

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI ANALISI E PROGETTAZIONE STRUTTURALE**

**CATTEDRA  
DI  
TECNICA DELLE COSTRUZIONI**



**TESI DI LAUREA**

**LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' SISMICA DEGLI  
EDIFICI IN C.A. ATTRAVERSO MODELLI TEORICI E  
SPERIMENTAZIONE AL VERO**

**RELATORE:**

**CH.MO PROF. ING. FEDERICO M. MAZZOLANI**

**CORRELATORI:**

**DR. ING. GAETANO DELLA CORTE**

**DR. ING. LUIGI FIORINO**

**CANDIDATA:**

**STEFANIA D'AMBROSIO**

**MATRICOLA:**

**49/174**

**ANNO ACCADEMICO 2003/2004**

LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' SISMICA DEGLI  
EDIFICI IN C.A. ATTRAVERSO MODELLI TEORICI E  
SPERIMENTAZIONE AL VERO

di

Stefania D'Ambrosio

Tesi presentata per la discussione del diploma  
di laurea in

Ingegneria per l'Ambiente e Territorio

Università degli studi di Napoli "Federico II"

2005

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Federico Massimo Mazzolani

Correlatori:

Dr. Ing. Gaetano Della Corte

Dr. Ing. Luigi Fiorino



*Ai miei genitori, a mio marito, a mio figlio,  
le persone più importanti della mia vita,  
con amore, stima e gratitudine*

# INDICE

|              |   |
|--------------|---|
| INTRODUZIONE | 1 |
|--------------|---|

## *CAPITOLO 1*

### CLASSIFICAZIONE E DEFINIZIONE DEI DISASTRI NATURALI E ANTROPICI

|         |                                                           |    |
|---------|-----------------------------------------------------------|----|
| 1.1     | INTRODUZIONE                                              | 5  |
| 1.2     | EVENTI GEOFISICI ESTREMI                                  | 6  |
| 1.2.1   | TERREMOTO                                                 | 6  |
| 1.2.1.1 | DEFINIZIONE                                               | 6  |
| 1.2.1.2 | CLASSIFICAZIONE DEI TERREMOTI                             | 6  |
| 1.2.1.3 | ONDE SISMICHE                                             | 10 |
| 1.2.1.4 | RISCHIO E PREVISIONE                                      | 11 |
| 1.2.2   | TSUNAMI-MAREMOTO                                          | 11 |
| 1.2.2.1 | DEFINIZIONE                                               | 11 |
| 1.2.2.2 | MECCANISMI DI GENERAZIONE E PROPAGAZIONE                  | 12 |
| 1.2.2.3 | CATALOGO DEI MAREMOTI                                     | 14 |
| 1.2.3   | ERUZIONI VULCANICHE                                       | 15 |
| 1.2.3.1 | FORMAZIONE DEI VULCANI E CAUSE DI SVILUPPO DELLE ERUZIONI | 15 |
| 1.2.3.2 | CLASSIFICAZIONE DEI VULCANI                               | 17 |
| 1.2.3.3 | FORME DI ERUZIONE E DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DEI VULCANI  | 19 |
| 1.2.3.4 | MATERIALE VULCANICO                                       | 20 |
| 1.2.4   | VALANGHE                                                  | 21 |
| 1.2.4.1 | DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE VALANGHE              | 21 |
| 1.2.5   | FRANE                                                     | 23 |

|         |                                               |    |
|---------|-----------------------------------------------|----|
| 1.2.5.1 | DEFINIZIONE                                   | 23 |
| 1.2.5.2 | CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE                   | 23 |
| 1.3     | CONDIZIONI METEOROLOGICHE ESTREME             | 25 |
| 1.3.1   | INONDAZIONI                                   | 25 |
| 1.3.1.1 | DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE                 | 25 |
| 1.3.1.2 | RISCHIO E PREVISIONE                          | 26 |
| 1.3.1.3 | CONTROLLO DELLE INONDAZIONI                   | 27 |
| 1.3.2   | TORNADO E URAGANI                             | 27 |
| 1.3.2.1 | FORMAZIONE E SVILUPPO DEI VENTI               | 27 |
| 1.3.2.2 | DEFINIZIONE E CARATTERISTICHE DEI TORNADO     | 29 |
| 1.3.2.3 | DEFINIZIONE E CARATTERISTICHE DEGLI URAGANI   | 29 |
| 1.3.2.4 | SISTEMI DI SORVEGLIANZA                       | 33 |
| 1.3.3   | TEMPESTE DI GRANDINE E TEMPORALI              | 33 |
| 1.4     | EVENTI ANTROPICI                              | 34 |
| 1.4.1   | ESPLOSIONI                                    | 34 |
| 1.4.1.1 | DEFINIZIONE E CAUSE                           | 34 |
| 1.4.2   | INCIDENTI TECNOLOGICI                         | 35 |
| 1.4.2.1 | DEFINIZIONE E CAUSE                           | 35 |
| 1.4.3   | CROLLI                                        | 36 |
| 1.4.3.1 | DEFINIZIONE E CAUSE                           | 36 |
| 1.4.4   | ATTI TERRORISTICI, CONFLITTI ARMATI           | 36 |
| 1.4.4.1 | DEFINIZIONE E CAUSE                           | 36 |
| 1.5     | STATISTICHE DEI DISASTRI NATURALI E ANTROPICI | 36 |
| 1.5.1   | CATASTROFI NATURALI                           | 37 |
| 1.5.2   | CATASTROFI ANTROPICHE                         | 39 |
| 1.5.3   | TENDENZE DEGLI ULTIMI ANNI                    | 40 |

## CAPITOLO 2

### RISCHIO SISMICO E METODI DI VALUTAZIONE

|         |                                                                                            |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1     | INTRODUZIONE                                                                               | 42 |
| 2.2     | PERICOLOSITA', ESPOSIZIONE, VULNERABILITA' E RISCHIO SISMICO: DEFINIZIONI E INTERRELAZIONI | 43 |
| 2.2.1   | ANALISI DI TIPO PROBABILISTICO E DI TIPO DETERMINISTICO                                    | 44 |
| 2.3     | L'UTILIZZO DEL GIS PER LA RAPPRESENTAZIONE E LA SIMULAZIONE DEL RISCHIO SISMICO            | 44 |
| 2.3.1   | CARATTERISTICHE DEL GIS                                                                    | 44 |
| 2.3.1.1 | ACQUISIZIONE DATI                                                                          | 45 |
| 2.3.1.2 | ELABORAZIONI                                                                               | 45 |
| 2.3.1.3 | RAPPRESENTAZIONI TEMATICHE                                                                 | 46 |
| 2.3.2   | UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL GIS IN ITALIA                                               | 46 |
| 2.3.2.1 | VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ                                                             | 47 |
| 2.3.2.2 | VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE                                                               | 48 |
| 2.3.2.3 | VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ                                                            | 49 |
| 2.3.2.4 | ANALISI DEL RISCHIO SISMICO                                                                | 50 |

## CAPITOLO 3

### VULNERABILITÀ SISMICA DEL COSTRUTTO ORDINARIO

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 INTRODUZIONE                                                                        | 52 |
| 3.2 METODOLOGIE DI ANALISI DI VULNERABILITÀ SISMICA                                     | 54 |
| 3.2.1 METODOLOGIA DI I E II LIVELLO DEL GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI    | 56 |
| 3.2.2 IL METODO HAZUS                                                                   | 63 |
| 3.2.3 IL METODO RISK-UE                                                                 | 67 |
| 3.2.3.1 MATRICE DI PROBABILITÀ DI DANNO DPM PER LE CLASSI DI VULNERABILITÀ DELLA EMS-98 | 74 |
| 3.2.3.2 CURVE DI VULNERABILITÀ ED INDICI DI VULNERABILITÀ SEMI-EMPIRICI                 | 77 |
| 3.2.3.3 DEFINIZIONE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ TIPOLOGICO                             | 79 |
| 3.2.3.4 FATTORI MODIFICATORI DI COMPORTAMENTO                                           | 81 |
| 3.3 ANALISI DI VULNERABILITÀ SU SCALA TERRITORIALE E LOCALE                             | 83 |
| 3.3.1 INDICE DI VULNERABILITÀ A SCALA TERRITORIALE                                      | 84 |
| 3.3.2 INDICE DI VULNERABILITÀ A SCALA LOCALE                                            | 86 |

## CAPITOLO 4

### VULNERABILITÀ DEGLI EDIFICI STORICI E MONUMENTALI

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 INTRODUZIONE                                                                                    | 92  |
| 4.2 DEFINIZIONE DEGLI EDIFICI STORICI E MONUMENTALI E CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA                    | 93  |
| 4.3 METODOLOGIE DI ANALISI                                                                          | 94  |
| 4.3.1 METODO DEL GNDT                                                                               | 94  |
| 4.3.1.1 SCHEDA PER IL RILIEVO DELLA VULNERABILITÀ E DEL DANNO SISMICO ALLE CHIESE                   | 95  |
| 4.3.1.2 CONSIDERAZIONI SULLA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA                                              | 102 |
| 4.3.1.3 CALCOLO DEGLI INDICI ED ANALISI DI VULNERABILITÀ                                            | 104 |
| 4.3.2 UN METODO INTEGRATO                                                                           | 105 |
| 4.3.2.1 L'UTILIZZO DELLA SCHEDA PER LA PREVENZIONE                                                  | 106 |
| 4.3.2.2 L'UTILIZZO DELLA SCHEDA IN EMERGENZA                                                        | 114 |
| 4.3.3 IL METODO RISK-UE                                                                             | 114 |
| 4.3.3.1 LIVELLO 1: SCHEDA DI INVENTARIO PER LA VALUTAZIONE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ             | 115 |
| 4.3.3.2 LIVELLO 2: DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI CAPACITÀ ATTRAVERSO MODELLI MECCANICI SEMPLIFICATI | 117 |
| 4.3.3.3 LIVELLO 3: DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI CAPACITÀ ATTRAVERSO MODELLI MECCANICI DETTAGLIATI  | 118 |

## CAPITOLO 5

### VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA ATTRAVERSO I MODELLI DI CAPACITÀ, DOMANDA E FRAGILITÀ

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 INTRODUZIONE                                                                                         | 120 |
| 6.2 VALUTAZIONE DEL DANNO                                                                                | 121 |
| 6.2.1 MODELLO DI CAPACITÀ                                                                                | 122 |
| 6.2.2 MODELLO DI DOMANDA                                                                                 | 125 |
| 6.3 METODOLOGIA ADOTTATA NEL RISK-UE                                                                     | 125 |
| 6.3.1 MODELLO DI CAPACITÀ E FRAGILITÀ                                                                    | 126 |
| 6.3.2 MODELLO DI DOMANDA                                                                                 | 131 |
| 6.3.2.1 RIDUZIONE DELLA RESISTENZA PER DUTTILITÀ DELLO SPETTRO DI<br>RICHIESTA AD                        | 131 |
| 6.3.3 PERFORMANCE POINT                                                                                  | 132 |
| 6.3.3.1 GENERAL FORM OF CAPACITY SPECTRA                                                                 | 133 |
| 6.3.3.2 BI-LINEAR REPRESENTATION OF CAPACITY SPECTRUM                                                    | 134 |
| 6.3.3.3 ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC REPRESENTATION OF CAPACITY SPECTRUM                                    | 135 |
| 6.3.4 CODE BASED APPROACH (CBA)                                                                          | 136 |
| 6.4 METODO PROPOSTO DALL'ATC40                                                                           | 137 |
| 6.4.1 CONVERSIONE DELLA CURVA DI CAPACITÀ                                                                | 138 |
| 6.4.1.1 RAPPRESENTAZIONE IN FORMA BI-LINEARE DELLO SPETTRO DI CAPACITÀ                                   | 140 |
| 6.4.2 STIMA DELLO SMORZAMENTO E RIDUZIONE DELLO SPETTRO ELASTICO                                         | 141 |
| 6.4.3 IL FATTORE DI COMPORTAMENTO K                                                                      | 142 |
| 6.4.4 I FATTORI DI RIDUZIONE                                                                             | 143 |
| 6.4.5 CALCOLO DEL PERFORMANCE POINT                                                                      | 144 |
| 6.5 ANALISI STATICA NON LINEARE SECONDO L'ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL<br>CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3274 | 146 |
| 6.5.1 DETERMINAZIONE LEGAME FORZA-SPOSTAMENTO GENERALIZZATO (CURVA DI<br>CAPACITÀ)                       | 146 |
| 6.5.1.1 PASSAGGIO AL SISTEMA SDOF EQUIVALENTE                                                            | 146 |
| 6.5.2 DETERMINAZIONE DELLO SPOSTAMENTO MASSIMO                                                           | 147 |

## CAPITOLO 6

### PROVA SPERIMENTALE AL VERO SU UN EDIFICIO IN C.A. CON TAMPONATURA

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 7.2 INTRODUZIONE               | 149 |
| 7.2 DESCRIZIONE DEL FABBRICATO | 150 |
| 7.2.1 CARICHI AGENTI           | 160 |
| 7.3 PROVA SPERIMENTALE         | 161 |
| 7.3.1 APPARATO DI PROVA        | 161 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 7.3.2 | PROTOCOLLO DI CARICO   | 161 |
| 7.3.3 | STRUMENTAZIONE         | 161 |
| 7.4   | RISULTATI SPERIMENTALI | 163 |

## *CAPITOLO 7*

### UN'APPLICAZIONE AGLI EDIFICI IN C.A. CON TAMPONATURA

|       |                                                                               |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1   | INTRODUZIONE                                                                  | 188 |
| 7.2   | CAPACITÀ SISMICA DELL'EDIFICIO IN OGGETTO                                     | 189 |
| 7.2.1 | IPOTESI                                                                       | 189 |
| 7.3   | ANALISI DELLA DOMANDA SISMICA                                                 | 191 |
| 7.4   | DEFINIZIONE DELLA PERFORMANCE                                                 | 193 |
| 7.4.1 | APPLICAZIONE DELL'OPCM 3274                                                   | 193 |
| 7.4.2 | APPLICAZIONE DELL'ATC40                                                       | 195 |
| 7.5   | RISULTATI SULLA VALUTAZIONE DELLA PERFORMANCE SISMICA                         | 198 |
| 7.5.1 | DEFINIZIONE DEGLI EFFETTI DI EVENTI SISMICI SULL'EDIFICIO OGGETTO<br>DISTUDIO | 201 |
| 7.6   | CURVE DI FRAGILITÀ                                                            | 203 |
| 7.6.1 | APPLICAZIONE AD UN CASO REALE                                                 | 203 |
| 7.7   | EFFETTI DELLA TAMPONATURA                                                     | 205 |

|             |     |
|-------------|-----|
| CONCLUSIONI | 207 |
|-------------|-----|

|              |     |
|--------------|-----|
| BIBLIOGRAFIA | 209 |
|--------------|-----|



## INTRODUZIONE

Il terremoto è un evento dannoso che ha spesso come conseguenza la distruzione o il grave danneggiamento di beni materiali e/o che comporta una sostanziale perdita di vite. Questo è certamente uno degli eventi dannosi generati dalle forze della natura più temuto dall'uomo per il gran numero di perdite di vite umane che esso provoca, in particolare, dalle statistiche dei disastri naturali e antropici si evince che è addirittura la principale causa di perdita di vite umane. Certamente l'entità di una catastrofe naturale non dipende solo dalla furia degli elementi, ma anche da fattori di rilevanza umana, quali ad esempio le tecniche di costruzione o la qualità delle misure di prevenzione nella regione interessata. Per questo motivo, per determinare l'impatto che i futuri terremoti potrebbero avere sulle costruzioni presenti in una determinata regione si fa riferimento alla valutazione del "rischio sismico" che richiede un'analisi separata di tre componenti di base: la "pericolosità", la "vulnerabilità", e l' "esposizione" la cui convoluzione definisce il rischio.

Nell'ambito di questo lavoro si è dato particolare rilievo all'analisi della vulnerabilità sismica che nel caso di un edificio è la sua suscettibilità ad essere danneggiato da un terremoto e può essere espressa *"dall'insieme delle probabilità di raggiungere una serie di livelli di danneggiamento fino al collasso, valutate in funzione dell'intensità del sisma e condizionate dal suo verificarsi"* (Augusti e Ciampoli, 1999). Di conseguenza la vulnerabilità di un edificio dovrebbe essere definita da una relazione probabilistica tra intensità e livello di danneggiamento, in termini operativi, un'analisi di vulnerabilità deve valutare il danno prodotto da terremoti di varia intensità. A tale scopo possono essere utilizzati diversi approcci che configurano un panorama abbastanza vario di metodologie di analisi della vulnerabilità sismica. Questi metodi di analisi possono essere classificati, in maniera più o meno completa, ora prendendo in considerazione l'approccio della metodologia, ora i dati utilizzati.

Tra i vari metodi di analisi attualmente in uso, si è scelto di analizzare gli aspetti principali della Metodologia di I e II livello del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT, 1994) per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito ordinario. Entrambi i livelli di questa metodologia sono metodi tipologici basati sull'analisi delle caratteristiche degli elementi costitutivi dell'edificio raccolte tramite delle schede. Anche la metodologia proposta nell'ambito del progetto europeo Risk-UE denominato "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns" è stata trattata in questo lavoro. Essa è organizzata in tre livelli: a) livello 1, basato solo su studi tipologici e su vulnerabilità osservate; b) livello 2, basato sulla definizione della capacità, della domanda e della prestazione dell'edificio che fa uso in parte degli studi tipologici ed in parte di modelli meccanici semplificati; c) livello 3, richiede la definizione di una modellazione di tutta la costruzione ed analisi numeriche dettagliate, non è adatto ad uno studio a scala territoriale.

Oltre ad esaminare i metodi di analisi della vulnerabilità del costruito ordinario, per completezza, sono state illustrate le metodologie di analisi della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali con particolare riferimento alle chiese.

La maggior parte del lavoro di tesi si è basato sul secondo livello del metodo proposto nell'ambito del progetto europeo Risk-UE. Tale metodologia si articola essenzialmente in tre fasi: individuazione tipologica dell'edificio; valutazione della performance sismica; definizione delle curve di fragilità. In questo lavoro si sono voluti ripercorrere i passi salienti di questa metodologia relativa alla valutazione della vulnerabilità degli edifici valutata, quindi, mediante l'utilizzo delle curve di capacità domanda e fragilità, con lo scopo di confrontare alcuni risultati ottenuti nell'ambito di questo progetto con i risultati ottenuti in una sperimentazione al collasso eseguita su un edificio reale in c.a.

La prova sperimentale presentata rientra in un programma di ricerca avente come obiettivo la valutazione dell'efficacia di diverse tecniche innovative di miglioramento/adequamento sismico. Gli edifici oggetto di questa ricerca, sono destinati ad essere demoliti nell'ambito della dismissione dell'ex area industriale di Bagnoli. Il gruppo di ricerca, coordinato dal prof. F.M. Mazzolani, ha quindi proposto di eseguire una demolizione intelligente, da cui l'acronimo del progetto di ricerca «ILVA Intelligent DEMolition» (ILVAIDEM), attraverso prove sperimentali a collasso su tali edifici (Mazzolani et al., 2004a, 2004b, 2004c; Della Corte et al., 2004).

La sperimentazione al collasso di costruzioni esistenti rappresenta senza dubbio una opportunità eccezionale perché la possibilità di effettuare una sperimentazione su un edificio esistente consente di superare tutte quelle limitazioni che una sperimentazione eseguita in laboratorio su modelli strutturali costruiti ad hoc, non riesce a superare. Questa sperimentazione, in particolare, ha portato l'edificio al collasso sotto azioni orizzontali nella sua configurazione originaria in modo tale da tenere in conto della presenza della tamponatura e di tutti gli altri elementi costruttivi (partizioni interne, rivestimenti, serramenti).

## MOTIVAZIONI

La necessità di una valutazione di intervento su fabbricati esistenti in zona sismica al fine di ridurre la vulnerabilità e quindi il rischio sismico ha indirizzato questo studio prima verso l'analisi delle metodologie esistenti sulla valutazione della vulnerabilità sismica ed in seguito sull'applicazione ad un caso reale. Essendo l'edificio oggetto della sperimentazione, inoltre, rappresentativo di una tipologia abbastanza ricorrente sul nostro territorio e cioè quella di edifici tamponati con doppia foderà e progettati con criteri sismici di basso livello o addirittura senza criteri sismici si è ritenuto importante valutarne il comportamento sismico, in generale, ed in particolare, il contributo della tamponatura.

## OBIETTIVI

Primo obiettivo della tesi è descrivere le metodologie applicabili per la valutazione della vulnerabilità degli edifici attraverso l'utilizzo delle curve di capacità, domanda e fragilità. Gli elementi chiave di un'analisi sismica in accordo alle più recenti metodologie sono: capacità, domanda, prestazione. La domanda è una rappresentazione degli spostamenti

e deformazioni richieste al moto sismico del terreno alla struttura. La capacità è l'abilità della struttura di resistere alla domanda sismica. La prestazione rappresenta la misura in cui la capacità assorbe la domanda; la struttura deve avere la capacità di resistere alla domanda sismica in modo che la prestazione sia compatibile con gli obiettivi di progetto.

La capacità è qui valutata sia mediante l'utilizzo dei risultati ottenuti attraverso la prova al collasso di un edificio in c.a con tamponatura sia mediante l'utilizzo di curve di capacità ottenute nell'ambito del progetto del Risk-UE. La performance, o prestazione, è analizzata con i metodi proposti dall'ATC40 (ATC40, 1996). e dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 (OPCM n.3274 del 20/03/2003 aggiornata al 15/01/2005). Si confrontano poi le metodologie per determinare quali tra queste è più cautelativa o se i risultati sono confrontabili.

Secondo obiettivo è la valutazione degli effetti della tamponatura sulla risposta strutturale di un edificio in c.a. La risposta sismica degli edifici può essere fortemente condizionata dalla tamponatura, ed il ruolo delle tamponature può rivelarsi fondamentale nelle costruzioni non progettate per dover resistere al sisma. Nel caso di studio qui trattato la tamponatura offre un importante contributo ai fini della resistenza al sisma e ciò porterebbe a tener conto anche degli elementi non strutturali in fase di progettazione di edifici per motivi economici.

## **ARTICOLAZIONE DELLA TESI**

Nel capitolo I si passano in rassegna le principali catastrofi naturali e antropiche, ovvero generate dall'uomo, descrivendo i parametri che li caratterizzano, le cause che li generano e le modalità con cui esse si evolvono per poi passare alla definizione dei principali danni che esse provocano in termini di vittime e danni economici. A valle di queste statistiche si è rilevato che il maggior numero di vittime è causato dai terremoti.

Nel capitolo II viene definito il rischio sismico e le interrelazioni esistenti tra pericolosità, vulnerabilità, ed esposizione e viene trattata l'analisi della vulnerabilità mediante uno strumento informatico che consente di archiviare, analizzare, rappresentare e interrogare dati geografici: il GIS (Sistema Geografico Informatizzato).

Nel capitolo III vengono analizzate alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito ordinario, vengono trattate le metodologie di I e II livello del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, il metodo Hazus, utilizzato negli Stati Uniti per la valutazione delle potenziali perdite provocate da terremoto, inondazioni e uragani ed infine la metodologia proposta nell'ambito del progetto europeo Risk-Ue denominato "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns" per la riduzione delle perdite provocate dal terremoto e per la generazione di piani d'azione per la mitigazione del rischio sismico.

Nel capitolo IV si trattano le stesse metodologie di analisi della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali con particolare riferimento alle chiese. In questo capitolo, dopo aver definito quali sono le costruzioni che si possono considerare storiche o monumentali si analizzano le metodologie speditive del GNDT e la proposta di

Lagomarsino (Lagomarsino et al., 2001) basate sull'utilizzo di schede di rilievo e sull'interpretazione dei meccanismi di collasso dei macroelementi costituenti la chiesa.

Nel capitolo V vengono illustrate le procedure analitiche per la valutazione del danno e quindi delle prestazioni degli edifici esistenti, in particolare, vengono esaminati i principali metodi di analisi non lineare come il metodo proposto nel Risk-UE, quello proposto nell'ATC40 ed il metodo degli spettri non lineari proposto dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274.

Nel capitolo VI si illustra la prova sperimentale eseguita su un edificio in c.a. con tamponatura destinato ad essere demolito nell'ambito della dismissione dell'ex area industriale di Bagnoli. L'edificio è stato provato a collasso sotto azioni orizzontali nella sua configurazione originaria in modo tale da tenere in conto della presenza della tamponatura e di tutti gli altri elementi costruttivi.

Nel capitolo VII si sono voluti ripercorrere i passi salienti della metodologia relativa alla valutazione della vulnerabilità degli edifici in accordo all'approccio definito nell'ambito del progetto Risk-UE per confrontare i risultati ottenuti nell'ambito con quelli ricavati dalla sperimentazione al vero eseguita sull'edificio in c.a. con tamponatura.

In conclusione sono riportati i più importanti risultati ottenuti nell'ambito di questa dissertazione.

## Capitolo 1

# CLASSIFICAZIONE E DEFINIZIONE DEI DISASTRI NATURALI E ANTROPICI

## 1.1 INTRODUZIONE

Una catastrofe è un evento dannoso che ha come conseguenza la distruzione o il grave danneggiamento di beni materiali e/o che comporta una sostanziale perdita di vite, feriti o gravi danni ambientali ad una parte o ad una intera comunità. Gli eventi dannosi generati dalle forze della natura vengono dette catastrofi naturali mentre quelli imputabili all'attività dell'uomo quali esplosioni, incidenti aerei, guerre ed altri, vengono definite catastrofi antropiche o man-made. Certamente l'entità di una catastrofe naturale non dipende solo dalla furia degli elementi, ma anche da fattori di rilevanza umana, quali ad esempio le tecniche di costruzione o la qualità delle misure di prevenzione nella regione interessata. Per alcuni di questi eventi quindi gli uomini sono i principali responsabili, molti altri eventi catastrofici invece sono causati da sconvolgimenti naturali in cui l'uomo spesso ne è indirettamente l'artefice, altri ancora invece sono da imputare esclusivamente a fenomeni naturali che sono più o meno dannosi per l'uomo in base alla regione nella quale si verificano. La scala non viene mai definita: le colate di fango di Sarno (centinaia di morti) e il Nevado del Ruiz (oltre 23000 morti) sono entrambi considerati disastri

Gli effetti degli eventi naturali estremi diventano considerevoli quando colpiscono zone densamente popolate o zone dove sono concentrate attività economiche o , in generale, dove il "valore esposto" è di notevole rilevanza.

E' possibile classificare i disastri naturali e/o antropici secondo lo schema riportato nella Figura 1.1.

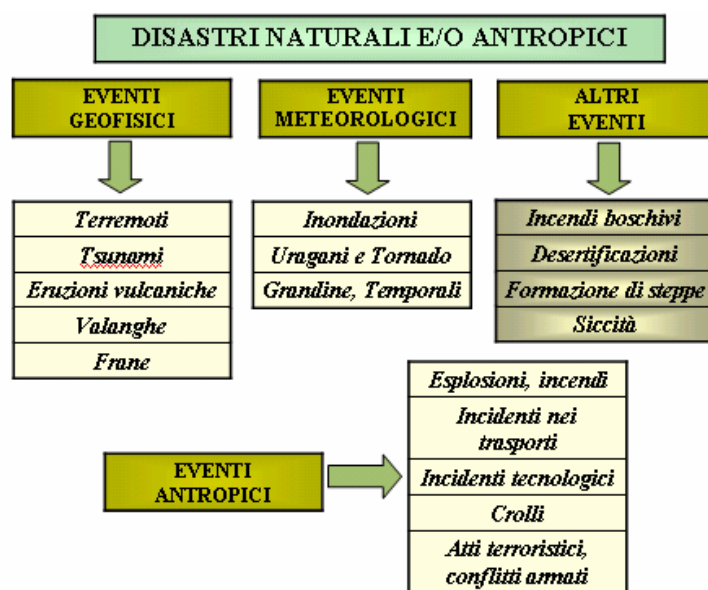


Figura 1.1: Schema di classificazione dei disastri naturali e/o antropici

Alcuni di questi, non avendo alcun impatto sulle strutture, come ad esempio gli incendi boschivi, la desertificazione, la formazione di steppe, le siccità, non saranno trattati in questo lavoro.

## 1.2 EVENTI GEOFISICI ESTREMI

### 1.2.1 Terremoti

#### 1.2.1.1 Definizione

Si definisce terremoto una scossa del terreno causata naturalmente, a seguito della frattura e dello slittamento di strati rocciosi all'interno della crosta terrestre. Questo fenomeno naturale è determinato dall'improvvisa rottura d'equilibrio delle tensioni agenti nelle stratificazioni terrestri, in zone caratterizzate da instabilità. Quando le tensioni, accumulate nelle zone instabili per una ragione qualsiasi (orogenesi, dislocazione degli strati, fenomeni chimico-fisici con brusco cambiamento di stato, ecc.), prevalgono bruscamente sulla resistenza del mezzo, generano fratture e scorrimenti. Contemporaneamente nel luogo di rottura si originano onde elastiche, longitudinali e trasversali, che si propagano in ogni direzione. Oltre che dall'intensità delle forze a cui si deve la rottura d'equilibrio, la possibilità di dislocazioni in superficie è legata alla profondità della zona dove la rottura si è determinata. A parità di altre condizioni, un terremoto è tanto più disastroso nella zona epicentrale, quanto meno è profondo. Con il crescere della profondità, gli spostamenti permanenti da esso provocati in superficie si fanno sempre più lievi, fino a scomparire.

Il terremoto, rispetto a tutte le altre catastrofi naturali è quello che determina il maggior numero di vittime, non solo per i danni che provoca lo scuotimento del terreno sugli edifici provocando crolli ma spesso dando origine ad altri fenomeni disastrosi come gli tsunami. Si riportano in Tabella 1.1 alcuni degli eventi più disastrosi che hanno provocato un grande numero di vittime.

#### 1.2.1.2 Classificazione dei terremoti

I terremoti possono essere classificati in accordo alle differenti cause che li generano in: terremoti tettonici, generati dall'improvviso scorrimento di grosse porzioni di litosfera, dette placche lungo un determinato piano chiamato "di faglia"; terremoti vulcanici che si presentano connessi alle eruzioni vulcaniche, sono generati dalla rottura di rocce a seguito della tensione termica dovuta all'intrusione di magma negli areoli vulcanici. Questi sono caratterizzati dalla loro localizzazione (profondità inferiore ai 10 km e intorno ai vulcani) e dalla loro energia; terremoti subsidenti che sono eventi localizzati causati dal collasso di caverne sotterranee.

L'entità di un terremoto è determinata dalle dimensioni della frattura, o faglia, che si apre nel terreno, e dal grado totale di scorrimento, o slittamento, che ne segue. Tanto più grandi sono la superficie della faglia e lo slittamento, tanto maggiore è l'energia prodotta durante il terremoto. Quest'energia, oltre a deformare la roccia nei pressi della faglia, causa la scossa che ha luogo al momento del terremoto e una serie di onde sismiche che si trasmettono attraverso la Terra. Mentre i terremoti più lievi sono causati da slittamenti di pochi centimetri su faglie lunghe solo decine o centinaia di

metri, un terremoto di notevoli dimensioni può comportare uno slittamento di metri su una faglia lunga centinaia di chilometri.

Tabella 1.1: Perdite umane per i maggiori terremoti in aree abitate

| Anno | Regione                           | Vittime  | Magnitudo |
|------|-----------------------------------|----------|-----------|
| 1556 | Cina (Shensi)                     | 830000   |           |
| 1737 | India (Calcutta)                  | 300000   |           |
| 1811 | US (Missouri, New Madrid)         | numerosa |           |
| 1819 | India (Kutch)                     | 1543     |           |
| 1906 | US (California, San Francisco)    | 700      | 8,3       |
| 1908 | Italia (Messina)                  | 120000   | 7,5       |
| 1920 | Cina (Kansu)                      | 180000   | 8,5       |
| 1923 | Giappone (Tokio, Yokohama)        | 143000   | 8,2       |
| 1960 | Cile del sud                      | 3000     | 8,5       |
| 1964 | Alaska                            | 131      | 8,6       |
| 1970 | (Cina)Yunnan                      | 10000    | 7,5       |
| 1970 | Perù                              | 66000    | 7,8       |
| 1976 | Guatemala                         | 23000    | 7,5       |
| 1976 | Cina (Tangshan)                   | 250000   | 7,6       |
| 1978 | Iran                              | 15000    | 7,8       |
| 1985 | Messico                           | 9500     | 8,1       |
| 1988 | Turchia                           | 25000    | 7,0       |
| 1989 | California (Santa Cruz Mountains) | 63       | 7,0       |
| 1989 | Australia (Newcastle)             | 13       | 5,6       |
| 1990 | Iran                              | 50000    | 7,7       |
| 1994 | California (Northridge)           | 56       | 6,9       |
| 1995 | Giappone (Kobe)                   | 5400     | 6,9       |
| 1999 | Turchia (Izmit)                   | 19118    | 7,4       |
| 1999 | Taiwan                            | 3400     | 7,6       |
| 1999 | Atene                             | 110      | 5,9       |
| 2001 | India                             | 15000    | 7,9       |

La scossa nel sito del terremoto ha luogo nel momento in cui avviene lo slittamento della faglia e solamente per la durata di questo processo, che va dai secondi a qualche minuto al massimo. Le onde sismiche generate dalla rottura continuano a propagarsi dopo che il movimento della faglia ha avuto termine, attraversando il globo per 20 minuti. E' solo nelle immediate vicinanze della faglia, intorno all'epicentro del terremoto, che queste vibrazioni sono sufficientemente potenti da poter causare dei danni. Le onde sismiche possono essere avvertite a grandi distanze dall'epicentro, e per questo motivo sono utili ai fini dello studio dei terremoti. I sismografi, gli strumenti che registrano queste onde, possono segnalare attività sismiche su ampie estensioni del globo, incluse regioni dove raramente possono essere effettuate misurazioni in loco. La registrazione dell'arrivo di onde P e S (pressione e scorrimento) effettuata dai sismografi può essere utilizzata per determinare l'epicentro, l'estensione e l'orientazione della faglia.

I sismologi fanno uso di diversi metodi per classificare l'entità dei terremoti. Uno di questi, quello cioè di ordinare i terremoti in base alla loro intensità sismica, pone

l'accento sugli effetti alle persone e alle cose attraverso la classificazione, su una scala ordinale, del grado di danneggiamento degli edifici e di altre strutture. La scala di questo tipo più comunemente usata è la **Mercalli** (Tab.1.2) modificata. Questa classificazione ordina i terremoti dal grado di intensità I (appena avvertito) al grado di intensità XII (distruzione totale). Poiché la distruzione causata dai terremoti dipende dalle tecniche di costruzione, dalle condizioni del suolo, dalla densità della popolazione nei pressi dell'epicentro, così come dal quantitativo totale di energia liberata dal terremoto, durante lo studio del processo del terremoto in sé non viene fatto uso di misurazioni di intensità. Vengono usate altre scale, basate su rilevazioni dell'energia, più attentamente controllate; quella più conosciuta è la scala di **Richter** del 1935, basata sull'ampiezza delle onde sismiche emesse dal terremoto. Egli pensò di definire come *magnitudo* il logaritmo dell'ampiezza massima di una scossa, registrata in una qualunque stazione sismica, confrontata con il logaritmo dell'ampiezza di una scossa campione, che un sismografo dello stesso tipo registra alla distanza epicentrale di 100 km. Lo zero della scala equivale ad una energia liberata pari a  $10^5$  Joule. Il massimo valore registrato, è stato di magnitudo 8.6 equivalente all'energia di  $10^{18}$  J. Partendo da questo principio, sono state dedotte relazioni opportune che consentono di trarre dalle registrazioni sismiche, la magnitudo dei terremoti che le hanno determinate.

Tabella 1.2: Scala Mercalli

| Grado | Scossa            | Descrizione                                                                                                                                                                                           |
|-------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I     | strumentale       | non avvertito                                                                                                                                                                                         |
| II    | leggerissima      | avvertito solo da poche persone in quiete, gli oggetti sospesi esilmente possono oscillare                                                                                                            |
| III   | leggera           | avvertito notevolmente da persone al chiuso, specie ai piani alti degli edifici; automobili ferme possono oscillare lievemente                                                                        |
| IV    | mediocre          | avvertito da molti all'interno di un edificio in ore diurne, all'aperto da pochi; di notte alcuni vengono destati; automobili ferme oscillano notevolmente                                            |
| V     | forte             | avvertito praticamente da tutti, molti destati nel sonno; crepe nei rivestimenti, oggetti rovesciati; a volte scuotimento di alberi e pali                                                            |
| VI    | molto forte       | avvertito da tutti, molti spaventati corrono all'aperto; spostamento di mobili pesanti, caduta di intonaco e danni ai comignoli; danni lievi                                                          |
| VII   | fortissima        | tutti fuggono all'aperto; danni trascurabili a edifici di buona progettazione e costruzione, da lievi a moderati per strutture ordinarie ben costruite; avvertito da persone alla guida di automobili |
| VIII  | rovinosa          | danni lievi a strutture antisismiche; crolli parziali in edifici ordinari; caduta di ciminiere, monumenti, colonne; ribaltamento di mobili pesanti; variazioni dell'acqua dei pozzi                   |
| IX    | disastrosa        | danni a strutture antisismiche; perdita di verticalità a strutture portanti ben progettate; edifici spostati rispetto alle fondazioni; fessurazione del suolo; rottura di cavi sotterranei            |
| X     | disastrosissima   | distruzione della maggior parte delle strutture in muratura; notevole fessurazione del suolo; rotaie piegate; frane notevoli in argini fluviali o ripidi pendii                                       |
| XI    | catastrofica      | poche strutture in muratura rimangono in piedi; distruzione di ponti; ampie fessure nel terreno; condutture sotterranee fuori uso; sprofondamenti e slittamenti del terreno in suoli molli            |
| XII   | grande catastrofe | danneggiamento totale; onde sulla superficie del suolo; distorsione delle linee di vista e di livello; oggetti lanciati in aria                                                                       |

I terremoti sono eventi comuni e riflettono il lento ma continuo movimento del materiale nella crosta terrestre. Quasi tutti avvengono vicino alla superficie terrestre, in



un guscio spesso 100 Km, relativamente fragile, chiamato litosfera. La litosfera è spezzettata in un numero di placche o zolle (da 12 a 15) che si muovono indipendentemente, in eterna collisione e sovrapposizione l'una con l'altra. I terremoti avvengono con maggior frequenza ai bordi di queste placche. Queste zone o fasce di intensa sismicità sono separate dalle porzioni centrali delle placche - i bacini oceanici e gli scudi continentali - relativamente inattive. Uno tra i bordi delle zolle, quello che delinea il margine della zolla del Pacifico, include aree estremamente popolate come il Giappone e la costa occidentale dell'America Settentrionale.

Mentre il calore e la grande pressione dell'interno della Terra permettono al materiale presente di scorrere uniformemente e plasticamente, il movimento delle zolle litosferiche ha luogo con sobbalzi sporadici. Grandi tensioni, accumulate all'interno delle placche per molti anni, vengono improvvisamente rilasciate quando queste superano la forza di rottura della roccia. La forma del margine della zolla, la velocità relativa delle placche adiacenti e il tipo di roccia, hanno tutti un'influenza decisiva sul carattere dei terremoti in una particolare regione.

La velocità relativa tra due zolle adiacenti è maggiore ai margini di due placche convergenti. La faglia tettonica trascorsa (thrust), che si sviluppa in queste zone di collisione fra placche, tende a immergersi, con piccoli angoli d'inclinazione, attraverso una litosfera relativamente spessa, formando un piano di faglia con un'area superficiale particolarmente estesa. La combinazione di un'alta velocità relativa con un esteso piano di faglia dà luogo a terremoti di entità notevole. I margini convergenti sono le zone di origine dei maggiori terremoti del mondo, molti dei quali sono di intensità superiore al grado 8,5 della scala di Richter. Le velocità relative delle zolle sono alte anche in corrispondenza dei margini delle placche a trasformazione, dove le zolle adiacenti scivolano una accanto all'altra. Le faglie trasformati che si formano su questi margini sono verticali e si sviluppano per corte distanze. Sebbene si possano verificare in queste zone anche terremoti di notevole intensità, in genere non sono al di sopra del grado 7,5 della scala di Richter.

I confini di placche divergenti sono la fonte di terremoti relativamente lievi. La litosfera che si viene riformando su queste zone di accrescimento della zolla è relativamente calda e sottile e permette solo la formazione di piccole faglie. Diversamente dalle faglie presenti sui margini convergenti o di trasformazione, che sono mosse direttamente dallo spostamento relativo delle due zolle, queste faglie, mosse principalmente dall'assestamento gravitazionale della superficie della placca appena formatasi, raramente danno luogo a terremoti che superino una magnitudo di 6,0 sulla scala di Richter.

Poiché i margini delle placche sono anche il luogo di ubicazione della maggior parte dei vulcani del mondo, i terremoti e i vulcani tendono a presentarsi nelle stesse zone, come nel caso della cintura di fuoco del Pacifico. La cartina in Figura 1.2 mostra come la maggiore concentrazione di zone contraddistinte da attività vulcanica intensa si trovi in corrispondenza dei margini delle zolle.

Le forze che stanno alla loro origine sono comunque diverse o correlate solo indirettamente.

I grandi terremoti avvengono solo raramente in contemporaneità con eruzioni vulcaniche, ma il movimento del magma all'interno di un vulcano in eruzione può causare fagliazioni e microsismi.

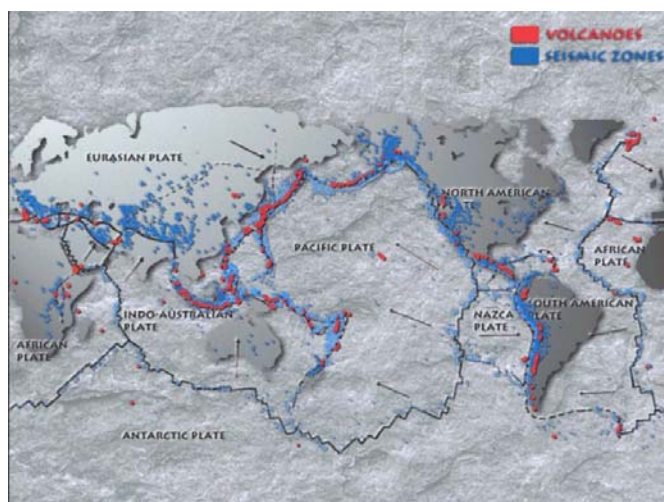


Figura 1.2: La cartina mostra come la maggiore concentrazione di zone contraddistinte da attività vulcanica intensa si trovi in corrispondenza dei margini delle zolle.

### 1.2.1.3 Onde sismiche

Dall'ipocentro di un terremoto si originano due tipi di onde sismiche: onde prime (P) e onde seconde (S). Esse vengono a volte chiamate anche "onde di volume" in quanto si propagano proprio all'interno del volume della roccia, la quale reagisce al loro passaggio comportandosi elasticamente cioè deformandosi e ritornando subito dopo alle condizioni iniziali di equilibrio.

Le onde P provocano nelle rocce attraversate sollecitazioni di compressione e dilatazione. Sono chiamate in questo modo perché sono le più veloci, raggiungendo una velocità compresa tra 4 e 8 Km al secondo. Per la loro natura possono propagarsi sia attraverso materiali rigidi, sia attraverso l'acqua e l'aria.

Le onde S provocano sulle rocce attraversate deformazioni di taglio in direzione perpendicolare a quella di propagazione e per tale motivo vengono chiamate anche onde trasversali o di taglio. Nelle registrazioni sismiche le onde S seguono sempre alle onde P perché la loro velocità è estremamente minore (da 2,3 a 4,5 Km. al secondo). La loro proprietà fondamentale è che non si possono propagare all'interno di mezzi fluidi. E' per questo che il loro passaggio è ostacolato dalle grandi masse di acqua degli oceani e all'interno della terra attraverso la porzione di nucleo liquido.

I percorsi delle onde di volume risultano alquanto complessi in quanto la loro velocità e la loro direzione si modifica ogni qualvolta attraversano livelli con differenti caratteristiche fisiche. Si generano così fenomeni di riflessione e rifrazione con il risultato che, in superficie, oltre ad arrivare delle onde dirette provenienti dall'ipocentro si registrano anche onde che hanno percorso un lungo tragitto attraverso i vari livelli della crosta.

In seguito alla nascita o alla riattivazione di una faglia si generano anche un'altro tipo di onde, dovute alla interazione delle onde P ed S con la superficie. Si tratta delle onde superficiali cioè onde che si propagano dall'epicentro lungo la superficie terrestre.

Sono riconoscibili sotto due distinti tipi che prendono il nome di onde di Love (L) e onde di Rayleigh (R). Le prime fanno muovere le particelle contenute all'interno della roccia trasversalmente alla loro direzione di propagazione e le seconde producono un movimento prevalentemente ellittico. I due tipi di onde si smorzano molto

rapidamente all'aumentare della profondità. Per registrarle opportunamente è comunque necessario che il sismografo si trovi ad una rilevante distanza dal punto di origine del terremoto.

#### 1.2.1.4 *Rischio e Previsione*

I terremoti sono fra le più mortali catastrofi naturali. La maggior parte delle vittime è causata dal crollo di case, ponti o altre strutture architettoniche. Sebbene gli edifici ubicati lungo una faglia possano essere distrutti, la maggior parte dei danni è causata dalle sole scosse, che possono abbattere costruzioni anche a grande distanza dalla faglia in movimento. E' stato calcolato che la forza di queste scosse si avvicina molto alla forza di gravità, durante quei pochi secondi per cui dura il terremoto.

I terremoti causano anche danni indiretti attraverso frane, incendi e crolli di dighe. Quelli che hanno luogo sotto o nei pressi dell'oceano possono inoltre causare ondate di marea, più propriamente chiamate maremoti o onde marine sismiche. Alte fino a 15 m, queste onde possono attraversare un oceano in poche ore, provocando notevoli danni anche sui litorali molto distanti dall'epicentro del terremoto.

Il mezzo più efficace per ridurre la portata delle distruzioni consiste in un programma di riduzione del rischio. Questo metodo riconosce l'inevitabilità dei terremoti e tenta di ridurre il loro effetto in aree densamente popolate. Ai due requisiti principali (capacità di riconoscere le zone ad alto rischio sismico e capacità di progettare strutture che siano in grado di resistere alle scosse) viene fatto fronte combinando insieme la moderna esplorazione geologica con la storia (attraverso la stesura di registrazioni della sismicità) e con lo sviluppo della scienza della sismologia e dell'ingegneria sismica. Vengono stesi regolamenti e ordinanze specifici per l'edilizia nelle zone sismiche, in modo da poter assicurare alle strutture delle zone soggette a terremoti di sopportare il quantitativo di scosse previsto.

Generalmente un terremoto è preceduto da accumulo di tensione e indebolimento della roccia; questi fattori sono misurabili e, se rilevati in tempo sufficiente, possono dare un segnale d'allarme. Nel periodo immediatamente precedente ad alcuni (non a tutti) terremoti sono stati osservati improvvisi abbassamenti del livello delle acque freatiche, rigonfiamenti o abbassamenti della superficie terrestre, cambiamenti della velocità di propagazione delle onde P e S, aumento di concentrazione di gas rari nelle acque freatiche e fenomeni geoelettrici.

Alcuni terremoti possono essere previsti in base alla nuova teoria dei vuoti sismici. Secondo quest'ipotesi certe faglie sono "mature" per un terremoto, in quanto lungo alcune di esse non vi sono state scosse sismiche per un periodo di 25-30 anni; appunto vi è un "vuoto sismico". Alcuni geologi credono che lungo un vuoto sismico le placche della Terra si comprimano l'una sull'altra in modo così forte da congiungersi. Ne consegue un enorme aumento della pressione che prima o poi verrà liberata con un terremoto di grandi dimensioni.

### 1.2.2 **Tsunami-Maremoto**

#### 1.2.2.1 *Definizione*

Uno tsunami è costituito da una serie di onde oceaniche generate solitamente (ma non solo) da terremoti il cui epicentro si trova sul fondale marino o nelle immediate

vicinanze e che, dopo aver percorso anche migliaia di chilometri attraversando interi oceani, si abbattono come giganteschi muri d'acqua sulle coste, distruggendo tutto ciò che incontrano sul loro cammino. Il termine è di origine giapponese può essere tradotto letteralmente come "onda del porto" e la ragione di tale nome appare in modo lampante proprio se consideriamo i terribili effetti che questo evento provoca sulle regioni costiere sulle quali si abbatte. Nel passato, talvolta, il termine è stato tradotto con "onde di marea", ma tale traduzione è fuorviante. E' certamente vero che la situazione di alta o bassa marea presente nel momento in cui uno tsunami colpisce può influenzare notevolmente la sua azione, ma si tratta di due fenomeni fisici ben distinti e assolutamente non correlati. Il verificarsi delle maree, inoltre, è un evento completamente prevedibile in quanto dipende dall'azione gravitazionale del nostro satellite, mentre uno tsunami non ha tempi prefissati e scadenze ben precise. A differenza di quanto si verifica per le maree, lo sviluppo di uno tsunami è caratterizzato da un tempo di preavviso molto limitato, e questo non fa che aumentare notevolmente la pericolosità della sua azione. Un altro termine (impiegato soprattutto nella comunità scientifica) con il quale ci si riferiva a questo fenomeno era quello di "onda sismica marina", ma anch'esso non è completamente corretto poichè quella sismica è solamente una delle possibili origini di uno tsunami. Anche la traduzione con il termine italiano di "maremoto" è, per analogo motivo, parzialmente fuorviante, come suggerisce l'etimologia stessa del termine che richiama espressamente ad un fenomeno di natura sismica. L'origine di uno tsunami non va, dunque, ricercata solamente in fenomeni sismici: in generale si può affermare che qualunque causa in grado di perturbare verticalmente una colonna d'acqua sufficientemente grande muovendola dalla sua posizione di equilibrio è in grado di originare uno tsunami; dunque possono a pieno titolo diventare causa di tsunami anche eruzioni vulcaniche, esplosioni, frane e movimenti tettonici sottomarini. A queste cause di origine terrestre ne va aggiunta anche una esterna, costituita dal possibile impatto con oggetti cosmici. Proprio per evitare le possibili inesattezze legate ai diversi termini impiegati per indicare il fenomeno è stato deciso, nel corso di un convegno scientifico internazionale tenutosi nel 1963, di introdurre la parola giapponese "tsunami" quale denominazione ufficiale.

#### 1.2.2.2 *Meccanismi di generazione e propagazione*

Uno tsunami è profondamente differente dal comune moto ondoso che ha la sua origine nell'azione dei venti in mare aperto. Nel classico moto ondoso le onde sono caratterizzate da un periodo (intervallo di tempo tra due onde successive) solitamente di 5-20 secondi e da una lunghezza d'onda (distanza tra due creste successive) di circa 100-200 metri; le onde di uno tsunami, invece, hanno un periodo dell'ordine di un'ora e una lunghezza d'onda che può raggiungere anche il valore di alcune centinaia di km. Ma i parametri fisici che più di ogni altro caratterizzano le onde di uno tsunami (chiamate anche "shallow-water waves" - onde d'acqua bassa - in quanto la loro lunghezza d'onda è di gran lunga maggiore della profondità dell'acqua in cui si sviluppano) sono la loro modesta ampiezza (altezza rispetto al piano medio della superficie marina) e l'elevata velocità con la quale si propagano in mare aperto. La velocità  $v$  di propagazione delle "shallow-water waves" è data dalla formula:

$$v = \sqrt{g * d} \quad (1.1)$$

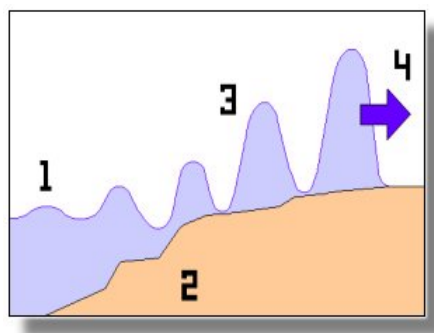
in cui  $d$  è la profondità dell'acqua in quel punto e  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $9.8 \text{ m/sec}^2$ ). Un semplice calcolo impiegando questa formula ci permette di trovare che,

per esempio, in un oceano caratterizzato da una profondità di 4000 metri (quale può essere l'Oceano Pacifico) un'onda di tsunami si può propagare alla velocità di oltre 710 km/h. Si diceva che il secondo aspetto che caratterizza queste onde è la loro ridotta ampiezza, il cui valore è tipicamente dell'ordine di un metro. Questa particolarità fa sì che esse risultino praticamente "invisibili" per qualsiasi imbarcazione che le incroci in mare aperto.

L'estrema pericolosità di questo fenomeno può essere meglio compresa introducendo alcune considerazioni riguardanti l'energia trasportata dal moto ondoso. Il tasso di perdita di energia di un'onda è strettamente correlato all'inverso della sua lunghezza d'onda e questo comporta che la propagazione di un'onda di tsunami avvenga con piccolissime dispersioni, dunque il treno d'onde può percorrere lunghissime distanze mantenendo praticamente inalterato il suo carico energetico. E sono proprio l'elevatissimo contenuto energetico delle onde e l'ineluttabilità della legge di conservazione dell'energia che trasformano queste onde da piccoli e quasi impercettibili movimenti della superficie marina in mare aperto a gigantesche calamità naturali nel momento in cui si abbattono violentemente sulle coste. Tutto dipende ancora dalla relazione tra la velocità e la profondità dell'acqua vista prima. Avvicinandosi alle coste diminuisce la profondità del mare e dunque anche la velocità delle onde si riduce, ma questo comporta che, dovendo per necessità fisica rimanere costante l'energia, debba aumentare l'ampiezza del moto ondoso, cioè l'altezza delle onde. La massima altezza cui può giungere un'onda di tsunami viene indicata con il termine inglese di "run-up" ed il suo valore è mediamente circa dieci volte maggiore dell'altezza dell'onda che lo ha originato, ma è evidente che tutto è legato all'andamento del profilo batimetrico. Molta importanza nel limitare gli effetti devastanti di uno tsunami hanno, infine, la morfologia della costa e la configurazione del terreno (liscio o rugoso, ricco o privo di alberi), elementi in grado di rallentare o meno l'impeto dell'acqua che tende ad addentrarsi nella terraferma anche per centinaia di metri (Fig. 1.3). Vi è anche la possibilità che uno tsunami non si manifesti subito come la classica gigantesca onda che si abbatte sulla costa, ma come un improvviso fenomeno di bassa marea, un repentino ritirarsi delle acque fino a lasciare scoperto il fondale marino per decine di metri prima che, una dopo l'altra, le numerose ondate che costituiscono lo tsunami si abbattano con gigantesca violenza ed elevata velocità su chi, incautamente, si è attardato ad osservare lo strano fenomeno. L'entità finale dell'evento è, evidentemente, legata in modo molto stretto all'energia trasmessa all'oceano dall'evento scatenante: nel caso di terremoto, ad esempio, sarà la sua magnitudine a determinare l'ampiezza iniziale del moto ondoso. Ma hanno la loro importanza anche altre caratteristiche quali la rapidità delle deformazioni del fondo marino, il profilo batimetrico e la profondità del mare nella zona dell'epicentro. Nella figura viene illustrato in modo schematico il fenomeno dello tsunami: l'immagine, naturalmente, è solamente indicativa e dunque non ha alcuna pretesa di mostrare i fenomeni ondosi in scala. L'intento è quello di descrivere la situazione che si viene a creare allorché un'onda di tsunami proveniente dal mare aperto si avvicina alla costa, si innesca il fenomeno del run-up ed una montagna d'acqua si abbatte violentemente sulla regione costiera (Fig. 1.4).



Figura 1.3 : Una vista tridimensionale delle fasi finali di uno tsunami.



*In mare aperto (1) l'onda è caratterizzata da una limitata ampiezza.  
Al diminuire della profondità del fondale (2) si innesca il fenomeno del runup (3) ed il muro d'acqua si riversa sulla costa (4) spingendosi nell'entroterra.*

Figura 1.4: Fenomeno del run-up

### 1.2.2.3 Catalogo dei maremoti

Negli ultimi 50 anni la ricerca sui maremoti si è evoluta a gradini alternando periodi di grande interesse ad altri di moderata attenzione o addirittura nulla. Durante ogni fase di maggiore interesse nei confronti dell'argomento, solitamente a seguito del verificarsi di un maremoto rilevante, si è di solito avuta la compilazione di un nuovo catalogo dei maremoti. La disponibilità di un catalogo dei maremoti è uno strumento essenziale per calcolare il potenziale tsunamigenico di una regione e per determinare il grado di hazard e rischio cui possono essere esposti i diversi tratti di costa. Essi possono essere un'inesprimibile base di partenza per definire le aree sorgenti di maremoti, per la comprensione dei meccanismi di generazione e di propagazione dei maremoti stessi e, soprattutto, per la comprensione degli effetti prodotti dal maremoto sulle coste.

Nell'ambito di un progetto dell'Unione Europea denominato GITEC (Genesis and Impact of Tsunamis on the European Coasts), che si è svolto dal 1992 al 1996, coinvolgendo specialisti di sei paesi europei, è stato prodotto un catalogo unificato in forma di "data base" digitale, attualmente in fase di pubblicazione, del quale la parte riguardante le coste italiane è già stata invece pubblicata.

Il database dei maremoti italiani è strutturato in tre sezioni, denominate Quick-Look Table (QLT), Quick-Look Accounts File (QLAF) e References File (RF).

La QLT è una tabella (Tab.1.3) in cui ad ogni evento corrisponde una singola riga, composta da 20 campi, nei quali sono riportate le seguenti informazioni:

1) *Codice*, un numero intero che identifica in modo univoco l'evento in ogni sezione del catalogo.

- 2)-6) *Data evento* che comprende anno, mese, giorno, ora, minuti, secondi in cui si è verificato l'evento che ha originato il maremoto (terremoto, eruzione vulcanica, ecc.).
- 7) *Regione*, cioè un codice che individua l'area geografica europea.
- 8) *Sottoregione*, è l'area geografica in cui l'evento è stato originato.
- 9) *Descrizione*, ossia una breve stringa di testo che riporta i fenomeni più rilevanti, con particolare attenzione ai ritiri delle acque e alle inondazioni, specificando le più importanti aree colpite.
- 10) *Attendibilità evento*, un numero compreso tra 0 e 4 , che corrisponde a classi di probabilità crescente che l'evento sia uno tsunami. ( 0=maremoto molto improbabile, 1=maremoto improbabile, 2=maremoto dubbio, 3=probabile maremoto, 4=maremoto certo.).
- 11) *Causa*, è un codice di due lettere che specifica la causa dell'evento generante e, più precisamente: EA=sisma a terra; ER=sisma in mare; EL=frana in terra; ES=frana sottomarina; VA=eruzione vulcanica a terra; VO=eruzione vulcanica sottomarina; GL=frana subaerea; GS=frana sottomarina.
- 12-13) *Coordinate evento*, sono le coordinate geografiche dell'evento che ha causato il maremoto.
- 14) *Intensità macrosismica*, ossia la massima intensità attribuita al sisma, sulla base della scala Percalli-Cancani-Sieberg in XII gradi, specificata solamente quando la causa è un terremoto.
- 15) *Magnitudo terremoto*, cioè la magnitudo Richter del sisma generante.
- 16) *Profondità focale* del sisma generante.
- 17) *VEI*, ossia Volcanic Explosivity Index, un valore rappresentativo dell'entità dell'eruzione vulcanica generante, sulla scala proposta da Simkin (1981).
- 18) *Runup*, cioè la massima altezza (in cm) raggiunta dall'onda di maremoto sulla costa.
- 19) *Tsu-int*, ossia l'intensità del maremoto, sulla base della scala proposta da Ambraseys (1962), divisa in 6 gradi, che misura l'entità del maremoto in base agli effetti prodotti sulle persone, sull'ambiente e sulle strutture.
- 20) *Revisione*, cioè l'indicazione se l'evento è stato riesaminato in dettaglio dagli autori in catalogo.

La tabella QLT completa, i cui campi sono appena stati descritti, è di seguito riportata.

La sezione QLAF è una parte nella quale vengono date descrizioni più dettagliate sul maremoto, con tutti i relativi riferimenti bibliografici. La sezione RF è la lista completa di tutti i riferimenti bibliografici citati nelle altre sezioni.

### 1.2.3 Eruzioni vulcaniche

#### 1.2.3.1 Formazione dei vulcani e cause di sviluppo delle eruzioni

I vulcani si sviluppano per la fuoriuscita e l'accumulazione sulla superficie terrestre del magma proveniente dal mantello. L'edificio vulcanico è formato da strati successivi di lava e di cenere depositati durante le eruzioni precedenti. Il magma si accumula in una camera o serbatoio magmatico situato in profondità, collegato con la superficie da un condotto attraverso il quale il magma risale verso il cratere.

Tabella 1.3: Catalogo dei maremoti italiani

| codice | anno | mese | giorno | ora | min. | sec. | regione | sottoregione          | descrizione                                     | att. evento | causa | coord_n | coord_e | int. macr. | magnitudo sisma | prof. focale | VEI | runup | tsu.int | rev. |
|--------|------|------|--------|-----|------|------|---------|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------|-------|---------|---------|------------|-----------------|--------------|-----|-------|---------|------|
| 3      | 1112 | 6    | 20     |     |      |      | M2      | Campania              | Ritiro di 200 piedi                             | 0           |       |         |         |            |                 |              |     |       |         | SI   |
| 4      | 1169 | 2    | 4      |     |      |      | M2      | Stretto di Messina    | Inondazione e distruzioni a Messina             | 3           | ER    | 37 24   | 15 06   | 11.00      | 6.08            |              |     |       | 4       | SI   |
| 7      | 1329 | 6    | 28     |     |      |      | M2      | Sicilia Orientale     | Barche trascinate in mare a Mascali             | 0           | VA    | 37 44   | 15 00   |            |                 |              | 1   |       |         | SI   |
| 12     | 1511 | 3    | 26     | 14  | 30   |      | M2      | Nord Adriatico        | Forte innalzamento del livello marino a Trieste | 3           | EA    | 46 16   | 13 09   | 10.00      | 6.01            |              |     |       | 2       | SI   |
| 14     | 1564 | 7    | 20     | 18  | 30   |      | M2      | Liguria-Costa Azzurra | Inondazione ad Antibes                          | 4           | EA    | 44 00   | 7 20    | 10.00      | 6.02            |              |     |       | 3       | SI   |
| 15     | 1613 | 8    | 25     | 4   | 30   |      | M2      | Stretto di Messina    | Inondazione a Naso                              | 2           | EA    | 38 08   | 14 48   | 9.00       | 5.06            |              |     |       |         | SI   |
| 17     | 1627 | 7    | 30     | 11  |      |      | M2      | Gargano               | Ritiro considerevole ed inondazione             | 4           | EA    | 41 48   | 15 12   | 11.00      | 6.03            |              |     |       | 5       | SI   |
| 18     | 1631 | 12   | 17     | 9   |      |      | M2      | Campania              | Ritiro nel Golfo di Napoli                      | 4           | VA    | 40 49   | 14 26   |            |                 |              | 4   |       | 3       | SI   |
| 19     | 1638 | 3    | 27     | 15  | 5    |      | M2      | Calabria Tirrenica    | Ritiro del mare di 2 miglia a Pizzo Calabro     | 2           | EA    | 39 08   | 16 15   | 11.00      | 7.01            |              |     |       |         | SI   |
| 20     | 1646 | 4    | 5      | 22  |      |      | M2      | Toscana               | Aumento del livello marino a Livorno            | 4           | EA    | 43 33   | 10 18   | 7.00       | 3.06            |              |     |       | 3       | SI   |
| 22     | 1649 | 1    |        |     |      |      | M2      | Stretto di Messina    | Naufragio nel porto di Messina                  | 0           | EA    | 38 10   | 15 33   | 8.00       |                 |              |     |       |         | SI   |
| 23     | 1672 | 4    | 14     | 16  | 15   |      | M2      | Adriatico Centrale    | Ritiro ed inondazione a Rimini                  | 4           | ER    | 44 04   | 12 34   | 9.00       | 5.07            |              |     |       | 2       | SI   |
| 24     | 1693 | 1    | 9      | 21  |      |      | M2      | Sicilia Orientale     | Movimento anomalo del mare                      | 0           | ER    | 37 20   | 15 10   | 8.05       | 6.00            |              |     |       |         | SI   |
| 25     | 1693 | 1    | 11     | 13  |      |      | M2      | Sicilia Orientale     | Ritiro considerevole ed inondazione             | 4           | ER    | 37 25   | 15 10   | 11.00      | 6.08            |              |     |       | 4       | SI   |
| 27     | 1698 | 5    | 14     | 10  |      |      | M2      | Campania              | Ritiro nel Golfo di Napoli                      | 2           | VA    | 40 49   | 14 26   |            |                 |              | 3   |       |         | SI   |
| 28     | 1703 | 5    | 1      |     |      |      | M2      | Liguria-Costa Azzurra | Ritiro nel Golfo di Genova                      | 2           | ER    | 44 24   | 8 55    | 4.00       | 3.02            |              |     |       |         | SI   |
| 296    | 1703 | 2    | 2      | 10  |      |      | M2      | Lazio                 | Ritiro alla foce del Tevere                     | 0           | EA    | 42 27   | 13 20   | 10.05      |                 |              |     |       |         | SI   |
| 29     | 1714 | 6    | 30     |     |      |      | M2      | Campania              | Ritiro nel Golfo di Napoli                      | 0           | VA    | 40 49   | 14 26   |            |                 |              | 2   |       |         | SI   |
| 31     | 1726 | 9    | 1      | 21  | 10   |      | M2      | Nord Sicilia          | Ritiro a Palermo                                | 4           | EA    | 38 06   | 13 22   | 9.00       | 5.08            |              |     |       | 2       | SI   |
| 401    | 1727 | 7    | 4      |     |      |      | M2      | Canale di Sicilia     | Ritiro a Sciacca                                | 2           | ER    | 37 30   | 13 04   | 7.00       |                 |              |     |       |         | SI   |
| 33     | 1731 | 3    | 20     | 3   | 15   |      | M2      | Gargano               | Aumento del livello marino a Siponto e Barletta | 2           | EA    | 41 27   | 15 33   | 10.00      | 6.03            |              |     |       |         | SI   |
| 34     | 1742 | 1    | 19     | 16  | 30   |      | M2      | Toscana               | Oscillazioni del mare nel porto di Livorno      | 4           | ER    | 43 33   | 10 18   | 5.05       | 4.00            |              |     |       | 2       | SI   |



Un'eruzione vulcanica è dovuta alla pressione della lava e del gas che rompe la crosta indurita e fuoriesce attraverso il camino principale e quelli laterali. Una eruzione si accompagna a fumo, gas tossici e cenere, la lava cola e forma degli strati che si induriscono quando si raffredda. La lava può fuoriuscire come liquido viscoso o può esplodere dalla bocca come particelle solide o liquide.

L'emissione di magma presuppone che il materiale sia soggetto ad una pressione. Il magma è costituito da una miscela di numerose sostanze, le più abbondanti sono i silicati e l'acqua, la cui tensione di vapore varia considerevolmente con la temperatura del magma. Quando nel bacino magmatico la temperatura scende sotto i 1200°C, la tensione di vapore aumenta e si libera una quantità di gas sufficiente a mettere in pressione il magma, così da farlo risalire lungo il condotto vulcanico: ne deriva una eruzione che cesserà solo quando il materiale eruttato avrà consentito alla pressione nella camera magmatica di ridiscendere a valori più bassi.

#### 1.2.3.2 *Classificazione dei vulcani*

La classica forma del vulcano è quella di un cono simmetrico capovolto con un profondo cratere aperto alla sommità. Ci sono diversi tipi di vulcani che possono essere classificati secondo le modalità con cui eruttano.

Le dimensioni del cono vulcanico dipendono ovviamente dalla quantità di magma eruttato, mentre la ripidità delle pareti dipende da varie circostanze, la più importante delle quali è il tipo di materiale eruttato.

I magmi più fluidi, a causa di un basso contenuto di acido silicico, sono eruttati in modo non esplosivo e scendono dalla bocca formando i vulcani a scudo a pendenza dolce (nome derivato dalla somiglianza con gli scudi dei primi guerrieri germanici). Le colate laviche di questo tipo di vulcani hanno, di solito, solo uno spessore di 1-10 m, ma si estendono a grande distanza dalla bocca vulcanica. I vulcani delle Hawaii e dell'Islanda sono tipici esempi di vulcani a scudo.

I magmi con alto contenuto gassoso e ad alta viscosità sono, di solito, più esplosivi di quelli che fuoriescono dai vulcani a scudo. Questi magmi ricchi di gas sono, in molti casi, proiettati in aria durante un'eruzione. Il magma, che ricade sotto forma di bombe vulcaniche, si accumula intorno alla bocca e forma coni di cenere a fianchi ripidi, ma relativamente piccoli. Le dimensioni delle bombe vulcaniche possono variare: da quelle della cenere a grana fine fino a quelle di blocchi grandi come case. Nella grande maggioranza i coni di cenere sono formati da frammenti vulcanici che hanno diametro inferiore a 3 cm, dalle ceneri e dai piccoli ciottoli.

La maggior parte dei vulcani più grandi sono vulcani compositi (stratovulcani) (Fig.1.5). Questi si formano per effusioni di lava fluida, seguite da eruzioni di lava viscosa. La lava fluida crea un rivestimento, resistente all'erosione, sopra il detrito dovuto all'esplosione e forma coni vulcanici con fianchi a gradino e resistenti.

L'altopiano di lava basaltica (Fig.1.6) si forma in maniera simile a quello a scudo, qui la lava viene eruttata attraverso le fessure della superficie e si estende su un'area di diverse centinaia di chilometri quadrati. Generalmente diversi strati di lava si accumulano uno sull'altro ciascuno dello spessore di 5-15 cm. L'altopiano di basalto può cambiare totalmente la morfologia del territorio circostante.

Nel passato si sono verificate sulla Terra grandi eruzioni di lava, estremamente fluida, da estesi sistemi di fessure. Queste serie di eruzioni formarono vasti plateau di lava

basaltica. Il plateau del Deccan, in India, si estende per 260.000 Km<sup>2</sup> e quello Columbia nell'Oregon (USA) si estende all'incirca per 130.000 Km<sup>2</sup>. Durante il periodo storico non sono mai state osservate eruzioni così vaste. Tuttavia nelle dorsali medio oceaniche si formano attualmente accumuli di lava basaltica anche più grandi.

Se il magma è molto viscoso, in rapporto al suo alto contenuto di acido silicico, questo non riesce ad essere espulso e quindi in questo caso si ha una eruzione esplosiva che fa fuoriuscire materiale sciolto come la pomice, ceneri vulcaniche e grumi di lava. Eruzioni di questo tipo possono seppellire intere distese di terreno sotto le macerie vulcaniche. Questo tipo di vulcano tende ad essere più piatto.

Alcune esplosioni distruggono completamente la sommità del vulcano dando origine ad un cratere molto ampio, vulcani di questo tipo vengono detti “a caldera” (Fig.1.7). Una caldera può anche formarsi quando la camera magmatica crolla su se stessa, ciò accade quando, dopo una grossa eruzione, una enorme quantità di magma è fuoriuscita, lasciando vuota la camera magmatica: la sommità del cratere crolla sotto il proprio peso. La caldera può avere un diametro fino a 20 km e un cratere profondo 1000 m.

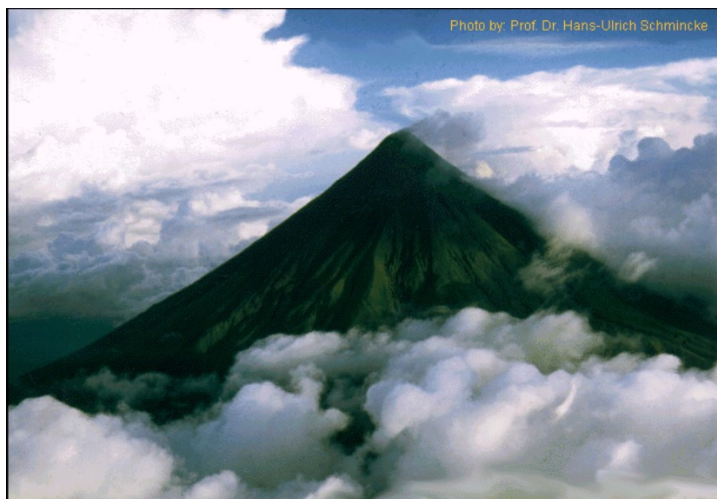


Figura 1.5: Stratovulcano



Figura 1.6: Altopiano basaltico



Figura 1.7: Vulcano a caldera

### 1.2.3.3 Forme di eruzione e distribuzione geografica dei vulcani

Un vulcano può mostrare differenti forme di eruzione in tempi diversi e le eruzioni possono subire trasformazioni mentre sono in corso. L'eruzione meno violenta è denominata del tipo *hawaiano* ed è caratterizzata da colate laviche estese provenienti dalla bocca centrale, o da altre fessure, e, occasionalmente, accompagnate da fontane di lava. Le eruzioni di tipo *stromboliano* sono caratterizzate da colate laviche moderatamente fluide, di solito accompagnate da violente fontane di lava che producono una grande quantità di bombe vulcaniche e di ceneri. Le eruzioni di tipo *vulcaniano* sono caratterizzate da magmi viscosi che formano spesse e corte colate attorno alle bocche; pezzi di lava molto viscosa o solida vengono eruttati con violenza da queste bocche. Le eruzioni di tipo *peleano* sono simili a quelle di tipo vulcaniano, ma hanno una lava ancora più viscosa; sopra le bocche si formano duomi e la formazione del duomo è accompagnata, comunemente, da colate di cenere. Le eruzioni più violente, sono chiamate di tipo *pliniano*, da Plinio il Vecchio, che morì nell'eruzione del Vesuvio del 79 d.C. Nelle eruzioni di tipo pliniano si ha una violenta espulsione di grandi quantità di ceneri, seguita dal crollo della parete centrale del vulcano, con la formazione di una caldera di collasso.

La maggior parte dei vulcani si trova lungo i bordi delle zolle crostali. La maggiore quantità di materiale vulcanico si forma nei centri di spandimento fra le zolle, come la dorsale medio-atlantica. Queste dorsali medio-oceaniche hanno, di solito, una composizione basaltica e vi si verificano eruzioni calme sul fondo oceanico. I vulcani che si formano sopra le zone di subduzione, nelle regioni dove le zolle convergono, possono essere di tipo esplosivo molto violento.

Lungo i bordi dei continenti si sono formate catene vulcaniche come quella delle Ande. Le collisioni di crosta oceanica, dal canto loro, producono archi insulari come quello delle Antille, delle Aleutine e delle isole giapponesi. Oltre che in queste aree ai bordi delle zolle, i vulcani si formano anche negli hot spots (punti caldi) dentro una zolla, come nel caso delle Hawaii e del campo vulcanico di Yellowstone, negli USA.

#### 1.2.3.4 Materiale vulcanico

Il magma è un complesso miscuglio di cristalli, frammenti di roccia, liquidi, gas, che si trova nelle viscere della Terra. E' la forma originaria delle rocce ignee e può intrudersi nelle rocce incassanti o effondere alla superficie. Benché non sia mai stato osservato direttamente, l'esistenza del magma e la sua composizione vengono desunte dai materiali vulcanici, come la lava e i vetri vulcanici naturali, e dalle rocce che sono presumibilmente cristallizzate da un fuso in profondità. Con gli studi sperimentali su fusi artificiali i geologi tentano di stabilire le condizioni fisiche, l'aspetto, la composizione chimica, l'evoluzione, l'origine e le cause della formazione del magma.

La causa ultima della formazione del magma è il calore interno della Terra, che si origina sia dal decadimento di materiale radioattivo che dal calore residuo della formazione stessa del pianeta. I magmi possono formarsi a diverse profondità; la fusione comincia non appena temperatura e pressione giungono ai valori del punto di fusione di qualche componente. Se queste condizioni si mantengono, la porzione fusa aumenta. Quando un fuso migra in zone più fredde o con pressioni diverse, può cominciare a cristallizzare.

L'ordine con il quale i diversi minerali fondono e cristallizzano in un magma di una certa composizione dipende dalla temperatura e dalla pressione locali. Un singolo tipo di magma può così produrre diversi tipi di roccia a diversi livelli all'interno della Terra. Quando i cristalli si separano da un fuso possono galleggiare o affondare, a seconda delle densità relative. La segregazione dei cristalli produce variazioni chimico-fisiche nel fuso rimanente. Se il liquido è viscoso, la diffusione dei suoi componenti può essere molto lenta o incompleta.

Quando la massa viscosa di rocce ignee, il magma, fuoriesce dall'interno sulla superficie terrestre, è chiamata lava. Una volta in superficie la lava comincia a raffreddarsi formando una superficie dura, appena il gas viene rilasciato. Più è alto il contenuto di acido silicico nella lava e più è bassa la sua viscosità. Il processo di raffreddamento produce basalto, caratteristica formazione rocciosa che si trova spesso nelle zone vulcaniche, utilizzato come materiale da costruzione per la sua resistenza.

Il materiale piroclastico che accompagna la lava durante le eruzioni vulcaniche è di varie dimensioni come ad esempio la cenere ed i lapilli. I frammenti incandescenti, durante l'esplosione, ruotano nell'aria, questo movimento rotatorio genera delle spirali. I depositi compatti costituiti da questo materiale sono chiamati tufi e si caratterizzano per la loro porosità.

I componenti dei depositi di tufo sono chiamati in modo differente a seconda delle dimensioni dei grani:

i lapilli sono frammenti molto piccoli, delle dimensioni di noccioline;

i blocchi sono dei grandi frammenti spigolosi di roccia vulcanica;

le bombe sono grandi pezzi di roccia rotonde o a forma di spirale.

Se un tufo è costituito fondamentalmente da cenere, si può formare un deposito spesso qualche metro che ricopre l'intero territorio. Quando questo tipo di tufo diventa compatto col tempo è chiamato "roccia tufacea".

Quando la lava a bassa viscosità subisce un rapido raffreddamento si forma un tipo di vetro vulcanico compatto chiamato ossidiana. Questo si forma perché il gas contenuto

nella lava non ha la possibilità di fuoriuscire e rimane intrappolato all'interno della roccia cristallizzando.

Il rapido raffreddamento di gas e lava più viscosa forma la pietra pomice che ha una porosità fino all'85% che la rende molto leggera e in grado di galleggiare sull'acqua.

I gas vulcanici possono fuoriuscire in una moltitudine di forme. Tra le più pericolose di queste ci sono le valanghe di gas incandescenti, consistono in una miscela di gas vulcanico e cenere più denso dell'atmosfera che può discendere lungo un pendio a più di 100 km/h. Ancora più devastanti sono gli effetti delle eruzioni di ignimbrite: incandescenti nuvole di cenere che viaggiano ad una velocità di circa 500 km/h che possono propagarsi su un territorio di centinaia di chilometri quadrati. Queste sono così calde che quando le particelle piovono sulla terra si solidificano trasformando la superficie in un tappeto di pietre.

La ricerca dei vulcanologi a livello mondiale ha consentito la determinazione di un indice di esplosività per le diverse regioni vulcaniche (Tab.1.4). Questo indice è dato dal rapporto percentuale del materiale piroclastico sciolto eruttato e del materiale totale eruttato. Maggiore è questo indice e maggiore sarà la probabilità di una esplosione vulcanica in quella regione.

Anche le eruzioni vulcaniche, alla stregua dei terremoti, sono spesso devastanti ma a differenza di questi è prevedibile che in corrispondenza di un vulcano attivo ci possa essere una qualche attività nel corso della sua vita. Molti vulcani hanno manifestazioni frequenti della loro attività come ad esempio l'Etna o lo Stromboli, in modo da tenere sempre all'erta gli abitanti del luogo; altri vulcani invece restano in una fase silente per numerosi anni come nel caso del Vesuvio alle cui pendici si sono sviluppati grandi centri abitati che fanno diventare tutta la zona dei paesi vesuviani ad elevato rischio.

In Tabella 1.5 sono riportati i dati di alcune eruzioni catastrofiche ognuna delle quali ha causato più di mille vittime.

Tabella 1.4: Indice di esplosività delle principali regioni vulcaniche della Terra

| REGIONE                                        | INDICE |
|------------------------------------------------|--------|
| Indonesia, Melanesia, America centrale, Alaska | 90-100 |
| Sud America, Filippine, Molucche               | 85     |
| Giappone, Nuova Zelanda, Nord America, Antille | 70     |
| Kamchatka, Isola Curili                        | 55     |
| Islanda, Area Mediterranea                     | 40     |
| Atlantico                                      | 30     |
| Oceano Indiano, Africa                         | 20     |
| Oceano Pacifico                                | 12     |

## 1.2.4 Valanghe

### 1.2.4.1 Definizione e classificazione delle valanghe

Banchi di ghiaccio o neve depositati sulle pendici delle montagne solitamente sono stabili, ma se il pendio è ripido e se si creano alcuni strati instabili, la lastra di ghiaccio può precipitare a valle. Gli strati profondi generano una superficie con poco attrito sulla quale possono scivolare gli strati superiori causando una valanga.

Tabella 1.5: Eventi vulcanici con più di 1000 vittime dal 1600 ad oggi

| Data | Vulcano                        | Vittime |
|------|--------------------------------|---------|
| 1631 | Vesuvio (Italia)               | 3500    |
| 1741 | Oshima (Giappone)              | 1475    |
| 1772 | Papandayan (Indonesia)         | 2957    |
| 1792 | Unzen (Giappone)               | 14300   |
| 1783 | Laki (Islanda)                 | 9350    |
| 1814 | Mayon (Filippine)              | 1200    |
| 1815 | Tambora (Indonesia)            | 92000   |
| 1877 | Cotopaxi (Ecuador)             | 1000    |
| 1882 | Galunggung (Indonesia)         | 4011    |
| 1883 | Krakatau (Indonesia)           | 36417   |
| 1902 | Santa Maria (Guatemala)        | 4500    |
| 1902 | Mount Peleé (Caraibi)          | 28000   |
| 1902 | Soufriere St Vincent (Caraibi) | 1680    |
| 1911 | Taal (Filippine)               | 1335    |
| 1919 | Kelut (Indonesia)              | 5110    |
| 1930 | Merapi (Indonesia)             | 1369    |
| 1951 | Lamington (Nuova Guinea)       | 2942    |
| 1963 | Agung (Indonesia)              | 1148    |
| 1982 | El Chichon (Messico)           | 1879    |
| 1985 | Ruiz (Colombia)                | 23080   |
| 1986 | Lake Nyos (Cameroun)           | 1700    |

I fattori che influenzano una valanga sono la variazione di pendenza, la natura della sua superficie, lo spessore della massa di neve e ghiaccio, la sua composizione e struttura interna, la temperatura ed il tipo di substrato, le vibrazioni. Il pericolo di una valanga è strettamente connesso alle condizioni meteorologiche prevalenti: intensi e lunghi periodi di nevicate generalmente aumentano il rischio di valanghe; ma anche un brusco aumento di temperatura, specialmente se accompagnato da pioggia, ammorbidisce lo strato superiore di neve, producendo un manto acquoso che riduce la sua coerenza interna. In genere le valanghe sono rare nei pendii con inclinazione inferiore a  $25^\circ$ , ossia del 45%; oltre questo limite le probabilità aumentano in proporzione diretta della pendenza; sono facili in genere lungo i pendii di oltre  $35^\circ$ . Naturalmente, se il pendio è coperto da vegetazione d'alto fusto diminuisce la possibilità di formazione delle valanghe, tanto più se il manto vegetale è fitto e continuo.

Si distinguono due tipi principali di valanghe nevose. Una valanga di neve incoerente si ingrossa sempre di più mentre scende sui fianchi della montagna. Una valanga a lastra è costituita da neve coerente, più compatta, che si stacca dal pendio in una massa discreta ed è molto simile a una frana di scorrimento; questo tipo di valanga è responsabile della grande maggioranza degli incidenti.

I danni causati dalle valanghe che avvengono per il troppo accumulo sui pendii instabili sono ridotti o prevenuti con le detonazioni, sia facendo esplodere mine sia sparando cannonate nel pendio pericoloso. I danni alle strutture si possono limitare costruendo vari tipi di recinzioni o di cunei di sdoppiamento, costruzioni in muratura a forma di V che dividono una valanga prima che questa arrivi alla struttura da preservare.

## 1.2.5 Frane

### 1.2.5.1 Definizione

Le frane sono movimenti compatti verso il basso e l'esterno di materiali adagiati su un pendio. Il termine frana è riservato al movimento di roccia e suolo con un ampio intervallo di velocità, comprendendo anche movimenti lenti che, sebbene raramente siano causa di perdita di vite umane, possono distruggere costruzioni o interrompere qualsiasi attività.

Si verifica una frana quando parte del pendio di un rilievo diviene troppo instabile per sostenere il suo stesso peso. L'instabilità generalmente comincia quando le piogge, o qualsiasi altro fenomeno apportatore di acqua, aumentano il contenuto d'acqua di un pendio, riducendo la resistenza dei materiali al taglio. Terremoti e rumori molto forti sono altre cause di frane. Le frane sono numerose dove l'erosione è più attiva nell'asportare il terreno, come lungo i corsi d'acqua e lungo le coste, ma possono verificarsi anche lontano dalle aree di forte erosione. Molti tipi di frane hanno movimenti stagionali o sporadici e possono rimanere in quiete per molti anni. Le frane a movimento lento si differenziano dagli scollamenti per avere confini ben delineati con il terreno stabile adiacente.

Un terreno stabile nel suo stato naturale può franare dopo l'intervento dell'uomo. Il livellamento del terreno per la costruzione di strade o di altre costruzioni sui fianchi dei rilievi facilita le frane, sia per l'incisione del pendio, che toglie il sostegno ai materiali più in alto, sia per il sovraccaricamento della parte in basso con i materiali scavati. Molte frane dannose avvengono dove sono stati alterati i pendii naturali o le condizioni delle acque sotterranee, specialmente nelle zone di frane in quiete che sono appena stabili nel loro stato naturale.

### 1.2.5.2 Classificazione delle frane

Si possono distinguere diversi tipi di frane in base al meccanismo di caduta dell'ammasso.

Le frane di scivolamento si muovono quando masse molto coerenti slittano su una o più superfici di minor resistenza o lungo superfici di discontinuità preesistenti (piani di stratificazione o di contatto, faglie). Queste frane si muovono in gran misura per rotazione su superfici cilindriche. I piani di scorrimento sono qui ben definiti, il distacco avviene lungo fratture trasversali al piano di scorrimento. Le cause provocatrici possono essere un aumento degli sforzi di taglio che imprime un impulso alle zolle sconnesse avviandone lo scivolamento. Queste si muovono con velocità che possono raggiungere i 2 m al giorno sebbene di solito siano più lenti e possano coinvolgere il movimento di enormi masse di materiale. Questo fenomeno interessa formazioni lapidee compatte, stratificate, con alternanze argillose.

Gli smottamenti sono frane dal comportamento fluido; se ne distinguono diversi tipi. Le colate di fango riguardano fanghi e detriti impregnati di acqua. Gli smottamenti lenti sono costituiti da lingue di materiale lunghe centinaia di metri che normalmente si muovono con velocità dell'ordine di alcuni metri in un anno. Sono caratterizzate dall'assenza di un vero e proprio piano di scorrimento, impegnano talvolta anche spessori di decine di metri che scorrono con grande lentezza, ma con continuità fino a depositarsi a valle in una sorta di conoide espansa. L'aspetto tipico di terreni affetti da



questo tipo di dissesto è quello di una superficie molto ondulata che si espande gradualmente da monte a valle (Fig.1.8) Sono causate dalle acque di infiltrazione ed interessano formazioni prevalentemente argillose. Smottamenti rapidi, al contrario, si verificano su pendii molto dolci di silt e argilla.



Figura 1.8: Frane di Sarno

Un soliflusso è un lento flusso di terreno verso la parte bassa di un pendio che avviene nelle zone artiche e alpine o durante il disgelo o quando la neve satura il terreno.

Una valanga dovuta a una frana da crollo roccioso è uno smottamento in cui enormi zolle di formazioni poco coerenti scivolano rapidamente per chilometri lungo pendii dolci. Queste frane possono essere determinate da un aumento degli sforzi di taglio, una diminuzione della resistenza d'attrito, una diminuzione della coesione. Questi effetti possono essere causati da scavi o tagli ad opera dell'uomo o da movimenti tettonici, scosse sismiche o esplosioni di mine

Nelle frane da rotolio grossi massi rotolano e precipitano a valle, spesso scompaginandosi in frammenti di varia pezzatura. Queste possono essere provocate da escursioni termiche, dall'azione del gelo e disgelo che causa delle fratture o dalle acque superficiali incanalate nelle fessure. Anche scosse sismiche o opere di scavo possono essere la causa di queste frane. Sono interessati da questo tipo di fenomeno tutte le formazioni spiccatamente lapidee, massicce o stratificate in grossi banchi, fratturate o interessate da fenomeni carsici.

Le frane da sprofondamento sono provocate dal cedimento di livelli plastici sottostanti a formazioni rigide o dal crollo di tetti di cavità sotterranee. Questi ultimi sono però fenomeni localizzati che impegnano zone ristrette caratterizzate da fenomeni carsici.

Diversi metodi vengono impiegati per prevenire le frane, fra cui: la cattura e il drenaggio dell'acqua prima che questa raggiunga la potenziale area di frana; il pompaggio dell'acqua con i pozzi nelle zone di frana; il riempimento delle fenditure che potrebbero essere invase dall'acqua piovana o superficiale. I danni agli edifici e alle altre strutture edili possono venir limitati con lo studio geologico delle aree edificabili e con la progettazione e la costruzione di terrapieni.

La causa naturale di una frana è il superamento da parte della superficie rocciosa della pendenza limite. Anche in questo caso l'uomo può essere l'artefice di eventi catastrofici a seguito della perturbazione del naturale equilibrio dei pendii attraverso la costruzione di strade o attraverso opere di disboscamento. Alcune delle maggiori catastrofi del 20° secolo connesse con le frane sono riportate in Tabella 1.6.



Tabella 1.6: Alcune delle maggiori catastrofi del 20° secolo connesse con frane

| Data | Località              | Vittime | Causa        |
|------|-----------------------|---------|--------------|
| 1920 | Kansu (Cina)          | 200000  | Loess flow   |
| 1925 | Gros Ventre (Wyoming) | 40      | Rockslide    |
| 1959 | Madison (Montana)     | 100     | Rockslide    |
| 1963 | Vaiont (Italia)       | 2600    | Rockslide    |
| 1966 | Aberfan (Galles)      | 150     | Debris-slide |
| 1970 | Huascarán (Perù)      | 25000   | Complex      |
| 1998 | Casitas (Nicaragua)   | 2000    | Debris flow  |
| 1999 | Venezuela             | 20000   | Complex      |
| 2000 | Svizzera              | 40      | Debris flow  |

### 1.3 CONDIZIONI METEOROLOGICHE ESTREME

#### 1.3.1 Inondazioni

##### 1.3.1.1 Definizione e classificazione

Un'inondazione è l'allagamento di un terreno, normalmente asciutto, provocata dalla crescita e dallo straripamento di un corso d'acqua.

Le inondazioni sono classificate in vario modo a seconda di cause particolari. Nelle classificazioni generali più utilizzate si distinguono le inondazioni costiere dovute ai laghi e ai mari da quelle di origine fluviale. Le inondazioni costiere possono essere causate da alte ondate generate dal vento, da maree eccezionalmente alte, dall'abbassamento delle zone costiere e dai maremoti, onde marine di origine sismica. L'inondazione delle coste riveste una particolare importanza in quanto in molti paesi la popolazione abita principalmente lungo di esse.

Anche se maree di altezza del tutto eccezionale raramente producono di per sé danni gravi ed estesi, esse possono sensibilmente accrescere il rischio di inondazioni se avvengono in concomitanza di tempeste di entità anche relativamente modesta.

Le inondazioni dovute ai fiumi hanno una varietà di cause. Tra quelle naturali sono la pioggia, lo scioglimento della neve e le ostruzioni dovute al ghiaccio.

Le inondazioni che si verificano lungo i grandi fiumi derivano da prolungati periodi di precipitazioni su estese regioni.

Le inondazioni dovute a nubifragi si verificano quando si hanno precipitazioni estremamente intense; tuttavia, esse hanno breve durata, continuando di rado per più di qualche ora in una data località. Questo tipo di inondazioni tende a verificarsi con maggiore facilità nelle zone montagnose, dove le ripide pendenze fanno sì che l'acqua si sposti a grande velocità provocando l'erosione del terreno e portando con sé detriti naturali e artificiali. Queste inondazioni spesso si verificano molto rapidamente e con scarsa possibilità di preavviso; da ciò deriva il loro nome di esondazione lampo.

Le inondazioni che derivano da un disgelo sono particolarmente pericolose poiché non sono necessariamente precedute da forti precipitazioni. Anche quantità modeste di pioggia di temperatura abbastanza alta che cadono su un ammasso nevoso, soprattutto se il terreno al di sotto è ghiacciato e non è quindi in grado di assorbire acqua, possono provocare gravi inondazioni.

Anche certe opere dell'uomo possono essere causa di inondazioni. L'esempio più banale è quello di inondazioni provocate dal cedimento di strutture artificiali come le dighe. Di solito le dighe crollano in conseguenza di errori nella progettazione o nella costruzione, di movimenti geologici sempre possibili come i terremoti e le frane, o semplicemente per la vetustà delle strutture stesse. Un esempio fra i più tragici di disastri causati dalla presenza di dighe che sbarrano corsi d'acqua è quello del Vajont. Anche il cedimento di strutture di altro genere, come acquedotti, bacini di raccolta di detriti e dighe di sbarramento, può provocare inondazioni.

Fra le altre cause artificiali sono da ricordare il restringimento di corsi d'acqua conseguente a interventi di ingegneria civile come l'interramento di una parte del letto; l'abbattimento della vegetazione, che accelera la velocità del ruscellamento; la pavimentazione e l'edificazione dei terreni, che riduce la capacità del suolo di assorbire l'acqua. Anche l'installazione di fognature per l'acqua piovana può accrescere il rischio di inondazioni, in quanto aumenta l'acqua portata dai fiumi.

### 1.3.1.2 *Rischio e previsione*

Se si vuole fare in modo che nei limiti umanamente prevedibili qualunque eccezionale evento di afflusso meteorico trovi sfogo in un regolare o, comunque non dannoso, scorrere dell'acqua nel fiume o torrente che sia, occorre preliminarmente svolgere un esame delle piene. Questo studio, che statisticamente si fonda sull'esame delle precipitazioni, non può prescindere da un contestuale esame dei cosiddetti fattori geometrici, ideologici e idraulici riguardanti il bacino imbrifero confluyente nel corso d'acqua che si esamina.

Fattori geometrici. Comprendono l'estensione, la forma, la geologia, l'altimetria, la temperatura, l'esposizione ai venti del bacino imbrifero. Di fondamentale importanza è il volume d'invaso  $v$  che esiste in un certo istante, in tutta la rete dei canali, naturali o artificiali, del bacino confluyente in una determinata sezione del corso d'acqua. Dal volume di invaso  $v$  che si suppone distribuito uniformemente su tutta la superficie,  $A$ , del bacino, si ricava l'altezza d'invaso,  $w$ .

Fattori idrologici. Riguardano sostanzialmente le cause delle precipitazioni atmosferiche. Viene chiamato *coefficiente di riduzione*  $\Psi$  il rapporto fra il volume di acqua che, durante la pioggia, entra nel corso d'acqua ed il volume d'acqua che cade su tutto il bacino. Per *tempo di corrivazione* s'intende invece il tempo impiegato da una particella d'acqua che cade in un punto del bacino ad arrivare al corso d'acqua. Entrambe queste quantità danno un'idea della morfologia del bacino. Se ad esempio un bacino è costituito da terreno assorbente o c'è vegetazione che trattiene l'acqua, il coefficiente è molto basso mentre il tempo di corrivazione è alto.

Fattori idraulici. Riguardano la capacità di portata di tutti i canali e fossi, naturali o artificiali, presenti nel bacino, fino alla sezione considerata lungo il corso d'acqua principale.

Analisi della frequenza delle inondazioni vengono effettuate da studiosi di idrologia, ingegneri civili e addetti alla programmazione, i quali si servono delle documentazioni relative a inondazioni precedenti per valutare la probabilità del verificarsi di nuovi casi di varia portata. Ad esempio, se un'inondazione di una determinata gravità ha una probabilità su cento ogni anno di essere uguagliata o superata, essa viene definita come "inondazione tipo ogni cento anni".

### 1.3.1.3 *Controllo delle inondazioni*

Nel tentativo di prevenire o ridurre i danni dovuti alle inondazioni si usano due tipi diversi di metodi, a volte fra loro contrastanti: strutturali e non strutturali. I sostenitori dei metodi strutturali fanno affidamento sulla costruzione di dighe e bacini di contenimento, argini e sbarramenti, canali artificiali, sistemi di deviazione dei corsi d'acqua, nonché sugli interventi sui bacini idrici. Le dighe per il controllo del flusso idrico trattengono l'acqua quando questo è eccessivo per ridurre il rischio a valle; poi, dopo che il pericolo è passato, l'acqua viene scaricata lentamente.

Gli argini artificiali servono a rendere più alte le sponde dei corsi d'acqua, riducendo così la probabilità degli straripamenti. In alcuni casi l'acqua viene deviata in bacini di riserva appositamente predisposti per le piene eccezionali, in modo da ridurre l'altezza del livello a valle.

Un altro sistema è quello di ridurre la quantità di liquido che affluisce ai corsi d'acqua mediante il rimboschimento dei bacini idrici e trattenendo il ruscellamento nelle zone alte a monte dei fiumi. In alcune situazioni il metodo degli interventi strutturali si è dimostrato pienamente efficace, ma in altre è fallito disastrosamente.

La critica a questo modo di affrontare il problema, oltre a far notare che il costo delle strutture per controllare il flusso dell'acqua spesso supera il valore dei beni economici che si intende proteggere, sottolinea il fatto che le dighe spesso accrescono i rischi legati alle inondazioni perché attirano gli abitanti delle località colpite più vicino ai corsi d'acqua di quanto la prudenza consiglia, cosicché se una diga crolla le conseguenze sono più gravi. Gli argini artificiali non fanno altro che spostare il pericolo più a monte o più a valle, e il loro crollo può essere estremamente dannoso.

I sostenitori dei metodi non strutturali preferiscono l'impiego di criteri di programmazione del territorio, di zonizzazione e di imposizione di vincoli per limitare l'edificazione del suolo nelle pianure alluvionali. Essi suggeriscono che si dovrebbe incoraggiare l'utilizzazione di questi terreni per scopi agricoli, per boschi o per aree di svago. Nelle zone dove già è in corso uno sviluppo edilizio si dovrebbero costruire edifici in grado di resistere alle inondazioni e si dovrebbero approntare sistemi di allarme precoce.

Gli oppositori del tipo di approccio non strutturale concordano sul fatto che sia auspicabile evitare che esistano aree costituzionalmente predisposte alle inondazioni; tuttavia, fanno notare che molte città importanti vennero costruite nei pressi di corsi d'acqua per motivi legati alle comodità di trasporto e alla possibilità di fruire di impianti di energia e di risorse idriche, e che sarebbe antieconomico abbandonare l'utilizzazione di questo tipo di aree. Le tendenze più recenti nel controllo delle inondazioni privilegiano entrambi i tipi di approccio, dato che i metodi non strutturali hanno ottenuto una maggiore considerazione.

Si riportano in Tabella 1.7 alcuni degli eventi più disastrosi che hanno provocato un grande numero di vittime.

## 1.3.2 **Tornado e Uragani**

### 1.3.2.1 *Formazione e sviluppo dei venti*

Tornado e uragani sono generati dal vento in particolari condizioni atmosferiche. Il vento è lo spostamento di aria in relazione alla rotazione della superficie terrestre; ha

una costituzione tridimensionale, con le componenti orizzontali che sono considerevolmente più grandi di quelle verticali. I venti hanno velocità orizzontali tipiche di 50 Km/h, sebbene nelle correnti a getto siano state registrate velocità superiori a 300 Km/h. Le velocità verticali sono intorno ai 10 Km/h, di conseguenza il termine vento è diventato sinonimo delle componenti orizzontali dei venti.

Tabella 1.7: Principali disastri causati da inondazioni

| Anno | Località                     | Vittime |
|------|------------------------------|---------|
| 1421 | Paesi Bassi                  | 100000  |
| 1530 | Paesi Bassi                  | 400000  |
| 1642 | Cina                         | 300000  |
| 1887 | Fiume Giallo, Cina           | 900000  |
| 1900 | Texas, Stati Uniti d'America | 5000    |
| 1911 | Fiume Yangtze, Cina          | 100000  |
| 1931 | Fiume Yangtze, Cina          | 145000  |
| 1935 | Fiume Yangtze, Cina          | 142000  |
| 1938 | Fiume Giallo, Cina           | 870000  |
| 1949 | Fiume Yangtze, Cina          | 5700    |
| 1953 | Paesi Bassi                  | 2000    |
| 1954 | Fiume Yangtze, Cina          | 30000   |
| 1960 | Bangladesh                   | 10000   |
| 1963 | Vajont, Italia               | 1800    |
| 1979 | Morvi, India                 | 15000   |
| 1991 | Bangladesh                   | 139000  |
| 1991 | Filippine                    | 6000    |
| 1991 | Fiume Huai, Cina             | 2900    |

Le leggi del moto di Isaac Newton implicano che il movimento dell'aria deve essere il risultato di forze di disequilibrio che sono dovute a grandi variazioni di temperatura. Le regioni equatoriali e quelle polari hanno le variazioni di temperatura più grandi; queste variazioni, insieme con un conseguente gradiente di pressione e con l'effetto Coriolis, sono l'essenza dei venti terrestri. Lo spirare del vento è un tentativo dell'atmosfera di ristabilire l'equilibrio. Poiché il Sole mantiene continuamente i gradienti di riscaldamento, non si raggiunge mai l'equilibrio; si raggiunge, invece, uno stato di uniformità in cui venti costanti portano calore dall'equatore verso il polo.

La distribuzione dei venti è governata da tre effetti fisici fondamentali: le forze di spinta responsabili del movimento nell'atmosfera; l'effetto dei processi di dissipazione, come l'attrito, che riducono l'energia cinetica del vento; e l'effetto Coriolis, dovuto alla rotazione terrestre. I venti di qualsiasi scala, dalla planetaria alla regionale, sono governati da questi processi.

La rotazione terrestre modifica il vento a causa dell'effetto di Coriolis, che può essere descritto come la forza prodotta dalla rotazione terrestre. Questa forza è zero all'equatore e raggiunge il massimo ai poli. A causa della bassa forza di Coriolis alle basse latitudini, i venti in queste zone hanno la tendenza a spirare direttamente dalle zone di alta a quelle di bassa pressione; a latitudini più alte, dove la forza di Coriolis è grande, i venti soffiano quasi parallelamente alle isobare. Alle basse latitudini, la forza di

Coriolis è insignificante e il vento diminuisce fino a zero sulla superficie terrestre, con un piccolo cambiamento di direzione.

### 1.3.2.2 *Definizione e caratteristiche dei tornado*

Il tornado o tromba d'aria è una colonna di d'aria che ruotando velocemente crea un vortice a forma d'imbuto che si estende sempre verso il basso di una nube di tipo convettivo. Il tornado diventa visibile quando, a causa della caduta di pressione all'interno del vortice, l'umidità atmosferica condensa rapidamente. I tornado sono prodotti da correnti ascendenti generate da nubi o cellule temporalesche. Queste nubi provocano precipitazioni che a loro volta generano correnti discendenti che tendono a dissipare quelle ascendenti. Quando si verificano particolari condizioni fisiche (aria calda e umida negli strati bassi dell'atmosfera e secca in quelli superiori, variazioni di direzione ed intensità del vento, ecc.) si crea un equilibrio fra correnti ascendenti e discendenti. Quando questo equilibrio perdura nel tempo la corrente ascendente tende a ruotare su se stessa, insieme alla nube temporalesca, iniziando da 3-4 km d'altezza e propagandosi verso il suolo. In questa situazione la corrente ascendente si comporta come un grande aspiratore che risucchiando l'aria al suolo fa scendere bruscamente la pressione ed il vento accelera rapidamente fino a raggiungere velocità distruttive. Il tornado così generato si sposta trascinato dalla cellula temporalesca che l'ha provocato, a velocità di 50-70 km/h, distruggendo quello che trova lungo il corridoio che percorre, finché la rottura dell'equilibrio fra correnti ascendenti e discendenti non interrompe il fenomeno. La larghezza di questo corridoio va da poche decine a qualche centinaio di metri, ma la capacità distruttiva è in relazione alla velocità tangenziale del vento intorno all'asse verticale del tornado.

Questa velocità è alla base della classificazione dei tornado (scala TORRO, acronimo di Tornado and Storm Research Organisation), che distingue dieci valori di intensità in relazione alla velocità del vento (Tab.1.8).

I tornado, contrariamente a quanto si pensa, non sono fenomeni tropicali (come gli uragani), ma caratteristici dei climi temperati nei quali ricade anche l'Italia.

Poiché i tornado sono fenomeni molto rapidi, la loro previsione è praticamente impossibile. Con l'anticipo di un giorno si possono prevedere le aree dove vi saranno condizioni favorevoli allo sviluppo delle cellule temporalesche e, attraverso il radar doppler, i vortici in quota che potranno generare i tornado e la direzione di spostamento. Non tutte le cellule temporalesche generano però tornado, per cui è impraticabile la diffusione di allarmi con anticipo e indicazioni di quale sarà la zona colpita, se non come avvisi generici di temporali intensi.

### 1.3.2.3 *Definizione e caratteristiche degli uragani*

L'uragano è un ciclone tropicale sostenuto da venti furiosi che soffiano anche ad elevate velocità. L'uragano (Fig.1.9), si classifica infatti secondo la scala Beaufort (Tab. 1.9), come un vento di grado pari a 12, con una velocità superiore ai 100 km/h creando la totale distruzione di tutto ciò che incontra sul suo percorso.

Le formazioni nuvolose assumono la forma tipica a spirale e danno luogo alle piogge più violente riscontrabili sulla Terra. L'uragano si forma in presenza di calore e umidità, caratteristiche tipiche delle aree tropicali. I venti soffiano intorno ad un'area centrale di

calma chiamata “occhio del ciclone”, di solito sgombro da nubi e attraversato da una colonna di aria calda.

Tabella 1.8: Scala Torro

| INTENSITA' TORRO | DESCRIZIONE DEL TORNADO E VELOCITA' DEL VENTO         | DESCRIZIONE INDICATIVA DEL DANNO                                                                                                                    |
|------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T0               | DEBOLE<br>17-24 m/s (61-86 km/h)                      | Tende da campeggio fortemente smosse. Tegole spostate. Piccoli rami strappati. Tracce visibili sui raccolti.                                        |
| T1               | MEDIO<br>24-32 m/s (86-115 km/h)                      | Sdrai, piccole piante, rifiuti pesanti volano. Tegole e piccoli comignoli vengono mossi. Recinti di legno piegati. Danni leggeri ad alberi e siepi. |
| T2               | MODERATO<br>32-41 m/s (115-148 km/h)                  | Roulotte leggere sollevate, piccoli capanni distrutti. Danni consistenti a tegole e grossi comignoli. Piccoli alberi sradicati.                     |
| T3               | FORTE<br>41-51 m/s (148-184 km/h)                     | Roulotte ribaltate, garage esterni distrutti. Tetti di legno fortemente danneggiati. Alcuni grossi alberi spezzati o sradicati.                     |
| T4               | SEVERO<br>51-61 m/s (184-220 km/h)                    | Roulotte distrutte, piccoli capanni volano per lunghe distanze. Tetti completamente rimossi da alcune case. Numerosi alberi spezzati o sradicati.   |
| T5               | INTENSO<br>61-72 m/s (220-259 km/h)                   | Automobili sollevate. Danni seri agli edifici senza compromettere i muri. Crollo di edifici vecchi e poco resistenti.                               |
| T6               | MODERATAMENTE DEVASTANTE<br>72-83 m/s (259-299 km/h)  | Pesanti veicoli a motore sollevati. Edifici resistenti perdono il tetto e qualche muro. Crollo di numerosi edifici poco resistenti.                 |
| T7               | FORTEMENTE DEVASTANTE<br>83-95 m/s (299-342 km/h)     | Muri in pietra e case in mattoni abbattuti. Magazzini con struttura in acciaio possono piegarsi. Locomotive deragliano.                             |
| T8               | SEVERAMENTE DEVASTANTE<br>95-107 m/s (342-385 km/h)   | Case in legno disperse su grandi distanze. Molte case in muratura seriamente danneggiate. Automobili scaraventate a grande distanza.                |
| T9               | INTENSAMENTE DEVASTANTE<br>107-120 m/s (385-432 km/h) | Molti edifici in acciaio fortemente danneggiati. Locomotive e treni scaraventate a grande distanza. Distruzione completa degli alberi.              |
| T10              | SUPER TORNADO<br>120-134 m/s (432-482 km/h)           | Case interamente sollevate e trasportate a grande distanza. Edifici in cemento armato possono essere severamente danneggiati.                       |

Le tempeste dell'Atlantico e del Pacifico orientale sono chiamate uragani, da una parola delle Indie Occidentali, huracan ("vento grande"); le tempeste del Pacifico occidentale sono chiamate tifoni, dalla parola cinese taifun, "grande vento".

La fonte energetica primaria dei cicloni tropicali è il calore latente liberato quando si ha la condensazione del vapor d'acqua. Soltanto aria estremamente umida può fornire l'energia necessaria a generare e mantenere le tempeste tropicali, e soltanto aria molto calda contiene umidità sufficiente. I cicloni tropicali, quindi, si formano solo sopra gli oceani con la temperatura dell'acqua ad almeno 27 °C. Dopo che si sono formati, questi temporali tendono a intensificarsi quando passano sopra acqua più calda e ad attenuarsi quando passano sopra acqua più fredda.

L'uragano maturo è caratterizzato da un occhio: una zona circolare, priva di nuvole e con venti leggeri, situata al centro dell'uragano stesso. La pressione in superficie

raggiunge il suo minimo nell'occhio; valori tipici sono di 950 mbar, ma ne sono stati registrati anche inferiori a 900 mbar. Il calo di movimento nell'occhio, che è responsabile della mancanza di nuvole, produce anche riscaldamento adiabatico ed essiccamento. Le temperature all'altezza di 5 Km sul livello del mare sono, di norma, 10 °C più elevate di quelle del resto dell'uragano.

Tabella 1.9: Scala Beaufort per la classificazione dei venti e per la determinazione della forza del mare

| Grado | Velocità<br>km/h | h max<br>onde | Nome vento        | Caratteristiche                                                                                                                                                               |
|-------|------------------|---------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0     | <1               | 0             | Calma             | Il vento non sposta il fumo che sale verticalmente; mare calmo.                                                                                                               |
| 1     | 1-5              | 0,1           | Bava di vento     | Il vento fa ondeggiare una colonna di fumo; mare increspato al largo, altezza delle onde minore di 0,1 m.                                                                     |
| 2     | 6-11             | 0,3           | Brezza leggera    | Il vento muove le banderuole e le foglie; piccole onde al largo                                                                                                               |
| 3     | 12-19            | 1             | Brezza tesa       | Il vento agita banderuole e ramoscelli; piccole onde ampie al largo                                                                                                           |
| 4     | 20-28            | 1,5           | Vento moderato    | Il vento muove i rami e mantiene tese le banderuole; onde lunghe                                                                                                              |
| 5     | 29-38            | 2,5           | Vento teso        | Il vento solleva polvere e carta, agita grossi rami; onde ampie e                                                                                                             |
| 6     | 39-49            | 4             | Vento fresco      | Il vento agita gli alberi e muove turbini di polvere; sibila tra rami e cavi tesi; onde ampie e lunghe con creste bianche.                                                    |
| 7     | 50-61            | 5,5           | Vento forte       | Il vento scuote gli alberi; si fatica a tenere gli ombrelli; impossibile tenere il mare con barche                                                                            |
| 8     | 62-74            | 7,5           | Burrasca          | Il vento rompe piccoli rami, asporta tegole ed oggetti non fissi; si cammina con difficoltà; navigazione difficoltosa; onde lunghe e alte fino a 5,5 m con creste di schiuma. |
| 9     | 75-88            | 10            | Burrasca forte    | Il vento provoca lievi danni a tetti ed a strutture elevate; il mare si gonfia e la navigazione è difficile; le onde battono con violenza le rive; visibilità ridotta.        |
| 10    | 89-102           | 12,5          | Tempesta          | Il vento sradica gli alberi; danni a strutture esterne delle abitazioni; navigazione impossibile per piccoli navigli.                                                         |
| 11    | 103-117          | 16            | Tempesta violenta | Il vento provoca devastazioni gravi; forti mareggiate battono le rive; danni alle attrezzature portuali; navigazione difficoltosa anche per grosse navi.                      |
| 12    | 118-133          | 14            | Uragano           | Devastazioni gravissime; case seriamente danneggiate o distrutte; opere portuali distrutte; navigazione pericolosa anche per grandi imbarcazioni; visibilità ridottissima.    |



Figura 1.9: Vista da satellite di un uragano

Attorno all'occhio, che ha un diametro di 10-100 Km, i venti ruotano in senso antiorario, lungo le pareti dell'occhio stesso, a grandissima velocità, che nei temporali più intensi può superare i 300 Km/h. Questi venti sono mantenuti dalle grandi differenze di pressione orizzontale fra l'occhio e la zona esterna del temporale. Sebbene i venti stessi siano responsabili di molti danni causati dagli uragani, le onde e le maree, originate dal vento, sono spesso responsabili della maggior parte dei danni alle aree costiere. Nell'uragano Camille (1969), per esempio, l'ondata dovuta all'uragano stesso produsse una marea alta 7,5 m più del normale, quando approdò nei pressi di Pass Christian (Mississippi). Poiché vicino alla costa sono concentrate, in pochi metri sul livello del mare, molte attività umane, le ondate degli uragani e dei tifoni possono causare molte perdite di vite umane e molti danni alle cose.

I venti raggiungono la loro velocità massima alla distanza di 10-100 Km dal centro dell'uragano e diminuiscono rapidamente con l'aumentare della distanza. Alla distanza di 500 Km, la velocità del vento è solitamente inferiore a 30 Km/h. Le precipitazioni più intense si hanno nelle condizioni di intensa convezione nelle pareti dell'occhio. Gli uragani e i tifoni possono produrre piogge di 250 mm al giorno. La liberazione del calore latente, associato con queste precipitazioni, mantiene bassa la pressione e forti i venti.

La circolazione tangenziale rapidamente vorticoso dei venti degli uragani può essere spiegata dalla conservazione del momento angolare. Proprio come un pattinatore ruota più velocemente quando porta le braccia in basso vicino all'asse di rotazione, così l'aria ruota in maniera più vorticoso quando viene richiamata verso il centro dell'uragano dalla bassa pressione. Senza l'attrito, il vento aumenterebbe in funzione inversa della distanza dal centro. Così un vento con velocità di rotazione di 5 Km/h a una distanza dal centro di 500 Km, dovrebbe avere la velocità di 250 Km/h se arrivasse a una distanza dal centro di solo 10 Km. L'attrito riduce un po' le predette velocità, ma il



principio di base spiega le alte velocità di rotazione in prossimità del centro dell'uragano.

L'aria che si solleva a spirale verso il centro, nelle pareti dell'occhio, gira verso l'esterno nella troposfera superiore (circa 15 Km s.l.m.). Quando l'aria si allontana dal centro, la sua rotazione è antioraria, in accordo con la conservazione del momento angolare. 300 Km circa dal centro, l'aria prende una circolazione anticiclonica (oraria).

Gli uragani si spostano con una velocità tipica di 25 Km/h, ma alcuni possono raggiungere una velocità doppia e altri restare fermi sullo stesso luogo per parecchi giorni. Il percorso tipico, alle basse latitudini, va da est verso ovest. Quando gli uragani si avvicinano alla terraferma, cominciano di solito a spostarsi verso nord. Quando giungono a latitudini più alte e subiscono l'influenza delle correnti occidentali, di solito girano verso nord-est, spesso evitando i continenti. Questo girare da nord-ovest a nord-est, scaldandosi, viene chiamato traiettoria ricurva.

#### 1.3.2.4 Sistemi di sorveglianza

Fin dal 1944, quando divenne comune il riconoscimento degli uragani dall'aereo, la scoperta degli uragani si basava soltanto sui bollettini di superficie di stazioni di rilevamento terrestri o navali e alcuni non furono, con probabilità, nemmeno rilevati. Sebbene il riconoscimento dall'aereo abbia aumentato considerevolmente la capacità di scoprire e seguire i temporali tropicali nel loro sviluppo, il primo grande passo nella scoperta precoce sugli oceani è stato fatto con la sorveglianza continua eseguita con una serie di satelliti geosincroni, stabili in punti fissi sull'equatore. Dal 1966, quando fu messo in orbita il primo di questi satelliti, tutti i temporali tropicali sono stati identificati.

Vento e vortici che si alzano in aree di bassa pressione sono dunque l'origine naturale degli uragani e cicloni. Non ci sono fattori umani che generano gli uragani ma sicuramente i mutamenti climatici generati dall'inquinamento atmosferico possono essere fattori che amplificano lo sviluppo di questi eventi.

### 1.3.3 Tempeste di grandine e Temporali

La grandine è la precipitazione di piccole particelle di ghiaccio di diversa forma comunemente chiamati chicchi di grandine. Essi sono costituiti da rivestimenti di ghiaccio e si formano all'interno di nuvole cumuliformi. La grandine può danneggiare seriamente i raccolti, specialmente quelli di grano.

Una tempesta elettrica, comunemente chiamata temporale, è una potente scarica di elettricità atmosferica che si è accumulata nelle nuvole cumuliformi. I temporali sono spesso accompagnati da notevoli piogge e qualche volta da grandine. Il più frequente tipo di temporale è causato dalla risalita di aria calda. La naturale sorgente di tempeste elettriche è da ricercarsi nell'atmosfera. L'umidità è responsabile della formazione di nuvole cumuliformi dentro le quali comincia a svilupparsi la tempesta elettrica.

Quando una grossa goccia d'acqua viene spezzata per effetto del vento relativo, il suo residuo più grosso risulta carico positivamente, mentre le goccioline più piccole in cui si frammenta il resto acquistano cariche negative dell'ordine di qualche decina di coulomb. Queste cariche di segno opposto possono produrre localmente nelle nubi campi così intensi da innescare delle scariche elettriche. All'innescio contribuiscono le goccioline che, sotto l'azione di forti campi elettrici, si deformano e si sfilacciano

frantumandosi in miriadi di ioni che iniziano una scarica a valanga (ogni ione per urto con le molecole neutre ne produce parecchie coppie; queste a loro volta accelerate ne producono altre, ecc.) Sotto l'azione del campo principale che si è andato stabilendo tra la grossa carica negativa, formata nella parte inferiore della nube, e il terreno sottostante, caricatosi positivamente per induzione, la scarica iniziata procede sino al suolo come scarica guida, poco luminosa e poco intensa ma che, avanzando, lascia un canale ionizzato. Appena la scarica guida, che viaggia ad una velocità media di 60 km/s, giunge al suolo, da questo parte il lampo principale, ossia una scarica estremamente intensa, che si propaga alla velocità di 300 km/s lungo il canale ionizzato (Fig. 1.10). A questa prima scarica elettrica ne possono seguire delle altre, sempre preceduti da una scarica guida. Questi fenomeni sono stati studiati sia in base all'andamento del campo elettrico osservato al suolo, sia con sistemi ultrarapidi di ripresa fotografica. Si è potuto così accertare che scariche analoghe a quella descritta si possono avere tra suolo e nube, tra una nube e le vicine, dalla sommità della nube verso la stratosfera.

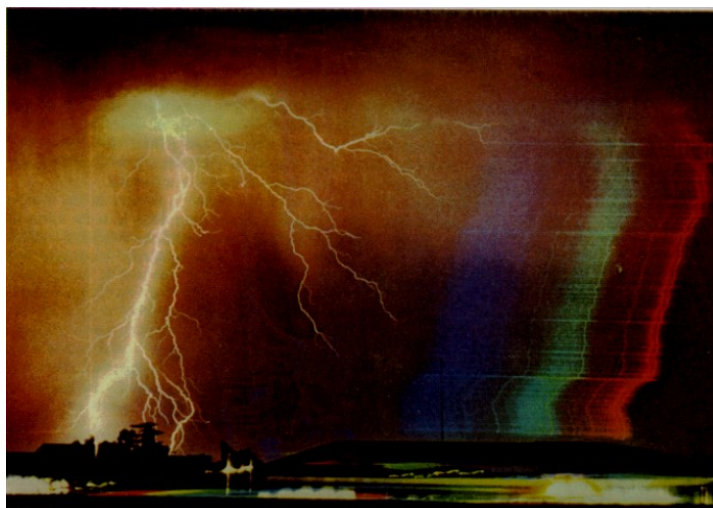


Figura 1.10: Fulmine e suo spettro cromatico

## 1.4 EVENTI ANTROPICI

### 1.4.1 Esplosioni

#### 1.4.1.1 Definizione e cause

Per esplosione si intende un particolare tipo di combustione, caratterizzato dalla grandissima velocità di propagazione della combustione stessa all'interno di una massa di sostanza suscettibile di dar luogo a tale fenomeno. Una esplosione consiste in una rapida espansione di una massa di gas compresso: l'energia liberata viene dispersa sotto forma di onda d'urto e come energia cinetica dei frammenti proiettati. Particolarmente note sono le esplosioni determinate dai materiali esplosivi (dinamite, tritolo, polvere da sparo, perossidi, etc.), caratterizzati dalla circostanza che, trattandosi di sostanze ricche di ossigeno, possono dar luogo a combustioni esplosive senza l'apporto dell'ossigeno dell'aria. Molto ricorrenti nell'ambito domestico sono le esplosioni di gas, per le quali è indispensabile la formazione di miscele esplosive gas-aria all'interno di un

ambiente, contenute nei cosiddetti "limiti di infiammabilità" facilmente raggiungibili in caso di fuga di gas, specialmente se in ambiente non adeguatamente ventilato.

La fuga di gas può essere provocata dalla rottura o usura di una tubazione, dalla dimenticanza della manopola di un fornello in posizione di apertura totale o parziale, dal cattivo funzionamento delle valvole o dei dispositivi di tenuta dei rubinetti dei gas o del regolatore di una bombola, etc. Le combustioni esplosive determinano la formazione quasi istantanea di ingenti volumi di prodotti gassosi, enormemente superiori ai volumi degli ambienti, con conseguente innalzamento della pressione negli ambienti stessi, non sopportabile dalle ordinarie strutture degli edifici che, pertanto, subiscono danni con cedimento degli elementi costruttivi più deboli (finestre, porte, tramezzature interne, muri perimetrali, tetti di copertura, etc.) fino al crollo completo degli edifici, nei casi più gravi. A tali effetti si accompagna lo spostamento ed il ribaltamento di mobili ed arredi, con proiezione violenta di elementi anche a distanze notevoli. I danni subiti dalle persone possono essere gravissimi.

## **1.4.2 Incidenti tecnologici**

### *1.4.2.1 Definizione e cause*

Per incidenti tecnologici si intendono il rilascio di sostanze inquinanti, incidenti nucleari, black-out, incidenti che si verificano durante il trasporto marittimo e negli impianti offshore e tutti quegli incidenti legati alla produzione e consumo di energia, alla produzione industriale o ai trasporti ed all'agricoltura.. Questi incidenti costituiscono una categoria di problemi a se stante e sono fonte di particolare apprensione a causa della loro imprevedibilità, della potenziale portata dei loro effetti e dell'incertezza riguardo le loro conseguenze.

I dati evidenziano che i maggiori incidenti connessi con la presenza di sostanze pericolose derivano di solito da una concomitanza di cause come l'errore umano, il guasto di un componente, le reazioni chimiche e gli eventi esterni.

Attualmente sono in funzione in tutto il mondo 460 reattori nucleari di cui 236 in Europa ed altri 99 impianti in Europa connessi con il ciclo del combustibile nucleare (dati AIEA). L'agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) ha messo a punto la scala internazionale degli incidenti nucleari (INES) come strumento per comunicare il significato degli episodi segnalati. Gli eventi considerati sono quelli connessi con l'emissione di radiazioni ionizzanti che vengono classificati con una scala che va da zero a sette; un evento di grado zero è definito "anomalia", quelli di grado 1-3 "incidenti lievi", quelli di grado 4-7 "incidenti rilevanti". Solo gli incidenti di grado compreso tra il 5 ed il 7 creano rischi. In Europa solo l'incidente di Cernobil è stato definito "rilevante", la maggior parte degli altri eventi segnalati rientravano nelle "anomalie". L'incidente di Cernobil ha causato nell'immediato 31 vittime e 140 persone hanno riportato disturbi di vario grado a seguito dell'esposizione alle radiazioni. In termini di sconvolgimenti socioeconomici le conseguenze sono state molto gravi, compresa l'evacuazione di 120.000 persone ed un notevole aumento di casi di carcinoma alla tiroide nei bambini che vivevano nelle regioni contaminate.

Gli incidenti marittimi rilevanti (ossia quelli in cui sono coinvolte petroliere, piattaforme petrolifere o condotte) possono causare molte vittime ed avere gravi ripercussioni sulla salute umana e sull'ambiente. Gli effetti di questi incidenti possono

variare considerevolmente a seconda delle condizioni atmosferiche, della sensibilità dell'ecosistema nel quale esso si verifica e del tipo di inquinante sversato.

La complessità delle cause responsabili di questi episodi impediscono la formulazione di qualsiasi previsione.

### **1.4.3 Crolli**

I crolli di interi fabbricati che si vanno ripetendo con maggiore frequenza nel più recente periodo rendono pressante una rivisitazione dello stato di funzionalità strutturale del nostro patrimonio edilizio.

Al di là dei danni economici provocati dal crollo di un edificio, certamente superiore è la perdita di vite umane. Considerando l'abitazione quale luogo di rifugio dai pericoli esterni, si rende necessario garantire condizioni di sicurezza e serenità per la popolazione.

La vulnerabilità fisica degli edifici esistenti è stata attribuita a due categorie principali: degrado per vetustà e degrado per ragioni costruttive, rispettivamente riferiti al periodo di costruzione e al contesto produttivo.

Sulla base di questi parametri gli alloggi italiani che il Censis individua come insieme da sottoporre a verifica risultano pari a 3.575.000, di cui il 36,5 % per ragioni di anzianità ed il 63,5% per cause tecniche.

I rischi di bassa qualità tecnica degli edifici e di scarse verifiche progettuali sono dovuti al rapido processo di edificazione.

### **1.4.4 Atti terroristici, conflitti armati**

#### *1.4.4.1 Definizione e cause*

Con terrorismo si intende un atto o una minaccia di violenza o un atto suscettibile di pregiudicare la vita umana, i beni mobili o immobili o le infrastrutture con l'effetto di seminare terrore tra la gente o determinati gruppi di persone.

La storia dimostra che il fenomeno non è una novità degli ultimi anni ma l'11 settembre 2001 con i devastanti attacchi alle torri gemelle di New York e al Pentagono a Washington hanno dimostrato che questo genere di minaccia ha assunto dimensioni sconcertanti e precedentemente inimmaginabili. Anche se i disastri antropici sono casuali, ci sono alcuni paesi particolarmente esposti al rischio terroristico. In Tabella 1.10 si riportano i dati degli atti terroristici più gravi per numero di vittime, degli ultimi decenni.

## **1.5 STATISTICHE DEI DISASTRI NATURALI E ANTROPICI**

Al fine di avere una stima delle perdite, in termini economici e di vite umane, che queste catastrofi producono, si è deciso di riportare alcune statistiche. La fonte di tutti i dati di seguito riportati è una compagnia assicurativa (Swiss Re) che ogni anno stila e pubblica delle tabelle che riportano i dati di tutti gli eventi calamitosi che si sono verificati specificando il numero di vittime causato ed i danni riportati in termini di milioni di dollari americani. Tutti i dati disponibili sono stati rielaborati al fine di confrontare e discutere i risultati.

Tabella 1.10: Atti terroristici più gravi per numero di vittime

| Data     | Località       | Vittime | Evento                                                                     |
|----------|----------------|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| 23/10/83 | Libano         | 300     | Attentato dinamitardo su base militare US e francese a Beirut              |
| 21/12/88 | Gran Bretagna  | 270     | Un Boeing 747 della Panam precipita su Lockerbie dopo un'esplosione        |
| 04/06/91 | Etiopia        | 100     | Incendio doloso in un magazzino di armi ad Addis Abeba                     |
| 12/03/93 | India          | 300     | Serie di 13 attentati dinamitardi a Bombay                                 |
| 19/04/95 | USA            | 166     | Attentato dinamitardo al palazzo federale di Oklahoma City                 |
| 23/11/96 | Oceano indiano | 127     | Boeing 767-260 dell'Ethiopian Airlines viene dirottato e precipita in mare |
| 07/08/98 | Kenya          | 253     | Due attentati dinamitardi all'ambasciata americana a Nairobi               |
| 31/01/99 | Sri Lanka      | 100     | Attentato dinamitardo alla Ceylinco House a Colombo                        |
| 13/09/99 | Russia         | 118     | Bomba distrugge un palazzo di abitazioni a Mosca                           |
| 11/09/01 | USA            | 3000    | Attacchi terroristici al WTC, Pentagono ed altri edifici                   |

Considerando il bilancio delle catastrofi naturali dal 1885 al 2003 (Sigma ,Swiss Re) in termini di vittime e perdite economiche, si può notare che il numero di morti diminuisce con il grado di civilizzazione e di sviluppo del paese.(Fig.1.11 a.)

Le società che infatti hanno la possibilità di investire di più per la protezione di vite umane hanno un minor numero di vittime quando si verifica una catastrofe. E' però vero che i disastri generati dall'uomo sono più frequenti nei paesi industrializzati. A livello mondiale, negli ultimi trenta anni, le catastrofi naturali hanno provocato mediamente ogni anno la morte di più di undici persone per milione di abitante. Nei paesi in via di sviluppo questo numero sale a quattordici mentre nei paesi più industrializzati tale numero si riduce a due vittime per milione di abitante.

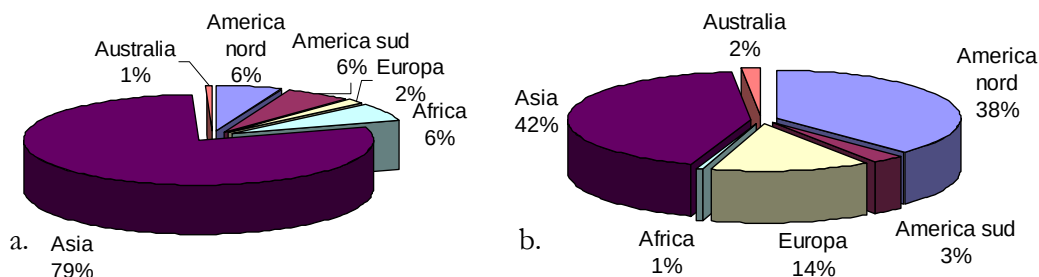


Figura 1.11 :Distribuzione geografica delle vittime (a) e delle perdite economiche dovute a catastrofi naturali dal 1885 al 2003

### 1.5.1 Catastrofi naturali

Per catastrofe naturale s'intende un evento dannoso provocato dalle forze della natura, certamente l'entità di una catastrofe non dipende soltanto dalla furia degli elementi, ma anche da fattori di rilevanza umana, quali ad esempio le tecniche di costruzione o la qualità delle misure di prevenzione nella regione interessata. Nel caso di danni a persone possono influire anche altri fattori accidentali, come, ad esempio, l'ora in cui si manifesta l'evento che, soprattutto nel caso di terremoti, incide sul numero delle vittime. In questo lavoro le catastrofi naturali sono suddivise in:

- inondazioni;
- tempeste;
- terremoti (compresi maremoti e tsunami);
- siccità, incendi boschivi;
- freddo, gelo;
- altre.

Dal 1995 al 2003 il maggior numero di catastrofi, addirittura il 62%, è da imputare all'azione dell'uomo; considerando le sole catastrofi naturali, le più numerose sono state le inondazioni, probabilmente a causa dei cambiamenti climatici, seguite dalle tempeste e dai terremoti come emerge dalla Fig.1.12 a.. Le principali cause di perdite economiche sono state le tempeste Fig.1.12 b., mentre il maggior numero di vittime è stato causato dai terremoti (circa 31%) seguiti dalle inondazioni (28%) Fig.1.12 c.

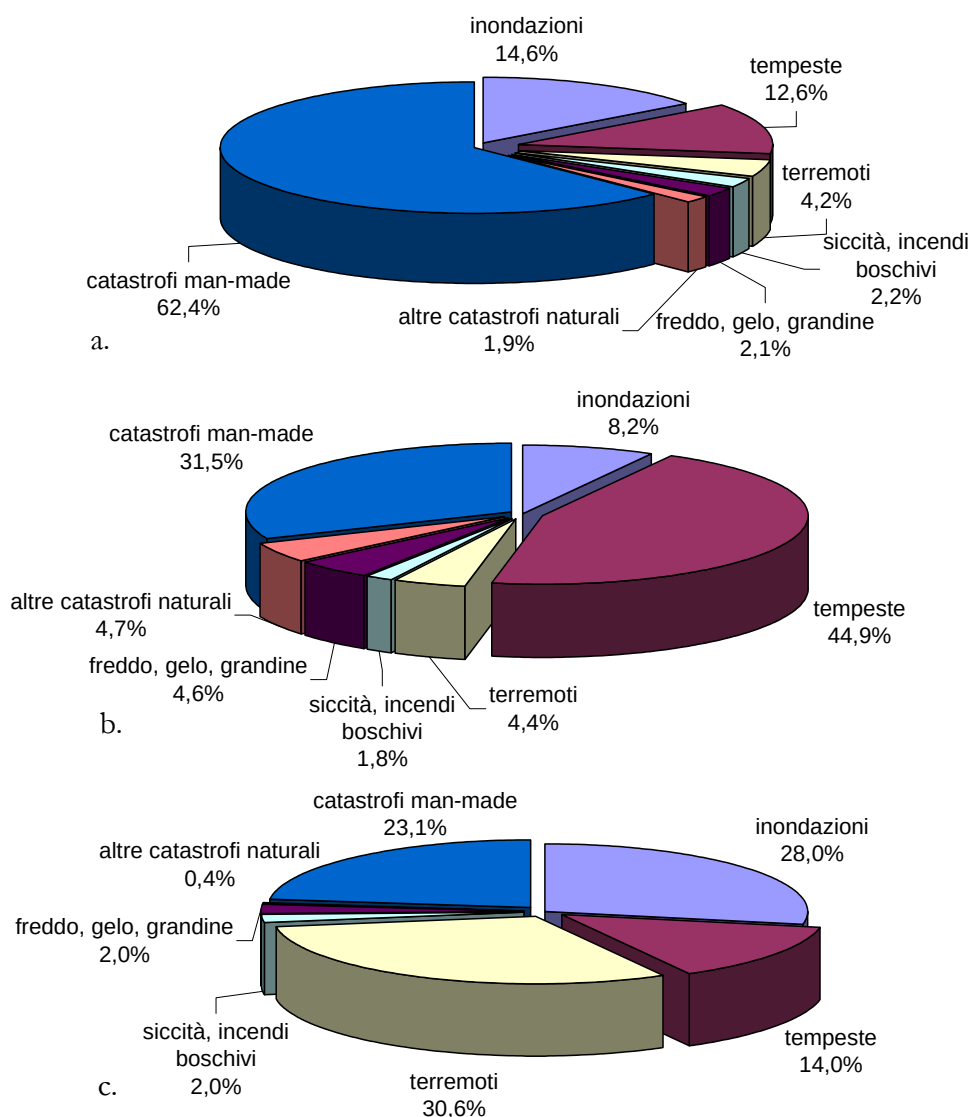


Figura 1.12 :Percentuale di eventi (a), perdite economiche (b) e vittime (c) dovute a catastrofi naturali (divise per categoria) e antropiche (man-made) dal 1995 al 2003

### 1.5.2 Catastrofi antropiche

A differenza delle catastrofi naturali, quelle antropiche avvengono in maniera assolutamente casuale, senza alcuna possibilità di determinazione con l'aiuto di dati e metodi scientifici. Questi incidenti sono causati spesso dalla disattenzione dell'uomo o da una scarsa manutenzione degli impianti, da negligenza nell'utilizzo di sistemi di sicurezza o da atti folli come quelli che più recentemente si stanno sviluppando ad opera di terroristi. Nell'ambito degli incidenti antropici sono inclusi anche quelli a piccola scala come gli incidenti stradali, ecco perché, dando uno sguardo alle statistiche, risultano più numerose le catastrofi antropiche rispetto a quelle naturali.

Si definiscono man-made le grandi catastrofi ricollegabili all'attività dell'uomo. Generalmente riguardano un bene di rilevante entità in un luogo circoscritto. In questo studio le catastrofi man-made sono suddivise in sette categorie:

- grandi incendi, esplosioni;
- catastrofi dell'aviazione;
- catastrofi della navigazione;
- catastrofi del traffico terrestre;
- incidenti in miniere e pozzi;
- crolli di edifici e ponti;
- vari.

Nell'ultima categoria sono compresi gli atti terroristici, i conflitti armati, le sommosse e tutte le altre catastrofi non riconducibili alle categorie prima menzionate.

In Fig.1.13 si riporta un confronto tra il numero di catastrofi causato da incidenti naturali e quelli man-made. Tra le categorie di catastrofi antropiche appare evidente il maggiore peso delle catastrofi riconducibili al traffico terrestre non solo in termini di frequenza ma anche in termini di numero di vittime, in Fig. 1.14 infatti, dove sono rappresentate le percentuali del numero di vittime da imputare ai disastri causati dall'uomo, il 27% dei morti è provocato proprio da questi incidenti.

I maggiori danni sono causati invece da tutte quelle catastrofi menzionate nella categoria "vari", questo accade perché qui sono compresi gli atti terroristici che prendono di mira solitamente grandi edifici, strutture notevoli sia per ciò che esse rappresentano sia per le loro dimensioni. A queste seguono i danni provocati da incendi ed esplosioni.

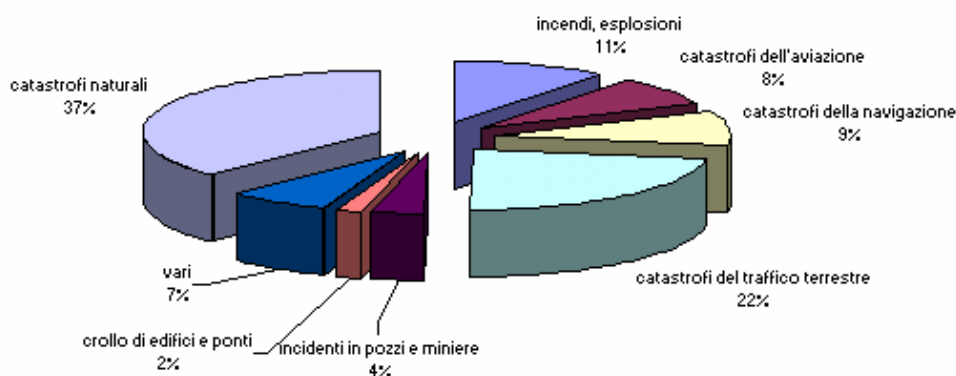


Fig. 1.13: Numero di catastrofi antropiche dal 1995 al 2003

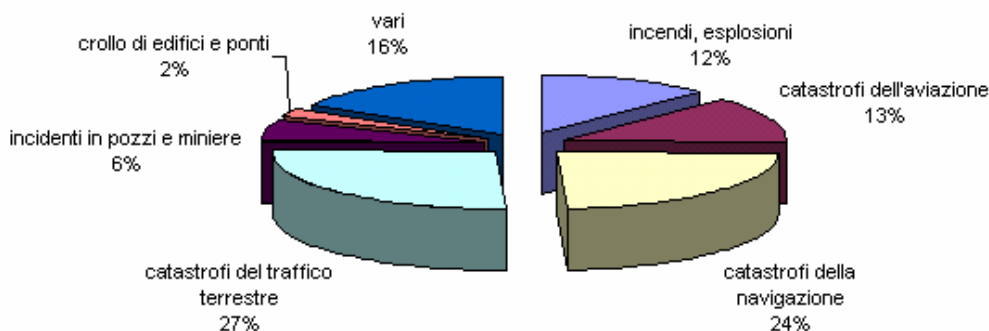


Fig.1.14: Vittime dovute a catastrofi antropiche dal 1995 al 2003

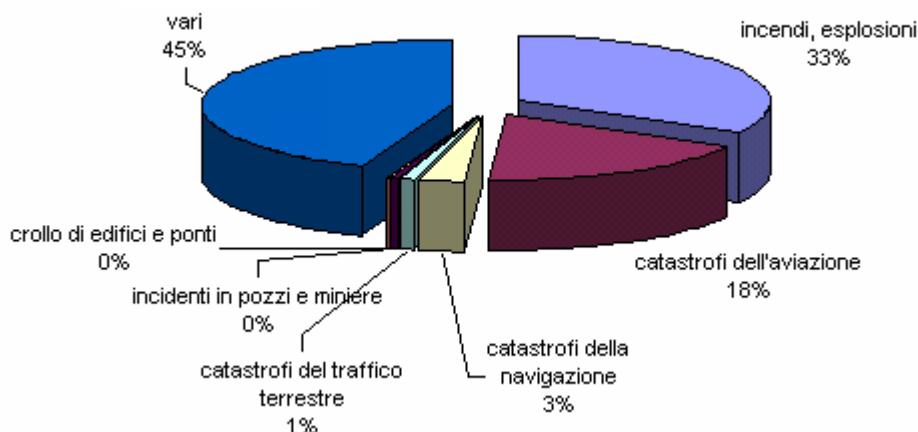


Fig.1.15: Danni dovuti a catastrofi antropiche dal 1995 al 2003

### 1.5.3 Tendenze degli ultimi anni

Dal 1970 le catastrofi naturali e quelle antropiche sono aumentate costantemente. Ciò può dipendere in parte dalle maggiori informazioni disponibili, in parte da una maggiore densità della popolazione e da una maggiore concentrazione di valori nei paesi industrializzati.

Il numero di catastrofi generate dalle inondazioni dal 1995 al 2003, come si può notare dalla (Fig.1.16), è cresciuto più che per tutti gli altri eventi naturali probabilmente a causa dei cambiamenti climatici che l'inquinamento sta provocando.

La tendenza degli ultimi anni delle catastrofi man-made ha invece portato ad una crescita delle catastrofi, già tra le più frequenti, generate dal traffico terrestre (Fig.1.17).



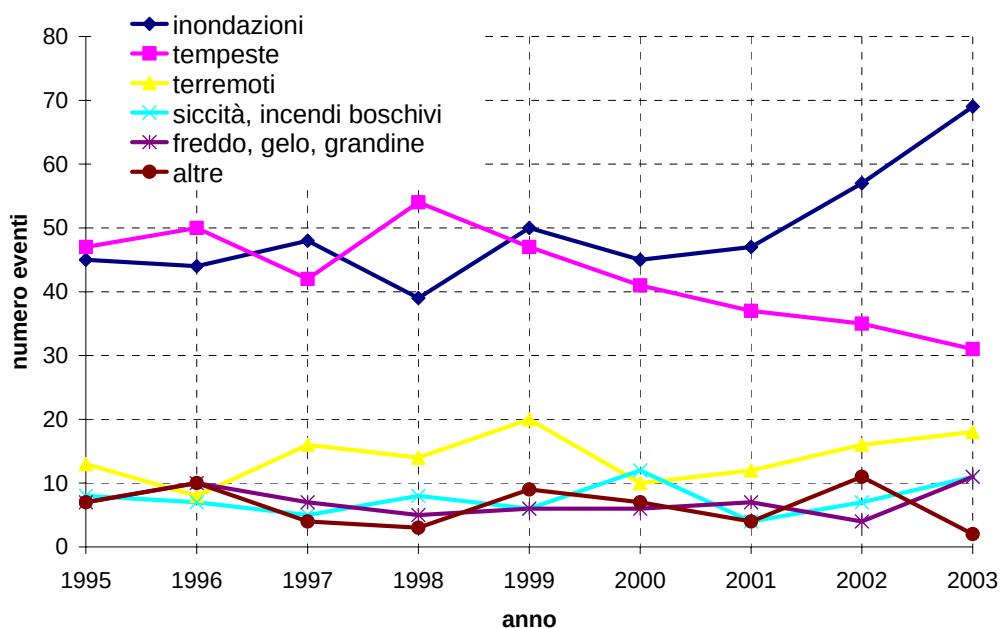


Fig. 1.16 : Tendenza degli ultimi anni del numero di catastrofi naturali suddivise per categorie

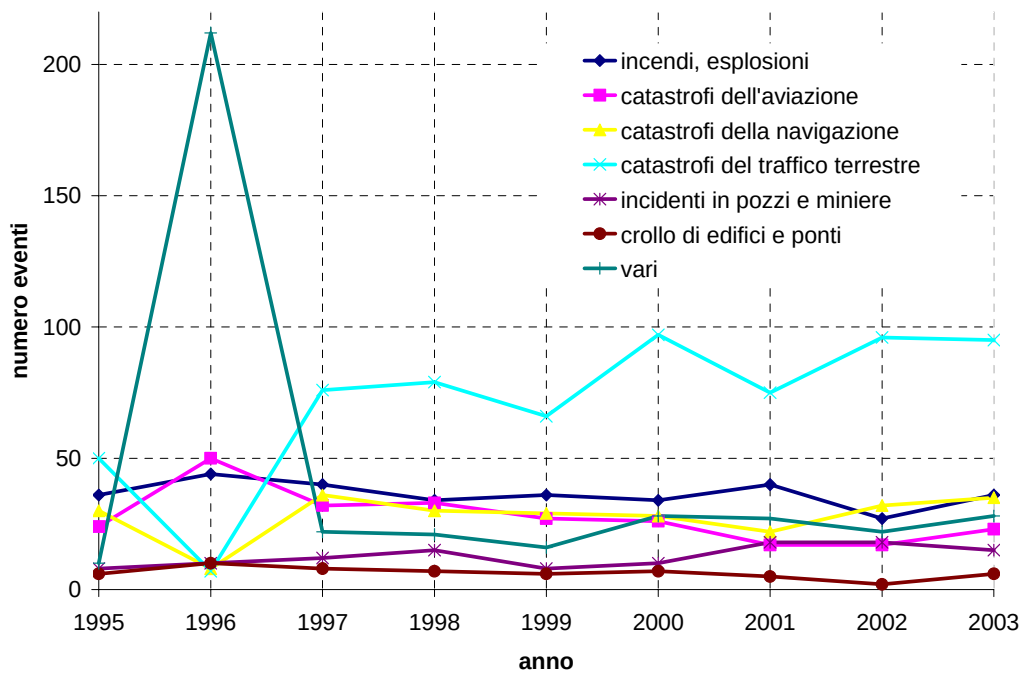


Fig. 1.17: Tendenza degli ultimi anni del numero di catastrofi antropiche suddivise per categorie

## Capitolo 2

### RISCHIO SISMICO E METODI DI VALUTAZIONE

#### 2.1 INTRODUZIONE

Il terremoto è un evento dannoso che ha spesso come conseguenza la distruzione o il grave danneggiamento di beni materiali e/o che comporta una sostanziale perdita di vite. Questo è certamente uno degli eventi dannosi generati dalle forze della natura più temuto dall'uomo per il gran numero di perdite di vite umane che esso provoca, in particolare, dalle statistiche dei disastri naturali e antropici si evince che è addirittura la principale causa di perdita di vite umane. Certamente l'entità di una catastrofe naturale non dipende solo dalla furia degli elementi, ma anche da fattori di rilevanza umana, quali ad esempio le tecniche di costruzione o la qualità delle misure di prevenzione nella regione interessata. Per questo motivo, per determinare l'impatto che i futuri terremoti potrebbero avere sulle costruzioni presenti in una determinata regione si fa riferimento alla valutazione del "rischio sismico" che richiede un'analisi separata di tre componenti di base: la "pericolosità", la "vulnerabilità", e l' "esposizione" la cui convoluzione definisce il rischio.

Il rischio sismico in un certo intervallo temporale, rappresenta la previsione delle perdite sociali ed economiche attese a seguito del verificarsi di un evento sismico stimato per l'area di riferimento durante tale intervallo temporale.

Seguendo tale approccio la pericolosità (o "hazard"), esprime la probabilità che si verifichi un processo fisico o un evento capace di causare delle perdite di vite umane o di beni; la vulnerabilità esprime la quantità di risorse suscettibili di essere persi in relazione all'evento; l'esposizione rappresenta il valore delle risorse a rischio. Definito così il rischio è intuibile che il verificarsi di un evento catastrofico nel deserto, ad esempio, comporta un rischio praticamente nullo visto che sono pressoché nulli i beni a rischio (esposizione).

Nel caso delle costruzioni, la vulnerabilità sismica di un edificio è la sua suscettibilità ad essere danneggiato da un terremoto e può essere espressa *"dall'insieme delle probabilità di raggiungere una serie di livelli di danneggiamento fino al collasso, valutate in funzione dell'intensità del sisma e condizionate dal suo verificarsi"* (Augusti e Ciampoli, 1999). Di conseguenza la vulnerabilità di un edificio dovrebbe essere definita da una relazione probabilistica tra intensità e livello di danneggiamento, in termini operativi, un'analisi di vulnerabilità deve valutare il danno prodotto da terremoti di varia intensità.

Definiti questi tre termini è necessario stabilire se lo studio viene eseguito a scopo preventivo (analisi di rischio) o per la gestione dell'emergenza (analisi di scenario). La scelta tra analisi di rischio e analisi di scenario dipende dalle finalità dello studio; stabilito il fine, per lo studio della vulnerabilità, cambia anche l'approccio da utilizzare, probabilistico per l'analisi di rischio, deterministico per l'analisi di scenario.

## 2.2 PERICOLOSITA', ESPOSIZIONE, VULNERABILITA' E RISCHIO SISMICO: DEFINIZIONI E INTERRELAZIONI

Si definisce rischio, in generale, la probabilità che a causa di un determinato evento un dato sistema funzionale (una persona o una comunità, un edificio o un complesso di costruzioni, un insediamento o una regione), nel corso di un assegnato periodo temporale (un anno, la vita nominale del sistema,...), subisca danni (meccanici, funzionali,...), e da questi derivino perdite per una collettività (coloro che occupano il sistema, gli abitanti di una regione o di una nazione, una classe sociale,...) riguardanti determinate risorse (vite umane, salute, standards, beni economici, valori culturali,...).

Il rischio può essere espresso come la convoluzione della pericolosità detta anche hazard, dell'esposizione e della vulnerabilità.

L'hazard, o anche pericolosità, esprime la probabilità che si verifichi un processo fisico o un evento capace di causare delle perdite di vite umane o di beni; mentre la vulnerabilità esprime la quantità di risorse suscettibili di essere persi in relazione all'evento, l'esposizione rappresenta il valore i risorse a rischio. Definito così il rischio è intuibile che il verificarsi di un evento catastrofico nel deserto, ad esempio, comporta un rischio praticamente nullo visto che sono pressoché nulli i beni a rischio (esposizione).

Il rischio sismico, in particolare, rappresenta la probabilità che una struttura (sistema funzionale) superi un prefissato stato limite (danno) a causa di un terremoto (evento) nel corso di un assegnato periodo di tempo. Tale definizione è la trasposizione, all'ambito dell'ingegneria sismica, del più generale concetto di affidabilità di un sistema. Dunque il rischio sismico non è altro che il complemento ad uno dell'affidabilità del sistema strutturale nel periodo di osservazione.

Evidentemente, come detto, il rischio è legato alla probabilità che si verifichi un evento di date caratteristiche, e al danno che tale evento può arrecare. Per quanto riguarda il danno, è necessario distinguere il danno alle persone e il danno alle strutture. Per ridurre entro limiti ragionevoli il rischio, occorre imporre due diverse condizioni di progetto:

1. (Stato limite di danno), le strutture devono essere progettate in modo da poter sopportare in regime elastico le sollecitazioni indotte dall'evento la cui intensità corrisponde, con riferimento alle caratteristiche della zona in esame, per un periodo di ritorno dell'ordine della vita nominale della struttura (nel caso di terremoti si assume in generale per gli edifici normali per abitazioni un periodo di ritorno di 50 anni) ;
2. (Stato limite ultimo), le strutture devono possedere sufficienti riserve di resistenza, oltre il limite elastico, per sopportare senza crolli le azioni di un evento di intensità tale da fare ritenere estremamente improbabile il verificarsi di un evento di intensità maggiore. L'evento che deve essere considerato in questa seconda condizione di progetto è quindi caratterizzato da un periodo di ritorno di 475 anni.).

E' evidente, da quanto sopra, che la condizione 1) tende soprattutto a limitare i danni per le costruzioni, mentre la condizione 2) fa chiaro riferimento alla salvaguardia della vita umana.

### 2.2.1 Analisi di tipo probabilistico e di tipo deterministico

Eseguire un'analisi di vulnerabilità sismica significa valutare la consistenza del costruito diffuso in una data area, sia in termini quantitativi che qualitativi, ed in particolare stimare la sua propensione ad essere danneggiato dal sisma. Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità deve quindi precisare come eseguire il censimento, più o meno dettagliato, del costruito e delle sue caratteristiche e definire opportuni modelli che correlino la severità dell'evento sismico con gli effetti in termini di danneggiamento fisico e di perdite, economiche o di vite umane. Eseguita quindi l'analisi di vulnerabilità e nota la pericolosità sismica dell'area in esame, ovvero le caratteristiche dell'evento sismico atteso nella regione, eventualmente differenziate per considerare gli effetti di amplificazione locale (microzonazione), è possibile stimare la distribuzione dei danni al costruito. Qualora lo studio di pericolosità sia condotto in termini *probabilistici*, anche le conseguenze strutturali ed economiche saranno espresse probabilisticamente: tale approccio configura quella che viene denominata *un'analisi di rischio*.

Nel caso invece in cui la sismicità sia studiata su base *deterministica*, estraendo da un catalogo di sismicità storica uno o più terremoti significativi o simulando con modelli teorico-numerici i meccanismi di sorgente e la propagazione delle onde sismiche, si esegue *un'analisi di scenario*, ovvero si valutano gli effetti sul territorio a seguito di uno specifico evento sismico.

La scelta tra analisi di rischio e analisi di scenario dipende dalle finalità dello studio. Nel caso di uno studio del territorio a fini preventivi, l'analisi di rischio è preferibile in quanto cumula gli effetti di tutte le potenziali sorgenti sismiche dell'area e fornisce una valutazione comparabile tra i diversi comuni interessati dallo studio. Per analizzare invece gli aspetti di gestione dell'emergenza legati alla protezione civile è più significativa un'analisi di scenario, in quanto riproduce una distribuzione realistica degli effetti sul territorio, fatto che consente di elaborare strategie per il post-terremoto.

## 2.3 L'UTILIZZO DEL GIS PER LA RAPPRESENTAZIONE E LA SIMULAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

### 2.3.1 Caratteristiche del GIS

Un GIS (Sistema Geografico Informatizzato) è uno strumento informatico che consente di archiviare, analizzare, rappresentare e interrogare dati geografici; attraverso il GIS è possibile, inoltre, cogliere le interazioni tra dati con una significativa correlazione spaziale. Per queste sue potenzialità il GIS è l'ambiente ideale all'interno del quale sviluppare un'analisi multidisciplinare quale quella di rischio sismico, che richiede un'analisi integrata tra valutazioni di pericolosità, identificazione dell'esposto e valutazione della vulnerabilità delle costruzioni.

Il (GIS) è una struttura composta da tecnici, strumentazioni hardware, software e procedure che ha lo scopo di acquisire dati, elaborarli e produrre informazioni. Questa struttura viene realizzata nell'ambito di un Ente avente giurisdizione territoriale con compiti di pianificazione ed intervento, il quale utilizza le informazioni prodotte dal GIS per dare massima efficacia alle decisioni che deve prendere.

Scopo del GIS è quello di acquisire dati di conoscenza del territorio, dati sulle strutture su di esso esistenti, dati sulle attività sismiche possibili e rappresentare scenari conseguenti a eventi sismici. In sintesi il GIS deve essere in grado di gestire

un'emergenza post-terremoto e cioè: nel momento in cui vengono rese disponibili le caratteristiche (magnitudo e coordinate epicentrali) di un evento sismico, il GIS deve essere in grado di generare in tempo reale una serie di mappe relative al danneggiamento previsto per le infrastrutture in modo da consentire una stima dei tempi di ripristino (reti elettriche) o dei percorsi alternativi (reti viarie) o dei possibili effetti indotti sull'ambiente e sulla popolazione (impianti industriali). Nell'ambito di questo schema concettuale il GIS dovrebbe essere impostato secondo una struttura client-server, e cioè: tutti i dati dovrebbero essere residenti su un server centrale collegato in rete con una serie di possibili utenti.

Il modello concettuale del GIS prevede

- che vengano acquisiti dati,
- che vengano effettuate elaborazioni,
- che vengano fornite rappresentazioni tematiche.

### 2.3.1.1 *Acquisizione dati*

Il modello concettuale del GIS prevede che vengano acquisiti i seguenti dati

a) Dati di conoscenza del territorio consistenti in:

- cartografia tecnica in formato vettoriale o raster
- cartografia tematica
- terreno digitale
- ortofoto

b) Rete viaria in formato vettoriale

c) Rete delle linee elettriche di alta tensione in formato vettoriale

d) Infrastrutture, rappresentate come entità vettoriali di tipo puntuale

e) Dati descrittivi della rete viaria, delle linee elettriche e delle infrastrutture

f) magnitudo e coordinate epicentrali di un fenomeno sismico

g) la mappa della pericolosità sismica a scala nazionale.

### 2.3.1.2 *Elaborazioni*

Il modello concettuale del GIS prevede che vengano effettuate le seguenti elaborazioni:

- a) calcolo degli effetti di sito relativi ad un fenomeno sismico di magnitudo e coordinate epicentrali dati per un qualsiasi punto del territorio; tale calcolo verrà effettuato in modo più o meno raffinato a seconda dei dati che verranno forniti dagli altri task. Come ipotesi minimale l'effetto di sito in un generico punto P che sia posto a una distanza epicentrale R di un sisma di magnitudo M sarà calcolato con l'espressione:

$$PGA = \frac{0.0274e^{0.0704M} e^{0.39s}}{D} \quad (2.1)$$

$$D = \sqrt{R^2 + 5.8^2} \quad (2.2)$$

- b) memorizzazione degli effetti di sito calcolati in file di scambio con i programmi predisposti dagli altri task per la valutazione della vulnerabilità delle strutture.

c) acquisizione dei risultati delle elaborazione dei programmi di valutazione della vulnerabilità tramite file di scambio.

### 2.3.1.3 Rappresentazioni tematiche

Il modello concettuale del GIS prevede che vengano fornite rappresentazioni tematiche consistenti nella visualizzazione dello scenario derivante dai dati forniti dai programmi di valutazione di vulnerabilità.

Il GIS deve essere in grado di gestire due tipi di dati: i dati di tipo cartografico, che costituiscono il *database cartografico*, e i dati descrittivi, che costituiscono il *database descrittivo*. I dati contenuti nei due database sono gestiti da due differenti software che colloquiano tra di loro mediante opportuni motori di interfaccia.

Una delle principali caratteristiche di un GIS è infatti quella di consentire due diversi tipi di interrogazione: nel primo caso si effettua una selezione sul database cartografico e, in funzione di questa, si accede al database descrittivo; nel secondo caso si procede in ordine inverso, cioè si effettua una selezione sul database descrittivo e si accede al database cartografico. Ad esempio, nel primo caso, una selezione sulla cartografia della pericolosità sismica che interroghi sulle zone con pericolosità superiore ad un prefissato livello, consente di individuare nel database descrittivo tutte le opere infrastrutturali comprese in queste zone.

Nel secondo tipo di interrogazione, invece, una selezione sul database descrittivo di una certa tipologia di infrastruttura (ad esempio tutti i ponti a travata con luce superiore a un prefissato valore) chiederà al software di mostrarne l'ubicazione sul database cartografico.

### 2.3.2 Un esempio di applicazione del GIS in Italia

Nell'ambito di una collaborazione tra l'Università di Genova e il Dipartimento di Protezione Civile della Regione Liguria, si sta sviluppando il progetto "Analisi di Rischio Sismico nella Liguria", il cui fine è la realizzazione di uno strumento GIS per la rappresentazione e la simulazione del rischio sismico a scopi di protezione civile. La scelta del GIS non è casuale, infatti l'ultimo decennio ha visto un sempre più vasto e svariato impiego di sistemi geografici informatizzati (GIS) per scopi di gestione del rischio, che è andato di pari passo con lo sviluppo e l'accrescimento delle potenzialità di questi sistemi (Coburn e Spence 1992).

In Italia, pur non essendo stato ancora definito uno strumento univocamente riconosciuto per la valutazione degli scenari di rischio sismico, sono stati moltissimi gli sforzi fatti dalla comunità scientifica e dagli enti pubblici e di ricerca sia per la conoscenza del territorio che per la messa a punto delle metodologie necessarie alle analisi.

Il GNDT ha in corso un progetto finalizzato alla realizzazione di scenari rivolti alla tutela dei centri storici. Nell'ambito di questo progetto sono state definite la struttura sismogenetica e sismotettonica; il moto sismico, gli effetti di sito e interazione; la gestione informatica dei dati.

L'organizzazione delle basi di dati e della cartografia acquisita all'interno del GIS è avvenuta secondo la definizione di rischio sismico, inteso come la convoluzione delle analisi di pericolosità, esposizione e vulnerabilità al fine di creare gli scenari delle perdite.

### 2.3.2.1 *Valutazione della pericolosità*

Per la definizione della pericolosità si stanno tracciando le mappe contenenti la localizzazione delle strutture sismogenetiche, riconosciute come potenziali sorgenti sismiche, e raccogliendo i piani quotati relativi ai terremoti storici e quelli relativi alle registrazioni strumentali; sulla base di questa cartografia e dei dati ad essa associati, risulterà così possibile posizionare i terremoti di scenario da utilizzare nelle analisi deterministiche, descritti da valori di magnitudo plausibili. Partendo dalle diverse unità litologiche distinte dagli strumenti urbanistici sarà operato un accorpamento in un numero limitato e significativo di classi di suolo.

La valutazione della pericolosità può essere condotta in termini probabilistici o deterministici a patto che si scelga di rappresentare l'input sismico in modo coerente rispetto all'input scelto nel metodo adottato per la valutazione della vulnerabilità degli edifici. In questo caso l'input sismico è rappresentato in termini di intensità macrosismica, lo stesso adottato nel metodo macrosismico per la valutazione della vulnerabilità.

Per quanto riguarda l'approccio probabilistico, l'analisi della pericolosità sismica è stata effettuata utilizzando una procedura standard (Cornell 1968, Kramer 1995) che, cumulando gli effetti di tutte le potenziali sorgenti sismiche dell'area, produce mappe rappresentative del livello di input sismico (in questo caso espresso in intensità macrosismica) atteso in ciascun punto del territorio per prefissati periodi di ritorno; nel presente studio la pericolosità sismica è stata stimata in termini di intensità macrosismica per periodi di ritorno di 475 e 100 anni.

Per quanto riguarda l'approccio deterministico, è stata realizzata una procedura automatica implementata su supporto GIS che, una volta definito un epicentro in termini di posizione e magnitudo, consente di simulare lo scenario di scuotimento sulla base della legge di attenuazione stabilita per l'area in esame. A corredo di questo preliminare scenario sismico, verranno fornite le indicazioni, sia in termini di posizione che di intensità epicentrale, di potenziali sorgenti sismiche; tali informazioni consentiranno alla Protezione Civile di realizzare scenari deterministici rispetto ai quali sviluppare e tarare i piani di protezione civile in diverse aree del territorio regionale.

Al fine di ottenere scenari di danno fisico e scenari di perdite economiche si è posto il problema di come avrebbero dovuto interfacciarsi le valutazioni di pericolosità con quelle di vulnerabilità; il problema è stato risolto scegliendo un'unità di analisi comune ad entrambe. L'unità geografica da utilizzare è stata identificata in modo da ottenere un riferimento comune tra la minima area di rappresentazione dei dati di vulnerabilità (sezione censuaria) e quella scelta per la valutazione della pericolosità (zona caratterizzata dalla stessa litologia semplificata) a tal fine ciascuna sezione censuaria è stata "spezzata" rispetto alle diverse categorie di suolo che la caratterizzano. Questa operazione è stata realizzata attraverso un'interrogazione geografica, cioè una procedura facilmente implementabile in ambiente GIS.

La pericolosità è stata quindi valutata rispetto ad una griglia di punti corrispondenti all'insieme dei baricentri di queste aree, in modo che ciascuna di esse fosse caratterizzata da un valore di pericolosità. La vulnerabilità, invece, è stata determinata ripartendo i dati ISTAT di ciascuna sezione proporzionalmente alle aree delle porzioni in cui la stessa è risultata suddivisa

### 2.3.2.2 Valutazione dell'esposizione

L'esposizione è caratterizzata in termini di popolazione, costruito ordinario ed edifici strategici, utilizzando i dati ISTAT relativi al censimento della popolazione (ISTAT 1991) e la cartografia digitale. Essendo riferiti al singolo appartamento, piuttosto che all'intero edificio, i dati ISTAT sono impiegati in una forma opportunamente rielaborata per scopi di vulnerabilità (Meroni et al. 1999).

L'identificazione della popolazione e del costruito è basata sulla mappa digitale dei limiti censuari dove l'unità geografica minima di riferimento è la sezione censuaria, che consente, pur lavorando con dati aggregati e non riferiti al singolo edificio, di giungere a una conoscenza molto dettagliata e localizzata dei centri abitati.

Dal censimento ISTAT è possibile ottenere informazioni generali relative all'intera sezione censuaria e dati statistici sul costruito. I dati generali caratterizzano ciascuna sezione censuaria in termini di popolazione, numero e superficie di edifici, numero di unità abitative e tipo di zona urbana (centro, nucleo e case sparse) (Tabella 2.1).

Tabella 2.1: Campi identificativi generali associati a una sezione censuaria ISTAT.

| Campo        | Tipo           | Descrizione                                                             |
|--------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Codice ISTAT | Intero         |                                                                         |
| tipo_sez     | Intero         | Zona urbana (1 centro, 2 nucleo, 3 case sparse)                         |
| superficie   | Virgola mobile | Superficie totale degli edifici nella sezione censuaria                 |
| num_ed       | Virgola mobile | Numero totale di edifici nella sezione censuaria                        |
| num_unità    | Virgola mobile | Numero totale unità abitative nella sezione censuaria                   |
| num_abitanti | Virgola mobile | Numero totale di abitanti nella sezione censuaria                       |
| num_ab_na    | Virgola mobile | Numero totale di abitanti non associati ad abitazioni                   |
| sup_cor      | Virgola mobile | Superficie totale degli edifici considerando gli spazi non residenziali |

I dati generali sulla sezione possono essere agganciati alla mappa digitale dei limiti censuari, in modo univoco, attraverso il Codice ISTAT ottenuto combinando i codici identificativi della Regione, della Provincia, del Comune e della sezione censuaria (es. 7.008.055.001: Regione Liguria = 7, Provincia di Imperia = 008, Comune di San Remo = 005, Sezione censuaria n. 1 = 001). Per quanto riguarda i dati statistici sul costruito (Tabelle 2.2 e 2.3), la scheda ISTAT identifica gruppi omogenei di costruzioni dal punto di vista della tipologia (muratura, cemento armato, edifici a pilotis, altro e tipologia non identificata), del numero di piani (da 1 a 2 piani, da 3 a 5 piani, più di 5 piani) e contesto nell'aggregato (edificio isolato o in aggregato).

Per ciascuno dei gruppi omogenei identificati nella sezione sono disponibili informazioni circa il numero di edifici appartenenti a tale gruppo, una stima sul volume ed una sulla popolazione residente negli stessi edifici. I dati relativi a ciascun gruppo sono suddivisi in percentuali in base alla loro data di costruzione (sono distinte sette classi di età: antecedente al 1919, dal 1919 al 1945, dal 1946 al 1960, dal 1961 al 1971, dal 1971 al 1981, dopo il 1981, dopo la data di classificazione sismica). Vengono inoltre fornite informazioni sulla percentuale degli edifici in buona manutenzione rispetto alla percentuale di edifici riconosciuta.

La struttura dei dati ISTAT consente una descrizione del costruito in termini di tre quantità collegate alla sezione censuaria: la superficie costruita  $s$ , il numero di edifici  $e$  e il numero di abitanti  $a$  residenti negli edifici.



Tabella 2.2: Classi di età ISTAT.

| Classe ISTAT      | 1     | 2         | 3         | 4         | 5         | 6     | 7             |
|-------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Intervallo di età | <1919 | 1919-1945 | 1946-1960 | 1961-1971 | 1972-1981 | >1981 | >1981+classif |

Tabella 2.3: Campi identificativi del costruito associati a una sezione censuaria ISTAT.

| Campo     | Tipo           | Descrizione                                                                                                                               |
|-----------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipologia | Intero         | Codice tipologia costruttiva (1 pilotis, 2 cemento armato, 3 muratura, 4 altro, 5 ignoto)                                                 |
| Isolato   | Intero         | Codice edificio isolato (1 isolato, 2 in aggregato)                                                                                       |
| Num_piani | Virgola mobile | Codice numero di piani (1 uno o due piani, 2 da tre a cinque piani, 3 oltre cinque)                                                       |
| s*        | Virgola mobile | %, rispetto alla superficie totale, della superficie di edifici della classe di età considerata                                           |
| e*        | Virgola mobile | %, rispetto al numero totale di edifici, del numero di edifici della classe di età considerata                                            |
| a*        | Virgola mobile | %, rispetto al numero totale di abitanti, del numero di abitanti residenti in edifici della classe di età considerata                     |
| sm*       | Virgola mobile | % della superficie di edifici in buono stato di manutenzione, rispetto alla superficie degli edifici della classe di età considerata      |
| em*       | Virgola mobile | % del numero di edifici in buono stato di manutenzione, rispetto al numero di edifici della classe di età considerata                     |
| am*       | Virgola mobile | % n. di abitanti residenti in edifici in buono stato di manutenzione, rispetto al n. di abitanti residenti in edifici della classe di età |

\*Campi associati a ognuna delle 7 classi di età definite dalla scheda ISTAT (cfr. Tabella 2).

### 2.3.2.3 Valutazione della vulnerabilità

Per la valutazione della vulnerabilità si è scelto di adottare quello di Giovinazzi e Lagomarsino (2003). Il metodo proposto esamina il singolo edificio su base tipologica, affinando successivamente la valutazione attraverso i fattori che potrebbero influenzare la risposta dell'edificio sotto azione sismica e dunque la sua vulnerabilità.

Il metodo utilizzato per la valutazione della vulnerabilità è stato sviluppato per il costruito ordinario introducendo un indicatore sintetico, l'Indice di Vulnerabilità  $V_I$  ( $-0.02 \leq V_I \leq 1.02$ ), che è definito sia su base tipologica, identificando l'edificio o la classe di edifici come appartenente a una certa tipologia edilizia considerando poi tutti quei fattori in grado di influenzare la risposta sismica della costruzione. L'indice di vulnerabilità è così definito come:

$$V_I = V_I^b + \Delta V_m \quad (2.3)$$

dove  $V_I^b$  è l'indice di vulnerabilità di base della tipologia e  $\Delta V_m$  è il punteggio totale dei modificatori di comportamento.

Tale indice va riferito anch'esso alla sezione censuaria prima definita, pertanto è necessario calcolare l'indice di categoria relativo all'unità d'analisi:

$$V_I^c = V_I^{cb} + \sum r_i^c * \Delta V_{m,i} \quad (2.4)$$

dove  $V_I^{cb}$  è l'indice di vulnerabilità di base della categoria,  $r_i^c$  e  $\Delta V_{m,i}$  sono rispettivamente la percentuale (di superficie costruita  $s$ , del numero di edifici  $e$  o del

numero di abitanti  $a$ ) del modificatore riferita alla categoria considerata e il punteggio dello stesso modificatore di comportamento. Va precisato che l'indice di vulnerabilità  $V_I^{cb}$  di ciascuna categoria è stato attribuito come combinazione delle tipologie edilizie definite dal modello di vulnerabilità utilizzato e le percentuali di combinazione sono state stabilite in base a un giudizio esperto. Per quanto riguarda i punteggi  $\Delta V_{m,i}$  invece, sono stati impiegati i valori proposti dalla metodologia utilizzata (Giovinnazzi e Lagomarsino 2003).

Una volta ottenuta una stima della vulnerabilità delle singole categorie è immediato ottenere l'indice relativo all'intera unità di analisi:

$$V_I^U = \sum r_j^U * V_{I,j}^C \quad (2.5)$$

dove  $r_j^U$  è la percentuale (di superficie costruita  $s$ , del numero di edifici  $e$  o del numero di abitanti  $a$ ) delle singole categorie all'interno dell'unità di analisi considerata e  $V_{I,j}^C$  è l'indice di vulnerabilità delle stesse categorie. Volendo infine stimare la vulnerabilità della sezione censuaria, il procedimento è stato del tutto analogo: l'indice di vulnerabilità  $V_{I,k}^U$  delle unità di analisi facenti parti della sezione censuaria originaria è stato riaggregato in ragione della percentuale di area  $r_k^S$  delle stesse unità:

$$V_I^S = \sum r_k^S * V_{I,k}^U \quad (2.6)$$

Tale metodologia per la valutazione della vulnerabilità sarà ampiamente discussa nel Capitolo 3.

#### 2.3.2.4 *Analisi del rischio sismico*

La valutazione del rischio, dopo aver definito la pericolosità, l'esposizione e la vulnerabilità, si concretizza generalmente nella stima delle perdite attese in termini di vite umane, di beni (in particolare edifici) e perdite economiche e quindi nella definizione di scenari di danno. In funzione del tipo di hazard considerato, gli scenari sono connotati da un punto di vista deterministico o probabilistico.

Gli scenari deterministici si prestano ad essere utilizzati nella fase di gestione dell'emergenza, cioè quando l'evento sismico è un dato oggettivo; viceversa la descrizione probabilistica, si inserisce nell'ambito della prevenzione e della pianificazione.

Indipendentemente dalla caratterizzazione scelta, uno scenario di danno deve poter rappresentare in maniera efficace l'impatto di un evento sismico sul territorio, nei confronti dei principali elementi esposti (persone, beni, economia, ecc.); dunque è necessario definire determinati parametri significativi del rischio.

Un parametro rappresentativo del danno apparente medio subito dagli edifici: il grado di danno medio  $\mu_D$ , cioè la media dei gradi di danno  $D_k$  ( $k = 0,1,2,3,4,5$ ) definiti dalla scala EMS-98 (Grunthal 1998), pesati sulle probabilità (scenario probabilistico) o frequenze (scenario deterministico) di accadimento  $p_k$ :

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 p_k * D_k \quad (2.7)$$

Nota l'intensità sismica e valutato l'indice di vulnerabilità è possibile valutare il grado di danno medio mediante l'equazione analitica in forma chiusa:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25 * V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (2.8)$$

Una volta stabilita la distribuzione dei danni è stato possibile risalire alle percentuali di edifici crollati ed inagibili, mediante relazioni empiriche dedotte da precedenti eventi sismici; e analogamente effettuare una stima dei morti e feriti gravi, e dei senzatetto, sulla base dei danni riportati dalle costruzioni (Bramerini et al. 1995).

## Capitolo 3

# VULNERABILITÀ SISMICA DEL COSTRUITO ORDINARIO

### 3.1 INTRODUZIONE

La vulnerabilità esprime la quantità di risorse suscettibili di essere perse in relazione all'evento. Nel caso delle costruzioni, la vulnerabilità sismica di un edificio è la sua suscettibilità ad essere danneggiato da un terremoto; in termini operativi, un'analisi di vulnerabilità deve valutare il danno prodotto da terremoti di varia intensità. A tale scopo possono essere utilizzati diversi approcci che configurano uno scenario abbastanza vario di metodologie di analisi della vulnerabilità sismica. Questi metodi di analisi sono classificati, in maniera più o meno completa, ora prendendo in considerazione l'approccio della metodologia, ora la base di dati utilizzata.

Tra i vari metodi di analisi attualmente in uso, si è scelto di analizzare gli aspetti principali della Metodologia di I e II livello del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito, del modello alla base del software Hazus (1999) sviluppato dalla U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA) ampiamente utilizzato negli Stati Uniti per la valutazione delle potenziali perdite provocate da terremoto, inondazioni e da uragani ed infine è stata esaminata la metodologia elaborata nell'ambito del progetto europeo Risk-Ue denominato "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns".

Il I livello della metodologia del GNDT è un metodo definito tipologico basato sull'analisi delle caratteristiche degli elementi costitutivi dell'edificio che vengono raccolte tramite schede. Questa metodologia non fornisce una valutazione sul singolo fabbricato, ma semplicemente lo enumera all'interno di un insieme di edifici della stessa classe di vulnerabilità, rappresentativa di tipologie diverse e variegata. Individua all'interno del costruito ordinario diverse tipologie edilizie e definisce alcune classi di vulnerabilità (A, B e C), per ciascuna delle quali viene precisata la relazione tra input sismico e danno, attraverso matrici di probabilità di danno. Viene quindi stabilita una corrispondenza diretta tra tipologia edilizia e classe di vulnerabilità. La distribuzione probabilistica dei danni, indicata per ciascuna classe di vulnerabilità per i diversi livelli dell'intensità sismica, è ottenuta sulla base dei danni effettivamente rilevati a seguito dei principali eventi sismici che hanno interessato il territorio nazionale. Il II livello della metodologia del GNDT è un metodo semeiotico basato sulla raccolta di informazioni tipologiche e costruttive su ogni singolo edificio, queste vengono combinate attraverso punteggi indipendenti per definire un indice di vulnerabilità  $I_V$  che caratterizza la propensione dell'edificio al danneggiamento. L'indice di vulnerabilità è definito in base ad undici parametri che sono stati ritenuti idonei a caratterizzare il comportamento sismico di un edificio. Per ogni parametro sono state definite 4 classi ad ognuna delle quali è assegnato un punteggio numerico  $p_p$ , ad ogni parametro è assegnato un peso  $w_p$ . L'indice di vulnerabilità  $I_V$  è definito come somma pesata dei punteggi relativi ad ogni parametro.

Il software Hazus invece contiene modelli per la valutazione delle potenziali perdite provocate da terremoto, inondazioni e da uragani. Questo utilizza un approccio basato sul confronto tra capacità e richiesta e individua famiglie circoscritte di strutture cui si associa una curva di capacità che definisce il livello di danneggiamento della struttura al variare dell'intensità macrosismica e per una prefissata vulnerabilità ed una deviazione standard. La valutazione della domanda sismica viene effettuata utilizzando il metodo dello spettro. Tutte le informazioni vengono riportate nel software geografico d'informazione (GIS) per tracciare e visualizzare i dati di rischio.

La recente metodologia proposta nell'ambito del progetto europeo Risk-Ue prevede tre livelli di analisi per la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito europeo. Il primo livello basato solo su studi tipologici e su vulnerabilità osservate. E' un metodo di tipo macrosismico in cui la valutazione è espressa in termini di un **indice di vulnerabilità** in funzione del quale è possibile ottenere la rappresentazione del danno, noto l'input sismico. Definita la classe di appartenenza dell'edificio considerato all'interno della Building Typology Matrix (BTM) rappresentativa del costruito europeo, è possibile definire immediatamente l'indice di vulnerabilità tipologico, caratteristico di quella determinata tipologia di edifici. L'indice di vulnerabilità finale sarà fornito dalla somma di questo indice tipologico e di un fattore modificatore di comportamento che tiene conto della interazione della costruzione all'interno dell'aggregato, delle caratteristiche costruttive locali, dello stato di manutenzione, etc.

Il secondo livello della metodologia è di maggiore dettaglio, prevede infatti la definizione della geometria, dei parametri dinamici e strutturali dell'edificio basato sulla definizione della capacità, della domanda e della prestazione dell'edificio, fa uso in parte degli studi tipologici ed in parte di modelli meccanici semplificati e verrà trattato in dettaglio nel Cap.5. Il terzo livello richiede la definizione di una modellazione di tutta la costruzione ed analisi numeriche dettagliate, non è adatto ad uno studio a scala territoriale e non verrà trattato nell'ambito di questo lavoro.

Il metodo adottato per la valutazione della vulnerabilità sismica implementato nell'ambito del progetto Risk-Ue è di tipo macrosismico, basato, quindi, sull'osservazione dei danni. La definizione di un metodo macrosismico richiede la disponibilità di dati relativi al danno osservato a seguito di fenomeni sismici di diversa intensità. L'Italia ha una grossa tradizione in tal senso con dati rilevati a seguito dei principali eventi sismici ma, la disponibilità di rilievi del danno sismico non è comune a tutti i paesi europei; inoltre i dati disponibili sono confrontabili solo a fronte di diverse assunzioni essendo rilevati secondo criteri diversi. Per ovviare a questi problemi, il metodo è stato derivato facendo riferimento alla scala macrosismica europea EMS-98

Alla EMS-98 sono state apportate delle modifiche con l'introduzione di altre tipologie costruttive e si è eseguita una interpretazione mista (probabilistica e fuzzy) delle definizioni in essa contenute. Particolare rilievo è stato dato alla derivazione del metodo utilizzato per la definizione degli indici di vulnerabilità degli edifici e dei fattori modificatori di comportamento (Giovinazzi e Lagomarsino, 2001). La peculiarità di questo metodo è l'applicazione a diverse scale (scala territoriale, scala locale) e la possibilità di utilizzarlo disponendo anche solo dei dati sufficienti a operare una classificazione tipologica del costruito; ogni altra informazione disponibile può essere, comunque, considerata nella valutazione contribuendo a rifinirla. Il metodo quindi è molto flessibile: non risulta vincolato alla disponibilità di dati rilevati *ad hoc* per

valutazioni di vulnerabilità sismica e consente di integrare in un'unica valutazione dati provenienti da diverse fonti e caratterizzati da una diversa qualità.

Sono poi riportati due esempi di analisi a scala locale ed a scala territoriale. La definizione della scala dipende essenzialmente dal dettaglio dei dati disponibili. Per la scelta della metodologia di analisi da eseguire è necessario anzitutto definire l'unità di analisi che può essere il singolo edificio, l'aggregato, la sezione censuaria, etc. La metodologia di analisi a scala territoriale riportata, si basa su dati ISTAT in cui l'unità di analisi è la sezione censuaria mentre nell'analisi di vulnerabilità a scala locale si è considerato il caso di un edificio inserito in un centro storico. Questo esempio potrebbe sembrare una applicazione ad un caso particolare ma, in realtà, rappresenta, come si vedrà in seguito, la forma più generale per la definizione dell'indice di vulnerabilità  $V_I$ . Sono riportati per ciascun esempio, i diagrammi di flusso con l'individuazione delle fasi da eseguire per definire l'indice di vulnerabilità  $V_I$ .

### 3.2 METODOLOGIE DI ANALISI DI VULNERABILITÀ SISMICA

La vulnerabilità sismica di una costruzione è la sua suscettibilità ad essere danneggiata da un terremoto; in termini operativi, un'analisi di vulnerabilità deve valutare il danno prodotto da terremoti di varia intensità. A tale scopo possono essere utilizzati diversi approcci che fanno così individuare diverse categorie di metodologie.

Il panorama delle classificazioni delle metodologie di analisi della vulnerabilità è molto vasto, i metodi di classificazione impiegati seguono infatti diversi criteri, uno dei metodi più completi per ciò che riguarda gli edifici considera varie tecniche, classificandole in *dirette*, *indirette*, *convenzionali* ed *ibride* (Corsanego e Petrini, 1990).

Le tecniche dirette sono ulteriormente suddivise in *tipologiche* e *meccaniche*, mentre le tecniche indirette possono essere pensate come una evoluzione delle tecniche convenzionali. Le tecniche ibride combinano elementi di due o più delle tecniche citate.

Le *tecniche dirette tipologiche* sono usualmente basate su esperimenti di terremoti reali, i cui dati vengono elaborati mediante procedure statistiche per ottenere matrici di probabilità di danno per un limitato numero di categorie di costruzioni, il danno è normalmente riferito al danno apparente. La loro applicazione richiede un censimento che permetta di classificare le costruzioni secondo i tipi predefiniti.

Le *tecniche dirette meccaniche* sono basate su esperimenti virtuali numerici, effettuati su una singola costruzione o su una categoria di costruzioni. I dati vengono elaborati mediante procedure statistiche il cui risultato consiste nella determinazione del livello di danno per una singola costruzione o per una singola categoria. L'applicazione delle tecniche meccaniche richiede una catalogazione delle costruzioni, che includa le loro caratteristiche meccaniche o che individui la tipologia strutturale di ciascuna costruzione.

Le *tecniche convenzionali* sono basate su esperimenti virtuali di esperti con elaborazioni statistiche dei dati; il risultato consiste in un punteggio convenzionale (indice di vulnerabilità) attribuito ad una costruzione o ad una categoria. L'applicazione di queste tecniche richiede una catalogazione delle costruzioni con le loro caratteristiche qualitative o la tipologia strutturale di appartenenza.

Le *tecniche indirette* fanno uso sia di esperimenti reali di terremoti che di esperimenti virtuali di esperti. Partendo dai risultati delle tecniche convenzionali arrivano alla

previsione del danno attraverso elaborazioni statistiche di dati di esperimenti di terremoti.

Un'altra classificazione proposta da Dolce.,1997 piuttosto che riferirsi a percorsi metodologici predefiniti, considera separatamente i tre seguenti fattori fondamentali in cui si può pensare di suddividere una metodologia: *input*, *metodo*, *output*. Si individuano tra le metodologie in uso 5 categorie di *input*, 3 categorie di *metodi* e 2 categorie di *output* e specificate in seguito:

*Input:*

1. Dati di danno raccolti dopo i terremoti o attraverso prove sperimentali di laboratorio;
2. Caratteristiche geometriche e qualitative, (altezza, configurazioni in pianta e in elevazione, età, tipo di strutture verticali e orizzontali, di fondazione, di tetto, stato di conservazione, etc.); queste informazioni sono ottenute da rilievi sul campo e/o disegni di progetto e/o analisi storiche e/o interviste e/o mappe aggiornate, etc;
3. Caratteristiche (quantitative) meccaniche, (massa, rigidezza, resistenza, duttilità intrinseca, stato pensionale, spostamenti sismici, etc.);
4. Caratteristiche dell'azione sismica, (intensità macrosismica, picco di accelerazione, etc.);
5. Dati geologici e geotecnici del sito (tipo e caratteristiche meccaniche del suolo di fondazione, comportamento sismico dei profili geologici, etc.).

*Metodo:*

1. Metodi statistici: analisi statistiche di grandi campioni di costruzioni soggetti ad un sisma;
2. Metodi meccanici: valutazione mediante modelli meccanici dei parametri che governano il comportamento sismico delle costruzioni (spostamento, duttilità, etc.);
3. Metodi basati sul giudizio di esperti: valutazioni qualitative o quantitative di fattori che governano la risposta sismica e relative elaborazioni basate sulla conoscenza di esperti.

*Output:*

1. Vulnerabilità assoluta: funzioni di vulnerabilità (danno medio in funzione dell'intensità sismica), oppure distribuzioni condizionali di danno data l'intensità sismica (Matrici di probabilità di danno o curve di fragilità);
2. Vulnerabilità relativa: indici di vulnerabilità euristici/empirici oppure ricavati sperimentalmente, per una quali non è disponibile ancora una correlazione con il danno e l'intensità sismica; essi permettono solo di ordinare le costruzioni secondo la loro vulnerabilità al sisma.

Molte altre classificazioni e definizioni sono state attribuite alle diverse metodologie esistenti, ora ispirandosi al percorso metodologico, ora facendo riferimento alla tipologia di dati utilizzati; ad esempio, se il metodo esprime numericamente la probabilità di danno viene detto di tipo *quantitativo*, se combina giudizio esperto ed elaborazioni di dati osservati viene detto *ibrido*, se la vulnerabilità dell'edificio è individuata da più sintomi di carenze intrinseche viene chiamato *semeiotico*.

Le metodologie possono essere distinte anche in base al livello di analisi; si riconoscono scale di analisi territoriale e scale locali. In linea di principio, questa distinzione dipende dal dettaglio dei dati disponibili anche se, è evidente che, una analisi molto dettagliata, come quella a scala locale, diventa onerosa su grandi porzioni di territorio.

### 3.2.1 Metodologia di I e II livello del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti

La procedura per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura, attualmente utilizzata dal GNDT, deriva da una proposta formulata nel 1983 (Benedetti e Petrini, 1984); essa si basa sull'analisi di una serie di informazioni sulle caratteristiche degli elementi costitutivi dell'edificio che vengono raccolte tramite schede.

Le prime due facciate (scheda di primo livello, valida per tutte le tipologie strutturali) contengono i dati relativi alla localizzazione, alla geometria ed alla tipologia dell'edificio, la terza contiene le informazioni di vulnerabilità in senso stretto (scheda di secondo livello).

La metodologia di I livello GNDT individua all'interno del costruito ordinario diverse tipologie edilizie e definisce alcune classi di vulnerabilità (A, B e C), per ciascuna delle quali viene precisata la relazione tra input sismico e danno, attraverso matrici di probabilità di danno - DPM (Damage Probability Matrix), definite più avanti. Viene quindi stabilita una corrispondenza diretta tra tipologia edilizia e classe di vulnerabilità. Si tratta di un metodo tipologico, che in Italia possiede una robusta validazione sperimentale; la distribuzione probabilistica dei danni, indicata per ciascuna classe di vulnerabilità per i diversi livelli dell'intensità sismica, è stata ottenuta sulla base dei danni effettivamente rilevati a seguito dei principali eventi sismici che hanno interessato il territorio nazionale, ed in particolare del terremoto dell'Irpinia (novembre 1980), il più significativo per quantità dei dati e livelli di intensità sismica (Braga et al., 1982). Nel dettaglio la scheda di I livello è composta dalle seguenti otto sezioni (Fig. 3.1 e Fig. 3.2):

1. dati relativi alla scheda: chiave di identificazione dell'edificio, comune, scheda, squadra, data;
2. localizzazione dell'edificio: aggregato, edificio, toponomastica, vincoli di piano urbanistico;
3. dati metrici: superfici, altezze interpiano, altezze minima e massima fuori terra;
4. uso: tipi di uso, stato, proprietà e conduzione dell'edificio, utilizzazione, utenza;
5. età della costruzione: interventi: tipi e classi di età;
6. stato delle finiture: impianti: tipologia, stato di manutenzione e di efficienza;
7. tipologia strutturale: tipi di struttura verticale, orizzontale, scale, copertura;
8. estensione e livello del danno: estensione e livello di danno più frequente: livello di danno massimo rispettivamente per strutture verticali, strutture orizzontali, scale, tamponature.



**GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI (G.N.D.T.) – C.N.R.**

Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici

[illegible]

Fig. 3.1: Facciata 1 della scheda di primo livello del GNDT per il rilevamento e la vulnerabilità degli edifici (GNDT, 1994)

## Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici

| Sezione 5 – ETÀ DELLA COSTRUZIONE – INTERVENTI                                                                                                                         |                                          |                            |                            |                         |  |  |  |  |  | Sezione 6 – STATO DELLE FINITURE E IMPIANTI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------|-------------|-----------------|-----------|---|------------------------------------------|-----------------|---|---------------|-----------|---|------------------|-----------|---|---|---|----------|---|---|---|---|--------------|
| <b>Classi di età</b><br>A prima del '19<br>B '19 '45<br>C '46 '60<br>D '61 '71<br>E '72 '81<br>F dopo l' '81<br>G .....<br>H .....                                     |                                          |                            |                            |                         |  |  |  |  |  | <b>INTERVENTI</b><br><table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>Norme tecniche precedenti</th> <th>Adm. Antisism. D.M. 241/86</th> <th>Adm. Antisism. D.M. 241/86</th> <th>Adm. Antisism. D.M. 241/86</th> <th>Interv. Non antisismico</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>/</td> <td>C</td> <td>Ampliamento</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>E</td> <td>/</td> <td>F</td> <td>Sopraelevazione</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>H</td> <td>I</td> <td>J</td> <td>Ristrutturazione</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>L</td> <td>M</td> <td>N</td> <td>Restauro</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>/</td> <td>P</td> <td>Q</td> <td>Manutenzione</td> </tr> </table>       |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Norme tecniche precedenti | Adm. Antisism. D.M. 241/86   | Adm. Antisism. D.M. 241/86 | Adm. Antisism. D.M. 241/86 | Interv. Non antisismico | A         | B               | /                  | C         | Ampliamento | D               | E         | / | F                                        | Sopraelevazione | G | H             | I         | J | Ristrutturazione | K         | L | M | N | Restauro | O | / | P | Q | Manutenzione |
| Norme tecniche precedenti                                                                                                                                              | Adm. Antisism. D.M. 241/86               | Adm. Antisism. D.M. 241/86 | Adm. Antisism. D.M. 241/86 | Interv. Non antisismico |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| A                                                                                                                                                                      | B                                        | /                          | C                          | Ampliamento             |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| D                                                                                                                                                                      | E                                        | /                          | F                          | Sopraelevazione         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| G                                                                                                                                                                      | H                                        | I                          | J                          | Ristrutturazione        |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| K                                                                                                                                                                      | L                                        | M                          | N                          | Restauro                |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| O                                                                                                                                                                      | /                                        | P                          | Q                          | Manutenzione            |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| Classe di età di costr. 270  ____ <br>Classe di età ultimo intervento significat. 271  ____ <br>Tipo ultimo int. signif. 272  ____ <br>R = in deroga (Art.30 L. 64/74) |                                          |                            |                            |                         |  |  |  |  |  | <b>Sezione 6 – STATO DELLE FINITURE E IMPIANTI</b><br><table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">E Efficiente</td> <td style="width: 50%;">Intonaci e paramenti esterni</td> <td style="width: 50%;">273  ____ </td> </tr> <tr> <td>N Non efficiente</td> <td>Infissi esterni</td> <td>274  ____ </td> </tr> <tr> <td>Z Non esistenti</td> <td>Impianto elettrico</td> <td>275  ____ </td> </tr> <tr> <td></td> <td>Impianto idrico</td> <td>276  ____ </td> </tr> <tr> <td></td> <td>Finiture interne (intonaci, pavim., ...)</td> <td>277  ____ </td> </tr> <tr> <td></td> <td>Riscaldamento</td> <td>278  ____ </td> </tr> <tr> <td></td> <td>Servizi igienici</td> <td>279  ____ </td> </tr> </table> |  |  |  |  |  |  |  |  |  | E Efficiente              | Intonaci e paramenti esterni | 273  ____                  | N Non efficiente           | Infissi esterni         | 274  ____ | Z Non esistenti | Impianto elettrico | 275  ____ |             | Impianto idrico | 276  ____ |   | Finiture interne (intonaci, pavim., ...) | 277  ____       |   | Riscaldamento | 278  ____ |   | Servizi igienici | 279  ____ |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| E Efficiente                                                                                                                                                           | Intonaci e paramenti esterni             | 273  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| N Non efficiente                                                                                                                                                       | Infissi esterni                          | 274  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
| Z Non esistenti                                                                                                                                                        | Impianto elettrico                       | 275  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
|                                                                                                                                                                        | Impianto idrico                          | 276  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
|                                                                                                                                                                        | Finiture interne (intonaci, pavim., ...) | 277  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
|                                                                                                                                                                        | Riscaldamento                            | 278  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |
|                                                                                                                                                                        | Servizi igienici                         | 279  ____                  |                            |                         |  |  |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                           |                              |                            |                            |                         |           |                 |                    |           |             |                 |           |   |                                          |                 |   |               |           |   |                  |           |   |   |   |          |   |   |   |   |              |

| Sezione 7 – TIPOLOGIA STRUTTURALE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|-----------------------|-----------------------------------------|-----|--|-----|--|-----|--|-----|--|-----|--|
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>Strutture verticali</b><br/>           A Muratura a sacco<br/>           B Muratura a sacco con spigoli, mazzette, ricorsi<br/>           C Muratura pietra sbazzata<br/>           D Muratura pietra sbazzata con rinforzi c.s.<br/>           E Muratura pietre arrotondate<br/>           F Muratura pietra arrotondate con rinforzi c.s.<br/>           G Muratura blocchetti tufo, pietra ben squadrata<br/>           H Muratura blocchetti calcestruzzo inerti pesanti<br/>           I Muratura blocchetti calcestruzzo inerti leggeri<br/>           L Muratura mattoni pieni o multifori<br/>           M Muratura mattoni forati<br/>           N Pareti calcestruzzo non armato<br/>           O Pareti calcestruzzo armato<br/>           P Telai di c.a. non tamponati<br/>           Q Telai di c.a. con tamponature deboli<br/>           R Telai di c.a. con tamponature consistenti<br/>           S Ossatura metallica<br/>           T Miste<br/>           U .....<br/>           V .....         </div> <div style="width: 45%;"> <b>Strutture orizzontali</b><br/>           A Legno<br/>           B Legno con catene<br/>           C Putrelle e voltine o tavelloni<br/>           D Putrelle e voltine o tavelloni con catene<br/>           E Laterocemento o solette in c.a.<br/>           F Volte senza catene<br/>           G Volte con catene<br/>           H Miste volte solai<br/>           I Miste volte solai con catene<br/>           L .....         </div> </div> |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>Coperture</b><br/>           M Legno spingente<br/>           N Legno "poco spingente" (vedi manuale)<br/>           O Legno a spinta eliminata o travi orizz.<br/>           P Laterocemento o solette in c.a.<br/>           Q Acciaio spingente<br/>           R Acciaio non spingente<br/>           S Mista spingente<br/>           T Mista non spingente<br/>           U .....         </div> <div style="width: 45%;"> <b>Scale</b><br/>           0 Struttura appoggiata in legno<br/>           1 Struttura a sbalzo in legno<br/>           2 Struttura appoggiata in acciaio<br/>           3 Struttura a sbalzo in acciaio<br/>           4 Struttura appoggiata in pietra o laterizio<br/>           5 Struttura a sbalzo in pietra o laterizio<br/>           6 Volta appoggiata in muratura<br/>           7 Volta a sbalzo in muratura<br/>           8 Struttura appoggiata in c.a.<br/>           9 Struttura a sbalzo in c.a.         </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>Tipologia strutturale prevalente</b> 280  ____ <br/>           1 Tipologia specialistica (capannoni, chiese, ...)<br/>           2 Muratura o mista<br/>           3 Calcestruzzo armato<br/>           4 acciaio<br/>           5 altro         </div> <div style="width: 45%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>Tipologia strutturale</th> <th>N° piani a tipologia strutturale uguale</th> </tr> <tr> <td>281</td> <td></td> </tr> <tr> <td>285</td> <td></td> </tr> <tr> <td>289</td> <td></td> </tr> <tr> <td>293</td> <td></td> </tr> <tr> <td>297</td> <td></td> </tr> </table> </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  | Tipologia strutturale | N° piani a tipologia strutturale uguale | 281 |  | 285 |  | 289 |  | 293 |  | 297 |  |
| Tipologia strutturale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | N° piani a tipologia strutturale uguale |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 281                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 285                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 289                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 293                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 297                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |                       |                                         |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |

| Sezione 8 – ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|----|--|--|--|--|--|--|---|-----|-------|----|-----|-------|---|-----|-------|---|-----|-------|-----|-----|-------|---|-----|-------|---|-----|-------|---|-----|-------|---|-----|-------|----|-----|--|--|--|-----|--|--|--|-----|--|--|--|-----|--|--|--|-----|--|--|--|
| Evento in data 301  ____  1 sisma 307  ____ <br>2 altro<br>Danni a impianti 1 sì 388  ____ <br>2 no                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>M = livello danno max rilevato</b><br/> <b>E = estensione danno più diffuso</b><br/> <b>L = livello danno più diffuso</b> </div> <div style="width: 45%;"> <b>Estensione del danno</b><br/> <table style="width: 100%;"> <tr> <td>0</td> <td>10&lt;</td> <td>≤ 10%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>10&lt;</td> <td>≤ 20%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>20&lt;</td> <td>≤ 30%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>30&lt;</td> <td>≤ 40%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>40&lt;</td> <td>≤ 50%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>50&lt;</td> <td>≤ 60%</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>60&lt;</td> <td>≤ 70%</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>70&lt;</td> <td>≤ 80%</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>80&lt;</td> <td>≤ 90%</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>90&lt;</td> <td></td> </tr> </table> </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |       |    |  |  |  |  |  |  | 0 | 10< | ≤ 10% | 1  | 10< | ≤ 20% | 2 | 20< | ≤ 30% | 3 | 30< | ≤ 40% | 4   | 40< | ≤ 50% | 5 | 50< | ≤ 60% | 6 | 60< | ≤ 70% | 7 | 70< | ≤ 80% | 8 | 80< | ≤ 90% | 9  | 90< |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10< | ≤ 10% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 10< | ≤ 20% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 20< | ≤ 30% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 30< | ≤ 40% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 40< | ≤ 50% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50< | ≤ 60% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 60< | ≤ 70% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 70< | ≤ 80% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 80< | ≤ 90% |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 90< |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <b>Livello del danno</b><br/>           A Nessun danno<br/>           B Danno lieve<br/>           C Danno medio<br/>           D Danno grave<br/>           E Danno gravissimo<br/>           F Danno totale         </div> <div style="width: 45%;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <b>Strutture verticali</b><br/> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>M</td><td>E</td><td>L</td><td>N°</td></tr> <tr><td>308</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>312</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>316</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>320</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>324</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> </div> <div style="text-align: center;"> <b>Strutture orizzontali</b><br/> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>M</td><td>E</td><td>L</td><td>N°</td></tr> <tr><td>328</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>332</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>336</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>340</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>344</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> </div> </div> </div> </div> |     |       |    |  |  |  |  |  |  | M | E   | L     | N° | 308 |       |   |     | 312   |   |     |       | 316 |     |       |   | 320 |       |   |     | 324   |   |     |       | M | E   | L     | N° | 328 |  |  |  | 332 |  |  |  | 336 |  |  |  | 340 |  |  |  | 344 |  |  |  |
| M                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | E   | L     | N° |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 308                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 312                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 316                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 320                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 324                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| M                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | E   | L     | N° |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 328                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 332                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 336                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 340                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |
| 344                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |       |    |  |  |  |  |  |  |   |     |       |    |     |       |   |     |       |   |     |       |     |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |   |     |       |    |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |     |  |  |  |

Fig. 3.2: Facciata 2 della scheda di primo livello del GNDT per il rilevamento e la vulnerabilità degli edifici (GNDT, 1994)

Delle suddette sezioni l'ultima concerne eventuali dati sui danni ad alcuni elementi costruttivi e per tale ragione costituisce una parte concettualmente diversa dalle precedenti. In tale sezione si registra, per ogni piano dell'edificio, il danno nelle diverse

componenti costruttive (strutture verticali, strutture orizzontali, scale, tamponature). I dati sono organizzati in 4 matrici separate e sono codificati con lettere da A ad F corrispondenti a crescenti livelli di danno. Ogni riga della matrice contiene le informazioni su un piano dell'edificio dal basso verso l'alto; in caso di medesimo livello di danneggiamento su piani contigui, viene riempita una sola riga della matrice ed il numero di piani danneggiati omogeneamente viene caricato nell'ultima colonna della matrice. Sulla base dei dati descritti nella sezione 8 e associando ai livelli di danno A,B,C,D...,F rispettivamente i valori numerici 0, 0.2,0.4,0.6...1, si costruisce per ogni piano componente l'indice di danno  $D_{ij}$ :

$$D_{ij} = E^* L + \frac{1-E}{3} M \quad \text{con } 0 \leq D_{ij} \leq 1 \quad (3.1)$$

dove  $M$  è il massimo livello di danno osservato,  $L$  è il danno più frequente ed  $E$  rappresenta la sua estensione espressa su ogni piano dell'edificio in 10 intervalli percentuali codificati tra 0 ( $\leq 10\%$ ) e 9 ( $>90\%$ ). In Figura 3.3 è riportato a titolo di esempio una parte della scheda GNDT per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici (sezione 8). Se si considera la matrice per le strutture verticali, volendo esaminare quanto espresso nelle caselle con codice 308, si evince che il massimo livello di danno  $M$  osservato è del tipo  $E$  cioè "*danno gravissimo*" mentre il danno più frequente  $L$  è del tipo  $D$  "*danno grave*" con una estensione  $E$  pari a 3 (30%-40%).

L'indice di danno per l'intero edificio  $d$  si ottiene in base alla relazione (Angeletti,1984; Angeletti et al.,1988):

$$d = \sum_{ij} S_i F_j D_{ij} \quad (3.2)$$

dove  $F_j$  sono pesi proporzionali al volume o alla superficie del piano j-esimo ed  $S_i$  sono pesi proporzionali all'incidenza economica della componente i-esima.

### Sezione 8 - ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO

Evento in data 301 0 6 0 5 7 6

1 sisma 307 1

2 altro

#### Estensione del danno

|                  | $E \leq 10\%$ | $10 < E \leq 20\%$ | $20 < E \leq 30\%$ | $30 < E \leq 40\%$ | $40 < E \leq 50\%$ | $50 < E \leq 60\%$ | $60 < E \leq 70\%$ | $70 < E \leq 80\%$ | $80 < E \leq 90\%$ | $E > 90\%$ |
|------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|
| Nessun danno     | <b>A</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |
| Danno lieve      | <b>B</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |
| Danno medio      | <b>C</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |
| Danno grave      | <b>D</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |
| Danno gravissimo | <b>E</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |
| Danno totale     | <b>F</b>      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |            |

1 sì

Danni impianti 388

Fig.3.3:Parte della scheda GNDT per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici (sezione 8).  
(GNDT, 1994)

Questa metodologia non fornisce una valutazione sul singolo fabbricato, ma semplicemente lo enumera all'interno di un insieme di edifici della stessa classe di vulnerabilità, rappresentativa di tipologie diverse e variegata. Il terremoto è considerato in termini di intensità macrosismica ed il danno è descritto attraverso livelli qualitativi, associati all'evidenza di particolari stati lesionativi o di collasso parziale o totale.

La metodologia di II livello GNDT è basata sulla scheda riportata in Fig. 3.4 (Benedetti e Petrini, 1984, - GNDT, 1994). Tale scheda raccoglie informazioni tipologiche e costruttive su ogni singolo edificio, queste vengono combinate attraverso punteggi indipendenti per definire un indice di vulnerabilità  $I_v$ , che caratterizza la propensione dell'edificio al danneggiamento (metodologia semeiotica).

La scheda di II livello, valida solo per gli edifici in muratura (Fig. 3.4), contiene dati finalizzati ad un modello, di derivazione soggettiva e basato su giudizi, il quale permette di valutare la vulnerabilità in funzione di un certo numero di parametri ritenuti rappresentativi della propensione dell'edificio a subire danni per effetto di un evento sismico. In particolare, alcuni fra i parametri rendono conto del comportamento degli elementi, strutturali e non, altri del comportamento d'insieme dell'organismo costruttivo. L'indice di vulnerabilità è definito in base ad undici parametri che sono stati ritenuti idonei a caratterizzare il comportamento sismico di un edificio, essi sono:

1. Tipo ed organizzazione del sistema resistente: valuta il grado di organizzazione degli elementi verticali e l'efficacia dei collegamenti per garantire il comportamento scatolare dell'organismo murario.
2. Qualità del sistema resistente: individua la tipologia delle strutture verticali, tenendo conto dell'omogeneità e della fattura del tessuto murario.
3. Resistenza convenzionale: quantifica la resistenza in due direzioni perpendicolari delle strutture in elevazione attraverso un calcolo speditivo, nelle ipotesi di comportamento scatolare (ovvero solaio infinitamente rigido e deformazione di pura traslazione dei piani) in assenza di eccentricità in pianta).
4. Posizione dell'edificio e delle fondazioni: evidenzia alcuni aspetti e caratteristiche geotecniche, relativi alle fondazioni ed al terreno di fondazione, ritenuti influenti sul comportamento sismico globale.
5. Orizzontamenti: considera la rigidezza nel piano (funzionamento a diaframma), il tipo e l'efficacia dei collegamenti alle strutture verticali.
6. Configurazione planimetrica: mette in conto la forma in pianta attraverso la valutazione dei rapporti tra i lati e le eventuali sporgenze.
7. Configurazione in elevazione: mette in conto le variazioni e discontinuità in elevazione, quali la presenza di torri, porticati, ecc.
8. Distanza massima fra le murature: valuta l'efficacia del vincolo delle murature perpendicolari ad una data parete.
9. Copertura: evidenzia la tipologia ed i carichi della copertura, l'eventuale presenza di elementi spingenti e le caratteristiche del collegamento alle murature.
10. Elementi non strutturali: valuta l'influenza che ha sui danni conseguenti ad un evento sismico la presenza, il tipo ed il collegamento alla struttura di tutti gli elementi non portanti quali comignoli, cornicioni, piccoli aggetti.
11. Stato di fatto: mette in conto la diminuzione di resistenza (e di duttilità) conseguenti a lesioni, dissesti, stato di degrado negli elementi strutturali.

## G.N.D.T. – SCHEDA DI VULNERABILITÀ DI 2° LIVELLO (MURATURA)



| Codice ISTAT Provincia <sup>1</sup> _____ |                                                      | Codice ISTAT Comune <sup>3</sup> _____ |                         | Scheda N° <sup>7</sup> _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PARAMETRI                                 | Classi                                               | Qual. Inf.                             | ELEMENTI DI VALUTAZIONE |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | SCHEMI – RICHIAMI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 1                                         | TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.) | 11 _____                               | 22 _____                | Norme nuove costruzioni (Clas. A) <sup>33</sup> <input type="checkbox"/> 1<br>Norme riparazioni (Clas. A) <input type="checkbox"/> 2<br>Cordoli e catene tutti i livelli (Clas. B) <input type="checkbox"/> 3<br>Buoni ammorsam. fra muri (Clas. C) <input type="checkbox"/> 4<br>Senza cordoli cattivi ammors. (Clas. D) <input type="checkbox"/> 5                                                                                                                                              | <b>Parametro 3. Resistenza convenzionale</b><br><br>Tipologia strutture verticali $\tau_x$ (t/mq)<br>_____<br>_____<br>_____<br>_____<br>Minimo tra $A_x$ ed $A_y$ $A$ (mq) _____<br>Massimo tra $A_x$ ed $A_y$ $A$ (mq) _____<br>Coeff. $a_0 = A_t / A_t$ _____ Coeff. $\gamma = B/A$ _____<br>$q = (A_x + A_y) h p_m / A_t + p_s$ _____<br>$C = \frac{a_0 \tau_k}{q N} \sqrt{1 + \frac{q N}{1,5 a_0 \tau_k (1 + \gamma)}}$<br>$\alpha = C/0,4$ _____ |
| 2                                         | QUALITÀ DEL S.R.                                     | 12 _____                               | 23 _____                | (vedi manuale) <sup>34</sup> _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3                                         | RESISTENZA CONVENZIONALE                             | 13 _____                               | 24 _____                | Numero di piani $N$ <sup>35</sup> _____<br>Area totale coperta $A_t$ (mq) <sup>37</sup> _____<br>Area $A_x$ (mq) <sup>41</sup> _____<br>Area $A_y$ (mq) <sup>44</sup> _____<br>$\tau_x$ (t/mq) <sup>47</sup> _____<br>Alt. media interpiano $h$ (m) <sup>50</sup> _____<br>Peso specifico pareti $p_m$ (t/mc) <sup>52</sup> _____<br>Carico permanente solai $p_s$ (t/mq) <sup>54</sup> _____                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 4                                         | POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONE                      | 14 _____                               | 25 _____                | Pendenza percentuale del terreno <sup>56</sup> _____<br>Roccia Fondazioni: Si <input type="checkbox"/> 1 No <input type="checkbox"/> 2<br>Terr. sciolto non sping. Fond. Si <input type="checkbox"/> 3 No <input type="checkbox"/> 4<br>Terr. sciolto spingente Fond. Si <input type="checkbox"/> 5 No <input type="checkbox"/> 6<br>Differen. max di quota $\Delta h$ (m) <sup>59</sup> _____                                                                                                    | <b>Parametro 6. Configurazione planimetrica</b><br><br>$\beta_1 = a/l$ $\beta_2 = b/l$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 5                                         | ORIZZONTAMENTI                                       | 15 _____                               | 26 _____                | Piani sfalsati Si <input type="checkbox"/> 1 No <input type="checkbox"/> 2<br>Orizzontamenti rigidi e ben collegati <sup>63</sup> <input type="checkbox"/> 1<br>Orizzontam. deformabili e ben collegati <input type="checkbox"/> 2<br>Orizzontam. rigidi e mal collegati <input type="checkbox"/> 3<br>Orizzontam. deformabili e mal collegati <input type="checkbox"/> 4<br>% Orizzontam. rigidi e ben collegati <sup>64</sup> _____                                                             | <b>Parametro 7. Configurazione in elevazione</b><br>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 6                                         | CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA                          | 16 _____                               | 27 _____                | Rapporto percentuale $\beta_1 = a/l$ <sup>66</sup> _____<br>Rapporto percentuale $\beta_2 = b/l$ <sup>70</sup> _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>Parametro 9. Copertura</b><br><br>Coperture spingenti (tipologia M)<br>Coperture poco spingenti (tipologia N)<br>Coperture non spingenti (tipologia O)                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 7                                         | CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE                         | 17 _____                               | 28 _____                | % aumento (+) o diminuzione (-) di massa <sup>74</sup> _____<br>Rapporto percentuale T/H <sup>77</sup> _____<br>Percentuale superficie porticata <sup>79</sup> _____<br>Piano terra porticato Si <input type="checkbox"/> 1 No <input type="checkbox"/> 2                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 8                                         | $D_{max}$ MURATURE                                   | 18 _____                               | 29 _____                | Rapporto massimo $l/s$ <sup>82</sup> _____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 9                                         | COPERTURA                                            | 19 _____                               | 30 _____                | Copert. non sp. <sup>84</sup> <input type="checkbox"/> poco sp. <input type="checkbox"/> 1 sp. <input type="checkbox"/> 2<br>Cordoli in copertura Si <sup>85</sup> <input type="checkbox"/> 1 No <input type="checkbox"/> 2<br>Catene in copertura Si <sup>86</sup> <input type="checkbox"/> 1 No <input type="checkbox"/> 2<br>Carico perman. coper. $p_c$ (t/mq) <sup>87</sup> _____<br>Lungh. appoggio coper. $l_a$ (m) <sup>90</sup> _____<br>Perimetro copertura $l$ (m) <sup>93</sup> _____ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 10                                        | ELEM. NON STRUTT.                                    | 20 _____                               | 31 _____                | (Vedi manuale)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 11                                        | STATO DI FATTO                                       | 21 _____                               | 32 _____                | (Vedi manuale)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Fig. 3.4: Scheda di secondo livello del GNDT per il rilevamento e la vulnerabilità degli edifici in muratura (GNDT, 1994)

Per ogni parametro sono state definite 4 classi ad ognuna delle quali è assegnato un punteggio numerico  $p_i$ , ad ogni parametro è assegnato un peso  $w_i$ . L'indice di vulnerabilità  $I_v$  è definito come somma pesata dei punteggi relativi ad ogni parametro:

$$I_v = \sum_i p_i w_i$$

Il metodo dell'indice di vulnerabilità è stato esteso con limitate modifiche al caso di edifici in calcestruzzo armato (Angeletti e Gavarini, 1984). In Fig. 3.5 è riportata la scheda di secondo livello del GNDT per il rilevamento e la vulnerabilità degli edifici in calcestruzzo armato.

**G.N.D.T. – SCHEDA DI VULNERABILITÀ DI 2° LIVELLO (CALCESTRUZZO ARMATO)**


| Codice ISTAT Provincia 1 _ _ _ |                                                     | Codice ISTAT Comune 4 _ _ _                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | Scheda N° 7 _ _ _ _ |  |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------|--|
| PARAMETRI                      | Classi                                              | ELEMENTI DI VALUTAZIONE E SCHEMI – RICHIAMI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                     |  |
| 1                              | TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE<br> _ | <p><i>La valutazione va riferita alla direzione più debole.</i></p> <p>1 Pareti in c.a. in entrambi le direzioni<br/>           2 Pilastri e travi alte<br/>           3 Pilastri e travi in spessore di solaio<br/>           4 Altro _____<br/>           5 Non so</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                     |  |
| 2                              | DISTRIBUZIONE DELLE TAMPONATURE<br> _               | <p><i>Considerare solo le tamponature esterne e i campi di tamponatura pieni per più del 70% a contatto con la maglia strutturale (travi e pilastri).</i></p> <p>A Su 4 lati esterni<br/>           B Su 3 lati esterni<br/>           C Su 2 lati esterni<br/>           D Su 1 lato esterno</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                     |  |
| 3                              | CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA<br> _                   | <p><i>Il nucleo scale e ascensore sono da considerarsi resistenti quando sono realizzati o in pareti di c.a. o a struttura intelaiata con tamponatura consistente (Blocchi cls o tufo, mattoni pieni o forati doppio UNI)</i></p> <div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>1 Forma compatta con nucleo scala/ascensore resistente centrale</p> <p>2 Forma compatta con nucleo scala/ascensore resistente eccentrico</p> <p>3 Forma non compatta con nucleo scala/ascensore resistente centrale</p> <p>4 Forma non compatta con nucleo scala/ascensore resistente eccentrico</p> </div> <div style="flex: 2;"> <p>Forme compatte</p> <p>Forme non compatte</p> </div> </div>                                                                               |  |                     |  |
| 4                              | IRREGOLARITÀ IN ELEVAZIONE<br> _                    | <p><i>Per piano debole si intende un piano che ha una rigidità ridotta rispetto agli altri come il caso di piano pilotis o piani con grandi aperture o piani privi di tamponature o tamponature poste in aggetto o arretrate rispetto alla maglia strutturale</i></p> <p>A Assente<br/>           B Diverso dal piano terra con nucleo scala/ascensore resistente<br/>           C Al piano terra con nucleo scala/ascensore resistente<br/>           D Diverso dal piano terra senza nucleo scala/ascensore resistente<br/>           E Al piano terra senza nucleo scala/ascensore resistente</p> <p>Pilastri tozzi</p> <p>1 Assenti<br/>           2 Per travi a ginocchio o piani sfalsati<br/>           3 Per finestre a nastro<br/>           4 Altro _____</p> |  |                     |  |

Fig. 3.5: Scheda di secondo livello del GNDT per il rilevamento e la vulnerabilità degli edifici in calcestruzzo armato (GNDT, 1994)

Le definizioni utilizzate per l'indice di danno  $d$  e l'indice di vulnerabilità  $I_v$  introducono molte limitazioni all'utilizzo di questa metodologia. L'indice di vulnerabilità è definito in forma scalare e non consente di tenere conto delle differenze di risposta dell'edificio in funzione della direzione prevalente della sollecitazione; la direzionalità dell'azione può avere una certa importanza quando si esaminano casi reali per stabilire correlazioni tra entità delle azioni e danni provocati.

Un limite ancora più importante è legato all'aver trascurato, nella definizione dell'indice di vulnerabilità, gli effetti dell'interazione tra l'edificio e le costruzioni adiacenti; in altri termini, l'indice di vulnerabilità rappresenta una specie di misura intrinseca riferita ad una condizione ideale dell'edificio, considerato come isolato dal contesto e non tiene conto della eventuale vulnerabilità indotta dalla presenza di edifici contigui.

Il modo in cui è definito l'indice di danno lo rende insensibile alla localizzazione del danno stesso; in altri termini, un dato livello di danno ha lo stesso peso sia che si verifichi, ad esempio, al piano terra sia che sia stato rilevato all'ultimo piano dell'edificio. Una simile insensibilità non è ammissibile per molte applicazioni; la localizzazione del danno può avere influenza, ad esempio, sui giudizi di agibilità, sulla valutazione dei costi di intervento e sulla stima delle conseguenze per le persone.

Una terza limitazione, infine, deriva dalla relativa esiguità di dati disponibili per la calibrazione dei parametri della relazione tra danno, vulnerabilità ed entità delle azioni.

### 3.2.2 Il metodo Hazus

Hazus è un programma che contiene i modelli per la valutazione delle potenziali perdite provocate da terremoto, inondazioni e uragani. Hazus usa il software geografico d'informazione (GIS) per tracciare e visualizzare i dati di rischio e le potenziali perdite economiche che derivano da danni a costruzioni ed a infrastrutture. Inoltre permette che gli utenti valutino gli effetti dei venti, delle inondazioni e dei terremoti sulle popolazioni in modo da descrivere possibili scenari di danno e prevedere dei piani di mitigazione del rischio.

Hazus utilizza *la tecnologia GIS*, un *database a scala nazionale* ed una *metodologia modellata a livello nazionale* per la valutazione del rischio e la stima delle perdite.

Il database a scala nazionale utilizza i seguenti dati:

demografici: popolazione, impiego, abitazioni;

destinazione d'uso degli edifici: residenziale, commerciale, industriale;

attrezzature essenziali: ospedali, scuole, stazioni di polizia e dei vigili del fuoco;

strutture per i trasporti: autostrade, strade, aeroporti, ponti, gallerie, porti;

impianti: acqua potabile, acqua di scarico, comunicazione, corrente elettrica, gas;

strutture ad alto rischio: impianti nucleari, industrie con sostanze altamente inquinanti, siti con attrezzature ed armi militari.

Hazus prevede tre livelli di analisi:

Un'analisi di I Livello che fornisce una stima approssimativa, basata su dati a scala nazionale.

Un'analisi di II Livello che richiede informazioni più dettagliate riguardo il rischio della località considerata ed una raccolta più dettagliata delle tipologie costruttive esistenti nella località in esame. Consente di ottenere valutazioni più affidabili delle perdite e del rischio.



Un'analisi di III Livello che consente di ottenere una valutazione del rischio ancora più affidabile e tipicamente richiede la partecipazione di tecnici esperti quali ingegneri strutturisti e geotecnici che possano modificare i parametri nazionali ed inserire dati specifici delle località considerate costruendo una raccolta di tipologie edilizie e fornendo dati più esatti riguardo la vulnerabilità del territorio.

Indipendentemente dal livello di analisi scelto, il modello di HAZUS relativo alla valutazione del rischio associato ai terremoti è provvisto di un sistema di classificazione delle costruzioni basato sulle caratteristiche della struttura. Esso permette agli utenti di:

1. computare i danni dei fabbricati residenziali, commerciali industriali e delle infrastrutture essenziali;
2. valutare le perdite economiche dirette ed indirette;
3. formulare e valutare piani di mitigazione del rischio;
4. valutare le risorse richieste per il rilievo del disastro;
5. migliorare la pianificazione dell' emergenza con l'analisi di piani d'azione;
6. progettare il recupero delle costruzioni dopo il terremoto;
7. pianificare l'assistenza tecnica dopo il disastro;
8. valutare i requisiti degli edifici rimanenti per mettere al riparo le famiglie.

Nella Figura 3.6 sono riportati i danni diretti, i danni indotti, le perdite dirette e indirette che si possono avere a seguito di un terremoto, di una inondazione o di un uragano.

|                                | Earthquake<br>Ground Motion<br>Ground Failure | Flood<br>Frequency Depth<br>Discharge Velocity | Hurricanes/Winds<br>Pressure Missile Rain |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Direct Damage</b>           |                                               |                                                |                                           |
| General Building Stock         | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Essential Facilities           | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| High Potential Loss Facilities | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Transportation Facilities      | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Lifelines                      | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| <b>Induced Damage</b>          |                                               |                                                |                                           |
| Fire Following                 | ✓                                             |                                                |                                           |
| Hazardous Materials Release    | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Debris Generation              | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| <b>Direct Losses</b>           |                                               |                                                |                                           |
| Cost of Repairs/Replacement    | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Income Loss                    | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Crop Damage                    | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Casualties                     | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Shelter and Recovery Needs     | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| <b>Indirect Losses</b>         |                                               |                                                |                                           |
| Supply Shortages               | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Sales Decline                  | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Opportunity Costs              | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |
| Economic Loss                  | ✓                                             | ✓                                              | ✓                                         |

Figura 3.6 : Danni diretti e indotti e perdite dirette e indirette a seguito di un terremoto, di una inondazione o di un uragano

Il metodo Hazus, per ciò che concerne la valutazione del rischio connesso con il terremoto, utilizza un approccio che fa riferimento al confronto tra capacità e richiesta. L'obiettivo è calcolare la probabilità che una classe di strutture subisca un danno di livello  $d_s$  (leggero, moderato, esteso o totale). La definizione del danno è una funzione



qualitativa che esprime le conseguenze che una struttura danneggiata può provocare in termini economici e sociali.

La funzione di fragilità (o funzioni di danno) è di tipo lognormale ed è la seguente:

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left[ \frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right] \right] \quad (3.3)$$

Questa funzione esprime la probabilità che si riscontri un certo danno  $ds$  a seguito del realizzarsi dello spostamento spettrale  $S_d$ ;

$\beta_{ds}$  è la deviazione standard del logaritmo naturale dello spostamento spettrale dello stato di danno  $ds$ ;

$\bar{S}_{d,ds}$  è la mediana dello spostamento spettrale al quale l'edificio giunge ad una certa soglia dello stato di danno  $ds$ ;

$\Phi$  è la funzione di distribuzione cumulata normale standard.

Lo spostamento spettrale  $S_d$  si ottiene mediante la relazione:

$$S_d = \bar{S}_{d,ds} \varepsilon_{ds} \quad (3.4)$$

mentre la mediana  $\bar{S}_{d,ds}$  che deriva da considerazioni strutturali si ottiene considerando l'equazione 3.5:

$$\bar{S}_{d,ds} = \delta_{R,Sds} \alpha_2 h \quad (3.5)$$

in cui  $\delta_{R,Sds}$  è il *drift ratio* ovvero il rapporto tra lo spostamento orizzontale di interpiano e l'altezza stessa di interpiano;  $\alpha_2$  è la frazione dell'altezza dell'edificio nel punto in cui si trova lo spostamento dell'analisi pushover ed  $h$  è l'altezza dell'edificio.

La variabilità delle funzioni di danno deriva dalle incertezze sulla capacità e sulla richiesta, ciascuna di queste incertezze è assunta lognormale.

$$\beta_{Sds} = \sqrt{\left( \text{convoluzione}[\beta_C, \beta_D, \bar{S}_{D,Sds}] \right)^2 + \beta_{M(Sds)}^2} \quad (3.6)$$

Nell'equazione 3.6  $\beta_C$  è la dispersione della curva di capacità;  $\beta_D$  è la variabilità dello spettro di richiesta, e  $\beta_{M(Sds)}$  è l'incertezza sulla stima della mediana della soglia che porta allo stato di danno, considerata indipendente da capacità e richiesta. La convoluzione produce una superficie che descrive la probabilità di ciascun punto d'intersezione capacità/richiesta.

Per ottenere il parametro di intensità spettrale che definisce la soglia per il livello di collasso si considera l'intersezione della curva di capacità di una certa classe strutturale con lo spettro a forma fissata, derivata dalla mappatura sismica probabilistica del territorio, opportunamente ridotto per tenere conto del comportamento non lineare della struttura.

Le classi di edifici, di cui all'equazione 3.3, sono definite in base alla tipologia strutturale (materiali, sistema resistente, ecc.); in particolare si fa riferimento alle 36 categorie tipologiche, suddivise ulteriormente in base all'altezza ed in funzione dei codici sismici in cui sono state presumibilmente progettate. In questo ambito esistono 4 classi (High-Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code) che esprimono la qualità della struttura in relazione alla performance sismica necessaria. Per gli ospedali ed altri edifici strategici si considerano funzioni di danno specifiche che tengono conto che tali strutture sono state costruite con codici di livello superiore a quelli medi delle altre strutture.

A ciascuna area geografica si associa un livello di progettazione secondo il criterio per cui: nelle zone a più alta sismicità c'è l'applicazione dei codici più avanzati per la progettazione sismica per quelle strutture di più recente costruzione (ad esempio, per la California dopo il 1973 le strutture si considerano High-Code), più si va indietro nel tempo più la qualità della progettazione scende (1940-1973 per la California si parla di Moderate-Code). Le strutture costruite prima del 1940 sono considerate Pre-Code e cioè progettate senza alcun criterio anti-sismico.

La capacità di classe, alla base del calcolo delle curve di fragilità, è descritta con curve di push-over bilinearizzate. I due punti fondamentali sono la capacità di snervamento (che si ottiene prolungando il tratto lineare definito dalla capacità di progetto) e quella ultima.

Le curve di capacità sono definite dalla stima dei parametri che influenzano la progettazione come il periodo fondamentale di oscillazione, la sovra-resistenza e la duttilità. Alcuni di questi parametri si ricavano dai codici, una volta definito il livello di riferimento per la progettazione, altri si considerano indipendenti e assegnati a priori in base alla tipologia strutturale.

Alla curva di capacità, costruita con valori di classe tabellati, si associa una incertezza lognormale. La dispersione sulla curva di capacità è anch'essa tabellata e dipende dal livello del codice con cui quella classe strutturale si considera progettata. Per stabilire la risposta si interseca la curva di capacità mediana con lo spettro come descritto in Figura 3.7.

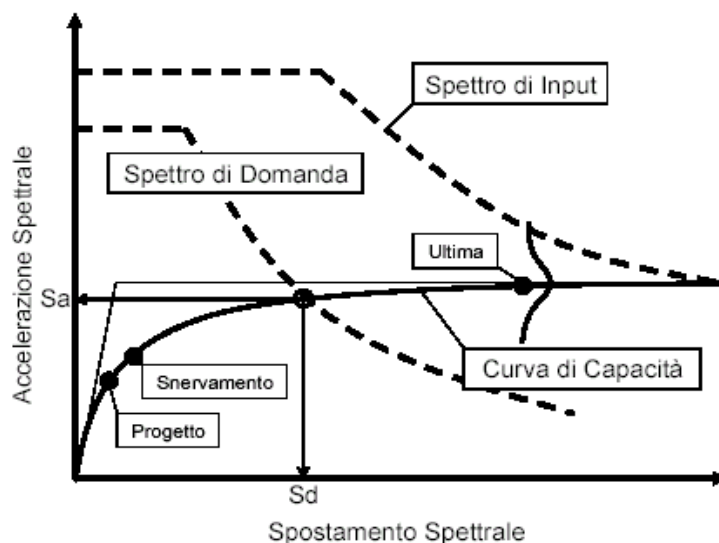


Fig.3.7: Richiesta e capacità nel metodo Hazus

### 3.2.3 Il metodo Risk-UE

Nell'ambito del progetto europeo Risk-Ue denominato “An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns” è stata proposta una metodologia per la riduzione delle perdite provocate dal terremoto e per la generazione di piani d'azione per la mitigazione del rischio sismico. Questa metodologia si basa su un inventario degli elementi a rischio e su un'analisi del loro valore e della loro vulnerabilità al fine di identificare i punti deboli del sistema urbano. La metodologia è stata applicata a sette città europee: Barcellona (Spagna), Bitola (Macedonia), Bucarest (Romania), Catania (Italia), Nizza (Francia), Sofia (Bulgaria) e Tessalonica (Grecia).

L'intero progetto ha interessato diversi aspetti, ciascuno di questi è stato trattato in maniera dettagliata in un “Working paper”. I contenuti di questi lavori sono i seguenti: WP1: “Caratteristiche peculiari delle città, inventario di dati e tipologie”, WP2: “Manuale di base degli scenari di terremoto”, WP3: “Metodologia sull'esposizione del sistema urbano ai disastri naturali”, WP4: “Vulnerabilità degli edifici”, WP5: “Valutazione della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali”, WP6: “Valutazione di vulnerabilità degli impianti e delle strutture essenziali”, WP7: “Manuale degli scenari di rischio sismico”.

Per le tipologie che rappresentano il costruito ordinario prevalente europeo si è tentato di sviluppare dei modelli di vulnerabilità e fragilità che descrivessero la relazione tra probabilità condizionata dei potenziali danni alle strutture ed un adeguato rischio sismico. La recente metodologia proposta nell'ambito del progetto europeo Risk-Ue prevede due livelli di analisi per la valutazione della vulnerabilità sismica del costruito europeo. Il primo livello è un metodo di tipo macrosismico in cui la valutazione è espressa in termini di un *indice di vulnerabilità* in funzione del quale è possibile ottenere la rappresentazione del danno, noto l'input sismico. Definita la classe di appartenenza dell'edificio considerato all'interno della Building Typology Matrix (BTM) rappresentativa del costruito europeo, è possibile definire immediatamente l'indice di vulnerabilità tipologico, caratteristico di quella determinata tipologia di edifici. L'indice di vulnerabilità finale sarà fornito dalla somma di questo indice tipologico e di un fattore modificatore di comportamento che tiene conto della interazione della costruzione all'interno dell'aggregato, delle caratteristiche costruttive locali, dello stato di manutenzione, etc. Il metodo di I livello è utilizzato per definire le classi di vulnerabilità, gli indici di vulnerabilità e sviluppare le matrici di probabilità di danno (DPM) pertinenti alle tipologie della BTM. Il II livello della metodologia è di maggiore dettaglio, prevede infatti la definizione della geometria, dei parametri dinamici e strutturali dell'edificio e verrà tratto in dettaglio nel Cap.5.

Per entrambi gli approcci adottati per la generazione dei modelli di vulnerabilità/fragilità è stata determinata una matrice “Building Typology Matrix” (BTM) (Tab.3.1) che descrive il costruito prevalente europeo. Questa comprende 23 principali classi di edifici raggruppati in base alla tipologia strutturale ed al materiale costruttivo. Questi edifici sono divisi in sottogruppi mediante tre tipiche classi di altezza:

- low-rise (1-2 piani per edifici in muratura e legno; 1-3 piani per edifici in calcestruzzo armato);
- mid-rise (3-5 piani per edifici in muratura e legno; 4-7 piani per edifici in calcestruzzo armato);

- high-rise (+6 piani per edifici in muratura e legno; +8 piani per edifici in calcestruzzo armato).

Le tipologie costruttive delle classi di edifici sono così descritte:

### **M1.1 – Muratura portante fatta di pietrame**

Sono costruzioni tradizionali in cui il pietrame è usato come materiale costruttivo di base, generalmente di scarsa qualità che conferisce alla struttura peso e piccola resistenza ai carichi orizzontali. I solai sono tipicamente di legno e non forniscono rigidità orizzontale.

### **M1.2 – Muratura portante fatta di pietra semplice**

Le costruzioni in pietra semplice differiscono dalle costruzioni in pietrame nelle quali la pietra ha subito una certa preparazione prima di essere usata. Queste pietre squadrate sono sistemate in accordo alle tecniche di miglioramento della resistenza della struttura. In questa tipologia rientrano edifici in muratura di pietre preparate grossolanamente, di dimensioni significative, e, qualche volta con piccole pietre spigolose, per incrementare la superficie di contatto. Si può includere in questa tipologia la muratura di pietrame intercalata con strati orizzontali di mattoni o grosse pietre.

### **M1.3 – Muratura portante fatta di pietra massiccia**

Edifici con pietre molto grandi generalmente si tratta di costruzioni monumentali, palazzi, castelli. Guardando le tecniche costruttive, questo tipo di muratura si è sviluppata nel Medioevo, le pietre sono preparate con grande accuratezza ed i materiali e la fattura sono più che mai di grande qualità. Conseguentemente questi edifici possiedono generalmente grande resistenza che contribuisce ad un buon comportamento sismico.

### **M2 – Laterizi**

Questo tipo di costruzione si può trovare lì dove è possibile reperire argilla adatta. I metodi di costruzione con i laterizi sono molto vari e questo implica comportamenti molto diversi nei confronti del terremoto. Le pareti sono costruite con strati di mattoni di laterizi che sono resistenti ma leggeri; i laterizi possono avere un comportamento migliore in dipendenza della qualità della malta e dei mattoni. Le abitazioni in laterizio con telai o controventi in legno possono incrementare la resistenza laterale e fornire un miglior comportamento durante il terremoto. Edifici del genere possono risentire dei danni relativamente piccoli alle pareti in laterizio mentre il telaio in legno rimane intatto. Ci possono essere casi in cui sono usate travi e pilastri in legno in case di laterizio, queste forniscono una maggiore resistenza orizzontale e quindi migliorano la prestazione, ma non tanto quanto potrebbe fare un unico telaio.

### **M3.1 – Muratura portante non armata con solai di legno**

Sono edifici con muratura portante non armata e solai in legno. La maggior parte degli impalcati di piano e di copertura sono costituiti da pannelli di legno appoggiati su arcarecci in legno. In generale, la vulnerabilità dipende dal numero, dalla dimensione e dalla posizione delle aperture. Grosse aperture, piccoli maschi murari, così come pareti molto distanziate a causa di ampi locali, contribuiscono ad incrementare la vulnerabilità.

Tabella 3.1. BTM “Building Typology Matrix”

| numero | Simbologia | Descrizione del tipo di costruzione                                   | descrizione altezza |                        |         |
|--------|------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|---------|
|        |            |                                                                       | n. di piani         | Range altezza $h_r(m)$ | Rischio |
|        | <b>M</b>   | <b>Edifici in muratura</b>                                            |                     |                        |         |
|        | <b>M1</b>  | <b>muratura portante fatta di:</b>                                    |                     |                        |         |
| 1      | M1.1L      | pietrame                                                              | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 2      | M1.1M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 3      | M1.2L      | pietra semplice                                                       | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 4      | M1.2M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 5      | M1.2H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 6      | M1.3L      | pietra massiccia                                                      | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 7      | M1.3M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 8      | M1.3H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 9      | M2L        | laterizi                                                              | 1-2                 |                        | basso   |
|        | <b>M3</b>  | <b>muratura portante rinforzata con:</b>                              |                     |                        |         |
| 10     | M3.1L      | solette di legno                                                      | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 11     | M3.1M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 12     | M3.1H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 13     | M3.2L      | volte in muratura                                                     | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 14     | M3.2M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 15     | M3.2H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 16     | M3.3L      | solette composte di acciaio e muratura                                | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 17     | M3.3M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 18     | M3.3H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 19     | M3.4L      | solette in calcestruzzo armato                                        | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 20     | M3.4M      |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 21     | M3.4H      |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 22     | M4L        | muri portanti in muratura confinata o rinforzata                      | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 23     | M4M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 24     | M4H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 25     | M5L        | altri edifici in muratura rinforzata                                  | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 26     | M5M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 27     | M5H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
|        | <b>RC</b>  | <b>Strutture in calcestruzzo armato</b>                               |                     |                        |         |
| 28     | RC1L       | telai in c.a.                                                         | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 29     | RC1M       |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 30     | RC1H       |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 31     | RC2L       | pareti di taglio in c.a.                                              | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 32     | RC2M       |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 33     | RC2H       |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
|        | <b>RC3</b> | <b>telai in cls con pannelli murari di tamponatura non rinforzata</b> |                     |                        |         |
| 34     | RC3.1L     | telai regolari                                                        | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 35     | RC3.1M     |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 36     | RC3.1H     |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 37     | RC3.2L     | telai irregolari                                                      | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 38     | RC3.2M     |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 39     | RC3.2H     |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 40     | RC4L       | sistemi duali (telai e pareti di taglio)                              | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 41     | RC4M       |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 42     | RC4H       |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 43     | RC5L       | pareti in c.a. prefabbricato                                          | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 44     | RC5M       |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 45     | RC5H       |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 46     | RC6L       | telai con pareti di taglio in c.a. prefabbricato                      | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 47     | RC6M       |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 48     | RC6H       |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
|        | <b>S</b>   | <b>Strutture in acciaio</b>                                           |                     |                        |         |
| 49     | S1L        | telai a nodi rigidi                                                   | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 50     | S1M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 51     | S1H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 52     | S2L        | telai controventati                                                   | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 53     | S2M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 54     | S2H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 55     | S3L        | telai in acciaio con pannelli murari di tamponatura non rinforzata    | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 56     | S3M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 57     | S3H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 58     | S4L        | telai in acciaio con muri di taglio in cls gettato in opera           | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 59     | S4M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 60     | S4H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
| 61     | S5L        | acciaio e sistemi compositi in c.a.                                   | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 62     | S5M        |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |
| 63     | S5H        |                                                                       | +6                  | $h > 15$               | alto    |
|        | <b>W</b>   | <b>Strutture in legno</b>                                             |                     |                        |         |
| 64     | WL         |                                                                       | 1-2                 | $h \leq 6$             | basso   |
| 65     | WM         |                                                                       | 3-5                 | $6 < h \leq 15$        | medio   |

**M3.2 – Muratura portante non armata con volte in muratura**

Sono edifici con muratura portante non armata con volte in muratura. Le volte in muratura sono sostenute direttamente dalla muratura armata portante o indirettamente attraverso archi in muratura. Nella maggior parte dei casi questa tipologia strutturale si incontra negli edifici religiosi. In generale, la vulnerabilità è legata al numero ed alle dimensioni delle aperture. Grosse aperture, piccoli maschi murari, così come pareti molto distanziate a causa di ampi locali, contribuiscono ad incrementare la vulnerabilità

**M3.3 – Muratura portante non armata con solai composti di acciaio e muratura**

Sono edifici con muratura portante non armata con solai composti di acciaio e muratura. I solai sono composti di travi d'acciaio sostenuti da muratura portante non armata e volte in muratura poste tra travi e sostenuta su una trave flangiata. In generale, la vulnerabilità è legata al numero ed alle dimensioni delle aperture. Grandi aperture, piccole travi tra le aperture, oltre ai radi muri interni dovuti alle ampie stanze, contribuiscono ad incrementare la vulnerabilità di questi edifici.

**M3.4 – Muratura portante non armata con solai in calcestruzzo armato**

Sebbene le pareti siano gli elementi più importanti da osservare in un edificio, qualche volta gli elementi orizzontali possono essere ugualmente importanti per la determinazione della resistenza di una struttura soggetta a carichi orizzontali. Infatti, nel caso in cui la costruzione è costituita da pareti murarie non armate se i solai sono realizzati mediante calcestruzzo armato ciò migliorerà significativamente il comportamento dell'intero edificio. Se le pareti sono ben ammassate al solaio mediante la presenza di cordolature, l'edificio avrà un comportamento "scatolare" con conseguente riduzione del rischio di collasso delle pareti ortogonali alla direzione dell'azione orizzontale. Solitamente la presenza dei cordoli si ha solo negli edifici più recenti, pertanto solo in questo caso si ottiene un significativo miglioramento del comportamento sotto carichi orizzontali.

**M4 – Pareti portanti in muratura confinata o armata**

Nel caso di muratura armata, barre o reti in acciaio sono inserite in fori appositamente predisposti in modo tale da realizzare una struttura composta (parete di muratura armata) avente resistenza e duttilità più elevate. I fori presenti nelle pareti murarie sono tali da garantire la presenza dell'armatura sia in direzione orizzontale che verticale. La muratura confinata è caratterizzata da parti murarie delimitate superiormente ed inferiormente da travi e lateralmente da pilastri in modo tale da ottenere, anche in tal caso, un incremento in termini di prestazioni strutturali grazie alla collaborazione di differenti materiali. È importante sottolineare come in queste strutture gli elementi in calcestruzzo armato non debbano costituire un telaio, visto che il principale sistema resistente alle azioni orizzontali è costituito sempre dalle pareti.

**M5 – Edifici in muratura armata**

Vecchi edifici in muratura possono essere stati consolidati con conseguente riduzione della vulnerabilità sismica. Appartengono a questa categoria: a) edifici con nuovi solai in c.a. (rigidi nel loro piano) aventi cordolature; b) edifici consolidati mediante applicazione di lastre in calcestruzzo armato sulle superfici laterali delle pareti murarie; c) edifici consolidati attraverso la realizzazione di

cordoli e pilastri in c.a nello spessore delle pareti; d) edifici consolidati attraverso l'inserimento nello spessore delle pareti di un telaio in acciaio. Il comportamento di questo tipo di edificio è veramente molto vario perché dipende dall'efficacia dell'intervento adottato in relazione all'edificio originario e alla qualità della sua realizzazione attuale.

### **RC1 – Telai in c.a.**

Gli elementi strutturali di questi telai sono costituiti da pilastri, travi e nodi trave-pilastro. In alcuni casi, le connessioni trave-pilastro hanno ridotte capacità di resistere a momenti flettenti ma, in altri casi, alcune travi e pilastri sono progettati per resistere ad azioni laterali. Generalmente la struttura è nascosta da pareti non strutturali, che possono essere di diversi materiali (pareti cortina, muratura in mattoni o pannelli in calcestruzzo prefabbricato). Le azioni orizzontali sono trasferite ai telai dai solai in c.a. La ridotta rigidezza dei telai può produrre danni abbastanza importanti agli elementi non strutturali a causa degli elevati valori degli spostamenti di interpiano. Ci sono diverse tipologie di sistemi resistenti a telaio. Solitamente, i telai di vecchia generazione non sono proporzionati adeguatamente e sono realizzati con scadenti dettagli costruttivi, di conseguenza in caso di terremoto le membrature possono subire rotture fragili provocando collassi parziali o globali. Al contrario, moderni telai posti in zone ad alta sismicità sono progettati in maniera adeguata e concepiti con dettagli costruttivi tali da garantire un comportamento duttile pertanto in caso di azione sismica essi esibiscono grandi deformazioni senza giungere a collasso.

### **RC2 – Pareti di taglio in c.a.**

Nelle costruzioni più vecchie le pareti di taglio spesso hanno grandi sezioni trasversali così che le tensioni per carichi gravitazionali sono bassi e pertanto si hanno ridotte armature longitudinali e trasversali. Negli edifici più recenti, le pareti a taglio sono generalmente progettate in maniera adeguata ed hanno spesso sezioni ridotte. In tali strutture particolare attenzione deve essere dedicata ai collegamenti tra le pareti di taglio e gli elementi che ad esse sono collegate. E' noto che le strutture in c.a. con pareti di taglio sono le soluzioni più adeguate per resistere a terremoti per edifici di media altezza.

### **RC3.1 – Telai in cls con pannelli murari regolari di tamponatura non armata**

Strutture generalmente progettate senza norme sismiche che hanno pannelli murari regolari che contribuiscono significativamente ad incrementare la resistenza alle azioni laterali. I pannelli murari di tamponatura, quando sono completamente ancorati ai telai (ad esempio sono posti sullo stesso piano), possono fornire alla struttura una rigidezza ed una resistenza adeguata ai carichi laterali. In questi edifici, il comportamento fragile dei pilastri dopo la rottura delle tamponature può limitare la risposta del sistema.

### **RC3.2 – Telai in cls con pannelli murari irregolari di tamponatura non armata**

Queste strutture sono simili a quelle in cls con pannelli murari regolari di tamponatura non armata eccetto che per il sistema strutturale che manca di regolarità dei telai in cls o dei pannelli murari. L'irregolarità del telaio in cls e/o la presenza di piani deboli (in particolare al piano terra) producono un cattivo comportamento strutturale sotto carichi laterali.

**RC4 – Sistemi accoppiati (telai e pareti di taglio)**

Questi edifici hanno sistemi strutturali composti da telai in c.a. e pareti di taglio.

**RC5 – Pareti in c.a. prefabbricato**

Questi edifici sono costituiti da pareti di taglio in c.a. prefabbricato collegate da solai in c.a. prefabbricate. Gli edifici più vecchi hanno spesso connessioni inadeguate per l'ancoraggio delle pareti ai solai ed in generale le connessioni ai pannelli prefabbricati sono spesso fragili. Le pareti possono avere numerose aperture per porte o finestre di dimensioni tali che esse sembrano più un telaio che ad una parete di taglio.

**RC6 – Telai in cls prefabbricato con pareti di taglio in cls**

Questi edifici hanno solai in c.a. composte tipicamente da elementi prefabbricati con o senza soletta superiore di cls gettato in opera. Travi e pilastri in cls prefabbricati sostengono i solai di copertura ed intermedi. I solai ed i nodi trave-pilastro sono completati da getti integrativi di cls. Elementi di acciaio saldato sono spesso usati per collegare gli elementi prefabbricati. Le pareti di taglio in c.a. prefabbricato resistono ai carichi laterali. Gli edifici con telai prefabbricati e pareti di taglio in cls esibiscono una buona risposta strutturale, i dettagli costruttivi usati per collegare gli elementi strutturali devono avere sufficiente resistenza e capacità di deformazione; comunque, in alcuni casi, i collegamenti tra gli elementi prefabbricati hanno duttilità trascurabile.

**S1 – Telai in acciaio a nodi rigidi**

Gli elementi strutturali di questi edifici sono costituiti da travi e colonne in acciaio. In alcuni casi i collegamenti trave – colonna hanno ridotte capacità di resistere a momenti flettenti ma, in altri casi, i collegamenti sono progettati per resistere ad azioni laterali. Generalmente la struttura è nascosta da pareti non strutturali, che possono essere di diversi materiali (pareti cortina, muratura in mattoni o pannelli in calcestruzzo prefabbricato). Le azioni orizzontali sono trasferite ai telai da diaframmi. I telai sviluppano una certa rigidità laterale a causa della capacità dei collegamenti trave – colonna di trasferire interamente (telai a nodi rigidi) o parzialmente (telai a nodi semirigidi) le sollecitazioni flettenti.

**S2 – Telai controventati in acciaio**

Questi edifici differiscono da quelli a telaio a nodi rigidi per la ridotta capacità, da parte dei collegamenti trave – colonna, di trasferire le sollecitazioni flettenti (telai pendolari). Pertanto le azioni orizzontali sono fronteggiate mediante l'inserimento di controventi.

**S3 – Telai in acciaio con pannelli murari di tamponatura non armata**

I pannelli murari di tamponatura, quando sono completamente ancorati ai telai (ad esempio sono posti sullo stesso piano), possono fornire alla struttura una rigidità ed una resistenza adeguata ai carichi laterali.

**S4 – Telai in acciaio con pareti di taglio in cls gettato in opera**

Le pareti di taglio di questi edifici sono di c.a. gettato in opera. Il telaio in acciaio è progettato per soli carichi verticali. Il telaio in acciaio può essere fornito di un sistema secondario resistente ai carichi orizzontali che dipende dalla rigidità del telaio e dalla capacità resistente dei collegamenti trave-colonna. Nei moderni sistemi accoppiati i telai sono progettati per lavorare sempre con le pareti in c.a.



### S5 – Sistemi compositi Acciaio - c.a.

Questi edifici hanno telai costituiti da membrature (pilastri e colonne) realizzate mediante strutture composte cls – acciaio. Generalmente la struttura è nascosta da pareti non strutturali, che possono essere di diversi materiali (pareti cortina, muratura in mattoni o pannelli in calcestruzzo prefabbricato). Le azioni orizzontali sono trasferite ai telai da diaframmi. I telai sviluppano una certa rigidità laterale a causa della capacità dei collegamenti trave – colonna di trasferire interamente (telai a nodi rigidi) o parzialmente (telai a nodi semirigidi) le sollecitazioni flettenti.

### W – Strutture in legno

Le strutture in legno sono tipicamente abitazioni singole o piccole abitazioni multi – familiari. Il sistema resistente alle forze laterali è costituito da telai in legno controventati o telai di legno rivestiti da pannelli (pannelli in compensato o altri pannelli a base di legno). Vista la leggerezza di tali tipologie costruttive, si hanno in questo caso carichi modesti. Queste costruzioni hanno solitamente luci ridotte. Esse possono presentare elementi in muratura quali canne fumarie o possono essere parzialmente o totalmente rivestite da murature. I solai sono solitamente costituiti da arcarecci in legno collegati superiormente da pannelli a base di legno mentre le pareti sono realizzate da montanti in legno rivestiti da pannelli a base di legno e/o a base di gesso.

Il metodo adottato per la valutazione della vulnerabilità sismica implementato nell'ambito del progetto Risk-Ue è di tipo macrosismico, basato, quindi, sull'osservazione dei danni. La definizione di un metodo macrosismico richiede la disponibilità di dati relativi al danno osservato a seguito di fenomeni sismici di diversa intensità. L'Italia ha una grossa tradizione in tal senso con dati rilevati a seguito dei principali eventi sismici ma, la disponibilità di rilievi del danno sismico non è comune a tutti i paesi europei; inoltre i dati disponibili sono confrontabili solo a fronte di diverse assunzioni essendo rilevati secondo criteri diversi. Per ovviare a questi problemi, il metodo è stato derivato facendo riferimento alla scala macrosismica europea EMS-98 (Grunthal, 1998), partendo dal presupposto che ogni scala macrosismica, contenga implicitamente un modello di vulnerabilità.

In seguito viene riportata la classificazione tipologica della scala EMS-98 e le modifiche ad essa apportate per la definizione della metodologia proposta da Giovinazzi e Lagomarsino, 2001. Nella EMS-98 infatti non c'erano riferimenti ad edifici in acciaio e prefabbricati, per questo motivo sono state aggiunte queste altre due classi tipologiche. All'interno della scala EMS-98 è contenuta la descrizione del danneggiamento atteso per sei classi di vulnerabilità (dalla A alla F) e per ogni livello di intensità. Il danneggiamento è espresso in 5 gradi di danno  $D_k$  ( $k = 1,2,3,4,5$ ) più l'assenza di danno  $D_0$ ; per esprimere la quantità di edifici danneggiati vengono utilizzati i termini linguistici *few* (pochi), *many* (molti), *most* (la maggior parte). Tali descrizioni sono state completate e tradotte in termini numerici, utilizzando un approccio misto (Probabilistico-Fuzzy), al fine di ottenere delle Damage Probability Matrix (DPM). La derivazione del metodo macrosismico si serve dell'approccio probabilistico, questo viene utilizzato per completare le matrici della EMS-98 che riportano il livello di danno in funzione dell'intensità macrosismica per una assegnata classe di vulnerabilità; viene inoltre descritta la teoria fuzzy utilizzata per la traduzione dei termini *few*, *many* e *most* in termini numerici. Sono così stati determinati i valori degli indici di vulnerabilità per le classi della scala EMS-98. E' stato inoltre definito un parametro significativo della

distribuzione del danno, il *grado di danno medio*  $\mu_D$  che, a differenza dei gradi di danno, è un parametro continuo  $0 < \mu_D < 5$ .

Rappresentando, per ciascuna classe di vulnerabilità, i valori del danno medio al variare dell'intensità, sono state tracciate delle curve di vulnerabilità.

Viene infine descritto il metodo utilizzato per la definizione dell'indice di vulnerabilità tipologico e dei fattori modificatori di comportamento. Anche in questo caso la teoria fuzzy fornisce un valido contributo per definire l'appartenenza di ciascuna tipologia costruttiva ad una classe di vulnerabilità.

### 3.2.3.1 Matrice di probabilità di danno DPM per le classi di vulnerabilità della EMS-98

La classificazione tipologica adottata nell'ambito del progetto Risk-Ue corrisponde a quella proposta dalla scala EMS-98, a meno di alcune modifiche. La classificazione tipologica utilizzata nella scala EMS-98 contiene una suddivisione delle tipologie costruttive di particolare efficacia, in quanto valida su tutto il territorio europeo ma al tempo stesso non generica e tale da consentire un'attribuzione sufficientemente chiara e precisa di un edificio ad una determinata classe tipologica. Essa distingue, in primo luogo, le costruzioni in funzione del materiale strutturale: *muratura*, *calcestruzzo armato*, *acciaio*, *legno*; per ciascuna categoria sono quindi individuate differenti tipologie costruttive.

Per le costruzioni in muratura sono considerate sette tipologie che rappresentano piuttosto bene la tradizione costruttiva italiana, molto varia per materiali, tecnica di posa in opera e particolari costruttivi. È significativo osservare come la priorità sia data alla qualità del materiale muratura, quello che costituisce gli elementi sismo-resistenti della costruzione (pareti); a questo primo livello di classificazione si presuppone che la qualità degli altri elementi che influenzano la risposta siano, in media, coerenti con la tipologia muraria. Ad esempio gli edifici in pietra grezza avranno in genere peggiori qualità costruttive nei solai e nei collegamenti rispetto a quelli in pietre sbozzate o a spacco; gli edifici più recenti in muratura non armata di elementi artificiali (laterizi, blocchetti in calcestruzzo) avranno nella maggioranza dei casi orizzontamenti latero-cementizi.

Per quanto riguarda il calcestruzzo armato, le costruzioni sono distinte in relazione al sistema sismo-resistente (telaio o pareti di taglio) ed al livello di progetto antisismico adottato per realizzarle. Per le costruzioni in acciaio e in legno è presente una sola categoria, una definizione certamente troppo vaga per includere situazioni anche molto diverse. Infine, la EMS-98 non fa riferimento alle costruzioni prefabbricate, importanti nelle aree periferiche delle grandi città.

Per lo sviluppo della nuova metodologia per l'analisi di vulnerabilità è stata definita una classificazione tipologica (Tab. 3.2) basata su quanto contenuto nella EMS-98, per le costruzioni in muratura ed in cemento armato, e sulla classificazione Hazus, per gli edifici prefabbricati ed in acciaio. Per la muratura è stata aggiunta un'altra tipologia per considerare le costruzioni povere (M1 e M3), rinforzate con interventi di adeguamento sismico pesante, che ne hanno modificato in maniera significativa il comportamento; queste costruzioni raramente assumono le caratteristiche di un edificio di tipo M6 e, spesso, risultano ancora più vulnerabili dell'edificio originale. Anche per le costruzioni in c.a. viene proposta un'ulteriore tipologia (RC7), relativa agli edifici su pilotis: l'assenza pressoché totale di tamponature al piano terra rappresenta infatti una grave

causa di vulnerabilità, facilmente individuabile in un censimento speditivo del costruito (Giovinazzi e. Lagomarsino, 2001).

Tabella 3.2. Classificazione tipologica del costruito adottata nella nuova metodologia

| Tipologie      |     | Descrizione                                                                            |
|----------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|
| MURATURA       | M1  | Pietra grezza (ciottoli, pietrame, mista)                                              |
|                | M2  | Case in terra o con mattoni crudi                                                      |
|                | M3  | Pietre sbazzate o a spacco                                                             |
|                | M4  | Pietre squadrate                                                                       |
|                | M5  | Mattoni                                                                                |
|                | M6  | Muratura non armata (pietra lavorata, laterizi o blocchi di cemento) con solai in c.a. |
|                | M7  | Muratura armata o confinata                                                            |
|                | M8  | Costruzioni antiche sottoposte ad interventi di rinforzo complessivo                   |
| CEMENTO ARMATO | RC1 | Telaio in c.a. (in assenza di progetto antisismico)                                    |
|                | RC2 | Telaio in c.a. (con progetto antisismico a bassa duttilità)                            |
|                | RC3 | Telaio in c.a. (con progetto antisismico elevato)                                      |
|                | RC4 | Pareti di taglio (in assenza di progetto antisismico)                                  |
|                | RC5 | Pareti di taglio (con progetto antisismico a bassa duttilità)                          |
|                | RC6 | Pareti di taglio (con progetto antisismico elevato).                                   |
|                | RC7 | Telaio in cemento armato con <i>pilotis</i>                                            |
| PRE FABBR.     | PC1 | Edificio prefabbricato a setti portanti in c.a.                                        |
|                | PC2 | Telaio in cemento armato prefabbricato con pareti di taglio in c.a.                    |
| ACCIAIO        | S1  | Edificio in acciaio con telaio a nodi rigidi                                           |
|                | S2  | Edificio in acciaio con telaio rinforzato da controventi                               |
|                | S3  | Edificio con telaio in acciaio e tamponature in muratura non rinforzata                |
|                | S4  | Telaio in acciaio con pareti di taglio in cemento armato gettate in opera              |
| LEGNO          | W1  | Strutture in legno                                                                     |

Il metodo macrosismico qui analizzato fa riferimento alla scala EMS-98 perché, come detto precedentemente, questa contiene una chiara definizione delle tipologie del costruito europeo. Questa scala fa riferimento a sei classi di vulnerabilità decrescente da A ad F. In Tabella 3.3 sono riportate le matrici di probabilità di danno per le classi di vulnerabilità della EMS-98. Le classi di vulnerabilità costituiscono un modo per raggruppare edifici anche diversi ma caratterizzati da un comportamento analogo nei riguardi del sisma; a ciascuna classe di vulnerabilità viene quindi associata una relazione tra intensità del terremoto e danno subito. Il danno è rappresentato in forma discreta attraverso cinque livelli di danno, oltre alla situazione di assenza di danno con le seguenti denominazioni: 1) danno trascurabile o lieve; 2) danno moderato; 3) danno grave; 4) danno molto grave; 5) distruzione. Ciascun livello di danno è descritto dettagliatamente, differenziando le conseguenze su edifici in muratura e su quelli in c.a.

Nella EMS-98 quindi sono riportate delle matrici che riportano, per una determinata classe di vulnerabilità, la quantità di edifici danneggiati per una prefissata intensità sismica (Intensità) ed un certo livello di danno (Damage L.). Per esprimere la quantità di edifici danneggiati vengono utilizzati termini linguistici; “*pochi*” (*few*), “*molti*” (*many*), “*la maggior parte*” (*most*). Tali matrici risultano però incomplete e vaghe. A titolo di esempio considerino le classi di vulnerabilità B e C della scala EMS-98 riportate in Tabella 3.3.

Sono infatti incomplete perché, come si può notare nel caso della classe di vulnerabilità B ad esempio, non ci sono informazioni per i livelli di danno 3, 4 e 5 nel caso in cui l'intensità sia pari a VI. Inoltre risulta vaga per l'utilizzo dei termini linguistici *few*, *many* e *most*.

Tabella 3.3: Matrici di probabilità di danno per le classi di vulnerabilità della EMS-98. (Grunthal, 1998)

| Class A          |      |     |      |      |      |
|------------------|------|-----|------|------|------|
| Damage Intensity | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    |
| V                | Few  |     |      |      |      |
| VI               | Many | Few |      |      |      |
| VII              |      |     | Many | Few  |      |
| VIII             |      |     |      | Many | Few  |
| IX               |      |     |      |      | Many |
| X                |      |     |      |      | Most |
| XI               |      |     |      |      |      |
| XII              |      |     |      |      |      |

| Class B          |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Damage Intensity | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| V                | Few  |      |      |      |      |
| VI               | Many | Few  |      |      |      |
| VII              |      | Many | Few  |      |      |
| VIII             |      |      | Many | Few  |      |
| IX               |      |      |      | Many | Few  |
| X                |      |      |      |      | Many |
| XI               |      |      |      |      | Most |
| XII              |      |      |      |      |      |

| Class C          |     |      |      |      |      |
|------------------|-----|------|------|------|------|
| Damage Intensity | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |
| V                |     |      |      |      |      |
| VI               | Few |      |      |      |      |
| VII              |     | Few  |      |      |      |
| VIII             |     | Many | Few  |      |      |
| IX               |     |      | Many | Few  |      |
| X                |     |      |      | Many | Few  |
| XI               |     |      |      |      | Many |
| XII              |     |      |      |      | Most |

| Class D          |     |      |      |      |      |
|------------------|-----|------|------|------|------|
| Damage Intensity | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |
| V                |     |      |      |      |      |
| VI               |     |      |      |      |      |
| VII              | Few |      |      |      |      |
| VIII             |     | Few  |      |      |      |
| IX               |     | Many | Few  |      |      |
| X                |     |      | Many | Few  |      |
| XI               |     |      |      | Many | Few  |
| XII              |     |      |      |      | Most |

| Class E          |   |      |      |     |   |
|------------------|---|------|------|-----|---|
| Damage Intensity | 1 | 2    | 3    | 4   | 5 |
| V                |   |      |      |     |   |
| VI               |   |      |      |     |   |
| VII              |   |      |      |     |   |
| VIII             |   |      |      |     |   |
| IX               |   | Few  |      |     |   |
| X                |   | Many | Few  |     |   |
| XI               |   |      | Many | Few |   |
| XII              |   |      |      |     |   |

| Class F          |   |      |     |   |   |
|------------------|---|------|-----|---|---|
| Damage Intensity | 1 | 2    | 3   | 4 | 5 |
| V                |   |      |     |   |   |
| VI               |   |      |     |   |   |
| VII              |   |      |     |   |   |
| VIII             |   |      |     |   |   |
| IX               |   |      |     |   |   |
| X                |   | Few  |     |   |   |
| XI               |   | Many | Few |   |   |
| XII              |   |      |     |   |   |

Tali descrizioni sono state completate e tradotte in termini numerici utilizzando un approccio Probabilistico-Fuzzy al fine di ottenere delle DPM (Damage Probability Matrix). Tali matrici esprimono una correlazione statistica tra l'intensità macrosismica ed il danno apparente; in particolare, esse esprimono la probabilità, per una costruzione appartenente ad una certa classe di vulnerabilità, di soffrire un certo livello di danno per una certa intensità.

Per completare la EMS-98 è stato proposto da Giovinazzi e Lagomarsino di introdurre una appropriata distribuzione di probabilità discreta del danno. La distribuzione utilizzata per calcolare le DPM continue per ogni classe di vulnerabilità è la distribuzione  $\beta$ :

$$P_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad a \leq x < b \quad (3.7)$$

dove  $a, b$  e  $t$  sono i parametri della distribuzione  $\beta$  correlati con il grado di danno medio  $\mu_D$ .

$$q = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad (3.8)$$

dove  $t$  è assunto pari ad 8.

Allo scopo di usare la distribuzione  $\beta$  è necessario fare riferimento al livello di danno  $k$ , che è una variabile discreta caratterizzata da 5 livelli di danno più l'assenza di danno. E' perciò consigliabile assegnare valore 0 al parametro  $a$  e valore 6 al parametro  $b$  (dove  $a$  e  $b$  sono i valori dell'intervallo di definizione della variabile  $x$ ).

Partendo da questa assunzione è possibile calcolare la probabilità  $P_k$  associata al livello di danno  $k$  ( $k=0,1,2,3,4,5$ ) come segue:

$$P_k = P_\beta(k+1) - P_\beta(k) \quad (3.9)$$

Il grado di danno medio  $\mu_D$ , valore medio della distribuzione discreta è così definito:

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 P_k k \quad (3.10)$$

Per tradurre i termini linguistici in un preciso valore di probabilità si è utilizzata la Teoria Fuzzy in base alla quale le definizioni quantitative possono essere interpretate con la funzione di appartenenza  $\chi$ . Questa funzione definisce l'appartenenza di un certo parametro ad uno specifico insieme, ovvero il valore di:

$\chi=1$  quando l'appartenenza è possibile (*plausible*),

$\chi=0-1$  quando il valore del parametro è raro ma probabile (*possible*),

$\chi=0$  se il parametro non appartiene all'insieme considerato.

### 3.2.3.2 Curve di vulnerabilità ed indici di vulnerabilità semi-empirici

L'appartenenza di un edificio ad una specifica classe di vulnerabilità è definita dall'*indice di vulnerabilità*. Esso ha valori arbitrari e rappresentano solo un punteggio che quantifica il comportamento sismico dell'edificio. L'intervallo dell'indice di vulnerabilità è compreso tra 0 ed 1. L'intervallo delle percentuali corrispondenti ai termini quantitativi *few*, *many* e *most* adottati dalla scala EMS-98 sono rappresentati in seguito nella Figura 3.8.

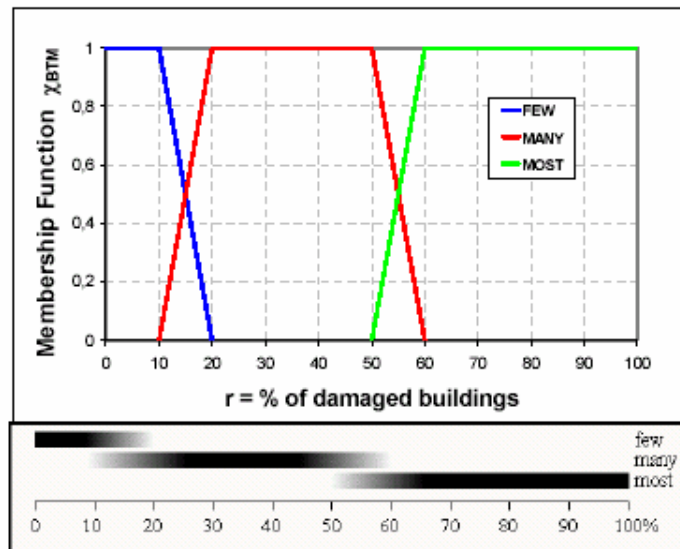


Fig. 3.8: Range delle percentuali della funzione  $\chi$  per i termini quantitativi *few*, *many* e *most*

La percentuale di edifici danneggiati corrispondente al termine *few* è minore del 10%, quella corrispondente al termine *many* è compresa tra 20% e 50%, quella relativa al termine *most* è superiore al 60%. Come si nota dalla Figura 3.8, ci sono delle situazioni in cui i termini si sovrappongono, ad esempio tra il 10% ed il 20% possono essere definiti sia *few* che *many*, tra 50% e 60% sia *many* che *most*.

Usando la teoria fuzzy e partendo dalle definizioni dell'EMS-98 è possibile costruire la DPM attraverso la distribuzione discreta  $\beta$ . Ricordando che a ciascun parametro di  $\mu_D$  corrisponde una distribuzione del grado di danno, sono stati determinati valori di  $\mu_D$  capaci di rappresentare i termini *few*, *many* e *most* attraverso la funzione  $\chi$ . Dalle distribuzioni probabilistiche corrispondenti ai valori  $\mu_D$  calcolati, è stata attribuita ai diversi gradi di danno la percentuale di danno.

Ripetendo questa procedura per ciascuna classe di vulnerabilità al variare del grado di intensità macrosismica, è possibile ottenere i limiti possibili e poco probabili del danno medio. Unendo questi punti si ottengono delle curve che definiscono le aree possibili e poco probabili di ciascuna classe di vulnerabilità come una funzione di intensità macrosismica. (Fig. 3.9)

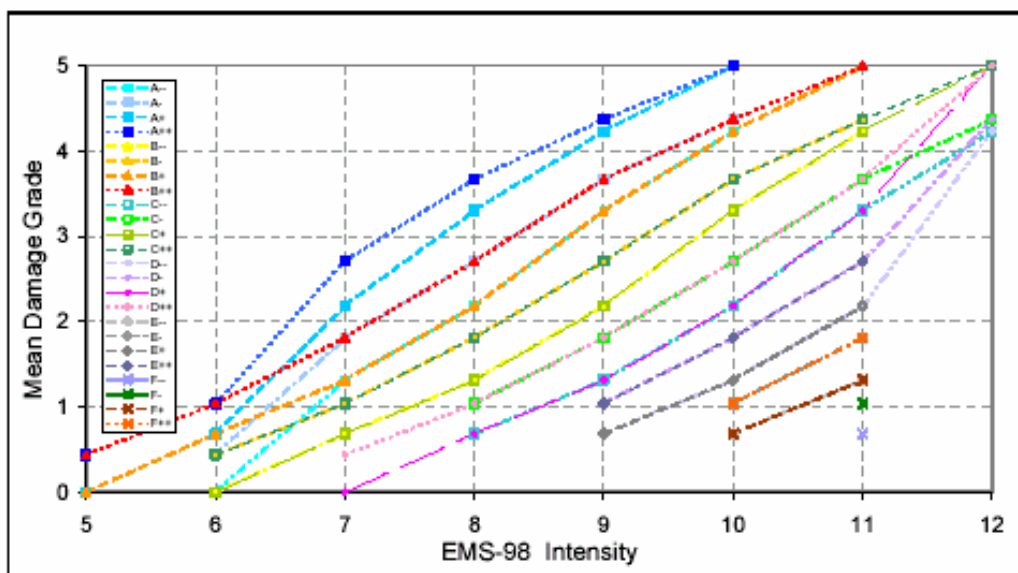


Fig.3.9: Curve che definiscono il comportamento possibile e poco probabile di ciascuna classe di vulnerabilità (Giovinazzi – Lagomarsino, 2004)

Osservando queste curve si trae che c'è un'area possibile per ciascuna classe di vulnerabilità ed una poco probabile per classi di vulnerabilità contigue.

Per rappresentare l'appartenenza di un edificio ad una classe di vulnerabilità è stato introdotto un indice di vulnerabilità convenzionale. I valori di questi indici rappresentano una misura della fragilità della costruzione al terremoto. Per semplicità è stato scelto come intervallo dell'indice 0-1; i valori prossimi ad uno sono assunti da costruzioni più vulnerabili, quelli prossimi a zero sono invece rappresentativi di una esperta progettazione.

L'associazione di una costruzione ad una specifica classe di vulnerabilità può essere definita da questo indice di vulnerabilità (Fig. 3.10); in accordo con la teoria fuzzy

questi indici hanno un intervallo possibile ( $\chi=1$ ) ed uno poco probabile rappresentativo della transizione tra due classi adiacenti. Per esempio, per la classe di vulnerabilità A, quando  $\chi=1$  si ha un intervallo possibile dell'indice di vulnerabilità che è  $0.86 \leq V_I \leq 0.94$  (come si nota anche dalla Tabella 3.4); l'intervallo dei valori poco probabili è  $0.78 < V_I < 0.86$  e  $0.94 < V_I < 1.02$ .

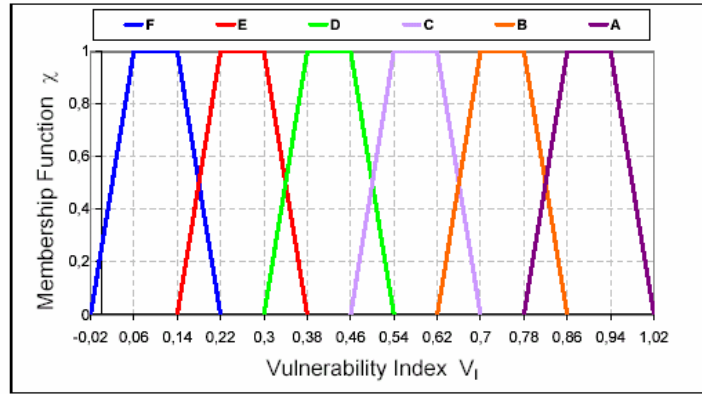


Fig.3.10: Funzione di appartenenza dell'indice di vulnerabilità delle classi della EMS-98

In accordo alla definizione fuzzy dell'indice di vulnerabilità, la Tabella 3.4 mostra il valore più probabile per ciascuna classe di vulnerabilità  $V_I^{C*}$ , i limiti  $V_I^{C-}$  e  $V_I^{C+}$  di incertezza dell'intervallo, il più grande  $V_{I,max}^C$  ed il più piccolo  $V_{I,min}^C$  limite dei valori poco probabili.

Tab.3.4: Valori degli indici di vulnerabilità per le classi di vulnerabilità dell'EMS-98

|   | $V_{I,min}^C$ | $V_I^{C-}$ | $V_I^{C*}$ | $V_I^{C+}$ | $V_{I,max}^C$ |
|---|---------------|------------|------------|------------|---------------|
| A | 1.02          | 0.94       | 0.9        | 0.86       | 0.78          |
| B | 0.86          | 0.78       | 0.74       | 0.7        | 0.62          |
| C | 0.7           | 0.62       | 0.58       | 0.54       | 0.46          |

|   | $V_{I,min}^C$ | $V_I^{C-}$ | $V_I^{C*}$ | $V_I^{C+}$ | $V_{I,max}^C$ |
|---|---------------|------------|------------|------------|---------------|
| D | 0.54          | 0.46       | 0.42       | 0.38       | 0.3           |
| E | 0.38          | 0.3        | 0.26       | 0.22       | 0.14          |
| F | 0.22          | 0.14       | 0.1        | 0.06       | -0.02         |

Altra importante osservazione che si può fare considerando le curve in Figura 3.9 è che queste sono, più o meno, parallele; questo accade perché il danno prodotto per una certa intensità su una costruzione di una data classe di vulnerabilità è lo stesso causato dal successivo grado di intensità su una costruzione appartenente alla successiva classe di vulnerabilità.

### 3.2.3.3 Definizione dell'indice di vulnerabilità tipologico

La EMS-98 descrive le diverse tipologie appartenenti a classi di vulnerabilità attraverso termini linguistici: "classe più probabile", "classe probabile", "classe improbabile". In Tabella 3.5 sono riportate le diverse tipologie costruttive con l'attribuzione alle diverse classi di vulnerabilità.

Anche in questo caso, la teoria fuzzy può fornire un contributo per l'interpretazione dei termini linguistici. L'appartenenza di ciascuna tipologia ad una classe di vulnerabilità è rappresentata, seguendo la metodologia fuzzy, attraverso la determinazione della classe più probabile (*Most probable class*  $\chi=1$ ), di quella probabile (*Possible class*  $\chi=0,6$ ) ed il caso eccezionale (*Unlikely class*  $\chi=0,2$ ).

Tab.3.5: Attribuzione delle classi di vulnerabilità alle diverse tipologie costruttive secondo la definizione fuzzy (Giovinazzi – Lagomarsino, 2004)

| Typologies          |     |                                 | Vulnerability Classes |   |   |   |   |   |
|---------------------|-----|---------------------------------|-----------------------|---|---|---|---|---|
|                     |     |                                 | A                     | B | C | D | E | F |
| Masonry             | M1  | Rubble stone                    | ■                     | ■ |   |   |   |   |
|                     | M2  | Adobe (earth bricks)            | ■                     | ■ |   |   |   |   |
|                     | M3  | Simple stone                    | ■                     | ■ | ■ |   |   |   |
|                     | M4  | Massive stone                   | ■                     | ■ | ■ | ■ |   |   |
|                     | M5  | Unreinforced M (old bricks)     | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ |   |
|                     | M6  | Unreinforced M with r.c. floors | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | M7  | Reinforced or confined masonry  | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Reinforced Concrete | RC1 | Frame in r.c. (without E.R.D)   | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | RC2 | Frame in r.c. (moderate E.R.D.) | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | RC3 | Frame in r.c. (high E.R.D.)     | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | RC4 | Shear walls (without E.R.D)     | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | RC5 | Shear walls (moderate E.R.D.)   | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
|                     | RC6 | Shear walls (high E.R.D.)       | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Stell               | S   | Steel structures                | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Tiber               | W   | Timber structures               | ■                     | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Situations: ■ Most probable class; ■ Possible class; ■ Unlikely class (exceptional cases)

E' così possibile definire la funzione di appartenenza di ciascun tipo di costruzione come una combinazione lineare delle funzioni di appartenenza delle classi di vulnerabilità, ciascuno considerato con il proprio grado di appartenenza. Ad esempio, la funzione di appartenenza di edifici in muratura (M4) è così definita dall'equazione 3.11:

$$\chi_{M4}(V_I) = \chi_C(V_I) + 0.6\chi_B(V_I) + 0.2\chi_D(V_I) \quad (3.11)$$

Nella Figura 3.11 è diagrammata la funzione  $\chi_{M4}(V_I)$  per la muratura M4

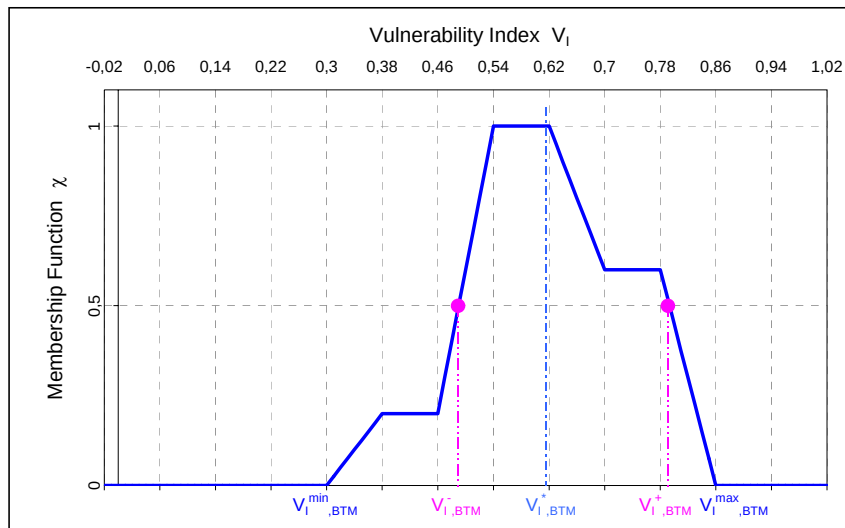


Fig.3.11: Valori dell'indice di vulnerabilità e funzioni di appartenenza per le tipologie in muratura (M4) (Giovinazzi – Lagomarsino, 2004)

Dalla funzione di appartenenza di ciascuna tipologia possono essere ottenuti i cinque valori di  $V_I$  prima definiti:  $V_I^*$  valore di  $V_I$  nel baricentro della funzione di appartenenza;



$V_I^-$  limite inferiore di  $V_I$ , ottenuto dall'intersezione del valore 0.5 con il ramo ascendente della funzione di appartenenza;  $V_I^+$  limite superiore di  $V_I$ , ottenuto dall'intersezione del valore 0.5 con il ramo discendente della funzione di appartenenza;  $V_{I,max}$  limite superiore di  $V_I$ ;  $V_{I,min}$  limite inferiore di  $V_I$ . Questi valori sono riportati nella Tabella 3.6 per tutte le tipologie costruttive considerate nella EMS-98.

Tab. 3.6: Valori dell'indice di vulnerabilità delle tipologie costruttive (Giovinazzi, Lagomarsino 2003)

| Typology | Description                           | $V_I$ representative values |               |               |               |                   |
|----------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
|          |                                       | $V_{I,ISM}^{min}$           | $V_{I,ISM}^-$ | $V_{I,ISM}^+$ | $V_{I,ISM}^*$ | $V_{I,ISM}^{max}$ |
| M1.1     | Rubble stone, fieldstone              | 0.62                        | 0.81          | 0.873         | 0.98          | 1.02              |
| M1.2     | Simple stone                          | 0.46                        | 0.65          | 0.74          | 0.83          | 1.02              |
| M1.3     | Massive stone                         | 0.3                         | 0.49          | 0.616         | 0.793         | 0.86              |
| M2       | Adobe                                 | 0.62                        | 0.687         | 0.84          | 0.98          | 1.02              |
| M3.1     | Wooden slabs                          | 0.46                        | 0.65          | 0.74          | 0.83          | 1.02              |
| M3.2     | Masonry vaults                        | 0.46                        | 0.65          | 0.776         | 0.953         | 1.02              |
| M3.3     | Composite steel and masonry slabs     | 0.46                        | 0.527         | 0.704         | 0.83          | 1.02              |
| M3.4     | Reinforced concrete slabs             | 0.3                         | 0.49          | 0.616         | 0.793         | 0.86              |
| M4       | Reinforced or confined masonry walls  | 0.14                        | 0.33          | 0.451         | 0.633         | 0.7               |
| M5       | Overall strengthened                  | 0.3                         | 0.49          | 0.694         | 0.953         | 1.02              |
| RC1      | Concrete Moment Frames                | -0.02                       | 0.047         | 0.442         | 0.8           | 1.02              |
| RC2      | Concrete shear walls                  | -0.02                       | 0.047         | 0.386         | 0.67          | 0.86              |
| RC3.1    | Regularly infilled walls              | -0.02                       | 0.007         | 0.402         | 0.76          | 0.98              |
| RC3.2    | Irregular frames                      | 0.06                        | 0.127         | 0.522         | 0.88          | 1.02              |
| RC4      | RC Dual systems (RC frame and wall)   | -0.02                       | 0.047         | 0.386         | 0.67          | 0.86              |
| RC5      | Precast Concrete Tilt-Up Walls        | 0.14                        | 0.207         | 0.384         | 0.51          | 0.7               |
| RC6      | Precast C. Frames, C. shear walls     | 0.3                         | 0.367         | 0.544         | 0.67          | 0.86              |
| S1       | Steel Moment Frames                   | -0.02                       | 0.467         | 0.363         | 0.64          | 0.86              |
| S2       | Steel braced Frames                   | -0.02                       | 0.467         | 0.287         | 0.48          | 0.7               |
| S3       | Steel frame+unrein. mas. infill walls | 0.14                        | 0.33          | 0.484         | 0.64          | 0.86              |
| S4       | Steel frame+cast-in-place shear walls | -0.02                       | 0.047         | 0.224         | 0.35          | 0.54              |
| S5       | Steel and RC composite system         | -0.02                       | 0.257         | 0.402         | 0.72          | 1.02              |
| W        | Wood structures                       | 0.14                        | 0.207         | 0.447         | 0.64          | 0.86              |

Il metodo di I livello definisce le funzioni di vulnerabilità semi-empiriche che correlano il grado di danno medio  $\mu_D$ , con l'intensità macrosismica  $I$ , e l'indice di vulnerabilità  $V_I$

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (3.12)$$

di qui, nota l'intensità macrosismica ( $I$ ) e valutato l'indice di vulnerabilità ( $V_I$ ) si calcola immediatamente il danno medio  $\mu_D$ . Le funzioni di vulnerabilità semi-empirica per le tipologie di edifici della BTM sono presentate in Fig. 3.12

#### 3.2.3.4 Fattori modificatori di comportamento

E' importante sottolineare che il comportamento sismico di una costruzione però, non dipende solo dal sistema strutturale ma coinvolge altri fattori.

Per ottenere una valutazione che tenga conto, non solo della tipologia ma anche di altre caratteristiche influenti sulla risposta sismica dell'edificio, è possibile variare l'indice di vulnerabilità attribuito su base tipologica  $V_I^*$ , considerando degli scostamenti in

termini di *un fattore di vulnerabilità regionale*  $\Delta V_R$  e di un contributo fornito dai *modificatori di comportamento*  $\Delta V_m$ :

$$\overline{V_I} = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m \quad (3.13)$$

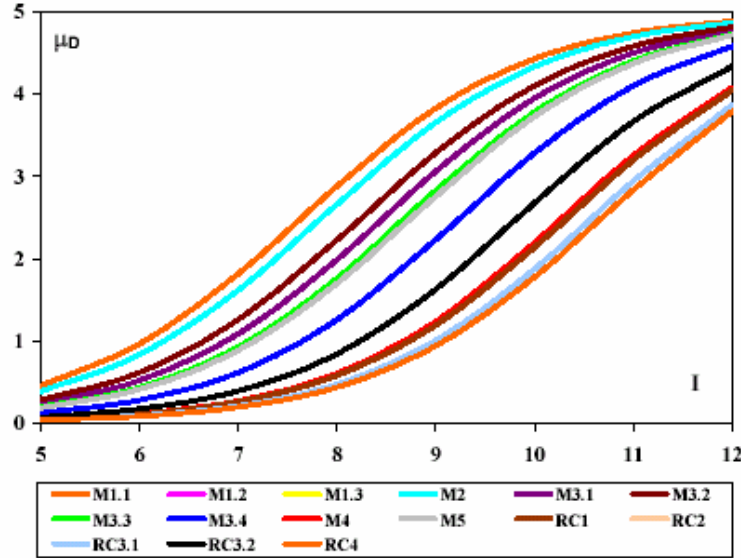


Fig.3.12: Funzioni di vulnerabilità media semi-empirica

Nella valutazione di  $V_I$  è possibile superare i valori  $V_I^- \div V_I^+$  dell'intervallo proposto per ciascuna tipologia; in ogni caso,  $V_I$  non dovrà eccedere i valori limite per cui è stato definito:

$$-0.02 \leq \overline{V_I} \leq 1.02 \quad (3.14)$$

Il *fattore di vulnerabilità regionale*  $\Delta V_R$  è introdotto per tenere conto della migliore o peggiore qualità di alcune tipologie di edifici riscontrata a livello regionale e attribuibile alle tecniche costruttive tradizionali o alle particolari caratteristiche dei materiali utilizzati. Il valore da attribuire a tale fattore viene stabilito su base esperta avvalendosi delle conoscenze dell'arte del costruire locale e di prove in sito, se disponibili.

Il fattore relativo ai *modificatori di comportamento*  $\Delta V_m$  computa il contributo di tutte quelle caratteristiche della costruzione (altezza, irregolarità planimetrica e altimetrica, stato di manutenzione e qualità costruttiva) che al di là della tipologia costruttiva influenzano la risposta al sisma della costruzione. I punteggi relativi a tali modificatori, riportati in Tabella 3.7 rispettivamente per gli edifici in muratura e in calcestruzzo armato, sono stati attribuiti coerentemente sia con una valutazione condotta su ampie aree del territorio nazionale (Meroni et al., 2000) che con il peso attribuito ai diversi parametri considerati nei metodi di vulnerabilità del GNDT (1994) e della ATC 21; là dove non è stato possibile operare un confronto, i punteggi sono stati attribuiti su base esperta come sottomultipli di 0.16, scostamento di  $V_I$  corrispondente a un salto di classe di vulnerabilità. In sostanza è possibile applicare il modello disponendo anche solo dei dati sufficienti a operare una classificazione tipologica del costruito; ogni altra informazione disponibile può essere, comunque, considerata nella valutazione contribuendo a raffinarla. Quindi, il metodo è molto flessibile: non risulta vincolato alla disponibilità di dati rilevati *ad hoc* per valutazioni di vulnerabilità sismica e consente di

integrare in un'unica valutazione dati provenienti da diverse fonti e caratterizzati da una diversa qualità.

Tab. 3.7: Punteggi dei fattori modificatori di comportamento per gli edifici in muratura e cemento armato (Giovinazzi, Lagomarsino. 2004)

| Behaviour modifier            | Masonry                           |             | Reinforced Concrete          |         |        |       |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------------|---------|--------|-------|
|                               | V <sub>mk</sub>                   |             | ERD Level                    | Pre/Low | Medium | Hight |
| State of preservation         | Good                              | -0.04       | Good                         | -       | -      | -     |
|                               | Bad                               | +0.04       | Bad                          | +0.04   | +0.02  | 0     |
| Number of floors              | Low (1or 2)                       | -0.08       | Low (1-3)                    | -0.02   | -0.02  | -0.02 |
|                               | Medium (3,4 or 5)                 | 0           | Medium (4-7)                 | 0       | 0      | 0     |
|                               | High (6 or more)                  | +0.08       | High (8 or more)             | +0.04   | +0.04  | +0.04 |
| Structural system             | Wall thickness                    | -0.04÷+0.04 |                              |         |        |       |
|                               | Wall distance                     |             |                              |         |        |       |
|                               | Wall connections                  |             |                              |         |        |       |
| Plan Irregularity             | Geometry                          | +0.04       | Geometry                     | +0.04   | +0.02  | 0     |
|                               | Mass distribution                 |             | Mass distribution            | +0.02   | +0.01  | 0     |
| Vertical Irregularity         | Geometry                          | +0.04       | Geometry                     | +0.04   | +0.02  | 0     |
|                               | Mass distribution                 |             | Mass distribution            |         |        |       |
| Superimposed flors            | +0.04                             |             |                              |         |        |       |
| Roof                          | Weight, thrust and connections    | +0.04       |                              |         |        |       |
| Retrofitting Intervention     | -0.08÷+0.08                       |             |                              |         |        |       |
| Aseismic Devices              | Barbican, Foil arches, Buttresses | -0.04       |                              |         |        |       |
| Aggregate Building: position  | Middle                            | -0.04       | Insufficient aseismic joints | +0.04   | 0      | 0     |
|                               | Corner                            | +0.04       |                              |         |        |       |
|                               | Header                            | +0.06       |                              |         |        |       |
| Aggregate Building: elevation | Staggered floors                  | +0.04       |                              |         |        |       |
|                               | Buildings with different height   | -0.04÷+0.04 |                              |         |        |       |
| Foundation                    | Different level foundations       | +0.04       | Beams                        | -0.04   | 0      | 0     |
|                               |                                   |             | Connected beams              | 0       | 0      | 0     |
|                               |                                   |             | Isolated Footing             | +0.04   | 0      | 0     |
|                               |                                   |             | Short-column                 | +0.02   | +0.01  | 0     |
|                               |                                   |             | Bow windows                  | +0.04   | +0.02  | 0     |

### 3.3 ANALISI DI VULNERABILITÀ SU SCALA TERRITORIALE E LOCALE

La peculiarità della metodologia descritta è la possibilità di applicazione a diverse scale e; come già anticipato, la definizione della scala dipende essenzialmente dal dettaglio dei dati disponibili; è evidente però che analisi di maggiore dettaglio si eseguono su porzioni circoscritte di territorio dal momento che, come si vedrà, queste richiedono molteplici dati generalmente accompagnati da rilievi ad hoc. Si riconoscono scale locali, di maggiore dettaglio, e scale territoriali. Quando si esegue una analisi è necessario anzitutto definire l'unità di analisi che può essere il singolo edificio, l'aggregato, la sezione censuaria, etc. Di seguito si riporta un esempio di metodologia a scala territoriale basata su dati ISTAT in cui l'unità di analisi è la sezione censuaria ed un esempio di analisi di vulnerabilità a scala locale dove si è considerato il caso di un edificio inserito in un centro storico. Questo esempio potrebbe sembrare una applicazione ad un caso particolare ma, in realtà, rappresenta la forma più generale per

la definizione dell'indice di vulnerabilità  $V_I$  poiché nel caso di edifici considerati isolati e ordinari sono nulli alcuni addendi che contribuiscono alla definizione di  $V_I$ .

### 3.3.1 Indice di vulnerabilità a scala territoriale

Il metodo utilizzato per la valutazione della vulnerabilità è stato sviluppato per il costruito ordinario introducendo un indicatore sintetico, l'indice di vulnerabilità  $V_I$ , che è definito sia su base tipologica, identificando l'edificio o la classe di edifici come appartenente a una certa tipologia edilizia, sia su base semeiotica, considerando cioè quanti più possibili particolari strutturali, tecnologici e costruttivi in grado di influenzare la risposta sismica della costruzione. Sotto queste ipotesi, l'indice di vulnerabilità  $V_I$  risulta così definito:

$$V_I = V_I^b + \Delta V_m \quad (3.15)$$

dove  $V_I^b$  è l'indice di vulnerabilità di base della tipologia (vulnerabilità dell'edificio considerato come isolato) e  $\Delta V_m$  è il punteggio totale dei modificatori di comportamento.

Definita l'unità di analisi, che in genere è la sezione censuaria o l'aggregato nel caso di una analisi a scala territoriale, è necessario anzitutto calcolare l'indice di ogni categoria relativo all'unità d'analisi:

$$V_I^C = V_I^{Cb} + \sum r_i^C \cdot \Delta V_{m,i} \quad (3.16)$$

dove  $V_I^{Cb}$  è l'indice di vulnerabilità di base della categoria,  $r_i^C$  e  $\Delta V_{m,i}$  sono rispettivamente la percentuale (di superficie costruita  $s$ , del numero di edifici  $e$ /o del numero di abitanti  $a$ ) del modificatore riferita alla categoria considerata e il punteggio dello stesso modificatore di comportamento.

Il fattore relativo ai modificatori di comportamento  $\Delta V_{m,i}$  computa il contributo di tutte quelle caratteristiche della costruzione (altezza, irregolarità planimetrica e altimetrica, stato di manutenzione e qualità costruttiva) che influenzano la risposta della costruzione al sisma; l'indice di vulnerabilità  $V_I^{Cb}$  è attribuito in base ad un giudizio esperto.

Una volta ottenuta una stima della vulnerabilità delle singole categorie è immediato ottenere l'indice relativo all'intera unità di analisi:

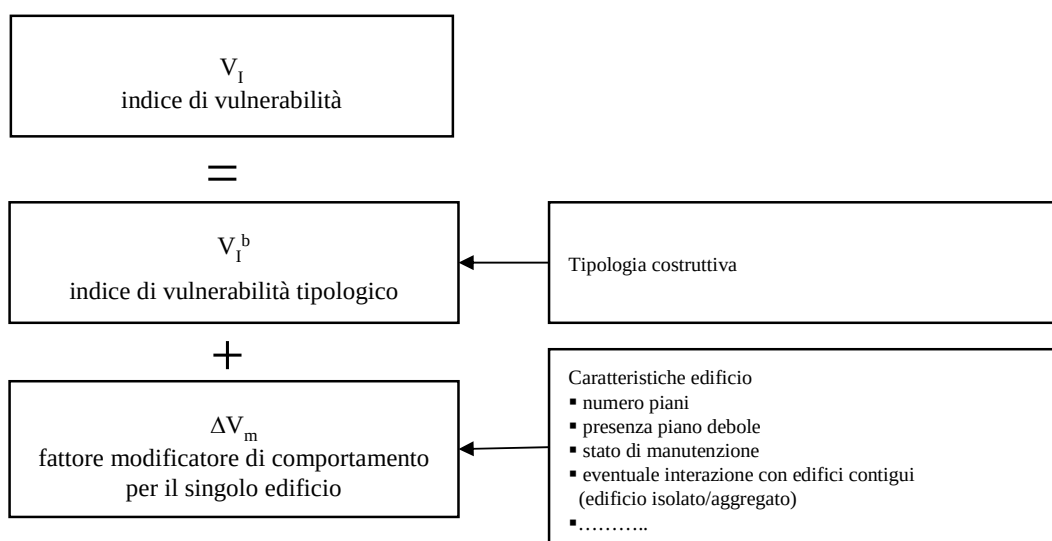
$$V_I^U = \sum r_j^U \cdot V_{I,j}^C \quad (3.17)$$

dove  $r_j^U$  è la percentuale (di superficie costruita  $s$ , del numero di edifici  $e$ /o del numero di abitanti  $a$ ) delle singole categorie all'interno dell'unità di analisi considerata e  $V_{I,j}^C$  è l'indice di vulnerabilità delle stesse categorie.

Volendo infine stimare la vulnerabilità della sezione censuaria, il procedimento è del tutto analogo: l'indice di vulnerabilità  $V_{I,k}^U$  delle unità di analisi facenti parti della sezione censuaria originaria viene riaggregato in ragione della percentuale di area  $r_k^S$  delle stesse unità:

$$V_I^S = \sum r_k^S \cdot V_{I,k}^U \quad (3.18)$$

Si riporta in Figura 3.13 il diagramma di flusso per la definizione di  $V_I$  in una analisi a scala territoriale

Fig.3.13: Diagramma di flusso per la definizione di  $V_I$  in una analisi a scala territoriale

Un esempio di analisi di vulnerabilità condotta a scala territoriale è quella proposta da Meroni basata su dati ISTAT. La consistenza del patrimonio abitativo può essere desunta dai dati rilevati nell'ambito del censimento della popolazione (ISTAT 1991), opportunamente rielaborati a fini di vulnerabilità su tutto il territorio nazionale (Meroni et al., 1999; Meroni et al., 2000).

Il dato originale dell'ISTAT si riferisce alla singola unità abitativa (alloggio individuale) e contiene informazioni sulle persone residenti, sulla superficie e su alcune caratteristiche dell'edificio a cui appartiene. Rielaborando tali schede, Lagomarsino e Giovinazzi (Lagomarsino e Giovinazzi, 2001) hanno ricavato, a livello di sezione censuaria, gruppi di edifici omogenei per tipologia costruttiva (muratura, cemento armato, pilotis, altro o ignoto) e numero di piani (uno o due piani; da tre a cinque piani; oltre cinque piani), indicando il numero di edifici, il loro volume e la popolazione residente. I dati relativi a ciascun gruppo nella sezione censuaria sono quindi suddivisi percentualmente per classe di età (7 classi: prima del 1919; dal 1919 al 1945; dal 1946 al 1960; dal 1961 al 1971; dal 1972 al 1981; dopo il 1981; dopo la data di classificazione), livello di manutenzione (buona e scarsa) e contesto urbano (edificio isolato o in aggregato). Possono essere inizialmente identificate sette distinte categorie di edifici, quattro in muratura (Tabella 3.8) e 3 in c.a. (Tabella 3.9).

I punteggi scelti per i modificatori di comportamento (Tabelle 3.10 e 3.11) sono coerenti con i risultati pubblicati nell'ambito di una valutazione condotta su ampie aree del territorio nazionale (Meroni et al., 2000); facendo riferimento ai comuni nei quali erano disponibili le schede GNDT di I e II livello, sono stati valutati gli indici di vulnerabilità medi corrispondenti a gruppi di edifici omogenei in relazione ai diversi parametri del censimento ISTAT. Ad esempio, per gli edifici in muratura è possibile valutare, per ciascuna classe di età, la variazione di  $I_v$  in funzione del numero dei piani, del contesto strutturale e delle condizioni di manutenzione.

Tab. 3.8: Edifici in muratura: individuazione delle categorie in base all'epoca di costruzione

| Categorie | Epoca               |             | Tipologie EMS                                                                                                                                 | I <sub>v</sub> |
|-----------|---------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1         | antecedente al 1919 |             | M1 – Pietra grezza (ciottoli, pietrame, mista)<br>M3 – Pietre sbozzate o a spacco<br>M5 – Mattoni                                             | 50             |
| 2         | dal 1919 al 1945    | zona urbana | M3 – Pietre sbozzate o a spacco<br>M4 – Pietre squadrate<br>M5 – Mattoni                                                                      | 35             |
|           |                     | zona rurale | M1 – Pietra grezza (ciottoli, pietrame, mista)<br>M3 – Pietre sbozzate o a spacco<br>M5 – Mattoni                                             | 45             |
| 3         | dal 1946 al 1971    |             | M3 – Pietre sbozzate o a spacco<br>M5 – Mattoni<br>M6 - Muratura non armata (pietra lavorata, laterizi, blocchi di cemento) con solai in c.a. | 30             |
| 4         | dopo il 1971        |             | M6 - Muratura non armata (pietra lavorata, laterizi, blocchi di cemento) con solai in c.a.                                                    | 20             |

Tab. 3.9: Edifici in muratura: individuazione delle categorie in base all'epoca di costruzione

| Categorie | Epoca                               | Tipologie EMS                                                                      | I <sub>v</sub> |
|-----------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 5         | prima della classificazione sismica | RC1 – Telaio in c.a. (pre-normativa)<br>RC4 – Pareti di taglio (pre-normativa)     | 20             |
| 6         | dopo la classificazione sismica     | RC2 – Telaio in c.a. (bassa duttilità)<br>RC5 – Pareti di taglio (bassa duttilità) | 0              |
| 7         | edificio a <i>pilotis</i>           | RC7 – Telaio in cemento armato con <i>pilotis</i>                                  | 40             |

Tab. 3.10: Punteggi modificatori di comportamento per gli edifici in muratura

| Modificatori di comportamento | Indicatori ISTAT       | Punteggio per le diverse categorie |       |       |       |
|-------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
|                               |                        | <1919                              | 19/45 | 46/71 | >1971 |
| Condizioni di manutenzione    | Scarsa manutenzione    | +6                                 | +6    | +6    | -     |
| Numero di piani (altezza)     | Basso (1 o 2 piani)    | -                                  | -     | -     | -     |
|                               | Medio (3, 4 o 5 piani) | +5                                 | +5    | +5    | +5    |
|                               | Alto (più di 5 piani)  | +10                                | +10   | +10   | +10   |
| Contesto strutturale          | Edificio in aggregato  | -                                  | -     | +6    | +6    |

Tab. 3.11: Punteggi modificatori di comportamento per gli edifici in calcestruzzo armato

| Modificatori di comportamento            | Indicatori ISTAT       | Punteggio |
|------------------------------------------|------------------------|-----------|
| Età di costruzione                       | Antecedente il 1971    | +6        |
| Numero di piani (altezza)                | Basso (1 o 2 piani)    | -6        |
|                                          | Medio (3, 4 o 5 piani) | 0         |
|                                          | Alto (6 p più piani)   | +6        |
| Edifici adiacenti con giunti non sismici | Edificio in aggregato  | +6 *      |

\* solo per la categoria 5 - edifici precedenti alla classificazione sismica

### 3.3.2 Indice di vulnerabilità a scala locale

L'analisi a scala locale, come anticipato, è di maggiore dettaglio quindi viene eseguita generalmente su porzioni di territorio non troppo vaste. L'unità di analisi può essere un singolo edificio o un aggregato. Consideriamo qui, a titolo di esempio, la valutazione della vulnerabilità di un edificio inserito in un centro storico. L'unità di analisi alla quale fare riferimento è quindi l'aggregato, all'interno del quale gli edifici sono organizzati

secondo schemi almetrici e planimetrici spesso complessi. Si determina così l'indice di vulnerabilità attraverso la seguente relazione:

$$V_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m + \Delta V_{CS} + \Delta V_{IA} \quad (3.19)$$

dove  $V_I^*$  è l'indice di vulnerabilità tipologico,  $\Delta V_R$  è il fattore di vulnerabilità regionale, che computa l'influenza delle tecniche appartenenti alla tradizione locale,  $\Delta V_m$  è il fattore modificatore di comportamento che computa tutte le caratteristiche della costruzione (altezza, irregolarità planimetrica e altimetrica, stato di manutenzione e qualità costruttiva), mentre  $\Delta V_{CS}$  è un fattore di vulnerabilità del centro storico strettamente connesso con la tradizione costruttiva locale e tiene conto della presenza di tecniche di prevenzione sismica ma anche di interventi di trasformazione edilizia, ed infine  $\Delta V_{IA}$  che considera l'interazione nell'aggregato.

Questo esempio potrebbe sembrare una applicazione ad un caso particolare ma, in realtà, l'equazione 3.19 rappresenta la forma più generale per la definizione di  $V_I$  poiché nel caso di edifici considerati isolati e ordinari sono nulli i termini  $\Delta V_{IA}$  e  $\Delta V_{CS}$ .

Nella valutazione dei modificatori di comportamento del contesto aggregato  $\Delta V_{IA}$  vengono considerati due diversi contributi: un primo relativo alle *interazioni in altezza* tra edifici adiacenti ed un secondo rappresentativo della diversa *posizione dell'edificio* all'interno dell'aggregato (nell'ottica di identificare le posizioni d'angolo e di testata comunemente riconosciute come situazioni di maggiore vulnerabilità), in Figura 3.14 è indicato cosa si intende per posizione d'angolo  $A$ , intercluso tra due edifici  $I$ , e di testata  $T$  per l'aggregato. Nella figura sottostante si riporta un esempio di edificio d'angolo, intercluso e di testata con i rispettivi valori dei modificatori.

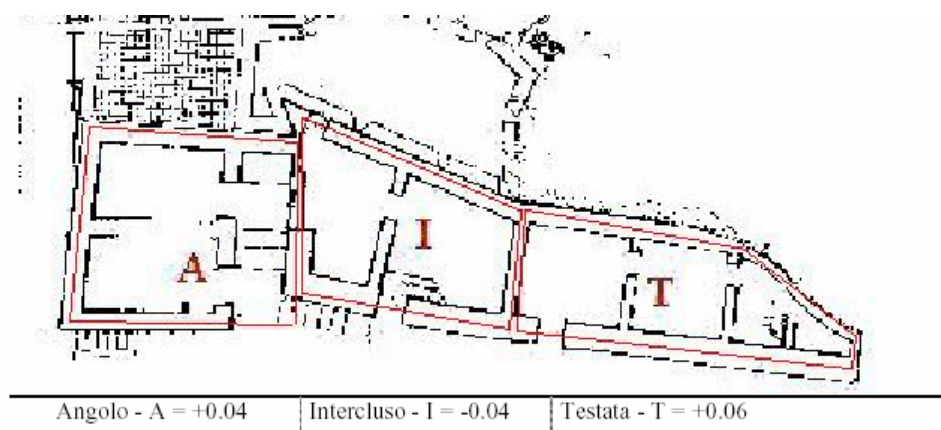


Fig.3.14: Esempio di riconoscimento della posizione dell'edificio all'interno dell'aggregato.(Giovinnazzi et al., 2004)

Nella Figura 3.15 si riporta un esempio di attribuzione dei modificatori che considerano l'interazione tra edifici adiacenti di diversa altezza. Nel caso del primo edificio, partendo dalla sinistra del prospetto della figura, il valore attribuito è -0.02 poiché risulta più basso solo rispetto ad uno dei due edifici confinanti; nel caso del secondo edificio il valore attribuito al modificatore è +0.04 poiché è più alto su dei

due edifici che lo fiancheggiano; l'edificio successivo risulta poi il più basso su due lati e perciò è corretta l'attribuzione del punteggio -0.04.



Fig.3.15: Esempio di attribuzione dei modificatori che computano l'interazione tra edifici adiacenti di diversa altezza. (Giovinnazzi et al., 2004)

I valori del modificatore di comportamento del contesto aggregato  $\Delta V_{LA}$  sono riportati nelle Tabella 3.12 e 3.13

Tab. 3.12: Punteggi  $V_m$  proposti per i modificatori di comportamento degli edifici in muratura (Frassine - Giovinnazzi, 2004)

| <i>Fattori di Vulnerabilità</i> | <i>Parametri</i>                              |              |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|
| Stato di manutenzione           | Buona manutenzione                            | -0.04        |
|                                 | Cattiva manutenzione                          | +0.04        |
| Numero piani (altezza)          | Basso (1 o 2 piani)                           | -0.04        |
|                                 | Medio (3, 4 o 5 piani)                        | 0            |
|                                 | Alto (più di 5 piani)                         | +0.04        |
| Sistema Strutturale             | Spessore delle pareti                         | -0,04 ÷ 0.04 |
|                                 | Distanza tra le pareti                        |              |
|                                 | Collegamento tra le pareti                    |              |
|                                 | Collegamento pareti-strutture orizzontali     |              |
| Irregolarità planimetriche      | Geometria e distribuzione delle masse         | +0.04        |
| Irregolarità altimetriche       | Geometria e distribuzione delle masse         | +0.02        |
| Piani aggiunti                  |                                               | +0.04        |
| Copertura                       | Peso e spinta del tetto                       | +0.04        |
|                                 | Collegamento con le pareti                    |              |
| Interventi di riparazione       |                                               | -0,08 ÷ 0,08 |
| Dispositivi antisismici         | Ringrossi murari, archetti di controspinta... | -0.04        |
| Edifici Aggregati               |                                               |              |
| posizione                       | Intercluso                                    | -0.04        |
|                                 | D'angolo                                      | +0.04        |
|                                 | Di testate                                    | +0.06        |
| irregolarità verticali          | Piani sfalsati                                | +0.04        |
|                                 | Altezze diverse tra edifici adiacenti         | -0,04 ÷ 0,04 |
| Fondazioni                      | Diversa altezza                               | +0.04        |



Tab. 3.13: Punteggi  $V_m$  proposti per i modificatori di comportamento degli edifici in calcestruzzo armato (Frassine - Giovinazzi, 2004)

| Fattori di Vulnerabilità        | Parametri                    | Livello di progetto antisismico |       |       |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------|-------|
|                                 |                              | Assen-<br>te/Basso              | Medio | Alto  |
| Livello di progetto antisismico |                              | +0.16                           | 0     | -0.16 |
| Stato di manutenzione           | Cattiva manutenzione         | +0.04                           | +0.02 | 0     |
| Numero piani (altezza)          | Basso (1, 2 o 3 piani)       | -0.02                           | -0.02 | -0.02 |
|                                 | Medio (4, 5, 6 o 7 piani)    | 0                               | 0     | 0     |
|                                 | Alto (più di 7 piani)        | +0.08                           | +0.06 | +0.04 |
| Irregolarità planimetriche      | Geometria                    | +0.04                           | +0.02 | 0     |
|                                 | Distribuzione delle masse    | +0.02                           | +0.01 | 0     |
| Irregolarità altimetriche       |                              | +0.04                           | +0.02 | 0     |
| Travi tozze                     |                              | +0.02                           | +0.01 | 0     |
| Bow windows                     |                              | +0.04                           | +0.02 | 0     |
| Fondazione                      | Travi Collegate              | -0.04                           | 0     | 0     |
|                                 | Travi                        | 0                               | 0     | 0     |
|                                 | Plinti isolati               | +0.04                           | 0     | 0     |
| Edifici Aggregati               | Giunti sismici insufficienti | +0.04                           | 0     | 0     |

Attraverso l'espressione 3.19 all'aggregato viene attribuito un indice di vulnerabilità computando la vulnerabilità degli edifici che lo compongono, considerati come isolati, e rifinando la valutazione attraverso un modificatore di interazione dell'aggregato  $\Delta V_{LA}$  ed un fattore di vulnerabilità del centro storico  $\Delta V_{CS}$ . Il contributo che tiene conto della vulnerabilità delle costruzioni viene calcolato come media dei valori di vulnerabilità dei singoli edifici, pesata sul volume o sulla superficie planimetrica. Nel caso dell'aggregato non è sempre semplice definire la *superficie planimetrica* poiché questo presenta delle irregolarità; per questo motivo viene valutata l'irregolarità planimetrica dell'aggregato tenendo conto della sua *snellezza* e *dell'irregolarità della sua forma*. La snellezza viene rappresentata dal parametro  $\alpha$  calcolato in funzione del rapporto tra il perimetro e l'area del poligono che identifica in pianta l'occupazione dell'aggregato. Definita la superficie equivalente  $S_{eq}$  attraverso l'espressione:

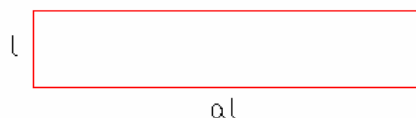
$$S_{eq} = \frac{P^2}{16A} \quad (3.20)$$

dove  $P$  è il perimetro ed  $A$  l'area del poligono, è possibile definire il parametro  $\alpha$  attraverso le espressioni 3.20 e 3.21.

$$\alpha = 2S_{eq} - 1 + 2\sqrt{S_{eq}^2 - S_{eq}} \quad \text{se } S_{eq} > 1 \quad (3.21)$$

$$\alpha = S_{eq} \quad \text{se } S_{eq} < 1 \quad (3.22)$$

La (3.22) è stata ricavata calcolando la snellezza di un rettangolo equivalente con rapporto tra i lati pari ad  $\alpha$  (Fig. 3.16) ed esplicitando tale parametro

Fig.3.16: Rettangolo equivalente con rapporto tra i lati uguale ad  $\alpha$ .

L'irregolarità della forma è rappresentata attraverso il parametro  $\beta$  calcolato in funzione del parametro  $I$  che rappresenta il rapporto tra l'area del poligono convesso

circoscritto alla planimetria dell'aggregato e l'area dell'aggregato stesso (3.24) automaticamente valutabili in ambiente GIS. Il parametro  $I$  è uguale ad 1 se l'area è convessa, maggiore di 1 in presenza di angoli rientranti (forme a C,L,Z).

$$\beta = \frac{I-1}{I_{eq}-1} \quad (3.23)$$

$$I = \frac{A_{circoscritto}}{A} \quad (3.24)$$

Al fine di ottenere un parametro indipendente dalla snellezza (misurata attraverso il parametro  $\alpha$ ), il valore  $I$  viene normalizzato rispetto ad  $I_{eq}$  calcolato secondo la (3.24) per una forma a L con rapporto tra i lati pari ad  $\alpha$ .

$$I_{eq} = \frac{l + \alpha^2 + 6\alpha}{8\alpha} \quad (3.25)$$

Sostituendo nella (3.25) i valori di  $\alpha$ , precedentemente calcolati è possibile valutare il parametro  $\beta$ .

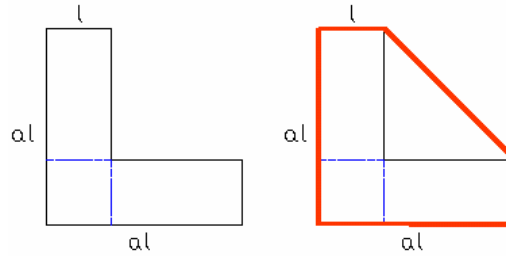


Fig. 3.17: Forma a L equivalente e poligono ad essa circoscritto.

Il punteggio viene attribuito al modificatore irregolarità planimetrica secondo la Tabella 3.14 considerando contemporaneamente i valori assunti dal parametro  $\alpha$  e dal parametro  $\beta$ .

Tab.3.14: Punteggi attribuiti al modificatore irregolarità planimetrica relativo ad un intero aggregato

| Modificatori di Vulnerabilità            |                  | Descrizione e Punteggi |                     |                     |
|------------------------------------------|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
|                                          |                  | $0 < \beta < 0.3$      | $0.3 < \beta < 0.5$ | $0.5 < \beta < 1.5$ |
| Irregolarità planimetrica dell'aggregato | $0 < \alpha < 3$ | 0                      | 0,02                | 0,04                |
|                                          | $3 < \alpha < 5$ | 0,02                   | 0,04                | 0,06                |
|                                          | $\alpha > 5$     | 0,04                   | 0,06                | 0,08                |

Il fattore di vulnerabilità del centro storico  $\Delta V_{CS}$  viene valutato per l'aggregato pesando i punteggi dei singoli modificatori  $V_{CS}$ , rispetto alla percentuale di edifici  $r_k$ , per i quali si stima la presenza di quel certo modificatore sommandone i contributi:

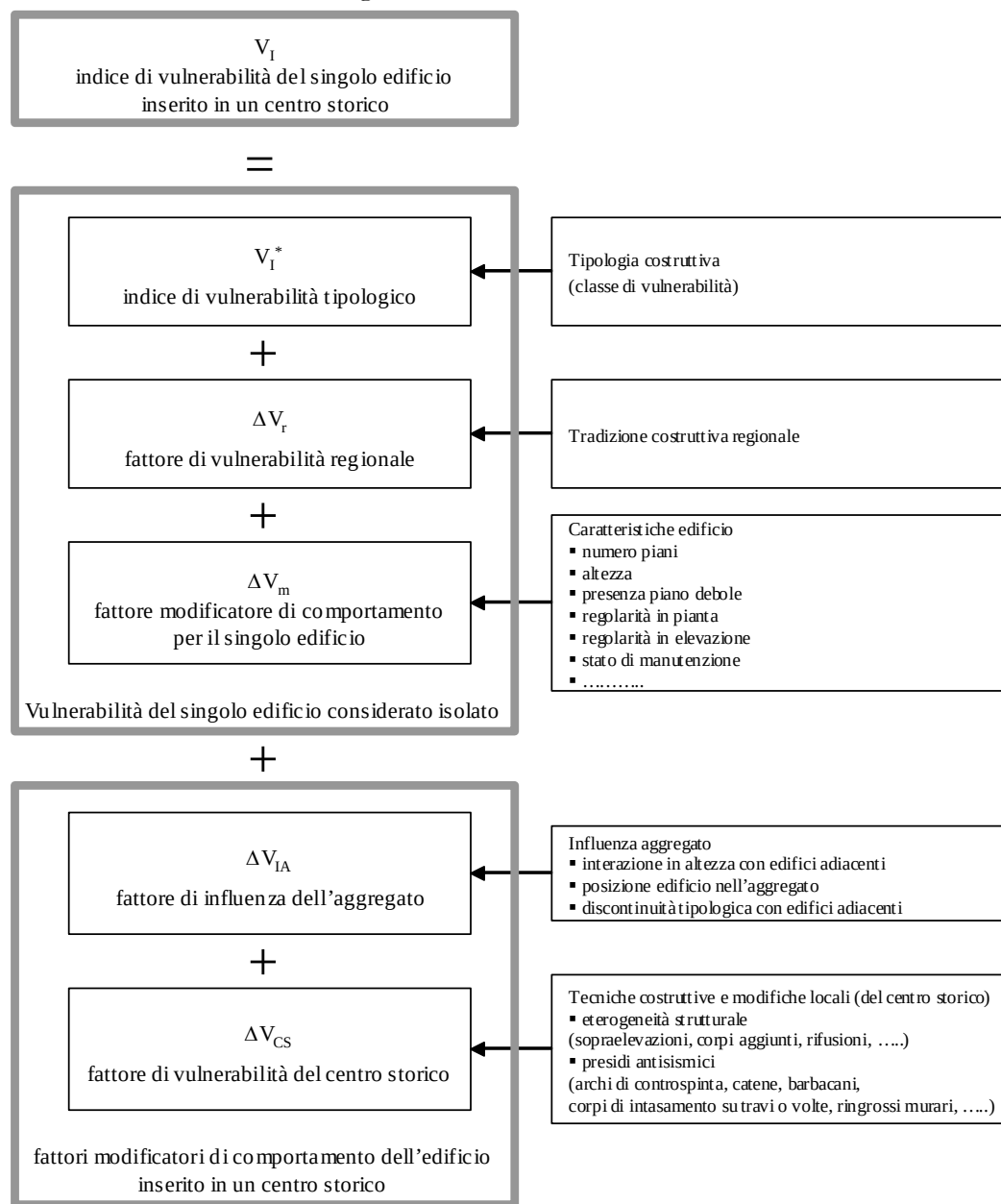
$$\Delta V_{rCS} = \sum_k r_k V_{rCS,k} \quad (3.26)$$

Il fattore di vulnerabilità del centro storico  $\Delta V_{CS}$  non può essere definito in maniera generale dovendo computare le vulnerabilità connesse con la locale tradizione costruttiva e con le modifiche subite. I parametri sono però quelli riportati in Tabella 3.15.

Tab.3.15: Modificatori dovuti alla vulnerabilità regionale del centro storico e punteggio attribuito

| Modificatori             | Descrizione                                                                                               | Punteggi                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Eterogeneità strutturale | Sopraelevazione<br>Corpi Aggiunti<br>Rifusioni                                                            | Da valutarsi<br>per ciascun<br>centro<br>storico |
| Presidi Antisismici      | Archi di controspinta<br>Catene<br>Barbacani<br>Corpi di intasamento su travi o volte<br>Ringrossi Murari |                                                  |

Il diagramma di flusso per la definizione di  $V_I$  nel caso di un edificio inserito in un centro storico è illustrato in Figura 3.18

Fig.3.18: Diagramma di flusso per la definizione di  $V_I$  nel caso di un edificio inserito in un centro storico

## Capitolo 4

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DEGLI EDIFICI STORICI E MONUMENTALI

### 4.1 INTRODUZIONE

Nel nostro paese caratterizzato da una considerevole attività sismica, e con un patrimonio storico-monumentale di notevole rilievo, il tema della vulnerabilità sismica ed in particolare la sua valutazione per la salvaguardia del suddetto patrimonio, assume una notevole importanza. Infatti i recenti eventi sismici hanno messo in evidenza come spesso le costruzioni di interesse storico-artistico siano spesso più vulnerabili rispetto ad altre tipologie di manufatti: anche terremoti di limitata intensità determinano sovente stati fessurativi evidenti e, per alcuni elementi architettonici della chiesa, situazioni d'instabilità con crolli locali. Nella valutazione della vulnerabilità sismica di strutture monumentali, seppure la varietà tipologica delle costruzioni sia molto ampia, non si può prescindere di attribuire alle chiese un ruolo peculiare. Infatti, le chiese, a causa della tradizione storico-culturale del nostro paese, sono molto diffuse sul territorio italiano. Il problema della vulnerabilità sismica delle chiese presenta problematiche differenti rispetto all'edilizia ordinaria. L'esigenza di conservazione, legata al valore storico-artistico, richiede infatti di operare attraverso un approccio di maggiore dettaglio.

Dall'osservazione dei danni prodotti da precedenti terremoti, anche quelli di lieve intensità, si è potuto osservare come il comportamento sismico delle chiese risulti inquadrabile secondo fenomenologie ricorrenti. Infatti, pur nella varietà delle tecniche costruttive, delle dimensioni e delle forme con cui si presentano le chiese d'epoche ed importanza diverse, la fabbrica risulta quasi sempre costituita da una facciata, un'aula (ad una o più navate), un presbiterio e un'abside; a questi elementi si possono aggiungere il transetto, la cupola, le cappelle laterali; inoltre quasi sempre è presente un campanile o una vela.

La scelta di criteri e metodi che consentano una valutazione oggettiva in base alla quale formulare idonee correlazioni tra danno ed evento sismico è il principale oggetto di studio. Allo stato attuale esistono notevoli incertezze ed ambiguità sia nella definizione dei gradi di danno da assumere sia nell'identificazione dei meccanismi di collasso.

Dopo i terremoti Umbria-Marche del 1997 e Puglia-Molise del 2002 i danni osservati alle chiese hanno fornito notevoli informazioni la cui elaborazione ha consentito lo sviluppo di interessanti metodologie per la valutazione della vulnerabilità di tali tipologie costruttive.

La metodologia sviluppata dal GNDT 1994-1999 si basa su un modello che definisce il danno strutturale dell'opera attraverso una diagnosi intuitiva dei meccanismi di collasso che si possono attivare nel corpo di fabbrica. L'analisi viene eseguita con l'ausilio di alcune schede che mirano al riconoscimento di macroelementi costituenti la chiesa. La scheda di rilievo consente un censimento a scala urbana che considera sia gli elementi strutturali dell'edilizia storica di base che gli elementi non portanti, con la possibilità di innestare un analogo rilievo per gli elementi contenuti (quadri, statue, etc.). Lo

strumento “scheda” si presta bene alla fase di acquisizione dei dati relativi a tali edifici purché la sua compilazione non necessiti di particolari competenze tecniche.

La metodologia del GNDT è stata recentemente integrata da Lagomarsino et al. (2001). In particolare, la scheda chiese del GNDT è stata migliorata introducendo alcuni nuovi meccanismi di danno allo scopo di fornire informazioni più dettagliate. Inoltre sono state ampliate le sezioni che riguardano i dati dimensionali e tipologici giudicate insufficienti a descrivere chiese di grandi dimensioni. L’ottica di questa rielaborazione è quella di porre maggior attenzione al rilievo dei particolari costruttivi che giocano un ruolo fondamentale sul comportamento sismico di tali strutture.

Sia la metodologia GNDT, sia la proposta migliorativa di Lagomarsino et al. (2001) sono metodologie speditive che si fondano sul riconoscimento delle caratteristiche del quadro fessurativo presente correlato ad una interpretazione in termini di meccanismi di collasso. A tal fine, raccogliendo le esperienze maturate sul campo dall’osservazione diretta di diverse casistiche di danneggiamento sismico, nell’ambito di tali approcci sono stati messi a punto degli abachi sintetici di riferimento nei quali per i diversi elementi strutturali si riportano i tipi di danno solitamente riscontrabili a vista (danno osservato o danno apparente) per i singoli elementi.

Una delle più recenti metodologie, che a differenza delle precedenti prevede solo un livello di tipo speditivo, è stata sviluppata nell’ambito del progetto Risk-UE denominato “An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns”. La metodologia è organizzata in tre livelli: a) livello 1, basato solo su studi tipologici e su vulnerabilità osservate; b) livello 2, secondo il quale si analizza una singola parte della fabbrica caratterizzata da un comportamento unitario nei riguardi dell’azione sismica detta macroelemento, e mediante modelli meccanici semplificati adatti alla scala territoriale; c) livello 3, basato su analisi numeriche più dettagliate di tutta la costruzione o del singolo macroelemento.

In questo capitolo, dopo aver definito quali sono le costruzioni che si possono considerare storiche o monumentali si analizzano le metodologie speditive del GNDT e la proposta di Lagomarsino et al. basate sull’utilizzo di schede di rilievo e sull’interpretazione dei meccanismi di collasso dei macroelementi costituenti la chiesa. L’ultima metodologia analizzata è sviluppata nell’ambito del progetto Risk-Ue, si articola su tre livelli di cui il primo è di tipo osservazionale, di rapida applicazione; gli altri due livelli prevedono un approccio meccanico.

## **4.2 DEFINIZIONE DEGLI EDIFICI STORICI E MONUMENTALI E CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA**

Nel passato solo le costruzioni realizzate da famosi architetti o costruzioni di particolare rilevanza venivano chiamati “monumenti”. E’ difficile determinare quando un edificio si può definire un monumento e per questo preservarlo. In Italia la legge stabilisce che tutte le chiese e gli elementi architettonici il cui valore è riconoscibile, devono essere protetti.

Per la determinazione della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali, e quindi del rischio sismico, anche se non esistono delle regole specifiche, l’Istituto Centrale del Restauro (ICR) ha introdotto una definizione basata sul “Valore” del monumento.

Per definire il Valore ( $V_a$ ) dell’edificio storico-monumentale, è necessario considerare che ogni monumento è un “unicum” e perciò, in teoria, dovrebbe essere irrealizzabile

stabilire una scala attraverso la quale poter misurare questo parametro. Tuttavia, nella Carta di Rischio dei Beni vengono utilizzati due criteri per la valutazione del Valore di un monumento:

1. la definizione dell'importanza storica del monumento attraverso il giudizio della Guida Rossa del Touring Club con le opinioni degli esperti;
2. l'insieme di dati raccolti dall'Istituto Centrale del Restauro del patrimonio artistico e architettonico ed il suo stato di conservazione (non ancora disponibile).

Così il parametro Valore viene definito attraverso la classificazione della Guida Rossa in tre livelli: (H alto, M medio, L basso).

1. H se è citato all'interno della guida con una stella;
2. M se è citato nella guida;
3. L se non è citato nella guida.

### 4.3 METODOLOGIE DI ANALISI

#### 4.3.1 Metodo del GNDT

La metodologia sviluppata dal GNDT 1994-1999 ed utilizzata per il censimento delle chiese del Molise, si basa su un modello che definisce il danno strutturale dell'opera attraverso una diagnosi intuitiva dei meccanismi di collasso che si possono attivare nel corpo di fabbrica. L'approccio mira al riconoscimento di parti della chiesa, dette macroelementi, caratterizzate da un comportamento unitario nei riguardi dell'azione sismica; i macroelementi coincidono in genere con gli elementi architettonici della fabbrica (facciata, abside, arco trionfale, campanile, cupola, ecc.).

La metodologia del GNDT si serve di alcune schede che mirano al riconoscimento di macroelementi costituenti la chiesa. Lo strumento "scheda" si presta bene alla fase di acquisizione dei dati relativi a tali edifici purché la sua compilazione non necessiti di particolari competenze tecniche. Le schede di vulnerabilità per il rilievo del danno sismico si basano sui meccanismi di danno possibili in ciascun elemento della chiesa e permettono di attribuire le lesioni e le deformazioni ad un particolare cinematismo fornendo una prima interpretazione del funzionamento della struttura e individuando le carenze della fabbrica responsabili della sua vulnerabilità, attraverso l'analisi di un certo numero di meccanismi di collasso.

Il meccanismo di danno rappresenta la ricostruzione schematica del cinematismo di parti del macroelemento e degli spostamenti relativi. Anche per i meccanismi di danno occorre individuare, in base all'analisi dei quadri fessurativi riscontrati nel campione di chiese esaminato, i meccanismi elementari. Il meccanismo è unitario, o semplice, nel caso in cui l'intero processo di dissesto sia legato all'evoluzione di un solo meccanismo, mentre è composito se costituito da un meccanismo principale, cioè che interessa la struttura nel suo insieme, e da uno o più meccanismi secondari, cioè che interessano parti limitate del macroelemento.

Tale metodologia consente un censimento rapido delle chiese su un certo territorio, attraverso una conoscenza delle caratteristiche tipologiche essenziali alla valutazione della risposta sismica; essa può essere utilizzata sia in termini di prevenzione per il rilievo del danno pregresso e delle caratteristiche costruttive, sia nella gestione di

un'emergenza sismica nel caso in cui si voglia determinare l'agibilità ed i conseguenti interventi di restauro.

Infatti, il rilievo combinato del livello di danno e delle caratteristiche costruttive consente di quantificare il danno prodotto da un terremoto già avvenuto (emergenza sismica) o di definire un indice di vulnerabilità della chiesa che ne caratterizza il comportamento nei riguardi di eventuali eventi sismici futuri (prevenzione sismica). In particolare, nel caso dell'emergenza sismica la scheda permette un rapido rilievo dei danni alle chiese in un'area colpita da terremoto; la sua elaborazione fornisce un quadro sintetico della situazione, con indicazioni sulle opere necessarie per la tutela dell'incolumità pubblica e la salvaguardia dei beni architettonici e dei beni artistici in essa contenuti. Nell'emergenza post-terremoto esiste invece la necessità di uno strumento agile e sintetico, con il quale rilevare rapidamente un elevato numero di manufatti mettendo in evidenza il danno subito, le condizioni di agibilità, la necessità di opere provvisorie a tutela dell'incolumità pubblica ed a salvaguardia del bene.

Sotto l'aspetto della previsione sismica, al fine di una più affidabile previsione del danno atteso, oltre ad alcune indicazioni dimensionali, la scheda mira ad individuare le carenze costruttive che favoriscono l'attivazione di ciascun meccanismo di danno; queste sono spesso legate a dettagli (presenza di catene, ammorsamenti, ecc.) piuttosto che a considerazioni generali sulla fabbrica. Inoltre il rilievo del danno pregresso rappresenta un'ulteriore preziosa informazione, in quanto i terremoti del passato lasciano segni che spesso non vengono cancellati e possono ancora oggi essere riconosciuti. Il risultato di questa analisi è ovviamente lo scenario di danno atteso a fronte del terremoto di riferimento per l'area. Questo può indirizzare le strategie di prevenzione a livello territoriale.

#### *4.3.1.1 Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese*

La metodologia utilizzata per il rilievo del danno sismico è stata formulata cercando di sintetizzare i diversi possibili modi di danno sismico in diciotto meccanismi di collasso fondamentali; le diverse modalità con le quali macroelementi differenti per proporzioni e materiali si lesionano, vengono riconosciute cogliendone il cinematismo di collasso, ovvero l'essenza propria della vulnerabilità. A tal fine sono utilizzate delle schede per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese elaborate dal GNDT (Figure 4.1a, 4.1b, 4.1c, 4.1d, 4.1e, 4.1 f, 4.1g e 4.1h). La scheda è strutturata in modo da guidare il rilevatore nel sopralluogo ed indirizzarlo verso l'interpretazione dei meccanismi di danno attivati e l'individuazione di particolari costruttivi fondamentali nei riguardi della vulnerabilità; non è invece previsto un rilievo dimensionale e del quadro fessurativo, che rallenterebbe le operazioni senza aggiungere conoscenza nei riguardi della risposta strutturale, considerata la scala territoriale dell'indagine.

Nella parte iniziale della scheda (sezione introduttiva, Fig. 4.1a) sono indicate la denominazione del manufatto, la collocazione toponomastica, i dati relativi al sopralluogo (squadra che ha eseguito il rilievo, data dello stesso, persona che ha consentito l'accesso). Inoltre sono richieste informazioni sui seguenti aspetti: a) caratteristiche del sito; b) posizione nel contesto; c) condizioni d'uso e possibilità di affollamento; d) stato di manutenzione generale. E' evidente che questi dati, anche se non sono caratteristiche intrinseche della fabbrica, influenzano la vulnerabilità ed in particolare sono utili in analisi complessive di rischio, dove si considerano gli aspetti della pericolosità e dell'esposizione.

# **SCHEDA PER IL RILIEVO DELLA VULNERABILITÀ E DEL DANNO SISMICO ALLE CHIESE**

*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*



|                                                  |                                      |                                              |                                             |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Denominazione:                                   |                                      | Scheda n°:                                   |                                             |
| Comune:                                          | via/piazza:                          |                                              |                                             |
| Località:                                        | Data:                                | Squadra:                                     |                                             |
| Riferimenti per sopralluogo - (nome e recapito): |                                      |                                              |                                             |
| Posizione:                                       | <input type="checkbox"/> isolata     | <input type="checkbox"/> corpi bassi annessi | <input type="checkbox"/> estremità o angolo |
| Caratteristiche del sito:                        | <input type="checkbox"/> in piano    | <input type="checkbox"/> in pendio           | <input type="checkbox"/> su rilievo         |
| Condizioni d'uso:                                | <input type="checkbox"/> quotidiano  | <input type="checkbox"/> settimanale         | <input type="checkbox"/> saltuario          |
| Stato di manutenzione generale:                  | <input type="checkbox"/> buono       | <input type="checkbox"/> discreto            | <input type="checkbox"/> scadente           |
|                                                  |                                      | <input type="checkbox"/> nel contesto urbano | <input type="checkbox"/> avvallamento       |
|                                                  | <input type="checkbox"/> abbandonata | Affollamento: <input type="checkbox"/>       |                                             |
|                                                  |                                      | <input type="checkbox"/> pessimo             |                                             |

Fig. 4.1a: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione introduttiva. (GNDT, 1994)

## **Sezione 1. DATI TIPOLOGICI E DIMENSIONALI**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pianta:</b> <input type="checkbox"/> una navata <input type="checkbox"/> due navate <input type="checkbox"/> tre navate <input type="checkbox"/> più navate <input type="checkbox"/> centrale <input type="checkbox"/> altro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Aula:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>navata centrale</b><br>largh. ____ × lungh. ____<br>altezza max: ____<br>n° campate: ____<br><input type="checkbox"/> paraste<br><input type="checkbox"/> colonne<br><input type="checkbox"/> contrafforti esterni<br>volte:<br><input type="checkbox"/> a botte<br><input type="checkbox"/> a crociera<br><input type="checkbox"/> a padiglione<br><input type="checkbox"/> a vela<br><input type="checkbox"/> cupola<br>strutturali: <input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>quota imposta volta: ____<br>n° catene trasversali: ____<br>catene/cuciture: <input type="checkbox"/> | <b>1° navata laterale</b><br>matroneo: <input type="checkbox"/><br>largh. ____ × lungh. ____<br>altezza max: ____<br>n° colonne/pilastrini: ____<br><input type="checkbox"/> concili lapidei <input type="checkbox"/> muratura<br>dimensioni: ____ × ____<br>altezza: ____<br>colleg. con navata centrale:<br><input type="checkbox"/> arco <input type="checkbox"/> architrave<br>n° catene archi long.: ____<br>volte: <input type="checkbox"/> a botte<br><input type="checkbox"/> a crociera<br><input type="checkbox"/> a padiglione<br><input type="checkbox"/> cupole o vele<br>strutturali: <input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>n° catene trasversali: ____ | <b>2° navata laterale / cappelle contigue</b><br>largh. ____ × lungh. ____<br>altezza max: ____<br>n° col./pil./setti trasv.: ____<br><input type="checkbox"/> concili lapidei <input type="checkbox"/> muratura<br>dimensioni: ____ × ____<br>altezza: ____<br>colleg. con 1° nav. laterale:<br><input type="checkbox"/> arco <input type="checkbox"/> architrave<br>n° catene archi long.: ____<br>volte: <input type="checkbox"/> a botte<br><input type="checkbox"/> a crociera<br><input type="checkbox"/> a padiglione<br><input type="checkbox"/> cupole o vele<br>strutturali: <input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>n° catene trasversali: ____ | <b>pianta centrale</b><br>largh. ____ × lungh. ____<br>altezza max: ____<br>forma: <input type="checkbox"/> circolare<br><input type="checkbox"/> quadrata/rettangolare<br><input type="checkbox"/> ellittica<br><input type="checkbox"/> poligonale<br><input type="checkbox"/> croce greca<br>n° altari: ____<br>colonne: <input type="checkbox"/><br>volte: <input type="checkbox"/> a crociera<br><input type="checkbox"/> a padiglione<br><input type="checkbox"/> a vela<br><input type="checkbox"/> cupola<br>strutturali: <input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>quota imposta volta: ____<br>n° catene: ____ |
| <b>Copertura:</b><br>lignea:<br><input type="checkbox"/> spingente <input type="checkbox"/> parz. sping.<br><input type="checkbox"/> non sping. <input type="checkbox"/> capriate<br>c.a. o metallica: <input type="checkbox"/><br>cordoli: <input type="checkbox"/> pilastrini: <input type="checkbox"/><br>controventi di falda: <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Presbiterio:</b> <input type="checkbox"/><br>l. ____ × p. ____ × H ____<br><b>Coro:</b> <input type="checkbox"/><br>l. ____ × p. ____ × H ____<br>volte strutturali:<br><input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>n° catene: ____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Transetto:</b> <input type="checkbox"/><br>n° navate: ____<br>largh. ____ × lungh. ____<br>altezza max: ____<br>volte strutturali:<br><input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>n° catene: ____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Cappelle:</b> <input type="checkbox"/> n° ____<br>largh. ____ × prof. ____<br>altezza max: ____<br>volte strutturali:<br><input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>cupole: <input type="checkbox"/><br>n° catene: ____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Abside principale:</b> <input type="checkbox"/><br>l. ____ × p. ____ × H ____<br><b>Abside secondarie:</b> <input type="checkbox"/><br>l. ____ × p. ____ × H ____<br>forma: <b>prin. sec.</b><br><input type="checkbox"/> rettangolare <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> poligonale <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> semicircolare <input type="checkbox"/><br>n° aperture: ____                                                                                                                                                                                       | <b>Campanili:</b> <input type="checkbox"/> n° ____<br><b>1 - a</b> ____ × b ____ × H ____<br><b>2 - a</b> ____ × b ____ × H ____<br>forma: <b>1 2</b><br><input type="checkbox"/> quadrata/rettang. <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> poligonale <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> circolare <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> a vela <input type="checkbox"/><br>n° celle camp.: ____<br>catene/cerchiatura <input type="checkbox"/><br>posizione (D/S, A/P) ____                                                                                                                                                                      | <b>Cupola:</b> <input type="checkbox"/><br>diametro: ____<br>forma:<br><input type="checkbox"/> circolare <input type="checkbox"/> poligonale<br>strutturale: <input type="checkbox"/> sì - <input type="checkbox"/> non so<br>lanterna: <input type="checkbox"/> tiburio: <input type="checkbox"/><br>tamburo: <input type="checkbox"/><br>n° aperture: ____<br>n° cerchiature: ____                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Facciata:</b> <input type="checkbox"/><br>forma: <input type="checkbox"/> capanna<br><input type="checkbox"/> salienti <input type="checkbox"/> rettangolare<br>sommità a vela: <input type="checkbox"/><br>paraste o colonne: <input type="checkbox"/><br>statue o oggetti: <input type="checkbox"/><br>narice o protiro: <input type="checkbox"/><br>edificio addossato: <input type="checkbox"/><br>n° aperture: ____                                                                                                                                                                                                                     |
| volte strutturali:<br><input type="checkbox"/> sì <input type="checkbox"/> no ... <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> non so <input type="checkbox"/><br>n° catene interne: ____<br>catene/cerchiatura <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <input type="checkbox"/> isolato<br><input type="checkbox"/> inserito in pianta<br><input type="checkbox"/> est. (muro comune)<br><input type="checkbox"/> esterno (adiacente)<br>quota stacco: ____                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Cripta:</b> <input type="checkbox"/><br>lar. ____ × lun. ____ × H ____<br>n° colonne: ____<br>volte: <input type="checkbox"/> botte <input type="checkbox"/> crociera                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Sacrestia/altro:</b> <input type="checkbox"/><br>posizione: ____ (D/S, A/P)<br>connessione: <input type="checkbox"/> adiacente<br><input type="checkbox"/> incatenata <input type="checkbox"/> ammorsata                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

Fig. 4.1b: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 1. (GNDT, 1994)

La parte successiva della scheda si articola nelle seguenti sette sezioni :

**1. Dati tipologici e dimensionali** (Fig. 4.1b): contiene informazioni sulla tipologia e le dimensioni della chiesa, scomposta nei diversi elementi architettonici (aula, presbiterio, abside, transetto, cappelle, copertura, cupola, cripta, facciata, campanile, sacrestia); in particolare si concentra l'attenzione sugli elementi strutturali ritenuti



determinanti nei riguardi della risposta sismica della fabbrica (contrafforti, catene, ecc.). Le poche misure richieste costituiscono un'indicazione di massima sulla dimensione della chiesa, utile ad esempio nella stima dei costi dell'intervento, e possono essere facilmente acquisite.

**2. Danni ad elementi di valore artistico** (Fig. 4.1c): si richiede di segnalare la presenza di beni artistici nelle diverse parti all'interno della chiesa e, nel caso d'uso in emergenza a seguito di terremoto, di indicare gli eventuali danni prodotti su tali beni dal sisma; questi possono essere direttamente associati al lesionamento della fabbrica (affreschi), dovuti al distacco di elementi decorativi (stucchi) o al ribaltamento di elementi di pregio (statue), indotti dalla caduta di parti murarie su arredi sacri (tabernacoli, organi).

**Sezione 2. DANNI AD ELEMENTI DI VALORE ARTISTICO (lieve - grave - perdita del bene)**

| Affreschi:                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> volta aula<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                 | <input type="checkbox"/> navate laterali<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> volte cappelle<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                            | <input type="checkbox"/> volta transetto<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                      | <input type="checkbox"/> volta presbiterio<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> volta abside<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                        |
| <input type="checkbox"/> cupola<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                     | <input type="checkbox"/> pareti navate<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                        | <input type="checkbox"/> pareti transetto<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                          | <input type="checkbox"/> pareti abside<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                        | <input type="checkbox"/> pareti cappelle<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                               | <input type="checkbox"/> altri corpi<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                         |
| <b>Stucchi:</b><br><input type="checkbox"/> volte<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> pareti/colonne<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <b>Sculpture:</b><br><input type="checkbox"/> statue<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> altro<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <b>Bassorilievi:</b><br><input type="checkbox"/> altari/pulpito<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> balaustre/altro<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <b>Dipinti:</b><br><input type="checkbox"/> tele<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> polittici<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <b>Facciata:</b><br><input type="checkbox"/> portali/edicole<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> rosoni<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | <b>Arredi sacri:</b><br><input type="checkbox"/> coro ligneo<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> organi/altro<br><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |

Fig. 4.1c: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 2. (GNDT, 1994)

**3. Indice di danno e indice di vulnerabilità** (Fig. 4.1d): nella sezione sono elencati i 18 meccanismi di collasso caratteristici per le chiese; per ogni meccanismo sono riportate le più frequenti modalità di danno illustrati nell'abaco riportato nelle Figure 4.2a e 4.2b. Tale abaco rappresenta una sorta di manuale di istruzioni, ad esempio, nel caso del meccanismo di danno *ribaltamento della facciata* (Fig. 4.2a), la modalità di danno più frequente è il *distacco della facciata dalle pareti* e i due indicatori di vulnerabilità connessi al meccanismo sono: ammortamento scadente tra la facciata ed i muri della navata e assenza di catene longitudinali o contrafforti efficaci (Fig. 4.1d).

**Sezione 3. INDICE DI DANNO E INDICE DI VULNERABILITÀ**

|               |                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                             |                                                                            |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1             | <b>RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA</b>                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | DISTACCO DELLA FACCIATA DALLE PARETI                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | (non so) <input type="checkbox"/>                                                                                                      | <input type="checkbox"/> Ammortamento scadente tra la facciata ed i muri della navata<br><input type="checkbox"/> Assenza di catene longitudinali o di contrafforti efficaci                                |                                                                            |
| 2             | <b>MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA</b>                                                                                         |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | LESIONI NELLA ZONA ALTA DELLA FACCIATA                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | (non so) <input type="checkbox"/>                                                                                                      | <input type="checkbox"/> Facciata indebolita per la presenza di grandi aperture (rosone o altro)<br><input type="checkbox"/> Assenza di collegamento con la copertura, di controventi di falda o di cordoli |                                                                            |
| 3             | <b>MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA</b>                                                                                             |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | LESIONI INCLINATE (TAGLIO); LESIONI VERTICALI O ARCUATE (ROTAZIONE)                                                                    |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| Vulnerabilità | (non so) <input type="checkbox"/>                                                                                                      | <input type="checkbox"/> Presenza di molte aperture (anche tamponate)<br><input type="checkbox"/> Possibilità di rotazioni dalle pareti laterali (copertura spingente, volta non incatenata)                |                                                                            |
| 4             | <b>RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA O DEL TRANSETTO</b>                                                                                  |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | LESIONI NEGLI ARCONI (CON EVENTUALE PROSECUZIONE NELLA VOLTA);<br>ROTAZIONI, SCHIACCIAMENTI O LESIONI ALLA BASE DELLE PARETI DI NAVATA |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 19            | <b>EFFETTI AL SUOLO DOVUTI ALLA MORFOLOGIA E ALLA GEOLOGIA DELL'AREA INTERESSATA</b>                                                   |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | EVIDENZA DI EFFETTI AL SUOLO (frane, cedimenti, fratturazione, liquefazione)                                                           |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
| 20            | <b>EFFETTI AL SUOLO DERIVANTI DA AZIONI MUTUE TRA TERRENO E COSTRUZIONE</b>                                                            |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/>                                                   |
| Danno         | LESIONI DA CEDIMENTO IN FONDAZIONE                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                             | <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> |
|               | Localizzazione:                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                             |                                                                            |

Fig. 4.1d: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 3. (GNDT, 1994)

Ai fini della compilazione di questa sezione, il rilievo è eseguito indicando a) la possibilità di attivazione del meccanismo di collasso; b) l'entità del danno (graduando il proprio giudizio su 3 livelli: 0-danno nullo; 1-danno lieve; 2-danno medio; 3-danno grave); c) le vulnerabilità intrinseche della fabbrica a quel meccanismo, tramite i due indicatori di vulnerabilità già citati.

È evidente che nel caso di uso della scheda in fase preventiva, la compilazione relativa al danno può essere omessa; tuttavia in molti casi i danni prodotti in occasione di precedenti terremoti sono ancora visibili (specie se la chiesa non è stata restaurata di recente) e quindi risulta molto utile rilevare tali dissesti per una previsione più affidabile della vulnerabilità.

Volendo precisare meglio le modalità di compilazione, si deve porre una croce nella casella della prima riga se è presente il macroelemento connesso a quel meccanismo o se si riscontra che tale meccanismo potrebbe attivarsi; ciò significa che vanno sempre segnati i meccanismi 13 e 14, mentre il meccanismo 10 richiede la presenza di un transetto o di cappelle che escono dal profilo delle pareti laterali; il meccanismo 15 presuppone che esistano corpi di fabbrica annessi (sacrestia, monastero, ecc.) di dimensioni comparabili o che siano evidenti fasi costruttive distinte, con soluzioni di continuità nell'apparato murario; il meccanismo 18 va segnalato se è presente una vela o qualche elemento svettante di dimensioni significative che, anche se non strutturale, possa indurre danni alla struttura sottostante a seguito del suo crollo. Nella seconda riga viene invece rilevato l'entità del danno; per meccanismo sviluppato (danno 2) si intende che le lesioni indicano chiaramente la sconnessione della fabbrica in parti con attivazione del cinematismo; il caso di danno grave (danno 3) si riferisce invece, oltre che alle situazioni di crollo locale o globale del macroelemento, ai casi in cui il meccanismo ha prodotto evidenti deformazioni permanenti (fuori piombo, perdita di forma di archi o volte) e la funzionalità strutturale è ridotta in misura significativa. Interessante è il rilievo del danno lieve, caratterizzato da lesioni che non compromettono la struttura ma che avvisano sulla predisposizione all'attivazione del meccanismo. Nella terza riga vengono individuate le carenze costruttive che determinano la vulnerabilità di quel meccanismo; siccome alcune delle informazioni richieste non sono facilmente rilevabili o il tecnico può non sentirsi in grado di esprimere un giudizio (quando l'indicatore è qualitativo), è possibile marcare la risposta negli spazi adiacenti alla dicitura “non so”; in questo caso l'indicatore non verrà tenuto in conto nelle successive elaborazioni.

**4. Caratteristiche delle murature** (Fig. 4.1e): le diverse murature nei vari macroelementi vengono descritte in apposite schede (Allegato 2) facendo riferimento alle caratteristiche degli elementi costitutivi e della malta, alla tessitura dei paramenti ed alla composizione della sezione trasversale. La compilazione della scheda è supportata da un abaco (Allegato 3), che illustra il significato delle diverse terminologie con le quali sono classificate le murature. Per ogni macroelemento possono essere compilate più schede, se sono evidenti diverse fasi o tecniche costruttive; nella scheda chiese è necessario quindi inserire i riferimenti alle schede allegate, seguendo questo criterio: numero della scheda, percentuale di muratura nel macroelemento riferibile alla scheda, spessori minimo e massimo della muratura. In altre parole, se la muratura fosse la stessa in tutta la fabbrica sarebbe necessario compilare un'unica scheda murature e riferirla, con percentuale 100%, a tutti i macroelementi presenti.

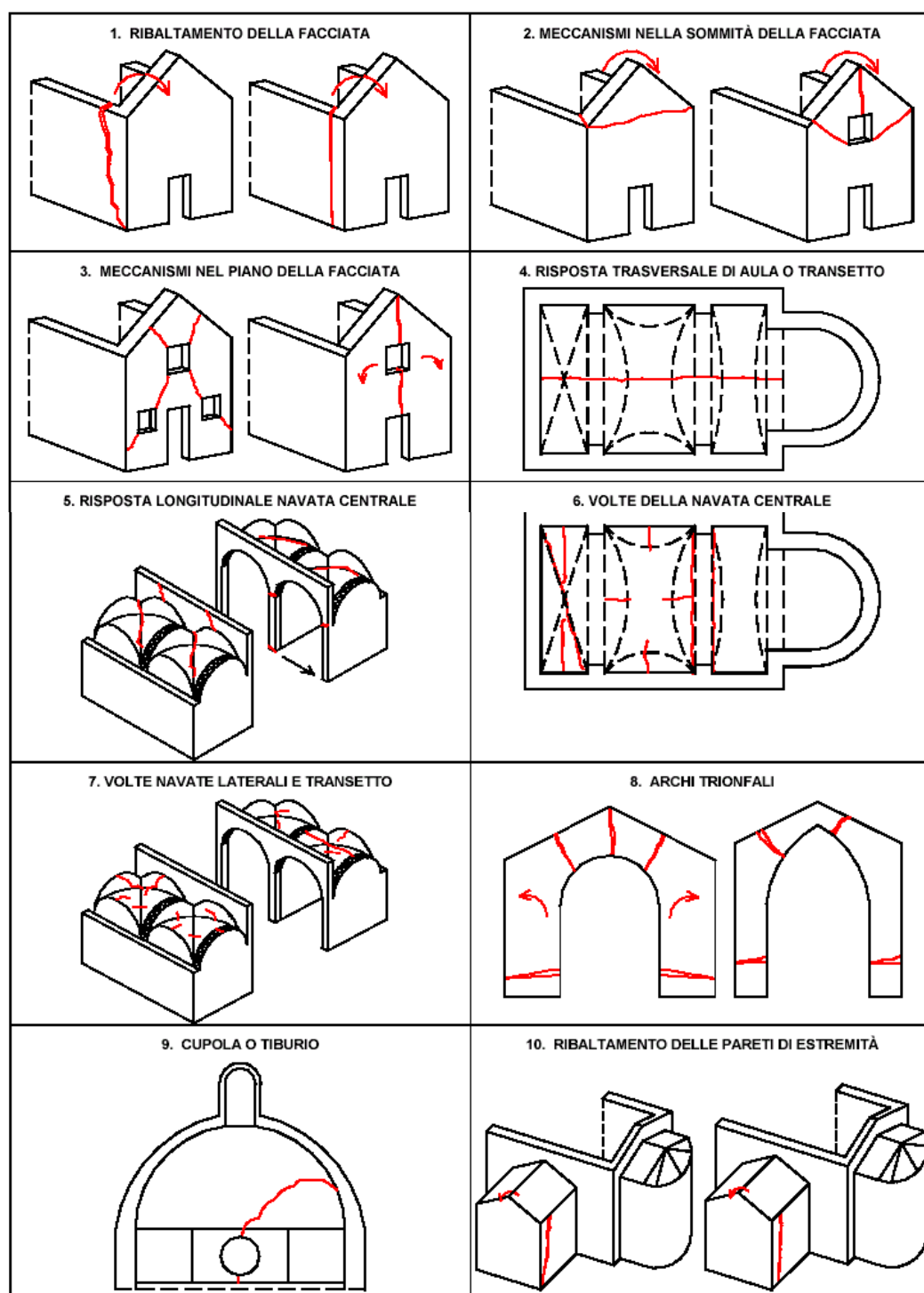


Fig. 4.2a: Abaco dei meccanismi di collasso delle chiese da 1 a 10

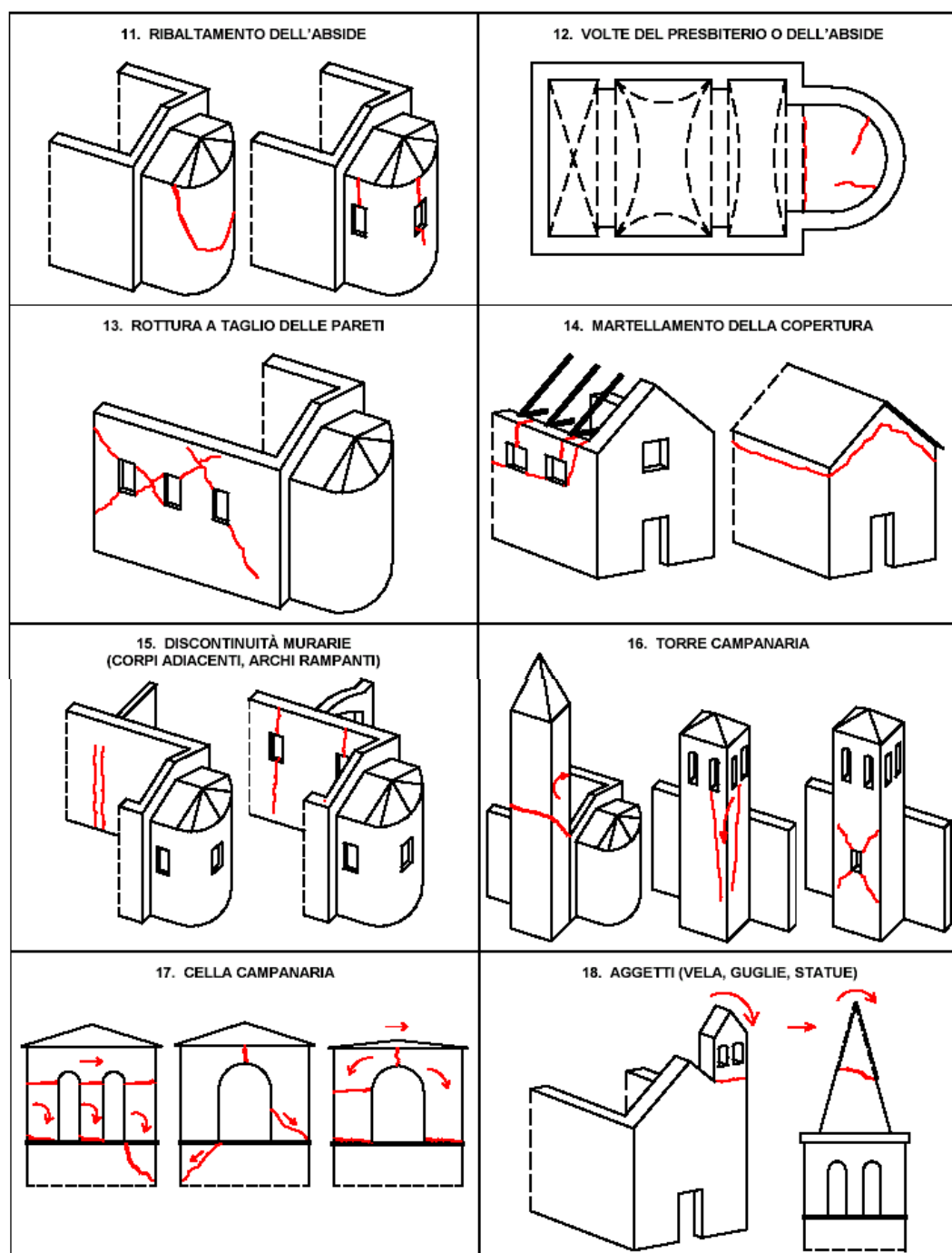


Fig. 4.2b: Abaco dei meccanismi di collasso delle chiese da 11 a 18

## Sezione 4. CARATTERISTICHE DELLE MURATURE

|                                                |    |             |             |            |    |             |             |
|------------------------------------------------|----|-------------|-------------|------------|----|-------------|-------------|
| <b>FACCIATA</b> □ □ □                          |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| <b>PARETI LATERALI</b> □ □ □                   |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| <b>TRANSETTO</b> □ □ □                         |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| <b>ABSIDE</b> □ □ □                            |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| <b>CAMPANILE</b> □ □ □                         |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| <b>ALTRI CORPI (cappelle, sacrestia)</b> □ □ □ |    |             |             | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |
| scheda n°:                                     | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : | scheda n°: | %: | $S_{min}$ : | $S_{max}$ : |

Fig. 4.1e: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 4. (GNDT, 1994)

**5. Agibilità** (Fig. 4.1f): in tale sezione, significativa solo nell'emergenza sismica, è richiesto un giudizio sull'agibilità della struttura, scegliendo fra quattro diverse possibilità: agibile, inagibile, parzialmente agibile, agibile con provvedimenti di pronto intervento. Nel caso di agibilità parziale, il rilevatore deve indicare quale parte della fabbrica ritiene agibile, o meglio quali zone devono essere transennate perché ritenute non fruibili (ad esempio una navata).

## Sezione 5. AGIBILITÀ

|                                                |                                                     |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> AGIBILE               | <input type="checkbox"/> INAGIBILE                  |
| <input type="checkbox"/> Parzialmente agibile: | <input type="checkbox"/> Agibile con provvedimenti: |

Fig. 4.1f: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 5. (GNDT, 1994)

**6. Annotazioni** (Fig. 4.1g): è uno spazio libero, che può essere utilizzato per evidenziare tipologie particolari, non previste nella sezione 1, dissesti di natura non sismica (cedimenti di fondazione) e recenti interventi di consolidamento.

## Sezione 6.

**ANNOTAZIONI**

(opere urgenti, danni particolari, recenti interventi di consolidamento, beni da salvaguardare)

|  |
|--|
|  |
|--|

Fig. 4.1g: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 6. (GNDT, 1994)

**7. Elaborati grafici** (Fig. 4.1h): pianta, prospetti, sezioni e schizzi per meglio chiarire le forme strutturali.

**Sezione 7. ELABORATI GRAFICI**

(piante, sezioni, prospetti; illustrazione di dissesti particolari)

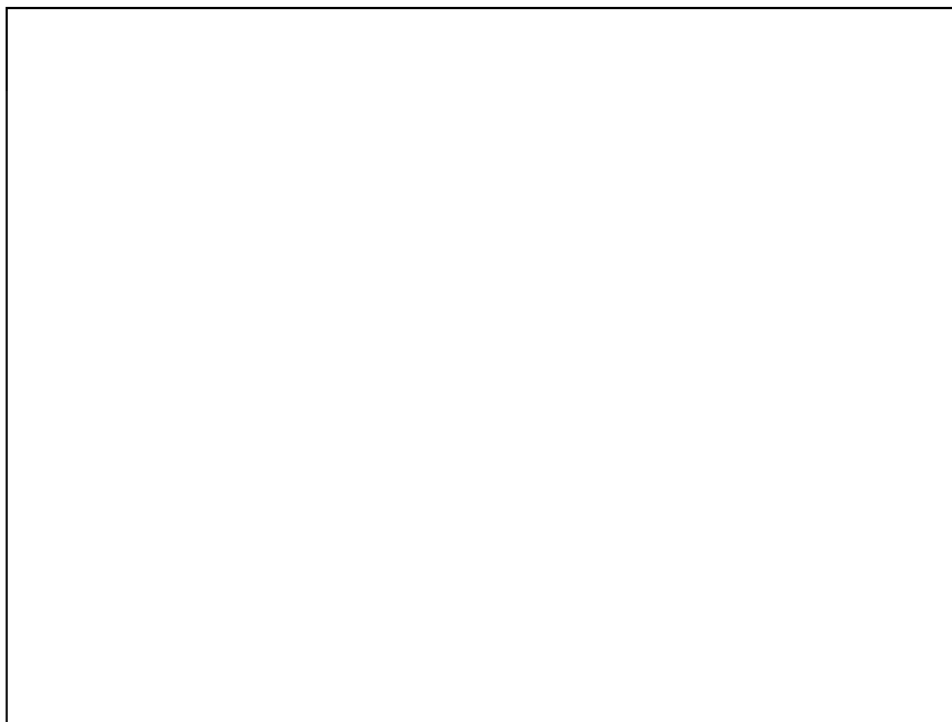


Fig. 4.1h: Scheda per il rilievo della vulnerabilità e del danno sismico alle chiese, sezione 7. (GNDT, 1994)

**4.3.1.2 Considerazioni sulla compilazione della scheda**

La scheda è stata concepita per guidare il rilevatore attraverso un percorso di conoscenza della fabbrica, del suo funzionamento strutturale e dei danni subiti a seguito del terremoto.

Dopo aver compilato la sezione introduttiva (Fig. 4.1a) si passa alla sezione 1 (Fig. 4.1b). In questa vengono riconosciuti i diversi elementi architettonici presenti nella fabbrica, rilevando quei particolari che sono in relazione al comportamento strutturale. Le poche misure richieste hanno lo scopo di fornire un'indicazione di massima sulla dimensione della chiesa, utile ad esempio nella stima dei costi dell'intervento, e possono essere valutate rapidamente con apposita strumentazione (rotella metrica, distanziometro laser). Per le informazioni tipologiche è sufficiente porre una croce sulla casella per indicare la presenza dell'elemento (ad esempio: presenza di catene, di contrafforti) o scegliendo tra una serie di possibilità (ad esempio per la tipologia delle volte, della copertura o la forma della facciata). E' possibile indicare più risposte (ad esempio in presenza di volte diverse nella stessa aula). Nella descrizione dell'aula il numero di campate serve ad indicare la presenza di diversi campi di volte, anche di tipologia diversa, eventualmente separati da arconi di irrigidimento. La posizione dei diversi corpi di fabbrica (campanile, sacrestia, ecc.) è riferita all'asse centrale della chiesa e viene indicata con destra o sinistra (D o S), anteriore o posteriore (A o P). In facciata l'entità delle aperture si indica con: 1 croce, portale particolarmente ampio (nel caso di presenza di un piccolo portale non bisogna mettere croci); 2 croci, apertura significativa sopra al portale (rosone o altro); 3 croci, presenza di aperture anche a lato

del portale (nella stessa navata) o evidenza di vecchie aperture tamponate tra il portale ed il rosone.

La compilazione accurata della sezione 1 facilita l'individuazione dei meccanismi di danno attivati dal terremoto, da indicarsi nella sezione 3 (Fig. 4.1d). Ciascuno dei 18 indicatori previsti rappresenta un particolare cinematismo di collasso in un macroelemento della fabbrica (parte strutturalmente autonoma che coincide in genere con un elemento architettonico). Tali cinematismi, come già illustrato in precedenza, sono schematicamente riportati nell'abaco riportato in Figura 4.2a e 4.2b e si riferiscono ai seguenti macroelementi: facciata (1, 2 e 3); aula (4, 5, 6 e 7); arco trionfale (8); cupola o tiburio (9); ribaltamento di altre pareti di estremità (transetto, cappelle) (9 e 10); ribaltamento dell'abside (11); volte del presbiterio o dell'abside (12); rottura a taglio delle pareti (13); meccanismi negli elementi di copertura (14); torre campanaria (14 e 15); aggetti o vele (16). Ciascun indicatore è caratterizzato da tre righe: il macroelemento, con eventualmente la descrizione del cinematismo a cui ci si riferisce; il meccanismo di danno atteso in relazione al cinematismo; le carenze costruttive che comportano una elevata vulnerabilità del macroelemento a questo specifico cinematismo. Nella casella della prima riga è necessario porre una croce quando si riconosce la presenza del macroelemento nella fabbrica, prescindendo quindi dal fatto che il danno si sia verificato; quindi queste caselle non vanno barrate solo se, ad esempio, la chiesa non ha la cupola o manca la torre campanaria. Nella seconda riga viene invece indicato il livello del danno: nessuna croce, danno assente; 1 croce, accenno di danno; 2 croci, meccanismo sviluppato (oltre alle lesioni si sono manifestati movimenti relativi tra le porzioni in cui la fabbrica si è sconnessa); 3 croci, collasso o situazione prossima alla crisi (il macroelemento ha perso la sua funzionalità strutturale, per perdita di forma o di resistenza dei materiali). Nella terza riga vengono individuate, in due voci distinte, le carenze costruttive che determinano la vulnerabilità; questa non è infatti desumibile da caratteristiche tipologiche globali (quelle indicate nella sezione 1) ma dai particolari costruttivi qui indicati. Alcune delle informazioni richieste sono immediatamente riscontrabili dal rilevatore mentre per altre possono verificarsi due distinti problemi: a) il dato non è facilmente rilevabile (collegamenti in copertura, puntelli appoggiati sulle volte); b) la risposta si presta ad un giudizio soggettivo (snellezza delle pareti, volte ribassate, qualità della muratura, ecc.). In entrambi i casi quando l'operatore non si sente in condizione di rispondere deve barrare gli appositi spazi contraddistinti da (non so), in modo tale da non tenerne conto nel successivo calcolo degli indici. Gli indici di danno e vulnerabilità intrinseca rappresentano una media normalizzata ad uno dei rispettivi punteggi riportati sui singoli indicatori; nel caso che ad alcune domande relative alla vulnerabilità il rilevatore non abbia potuto rispondere, è necessario detrarre il numero dal denominatore dell'indice di vulnerabilità ( $i_v$ ). E' evidente che, a seguito del sisma, indici di danno più elevati si riscontreranno in chiese con un indice di vulnerabilità alto; tuttavia nel passaggio dalla vulnerabilità al danno entra in gioco l'intensità macrosismica, ovvero la severità del terremoto in quella località. Nel progetto GNDT-Molise il carattere preventivo dell'analisi ha portato gli autori ad investigare, inoltre, la possibile presenza di stati fessurativi connessi a meccanismi di danno legati all'interazione della struttura con il terreno (cedimenti fondali) o alla presenza in sito di fenomeni dovuti alla morfologia ed alla geologia dell'area interessata (movimenti franosi in atto, fratturazioni, liquefazioni). E' apparso, infatti, importante il rilievo di tali fenomeni, in quanto, anche se in gran parte sconnessi dagli effetti di terremoti passati, possono favorire la formazione di

zone di debolezza nella costruzione che influenzano la risposta strutturale in occasione di un sisma. Per tali meccanismi di danno (19 e 20) è stato inserito solo il rilievo del danno presente, in quanto risulta improbabile potere valutare vulnerabilità specifiche della chiesa tramite un giudizio qualitativo e speditivo.

#### 4.3.1.3 *Calcolo degli indici di danno e di vulnerabilità e analisi di vulnerabilità*

L'elaborazione dei dati rilevati ed in particolare di quelli presenti nella sezione 3 (Fig. 4.1d) consente di ricavare due distinti indici. Chiamando  $n$  il numero di meccanismi che potenzialmente potrebbero essere attivati nella chiesa (con intervallo che varia da 0 a 18),  $v$  il punteggio totale (numero complessivo di indicatori di vulnerabilità riscontrati che varia da 0 a 2 per singolo meccanismo, da 0 a 36 in totale),  $d$  livello totale di danno subito il cui punteggio varia da 0 a 3 per singolo meccanismo, da 0 a 54 in totale),  $p$  è il numero di indicatori di vulnerabilità per i quali non è stato possibile rilevare l'informazione o formulare un giudizio, (per esempio certe zone della fabbrica, come il sottotetto, possono non essere ispezionabili, specie in emergenza); è possibile calcolare i seguenti indici:

$$1. \text{ indice di danno } i_d = \frac{d}{3n} \quad (4.1)$$

tale indice è un numero compreso tra 0 e 1 che quantifica il livello medio di danno subito dalla chiesa. In particolare, l'indice di danno vale 1 se il livello di danno è risultato grave in tutti i meccanismi possibili

$$2. \text{ indice di vulnerabilità } i_v = \frac{v}{(2n - p)} \quad (4.2)$$

tale indice è un numero compreso tra 0 e 1, rappresentativo della propensione della chiesa ad essere danneggiata dal terremoto. Anche in questo l'indice vale 1 nella situazione peggiore, ovvero quando per tutti gli indicatori a cui si è potuto dare risposta si è riscontrata una vulnerabilità.

Questi indici vengono utilizzati in maniera differente a seconda che si voglia effettuare un'analisi di vulnerabilità sulle chiese di un territorio a fini preventivi o si rilevino i dati a seguito di un terremoto per la gestione dell'emergenza. La loro utilità consiste nell'essere parametri sintetici tramite i quali confrontare situazioni differenti, al fine di mettere insieme gruppi di manufatti di caratteristiche analoghe o stabilire gerarchie in funzione dei danni subiti o della vulnerabilità presunta nei riguardi dell'azione sismica.

L' utilizzo a posteriori della metodologia ha permesso una validazione del metodo di previsione che è stato tarato direttamente sui dati censiti a seguito di eventi sismici in diverse aree geografiche. Suddividendo il campione di dati rilevati in occasione del terremoto umbro-marchigiano (1997) per aree in cui è stata rilevata un'intensità macrosismica omogenea è stato possibile ottenere una distribuzione statistica dell'indice di danno, trasformando tale variabile, continua tra 0 e 1, in un parametro discreto in base ad una tabella di conversione riportata in Tabella 4.1, stabilendo cioè una correlazione tra l'indice di danno  $d$  ed i sei livelli di danno definiti dalla Scala EMS-98. (Grunthal, 1998)



Tab. 4.1: Conversione dell'indice di danno  $i_d$  in 6 livelli di danno, descritti qualitativamente

| Livello | Indice di danno        | Descrizione del danno strutturale                                                                        |
|---------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | $i_d \leq 0.05$        | Nessun danno: danno lieve solo in uno o due meccanismi                                                   |
| 1       | $0.05 < i_d \leq 0.25$ | Danno trascurabile o lieve: danno lieve o moderato in alcuni meccanismi                                  |
| 2       | $0.25 < i_d \leq 0.4$  | Danno medio: danno moderato in molti meccanismi, con uno o due meccanismi attivati a livello medio       |
| 3       | $0.4 < i_d \leq 0.6$   | Danno grave: molti meccanismi attivati a livello medio, con alcuni meccanismi a livello grave            |
| 4       | $0.6 < i_d \leq 0.8$   | Danno molto grave: danno grave in molti meccanismi, con possibile crollo di alcuni elementi della chiesa |
| 5       | $i_d > 0.8$            | Crollo: oltre 2/3 presentano un livello di danno corrispondente al crollo                                |

Tale trasformazione ha permesso di ottenere per aree con la stessa intensità macrosismica le matrici di probabilità di danno (Damage Probabilistic Matrix, DPM), che sono in grado di rappresentare probabilisticamente il danno atteso sugli edifici di ciascuna classe attraverso un istogramma. Dall'osservazione delle matrici di probabilità di danno si è potuto notare come ovviamente il danno si incrementa gradualmente con l'aumentare dell'intensità del sisma. Dai dati rilevati a seguito dei terremoti umbro-marchigiano (1997), Lunigiana e Garfagnana (1995) e del Lazio (1999) si è visto che gli istogrammi di distribuzione del danno medio determinati a seguito di tali eventi sono ben approssimati dalla distribuzione di probabilità di tipo binomiale definita dal solo parametro  $d$  danno medio (compreso tra 0 e 1):

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} d^k (1-d)^{5-k} \quad (k=0,1,2,3,4,5) \quad (4.3)$$

dove:  $p_k$  è la probabilità di avere un danno di livello  $k$ .

Nel caso di costruzioni religiose, si evince come il modello proposto non risenta in maniera sostanziale dell'area geografica dove viene applicato, permettendo un utilizzo affidabile in occasione di valutazioni del rischio sismico per zone diverse da quelle considerate ai fini della sua calibrazione.

Una rappresentazione grafica della vulnerabilità si può ottenere mediante le curve di capacità e di fragilità.

Il modello di vulnerabilità definisce la curva di capacità che rappresenta il livello di danneggiamento della struttura al variare dell'intensità macrosismica e per una prefissata vulnerabilità.

Un'altra strada per rappresentare la vulnerabilità di un edificio è attraverso le curve di fragilità nelle quali, per un prefissato valore dell'indice di vulnerabilità, il danno medio viene riportato in funzione dell'intensità macrosismica. Tali curve esprimono la probabilità che il danno atteso dalla struttura superi un fissato livello di danno durante un terremoto. Tale probabilità è associata ad un livello di danno (0,1,2,3,4,5).

#### 4.3.2 Un metodo integrato

La metodologia di seguito riportata (Lagomarsino et al., 2001) è una proposta di integrazione della scheda chiese elaborate dal GNDT. In particolare, in essa si introducono nelle schede alcuni nuovi meccanismi di danno allo scopo di fornire informazioni più dettagliate e scongiurare situazioni troppo approssimate nell'attribuzione di un meccanismo collasso ad una porzione di fabbrica. Inoltre, sono state ampliate le sezioni che riguardano i dati dimensionali e tipologici giudicate insufficienti a descrivere chiese di grandi dimensioni. L'ottica di questa rielaborazione è,

pertanto, quella di porre maggior attenzione al rilievo dei particolari costruttivi che giocano un ruolo fondamentale sul comportamento sismico di tali strutture.

L'integrazione che gli Autori propongono si articola in due sezioni distinte: una mirata al rilievo del danno in una fase di emergenza sismica, ed una correlata in molte parti alla prima ma con lo scopo principale di giudicare la vulnerabilità presente del corpo di fabbrica prima che il terremoto avvenga. Le due schede permettono di effettuare il rilievo del danno e della vulnerabilità attraverso 28 meccanismi rispetto ai 18 presenti nella metodologia GNDT. L'introduzione di alcuni nuovi meccanismi consente una descrizione più accurata di situazioni che molto spesso venivano in modo troppo approssimato attribuite allo stesso meccanismo di collasso. I 28 meccanismi presenti, correlati da un abaco revisionato anche nelle parti già precedentemente presenti, permette, infatti, una più puntuale descrizione dei meccanismi attivati, fornendo pertanto, al rilevatore, una serie di parametri aggiuntivi utili anche per esprimersi sulla agibilità del fabbricato. In Tabella 4.2 è riportato l'elenco dei meccanismi di danno considerati: nella II e III colonna sono rispettivamente riportati i modi di danno (azioni fuori dal piano: I modo; azione nel piano: II modo) associabili ad ogni cinematisma di collasso previsto, riportato nella prima colonna, e le parti della chiesa. L'abaco dei possibili meccanismi di danno è riportato nelle Figure 4.3a, 4.3b, 4.3c, 4.3d, 4.3e.

Appare evidente come certi meccanismi siano difficilmente correlabili ad un unico modo di danno, che d'altra parte è una schematizzazione introdotta per comprendere il comportamento di pareti investite da una azione sismica. Si descriverà in seguito la scheda per il rilievo della vulnerabilità, che dovrebbe essere compilata preventivamente all'evento sismico e di seguito quella da utilizzarsi per il danno sismico e il giudizio di agibilità in caso di terremoto già avvenuto. Si sottolinea, da subito, come le due schede siano strettamente collegate tra loro.

#### 4.3.2.1 *L'utilizzo della scheda per la prevenzione*

La scheda si articola in tre parti distinte, che riassumono seppur con diverse modifiche le sette sezioni della scheda di rilievo del GNDT precedentemente descritta. La prima parte è dedicata alla conoscenza generale della fabbrica; intendendo, quindi, le caratteristiche formali, le principali dimensioni degli elementi architettonici che la compongono, le caratteristiche delle murature dei vari macroelementi. Per quanto riguarda i dati dimensionali e tipologici si è cercato di ampliare le sezioni che erano risultate insufficienti a descrivere chiese di grandi dimensioni; la presenza di numerose cappelle laterali di diversa fattura e dimensioni, la presenza di facciate tipologicamente differenti rispetto alla classica forma a capanna, trova in questa nuova versione una giusta collocazione in modo da evitare confusione al rilevatore e allo stesso tempo la presenza di molte annotazioni in campo libero che hanno lo svantaggio di essere dati difficilmente archiviabili e processabili. I dati raccolti rappresentano la vulnerabilità intrinseca della fabbrica che gioca un ruolo fondamentale, come dimostra l'osservazione dei danni, nel comportamento strutturale.

La seconda parte è legata alla definizione dell'indice di vulnerabilità; le modifiche apportate sono in tale sezione quelle che risultano essere le più significative. I 28 meccanismi permettono l'analisi anche di chiese di grandi dimensioni con lo stesso grado di accuratezza. Un esempio, che può risultare significativo, è rappresentato dai meccanismi di collasso della copertura, che nella versione del GNDT erano raggruppati in un unico indicatore. La diversificazione introdotta in 3 differenti

meccanismi permette di individuare e catalogare con maggior precisione le caratteristiche costruttive. In chiese di grosse dimensioni, formate da diversi macroelementi (aula, abside, transetto, navata centrale e laterale), sono presenti, in molti casi, tipologie di copertura differenti, che generano già in situazioni statiche comportamenti disuguali (capriate nell'aula centrale, puntoni di falda nell'abside), che devono essere evidenziate e catalogate in modo autonomo. La necessità di formulare uno strumento da dovere utilizzare per un'analisi di vulnerabilità preventiva, ha determinato l'esigenza di adottare una scheda che, pur mantenendo l'approccio per meccanismi di danno, avesse per ogni cinematismo una lista di presidi antisismici (storici o moderni) che rappresentassero quelle soluzioni tecnologiche adottate per contrastare l'attivazione e lo sviluppo del meccanismo.

Di seguito è riportato a titolo d'esempio la sezione riguardante i meccanismi della copertura dell'aula (Figura 4.4); le modalità di compilazione sono del tutto analoghe alla versione del GNDT: nella prima riga è riportata la denominazione del meccanismo o del macroelemento di cui si vuole valutare la vulnerabilità, con a fianco un box da marcare solo se il macroelemento è presente nella chiesa che si sta considerando. Nella riga successiva sono riportati, invece, una serie di presidi che possono contrastare l'attivazione del suddetto cinematismo. Per ognuno di essi il rilevatore dovrà evidenziare la presenza o l'impossibilità di rilevarlo per inaccessibilità del sito, e nella colonna di destra esprimere un giudizio sull'efficacia del particolare costruttivo, modulando il suo giudizio su tre diversi livelli (0: inefficace; 1: modesto; 2: buona; 3: completamente efficace). La presenza di una catena che contrasta il ribaltamento della facciata, per esempio, non rappresenta in assoluto un buon presidio; la sua posizione o il fatto che sia "lenta", può renderla, infatti, inefficace sotto le azioni sismiche.

Tab. 4.2: Elenco dei meccanismi di danno proposti nella nuova metodologia di rilievo

|    | MECCANISMO DI COLLASSO                                        | Modo di danno | Parte della chiesa     |
|----|---------------------------------------------------------------|---------------|------------------------|
| 1  | RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA                                   | I             | FACCIATA               |
| 2  | MECCANISMI NELLA SOMMITA' DELLA FACCIATA                      | I             |                        |
| 3  | MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA                           | II            |                        |
| 4  | PROTIRO-NARTECE                                               | I o II        |                        |
| 5  | RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA                                | I             | AULA                   |
| 6  | MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI                    | II            |                        |
| 7  | RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO (chiese a più navate)    | I             |                        |
| 8  | VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE                                   | I o II        |                        |
| 9  | VOLTE DELLAE NAVATE LATERALI                                  | I o II        | TRANSETTO              |
| 10 | RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITA' DEL TRANSETTO         | I             |                        |
| 11 | MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO               | II            |                        |
| 12 | VOLTE DEL TRANSETTO                                           | I o II        |                        |
| 13 | ARCHI TRIONFALI                                               | II            | ARCO TRIONFALE         |
| 14 | CUPOLA-TAMBURIO/TIBURIO                                       | I o II        | CUPOLA                 |
| 15 | LANTERNA                                                      | I o II        |                        |
| 16 | RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE                                      | I             | ABSIDE                 |
| 17 | MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE            | II            |                        |
| 18 | VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE                           | I o II        |                        |
| 19 | MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA (pareti laterali aula) | I o II        | COPERTURA              |
| 20 | MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA- TRANSETTO             | I o II        |                        |
| 21 | MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA (abside, presbiterio)  | I o II        |                        |
| 22 | RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE                                   | I             | CAPPELLE CORPI ANNESSI |
| 23 | MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DELLE CAPPELLE              | II            |                        |
| 24 | VOLTE DELLE CAPPELLE                                          | I o II        |                        |
| 25 | INTERAZIONI IN PROSSIMITA' DI IRREGOLARITA'                   | I o II        |                        |
| 26 | AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)                     | I             | AGGETTI CAMPANILE      |
| 27 | TORRE CAMPANARIA                                              | I o II        |                        |
| 28 | CELLA CAMPANARIA                                              | I o II        |                        |

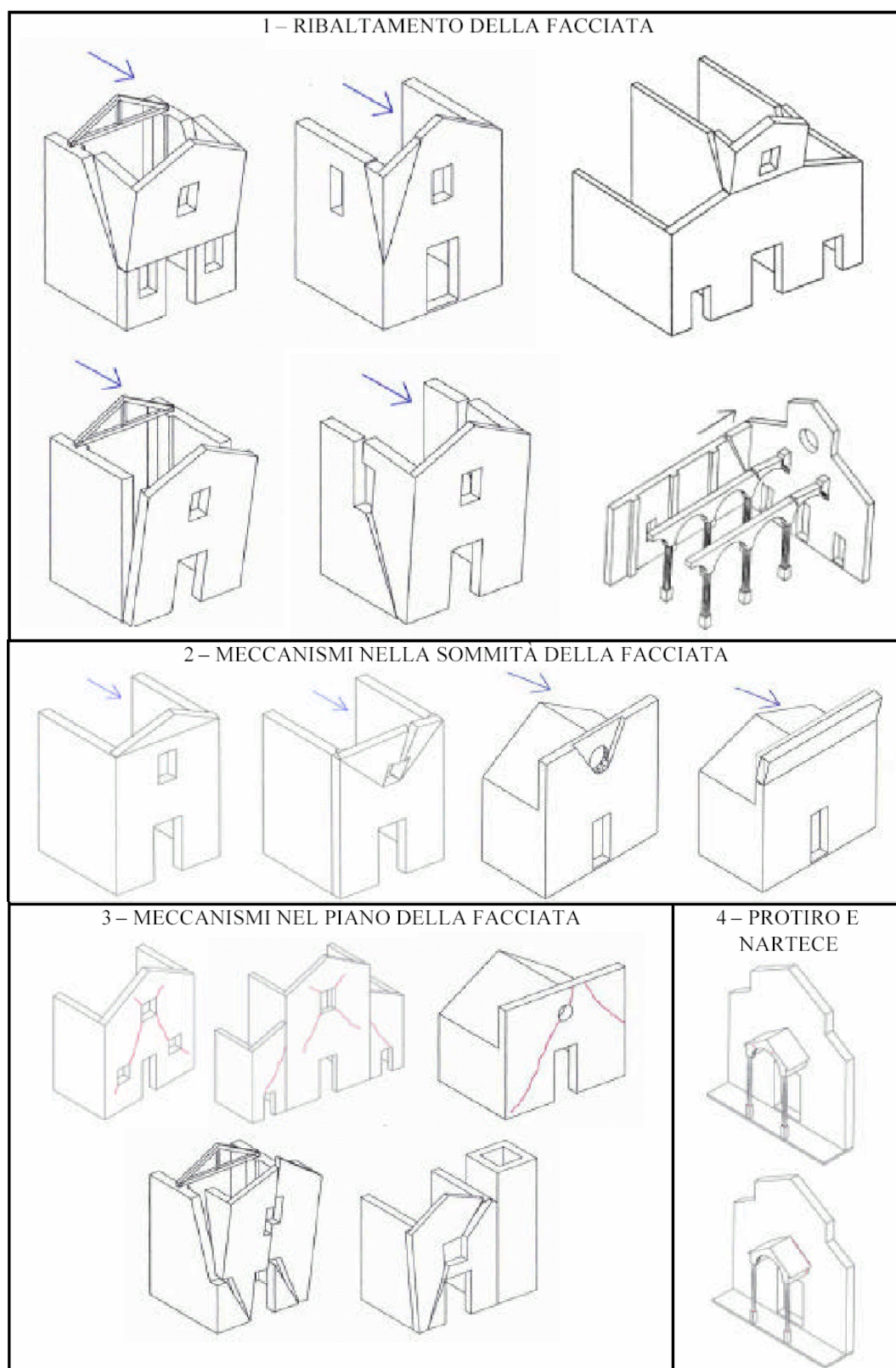


Fig. 4.3a: Abaco dei 28 meccanismi di danno delle chiese. (Lagomarsino et al., 2001)

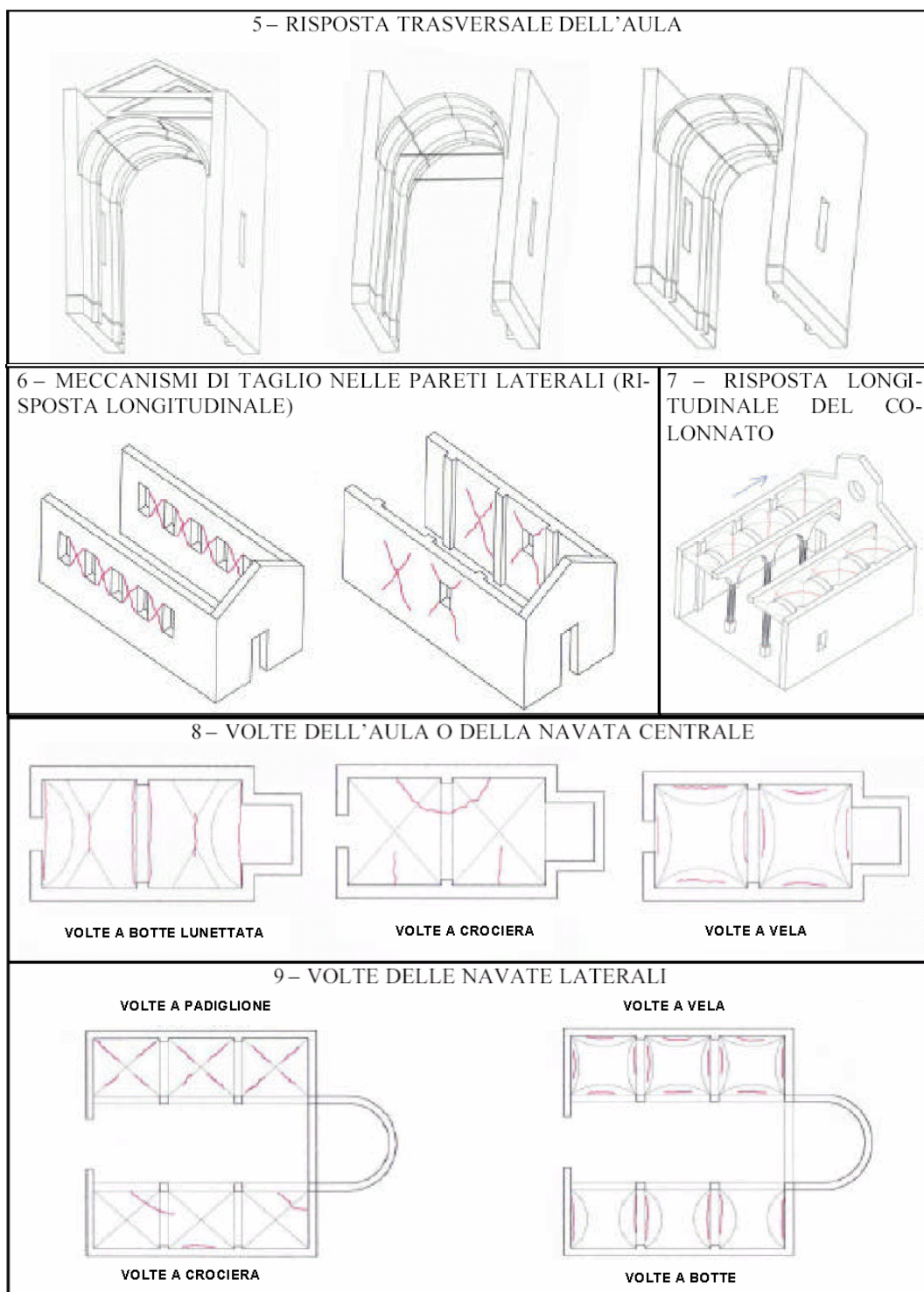


Fig. 4.3b: Abaco dei 28 meccanismi di danno delle chiese. (Lagomarsino et al., 2001)



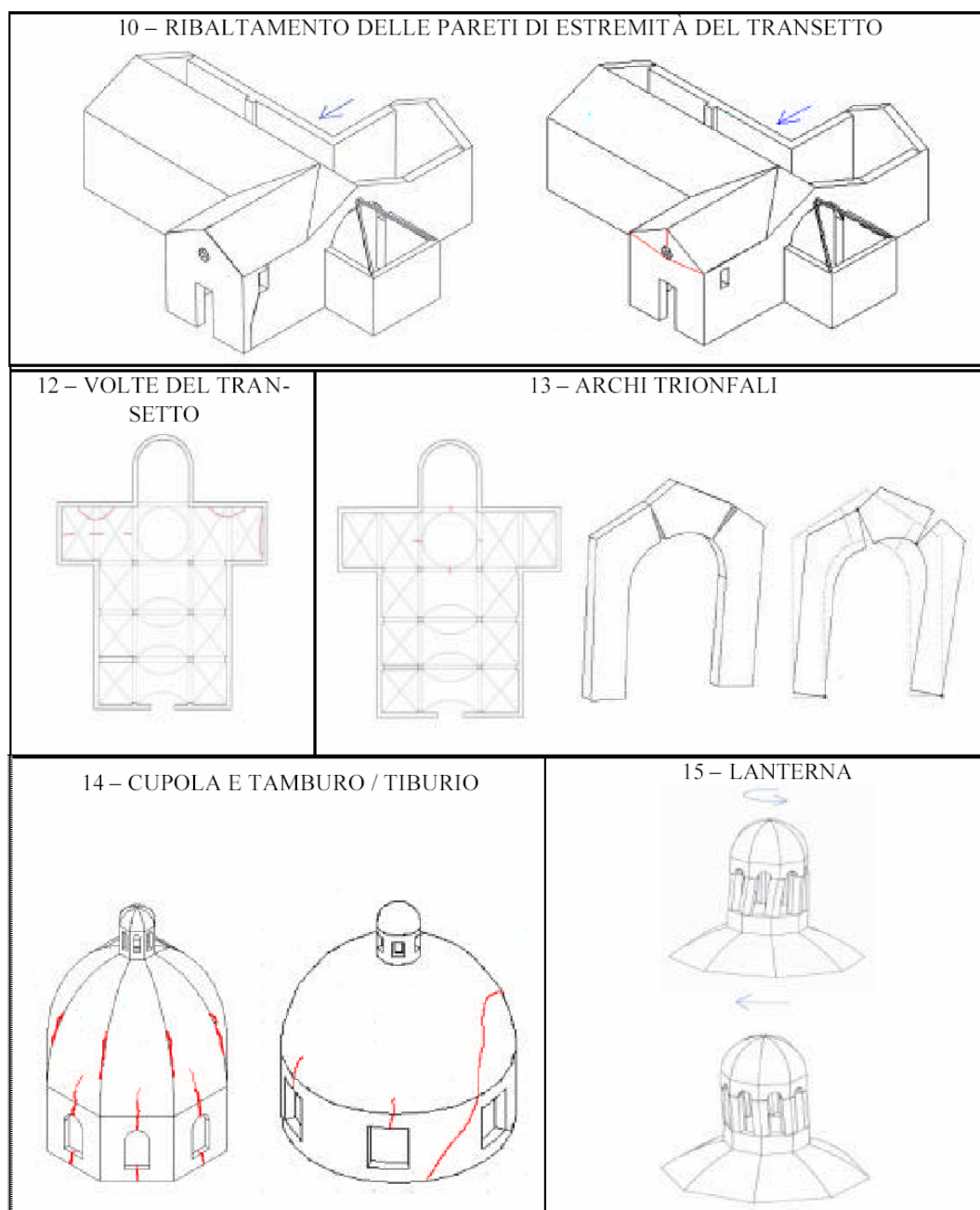


Fig. 4.3c: Abaco dei 28 meccanismi di danno delle chiese. (Lagomarsino et al., 2001)

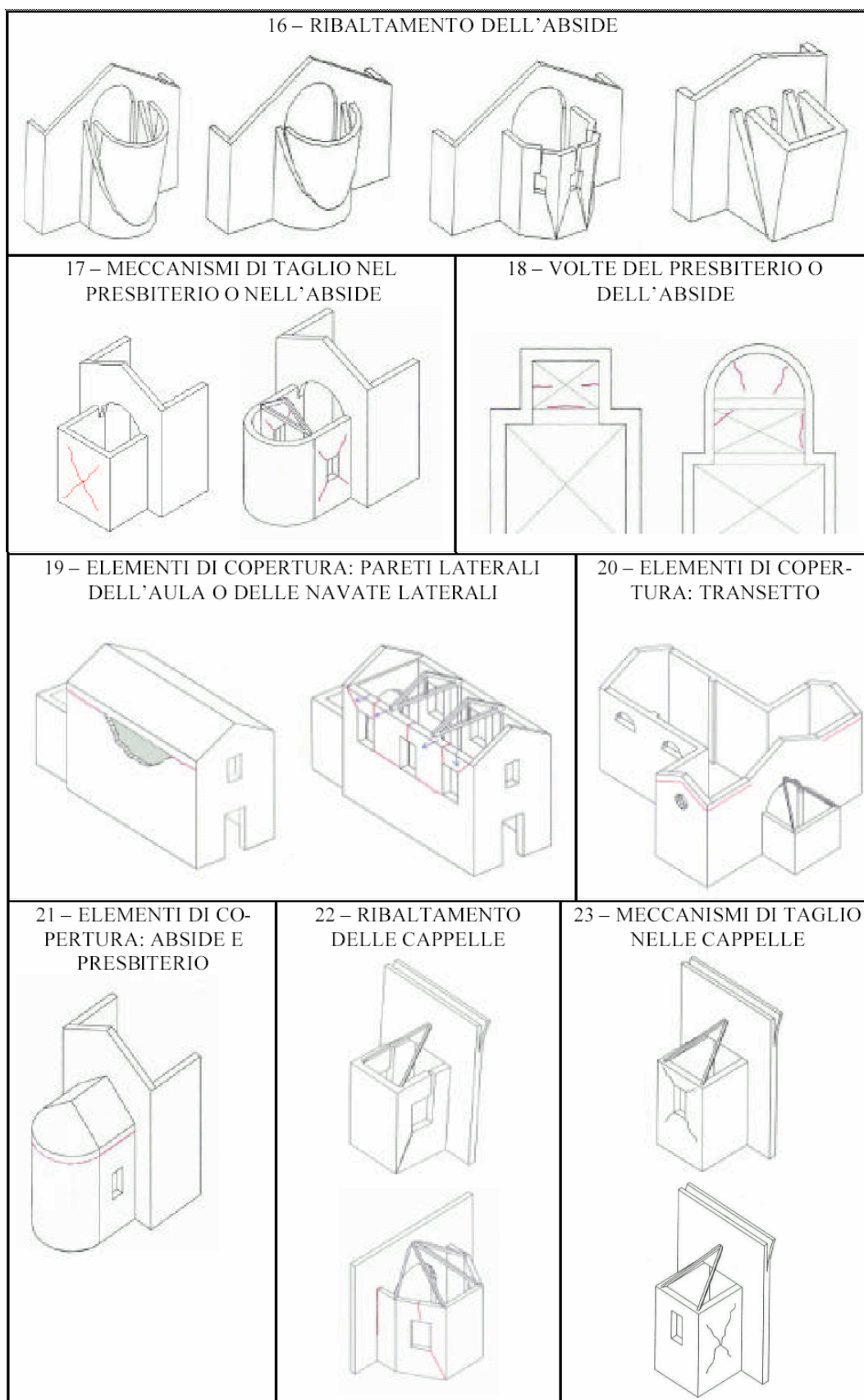


Fig. 4.3d: Abaco dei 28 meccanismi di danno delle chiese. (Lagomarsino et al., 2001)

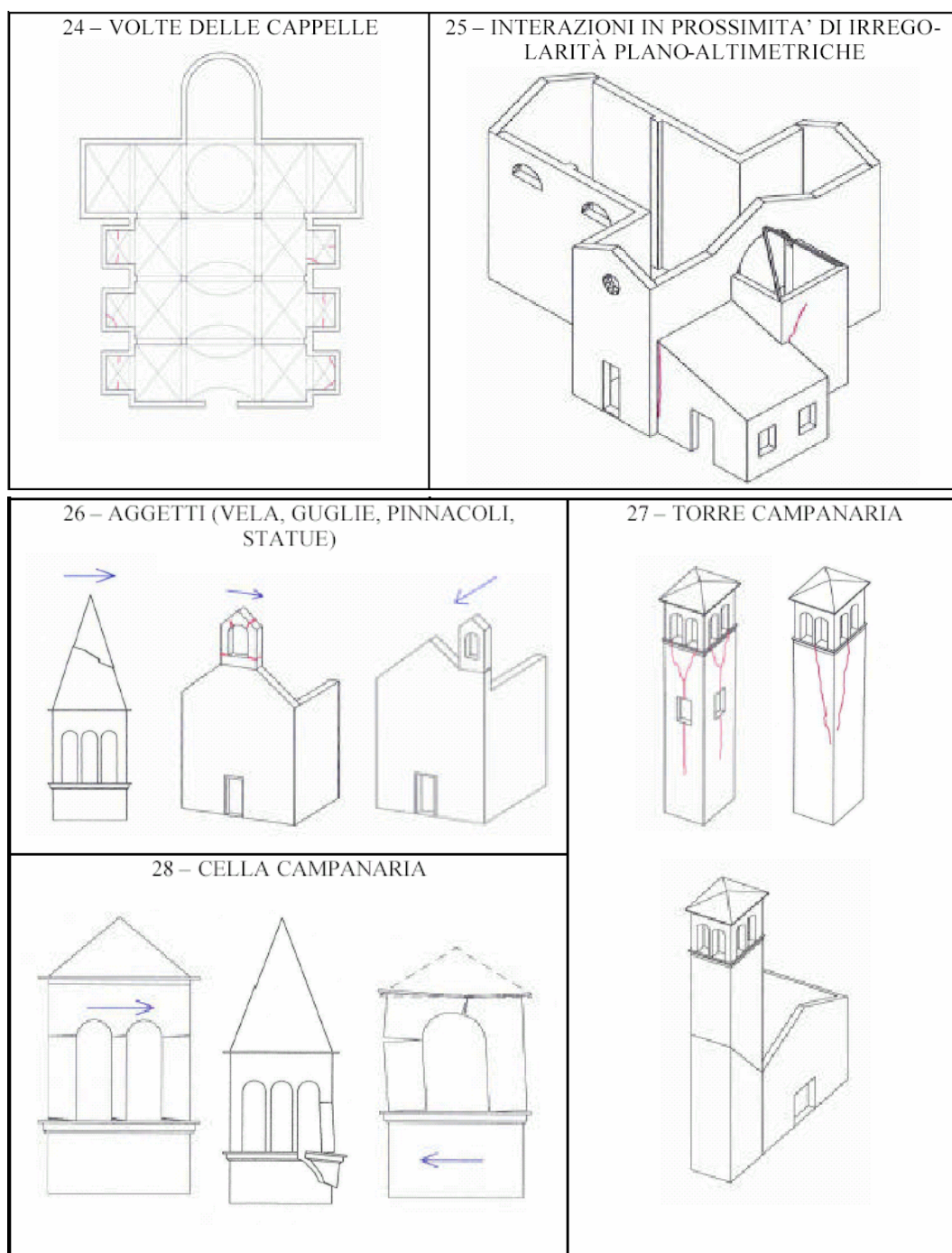


Fig. 4.3e: Abaco dei 28 meccanismi di danno delle chiese. (Lagomarsino et al., 2001)

L'indice di vulnerabilità che ne deriva si basa, pertanto su tali considerazioni; in particolare, per tener conto dell'efficacia del presidio si è deciso di valutare la vulnerabilità del macroelemento secondo lo schema riportato della Tabella 4.3.



| 19 – MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA -<br>PARETI LATERALI DELL'AULA |                                                                                                                                                                                                                         |                                                                       | <input type="checkbox"/>                             |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| (non so)                                                                   | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Copertura staticamente non spingente                                  | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Assenza di aumento del peso a seguito d'interventi di rifacimento     | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Presenza di cordolo in c.a.                                           | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Presenza di cordolo metallico reticolare piano                        | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Presenza di collegamento puntuale delle travi alla muratura           | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato)                | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | Presenza di collegamento tra gli elementi di orditura della copertura | <input type="checkbox"/>                             |
|                                                                            | <input type="checkbox"/>                                                                                                                                                                                                | .....                                                                 | <input type="checkbox"/>                             |
| danno<br>pregresso                                                         | Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse<br>Sconnessioni tra i cordoli e muratura – Movimenti significativi del<br>manto Sconnessioni e movimenti tra gli elementi di orditura principale |                                                                       | <input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> |

Fig. 4.4: Parte della scheda di rilievo della vulnerabilità su un meccanismo

Tab. 4.3: Schema per la valutazione del punteggio di vulnerabilità del singolo macroelemento

| Giudizio dell'efficacia | Numero indicatori di presidio | Punteggio |
|-------------------------|-------------------------------|-----------|
| 3                       | almeno 1                      | 3         |
| 2                       | almeno 2                      |           |
| 2                       | 1                             | 2         |
| 1                       | almeno 3                      |           |
| 1                       | 1 o 2                         | 1         |
| 0                       | -                             | 0         |

Nella prima colonna è riportato il numero minimo di presidi riscontrati per ogni macroelemento, nella seconda colonna il giudizio sull'efficacia, nella terza il punteggio associato per le diverse soglie limite da computare per il calcolo dell'indice di vulnerabilità complessivo. L'indice totale sulla vulnerabilità della fabbrica è la media normalizzata ad 1 calcolata tramite la seguente funzione continua:

$$i_v = 1 - \frac{1}{3} \frac{\sum_{k=1}^{28} c_k v_k}{\sum_{k=1}^{28} c_k} \quad (4.4)$$

dove:  $v_k$  è il punteggio in funzione del criterio riportato in Tabella 4.7 nel k-esimo meccanismo (da 0 a 3) e  $c_k$  rappresenta il peso da attribuire ai quei meccanismi in cui non si è potuto valutare in maniera esaustiva la presenza di presidi antisismici efficaci secondo la seguente relazione:

$$c_k = p_k - m_k + p_{a,k} \leq 3 \quad (4.5)$$

dove:  $p_k$  è il numero di presidi che si sono individuati per il k-esimo meccanismo,  $m_k$  è il numero di presidi per i quali non è stato possibile rilevare l'informazione o formulare un giudizio e  $p_{a,k}$  tiene conto della presenza di ulteriori indicatori che possono essere stati individuati durante il sopralluogo.

Nella terza parte è stato dato spazio a sezioni a campo libero, in modo da inserire quelle informazioni che non sono schematizzabili nelle sezioni precedenti, o che aiutano ad una migliore comprensione della struttura della chiesa (schizzi, disegni, foto). E' stata, inoltre, a tale scopo inserita anche una parte nella quale possono essere inseriti i riferimenti archivistici di rilievi geometrici storici, che possono essere utili nel caso in cui l'oggetto d'indagine necessiti d'approfondimenti attraverso l'applicazione di modelli

meccanici, che hanno bisogno generalmente di un numero d'informazioni difficilmente reperibili durante una campagna di censimento a scala territoriale.

#### 4.3.2.2 *L'utilizzo della scheda in emergenza*

La scheda da utilizzare durante un'emergenza post-sismica mira principalmente al rilievo del danno e allo stesso tempo è del tutto confrontabile con lo strumento proposto per l'analisi preventiva. Pertanto, anche in questa scheda si sono mantenute, le informazioni legate alla vulnerabilità intrinseca del macroelemento, anche se in questo caso esse sono proposte al rilevatore non in forma di presidi, ma come carenze costruttive, analogamente alla versione della scheda del GNDT.

In questa scheda il significato delle informazioni legate alle caratteristiche costruttive del macroelemento deve essere inteso come un giudizio sulle cause del danno, su quel particolare strutturale la cui assenza o inefficacia ha permesso l'attivazione del meccanismo, assumendo pertanto un rilievo legato principalmente alla vulnerabilità constatata a seguito dell'azione sismica, piuttosto che ad un rilievo classico della vulnerabilità.

Anche in questo caso l'estensione a 28 meccanismi in cui il grado di danneggiamento è valutato su 5 differenti livelli di danno permette un maggior dettaglio e consente anche dal punto di vista statistico un controllo maggiore su valutazioni discutibili.

L'indice di danno che ne deriva è rappresentato da una media normalizzata valutata tramite la seguente relazione:

$$i_d = \frac{1}{5N} \sum_{k=1}^{28} d_k \quad (4.6)$$

dove:  $d_k$  è il livello di danno subito nei riguardi del k-esimo meccanismo (da 0 a 5);  $N$  è il numero di meccanismi che si sarebbero potuti attivare nella chiesa ( $N \leq 28$ ).

#### 4.3.3 Il metodo Risk-UE

Dopo i recenti eventi sismici italiani (Umbria e Marche, 1997; Puglia e Molise, 2002) i danni osservati negli edifici monumentali ed in particolare nelle chiese hanno fornito notevoli informazioni la cui elaborazione ha consentito lo sviluppo di interessanti metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali. Tra queste, una delle più recenti metodologie è stata sviluppata nell'ambito del progetto di ricerca europeo Risk-UE denominato "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns". In accordo a tale metodologia, la valutazione della vulnerabilità degli edifici storici e monumentali può essere eseguita con tre distinti livelli di approfondimento.

Livello 1: è un approccio macrosismico, nel quale i dati sono rappresentati da parametri di intensità macrosismica e la vulnerabilità è legata a parametri qualitativi. E' basato su studi tipologici connessi al tipo di monumento a scala territoriale.

Livello 2: è un approccio meccanico, nel quale i dati sono rappresentati dalle coordinate spettrali del terremoto e la vulnerabilità è descritta da una curva di capacità. La curva di capacità fornisce il comportamento strutturale della singola parte della fabbrica considerata (macroelemento) e descrive l'attivazione del corrispondente meccanismo di collasso parziale. Essa è definita da modelli semplificati e da pochi parametri meccanici e geometrici disponibili a scala territoriale.

Livello 3: è un approccio meccanico di vulnerabilità, nel quale le coordinate spettrali del terremoto rappresentano i dati di input e la vulnerabilità è descritta da una curva di capacità derivata da analisi numeriche. Tale livello è caratterizzato da una analisi molto dettagliata e pertanto non utilizzabile di fatto a scala territoriale.

#### 4.3.3.1 *Livello 1: scheda di inventario per la valutazione dell'indice di vulnerabilità*

La metodologia di primo livello si basa su pochi dati, in questo caso l'approccio è necessariamente tipologico. Le strutture sono divise in varie classi in dipendenza delle caratteristiche del materiale costruttivo. La vulnerabilità è connessa principalmente al tipo di monumento (palazzo, chiesa, torre, castello, ecc.) Il metodo si basa quindi sull'attribuzione di un indice di vulnerabilità ( $V_i$ ) definito in funzione della tipologia del monumento (vulnerabilità su base tipologica), e corretto attraverso dei punteggi che sono correlati ad alcuni parametri dipendenti dall'edificio in oggetto quali ad esempio: stato di conservazione, qualità dei materiali, regolarità strutturale, etc. (modificatori di comportamento). Il modello utilizzato è molto semplice, rappresenta uno strumento di immediata applicazione al territorio e permette di determinare gli scenari di danno connessi a ciascuna tipologia di monumento.

Il problema della vulnerabilità sismica delle chiese presenta problematiche differenti rispetto all'edilizia ordinaria, infatti, in questo caso, per definire l'indice di vulnerabilità, si considera la fabbrica costituita da macroelementi: parti della costruzione caratterizzati da un comportamento sismico indipendente e semplicemente associabili ad un elemento architettonico. Infatti, dall'osservazione diretta dei danni prodotti dagli eventi sismici sulle costruzioni storiche e monumentali emerge chiaramente che il danno ed il collasso spesso avvengono localmente, in accordo alla complessità architettonica, alle caratteristiche costruttive (fasi costruttive, trasformazioni) e alla scarsa resistenza a trazione della muratura.

La caratterizzazione del comportamento delle diverse tipologie è stata definita, parzialmente, su base statistica per gli edifici e le chiese; in particolare, per questi si hanno a disposizione numerose statistiche di danni per sottotipi omogenei con i quali è stata definita una Matrice di Probabilità di Danno (DPM). La matrice per un'assegnata tipologia di edifici (classe di vulnerabilità), al variare dell'intensità sismica, fornisce la distribuzione del livello di danno. In tali matrici i livelli di danno rappresentano una interpretazione quantitativa delle conseguenze causate dal terremoto sugli elementi strutturali e non strutturali. In particolare, essi possono assumere i seguenti sei valori: 0, nessun danno; 1, trascurabile o lieve; 2, lieve; 3, medio danno; 4, grave danno; 5, collasso. Attraverso la derivazione del metodo macrosismico, descritto nel capitolo 3 per gli edifici ordinari, sono stati determinati in maniera analoga, anche per gli edifici monumentali, degli indici di vulnerabilità tipologici.

Alle diverse tipologie è stato così attribuito un indice di vulnerabilità intrinseca ed un intervallo entro cui questo valore può variare. In Tabella 4.4 per le diverse tipologie costruttive elencate nella prima colonna è stato riportato il valore dell'indice di vulnerabilità attribuito ( $V_i^*$ ) insieme agli estremi inferiore ( $V_i^-$ ) e superiore ( $V_i^+$ ) dell'intervallo in cui tale indice può variare.

Tab. 4.4: Valori dell'indice di vulnerabilità su base tipologica

| TIPOLOGIA        | Vi-   | Vi*   | Vi+   |
|------------------|-------|-------|-------|
| Palazzi/edifici  | 0,496 | 0,616 | 0,956 |
| Monasteri        | 0,616 | 0,736 | 1,076 |
| Castelli         | 0,356 | 0,456 | 0,766 |
| Chiese           | 0,77  | 0,89  | 1,26  |
| Cappelle/oratori | 0,65  | 0,77  | 1,14  |
| Moschee          | 0,67  | 0,73  | 0,94  |
| Teatri           | 0,616 | 0,736 | 1,086 |
| Torri            | 0,636 | 0,776 | 1,136 |
| Ponti            | 0,216 | 0,296 | 0,566 |
| Mura             | 0,396 | 0,496 | 0,746 |
| Archi trionfali  | 0,376 | 0,456 | 0,706 |
| Obelischi        | 0,396 | 0,456 | 0,746 |
| Statue/fontane   | 0,236 | 0,296 | 0,606 |

Come già accennato in precedenza, tale approccio completa la definizione dell'indice di vulnerabilità assegnato in base alla tipologia della costruzione (indice di vulnerabilità su base tipologica  $V_i^*$ ) prendendo in considerazione alcuni aspetti specifici della costruzione esaminata (modificatori di comportamento) quali le caratteristiche del sito (posizione nel contesto), lo stato di conservazione, la qualità della muratura, etc.. Per alcune tipologie (ad esempio le chiese) è necessario avere anche altre specifiche informazioni (la presenza di torri ad esempio).

Per questo studio è stata redatta una scheda nella quale sono indicati tre tipi di dati. Una prima parte riportata in Tabella 4.5, contiene informazioni generali dell'edificio (nome, periodo, dati relativi a problemi generali di emergenza sismica), necessari ad identificare, localizzare e descrivere l'edificio. Questa parte non contribuisce direttamente alla determinazione dell'indice di vulnerabilità. Nella seconda parte riportata in Tabella 4.6; sono definiti i parametri modificatori di vulnerabilità generali, comuni a tutte le tipologie che si riferiscono essenzialmente allo stato di conservazione, al livello di danno pregresso, alle trasformazioni che l'edificio ha subito, alla qualità della muratura, alla morfologia del sito, alla regolarità della costruzione ed alla sua posizione. Mediante la compilazione della seconda e terza parte della scheda, si definiscono i valori modificatori di vulnerabilità che, insieme al valore dell'indice di vulnerabilità su base tipologica, contribuiscono alla determinazione dell'indice di vulnerabilità totale

Tab. 4.5: Informazioni generali sul monumento

|                                               |                                           |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Nome dell'edificio</b>                     | -                                         |
| <b>Indirizzo</b>                              | -                                         |
| <b>Periodo di costruzione</b>                 | -                                         |
| <b>Periodo prevalente</b>                     | se è il risultato di un restauro          |
| <b>Proprietario</b>                           | pubblico, privato, altro...               |
| <b>Tipo d'uso</b>                             | residenziale, ufficio, libreria,...       |
| <b>Frequenza d'uso</b>                        | giornaliera, settimanale, occasionale,... |
| <b>Affollamento nelle immediate vicinanze</b> | si o no                                   |
| <b>Accessibilità</b>                          | difficile, buona, eccellente,...          |

Tab. 4.6: Parametri generali di vulnerabilità e relativi punteggi modificatori di  $V_I$ 

| <b>Parametri generali</b>             |                               | <b><math>V_I</math></b> |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <b>Stato di conservazione</b>         | pessimo                       | 0,04                    |
|                                       | medio                         | 0                       |
|                                       | buono                         | -0,04                   |
| <b>Livello di danno</b>               | grave                         | 0,04                    |
|                                       | lieve                         | 0,02                    |
|                                       | nessuno                       | 0                       |
| <b>Trasformazioni architettoniche</b> | si                            | 0,02                    |
|                                       | no                            | 0                       |
| <b>Interventi recenti</b>             | si                            | -0,02                   |
|                                       | no                            | 0,02                    |
| <b>Qualità della muratura</b>         | si                            | 0,05                    |
|                                       | no                            | 0                       |
| <b>Morfologia del sito</b>            | tortuoso                      | 0,04                    |
|                                       | inclinato                     | 0,02                    |
|                                       | piatto                        | 0                       |
| <b>Regolarità della pianta</b>        | in dipendenza della tipologia |                         |
| <b>Regolarità della sezione</b>       | in dipendenza della tipologia |                         |
| <b>Posizione</b>                      | in dipendenza della tipologia |                         |

Nella terza parte, specifica per ciascuna tipologia costruttiva, sono riportati i parametri modificatori di vulnerabilità che caratterizzano ciascuna tipologia costruttiva. In particolare, in Tabella 4.7 sono riportati i parametri modificatori caratteristici delle chiese insieme ai punteggi ad essi associati.

Tab. 4.7: Parametri specifici di vulnerabilità delle chiese e punteggi modificatori di  $V_I$ 

| <b>Parametri generali</b>                           |                     | <b><math>V_I</math></b> |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| <b>Regolarità della pianta:</b><br>tipologia navata | centrale            | -0,02                   |
|                                                     | una                 | 0                       |
|                                                     | tre                 | 0,02                    |
| <b>Regolarità della sezione</b>                     | si                  | 0,04                    |
|                                                     | no                  | 0                       |
| <b>Posizione</b>                                    | circostritta        | -0,02                   |
|                                                     | collegata a edifici | 0,02                    |
|                                                     | isolata             | 0                       |
| <b>Cupole/Volte</b>                                 | si                  | 0,04                    |
|                                                     | no                  | 0                       |
| <b>Altezza muri laterali</b>                        | <6m                 | -0,02                   |
|                                                     | 6<x<12m             | 0                       |
|                                                     | >12m                | 0,02                    |

#### 4.3.3.2 Livello 2: determinazione della curva di capacità attraverso modelli meccanici semplificati

Allo scopo di sviluppare una metodologia di secondo livello per le chiese, è stato necessario semplificare i classici metodi di analisi strutturale, infatti, tale approccio è generalmente applicato a scala territoriale. Nel caso delle chiese non è concettualmente corretto utilizzare una curva di capacità che rappresenti il comportamento globale della struttura, ma la curva deve essere definita per ogni singolo macroelemento. Il motivo per il quale non è corretto definire un'unica curva di capacità che descrive il comportamento globale dell'edificio monumentale deriva dal fatto che il danno ed il collasso nelle chiese spesso avvengono localmente, in accordo alla complessità architettonica, alle caratteristiche costruttive (fasi costruttive, trasformazioni), alla poca resistenza a trazione della muratura. Questo approccio consente di stimare con pochi

parametri tipologici e geometrici, una curva di capacità del macroelemento, stimando anche l'efficacia di alcuni presidi antisismici (le catene, ammorsamenti, etc.).

La vulnerabilità sismica è valutata attraverso il metodo dello spettro di capacità (Freeman, 1998); lo scenario di danno è definito dall'intersezione tra la curva di capacità e lo spettro di risposta che è rappresentativo del terremoto scelto.

Il metodo di analisi usato per definire la curva di capacità è basato sull'analisi dell'equilibrio limite. L'analisi limite rappresenta un metodo semplificato per valutare il moltiplicatore delle forze agenti che attiva il cinematismo strutturale (meccanismo di collasso). In questa analisi, la struttura in muratura è considerata come un insieme di corpi rigidi, tenuti insieme da forze di compressione e soggetti alla rottura appena cominciano a svilupparsi tensioni di trazione. Quest'approccio è basato sull'osservazione del reale comportamento delle strutture in muratura. Infatti esse sono caratterizzate generalmente da una irrilevante deformazione elastica delle singole parti, parti che sono soggette a spostamenti e rotazioni praticamente rigide a seguito dell'attivazione del meccanismo.

Le ipotesi formulate alla base dell'analisi limite di tali strutture sono: assenza di rottura per scorrimento; muratura infinitamente resistente a compressione; muratura non resistente a trazione.

Lo strumento utilizzato per tale analisi è il teorema cinematico del collasso plastico. L'applicazione di tale teorema avviene, prima di tutto, ipotizzando un certo numero ( $n$ ) di possibili meccanismi di collasso cinematicamente ammissibili (rispettosi della congruenza). In particolare, in accordo alle ipotesi descritte in precedenza, i meccanismi di collasso considerati sono rappresentati da catene cinematiche, pertanto i moltiplicatori cinematicamente ammissibili ( $\lambda_i$ ) (moltiplicatori dei carichi per i cinematismi ipotizzati) ad essi associati sono facilmente ottenibili applicando il principio dei lavori virtuali per i corpi rigidi. In accordo al teorema cinematico, il moltiplicatore di collasso  $\lambda$  sarà il minimo moltiplicatore cinematicamente ammissibile ( $\lambda = \min\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ ).

#### 4.3.3.3 Livello 3: determinazione della curva di capacità attraverso modelli meccanici dettagliati

La metodologia di terzo livello prevede che la vulnerabilità sia studiata attraverso il metodo dello spettro di capacità. La definizione della curva di capacità rappresentativa del singolo monumento è necessaria e, considerando il livello di dettaglio in questa metodologia, lo studio non può riferirsi alla scala territoriale. In un'area geografica con comportamenti costruttivi omogenei, è però possibile analizzare in maniera dettagliata un singolo monumento come prototipo di una tipologia con la possibilità di estendere i risultati ottenuti all'intera zona oggetto di studio.

Anche in questo caso, la curva di capacità va definita per ogni macroelemento identificato nella fabbrica (o per quelli che sembrano essere i più vulnerabili attraverso un giudizio basato sull'esperienza). Al fine di definire la curva di capacità si può utilizzare il metodo agli elementi finiti o un'altra metodologia di analisi strutturale sviluppata specificamente per ciascuna tipologia monumentale.

Nell'analisi agli elementi finiti la struttura può essere modellata attraverso elementi con comportamento non lineare che prende in considerazione la limitata resistenza a trazione del materiale ed il progressivo degrado delle proprietà meccaniche. Possono

essere considerati diversi tipi di collasso (scorrimento, schiacciamento, rottura per taglio, ecc...). Per ottenere una simulazione del comportamento della struttura sotto azioni sismiche si procede solitamente ad analisi statiche incremental non-lineari, dove oltre a considerare le non linearità meccaniche (legame costitutivo del materiale non lineare) si considerano anche non linearità geometriche ovvero grandi spostamenti e grandi deformazioni.

Uno svantaggio di questo tipo di analisi è la difficoltà di determinare una soluzione convergente soprattutto nei casi in cui si vuole descrivere il comportamento per spostamenti maggiori di quello corrispondente alla massima capacità portante.

Usando modelli agli elementi finiti è possibile definire gli stati limite di danno in maniera non arbitraria sulla curva di capacità (ad esempio come frazione dello spostamento ultimo), ma associandoli a particolari transizioni di fase nel comportamento strutturale (ad esempio l'attingimento della massima resistenza a trazione o a compressione in alcune zone della muratura).

## Capitolo 5

# VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA ATTRAVERSO I MODELLI DI CAPACITÀ, DOMANDA E FRAGILITÀ

### 5.1 INTRODUZIONE

Nel seguente capitolo vengono illustrate le procedure analitiche per la valutazione del danno e quindi delle prestazioni degli edifici esistenti. Il comportamento dinamico di una struttura in campo non lineare può essere modellato al meglio utilizzando un'analisi non lineare dinamica nel dominio del tempo (time history analysis). Questo approccio però risulta oneroso e spesso impraticabile. Sono stati quindi proposti, e vengono continuamente perfezionati, metodi semplificati costituiti da procedure statiche non lineari, che, con il rispetto di particolari condizioni, riescono a simulare, con buona approssimazione, il comportamento di una struttura.

Le analisi lineari, in particolare quelle dinamiche, forniscono utili indicazioni sul comportamento elastico di una struttura e indicano quali siano i componenti che per primi entrano in campo plastico. Esse, però, non consentono di individuare i successivi meccanismi di collasso e la relativa redistribuzione delle forze; la loro utilizzazione per l'analisi delle prestazioni sotto sisma è quindi soggetta a restrizioni.

I metodi statici equivalenti per la valutazione della risposta strutturale sono delle procedure non lineari semplificate, in cui il problema della determinazione della massima risposta attesa a fronte di un certo evento sismico viene ricondotto a quello relativo ad un oscillatore semplice reso "equivalente" al sistema a più gradi di libertà rappresentativo della struttura reale.

Il comune fondamento di queste procedure risiede nell'impiego dell'analisi di spinta per caratterizzare il sistema strutturale e, poi, nella possibilità di considerare la risposta direttamente in termini di spostamento, attraverso l'approccio della struttura sostitutiva di Shibata e Sozen (1976), in cui il periodo della struttura non è più basato sulla rigidezza elastica iniziale  $K_e$ , come nelle procedure basate sulle forze, ma sulla rigidezza effettiva  $K_{eff}$  che corrisponde allo spostamento massimo.

Gli elementi chiave di un'analisi non lineare sono: capacità, domanda, prestazione. La domanda è una rappresentazione degli spostamenti e deformazioni richieste al moto sismico del terreno alla struttura. La capacità è l'abilità della struttura di resistere alla domanda sismica. La prestazione rappresenta la misura in cui la capacità assorbe la domanda; la struttura deve avere la capacità di resistere alla domanda sismica in modo che la prestazione sia compatibile con gli obiettivi di progetto.

In questo capitolo verranno esaminati, in particolare, i principali metodi di analisi non lineare come il metodo proposto nel Risk-UE, quello proposto nell'ATC40 (ATC40, 1996) ed il metodo degli spettri non lineari proposto dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274 (OPCM n.3274 del 20/03/2003 aggiornata al 15/01/2005).



## 5.2 VALUTAZIONE DEL DANNO

La valutazione del danno per un edificio o per un gruppo di edifici è la stima delle perdite basate sulla valutazione della vulnerabilità (danneggiabilità) caratteristica dell'edificio per un prefissato livello di danno. La probabilità condizionata che l'edificio giunga ad un certo stato di danno può essere determinata come segue:

- si sceglie il modello di edificio dalla “Building Typology Matrix” (BTM) che rappresenti la struttura considerata;
- si definisce il modello di capacità e lo si converte in spettro di capacità;
- si determina lo spettro di domanda;
- si calcola la risposta attesa dalla costruzione dall'intersezione dello spettro di capacità e lo spettro di domanda (punto di performance);
- dal modello di fragilità si stima la probabilità condizionata che per un determinato punto di performance l'edificio presenterà un certo stato di danno.

Definita quindi la classe di appartenenza all'interno della Building Typology Matrix (BTM) dell'edificio da esaminare, note le caratteristiche dinamiche, geometriche e strutturali dell'edificio, nell'ipotesi che sia possibile tracciare lo spettro di capacità e quello di domanda opportunamente ridotto per tenere conto del comportamento non lineare della struttura (nello stesso formato AD “acceleration-displacement”) si determina il punto di funzionamento della struttura ovvero il *point performance* che rappresenta la condizione per cui la capacità sismica di una struttura è pari alla domanda sismica imposta. Questo punto ci fornisce lo spostamento spettrale che definisce la soglia di danno per il livello di collasso per un determinato terremoto. Avendo a disposizione la curva di fragilità (o funzione di danno) dell'edificio è possibile definire la probabilità che si riscontri un certo danno  $d_s$  (“slight”, “moderate”, “extensive”, “complete”) a seguito del realizzarsi dello spostamento spettrale  $S_d$  prima determinato.

In Fig. 5.1 è riportato il diagramma di flusso che sintetizza i passi da eseguire per la valutazione del danno.

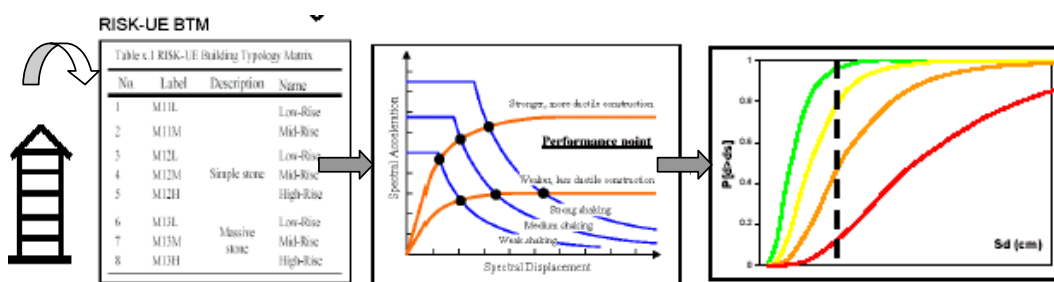


Fig.5.1: Diagramma di flusso per la valutazione del danno

Ognuno di questi passi contiene delle problematiche come la determinazione della curva di capacità e la sua conversione in spettro di capacità o la determinazione dello spettro di domanda elastico e del corrispondente spettro anelastico. Alcune di queste problematiche verranno affrontate di seguito, altre saranno soltanto enunciate, non avendo possibilità di risoluzione, una di queste è l'affidabilità della funzione di danno; in realtà questa funzione presenta delle variabilità che derivano dalle incertezze sulla capacità e sulla richiesta. Infatti, le curve di capacità sono definite dalla *stima* dei parametri che influenzano la progettazione come il periodo fondamentale di

oscillazione, la sovra-resistenza e la duttilità. Alcuni di questi parametri si ricavano dai codici, una volta definito il livello di riferimento per la progettazione, altri si considerano indipendenti e assegnati a priori in base alla tipologia strutturale.

### 5.2.1 Modello di capacità

La capacità globale di una struttura dipende dalla resistenza e dalla capacità di deformazione dei singoli componenti della struttura. Allo scopo di determinare il comportamento strutturale oltre il limite elastico, si utilizzano delle tecniche di analisi non lineare come quella denominata pushover o “analisi non lineare incrementale di spinta”.

Il concetto alla base di tale analisi è che la capacità complessiva della struttura di sostenere le azioni sismiche può essere descritta dal comportamento di forze statiche equivalenti incrementate fino a raggiungere il collasso, inteso come incapacità di continuare a sostenere carichi verticali.

Il sistema di forze in questione deve simulare in modo quanto più realistico possibile gli effetti di inerzia prodotti dal sisma nel piano orizzontale; essi a loro volta dipendono dalla risposta della struttura, per cui il sistema di forze andrebbe cambiato durante l'analisi (*pushover adattivo*).

Attualmente, per non complicare oltre misura il procedimento, la distribuzione di forze è assunta fissa durante l'analisi. In genere essa è costruita in modo da rappresentare la distribuzione di forze di inerzia derivante dal modo fondamentale di vibrazione (primo modo), assumendo che esso sia predominante. Questa assunzione è generalmente ben approssimata per edifici con periodi fondamentali fino ad un secondo, mentre per strutture più flessibili, occorre considerare anche i modi di vibrazione superiori. Inoltre, qualora nel corso dell'analisi si dovessero verificare meccanismi di danneggiamento molto localizzati può essere opportuno adottare distribuzioni congruenti con essi: ad esempio l'innescio di un “piano debole” al livello più basso di un edificio può portare a considerare una distribuzione uniforme sull'altezza.

La procedura in linea di principio richiederebbe l'uso di un codice di calcolo non lineare, ma può anche essere approssimata da una serie di analisi elastiche sequenziali sovrapposte ed è proprio questo metodo che è suggerito, con diverse varianti, nell'ATC 40 e nelle FEMA 273, per consentire una maggiore spedività ed anche per ridurre i possibili scarti nei risultati. In questo caso il modello matematico della struttura (più precisamente la matrice di rigidezza), viene continuamente aggiornato, per tener conto della riduzione di rigidezza degli elementi che entrano in campo plastico.

La capacità di una struttura è pertanto rappresentata mediante una curva che ha come grandezze di riferimento il taglio alla base ( $V$ ) normalizzato rispetto alla massa dell'edificio ( $M$ ) e lo spostamento in copertura dell'edificio ( $\Delta R$ ). La curva di capacità rappresenta la risposta laterale della struttura sotto una certa forma di carico, essa è definita da due punti caratteristici:

YC ( $V_y, \Delta y$ ) capacità al limite di snervamento: rappresenta il punto per il quale la struttura inizia ad esibire una risposta non lineare.

$$V_y = \gamma * C_s \quad (5.1)$$

dove

- $\gamma$  coefficiente di sovraresistenza della condizione di snervamento rispetto alla condizione di progetto  $\gamma = \frac{V_y}{V_d}$
- $C_s$  coefficiente di intensità sismica  $C_s = \frac{V_d}{mg}$

UC ( $V_u$ ,  $\Delta u$ ) capacità ultima: rappresenta il punto per il quale la struttura esibisce la massima resistenza

$$\Delta y = \frac{V_y}{4\pi^2} T^2 \quad (5.2)$$

dove

- $\lambda$  coefficiente di sovraresistenza della condizione ultima rispetto allo snervamento  $\lambda = \frac{V_u}{V_y}$
- $\mu$  fattore di duttilità  $\mu = \frac{\Delta u}{\Delta_0}$

La curva di capacità può essere ottenuta, come detto, con una analisi statica non lineare. Questo metodo è basato su un approccio incrementale che simula la spinta di forze statiche orizzontali applicate staticamente. Per la costruzione della curva di capacità si eseguono i seguenti passi:

1. scelta della forma di carico da applicare. Si suggerisce di applicare, per semplicità, un sistema di forze orizzontali tali da essere proporzionali al prodotto delle masse di piano e dei coefficienti modali relativi al primo modo di vibrare;
2. amplificazione dei carichi orizzontali per un moltiplicatore tale da ottenere una risposta elastica lineare (la somma dei carichi rappresenta il taglio alla base);
3. risoluzione della struttura attraverso la determinazione degli spostamenti e delle sollecitazioni incluso lo spostamento in copertura (in questa fase nessun elemento si plasticizza);
4. amplificazione dei carichi fino ad ottenere la plasticizzazione di almeno un elemento;
5. risoluzione della struttura;
6. aggiornamento della matrice delle rigidezze assegnando rigidezza ridotta all'elemento che è entrato in campo plastico;
7. ripetizione dei passi 4, 5 e 6.

Si costruiscono in questo modo curve come quella riportata in Figura 5.2.

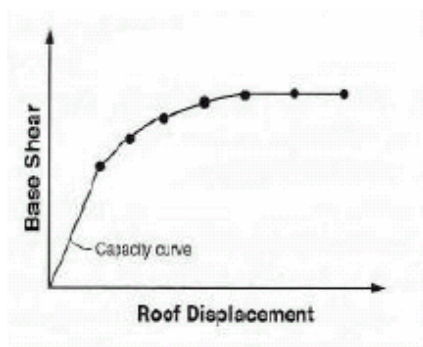


Fig.5.2: Richiesta e capacità nel metodo

Per definire la perdita globale di resistenza della struttura, è necessario ridurre o eliminare la rigidità degli elementi che hanno raggiunto uno stato limite. Va dunque ripetuto l'intero processo a partire dal passo 1, costruendo così nuove curve di capacità (Fig.5.3).

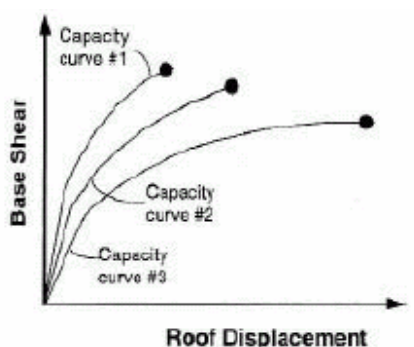


Fig.5.3: Curve di capacità con progressiva perdita di resistenza della struttura

La curva di capacità finale, che tiene conto delle progressive perdite di resistenza della struttura, raccorda superiormente le varie curve con dei tratti verticali, in corrispondenza dei vari stati limite assumendo la caratteristica forma a denti di sega (sawtooth curve) riportata in Fig.5.4.

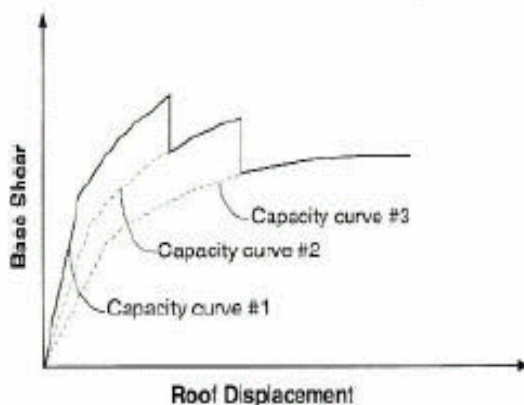


Fig.5.4: Curva di capacità finale

Come anticipato, le curve di capacità sono definite dalla stima dei parametri che influenzano la progettazione come il periodo fondamentale di oscillazione, la sovra-

resistenza e la duttilità. Alcuni di questi parametri si ricavano dai codici, una volta definito il livello di riferimento per la progettazione, altri si considerano indipendenti e assegnati a priori in base alla tipologia strutturale. Queste stime danno origine a notevoli incertezze sull'affidabilità del modello di capacità così determinato.

Per confrontare lo spettro di domanda con la “capacità” della struttura, bisogna convertire il taglio alla base ( $V$ ) in accelerazione spettrale ( $S_{ae}$ ) e lo spostamento il copertura ( $\Delta R$ ) in spostamento spettrale ( $S_d$ ). Il modello di capacità così presentato è chiamato “Spettro di capacità”. (Freeman, 1975-1998).

### 5.2.2 Modello di domanda

Lo spettro di domanda elastico è utilizzato per caratterizzare la richiesta sismica. Esso permette di sintetizzare la risposta di tutti i possibili sistemi lineari ad un grado di libertà (SDOF) per un particolare terremoto. Generalmente tale spettro è ottenuto per un fattore di smorzamento del 5% rappresentativo della maggior parte delle strutture ( $\nu=0.05$ ). Tale curva ha come grandezze di riferimento il periodo ( $T$ ) e la pseudo-accelerazione spettrale elastica ( $S_{ae}$ ).

Per la costruzione dello spettro di domanda si eseguono i seguenti passi:

- si determina lo spettro di domanda elastico per un sito specifico per un fattore di smorzamento del 5% (per edifici che hanno smorzamento diverso dal 5% o si fa un nuovo spettro elastico calcolato considerando un'appropriato rapporto di smorzamento o si modifica lo spettro di domanda al 5% di smorzamento);
- si converte lo spettro di domanda elastico in formato AD che riporta in ascisse lo spostamento spettrale ( $S_d$ ) ed in ordinate la pseudo-accelerazione spettrale elastica ( $S_{ae}$ );
- a partire dallo spettro di domanda elastico in formato AD si ottiene lo spettro di domanda anelastico per tener conto della non linearità della risposta strutturale.

Per definire la richiesta elastica possono essere utilizzati diversi spettri aventi forma diversa. Lo spettro più usato è quello di Newmark-Hall, questo individua tre regioni, una ad accelerazione costante ( $T_B \leq T \leq T_C$ ), una a velocità costante ( $T_C \leq T \leq T_D$ ) ed una a spostamento costante ( $T \geq T_D$ ).

## 5.3 METODOLOGIA ADOTTATA NEL RISK-UE

Nel progetto del Risk-UE sono stati proposti, dai gruppi di lavoro, diversi metodi per lo sviluppo di modelli di capacità e fragilità da utilizzare nell'elaborazione di scenari di rischio e per la stima delle perdite attese.

Questi metodi utilizzano diversi approcci analitici (analytical approaches) ed analizzano diversi tipi di edifici. In aggiunta a questi metodi c'è il “code based approach” che considera i parametri di progetto riportati nelle diverse norme sismiche europee come dati sperimentali disponibili. In seguito si forniranno le linee guida per la comprensione dei due diversi approcci con i risultati forniti dai partners del progetto per la definizione delle curve di capacità e di fragilità per le diverse tipologie costruttive definite nella BTM.

### 5.3.1 Modello di capacità

Il modello di capacità di un edificio è una curva di capacità idealizzata definita da due punti caratteristici: *YC* capacità al limite di snervamento e *UC* capacità ultima. Tali punti sono definiti dalle coordinate definite nel paragrafo 5.2.1. Per la conversione della curva di capacità, rappresentata in termini di taglio e spostamento ( $V-\Delta R$ ), nello spettro di capacità ossia nel formato ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra), accelerazione-spostamento spettrale ( $S_a-S_d$ ), occorre conoscere le caratteristiche dinamiche:  $T$  periodo,  $\Phi_i$  forma modale,  $m_i$  massa. I punti caratteristici dello spettro avranno coordinate:

YC ( $S_{ay}, S_{dy}$ )

$$S_{ay} = \frac{C_s * \gamma}{\alpha_1} = \frac{V_y}{\alpha_1} \quad (5.3)$$

$$S_{dy} = \frac{S_{ay}}{4\pi^2} T^2 \quad (5.4)$$

UC ( $S_{au}, S_{du}$ )

$$S_{au} = \lambda * S_{ay} = \frac{\lambda * V_y}{\alpha_1} = \frac{V_y}{\alpha_1} \quad (5.5)$$

$$S_{du} = \lambda * \mu * S_{ay} = \lambda * \mu * S_{ay} * \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (5.6)$$

Per la conversione quindi, è necessario ricondurre il comportamento della struttura a quello di un sistema ad un grado di libertà. Allo scopo si utilizza una distribuzione di spostamenti orizzontali sull'altezza: in genere si usa il modo di vibrazione fondamentale, ma si possono usare anche altre forme. Nella maggior parte delle strutture il comportamento dinamico è ben descritto considerando il solo primo modo di vibrare.

Per garantire l'uguaglianza fra l'energia cinetica della struttura e quella del sistema equivalente ad un grado di libertà si sfruttano il fattore di partecipazione  $PF_i$  e la percentuale di massa partecipante  $\alpha_i$  relativi al primo modo:

$$\alpha_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \sum_{i=1}^N (m_i \Phi_{i1}^2)} \quad (5.7)$$

$$PF_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)}{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1}^2} \quad (5.8)$$

dove  $m_i$  è la massa del piano  $i$ -esimo,  $\Phi_i$  è l'ampiezza del primo modo in corrispondenza dell' $i$ -esimo piano ed  $N$  è il numero totale di piani.

Ciascun punto della curva di capacità nel piano ( $V, \Delta R$ ) è associato al corrispondente punto sullo spettro di capacità mediante le seguenti relazioni:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (5.9)$$

$$S_d = \frac{\Delta R}{PF_1 * \Phi_{copertura,1}} \quad (5.10)$$

dove  $V$  è il taglio alla base,  $W$  il peso dell'edificio e  $\Delta R$  lo spostamento in copertura.

Per ogni classe di edificio della BTM i partners del progetto Risk-UE hanno ricavato i punti caratteristici della curva di capacità nel formato AD (Acceleration-Displacement) ovvero dello spettro di capacità  $YC(S_{ay}, S_{dy})$ ;  $UC(S_{au}, S_{du})$ . Tali punti sono riportati nelle Tabelle 5.1a, 5.1b, 5.1c e 5.1d.

La funzione di fragilità (o funzioni di danno) che esprime la probabilità che si riscontri un certo danno  $ds$  a seguito del realizzarsi dello spostamento spettrale  $S_d$  è la seguente:

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left[ \frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right] \right] \quad (5.11)$$

dove:

- $\beta_{ds}$  è la deviazione standard del logaritmo naturale dello spostamento spettrale dello stato di danno  $ds$ ;
- $\bar{S}_{d,ds}$  è la mediana dello spostamento spettrale al quale l'edificio giunge ad una certa soglia dello stato di danno  $ds$ ;
- $\Phi$  è la funzione di distribuzione cumulata normale standard.

Tab.5.1a: Punti caratteristici dello spettro di capacità definiti mediante l'approccio analitico (Pre Code).

| BTM   | Institution | Yield point |        | Ultimate point |        |
|-------|-------------|-------------|--------|----------------|--------|
|       |             | Dy (cm)     | Ay (g) | Du (cm)        | Au (g) |
| M1.1L | UNIGE       | 0.38        | 0.173  | 1.93           | 0.173  |
| M1.1M | UNIGE       | 0.47        | 0.115  | 2.03           | 0.115  |
| M1.1H | UNIGE       | 0.66        | 0.058  | 2.28           | 0.058  |
| M1.2L | AUTH        | 0.352       | 0.18   | 1.433          | 0.2    |
|       | UNIGE       | 0.15        | 0.15   | 1.55           | 0.15   |
| M1.2M | UNIGE       | 0.31        | 0.12   | 1.69           | 0.132  |
| M1.2H | UNIGE       | 0.48        | 0.10   | 1.85           | 0.12   |
| M3.3M | CIMNE       | 0.63        | 0.133  | 2.91           | 0.117  |
| M3.3H | CIMNE       | 0.68        | 0.105  | 2.61           | 0.079  |
| M3.4L | UNIGE       | 0.53        | 0.297  | 3.18           | 0.297  |
| M3.4M | UNIGE       | 0.75        | 0.149  | 3.47           | 0.149  |
| M3.4H | UNIGE       | 0.92        | 0.099  | 3.67           | 0.099  |
| RC1L  | UNIGE       | 0.77        | 0.187  | 4.47           | 0.187  |
| RC1M  | UNIGE       | 2.21        | 0.156  | 8.79           | 0.156  |
| RC1H  | UNIGE       | 3.86        | 0.073  | 11.48          | 0.073  |

Tab.5.1b: Punti caratteristici dello spettro di capacità definiti mediante l'approccio analitico (Low Code).

| BTM    | Institution   | Yield point |        | Ultimate point |        |
|--------|---------------|-------------|--------|----------------|--------|
|        |               | Dy (cm)     | Ay (g) | Du (cm)        | Au (g) |
| RC1L   | AUTH          | 2.32        | 0.192  | 9.58           | 0.209  |
| RC1M   | AUTH          | 4.27        | 0.17   | 10.77          | 0.175  |
| RC1H   | AUTH          | 5.76        | 0.124  | 14.83          | 0.144  |
|        | UTCB          | 10.3        | 0.068  | 99.0           | 0.070  |
| RC2L   | AUTH (RC4.1L) | 1.08        | 0.385  | 5.05           | 0.466  |
| RC2M   | AUTH (RC4.1M) | 1.46        | 0.182  | 8.25           | 0.253  |
| RC2H   | AUTH (RC4.1H) | 3.86        | 0.204  | 15.6           | 0.26   |
|        | UTCB          | 1.3         | 0.215  | 7.4            | 0.302  |
| RC3.1L | AUTH          | 0.44        | 1.541  | 1.87           | 2.233  |
| RC3.1M | AUTH          | 0.85        | 0.808  | 2.63           | 1.131  |
| RC3.1H | AUTH          | 2.14        | 0.455  | 5.98           | 0.631  |
| RC3.2L | AUTH          | 1.63        | 0.182  | 6.37           | 0.193  |
| RC3.2M | AUTH          | 1.9         | 0.198  | 7.87           | 0.2    |
| RC3.2H | AUTH          | 2.26        | 0.253  | 7.8            | 0.272  |
| RC4L   | AUTH (RC4.2L) | 0.32        | 0.584  | 2.48           | 0.877  |
| RC4M   | AUTH (RC4.2M) | 0.82        | 0.331  | 4.87           | 0.451  |
| RC4H   | AUTH (RC4.2H) | 2.81        | 0.361  | 9.88           | 0.411  |
|        | AUTH (RC4.3L) | 0.39        | 0.472  | 3.23           | 0.623  |
|        | AUTH (RC4.3M) | 0.89        | 0.296  | 4.8            | 0.374  |
|        | AUTH (RC4.3H) | 2.50        | 0.309  | 8.12           | 0.37   |

Tab.5.1c: Punti caratteristici dello spettro di capacità definiti mediante l'approccio analitico (Moderate Code).

| BTM  | Institution | Yield point |        | Ultimate point |        |
|------|-------------|-------------|--------|----------------|--------|
|      |             | Dy (cm)     | Ay (g) | Du (cm)        | Au (g) |
| RC1L | UNIGE       | 1.52        | 0.375  | 8.94           | 0.375  |
| RC1M | CIMNE       | 1.418       | 0.083  | 5.107          | 0.117  |
|      | UNIGE       | 4.42        | 0.312  | 17.55          | 0.312  |
| RC1H | CIMNE       | 1.894       | 0.059  | 4.675          | 0.079  |
|      | UNIGE       | 7.70        | 0.147  | 22.99          | 0.147  |
|      | UTCB        | 6.2         | 0.138  | 89.0           | 0.20   |
| RC2M | UTCB        | 1.8         | 0.32   | 6.0            | 0.34   |

Tab.5.1d: Punti caratteristici dello spettro di capacità definiti mediante l'approccio analitico (High Code).

| BTM  | Institution   | Yield point |        | Ultimate point |        |
|------|---------------|-------------|--------|----------------|--------|
|      |               | Dy (cm)     | Ay (g) | Du (cm)        | Au (g) |
| RC1M | IZIIS         | 2.283       | 0.187  | 15.52          | 0.318  |
| RC2M | AUTH (RC4.1M) | 1.90        | 0.277  | 8.88           | 0.316  |
| RC4M | IZIIS         | 0.883       | 0.274  | 7.23           | 0.56   |
| RC4H | IZIIS         | 4.59        | 0.239  | 16.26          | 0.435  |

Nell'ambito del progetto Risk-UE sono stati sviluppati analiticamente i parametri del modello di fragilità ( $\bar{S}_{d,ds}, \beta_{ds}$ ) per le classi di edifici costituenti la BTM in cui è stato rappresentato il costruito prevalente europeo.

Le classi di edifici della BTM sono definite in base alla tipologia strutturale (materiali, sistema resistente, ecc.); in particolare si fa riferimento a 23 categorie tipologiche della, suddivise ulteriormente in base all'altezza ed in funzione dei codici sismici in cui sono



state presumibilmente progettate. In questo ambito esistono 4 classi (High-Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code) che esprimono la qualità della struttura in relazione alla performance sismica necessaria.

Tab.5.2: Descrizione degli stati di danno

| <i>Grado di danno</i> | <i>Etichetta del livello di danno</i> | <i>Descrizione</i>                                        |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 0                     | None                                  | Nessun danno                                              |
| 1                     | Slight                                | Danno da trascurabile a leggero                           |
| 2                     | Moderate                              | Danno strutturale leggero, danno non strutturale moderato |
| 3                     | Extensive                             | Danno strutturale moderato, danno non strutturale grave   |
| 4                     | Complete                              | Grave danno strutturale, totale o parziale collasso       |

A ciascuna area geografica si associa un livello di progettazione secondo il criterio per cui nelle zone a più alta sismicità c'è l'applicazione dei codici più avanzati per la progettazione sismica per quelle strutture di più recente costruzione, in generale, più si va indietro nel tempo più la qualità della progettazione scende.

Pre-Code sono tutti quegli edifici progettati in assenza di norme sismiche, Low-Code sono invece quegli edifici progettati con unico e arbitrario taglio alla base e coefficiente sismico senza appropriate regole e dettagli strutturali. Per Moderate-Code si intendono quegli edifici che non rientrano nella categoria dei Low-Code o High-Code, mentre questi ultimi hanno un livello di progettazione sismica confrontabile con quello definito nell'Eurocodice 8. (WP1-Risk-UE)

Definita quindi la classe di appartenenza dell'edificio esaminato, determinato il tipo di codice normativo utilizzato nella progettazione (High-Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code) sono noti i parametri del modello di fragilità ( $\bar{S}_{d,ds}, \beta_{dk}$ ) ed è così possibile tracciare la curva di fragilità mediante la (5.11) per tutti e quattro gli stati di danno ("slight", "moderate", "extensive", "complete").

I parametri del modello ottenuti mediante l'approccio analitico per i diversi codici normativi (Pre-Code, Low-Code, Moderate-Code, High-Code) ed i quattro stati di danno (slight, moderate, extensive, complete) sono riportati in Tabella 5.3.

Tab.5.3: Parametri delle curve di fragilità ottenute mediante l'approccio analitico per i diversi codici normativi (Pre-Code, Low-Code, Moderate-Code, High-Code) ed i quattro stati di danno (slight, moderate, extensive, complete)

Parameters of the fragility curves for Pre Code masonry buildings

| Bldg. Properties |         |            |       | Interstory drift at threshold of damage state |          |           |          | Spectral Displacements (cm) |      |          |      |           |      |          |      |      |  |
|------------------|---------|------------|-------|-----------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|------|--|
| BTM              | Partner | Height (m) |       |                                               |          |           |          | Slight                      |      | Moderate |      | Extensive |      | Complete |      |      |  |
|                  |         | Roof       | Modal | Slight                                        | Moderate | Extensive | Complete | Median                      | Beta | Median   | Beta | Median    | Beta | Median   | Beta |      |  |
|                  |         | M1.2L      | 4     |                                               |          |           |          |                             |      | 0.15     |      | 0.36      |      | 0.71     |      | 1.55 |  |
|                  |         | M1.2M      | 4     |                                               |          |           |          |                             |      | 0.31     |      | 0.51      |      | 0.86     |      | 1.69 |  |
|                  |         | M1.2H      | 4     |                                               |          |           |          |                             |      | 0.48     |      | 0.69      |      | 1.03     |      | 1.85 |  |
| M3.3M            | 2       | 17.0       |       |                                               |          |           |          |                             | 0.44 | 0.40     | 0.63 | 0.50      | 1.20 | 0.75     | 2.91 | 0.70 |  |
| M3.3H            | 2       | 24.0       |       |                                               |          |           |          |                             | 0.46 | 0.30     | 0.68 | 0.65      | 1.68 | 0.65     | 2.61 | 0.65 |  |

Parameters of the fragility curves for Low Code masonry and RC buildings

| Bldg. Properties |         |            |       | Interstory drift at threshold of damage state |      |        |      | Spectral Displacements (cm) |       |          |       |           |       |          |       |
|------------------|---------|------------|-------|-----------------------------------------------|------|--------|------|-----------------------------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|-------|
| BTM              | Partner | Height (m) |       |                                               |      |        |      | Slight                      |       | Moderate |       | Extensive |       | Complete |       |
|                  |         | Roof       | Modal | Median                                        | Beta | Median | Beta | Median                      | Beta  | Median   | Beta  |           |       |          |       |
|                  |         |            |       |                                               |      |        |      |                             |       |          |       |           |       |          |       |
| M1.2 1           | 1       |            |       |                                               |      |        |      | 0.145                       | 0.437 | 0.335    | 0.656 | 0.447     | 0.564 | 0.64     | 0.385 |
| M1.2 2           | 1       |            |       |                                               |      |        |      | 1.518                       | 0.8   | 2.466    | 0.9   | 3.134     | 0.7   | 3.587    | 0.6   |
| M3.4 1           | 1       |            |       |                                               |      |        |      | 0.289                       | 0.85  | 0.374    | 0.8   | 0.468     | 0.7   | 0.553    | 0.65  |
| M3.4 2           | 1       |            |       |                                               |      |        |      | 1.686                       | 0.5   | 2.059    | 0.5   | 2.513     | 0.5   | 4.090    | 0.65  |
| RC1H             | 5       | 37.97      | 27.94 | 0.00                                          | 0.01 | 0.01   | 0.02 | 7.82                        | 0.65  | 17.88    | 0.75  | 27.94     | 0.85  | 68.16    | 0.95  |
| RC2H             | 5       | 31.00      | 21.99 | 0.02                                          | 0.06 | 0.09   | 0.24 | 0.52                        | 0.65  | 1.30     | 0.75  | 2.09      | 0.85  | 5.22     | 0.95  |

Parameters of the fragility curves for Moderate Code masonry and RC buildings

| Bldg. Properties |         |            |       | Interstory drift at threshold of damage state |          |           |          | Spectral Displacements (cm) |      |          |      |           |      |          |      |
|------------------|---------|------------|-------|-----------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|
| BTM              | Partner | Height (m) |       |                                               |          |           |          | Slight                      |      | Moderate |      | Extensive |      | Complete |      |
|                  |         | Roof       | Modal | Slight                                        | Moderate | Extensive | Complete | Median                      | Beta | Median   | Beta | Median    | Beta | Median   | Beta |
|                  |         |            |       |                                               |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
|                  |         |            |       |                                               |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
|                  |         |            |       |                                               |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
| RC1M             | 2       | 15.8       |       |                                               |          |           |          | 0.99                        | 0.28 | 1.42     | 0.36 | 2.34      | 0.50 | 5.11     | 0.61 |
| RC1H             | 2       | 24.0       |       |                                               |          |           |          | 1.33                        | 0.28 | 1.89     | 0.29 | 2.59      | 0.34 | 4.68     | 0.45 |
| RC1H             | 5       | 30.8       | 24.8  | 0.00                                          | 0.01     | 0.01      | 0.03     | 11.67                       | 0.65 | 21.61    | 0.75 | 31.79     | 0.85 | 72.03    | 0.95 |
| RC2M             | 5       | 22.0       | 16.2  | 0.00                                          | 0.00     | 0.00      | 0.00     | 0.46                        | 0.65 | 1.02     | 0.75 | 1.58      | 0.85 | 3.84     | 0.95 |

Parameters of the fragility curves for High Code RC buildings

| Bldg. Properties |         |            |       | Interstory drift at<br>threshold of damage state |          |           |          | Spectral Displacements (cm) |      |          |      |           |      |          |      |
|------------------|---------|------------|-------|--------------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|
| BTM              | Partner | Height (m) |       |                                                  |          |           |          | Slight                      |      | Moderate |      | Extensive |      | Complete |      |
|                  |         | Roof       | Modal | Slight                                           | Moderate | Extensive | Complete | Median                      | Beta | Median   | Beta | Median    | Beta | Median   | Beta |
|                  |         |            |       |                                                  |          |           |          | 2.50                        | 0.50 | 3.97     | 0.43 | 5.18      | 0.43 | 10.54    | 0.51 |
| RC4M             | 3       |            |       |                                                  |          |           |          | 0.70                        | 0.50 | 1.27     | 0.41 | 1.68      | 0.40 | 3.07     | 0.40 |
| RC4H             | 3       |            |       |                                                  |          |           |          | 1.97                        | 0.46 | 3.18     | 0.33 | 4.27      | 0.30 | 8.72     | 0.32 |

Partners: 1-AUTH; 2-CIMNE; 3-IZIIS; 4-UNIGE; 5-UTCB

### 5.3.2 Modello di domanda

Gli spettri di capacità/richiesta delle città esaminate nel progetto Risk-Ue sono stati calcolati usando la legge di attenuazione Ambraseys 1996. L'area urbana è stata discretizzata ed a ciascuna cella sono stati assegnati i valori  $S_{ae}(T_i)$  per valori discreti del periodo  $T_i=0.0, 0.3, 0.6, 1.0$ , e  $2.0$  s. Nell'ambito del progetto del Risk-UE è stato sviluppato uno spettro elastico di domanda (al 5% di smorzamento) che individua tre regioni; la formulazione analitica è la seguente:

$$\frac{S_{ae}(T)}{A} = \frac{(\beta_i T_k - \beta_k T_i) + (\beta_k - \beta_i) T}{T_k - T_i} \quad T_i \leq T < T_k \quad (T_k \leq T_C) \quad (5.12)$$

$$\frac{S_{ae}(T)}{A} = \beta_i \left( \frac{T_i}{T} \right)^{\frac{\log(\beta_k / \beta_i)}{\log(T_k / T_i)}} \quad T_i \leq T < T_k \quad (T_C \leq T_i < T_k \leq T_D) \quad (5.13)$$

$$\frac{S_{ae}(T)}{A} = \beta_D \left( \frac{T_D}{T} \right)^2 \quad T < T_D \quad (5.14)$$

dove:

$S_{ae}(T)$  è l'ordinata dello spettro di risposta elastico

$T$  è il periodo di vibrazione del sistema lineare ad un grado di libertà SDOF

$A$  è il picco di accelerazione al suolo (PGA)

$T_i, T_k$  sono il periodo iniziale e finale di ogni intervallo di periodo selezionato

$T_C$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante

$T_D$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante

$\beta_{i,k,D}$  è il fattore definito come  $S_{ae}(T_{i,k,D})/A$

Il vantaggio di questa formulazione è che il tratto  $0 \leq T \leq T_C$  non deve avere necessariamente accelerazione costante. Questa formulazione ha il vantaggio di descrivere bene spettri anche diversi da quelli generalmente usati nei codici normativi correnti.

Per convertire lo spettro di domanda elastico dal formato standard ( $S_{ae}-T$ ) in formato AD ( $S_{ae}-S_{de}$ ) è sufficiente utilizzare la relazione tra l'accelerazione e lo spostamento spettrale.

$$S_{de}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{4\pi^2} T^2 \quad (5.15)$$

#### 5.3.2.1 Riduzione della resistenza per duttilità dello spettro di richiesta AD

Per convertire lo spettro di risposta elastico nel corrispondente spettro anelastico, si utilizza il fattore di struttura  $R_\mu$  che è un fattore di riduzione della resistenza dovuto alla duttilità.

$$R_\mu = \frac{V_{\max}}{V_y} = \frac{m^* S_a(v, T)}{V_y} \quad (5.16)$$

Per passare da uno spettro elastico ad uno anelastico si considerano le seguenti relazioni:

$$S_a(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_\mu} \quad (5.17)$$

$$S_d(T) = \mu S_a \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (5.18)$$

dove  $\mu$  è il fattore di duttilità definito come rapporto tra il massimo spostamento e lo spostamento al limite di snervamento.

Assegnata una certa duttilità  $\mu$ , per un assegnato spettro  $S_d(T)$ , è possibile diagrammare il fattore di struttura  $R_\mu$

Per periodo nullo, strutture infinitamente rigide,  $R_\mu \cong 1$ ; all'aumentare di  $T$ ,  $R_\mu$  si incrementa in funzione della duttilità  $\mu$  e del periodo  $T$ . Per strutture piuttosto deformabili ( $T \geq T_C$ )  $R_\mu$  è indipendente dal periodo  $T$  ed eguaglia la duttilità  $\mu$  (Fig.5.5).

Nel progetto Risk-UE si utilizza una rappresentazione bi-lineare del fattore  $R_\mu$  (Vidic et al.,1994; Fajfar,2000)

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad \text{per } T < T_C \quad (5.19)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{per } T \geq T_C \quad (5.20)$$

dove  $T_C$  è il periodo caratteristico del terremoto, tipicamente definito come il periodo di transizione del tratto dello spettro di risposta con accelerazione costante con quello con velocità costante. Un tipico valore di  $T_C$  proposto da Fajfar (Fajfar, 2000) è  $T_C = 0.6s$  o  $T_C = 0.8s$  proposto da Cosenza e Manfredi (Cosenza e Manfredi, 1997)

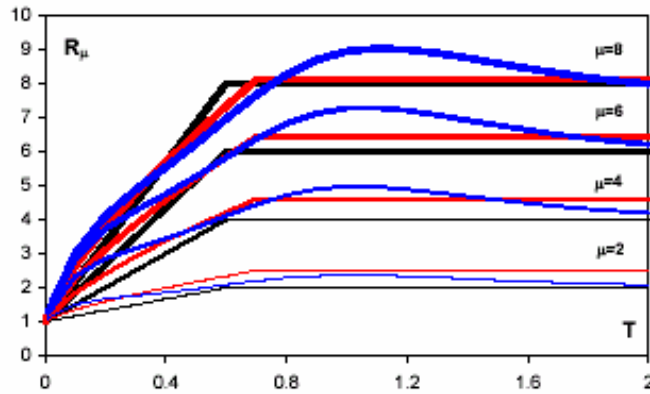


Fig.5.5: Fattore di struttura  $R_\mu$

### 5.3.3 Performance point

Una volta riportati nello stesso riferimento sia lo spettro di domanda che quello di capacità, è possibile determinare il punto di performance della struttura ossia il punto in cui domanda e capacità si eguagliano ed è quindi fornito dall'intersezione delle due curve.(Fig.5.6)

Nel caso in cui il sisma ha modesta intensità la risposta della struttura è elastica, quindi la determinazione del punto di performance è immediata perché esso si troverà nel

tratto elastico dello spettro di capacità e non occorre ridurre lo spettro di domanda elastico. All'aumentare dell'intensità sismica, la risposta della struttura non è più lineare e la determinazione del punto di performance non è più immediata essendo lo spettro di domanda inelastico funzione della duttilità che occorre determinare: si procede alla ricerca del punto di performance per tentativi.

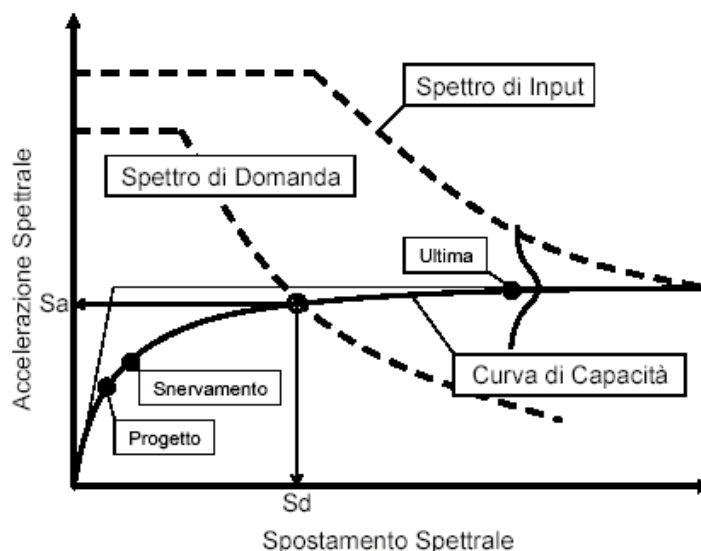


Fig.5.6: Richiesta e capacità per la determinazione del performance point

Per la determinazione del punto di performance esistono diversi criteri. Nel Risk-UE si riportano i seguenti tre metodi:

- General form of capacity spectra;
- Bi-linear representation of capacity spectrum;
- Elastic-perfectly plastic representation of capacity spectrum.

#### 5.3.3.1 General form of capacity spectra

Tale criterio assume uno spettro di capacità avente forma lineare fino al punto di snervamento e un andamento non lineare nel tratto post-snervamento. La procedura per la determinazione del punto di performance è iterativa, si stima un primo punto di prova sullo spettro di capacità che si può ottenere ad esempio assumendo una eguaglianza fra spostamento spettrale anelastico e lo spostamento che si avrebbe se la struttura rimanesse perfettamente elastica ( $S_{d_{TR}}, S_{a_{TR}}$ ) (Fig.5.7).

Basandosi sull'accelerazione spettrale e sullo spostamento spettrale che definiscono il punto di prova è possibile calcolare il fattore di riduzione di resistenza che giustifica gli effetti non lineari. A questo punto è possibile determinare il corrispondente spettro di domanda anelastico. Lo spettro di domanda anelastico interseca lo spettro di capacità nel punto  $(S_{d_{neu}}, S_{a_{neu}})$ . Se lo spostamento all'intersezione è uguale a quello assunto inizialmente ( $S_{d_{TR}}$ ), o si discosta per non più del 5% da questo valore, allora quest'ultimo è il punto di performance, se la tolleranza non è più accettabile si prenderà un nuovo punto di prova e si ripeterà la procedura scegliendo come successivo punto di prova proprio quello determinato.

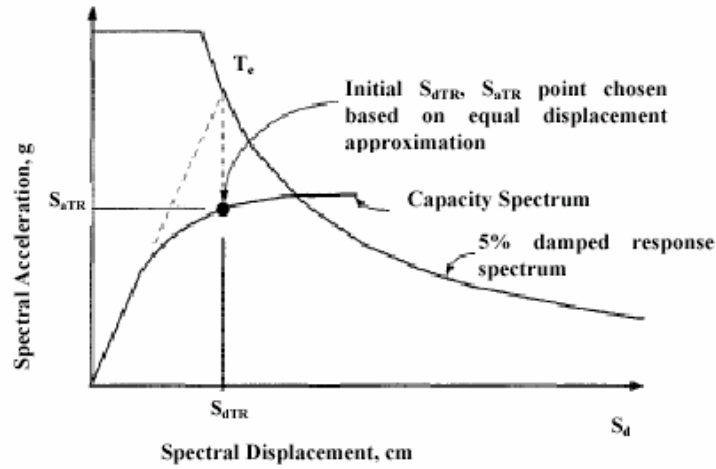


Fig.5.7: Procedura per la determinazione del performance point per uno spettro di capacità di forma generica

### 5.3.3.2 Bi-linear representation of capacity spectrum

Nel caso in cui lo spettro di capacità sia rappresentato da una forma bi-lineare, per la determinazione del punto di performance si può utilizzare un approccio semplificato. Esso si basa sull'assunzione che non solo la pendenza iniziale della rappresentazione bi-lineare del modello di capacità rimane costante ma anche la pendenza post-snervamento. Per determinare il punto di performance si disegna lo spettro elastico (con smorzamento del 5%) e lo spettro di capacità nello stesso riferimento. Si scelgono i valori  $S_{d,i}$  con  $i=1,2,\dots,N$  ciascuno in modo che risulti  $S_{d,i} > S_{d,y}$ ,  $S_{d,i+1} > S_{d,i}$

Per ciascun valore  $S_{d,i}$  scelto si definisce la duttilità  $\mu$   $\left( \mu = \frac{S_{d,i}}{S_{d,y}} \right)$ , il periodo spettrale

$$T_i \left( T_i = 2\pi \sqrt{\frac{S_{d,i}}{S_{a,i}}} \right) \text{ e si definisce l'intervallo in cui esso ricade } (T_i < T_C)$$

oppure  $(T_i \geq T_C)$ . Si calcola il fattore di riduzione di resistenza  $R_{\mu}$  usando l'espressione appropriata e con esso si determina l'accelerazione spettrale anelastica attraverso la riduzione dell'accelerazione spettrale elastica ( $S_{ae,i}$ ) per un adeguato fattore di riduzione della resistenza  $R_{\mu,i}$

$$S_{a,i} = \frac{S_{ae,i}}{R_{\mu,i}}$$

Si disegnano così i valori di accelerazione e spostamento spettrale ridotti e si traccia una curva che interpola questi punti. L'intersezione di questa curva con lo spettro di capacità determina il punto di performance (Fig.5.8).

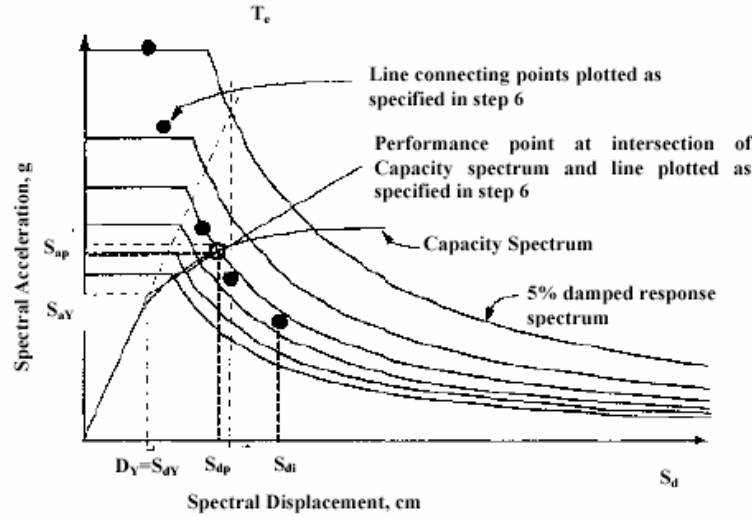


Fig.5.8: Procedura di determinazione del performance point per un modello di capacità ottenuto mediante rappresentazione bi-lineare

### 5.3.3.3 Elastic-perfectly plastic representation of capacity spectrum

Questa procedura fornisce delle soluzioni matematiche chiuse, si stima uno spostamento dovuto ad una certa richiesta sismica assumendo *l'equal displacement approximation* ovvero si ipotizza che lo spostamento spettrale non-elastico ( $S_d$ ) sia lo stesso di quello che si avrebbe se la struttura rimanesse perfettamente elastica ( $S_{de}$ ).

L'intersezione della retta radiale passante per l'origine corrispondente al periodo elastico  $T_e$  del sistema plastico idealizzato perfettamente elastico con lo spettro di domanda al 5% di smorzamento definisce l'accelerazione ed il corrispondente spostamento richiesto per il comportamento elastico lineare del sistema.

$$\left( T_e = 2\pi \sqrt{\frac{S_{de}}{S_{ae}}} \right) \quad (5.21)$$

L'accelerazione di snervamento ( $S_{ay}$ ) rappresenta sia l'accelerazione di richiesta che la capacità del sistema non-elastico. Il rapporto tra le accelerazioni corrispondenti ai sistemi elastico e non-elastico rappresentano il fattore di riduzione di resistenza:

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T_e)}{S_{ay}} \quad (5.22)$$

Per l'assunzione fatta, lo spostamento di richiesta non elastico è uguale allo spostamento di richiesta elastico:

$$S_d = S_{de} = \mu S_{dy} \quad (5.23)$$

Per accelerazione costante e velocità costante e la richiesta di duttilità per gli intervalli spettrali sono:

$$\mu_p = (R_\mu - 1) \frac{T_c}{T_e} + 1 \quad T_e < T_c \quad (5.24)$$

$$\mu_p = \frac{S_d}{S_{dy}} = \frac{S_{ae}(T_e)}{S_{ay}} = R_\mu \quad T_e \geq T_c \quad (5.25)$$

e le coordinate del punto di performance sono calcolate come:

$$S_{dP} = \frac{S_{de}}{R_\mu} \mu_P \quad (5.26)$$

$$S_{aP} = S_{ay} \quad (5.27)$$

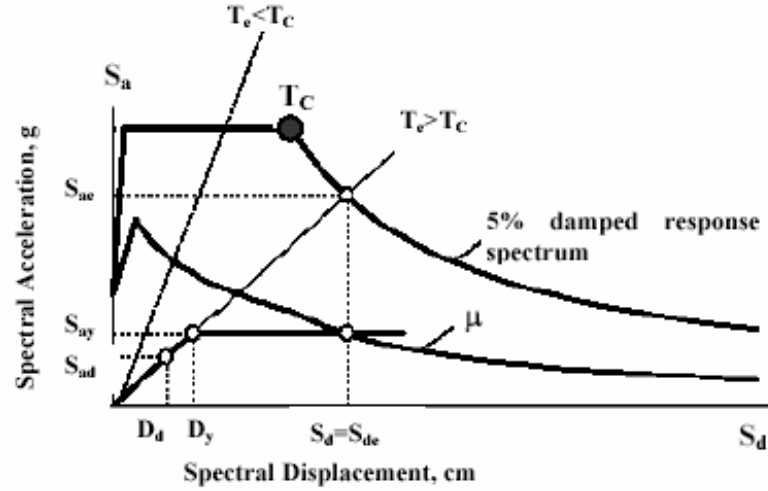


Fig.5.9: Procedura per la determinazione del performance point per un modello di capacità elasto-plastico

### 5.3.4 Code Based Approach (CBA)

E' stato elaborato anche un metodo ibrido per lo sviluppo delle curve di capacità e le funzioni di fragilità che d'ora in poi verrà chiamato metodo CBA.

In questo metodo la curva di capacità è modellata come una curva bi-lineare in formato AD la cui equazione è riportata in seguito:

$$YC (A_y, D_y) \quad A_y = \frac{C_s \gamma}{\alpha_1} \quad D_y = \frac{A_y}{4\pi^2} T^2 \quad (5.28)$$

$$UC (A_u, D_u) \quad A_y = \lambda \frac{C_s \gamma}{\alpha_1} \quad D_y = \lambda \frac{C_s \gamma}{\alpha_1} \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (5.29)$$

Dove:

$C_s$  coefficiente di intensità sismica  $T$  periodo

$\alpha_1$  frazione del peso effettivo dell'edificio nel modello push-over

$\gamma$  coefficiente di sovrarresistenza della condizione di snervamento rispetto alla condizione di progetto

$\lambda$  coefficiente di sovrarresistenza della condizione ultima rispetto allo snervamento

$\mu$  fattore di duttilità

La resistenza di progetto  $C_s$  si basa sulle forze orizzontali di progetto richieste dalle norme sismiche. Esso è funzione della zona sismica e di altri fattori che includono le condizioni del suolo.

Il coefficiente  $\alpha_1$  è definito dalle caratteristiche modali dell'edificio come precedentemente definito (Eq.5.7).



Le curve di fragilità sono modellate mediante la distribuzione standard lognormale; per ottenere stati di danno discreti è stato adottato l'indice di danno Park & Ang (1985) riportato in Tabella 5.4

Tab. 5.4: Indice di danno Park &amp; Ang.

| Grado di danno | Definizione      | Range dell'indice di danno (DI) |
|----------------|------------------|---------------------------------|
| 0              | Assenza di danno | <0.10                           |
| 1              | Danno lieve      | 0.10-0.25                       |
| 2              | Danno moderato   | 0.25-0.40                       |
| 3              | Danno esteso     | 0.40-1.00                       |
| 4              | collasso         | >1.00                           |

Il valore medio dello spostamento spettrale corrispondente ad un certo stato di danno è stato determinato utilizzando le seguenti equazioni:

$$DI = \frac{D - D_y}{D_u - D_y} + \beta_e \frac{4k(A_y D - A D_y)}{A_y D_u} \quad (5.30)$$

$$A = A_y + \frac{A_u - a_y}{D_u - D_y} (D - D_y) \quad (5.31)$$

dove  $D$  è il valore medio dello spostamento spettrale ad un certo stato di danno e  $k$  è il fattore di degrado che definisce l'effettiva quantità del comportamento isteretico.

I parametri delle curve di capacità e di fragilità sviluppate sono riportate nelle Tabelle 5.5 e 5.6

#### 5.4 METODO PROPOSTO DALL'ATC40

L'ATC40 fornisce diversi metodi per la determinazione del performance point. Essi sono tutti basati sul calcolo degli spettri di domanda corrispondenti a diversi valori di smorzamento equivalente e sulla determinazione iterativa dello spostamento atteso.

In sintesi si procede come segue:

1. Si effettua una prima stima del performance point (generalmente come spostamento di una struttura elastica avente la stessa rigidità iniziale);
2. si determina da esso un legame costitutivo bi-lineare equivalente, in termini energetici, alla curva di capacità fino al performance point;
3. si calcola lo smorzamento equivalente del legame bi-lineare ed il conseguente fattore di riduzione dello spettro elastico lineare;
4. si determina il punto di intersezione dello spettro di domanda ridotto con la curva di capacità: se esso è caratterizzato da uno spostamento sufficientemente vicino a quello stimato in partenza la soluzione è trovata; se non è così si assume come nuova stima del performance point il punto trovato (o una media fra quello trovato e quello iniziale) e si itera fino a convergenza.

Tab.5.5: Punti caratteristici dello spettro di capacità definiti mediante l'approccio CBA

| BTM                  | Institution | /IZIIS, UTCB/ |        |                |        |
|----------------------|-------------|---------------|--------|----------------|--------|
|                      |             | Yield point   |        | Ultimate point |        |
|                      |             | Dv (cm)       | Av (g) | Du (cm)        | Au (g) |
| <b>Pre Code</b>      |             |               |        |                |        |
| <b>RC1M</b>          | UTCB        | 1.00          | 0.082  | 3.01           | 0.124  |
| <b>RC1H</b>          | UTCB        | 2.32          | 0.093  | 6.96           | 0.140  |
| <b>RC2M</b>          | UTCB        | 0.31          | 0.078  | 0.93           | 0.117  |
| <b>RC2H</b>          | UTCB        | 1.07          | 0.088  | 3.20           | 0.131  |
| <b>Low Code</b>      |             |               |        |                |        |
| <b>RC1M</b>          | UTCB        | 0.64          | 0.053  | 2.90           | 0.079  |
| <b>RC1H</b>          | UTCB        | 1.04          | 0.042  | 4.70           | 0.063  |
| <b>RC2M</b>          | UTCB        | 0.48          | 0.12   | 2.15           | 0.180  |
| <b>RC2H</b>          | UTCB        | 0.88          | 0.073  | 3.98           | 0.109  |
| <b>Moderate Code</b> |             |               |        |                |        |
| <b>RC1L</b>          | IZIIS       | 0.10          | 0.18   | 0.22           | 0.20   |
| <b>RC1M</b>          | IZIIS       | 1.51          | 0.17   | 3.31           | 0.19   |
|                      | UTCB-1      | 0.68          | 0.056  | 3.07           | 0.084  |
|                      | UTCB-2      | 1.26          | 0.141  | 12.63          | 0.282  |
| <b>RC1H</b>          | IZIIS       | 3.52          | 0.10   | 7.75           | 0.11   |
|                      | UTCB-1      | 1.11          | 0.045  | 5.01           | 0.067  |
|                      | UTCB-2      | 2.87          | 0.160  | 28.73          | 0.320  |
| <b>RC2M</b>          | UTCB-1      | 0.45          | 0.112  | 2.00           | 0.168  |
|                      | UTCB-2      | 0.51          | 0.167  | 4.06           | 0.333  |
| <b>RC2H</b>          | UTCB-1      | 0.94          | 0.077  | 4.22           | 0.116  |
|                      | UTCB-2      | 1.68          | 0.188  | 13.42          | 0.375  |
| <b>High Code</b>     |             |               |        |                |        |
| <b>RC1L</b>          | IZIIS       | 0.07          | 0.13   | 0.59           | 0.26   |
| <b>RC1M</b>          | IZIIS       | 1.31          | 0.15   | 10.44          | 0.29   |
|                      | UTCB        | 1.58          | 0.176  | 15.79          | 0.353  |
| <b>RC1H</b>          | IZIIS       | 4.58          | 0.13   | 36.63          | 0.26   |
|                      | UTCB        | 3.59          | 0.200  | 35.91          | 0.400  |
| <b>RC2M</b>          | UTCB        | 0.63          | 0.208  | 5.07           | 0.417  |
| <b>RC2H</b>          | UTCB        | 2.10          | 0.234  | 16.77          | 0.469  |

#### 5.4.1 Conversione della curva di capacità

Per la conversione occorre conoscere le caratteristiche dinamiche:  $T$  periodo,  $\phi_i$  forma modale,  $m_i$  massa.

Per convertire quindi la curva di capacità, rappresentata in termini di taglio e spostamento, nello spettro di capacità ossia nel formato ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra), ossia accelerazione-spostamento spettrale, è necessario ricondurre il comportamento della struttura a quello di un sistema ad un grado di libertà. Allo scopo si utilizza una distribuzione di spostamenti orizzontali sull'altezza: in genere si usa il modo di vibrazione fondamentale, ma si possono usare anche altre forme. Nella maggior parte delle strutture il comportamento dinamico è ben descritto considerando il solo primo modo di vibrare.

Per garantire l'uguaglianza fra l'energia cinetica della struttura e quella del sistema equivalente ad un grado di libertà si sfruttano il fattore di partecipazione  $PF_i$  e la percentuale di massa partecipante  $\alpha_i$  relativi al primo modo:

$$\alpha_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \sum_{i=1}^N (m_i \Phi_{i1}^2)} \quad (5.32)$$

Tab.5.6: Parametri delle curve di fragilità ottenute mediante l'approccio CBA per i diversi codici normativi (Pre-Code, Low-Code, Moderate-Code, High-Code) ed i quattro stati di danno (slight, moderate, extensive, complete)

| Bldg. Properties |             |            |       | Interstory drift at<br>threshold of damage state |          |           |          | Spectral Displacements (cm) |      |          |      |           |      |          |      |
|------------------|-------------|------------|-------|--------------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|
| BTM              | Institution | Height (m) |       |                                                  |          |           |          | Slight                      |      | Moderate |      | Extensive |      | Complete |      |
|                  |             | Roof       | Modal | Slight                                           | Moderate | Extensive | Complete | Median                      | Beta | Median   | Beta | Median    | Beta | Median   | Beta |
| Pre Code         |             |            |       |                                                  |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
| RC1L             | 5           | 570        | 342   | 0.04                                             | 0.08     | 0.13      | 0.30     | 0.14                        | 0.65 | 0.29     | 0.75 | 0.44      | 0.85 | 1.03     | 0.95 |
| RC1M             | 5           | 1710       | 1026  | 0.04                                             | 0.08     | 0.12      | 0.27     | 0.38                        | 0.65 | 0.78     | 0.75 | 1.18      | 0.85 | 2.79     | 0.95 |
| RC1H             | 5           | 2850       | 1710  | 0.05                                             | 0.11     | 0.16      | 0.38     | 0.87                        | 0.65 | 1.80     | 0.75 | 2.73      | 0.85 | 6.46     | 0.95 |
| RC2L             | 5           | 570        | 399   | 0.00                                             | 0.01     | 0.01      | 0.03     | 0.01                        | 0.65 | 0.03     | 0.75 | 0.05      | 0.85 | 0.11     | 0.95 |
| RC2M             | 5           | 1710       | 1197  | 0.01                                             | 0.02     | 0.03      | 0.07     | 0.12                        | 0.65 | 0.24     | 0.75 | 0.36      | 0.85 | 0.86     | 0.95 |
| RC2H             | 5           | 2850       | 1995  | 0.02                                             | 0.04     | 0.06      | 0.15     | 0.40                        | 0.65 | 0.83     | 0.75 | 1.26      | 0.85 | 2.97     | 0.95 |
| Low Code         |             |            |       |                                                  |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
| RC1L             | 5           | 570        | 342   | 0.06                                             | 0.12     | 0.18      | 0.43     | 0.20                        | 0.65 | 0.41     | 0.75 | 0.62      | 0.85 | 1.47     | 0.95 |
| RC1M             | 5           | 1710       | 1026  | 0.03                                             | 0.07     | 0.11      | 0.25     | 0.34                        | 0.65 | 0.71     | 0.75 | 1.08      | 0.85 | 2.55     | 0.95 |
| RC1H             | 5           | 2850       | 1710  | 0.03                                             | 0.07     | 0.10      | 0.24     | 0.56                        | 0.65 | 1.15     | 0.75 | 1.75      | 0.85 | 4.14     | 0.95 |
| RC2L             | 5           | 570        | 399   | 0.01                                             | 0.02     | 0.03      | 0.07     | 0.04                        | 0.65 | 0.08     | 0.75 | 0.12      | 0.85 | 0.28     | 0.95 |
| RC2M             | 5           | 1710       | 1197  | 0.02                                             | 0.04     | 0.07      | 0.16     | 0.25                        | 0.65 | 0.53     | 0.75 | 0.80      | 0.85 | 1.89     | 0.95 |
| RC2H             | 5           | 2850       | 1995  | 0.02                                             | 0.05     | 0.07      | 0.18     | 0.47                        | 0.65 | 0.98     | 0.75 | 1.48      | 0.85 | 3.51     | 0.95 |
| Moderate Code    |             |            |       |                                                  |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
| RC1L             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 0.11                        | 0.40 | 0.13     | 0.50 | 0.15      | 0.60 | 0.21     | 0.70 |
|                  | 5A          | 570        | 342   | 0.06                                             | 0.13     | 0.19      | 0.46     | 0.21                        | 0.65 | 0.43     | 0.75 | 0.66      | 0.85 | 1.56     | 0.95 |
|                  | 5B          | 570        | 342   | 0.15                                             | 0.32     | 0.50      | 1.21     | 0.50                        | 0.65 | 1.11     | 0.75 | 1.72      | 0.85 | 4.15     | 0.95 |
| RC1M             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 1.67                        | 0.40 | 1.92     | 0.50 | 2.17      | 0.60 | 3.16     | 0.70 |
|                  | 5A          | 1710       | 1026  | 0.04                                             | 0.07     | 0.11      | 0.26     | 0.36                        | 0.65 | 0.75     | 0.75 | 1.14      | 0.85 | 2.70     | 0.95 |
|                  | 5B          | 1710       | 1026  | 0.12                                             | 0.27     | 0.42      | 1.02     | 1.26                        | 0.65 | 2.79     | 0.75 | 4.32      | 0.85 | 10.43    | 0.95 |
| RC1H             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 3.91                        | 0.40 | 4.49     | 0.50 | 5.07      | 0.60 | 7.40     | 0.70 |
|                  | 5A          | 2850       | 1710  | 0.04                                             | 0.07     | 0.11      | 0.26     | 0.59                        | 0.65 | 1.23     | 0.75 | 1.87      | 0.85 | 4.42     | 0.95 |
|                  | 5B          | 2850       | 1710  | 0.17                                             | 0.37     | 0.57      | 1.39     | 2.87                        | 0.65 | 6.35     | 0.75 | 9.82      | 0.85 | 23.72    | 0.95 |
| RC2L             | 5A          | 570        | 399   | 0.01                                             | 0.02     | 0.02      | 0.06     | 0.03                        | 0.65 | 0.06     | 0.75 | 0.09      | 0.85 | 0.22     | 0.95 |
|                  | 5B          | 570        | 399   | 0.01                                             | 0.02     | 0.03      | 0.06     | 0.03                        | 0.65 | 0.07     | 0.75 | 0.10      | 0.85 | 0.25     | 0.95 |
| RC2M             | 5A          | 1710       | 1197  | 0.02                                             | 0.04     | 0.06      | 0.15     | 0.24                        | 0.65 | 0.49     | 0.75 | 0.75      | 0.85 | 1.77     | 0.95 |
|                  | 5B          | 1710       | 1197  | 0.04                                             | 0.08     | 0.12      | 0.28     | 0.43                        | 0.65 | 0.92     | 0.75 | 1.41      | 0.85 | 3.37     | 0.95 |
| RC2H             | 5A          | 2850       | 1995  | 0.03                                             | 0.05     | 0.08      | 0.19     | 0.50                        | 0.65 | 1.04     | 0.75 | 1.57      | 0.85 | 3.72     | 0.95 |
|                  | 5B          | 2850       | 1995  | 0.07                                             | 0.15     | 0.23      | 0.56     | 1.41                        | 0.65 | 3.03     | 0.75 | 4.65      | 0.85 | 11.15    | 0.95 |
| High Code        |             |            |       |                                                  |          |           |          |                             |      |          |      |           |      |          |      |
| RC1L             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 0.12                        | 0.40 | 0.19     | 0.50 | 0.26      | 0.60 | 0.53     | 0.70 |
|                  | 5           | 570        | 342   | 0.18                                             | 0.39     | 0.59      | 1.40     | 0.63                        | 0.65 | 1.32     | 0.75 | 2.01      | 0.85 | 4.78     | 0.95 |
| RC1M             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 2.11                        | 0.40 | 3.31     | 0.50 | 4.52      | 0.60 | 9.35     | 0.70 |
|                  | 5           | 1710       | 1026  | 0.15                                             | 0.32     | 0.49      | 1.17     | 1.58                        | 0.65 | 3.32     | 0.75 | 5.06      | 0.85 | 12.03    | 0.95 |
| RC1H             | 3           |            |       |                                                  |          |           |          | 7.40                        | 0.40 | 11.64    | 0.50 | 15.87     | 0.60 | 32.82    | 0.70 |
|                  | 5           | 2850       | 1710  | 0.21                                             | 0.44     | 0.67      | 1.60     | 3.59                        | 0.65 | 7.55     | 0.75 | 11.51     | 0.85 | 27.35    | 0.95 |
| RC2L             | 5           | 570        | 399   | 0.01                                             | 0.02     | 0.03      | 0.07     | 0.04                        | 0.65 | 0.08     | 0.75 | 0.12      | 0.85 | 0.29     | 0.95 |
| RC2M             | 5           | 1710       | 1197  | 0.05                                             | 0.09     | 0.14      | 0.33     | 0.54                        | 0.65 | 1.10     | 0.75 | 1.66      | 0.85 | 3.90     | 0.95 |
| RC2H             | 5           | 2850       | 1995  | 0.09                                             | 0.18     | 0.28      | 0.65     | 1.79                        | 0.65 | 3.64     | 0.75 | 5.49      | 0.85 | 12.89    | 0.95 |

Institutions: 1-AUTH; 2-CIMNE; 3-IZIIS; 4-UNIGE; 5-UTCB (5A 1970-77; 5B 1978-89)

$$PF_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)}{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1}^2} \quad (5.33)$$

dove  $m_i$  è la massa del piano  $i$ -esimo,  $\Phi_i$  è l'ampiezza del primo modo in corrispondenza dell' $i$ -esimo piano ed  $N$  è il numero totale di piani.

Ciascun punto della curva di capacità nel piano ( $V, \Delta R$ ) è associato al corrispondente punto sullo spettro di capacità mediante le seguenti relazioni:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (5.34)$$

$$S_d = \frac{\Delta R}{PF_1 * \Phi_{copertura,1}} \quad (5.35)$$

dove  $V$  è il taglio alla base,  $W$  il peso dell'edificio e  $\Delta R$  lo spostamento in copertura.

Nel formato ADRS ( $S_a$ - $S_d$ ) in fascio di rette passanti per l'origine ha periodo costante e per ogni punto dello spettro il periodo  $T$  può essere calcolato usando la relazione:

$$T = 2\pi \sqrt{\left( \frac{S_d}{S_a} \right)} \quad (5.36)$$

Analogamente, per ogni punto dello spettro tradizionale ( $S_a$ - $T$ ), lo spostamento spettrale può essere calcolato usando la relazione:

$$S_d = S_a \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (5.37)$$

#### 5.4.1.1 Rappresentazione in forma bi-lineare dello spettro di capacità

La rappresentazione in forma bi-lineare è necessaria per stimare velocemente lo smorzamento efficace (equivalente) e la conseguente riduzione della domanda spettrale. La rappresentazione bi-lineare richiede la definizione di un punto di coordinate  $d_{pi} a_{pv}$  che rappresentano la stima del massimo spostamento atteso e la corrispondente accelerazione spettrale. Il primo tratto della spezzata coincide con la rigidità iniziale della struttura, definito dai punti caratteristici dello snervamento ( $a_y, d_y$ ). Il secondo, che si disegna a partire dal punto di stima, ha una pendenza tale che le aree  $A1$  e  $A2$  (Fig.5.10) siano approssimativamente uguali, in modo che l'energia dissipata per ciclo sia identica fra il legame bi-lineare e la curva di capacità effettiva. La prima stima del punto è designata con  $ap1, dp1$ , la seconda con  $ap2, dp2$  e così via. Nel caso di una curva di capacità che rappresenti il progressivo degrado della resistenza strutturale, la spezzata va costruita in riferimento alla curva di capacità che contiene il punto corrente di stima.

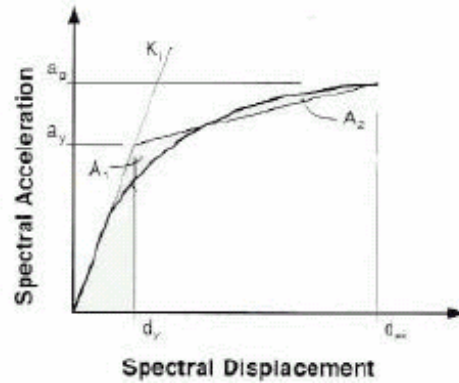


Fig.5.10: Stima della accelerazione spettrale

#### 5.4.2 Stima dello smorzamento e riduzione dello spettro elastico

Lo smorzamento equivalente, che si manifesta quando il sisma fa oscillare oltre il limite elastico una struttura, può essere considerato come somma del contributo viscoso e di quello isteretico:

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \quad (5.38)$$

$\beta_0$  = smorzamento viscoso equivalente a quello isteretico;

0.05 = smorzamento viscoso proprio della struttura considerato pari al 5%.

Lo smorzamento isteretico  $\beta_0$ , è legato all'energia dissipata dalla struttura, proporzionale all'area racchiusa dai cicli d'isteresi, rappresentati in un riferimento che abbia come componenti la forza sismica (taglio alla base) e lo spostamento strutturale. Tale smorzamento può essere calcolato mediante la seguente relazione (Chopra 1995):

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{s0}} \quad (5.39)$$

$E_D$  = Energia dissipata a causa dello smorzamento isteretico

$E_{s0}$  = Energia elastica relativa alla massima deformazione

Sviluppando l'equivalenza dell'energia dissipata da un oscillatore, dotato di smorzamento viscoso, e quella sviluppata da un oscillatore, a comportamento elasto-plastico incrudente, si perviene all'espressione dello smorzamento viscoso equivalente; lo smorzamento è espresso in percentuale, ed è calcolato in funzione dei punti critici della rappresentazione bi-lineare dello spettro di capacità (Fig.5.11):

$$\beta_0 = \frac{63.7 * (a_y * d_{pi} - d_y * a_{pi})}{a_{pi} * d_{pi}} \quad (5.40)$$

$$\beta_{eq} = \frac{63.7 * (a_y * d_{pi} - d_y * a_{pi})}{a_{pi} * d_{pi}} + 5 \quad (5.41)$$

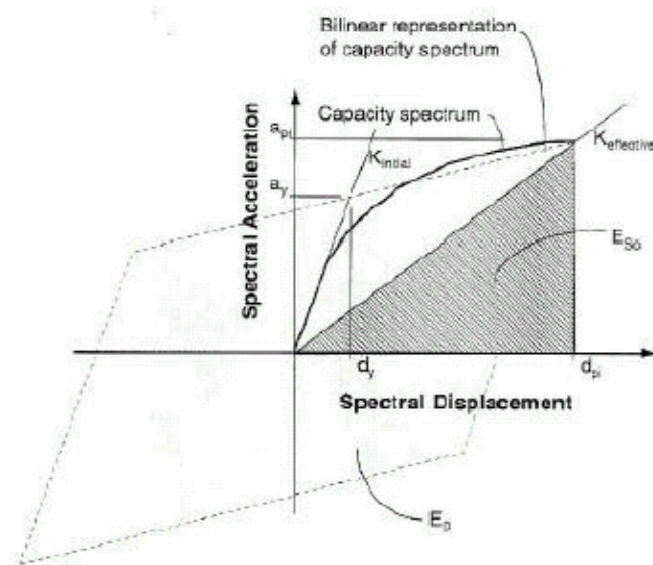


Fig.5.11: Calcolo dello smorzamento viscoso equivalente (da ATC40)

### 5.4.3 Il fattore di comportamento k

Il ciclo d'isteresi presente in Figura 5.11 è una ragionevole approssimazione per strutture con alto grado di duttilità, sottoposte a terremoti di breve intensità (tali da comportare pochi cicli e da considerare il degrado della resistenza degli elementi nullo), con smorzamento equivalente inferiore al 30%. Per condizioni che siano diverse da quelle enunciate, considerando ad esempio un edificio esistente, i cicli d'isteresi come quelli di figura tendono a sovrastimare l'effettivo valore dello smorzamento viscoso equivalente, in quanto non vengono considerati fenomeni tipo *pinching*, che portano ad una progressiva riduzione dell'ampiezza dei cicli. Va pertanto introdotto nell'espressione di  $\beta_{eq}$  il fattore  $k$ , per tenere conto della possibile presenza di tali fenomeni :

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + 5 = \frac{63.7 * k * (a_y * d_{pi} - d_y * a_{pi})}{a_{pi} * d_{pi}} + 5 \quad (5.42)$$

Il fattore  $k$  dipende dal comportamento strutturale dell'edificio, che a sua volta è funzione della qualità del sistema sismico resistente e della durata del sisma. Nell'ATC 40 vengono proposti, per semplicità, tre categorie di comportamenti strutturali:

- Tipo A, rappresenta strutture con cicli d'isteresi ampi e stabili;
- Tipo B, rappresenta strutture che mostrano una moderata riduzione dell'area dei cicli d'isteresi;
- Tipo C, rappresenta un comportamento isteretico assai limitato con una notevole riduzione dell'area dei cicli.

Nella Tabella 5.7 è possibile individuare il tipo di comportamento in funzione della durata del sisma e della qualità del sistema sismico resistente.

L'intervallo ed i limiti di  $k$  espressi in funzione del comportamento strutturale e della percentuale di smorzamento equivalente  $\beta_0$  sono riportati in Tabella 5.8. Questi valori derivano dai valori dei fattori di riduzione spettrale riportati nei codici normativi

(Uniform Building Code, 1994) e da elaborazioni eseguite con il programma NEHRP, 1995.

Tab.5.7: Tipi di edifici

| <i>Durata del sisma</i> | <i>Edifici essenzialmente nuovi (1)</i> | <i>Edifici esistenti comuni (2)</i> | <i>Edifici esistenti poveri (3)</i> |
|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Breve                   | Tipo A                                  | Tipo B                              | Tipo C                              |
| Lungo                   | Tipo B                                  | Tipo C                              | Tipo C                              |

(1) Edifici in cui elementi primari costituiscono un sistema resistente alle azioni orizzontali essenzialmente nuovo.

(2) Edifici i cui elementi primari resistenti sono combinazione di elementi esistenti e di elementi nuovi.

(3) Edifici i cui elementi primari hanno uno scarso comportamento isteretico.

Tab.5.8: Valori del fattore di comportamento k

| <i>Tipo di comportamento strutturale</i> | <i>b0 (percentuale)</i> | <i>k</i>                                                       |
|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Tipo A                                   | ≤16.25                  | 1                                                              |
|                                          | >16.25                  | $1.13 - \frac{0.51(a_y d_{py} - d_y a_{py})}{a_{pi} d_{pi}}$   |
| Tipo B                                   | ≤25                     | 0.67                                                           |
|                                          | >25                     | $0.845 - \frac{0.446(a_y d_{py} - d_y a_{py})}{a_{pi} d_{pi}}$ |
| Tipo C                                   | qualsiasi               | 0.33                                                           |

#### 5.4.4 I fattori di riduzione

A questo punto sono disponibili tutti gli elementi per calcolare i fattori di riduzione dello spettro di risposta elastico,  $SR_A$ , relativo al campo in cui si hanno accelerazioni spettrali costanti, e  $SR_V$ , relativo al campo in cui si hanno velocità spettrali costanti.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 * \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (5.43)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 * \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (5.44)$$

Si può quindi procedere alla determinazione dello spettro di domanda ridotto, secondo lo schema riportato in Figura 5.13

Lo spettro elastico è costruito sulla base dei coefficienti sismici  $C_A$  (accelerazione di picco al suolo) e  $C_V$ , che valgono rispettivamente:

$$C_A = 0.4 * S_{MS} \quad (5.45)$$

$$C_V = S_{M1} \quad (5.46)$$

dove:

$S_{MS}$  = accelerazione spettrale su suolo roccioso, in corrispondenza di un periodo di 0.3 secondi.

$S_{M1}$  = accelerazione spettrale su suolo roccioso, in corrispondenza di un periodo di 1 secondo.

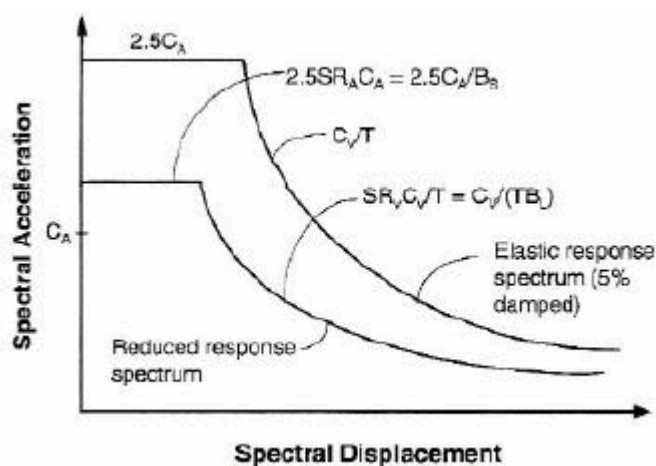


Fig.5.13: Spettro di domanda ridotto

$SMS$  e  $SMI$  sono funzione della sismicità della zona e tengono conto anche degli effetti di amplificazione locali; fanno inoltre riferimento a un evento sismico con probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni (MCE).

I fattori di riduzione  $SR_A$  e  $SR_V$  sono limitati inferiormente in funzione del comportamento strutturale, come indicato in Tab.5.9.

Tab.5.9: Limitazione dei fattori di riduzione

| <i>Tipo di comportamento strutturale</i> | $SR_A$ | $SR_V$ |
|------------------------------------------|--------|--------|
| Tipo A                                   | 0.33   | 0.50   |
| Tipo B                                   | 0.44   | 0.56   |
| Tipo C                                   | 0.56   | 0.67   |

Definiti i punti di coordinate  $(a_y, d_y)$  e  $(a_{pi}, d_{pi})$  è possibile calcolare  $\beta_0$  mediante l'equazione 5.40. Noto  $\beta_0$  e definito il tipo di comportamento strutturale dell'edificio in esame è possibile, mediante la Tabella 5.8 definire il fattore di riduzione  $k$  (o la sua espressione per calcolarlo). Infine, calcolato  $k$  è possibile determinare  $\beta_{eff}$  mediante la 5.42 e quindi dalle espressioni 5.43 e 5.44 calcolo i fattori di riduzione  $SR_A$  (relativo all'intervallo dello spettro di domanda con accelerazione costante) ed  $SR_V$  (relativo all'intervallo dello spettro di domanda con velocità costante). Occorrerà verificare se questi valori sono maggiori o uguali di quelli riportati in Tab.5.9

In Tabella 5.10 sono riportati, a titolo di esempio, i fattori di riduzione calcolati per i tre tipi di comportamento strutturale definiti nell'ATC40 per i valori di  $\beta_0$  fissati pari allo 0%, al 5%, 15%, 25%, 35% e maggiore o uguale del 45%.

#### 5.4.5 Calcolo del Performance Point

Nell' ATC 40 vengono esaminate tre diverse procedure per il calcolo del performance point:

- procedura A: rappresenta l'applicazione più diretta di concetti e delle relazioni precedentemente descritte;



- procedura B: è il metodo più rapido in quanto introduce una semplificazione nella rappresentazione bi-lineare della curva di capacità; consente dunque con poche iterazioni di determinare il performance point. Si assume che non solo la pendenza iniziale della rappresentazione bi-lineare rimanga costante, ma anche la pendenza del tratto incrudente ed il punto  $a_p, d_p$ . Tale semplificazione consente una soluzione diretta senza dover riaggiornare completamente il modello bi-lineare ad ogni iterazione, poiché lo smorzamento efficace  $\beta_{eq}$  in questo caso è solo funzione di  $d_p$ ;
- procedura C: rappresenta un metodo grafico per il calcolo del performance point e, come la procedura A, fa riferimento a concetti e relazioni descritte precedentemente. E' sicuramente un metodo più immediato per un calcolo approssimato della prestazione, sebbene rappresenti la procedura meno chiara di quelle esaminate.

Tab.5.10: Fattori di riduzione spettrale per valori di  $\beta_0$  fissati

| $\beta_0$ (percento) | Comportamento di tipo A |        |        | Comportamento di tipo B |        |        | Comportamento di tipo C |        |        |
|----------------------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|                      | $\beta_{eff}$           | $SR_A$ | $SR_V$ | $\beta_{eff}$           | $SR_A$ | $SR_V$ | $\beta_{eff}$           | $SR_A$ | $SR_V$ |
| 0                    | 5                       | 1,00   | 1,00   | 5                       | 1,00   | 1,00   | 5                       | 1,00   | 1,00   |
| 5                    | 10                      | 0,78   | 0,83   | 8                       | 0,83   | 0,87   | 7                       | 0,91   | 0,93   |
| 15                   | 20                      | 0,55   | 0,66   | 15                      | 0,64   | 0,73   | 10                      | 0,78   | 0,83   |
| 25                   | 28                      | 0,44   | 0,57   | 22                      | 0,53   | 0,63   | 13                      | 0,69   | 0,76   |
| 35                   | 35                      | 0,38   | 0,52   | 26                      | 0,47   | 0,59   | 17                      | 0,61   | 0,70   |
| $\geq 45$            | 40                      | 0,33   | 0,50   | 29                      | 0,44   | 0,56   | 20                      | 0,56   | 0,67   |

Di seguito si riporta solo una delle tre diverse tipologie proposte, sia per l'accuratezza dei risultati forniti, sia perché nel suo sviluppo chiarisce le relazioni esposte. Questa procedura è iterativa, la cui convergenza porta alla definizione della prestazione della struttura. Vengono descritti i vari passi che sono alla base del metodo:

1. Scelta dello spettro elastico di partenza (con smorzamento del 5%), in funzione delle caratteristiche del sito.
2. Conversione della curva di capacità nello spettro di capacità, nel formato ADRS, secondo quanto già descritto. Rappresentazione su uno stesso grafico dello spettro di capacità e dello spettro elastico di progetto.
3. Scelta del punto di prova. Si può utilizzare *l'equal displacement approximation* oppure anche scegliere il punto finale dello spettro di capacità.
4. Sviluppo della rappresentazione bi-lineare dello spettro di capacità.
5. Calcolo dei fattori di riduzione. Sviluppo dello spettro ridotto della domanda e rappresentazione nello stesso riferimento definito nel passo 2.
6. Determinazione del punto di intersezione fra lo spettro della domanda e lo spettro della capacità.
7. Se il punto d'intersezione non rientra nel range del 5%, va scelto un nuovo punto di prova, quest'ultimo potrebbe essere lo stesso determinato nel passo 6 oppure un altro punto che possa garantire una convergenza più veloce.

8. se il punto di intersezione rientra nei limiti imposti, allora il punto di prova  $a_{p,p}$ ,  $d_{p,i}$  rappresenta il punto di performance  $a_p, d_p$ . Lo spostamento  $d_p$  rappresenta dunque il massimo spostamento strutturale atteso per l'evento sismico.

## 5.5 ANALISI STATICA NON LINEARE SECONDO L'ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N.3274

Secondo la suddetta ordinanza l'analisi statica non lineare può essere adottata anche come metodo per la valutazione della capacità di edifici esistenti. Tale non richiede la conversione nel piano ADRS ma impone che la curva di risposta sia schematizzata come una bilatera elastica perfettamente plastica.

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali che, mantenendo invariati i rapporti relativi fra le forze stesse, vengano tutte scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un punto di controllo sulla struttura (es. un punto in sommità dell'edificio), fino al raggiungimento delle condizioni ultime.

Il metodo si articola nei seguenti passi:

- determinazione di un legame forza-spostamento generalizzato tra la risultante delle forze applicate ("taglio alla base"  $F_b$ ) e lo spostamento  $d_c$  di un "punto di controllo", usualmente scelto come il baricentro dell'ultimo piano;
- determinazione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà a comportamento bi-lineare equivalente;
- determinazione della risposta massima in spostamento di tale sistema con utilizzo dello spettro di risposta elastico.

### 5.5.1 Determinazione legame forza-spostamento generalizzato (Curva di capacità)

Devono essere applicati all'edificio almeno due distinte distribuzioni di forze orizzontali, applicate ai baricentri delle masse a ciascun piano:

- una distribuzione di forze proporzionali alle masse;
- una distribuzione di forze proporzionali al prodotto delle masse per la deformata corrispondente al primo modo di vibrazione;

Tutti i passi successivi devono essere eseguiti per entrambe le distribuzioni di forze eseguendo le verifiche di duttilità e di resistenza di ciascun elemento/meccanismo per la distribuzione più sfavorevole.

L'analisi deve essere spinta fino al superamento dello stato limite oggetto della verifica. Il diagramma risultante ha nelle ascisse lo spostamento del nodo di controllo e nelle ordinate il taglio alla base.

#### 5.5.1.1 Passaggio al sistema SDOF equivalente

Si indichi con  $\phi$  il vettore rappresentativo del primo modo di vibrazione della struttura di interesse per la direzione considerata dell'azione sismica, normalizzato al valore unitario della componente relativa al punto di controllo.

Il "coefficiente di partecipazione"  $\Gamma$  è definito dalla relazione:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (5.47)$$

La forza  $F^*$  e lo spostamento  $d^*$  del sistema equivalente a un grado di libertà sono legati, in campo elastico, alle corrispondenti grandezze dell'edificio dalle relazioni:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (5.48)$$

$$d^* = \frac{d_c}{\Gamma} \quad (5.49)$$

La curva caratteristica forza  $F^*$  - spostamento  $d^*$  del sistema equivalente è approssimata da una bi-lineare definita in base al criterio di uguaglianza delle aree.

In mancanza di valutazioni più accurate, le coordinate del punto di snervamento del sistema bi-lineare equivalente possono essere definite nel seguente modo:

$$F_y^* = \frac{F_{bu}}{\Gamma} \quad (5.50)$$

dove  $F_{bu}$  è la resistenza massima dell'edificio;

$$d_y^* = \frac{F_y^*}{k^*} \quad (5.51)$$

dove  $k^*$  è la rigidezza secante del sistema equivalente ottenuta dall'eguaglianza delle aree come indicato nella Fig. 5.14

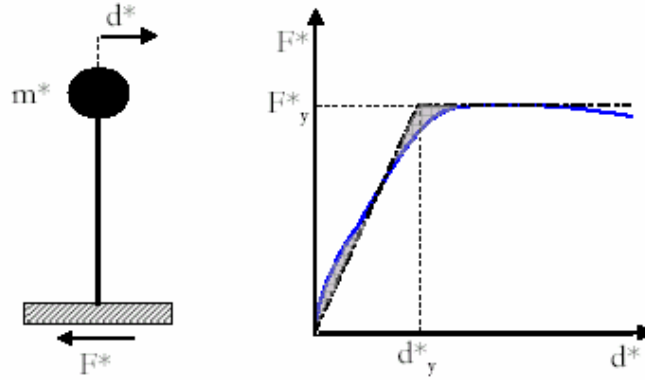


Fig.5.14: Sistema e diagramma bi-lineare equivalente

Il periodo elastico del sistema bi-lineare è dato dall'espressione:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad (5.52)$$

$$\text{dove } m^* = \sum m_i \phi_i \quad (5.53)$$

### 5.5.2 Determinazione dello spostamento massimo

Nel caso che  $T^* \geq T_c$  la risposta in spostamento del sistema anelastico è assunta uguale a quella di un sistema elastico di pari periodo:

$$d_{\max}^* = d_{e,\max}^* = S_{de}(T^*) = \frac{S_{ae}(T^*)}{\varpi^{*2}} \quad (5.54)$$

Nel caso che  $T^* < T_C$  la risposta in spostamento del sistema anelastico è maggiore di quella di un sistema elastico di pari periodo e si ottiene da quest'ultima mediante l'espressione:

$$d_{\max}^* = \frac{d_{e,\max}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_C}{T^*} \right] \geq d_{e,\max}^* \quad (5.55)$$

dove  $q^*$  rappresenta il rapporto tra la forza di risposta elastica e la forza di snervamento del sistema equivalente:

$$q^* = \frac{S_e(T^*)m^*}{F_y^*} \quad (5.56)$$

Se  $q^* \leq 1$  allora si ha  $d_{\max}^* = d_{e,\max}^*$

## Capitolo 6

### PROVA SPERIMENTALE AL VERO SU UN EDIFICIO IN C.A. CON TAMPONATURA

#### 6.1 INTRODUZIONE

La prova sperimentale di seguito illustrata rientra in una programma di ricerca dai contenuti più ampi, in corso di svolgimento, su diversi edifici esistenti con struttura in calcestruzzo armato, avente come obiettivo la valutazione dell'efficacia di diverse tecniche innovative di miglioramento/adeguamento sismico. Gli edifici oggetto di questa ricerca, tutti progettati e costruiti per resistere ai soli carichi verticali in accordo a normative tecniche oramai superate, sono destinati ad essere demoliti nell'ambito della dismissione dell'ex area industriale di Bagnoli. Il gruppo di ricerca, coordinato dal prof. F.M. Mazzolani, ha quindi proposto di eseguire una demolizione intelligente, da cui l'acronimo del progetto di ricerca «ILVA Intelligent DEMolition» (ILVAIDEM), attraverso prove sperimentali a collasso su tali edifici (Mazzolani et al., 2004a, 2004b, 2004c; Della Corte et al., 2004). Le attività coinvolgono soggetti istituzionali, accademici e industriali. Nell'ambito della campagna di indagini sperimentali saranno testati differenti sistemi di miglioramento/adeguamento sismico, che prevedono l'inserimento nelle strutture esistenti di diversi tipi di controventi, nonché vari interventi di riparazione sismica mediante l'applicazione di materiali compositi con fibre di carbonio.

La possibilità di effettuare una sperimentazione su un edificio esistente consente di superare tutte quelle limitazioni che, purtroppo, una sperimentazione eseguita in laboratorio su modelli strutturali costruiti ad hoc, non riesce a superare. Si pensi, a titolo di esempio, agli effetti scala connessi alla realizzazione di prototipi in scala ridotta, o alle difficoltà connesse con la riproduzione delle reali condizioni al contorno, delle effettive imperfezioni costruttive, dello stato di degrado dei materiali (corrosione delle armature, degrado de calcestruzzo). Sfortunatamente, è rara la possibilità di poter sperimentare strutture reali. Inoltre, quando ciò avviene, per evitare il danneggiamento degli elementi non strutturali, è possibile condurre prove sperimentali che solitamente consentono di saggiare solo la risposta elastica della struttura. Pertanto, la sperimentazione al collasso di costruzioni esistenti rappresenta senza dubbio una opportunità eccezionale, che dovrebbe essere colta quando possibile. Questo è il caso della prova sperimentale illustrata in questo Capitolo.

La sperimentazione di seguito illustrata è stata condotta su un edificio reale in calcestruzzo armato. L'edificio è stato provato a collasso sotto azioni orizzontali nella sua configurazione originaria in modo tale da tenere in conto della presenza della tamponatura e di tutti gli altri elementi costruttivi (partizioni interne, rivestimenti, serramenti). Il Capitolo è strutturato in tre parti. La prima parte è dedicata alla descrizione del fabbricato oggetto di studio (Paragrafo 6.2); la preparazione della prova sperimentale è illustrata nella seconda parte (Paragrafo 6.3); nella terza ed ultima parte sono sintetizzati i risultati ottenuti (Paragrafo 6.4).

## 6.2 DESCRIZIONE DEL FABBRICATO

Il fabbricato in oggetto risale agli inizi degli anni '80, ed in origine era stato adibito ad uso uffici. Alcune fotografie dell'edificio sono riportate nelle Figure 6.1a e 6.1b.

Esso si presenta di forma rettangolare costituito da 2 piani fuori terra, aventi dimensioni in pianta pari a 18,50m x 12,00m.

Alcuni elaborati grafici sono riportati nelle Figure da 6.2 a 6.10. In particolare le piante delle fondazioni, del piano terra e del piano primo sono illustrate rispettivamente nelle Figure 6.2, 6.3 e 6.4. Le sezioni longitudinale e trasversale sono mostrate nelle Figure 6.5 e 6.6. Le Figure 6.7 e 6.8 riportano rispettivamente le carpenterie del primo e del secondo impalcato. Infine, una vista assonometrica della sola struttura in calcestruzzo armato è presentata in Figura 6.9, mentre alcuni particolari costruttivi relativi alle tramezzature interne ed alle tompagnature esterne sono forniti nella Figura 6.10. L'edificio è realizzato in calcestruzzo armato, con telai disposti prevalentemente nella direzione del lato lungo. I solai sono di tipo latero-cementizio gettato in opera, con spessore pari a 24 cm (quota +5.10m) e 22 cm (quota +9.45m). Nei due impalcati è inoltre presente un travetto di ripartizione di larghezza pari a 15 cm. I pilastri, disposti su 3 file longitudinali, sono in numero di 17 per piano, ed hanno tutti forma quadrata con lato di 30 cm.

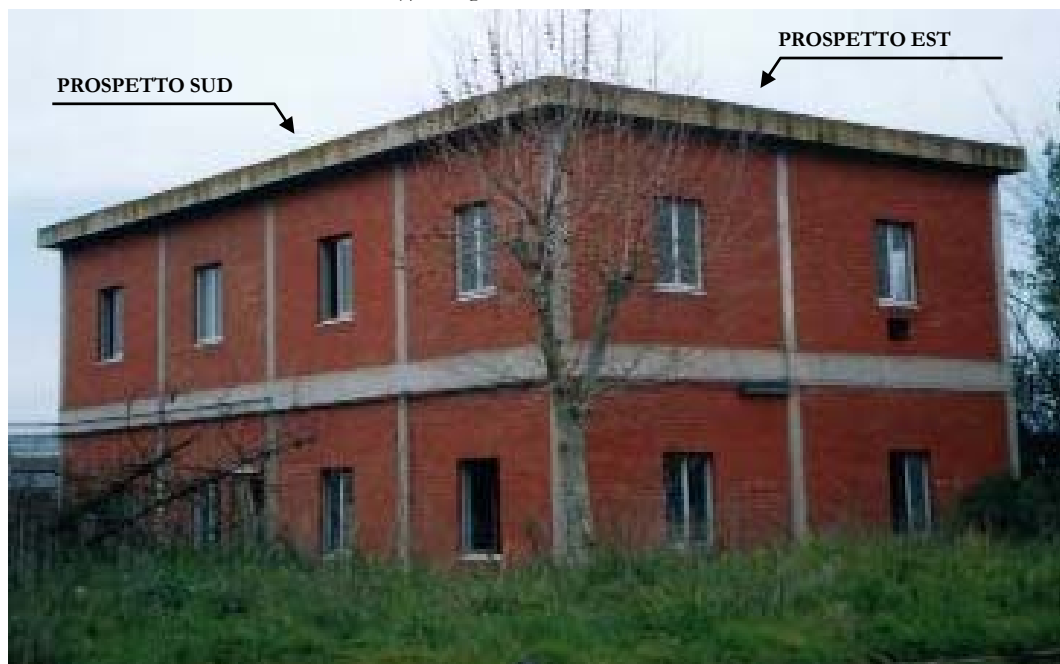
La tipologia della scala interna costituita da due rampe è a soletta rampante, con spessore della soletta pari a 15 cm, mentre i gradini sono riportati in calcestruzzo magro. I pianerottoli di riposo e di arrivo sono realizzati con un solaio in calcestruzzo di spessore  $h = 15$  cm. I gradini, in numero di 11 per ogni rampa, presentano alzata  $a = 18$  cm, e pedata  $p = 30$  cm. La larghezza della rampa è pari a 92 cm.

Le fondazioni sono di tipo diretto a travi rovesce, disposte nella direzione dei telai perimetrali.

La muratura perimetrale (Fig. 6.10) si compone di una fodera interna costituita da blocchi di calcestruzzo e lapillo (spessore 10cm) e da una fodera esterna di mattoni semipieni (spessore 12cm). Tra le due fodere è presente una camera d'aria di 5 cm di spessore. La muratura interna (Fig. 6.10) è costituita da blocchi di calcestruzzo e lapillo (spessore 10cm).



(a) Fotografia lato Nort-Ovest.



(a) Fotografia lato Sud-Est.

Fig. 6.1: Il fabbricato oggetto di studio.

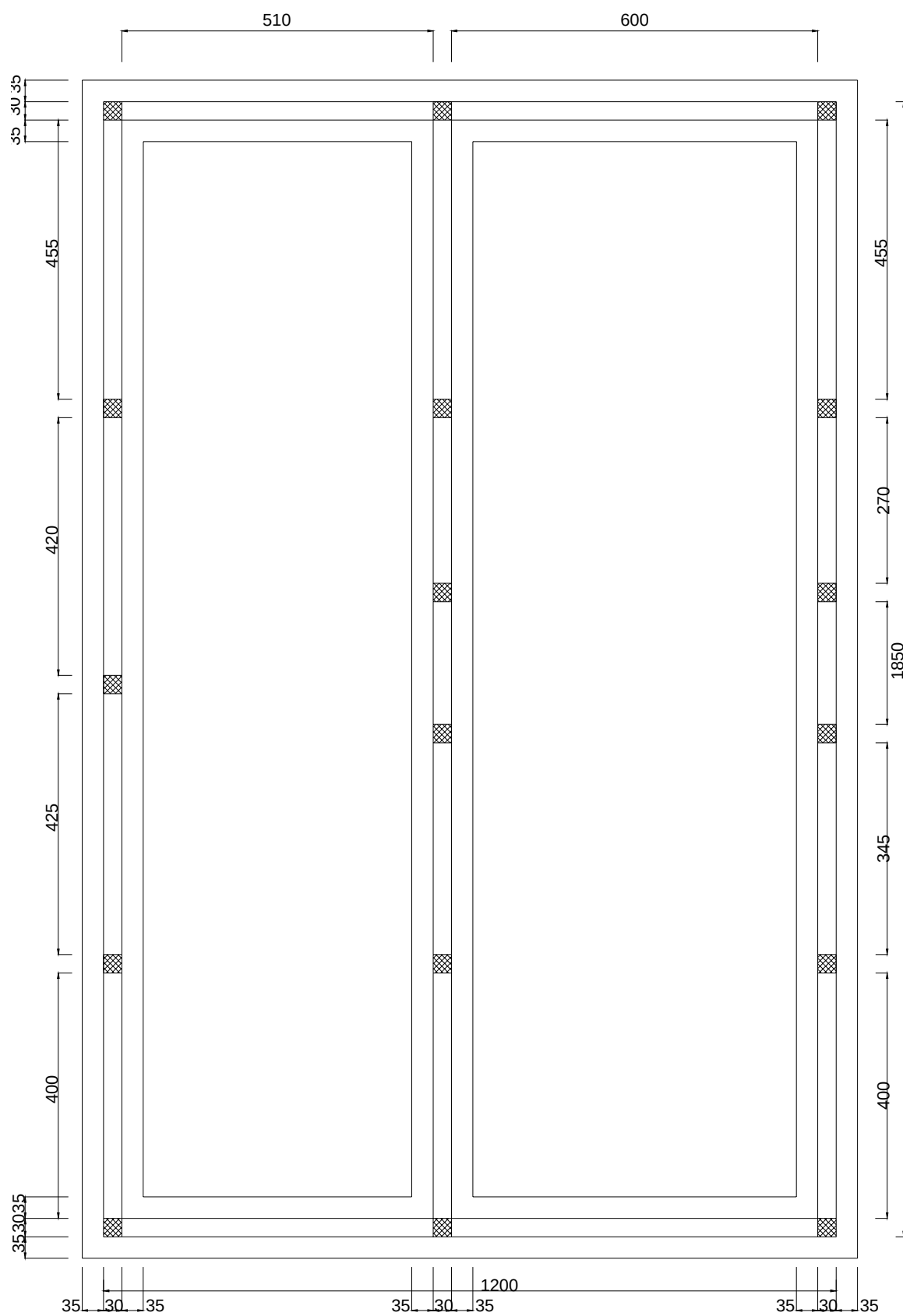


Fig. 6.2: Pianta fondazioni.



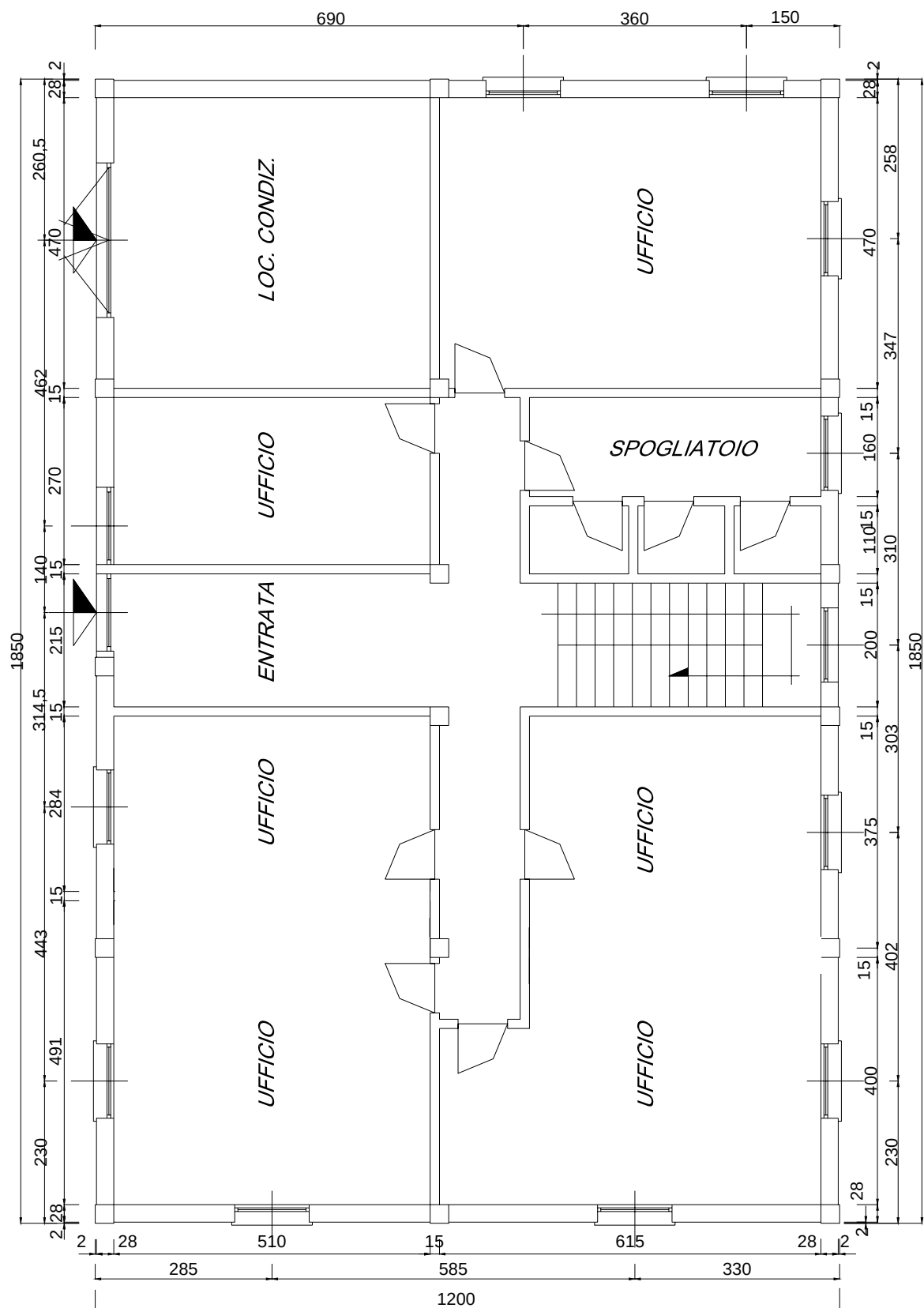


Fig. 6.3: Pianta piano terra.

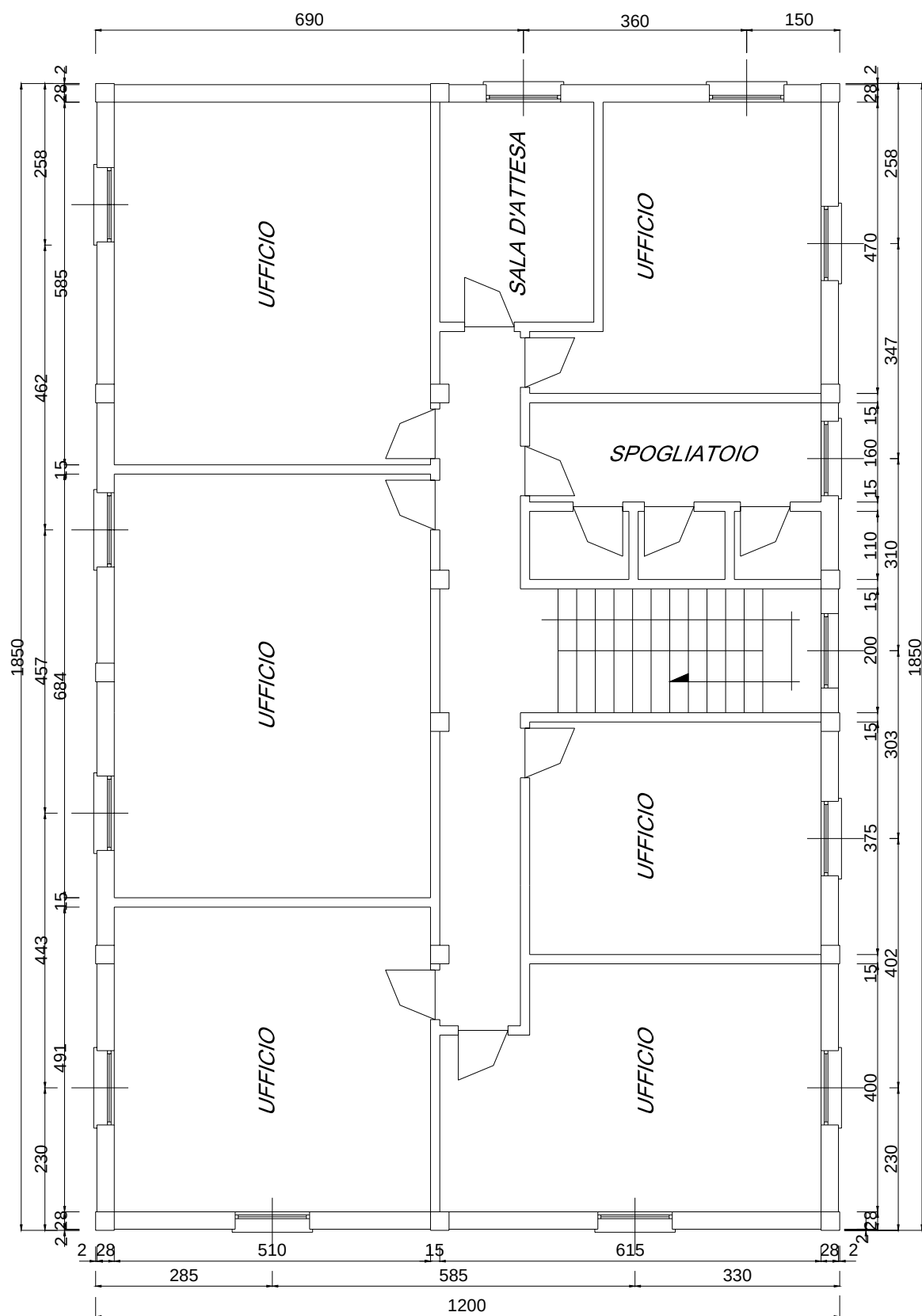


Fig. 6.4: Pianta piano primo.

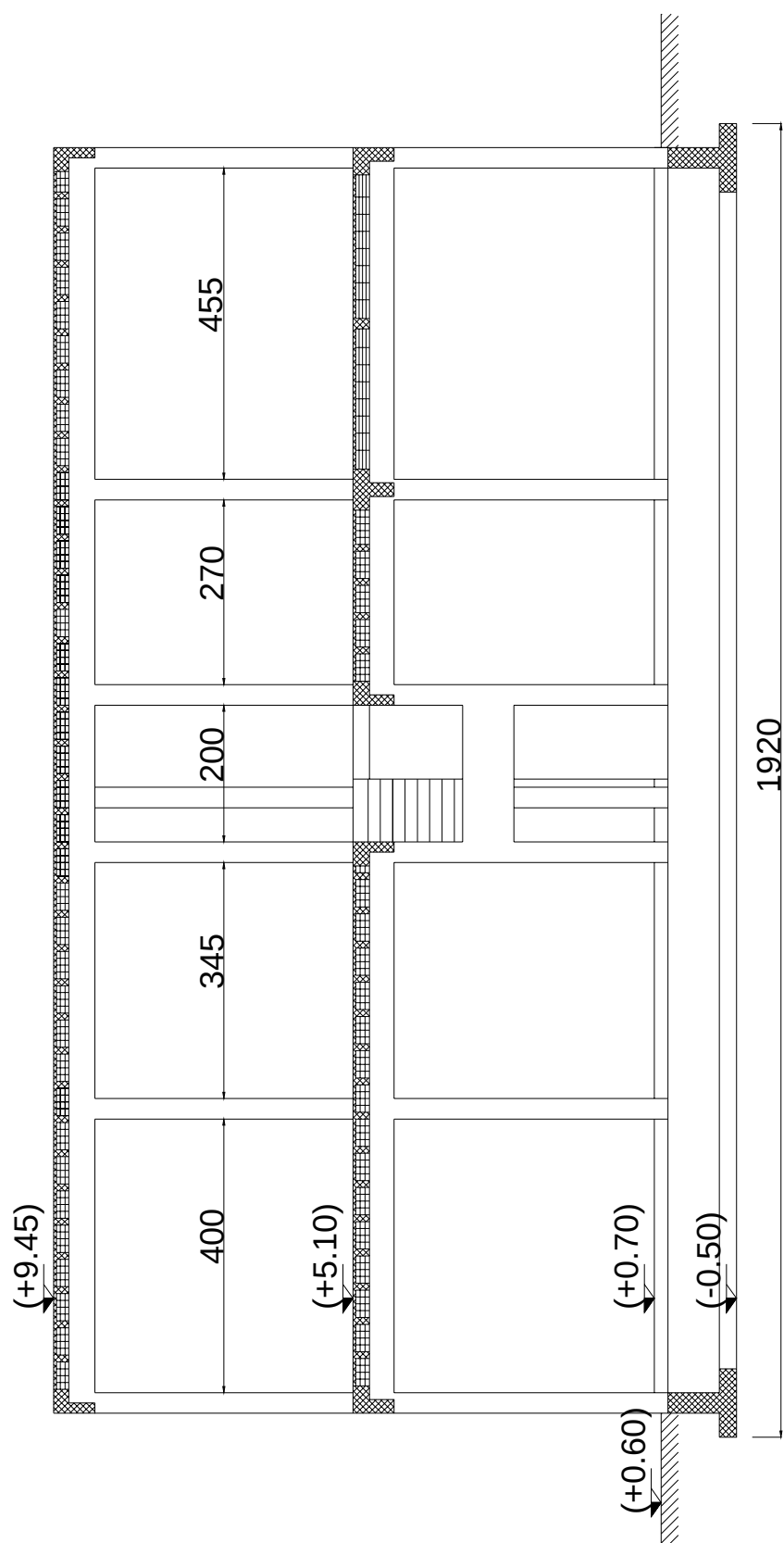


Fig. 6.5: Sezione longitudinale.

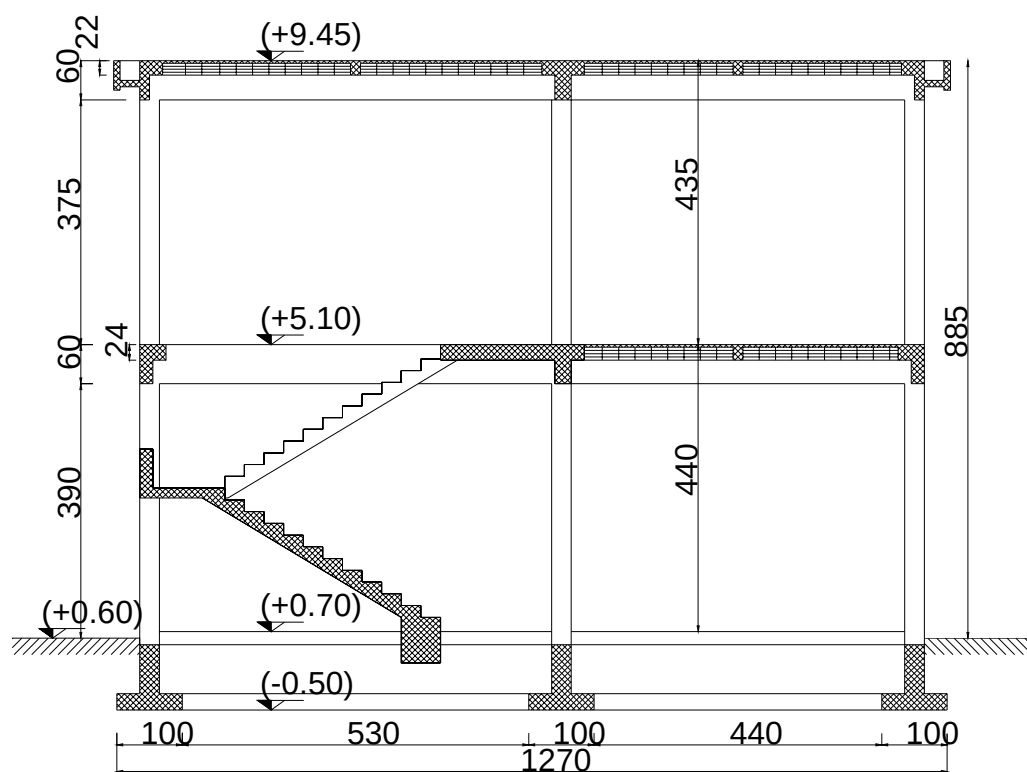
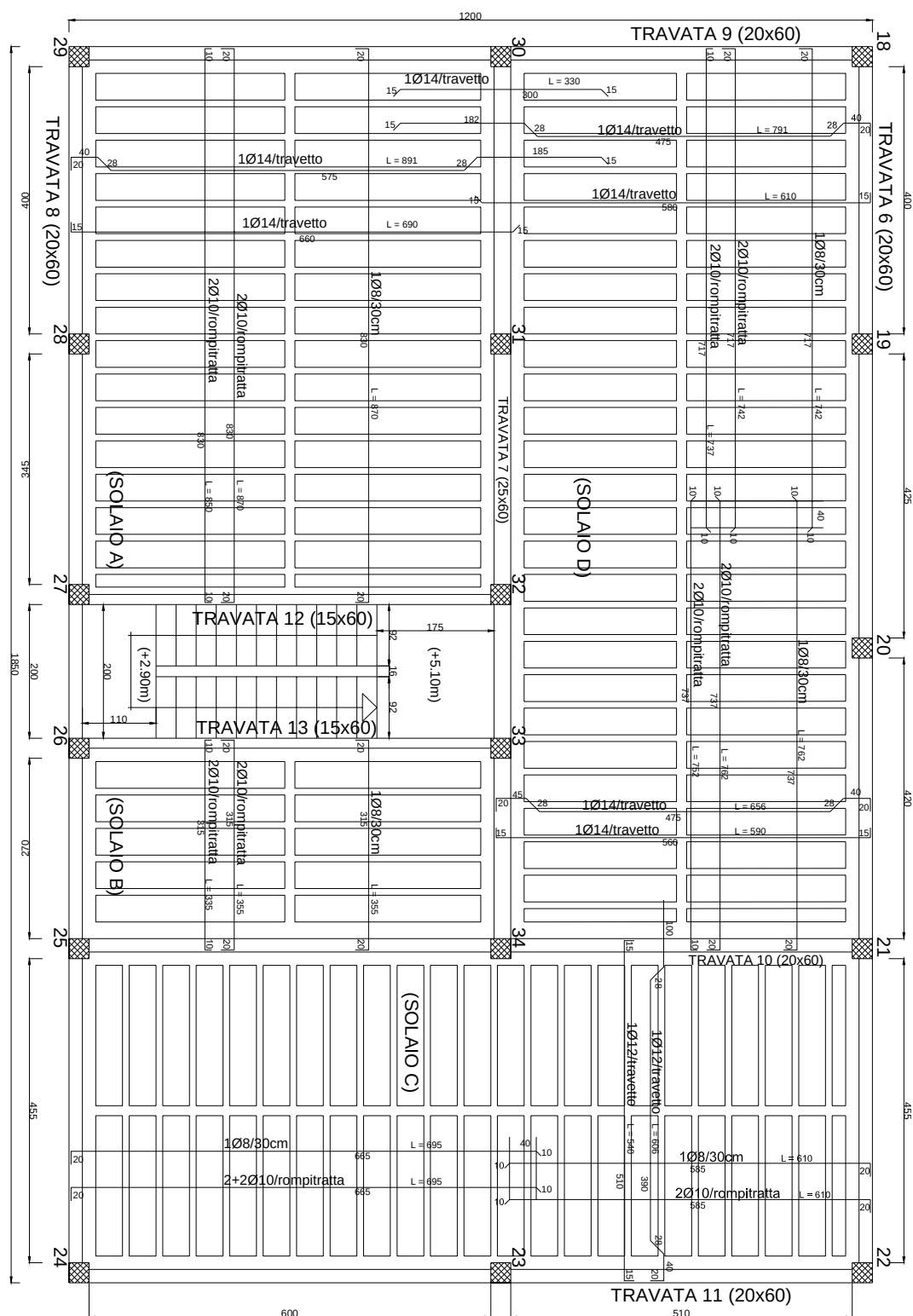


Fig. 6.6: Sezione trasversale.



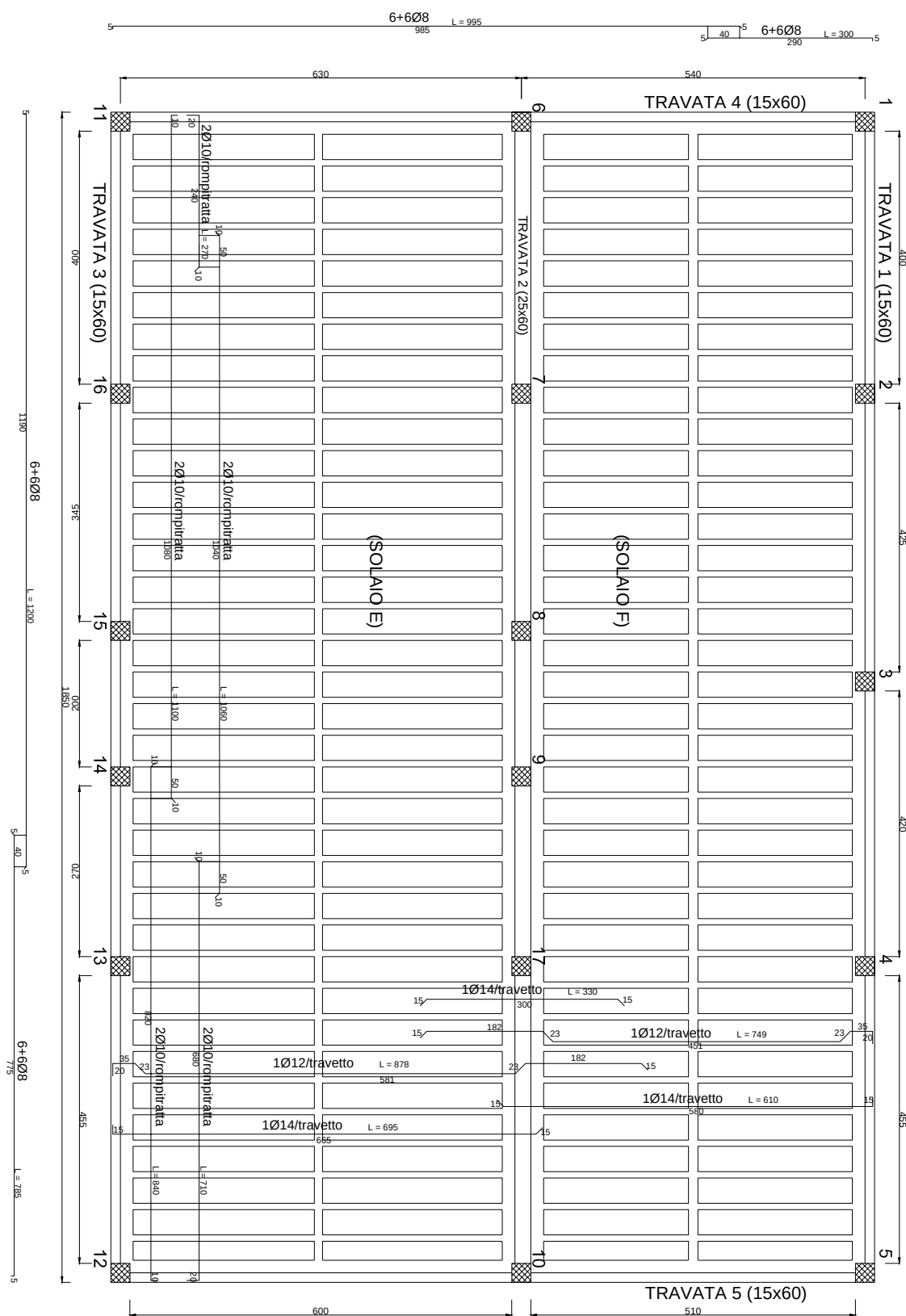


Fig. 6.8: Carpenteria secondo impalcato (copertura).

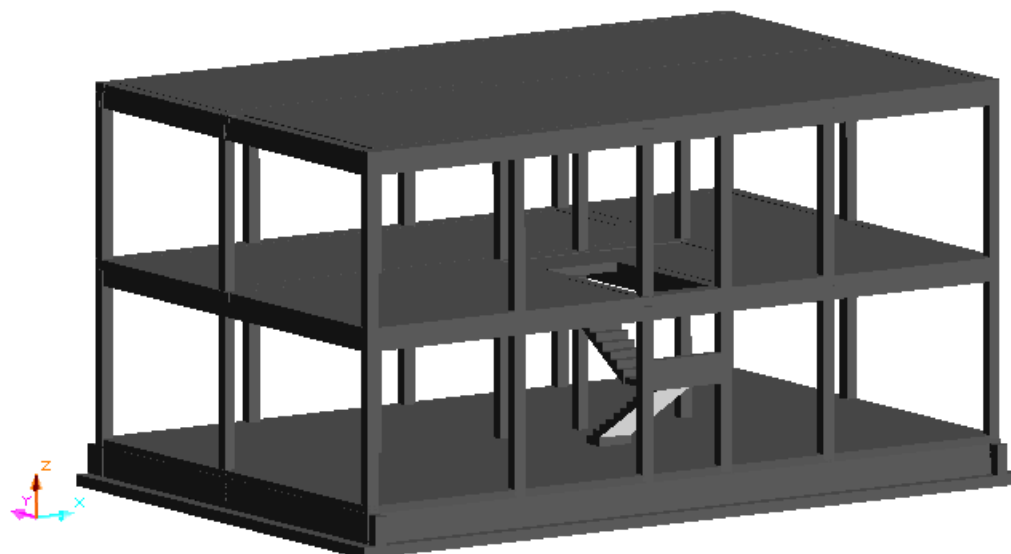


Fig. 6.9: Carpenteria secondo impalcato.

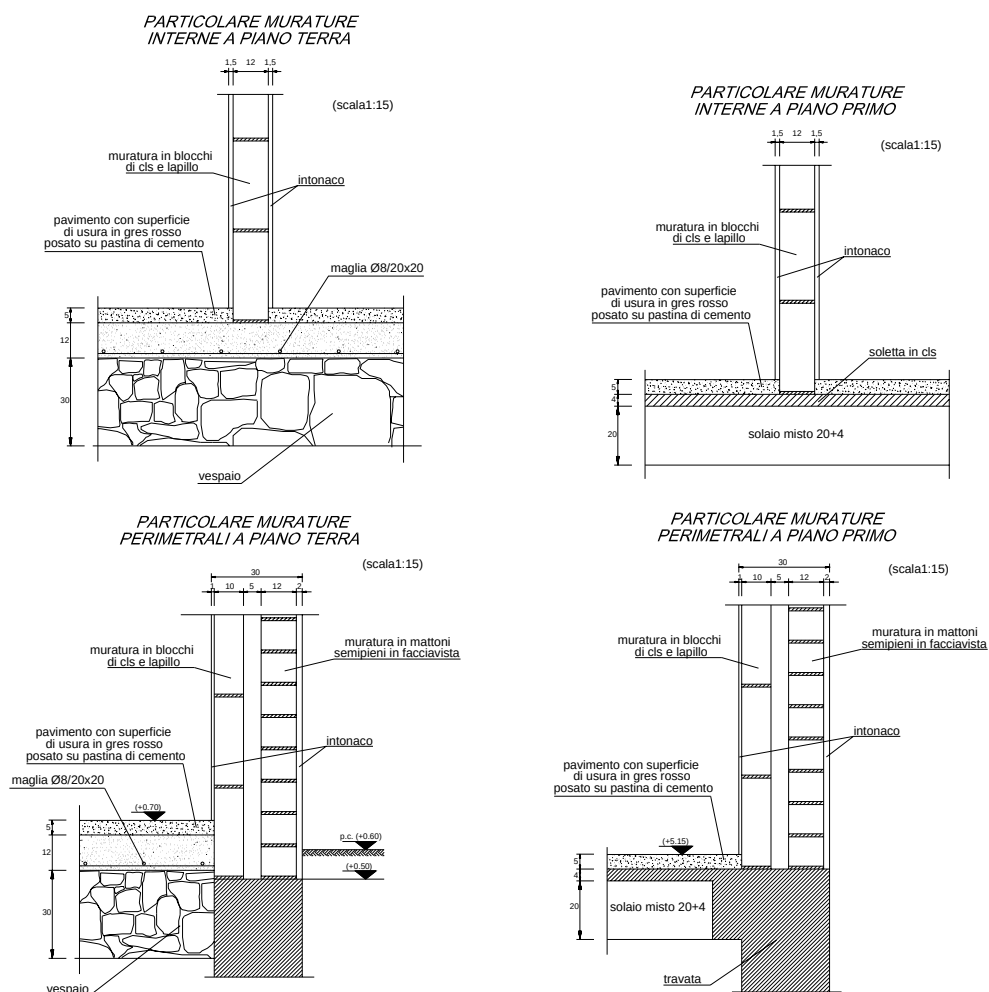


Fig. 6.10: Particolari costruttivi murature interne e perimetrali.

Come gran parte del patrimonio edilizio italiano risalente agli inizi anni '80, anche l'edificio oggetto di studio è stato progettato per soli carichi verticali, e quindi in assenza delle opportune regole sismiche previste dalla normativa vigente per ridurre la vulnerabilità ai terremoti. La mancanza di adeguati dettagli costruttivi e di una appropriata gerarchia delle resistenze tra gli elementi strutturali conduce ad un comportamento sismico globale non soddisfacente, con formazione di un meccanismo di collasso di tipo fragile a travi forti e pilastri deboli. La tipologia costruttiva con telai portanti prevalentemente orientati in una direzione all'epoca era molto diffusa: infatti permetteva di ridurre i costi, di semplificare la realizzazione e di avere la massima libertà di organizzazione degli spazi interni, relegando le travi emergenti al perimetro dell'edificio ed agli allineamenti coincidenti con i corridoi.

### 6.2.1 Carichi agenti

L'analisi dei carichi è stata condotta non solo sulla base delle indicazioni degli elaborati grafici di progetto, ma anche sull'accertamento diretto della presenza di determinate tipologie edilizie riscontrate nei suddetti elaborati. In seguito a tale analisi sono stati ottenuti i seguenti carichi unitari:

- solaio primo piano:  $690 \text{ Kg/m}^2$ ;
- solaio copertura:  $492 \text{ Kg/m}^2$ ;
- scala:  $960 \text{ Kg/m}^2$ ;
- pareti esterne:  $240 \text{ Kg/m}^2$ .

Partendo da questi carichi unitari ed ipotizzando di applicare tutta la massa gravante sull'edificio ai due impalcati (ipotesi solitamente invocata nell'ambito dell'analisi sismica degli edifici nei quali gli impalcati vengono assimilati a diaframmi rigidi) sono state ottenute le seguenti masse:

- primo impalcato: 20248 Kg;
- secondo impalcato: 14979 Kg.



## 6.3 PROVA SPERIMENTALE

### 6.3.1 Apparato di prova

L'edificio è stato sottoposto ad un carico orizzontale che, simulando un'azione di natura sismica, è stata applicata ad una quota tale da rappresentare la risultante di una distribuzione di carico triangolare crescente verso l'alto. Gli unici carichi verticali agenti sono stati quelli prodotti dal peso proprio dell'edificio, comprensivo di tutti i pesi derivanti dagli elementi di completamento (tramezzature, serramenti esterni ed interni nonché alcune suppellettili).

Il carico orizzontale è stato applicato mediante 6 martinetti idraulici aventi ciascuno corsa massima pari a 60 cm e portata massima pari a 496 kN in compressione e 264 kN in trazione (corrispondente ad una forza complessiva massima di 2976 kN in compressione e 1584 kN in trazione). Essi sono stati collegati ad una pompa idraulica attraverso un circuito tale da garantire in ogni istante la stessa pressione (tutti i martinetti, in un certo istante, applicano la stessa forza). I martinetti sono stati posti ad una quota di 731 cm e sono stati distanziati planimetricamente l'uno dall'altro di 364 cm.

Il carico è stato trasferito ai due impalcati dell'edificio attraverso una struttura di ripartizione reticolare in acciaio. La struttura di contrasto è stata realizzata mediante una struttura reticolare in acciaio avente fondazione zavorrata. In particolare, la zavorra è stata realizzata mediante 6 container riempiti di terreno e resi solidali alla struttura reticolare superiore. Una vista planimetrica dell'apparato di prova è fornita in Figura 6.11a, mentre una sezione trasversale è riportata in Figura 6.11b. Due fotografie raffiguranti la struttura di contrasto, la struttura di ripartizione ed i martinetti sono illustrate in Figura 6.12.

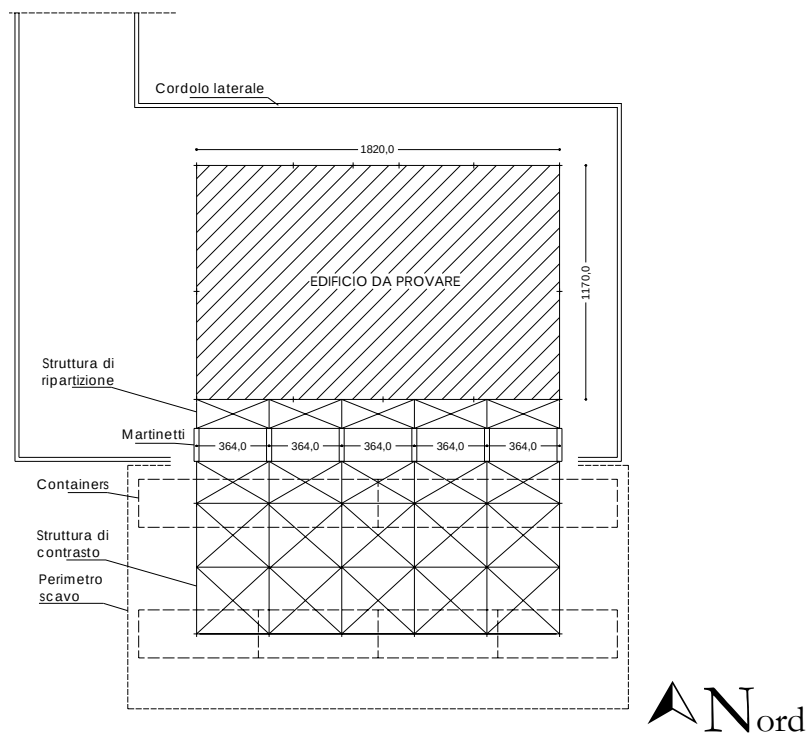
### 6.3.2 Protocollo di carico

Il protocollo di carico applicato ha previsto tre cicli di carico. In particolare, il primo ciclo è stato realizzato prima spingendo la struttura fino al carico totale di +1872 kN, poi invertendo il carico fino a raggiungere il valore di -1583 kN (massima capacità dei martinetti a trazione), infine il carico è stato annullato. Con il secondo ciclo, analogamente al primo, si è applicata una forza massima di compressione pari a +2106 kN ed un carico di trazione pari a -1572 kN. Il terzo ciclo, avente lo scopo di portare la struttura ad un livello di danneggiamento molto elevato, ha previsto la spinta dell'edificio fino al completo superamento della massima capacità portante. La storia di carico è stata illustrata in Figura 6.13.

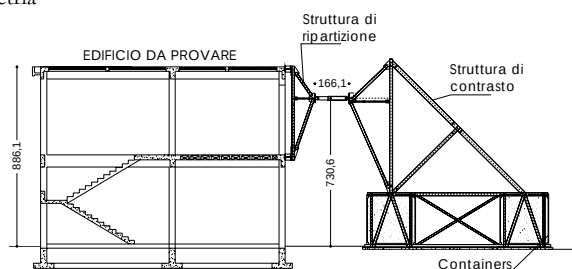
### 6.3.3 Strumentazione

Gli spostamenti dell'edificio sono stati monitorati attraverso una Stazione Totale Zeiss-Trimble S10 (teodolite laser con precisione di 0.1 mm) mediante l'applicazione di target riflettenti. In particolare, sono stati monitorati 8 punti significativi, 4 alla quota del secondo impalcato (punti 1, 2, 3, 4) e 4 alla quota del primo (punti 5, 6, 7, 8). Le misure sono state effettuate alla fine di ogni fase di carico. In Figura 6.14 è mostrato il posizionamento della stazione di misura e dei target riflettenti.

La forza totale agente è stata ricavata attraverso la misura della pressione agente, la quale è stata monitorata mediante un manometro digitale avente precisione di 1 bar (corrispondente ad una forza totale di 4.3 kN in compressione e 2.3 kN in trazione).



(a) Planimetria



(b) Sezione trasversale

Fig. 6.11: Apparato di prova



Fig. 6.12: Strutture di contrasto e di ripartizione del carico.

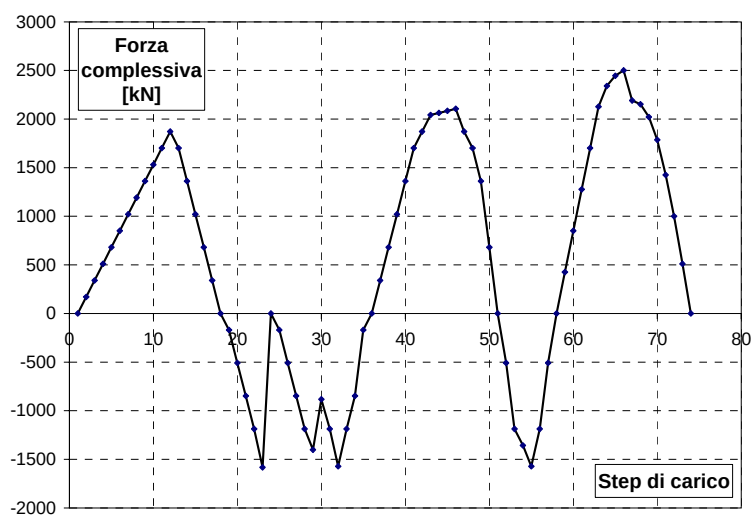


Fig. 6.13: Storia di carico.

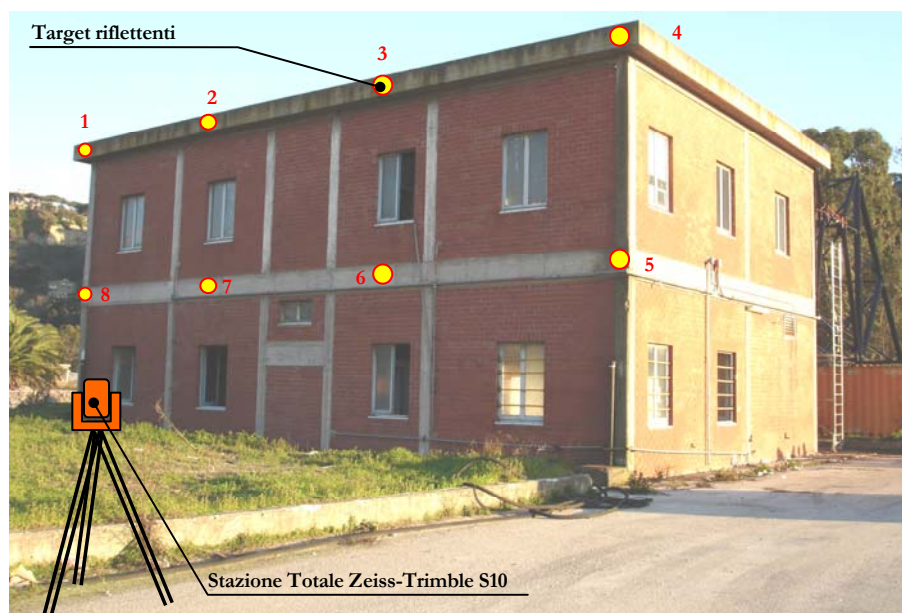


Fig. 6.14: Posizionamento stazione di misura e target riflettenti

## 6.4 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati della prova sono illustrati in termini di curve forza totale agente ( $F$ ) – spostamenti di impalcato ( $y$ ) nelle Figure 6.15a e 6.15b. In particolare, la Figura 6.15a riporta gli spostamenti del secondo impalcato, mentre la Figura 6.15b quelli del primo. Nelle Figure 6.16 la forza totale agente è invece rappresentata come funzione degli spostamenti medi di interpiano ( $d$ ) adimensionalizzati rispetto alle altezze di interpiano ( $h$ ). In particolare, le curve  $F - d/h$  sono illustrate rispettivamente per il secondo impalcato nella Figura 6.16a e per il primo impalcato nelle Figure 6.16b (primi due cicli e tratto iniziale del terzo ciclo) e 6.16c (per l'intera prova).

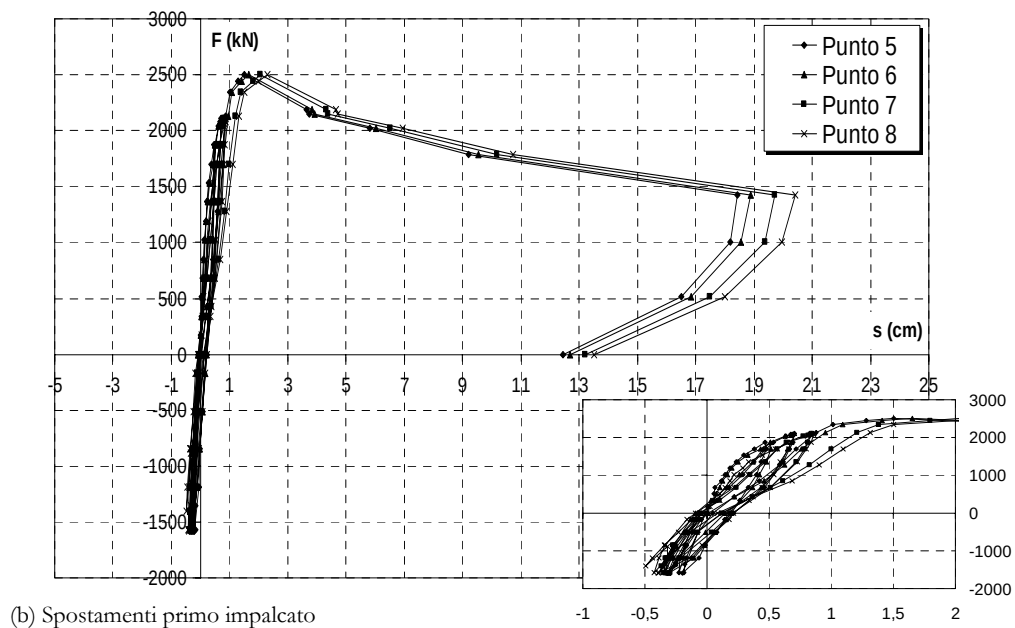
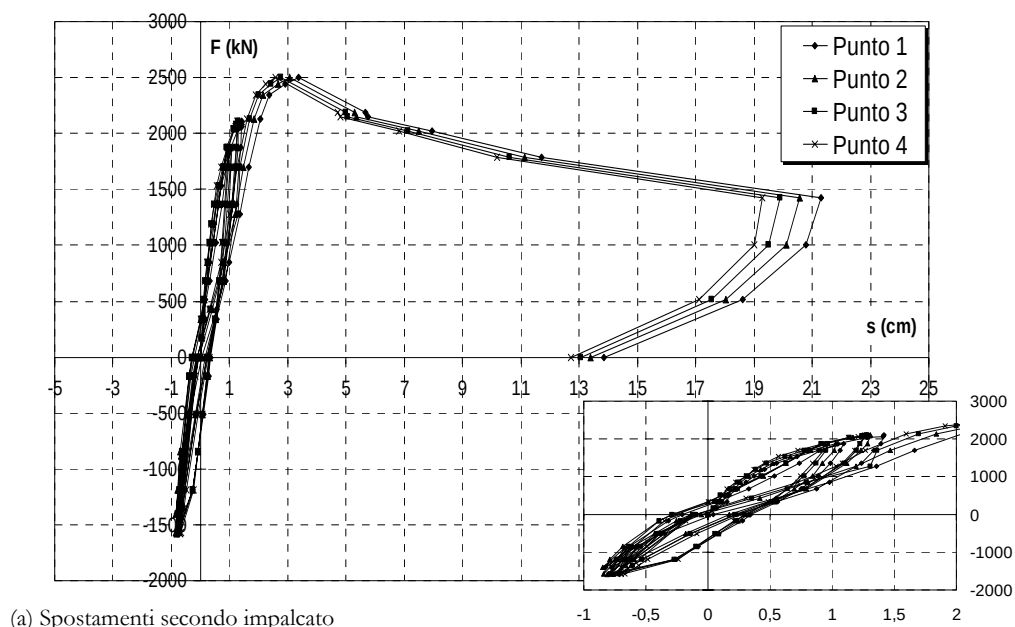
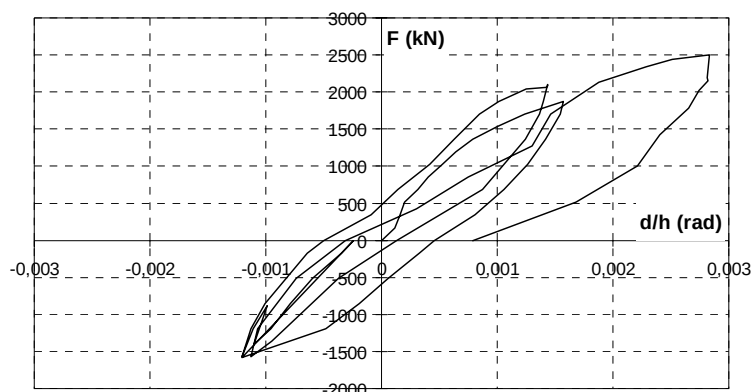
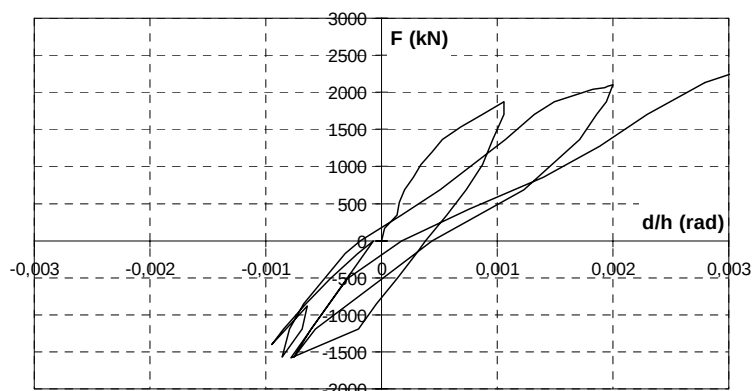


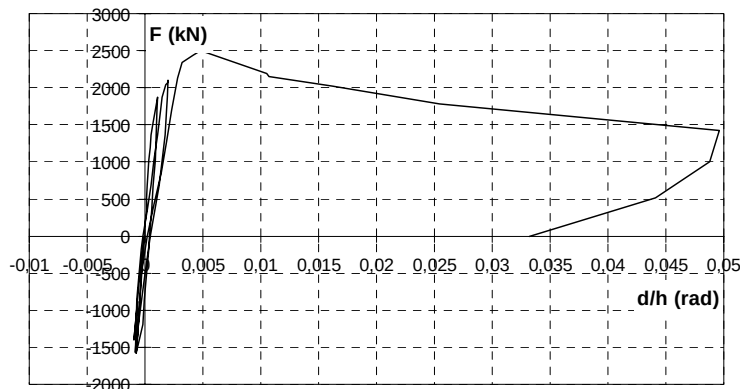
Fig. 6.15: Risposta sperimentale in termini di curve F-s.



(a) secondo impalcato (intera prova)



(b) Primo impalcato (primi due cicli e tratto iniziale terzo ciclo)



(c) Primo impalcato (intera prova)

Fig. 6.16: Risposta sperimentale in termini di curve  $F$ - $d/h$ .

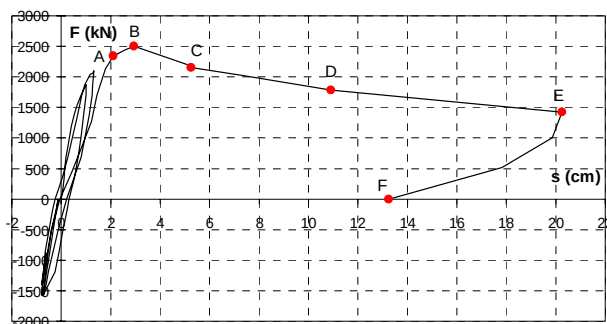
Durante la prova è stato possibile riconoscere tre fasi comportamentali distinte: (1) Primo ciclo di carico; (2) secondo ciclo di carico; (3) terzo ciclo di carico.

Durante il primo ciclo di carico non sono stati notati danneggiamenti evidenti nella fodera esterna delle compagnature perimetrali, mentre lesioni diffuse di modesta ampiezza (minore di 1 mm) sono state rilevate nella fodera interna delle compagnature perimetrali e nelle tramezzature interne; soprattutto per quelle pareti orientate nella direzione di carico. In corrispondenza del massimo carico (+1872 kN) è stato misurato uno spostamento medio di 1.004 cm per il secondo impalcato e di 0.414 cm per il primo. Allo scarico, in corrispondenza del minimo carico (-1583 kN), gli spostamenti medi al secondo ed al primo impalcato sono risultati rispettivamente di -0.757 cm e -

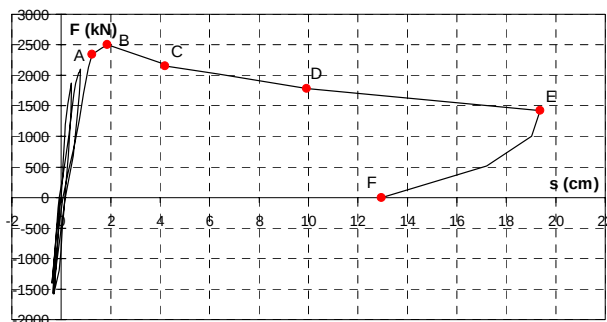
0.305 cm. I valori massimi di  $d/b$  sono stati pari a 0.0014 e 0.0011 rispettivamente per il secondo e per il primo impalcato. La rigidezza laterale iniziale dell'edificio, considerando lo spostamento medio del secondo piano, è stata pari a 3166 kN/cm.

La risposta strutturale durante il secondo ciclo di carico è stata caratterizzata da una riduzione significativa di rigidezza e da un modesto livello di danneggiamento. In particolare, è stata notata soprattutto al primo piano una certa estensione del quadro fessurativo già generatosi durante il primo ciclo di carico e, sotto l'azione della massima spinta, è stata osservata l'apertura di alcune fessure nella fodera esterna della parete perimetrale Ovest (lato opposto alla struttura di contrasto) in corrispondenza del primo piano (tra le due finestre). Tali fessure erano dirette a  $45^\circ$  ed avevano una ampiezza limitata (minore di 1mm). I valori massimi di  $d/b$  sono stati per il secondo e per il primo impalcato rispettivamente pari a 0.0016 e 0.0020. È interessante notare come, diversamente da quanto avvenuto nel primo ciclo, il valore di  $d/b$  risulta in questo caso maggiore per il primo piano, ciò spiega il maggiore incremento dello stato fessurativo in corrispondenza del piano inferiore. Inoltre tale osservazione lascia intuire che l'evoluzione della risposta strutturale tende verso la formazione di un meccanismo di piano al primo ordine. Gli spostamenti medi del secondo e del primo impalcato in corrispondenza del massimo carico (2106 kN) sono stati rispettivamente 1.318 cm e 0.779 cm, mentre per il minimo carico applicato (-1572 kN) è stato misurato uno spostamento medio di -0.717 al secondo impalcato e di -0.295 al primo impalcato. La rigidezza iniziale è stata di 1161 kN/cm, pari a circa il 37% di quella misurata all'inizio del primo ciclo.

Le fasi significative dell'evoluzione del comportamento durante il terzo ciclo di carico, individuate dai punti A, B, C, D, E, F, possono essere individuate in Figura 6.17, in cui sono riportate le curve forza totale agente ( $F$ ) – spostamenti medi di impalcato ( $s$ ) rispettivamente per il secondo (Fig. 6.17a) e per il primo (Fig. 6.17b) impalcato.



(a) secondo impalcato (intera prova)



(b) Primo impalcato (primi due cicli e tratto iniziale terzo ciclo)

Fig. 6.17: Fasi significative della risposta in termini di curve  $F$ - $s_{\text{medio}}$  durante il III ciclo.

Questa fase di carico è stata caratterizzata da una ulteriore riduzione di rigidezza (926 kN/cm, pari al 29% di quella misurata all'inizio del primo ciclo ed al 80% di quella misurata all'inizio del secondo ciclo), dal raggiungimento della massima capacità portante (2501 kN) e dal completo sviluppo del meccanismo di collasso.

Nel seguito sarà illustrata sinteticamente l'evoluzione della risposta sperimentale osservata durante il terzo ciclo di carico. Sarà adottata la seguente simbologia:  $s_1$  e  $s_2$ : spostamenti medi al primo ed al secondo impalcato;  $(d/h)_1$  e  $(d/h)_2$ : spostamenti medi di interpiano adimensionali al primo ed al secondo impalcato.

Come precedentemente introdotto, durante la prova è stato possibile individuare 6 eventi significativi:

- La risposta strutturale perde marcatamente la sua linearità per un carico totale di  $F = 2340$  kN (punto A). La vista del prospetto Ovest dell'edificio in prossimità di tale evento è illustrata in Figura 6.18a. In corrispondenza di tale punto, al primo piano, è stata osservata l'apertura di una fessura diretta a  $45^\circ$  nella fodera esterna della parete perimetrale Est (lato struttura di contrasto) (Fig. 6.18a), mentre si è incrementata l'ampiezza delle fessure già notate sulla parete Ovest durante il secondo ciclo di carico (Fig. 6.18b). Ciò consente di affermare che tali pareti si sta sviluppando il meccanismo di collasso associato alla rottura diagonale per trazione. I valori degli spostamenti e degli spostamenti di interpiano adimensionali per i due impalcati erano:  $s_1 = 1.249$  cm,  $s_2 = 2.106$  cm,  $(d/h)_1 = 0.0028$ ,  $(d/h)_2 = 0.0020$ .
- La massima capacità portante laterale è stata di  $F = 2501$  kN (punto B). Essa è stata attinta per uno spostamento medio pari a  $s_2 = 2.935$  cm in copertura e pari a  $s_1 = 1.873$  cm al primo impalcato. Gli spostamenti di interpiano erano  $(d/h)_1 = 0.0042$ ,  $(d/h)_2 = 0.0024$ . Per questo valore del carico il danneggiamento si concentrava soprattutto negli elementi costruttivi del primo piano. Ciò è coerente con il maggiore incremento di  $(d/h)_1$  rispetto a  $(d/h)_2$ . Per tale livello di deformazioni tutte le pareti esterne del primo piano dirette secondo la direzione di carico presentavano chiari quadri fessurativi e/o erano notati distacchi tra pareti murarie e struttura in calcestruzzo armato e/o presentavano rotture per schiacciamento locale. Il livello di danneggiamento raggiunto è illustrato per le pareti esterne del lato Ovest e del lato Est rispettivamente nelle Figure 6.19a ed 6.19b. Sul lato Ovest, oltre all'incremento dell'ampiezza delle fessure a  $45^\circ$  nel pannello murario tra le due finestre, in corrispondenza del lato superiore destro della parete adiacente (lato struttura di contrasto) era chiaramente visibile la rottura per schiacciamento locale degli spigoli della tamponatura, dovuta alla concentrazione delle forze orizzontali trasmesse dal telaio in c.a.. Il danneggiamento della tamponatura in questa zona è accompagnato dalla evidente fessurazione della testa del pilastro che converge in tale nodo che preannuncia la rottura a taglio di tale elemento (Fig. 6.19a). Sul lato est, in tutti i pannelli murari del primo ordine compresi tra le finestre ed i pilastri era chiara la rottura a  $45^\circ$  dovuta alle tensioni di trazioni inclinate (collasso per rottura diagonale per trazione) (Fig. 6.19b). Inoltre, anche sul prospetto Est, nello spigolo superiore sinistro della parete dal lato della struttura di contrasto è stato riscontrato lo schiacciamento localizzato della tamponatura. Anche all'interno dell'edificio nelle tramezzature aventi direzione parallela a quella di spinta le ampiezze delle lesioni si erano chiaramente incrementate. Il quadro fessurativo presente in alcuni ambienti interni del primo piano è mostrato nelle Figure 6.20a e 6.20b.

- In corrispondenza del punto C ( $F = 2152$  kN,  $s_1 = 4.187$  cm,  $s_2 = 5.244$  cm,  $(d/h)_1 = 0.0093$ ,  $(d/h)_2 = 0.0023$ ) il danneggiamento si concentra esclusivamente al primo piano. Infatti, l'incremento di spostamento è prodotto esclusivamente dal “*drift*” del primo piano mentre lo spostamento relativo del secondo interpiano subiva una leggera riduzione. La vista del prospetto Ovest dell'edificio è illustrata in Figura 6.21a, mentre il prospetto Est è mostrato in Figura 6.21b. Dall'esame di tali Figure si nota la tendenza verso un meccanismo di collasso di piano in corrispondenza del primo ordine.
- I danni esterni all'edificio in corrispondenza del punto D ( $F = 1787$  kN,  $s_1 = 9.917$  cm,  $s_2 = 10.911$  cm,  $(d/h)_1 = 0.0221$ ,  $(d/h)_2 = 0.0021$ ) sono mostrati per le pareti Ovest ed Est rispettivamente nelle Figure 6.22a e 6.22b. In particolare, negli elementi murari in cui si era innescato il meccanismo di collasso per rottura diagonale per trazione le lesioni a  $45^\circ$  generatesi in precedenza divennero più ampie e, in alcuni casi, altre fessure si aprirono accanto a quelle già esistenti (parete Est, pannello murario lato struttura di contrasto). Nella parete Ovest interessata fino a questo punto dal collasso per schiacciamento locale dello spigolo è stata osservata l'apertura di una fessura a  $45^\circ$  (Fig. 6.22a). Tale fenomeno testimonia come il danneggiamento progressivo di tale elemento faccia evolvere il precedente meccanismo di collasso in un meccanismo per rottura diagonale. In aggiunta, a questo livello di deformazioni è stato osservato il completo sviluppo del collasso per taglio alla testa del pilastro esterno sulla facciata Ovest (lato struttura di contrasto) (Fig. 6.22a). Nella parete Est interessata da un meccanismo misto schiacciamento locale – rottura diagonale (parete lato struttura di contrasto) era evidente il collasso per taglio alla testa del pilastro in corrispondenza dello spigolo di muratura interessato dallo schiacciamento locale (Fig. 6.22b). Sempre in tale elemento murario, in questa fase della prova è avvenuto il crollo di una porzione di fodera esterna in prossimità del pilastro centrale (Fig. 6.22b).
- Al massimo livello di deformazione raggiunta (punto E) gli spostamenti al primo ed al secondo impalcato erano rispettivamente pari a  $s_1 = 19.359$  cm e  $s_2 = 20.261$  cm, mentre i spostamenti di interpiano adimensionalizzati erano  $(d/h)_1 = 0.0432$  e  $(d/h)_2 = 0.0021$ . tali spostamenti sono stati raggiunti per un valore della forza esterna  $F = 1425$  kN. In questa fase il meccanismo di piano al primo ordine era completamente sviluppato ed il livello di danneggiamento era molto rilevante, come illustrato nelle Figure 6.23a ed 6.23b, rispettivamente per il lato Ovest ed Est. Infatti, alla testa del pilastro esterno (facciata Ovest lato struttura di contrasto) era chiaramente osservabile l'apertura delle staffe e la completa espulsione del copriferro per un tratto di circa 50 cm (Fig. 6.23a). Sempre sulle pareti esterne del lato Ovest in questa fase si è verificato il crollo della porzione della fodera esterna posta al disopra della finestra centrale (Fig. 6.23b).
- Lo stato dell'edificio allo scarico completo (punto F) è illustrata nelle Figure 6.24a, 24b, 24c e 24d per gli elementi costruttivi esterni e nelle Figure 6.25a e 6.25b per quelli interni. Le deformazioni permanenti sono rilevanti e localizzate quasi esclusivamente al primo ordine, come confermato dall'entità degli spostamenti e degli spostamenti adimensionalizzati residui ( $s_1 = 12.954$  cm,  $s_2 = 13.250$  cm,  $(d/h)_1 = 0.0289$ ,  $(d/h)_2 = 0.0007$ ). Dall'esame di queste Figure si può notare come il livello di danneggiamento sia elevato e sia concentrato quasi esclusivamente al primo piano. In particolare, oltre ai danni precedentemente manifestatisi la fase di scarico ha prodotto nuovi crolli parziali, soprattutto nella fodera interna delle tamponature



e nelle tramezzature interne. Le deformazioni permanenti indotte alla struttura sono state tali da produrre seri danni non solo negli elementi murari ma anche nella struttura in calcestruzzo armato, tali danni sono maggiormente osservabili nelle zone alla testa ed al piede dei pilastri esterni sui lati Ovest ed Est. In particolare, ad eccezione dei pilastri d'angolo posti dal lato della struttura di contrasto, per i quali è stato osservato un meccanismo di collasso per taglio nella zona superiore, negli altri elementi è stata riscontrata la formazione di cerniere plastiche. Danni rilevanti sono stati rilevati anche all'interno degli edifici. In particolare, tutte le pareti divisorie interne orientate nella direzione del carico applicato erano notevolmente lesionate e, in alcuni casi, le lesioni erano accompagnate da crolli parziali. Il quadro fessurativo in tali elementi era generalmente coerente con il meccanismo di collasso prodottosi (lesioni a  $45^\circ$  dirette ortogonalmente alle isostatiche di trazione). I danni presenti nelle pareti dirette ortogonalmente alla direzione di spinta erano rappresentati esclusivamente da lievi lesioni, quasi tutte localizzate verso la parte superiore o inferiore ed aventi direzione orizzontale. Al primo piano anche le scale, i serramenti interni ed esterni e la pavimentazione si presentavano pesantemente dissestate. In particolare, nelle scale era completo il distacco con le pareti adiacenti ed era evidente la rottura in corrispondenza dell'intersezione tra la prima rampa (in salita) ed il pianerottolo intermedio, fenomeno riconducibile allo spostamento orizzontale relativo rampa-pianerottolo. I serramenti interni ed esterni delle pareti dirette secondo la direzione di carico erano deformati marcatamente. La pavimentazione si era sollevata in diverse zone in modo tale da far presumere la rottura del sottofondo cementizio. Le condizioni degli elementi costruttivi al secondo piano non presentavano, rispetto alle osservazioni fatte in seguito dei primi due cicli di carico, rilevanti evoluzioni intermini di quadro fessurativo.

Un quadro riassuntivo delle prevalenti tipologie di meccanismi di collasso riscontrate nei pannelli murari e nei pilastri è riportato nelle Figure 6.24a e 6.24c, rispettivamente per gli elementi appartenenti al prospetto Ovest ed Est.

Le misure delle componenti di spostamento orizzontali nella direzione di prova effettuate nei diversi punti di misura sono riportate per i due impalcati nelle Figure 6.26a, 6.26c ed 6.26e per il primo piano e nelle Figure 6.26b, 6.26d ed 6.26f per il secondo. Attraverso l'esame di tali Figure è possibile seguire l'evoluzione della deformata degli impalcati nelle sue fasi salienti. In particolare, due principali osservazioni possono essere fatte:

- Per tutti i livelli di spostamento la deformazione laterale della struttura è accompagnata da una rotazione torsionale, a causa della quale la zona Est dell'edificio ha subito maggiori spostamenti laterali. Le rotazioni risultano in assoluto modeste. In particolare, le rotazioni massime degli impalcati per il secondo piano erano di 0.0009 rad (I ciclo) e 0.00110 rad (III ciclo) e per il primo piano erano pari a 0.0011 rad (I ciclo) e 0.00109 rad (III ciclo). Se però si rapportano i massimi spostamenti differenziali allo spostamento medio si riscontra che tale rapporto raggiunge valori abbastanza significativi di 0.17 (I ciclo) e 0.27 (III ciclo) per il primo piano e di 0.59 (I ciclo) e 0.42 (III ciclo) per il secondo piano.
- Il comportamento del secondo impalcato può assimilarsi a quello di un diagramma rigido nel proprio piano. Infatti, gli spostamenti dei punti 4, 3, 2, 1, se si esclude il caso del I ciclo quando il carico vale -1583 kN (Fig. 6.26b), presentano in pianta un andamento abbastanza lineare (Figg. 6.26 b, d, f). Per il primo impalcato (Figg. 6.26

a, c, e), è evidente come i gli spostamenti dei punti 5, 6, 7, 8 si discostano maggiormente dalla linearità sia durante il I ciclo, sia nella fase pre-picco del III ciclo (Figg. 6.26 a, c). Ciò è dovuto in parte alla sua minore regolarità planimetrica (presenza della scale, differente orditura dei solai, presenza di un telaio trasversale posto eccentricamente rispetto al baricentro geometrico) ed in parte al maggiore livello di sollecitazioni che agiscono nel suo piano.



Fig. 6.18a: III ciclo di carico (punto A): Vista del prospetto ovest.



Fig. 6.18b: III ciclo di carico (punto A): Apertura lesioni sulla parete lato Est.

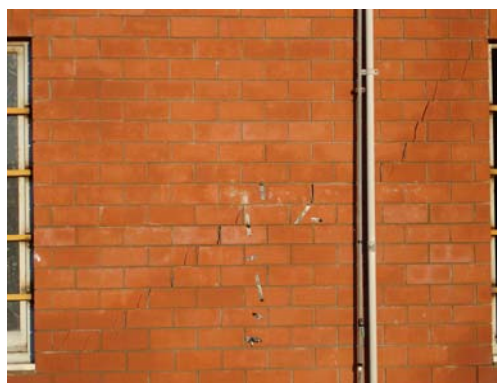


Fig. 6.18c: III ciclo di carico (punto A): Propagazione lesioni sulla parete lato Ovest.

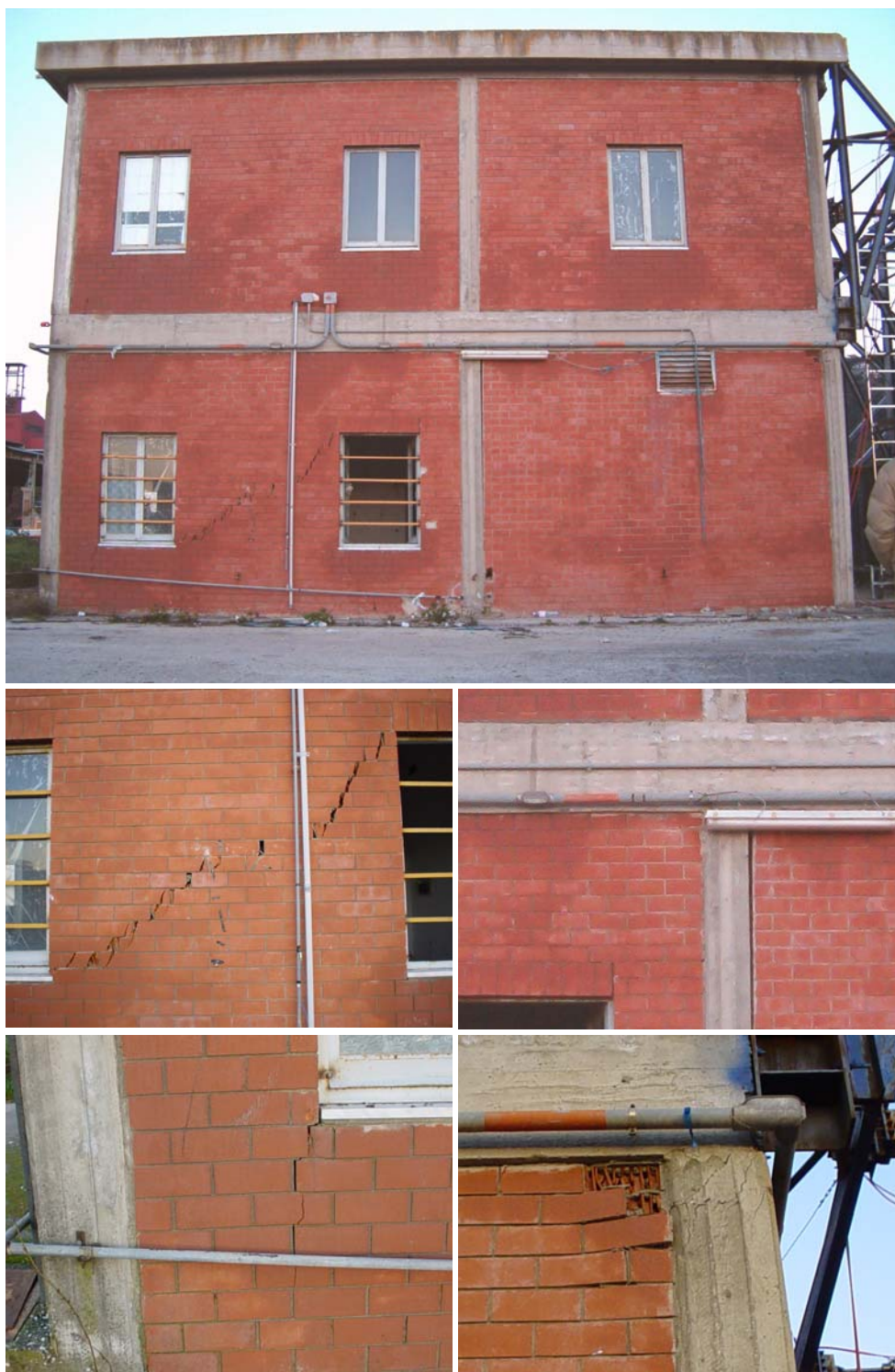


Fig. 6.19a: III ciclo di carico (punto B): Danneggiamento pareti lato Ovest.





Fig. 6.19b: III ciclo di carico (punto B): Danneggiamento pareti lato Est.



Fig. 6.20a: III ciclo di carico (punto B): Danneggiamento all'interno dell'edificio.



Fig. 6.20b: III ciclo di carico (punto B): Danneggiamento all'interno dell'edificio.





Fig. 6.21a: III ciclo di carico (punto C): Danneggiamento pareti lato Ovest.



Fig. 6.21b: III ciclo di carico (punto C): Danneggiamento pareti lato Est.





Fig. 6.22a: III ciclo di carico (punto D): Danneggiamento pareti lato Ovest.



Fig. 6.22b: III ciclo di carico (punto D): Danneggiamento pareti lato Est.





Fig. 6.23a: III ciclo di carico (punto E): Danneggiamento pareti lato Ovest.



Fig. 6.23b: III ciclo di carico (punto E): Danneggiamento pareti lato Ovest.

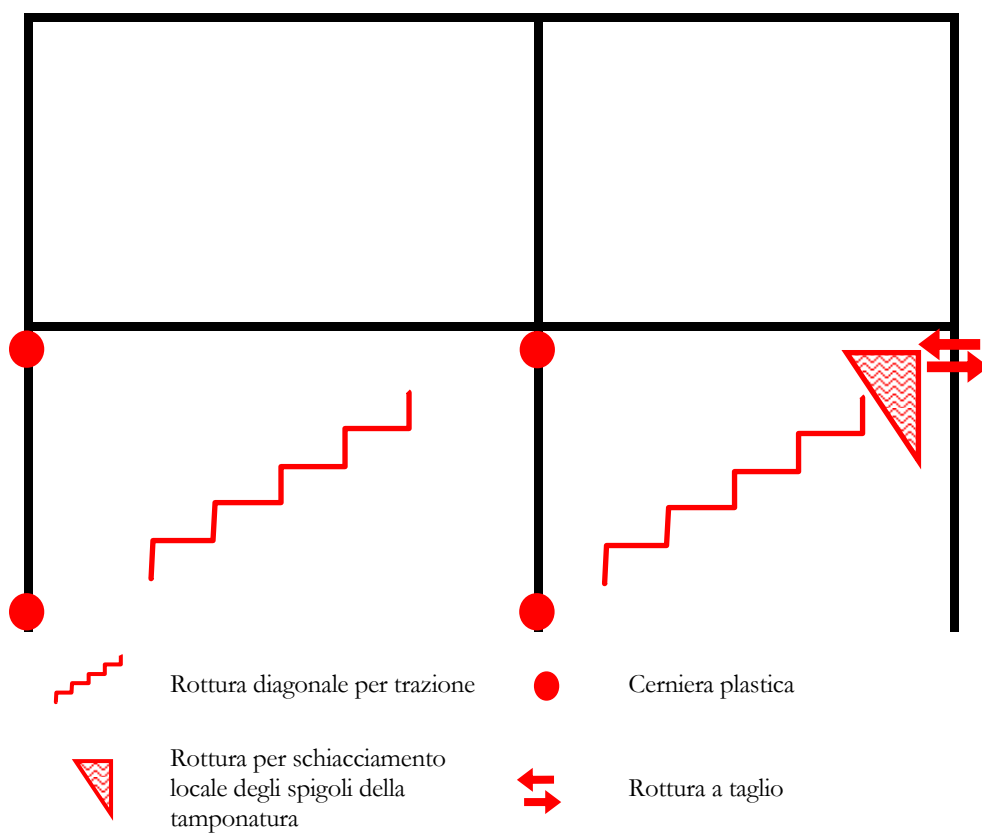


Fig. 6.24a: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento pareti lato Ovest (vista globale).





Fig. 6.24b: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento pareti lato Ovest (particolari).

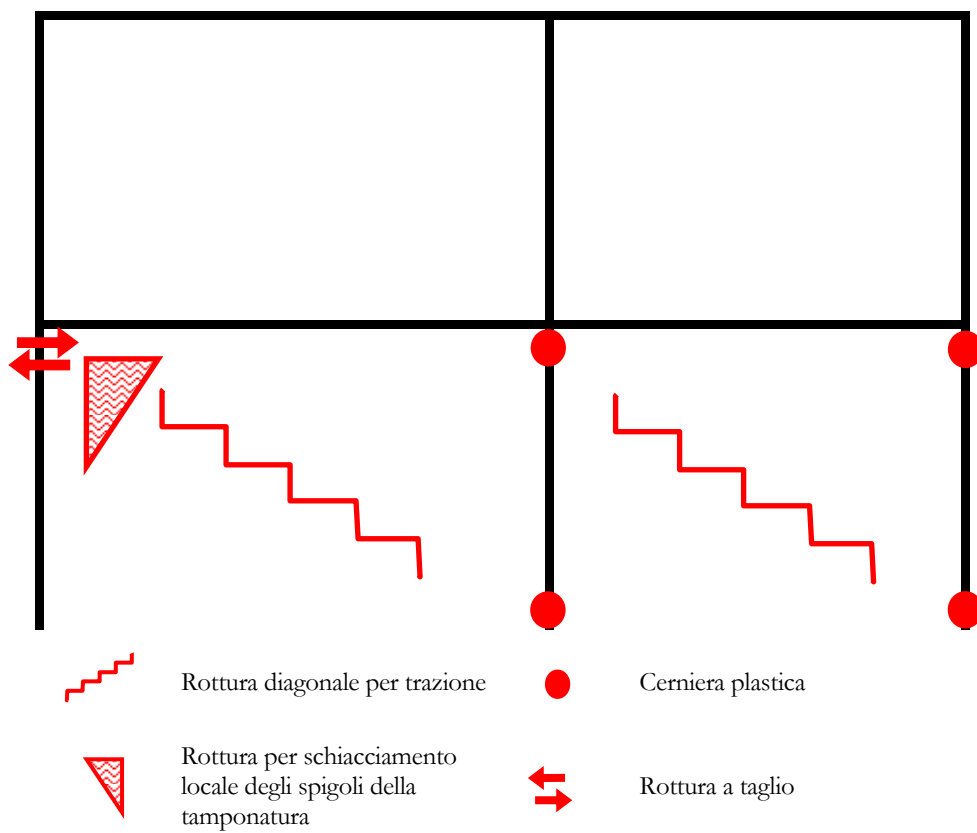


Fig. 6.24c: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento pareti lato Est (vista globale).



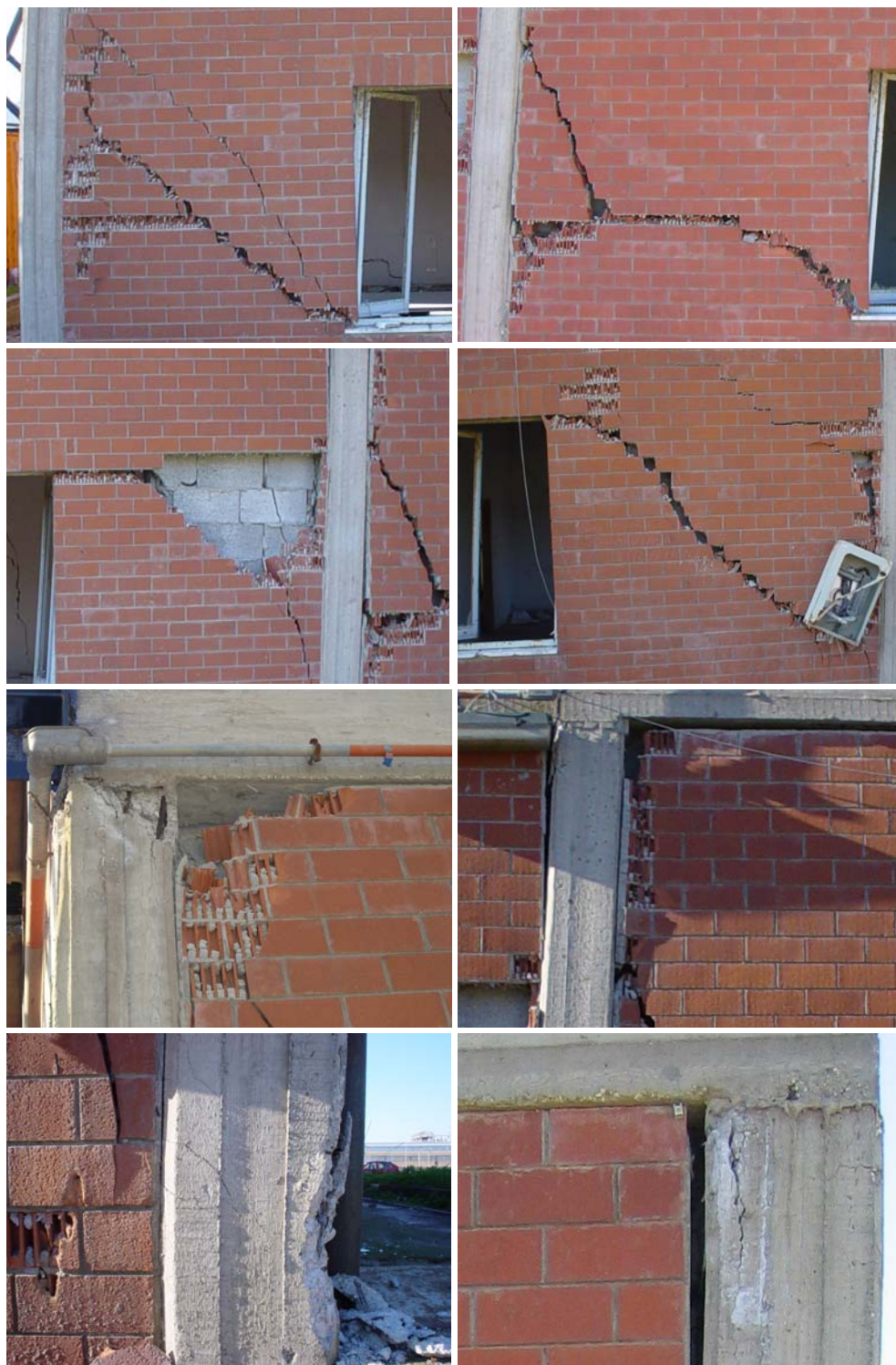


Fig. 6.24d: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento pareti lato Est (particolari).





Fig. 6.25a: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento all'interno dell'edificio.

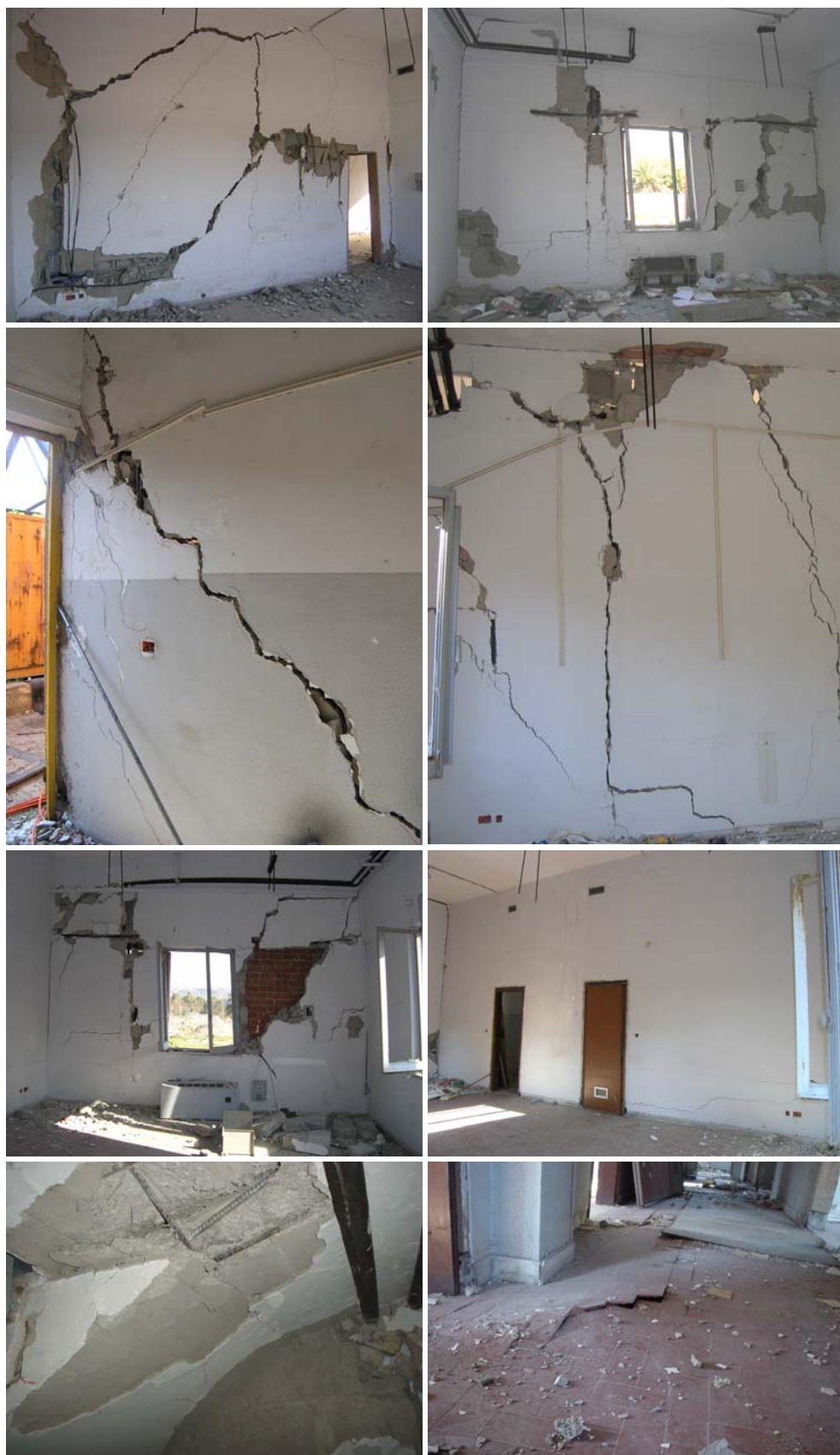


Fig. 6.25b: III ciclo di carico (punto F): Danneggiamento all'interno dell'edificio.

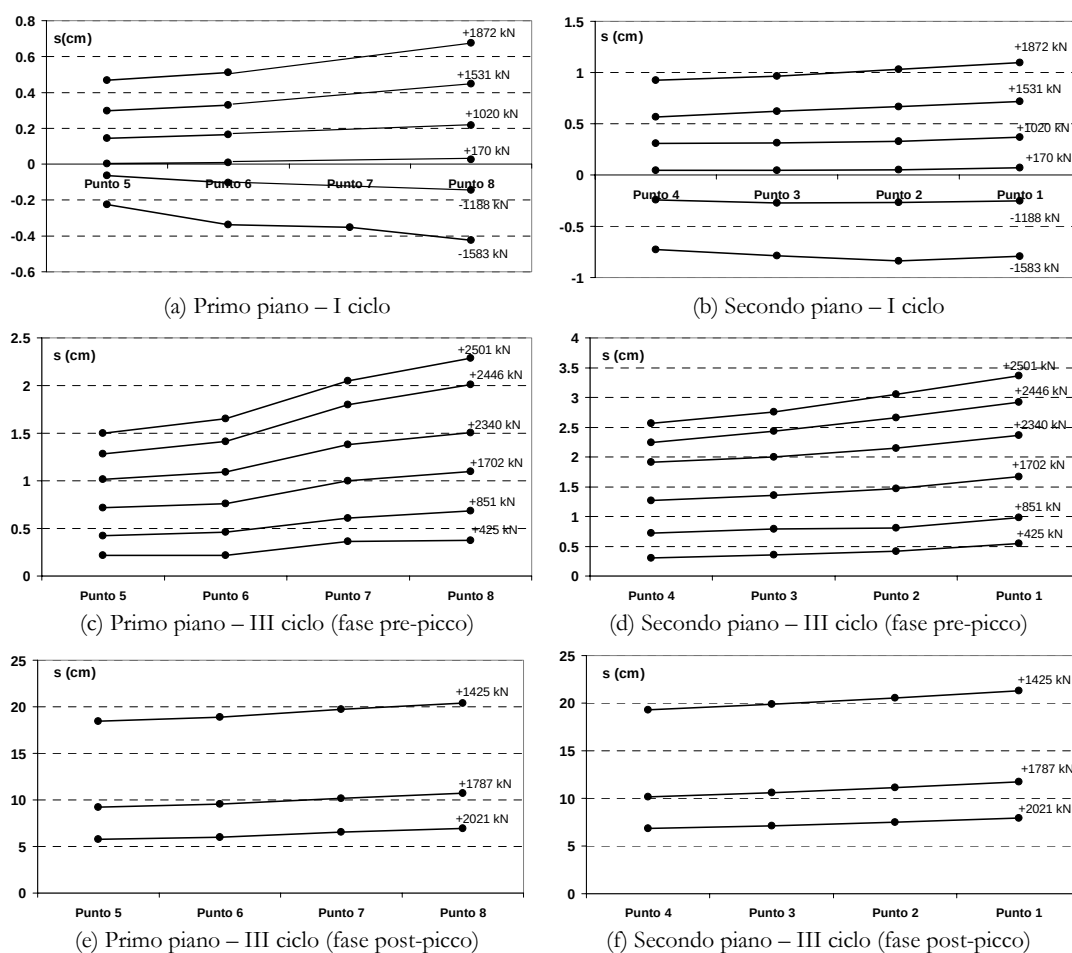


Fig. 6.26: Deformate di piano.

## Capitolo 7

### UN'APPLICAZIONE AGLI EDIFICI IN C.A. CON TAMPONATURA

#### 7.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si sono voluti ripercorrere i passi salienti della metodologia relativa alla valutazione della vulnerabilità degli edifici valutata mediante l'utilizzo delle curve di capacità domanda e fragilità, per confrontare alcuni risultati ottenuti nell'ambito del progetto del Risk-UE con i risultati ottenuti nella sperimentazione al collasso eseguita su un edificio reale in c.a.

La metodologia proposta nel Risk-UE per la valutazione della vulnerabilità sismica (WP4, 2002) si articola essenzialmente in tre fasi: individuazione tipologica dell'edificio; valutazione della performance sismica; caratterizzazione delle curve di fragilità. L'individuazione tipologica prevede anzitutto la definizione del codice sismico con cui presumibilmente è stato progettato l'edificio (pre-code: progettati senza alcun criterio sismico; low-code: progettati senza appropriate regole sismiche e senza la definizione di dettagli strutturali; moderate-code: sono tutti quegli edifici che non possono essere classificati come low-code o high-code; ed infine high-code: edifici progettati con l'utilizzo di codici sismici avanzati come l'eurocodice 8 ad.es. e quindi fa riferimento a strutture di più recente costruzione). Definito il codice sismico, attraverso la Building Typology Matrix (BTM), rappresentativa del costruito prevalente europeo, si determina la classe tipologica dell'edificio in esame. La Building Typology Matrix comprende 23 principali classi di edifici raggruppati in base alla tipologia strutturale ed al materiale costruttivo. Questi edifici sono divisi in sottogruppi mediante tre tipiche classi di altezza (low-rise, mid-rise, high-rise). Attraverso l'individuazione tipologica è possibile ricavare i parametri (tabellati per ciascuna tipologia individuata nella BTM) necessari per determinare lo spettro di capacità e le curve di fragilità. Ai fini dell'applicazione della metodologia proposta nel Risk-UE, si è anzitutto definita la tipologia dell'edificio studiato, in particolare, trattandosi di un edificio costituito da telai in c.a. con pannelli murari di tamponatura non armata appartiene alla classe RC3.1, essendo poi costituito da due piani è un edificio definito "low-rise" e quindi è un RC3.1L.

Dall'analisi della capacità e della domanda si ottiene la valutazione della performance dell'edificio. Definito infine lo spostamento massimo atteso dalla struttura per quel prefissato evento, è possibile determinare la probabilità che si riscontri un certo danno  $d_s$  al realizzarsi dello spostamento  $S_d$  determinato.

L'edificio oggetto della sperimentazione è stato considerato, in un primo momento, come rappresentativo di una classe tipologica; in questo caso le elaborazioni hanno avuto carattere generale e sono state considerate, nella valutazione della performance sismica, tutte le zone sismiche e tutti i tipi di suolo definiti dall'OPCM 3274. Successivamente si è considerato l'edificio come appartenente al sito dove è effettivamente collocato e qui le elaborazioni hanno tenuto conto della sola zona 2 e di un suolo del tipo B,C,E.

In entrambi i casi, per la definizione della performance sono state adottate le metodologie proposte dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274

(Ordinanza 3274 del 20/03/2003 aggiornata al 15/01/2005) dall'ATC40 (ATC40, 1996) assumendo prima un modello che tiene conto della presenza della tamponatura e poi uno che considera quasi esclusivamente il contributo degli elementi strutturali: questi due modelli fanno riferimento alla curva di capacità determinata con la prova sperimentale al vero.

Successivamente sono state considerate le curve di capacità RC1L ed RC3.1L, rappresentativo, come si vedrà nei successivi paragrafi, dei due modelli considerati. A queste curve di capacità si è applicata la metodologia per la valutazione della performance proposta dall'OPCM 3274 e dall'ATC40 per poi confrontarne i risultati e vedere quale assunzione fosse più cautelativa. In questo capitolo sono riportate in dettaglio le assunzioni fatte per l'applicazione delle metodologie proposte.

Gli spettri di domanda utilizzati nelle elaborazioni eseguite sono gli spettri con probabilità di superamento  $\leq 10\%$  in 50 anni (SLDS) e quelli con probabilità di superamento  $\leq 2\%$  in 50 anni (SLCO) con il 2% di smorzamento viscoso. Volendo eseguire una trattazione quanto più generale possibile le elaborazioni sono state eseguite considerando tutti i tipi di suolo e tutte le zone sismiche definite dall'OPCM 3274.

Infine, l'edificio di Bagnoli, si è visto non più come rappresentativo di una categoria di edifici e pertanto le elaborazioni sono state eseguite assumendo la struttura appartenente alla zona sismica 2 ed edificato su un tipo di suolo appartenente ad una delle categorie B,C,E definite dall'ordinanza. Le analisi hanno considerato tutti gli stati limite previsti dall'ordinanza, anche lo SLDL con probabilità di superamento del 20% in 50 anni. Si è così riscontrato che l'edificio è in grado di resistere senza danni strutturali ad un evento sismico con periodo di ritorno di 225 anni (SLDL), di resistere con danni strutturali limitati ad un evento sismico con periodo di ritorno di 475 anni (SLDS) e di riuscire a sopportare, seppure con gravi danni strutturali ad un evento sismico caratterizzato da un periodo di ritorno di 2475 anni (SLCO). Si è infine determinata la massima accelerazione di picco al suolo a cui l'edificio è in grado di resistere prima del collasso.

Vengono quindi discussi, in questo capitolo, in maniera critica i risultati ottenuti facendo un confronto tra i modelli adottati (modello I e modello II) e tra le metodologie applicate (OPCM n.3274 e ATC40).

## 7.2 CAPACITÀ SISMICA DELL'EDIFICIO IN OGGETTO

### 7.2.1 Ipotesi

Dall'analisi sperimentale si è determinata la curva di pushover. Di questa curva si è fatto l'involuppo e si sono poi considerati, per le successive analisi, due diversi modelli:

*Modello I* che tiene conto del massimo contributo della tamponatura e quindi di un comportamento isteretico scadente, per questo modello è stata considerata come curva di capacità l'involuppo della curva sperimentale fino alla massima capacità portante (nell'applicazione dell'ATC40 si è considerato un comportamento strutturale di tipo C).

*Modello II* rappresentativo di un edificio costituito dal solo telaio in c.a. e perciò si è considerata una rigidezza pari a quella secante allo scarico ed una resistenza pari a quella residua in modo da considerare un contributo minimo della tamponatura ed un

comportamento isteretico medio (nell'applicazione dell'ATC40 si è considerato un comportamento strutturale di tipo B).

In Figura 7.1 è riportata la curva di capacità sperimentale, la curva relativa al modello I e quella relativa al modello II.

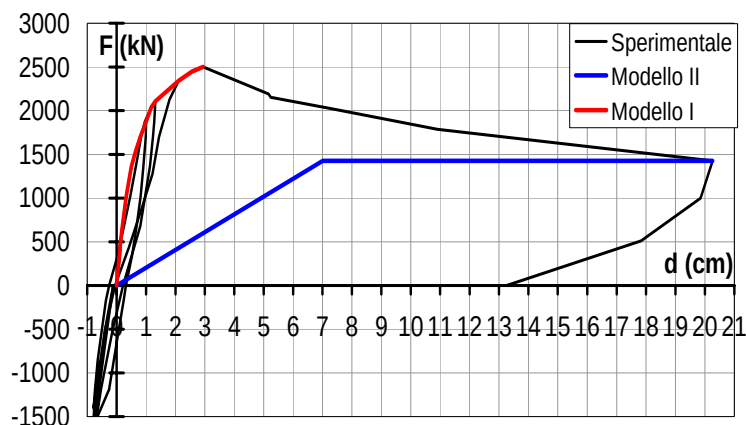


Fig. 7.1: Curve di capacità adottate

L'edificio in esame è schematizzabile come una struttura a due piani avente masse concentrate rispettivamente al I e II piano pari a:

$m_1 = 1.99 \text{ kN/cm}$                       posta a quota 4.48m                      con  $\Phi_1 = 0.03887$

$m_2 = 1.47 \text{ kN/cm}$                       posta a quota 8.84m                      con  $\Phi_2 = 0.07670$

Per passare al sistema ad un solo grado di libertà si è assunto che il primo modo di vibrare sia caratterizzato da spostamenti linearmente crescenti verso l'alto. Avendo definito come punto di controllo il baricentro delle masse dell'impalcato di copertura, sono state normalizzate le forme modali  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$  in modo da avere la componente di spostamento in copertura pari ad 1. (Fig.7.2)

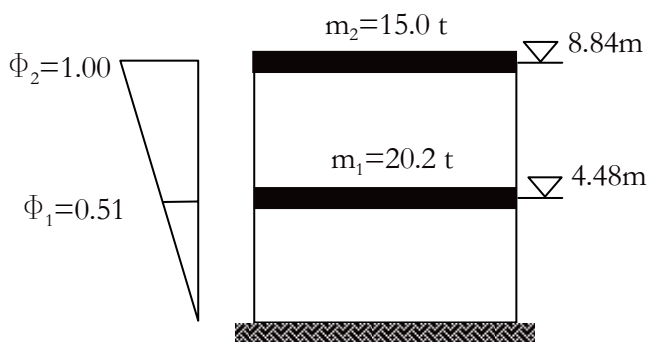


Fig.7.2: Schema dell'edificio MDOF con definizione della forma modale scelta

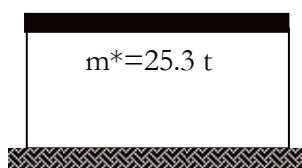


Fig.7.3: Schema SDOF

Per confrontare i risultati ottenuti nell'ambito del progetto del Risk-UE per edifici aventi tipologia analoga a quella dell'edificio in oggetto, sono state considerate le seguenti tipologie:

Tipologia corrispondente al modello I: RC3.1L (Low code), edifici caratterizzati da un telaio in c.a. con pannelli murari di tamponatura non armata, costituito da massimo due piani (low-rise) e progettato con un codice sismico privo di appropriate regole sismiche e senza la definizione di dettagli strutturali (low-code).

Tipologia corrispondente al modello I: RC1L (Low code), edifici con telaio in c.a. costituito da massimo due piani e progettato con un codice sismico che non prevede la definizione di dettagli strutturali.

Le curve di capacità del SDOF equivalente relative alle tipologie RC3.1L (low-code) e RC1L (low-code) sono riportate in Figura 7.4 insieme alle curve ricavate su base sperimentale (Modelli I e II).

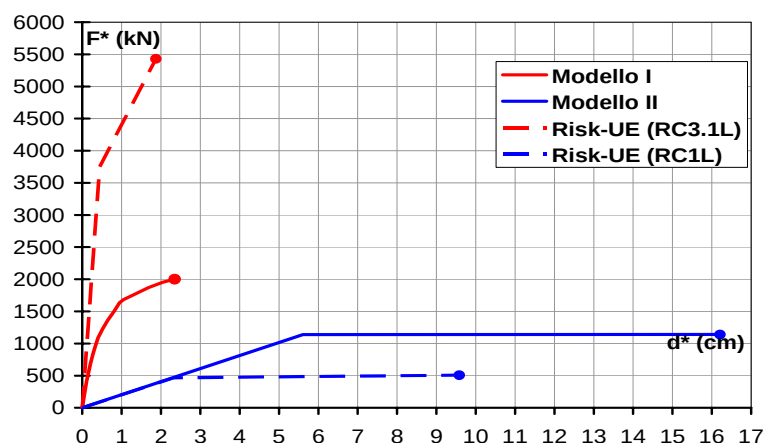


Figura 7.4: Confronto delle curve di capacità del SDOF equivalente relative ai modelli I e II e quelle scelte a rappresentare i due modelli nell'approccio utilizzato dal progetto del Risk-UE

Si nota qui una resistenza nettamente superiore per la classe RC3.1L definita nella metodologia del Risk-Ue rispetto a quella del modello I mentre le rigidezze possono essere ritenute confrontabili. Nel caso della classe RC1L invece, si nota che rispetto al modello II le rigidezze sono identiche mentre la resistenza del modello II è maggiore.

### 7.3 ANALISI DELLA DOMANDA SISMICA

Il comportamento sismico della struttura oggetto di studio viene valutato seguendo le indicazioni fornite dalla Nuova Normativa Sismica (Ordinanza 3274 del 20/03/2003 e successive modifiche), per quanto riguarda gli edifici esistenti. In particolare, sono previsti tre diversi stati limite con tre differenti livelli di intensità sismica. Quindi, rispetto agli edifici di nuova costruzione, viene introdotto un livello di stato limite aggiuntivo (Stato Limite di Collasso, SLCO), per portare in conto il non rispetto dei criteri di Gerarchia delle resistenze ed il basso livello di duttilità. Gli stati limite di Danno Severo (SLDS) e di Danno Limitato (SLDL) invece corrispondono rispettivamente allo Stato Limite Ultimo ed allo Stato Limite di Danno per gli edifici di nuova costruzione.

Ai fini della determinazione dell'azione sismica, occorre la determinazione dello spettro di risposta. Le elaborazioni eseguite hanno tenuto conto di tutte e quattro le zone

sismiche individuate nell'ordinanza a cui corrispondono un valore dell'accelerazione orizzontale massima pari a:

zona 1  $\rightarrow a_g = 0.35g$

zona 2  $\rightarrow a_g = 0.25g$

zona 3  $\rightarrow a_g = 0.15g$

zona 4  $\rightarrow a_g = 0.05g$

La normativa definisce le seguenti categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione per ognuna delle quali riporta poi i parametri necessari a caratterizzare lo spettro di risposta:

- A- *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di  $V_{s30}$  superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.
- B- *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{SPT} > 50$ , o coesione non drenata  $c_u > 250$  kPa).
- C- *Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori  $V_{s30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s ( $15 < N_{SPT} < 50$ ,  $70 < c_u < 250$  kPa).
- D- *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di  $V_{s30} < 180$  m/s ( $N_{SPT} < 15$ ,  $c_u < 70$  kPa).
- E- *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di  $V_{s30}$  simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su un substrato di materiale più rigido con  $V_{s30} > 800$  m/s

Dove  $V_{s30}$  è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio.

Lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale è definito dalle espressioni seguenti:

$$S_e(T) = a_g * S * \left( 1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 2,5 - 1) \right) \quad 0 \leq T < T_B \quad (7.1)$$

$$S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5 \quad T_B \leq T < T_C \quad (7.2)$$

$$S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5 * \left( \frac{T_C}{T} \right) \quad T_C \leq T < T_D \quad (7.3)$$

$$S_e(T) = a_g * S * \eta * 2,5 * \left( \frac{T_C * T_D}{T^2} \right) \quad T_D \leq T \quad (7.4)$$

nelle quali  $S$  è un fattore che tiene conto del profilo stratigrafico del suolo di fondazione,  $\eta$  è un fattore che tiene conto di un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  diverso da 5 ( $\eta=1$  per  $\xi=5$ ) essendo  $\xi$  espresso in percentuale.

Anche in questo caso si è tenuto conto di tutti i tipi di suolo al fine di ottenere risultati più generalizzabili.



Nell'analisi eseguita per la determinazione degli spettri di domanda si è assunto un valore dello smorzamento viscoso pari al 2% sia perché questo valore è quello effettivamente ricavato dall'analisi sperimentale eseguita, sia per tener conto del contributo dissipativo delle tamponature, delle tramezzature e di tutto ciò che non appartiene al modello strutturale già valutati in qualche modo nel momento in cui è stata utilizzata la curva di capacità sperimentale.

In tal caso il fattore  $\eta$  si calcola nel seguente modo:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad \text{con } \xi \text{ pari a 2 espresso in percentuale, quindi risulta } \eta = 1.2 \quad (7.5)$$

I valori di  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  ed  $S$  da assumere per le componenti orizzontali del moto e per le categorie di suolo di fondazione definite, sono riportati in Tabella 7.1

Tabella 7.1. Parametri dello spettro di risposta

| Categoria suolo | S    | $T_B$ | $T_C$ | $T_D$ |
|-----------------|------|-------|-------|-------|
| A               | 1,0  | 0,15  | 0,40  | 2,0   |
| B,C,E           | 1,25 | 0,15  | 0,50  | 2,0   |
| D               | 1,35 | 0,20  | 0,80  | 2,0   |

E' ora possibile definire lo spettro di risposta per i tre livelli di stati limite considerati (SLCO, SLDS, SLDL) e per i diversi tipi di suolo.

In particolare, lo spettro relativo allo stato limite di DS è quello elastico adottato per gli edifici di nuova concezione, mentre lo spettro relativo agli stati limite di DL e di CO si ottiene rispettivamente riducendo le accelerazioni di ancoraggio dello spettro elastico secondo un fattore pari a 2.5 e incrementandole per un fattore pari a 1.5. Nelle elaborazioni eseguite sono stati considerati prima gli spettri con probabilità di superamento  $\leq 10\%$  in 50 anni (SLDS) e poi quelli con probabilità di superamento  $\leq 2\%$  in 50 anni (SLCO). Infine solo per l'edificio di Bagnoli appartenente alla zona sismica 2 ed edificato su un tipo di suolo appartenente alla categoria B,C,E definita dall'ordinanza, si è eseguita una analisi allo SLDL.

## 7.4 DEFINIZIONE DELLA PERFORMANCE

### 7.4.1 Applicazione dell' OPCM 3274

Tale metodo non richiede la conversione nel piano ADRS ma impone che la curva di risposta sia schematizzata come una bilatera elastica perfettamente plastica.

Il metodo proposto si articola nei seguenti passi:

- determinazione di un legame forza-spostamento generalizzato tra la risultante delle forze applicate ("taglio alla base"  $F_b$ ) e lo spostamento  $d_e$  di un "punto di controllo", usualmente scelto come il baricentro dell'ultimo piano;
- definizione delle caratteristiche di un sistema ad un grado di libertà SDOF equivalente alla struttura oggetto di studio a comportamento bi-lineare (elasto-plastico) equivalente;

- valutazione della risposta massima in spostamento di tale sistema con utilizzo dello spettro di risposta elastico.

Per passare al sistema ad un solo grado di libertà a comportamento bi-lineare equivalente è stato definito il coefficiente di partecipazione  $\Gamma$  che nel caso in esame è risultato pari a 1.25:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} = 1.25 \quad (7.6)$$

Il sistema ad un solo grado di libertà equivalente è caratterizzato dalle seguenti relazioni:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad \text{e} \quad d^* = \frac{d_c}{\Gamma} \quad (\text{definite nel Cap.5}). \quad (7.7)$$

Tramite queste relazioni è stata tracciata la curva di capacità del sistema ad un solo grado di libertà con comportamento equivalente e mediante l'uguaglianza delle aree è stata definita la rigidità secante  $k^*$  ottenuta dalla relazione:

$$k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*} \quad \text{essendo noti } F_y^* \text{ e } d_y^* \quad (7.8)$$

A titolo di esempio si riporta in Fig. 7.5 la definizione di  $k^*$  nel caso del modello I dal grafico in

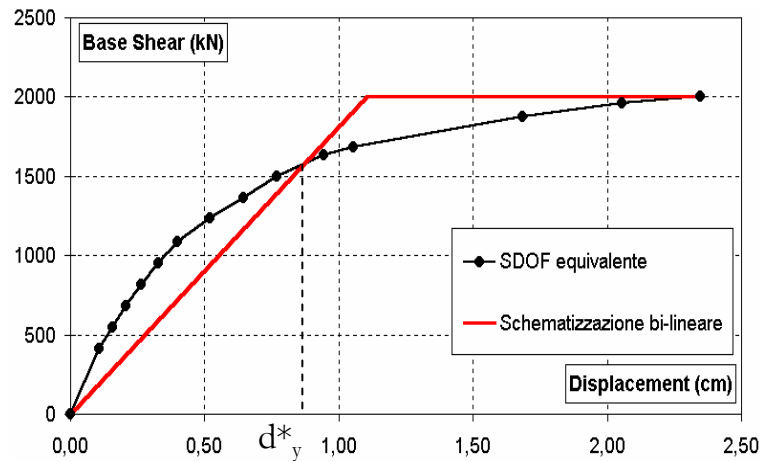


Fig.7.5: Curva di capacità del SDOF equivalente e determinazione di  $d_y^*$  mediante la schematizzazione bi-lineare ottenuta con l'uguaglianza delle aree

Il sistema ad un grado di libertà ha quindi valore di snervamento pari al valore del taglio ultimo al piede e come spostamento al limite elastico quello definito dalla rigidità secante  $k^*$  del sistema equivalente ottenuta dall'uguaglianza delle aree.

Ottenuta  $k^*$  è possibile conoscere il periodo elastico dell'oscillatore che vale:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad \text{dove } m^* = \sum m_i \phi_i \quad (7.9)$$

I parametri determinati per i due modelli sono riassunti nella Tabella 7.2:

Tab.7.2: Sintesi dei parametri relativi al Modello I e II

|                  | Modello I   | Modello II  |
|------------------|-------------|-------------|
| $m_1$            | 1,99        | 1,99        |
| $m_2$            | 1,47        | 1,47        |
| $\phi_1$         | 0,51        | 0,51        |
| $\phi_2$         | 1,00        | 1,00        |
| $\Gamma$         | 1,25        | 1,25        |
| $k^*$            | <b>1813</b> | <b>203</b>  |
| $m^*$            | 2,48        | 2,48        |
| $T^*$            | <b>0,23</b> | <b>0,69</b> |
| $F^*_{\text{v}}$ | <b>2001</b> | <b>1140</b> |
| $\alpha_1$       | 0,898       | 0,898       |
| $M_{\text{tot}}$ | 3,45        | 3,45        |

Noto il periodo dell'oscillatore per poter conoscere lo spostamento elasto-plastico dell'oscillatore, bisogna confrontare il suo periodo  $T^*$  con il periodo  $T_C$  (che corrisponde al limite del tratto orizzontale dello spettro di accelerazione), così dopo aver definito lo spettro di spostamento (funzione del fattore di struttura adottato), per definire lo spostamento obiettivo si ha:

se  $T^* \geq T_C$  si ritiene valido il principio di uguaglianza di spostamenti, così si assume

$$d_{\text{max}}^* = d_{e,\text{max}}^* = S_{de}(T^*) = \frac{S_{ae}(T^*)}{\varpi^{*2}}; \quad (7.10)$$

se  $T^* < T_C$  si ritiene valido il principio di uguaglianza delle aree, se il fattore di struttura prima definito risulta

$q^* \leq 1$  si assume allora  $d_{\text{max}}^* = d_{e,\text{max}}^*$ ;

$$\text{se } q^* > 1 \text{ si ha } d_{\text{max}}^* = \frac{d_{e,\text{max}}^*}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_C}{T^*} \right] \geq d_{e,\text{max}}^* \quad (7.11)$$

I valori di  $T_C$  considerati sono quelli dei terreni definiti dall'Ordinanza per i quali sono stati tracciati gli spettri di domanda con smorzamento al 2%, come descritto nel paragrafo 7.3.1

#### 7.4.2 Applicazione dell'ATC40

Il metodo proposto dall'ATC40 si articola nei seguenti passi:

- definizione del tipo di comportamento isteretico (Tipo A: rappresenta strutture con cicli d'isteresi ampi e stabili; Tipo B: rappresenta strutture che mostrano una moderata riduzione dell'area dei cicli d'isteresi; Tipo C: rappresenta un comportamento isteretico assai limitato con una notevole riduzione dell'area dei cicli);
- determinazione SDOF equivalente a comportamento bi-lineare (elasto-incrudente) e conversione in formato AD ossia acceleration-displacement;
- valutazione dello smorzamento equivalente ( $\beta_{\text{eq}}$ ) considerato come somma del contributo viscoso (smorzamento proprio della struttura) e di quello isteretico

(legato all'energia dissipata dalla struttura), quest'ultimo ricavato a partire dalla risposta bi-lineare del SDOF equivalente;

- determinazione dello smorzamento efficace ( $\beta_{eff}$ ); infatti lo smorzamento equivalente ricavato al punto precedente sovrastima l'effettiva energia dissipata trascurando il degrado ciclico, pertanto esso va ridotto in funzione del tipo di comportamento isteretico (Tipo A,B o C) attraverso il coefficiente  $k$ ;
- riduzione dello spettro di domanda in funzione dello smorzamento efficace ( $\beta_{eff}$ );
- determinazione del punto di performance.

Note le caratteristiche dinamiche della struttura in oggetto ( $T$  periodo,  $\phi_i$  forma modale,  $m_i$  massa) si è rappresentata la curva sperimentale fornita in termini di taglio e spostamento, nello spettro di capacità ossia nel formato accelerazione-spostamento spettrale di un sistema ad un grado di libertà. A tale scopo sono stati determinati il fattore di partecipazione  $PF_1$  e la percentuale di massa partecipante  $\alpha_1$  relativi al primo modo:

$$\alpha_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \sum_{i=1}^N (m_i \Phi_{i1}^2)} \quad (7.12)$$

$$PF_1 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1} \right)}{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1}^2} \quad (7.13)$$

dove  $m_i$  è la massa del piano  $i$ -esimo,  $\phi_i$  è l'ampiezza del primo modo in corrispondenza dell' $i$ -esimo piano ed  $N$  è il numero totale di piani.

Ciascun punto della curva di capacità nel piano ( $V, \Delta R$ ) è associato al corrispondente punto sullo spettro di capacità mediante le seguenti relazioni:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (7.14)$$

$$S_d = \frac{\Delta R}{PF_1 * \Phi_{copertura,1}} \quad (7.15)$$

dove  $V$  è il taglio alla base,  $W$  il peso dell'edificio e  $\Delta R$  lo spostamento in copertura.

Al fine di stimare lo smorzamento efficace (equivalente) si è proceduto alla rappresentazione in forma bi-lineare (elasto-plastico incrudente) e la conseguente riduzione della domanda spettrale. Si è così proceduto per tentativi nella determinazione del punto ( $a_y, d_y$ ) che consentisse di calcolare lo smorzamento viscoso equivalente a quello isteretico  $\beta_o$ , calcolato in funzione dei punti critici della rappresentazione bi-lineare dello spettro di capacità:

$$\beta_0 = \frac{63.7 * (a_y * d_{pi} - d_y * a_{pi})}{a_{pi} * d_{pi}} \quad (7.16)$$

quindi  $\beta_{eq}$  sarà pari alla somma dello smorzamento viscoso proprio della struttura considerato pari al 2% e dello smorzamento viscoso equivalente a quello isteretico:

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.02 \quad (7.17)$$

Va poi introdotto nell'espressione di  $\beta_{eq}$  il fattore  $k$ :

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + 2 = \frac{63.7 * k * (a_y * d_{pi} - d_y * a_{pi})}{a_{pi} * d_{pi}} + 2 \quad (7.18)$$

che dipende dal comportamento strutturale dell'edificio, nell'ATC 40 vengono proposti, per semplicità, tre categorie di comportamenti strutturali:

- Tipo A, rappresenta strutture con cicli d'isteresi ampi e stabili;
- Tipo B, rappresenta strutture che mostrano una moderata riduzione dell'area dei cicli d'isteresi;
- Tipo C, rappresenta un comportamento isteretico assai limitato con una notevole riduzione dell'area dei cicli.

Nello studio in oggetto si è considerato in un primo modello un comportamento strutturale di tipo C, che fornisce un valore di  $k=0.33$  per qualsiasi valore di  $\beta_0$ , questo perché il modello I tiene conto del massimo contributo della tamponatura e quindi di un comportamento isteretico scadente; nel secondo modello (quando si è considerata una curva di capacità con una rigidezza pari a quella secante allo scarico ed una resistenza pari a quella residua) si è scelto un comportamento strutturale di tipo B che prevede valori di  $k$  diversi a secondo del valore di  $\beta_0$  sono come definito nella Tab.7.3

Tab.7.3: Valori del fattore di comportamento  $k$

| <i>Tipo di comportamento strutturale</i> | $\beta_0$ (percentuale) | $k$                                                            |
|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Tipo A                                   | $\leq 16.25$            | 1                                                              |
|                                          | $> 16.25$               | $1.13 - \frac{0.51(a_y d_{py} - d_y a_{py})}{a_{pi} d_{pi}}$   |
| Tipo B                                   | $\leq 25$               | 0.67                                                           |
|                                          | $> 25$                  | $0.845 - \frac{0.446(a_y d_{py} - d_y a_{py})}{a_{pi} d_{pi}}$ |
| Tipo C                                   | qualsiasi               | 0.33                                                           |

A questo punto sono disponibili tutti gli elementi per calcolare il fattore di riduzione dello spettro di risposta elastico. In questa applicazione non sono state considerate le espressioni dei fattori di riduzione previsti dall'ATC40 (riportati nel Cap.5) perché

applicabili solo quando lo smorzamento viscoso è pari al 5% e perché determinati per spettri di domanda diversi da quelli del nostro territorio.

Si è quindi proceduto alla riduzione degli spettri forniti dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 mediante il fattore  $\eta$  che è pari ad 1 se lo smorzamento viscoso è pari al 5%, mentre si determina secondo la seguente espressione in tutti gli altri casi:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (7.19)$$

dove  $\xi$  è espresso in percentuale.

Calcolato quindi lo smorzamento equivalente del legame bi-lineare ed il conseguente fattore di riduzione dello spettro elastico lineare si è determinato il punto di intersezione dello spettro di domanda ridotto con la curva di capacità: quando esso era caratterizzato da uno spostamento sufficientemente vicino a quello stimato in partenza si poteva affermare di aver trovato la soluzione; se non era così si assumeva come nuova stima del performance point il punto trovato (o una media fra quello trovato e quello iniziale) iterando fino a convergenza.

## 7.5 RISULTATI SULLA VALUTAZIONE DELLA PERFORMANCE SISMICA

Considerando gli spettri elastici con probabilità di superamento  $\leq 10\%$  in 50 anni i risultati ottenuti mediante l'applicazione delle metodologie proposte dall'Ordinanza 3274 e dall'ATC40 sono sintetizzati nelle Tabelle 7.4 e 7.5, rispettivamente per i modelli I e II. Da tali tabelle si evince che la capacità massima (2.35 cm per il modello I e 16.2 cm per il modello II) con l'applicazione dell'ATC40 viene superata, nel modello I, una sola volta (zona 1 suolo D) mentre con l'OPCM viene superata in due casi, quando si considera il modello I (zona 1- suoli B,C,E e D) ed in un solo caso quando si considera il modello II (zona 1- suolo D). L'OPCM 3274 risulta sempre più penalizzante.

Tab.7.4: Spostamenti richiesti Modello I

| <i>ATC40</i>  |         |         |                 | <i>OPCM n. 3274</i> |         |             |             |
|---------------|---------|---------|-----------------|---------------------|---------|-------------|-------------|
| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E   | Suolo D         | $d_{max}(cm)$       | Suolo A | B,C,E       | Suolo D     |
| zona 1        | 1,20    | 2,25    | <b>&gt;2,35</b> | zona 1              | 1,63    | <b>2,52</b> | <b>3,86</b> |
| zona 2        | 0,65    | 0,97    | 1,10            | zona 2              | 1,01    | 1,44        | 1,98        |
| zona 3        | 0,32    | 0,42    | 0,47            | zona 3              | 0,60    | 0,76        | 0,82        |
| zona 4        | 0,10(*) | 0,12(*) | 0,11(*)         | zona 4              | 0,20    | 0,25        | 0,27        |

Tab.7.5: Spostamenti richiesti Modello II

| <i>ATC40</i>  |         |         |         | <i>OPCM n. 3274</i> |         |       |             |
|---------------|---------|---------|---------|---------------------|---------|-------|-------------|
| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E   | Suolo D | $d_{max}(cm)$       | Suolo A | B,C,E | Suolo D     |
| zona 1        | 6,14    | 8,00    | 15,8    | zona 1              | 7,25    | 11,3  | <b>18,7</b> |
| zona 2        | 5,15(*) | 6,45    | 9,70    | zona 2              | 5,18    | 8,09  | 13,1        |
| zona 3        | 3,11(*) | 4,85(*) | 6,29    | zona 3              | 3,11    | 4,85  | 7,53        |
| zona 4        | 1,04(*) | 1,62(*) | 2,43(*) | zona 4              | 1,04    | 1,62  | 2,43        |

I risultati ottenuti mediante l'utilizzo delle curve di capacità fornite dal progetto del Risk-UE sono riportati nelle Tabelle 7.6 e 7.7, rispettivamente per i casi RC3.1L (low-code) e RC1L (low-code). Dall'esame di questi si nota che, per ciò che concerne il caso RC3.1L, si hanno risultati identici sia per l'ATC40 che per l'OPCM 3274, questo accade perché lo spettro di domanda interseca lo spettro di capacità nel tratto lineare pertanto non viene mai superata la capacità massima (1.87 cm). Nel caso RC1L invece, l'OPCM risulta più penalizzante quando  $d_{max} < d_{c,max}$  (dove  $d_{max}$  è lo spostamento massimo richiesto e  $d_{c,max}$  è lo spostamento massimo offerto dalla struttura); l'ATC40 invece è più penalizzante nel caso opposto. La capacità massima (9.58 cm) viene superata in tre casi (zona 1, suoli BCE e D; zona 2, suolo D). Con l'ATC40 invece la massima capacità viene superata in tre casi (zona 1, suoli B,C,E e D; zona 2, suolo D). Anche con l'ATC40 viene superata negli stessi tre casi.

Tab.7.6: Spostamenti richiesti RC3.1L (low-code)

| <i>ATC40</i>  |         |         |         | <i>OPCM n. 3274</i> |         |       |         |
|---------------|---------|---------|---------|---------------------|---------|-------|---------|
| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E   | Suolo D | $d_{max}(cm)$       | Suolo A | B,C,E | Suolo D |
| zona 1        | 0,24(*) | 0,30(*) | 0,28(*) | zona 1              | 0,24    | 0,30  | 0,28    |
| zona 2        | 0,17(*) | 0,22(*) | 0,20(*) | zona 2              | 0,17    | 0,22  | 0,20    |
| zona 3        | 0,10(*) | 0,13(*) | 0,12(*) | zona 3              | 0,10    | 0,13  | 0,12    |
| zona 4        | 0,03(*) | 0,04(*) | 0,03(*) | zona 4              | 0,03    | 0,04  | 0,04    |

Tab.7.7: Spostamenti richiesti RC1L (low-code)

| <i>ATC40</i>  |         |             |             | <i>OPCM n. 3274</i> |         |             |             |
|---------------|---------|-------------|-------------|---------------------|---------|-------------|-------------|
| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E       | Suolo D     | $d_{max}(cm)$       | Suolo A | B,C,E       | Suolo D     |
| zona 1        | 5,50    | <b>11,5</b> | <b>26,3</b> | zona 1              | 7,28    | <b>11,4</b> | <b>19,3</b> |
| zona 2        | 3,75    | 6,50        | <b>17,2</b> | zona 2              | 5,20    | 8,13        | <b>13,7</b> |
| zona 3        | 2,72    | 3,56        | 6,90        | zona 3              | 3,12    | 4,88        | 8,06        |
| zona 4        | 1,04(*) | 1,63(*)     | 2,45(*)     | zona 4              | 1,04    | 1,63        | 2,45        |

Considerando invece gli spettri elastici con probabilità di superamento  $\leq 2\%$  in 50 anni i risultati ottenuti mediante l'applicazione delle metodologie proposte dall'Ordinanza e dall'ATC40 sono sintetizzati nelle Tabelle 7.8 e 7.9, rispettivamente per i modelli I e II. Si nota qui, in riferimento al modello I, che la capacità massima (2.35 cm) con l'applicazione dell'ATC40 viene superata in 5 casi (zona 1, tutti i suoli; zona 2, suoli B,C,E e D), con l'OPCM viene superata la massima capacità di spostamento negli stessi casi. Nel modello II, invece, la capacità massima (16.2 cm) viene superata con l'ATC40 in due casi (zona 1 e 2, suolo D) e con l'OPCM in tre casi (zona 1, suoli B,C,E e D; zona 2, suolo D). L'OPCM è sempre più penalizzante tranne nel caso della zona 1 -suolo D.

Tab.7.8: Spostamenti richiesti Modello I

| <i>ATC40</i>  |                 |                 |                 | <i>OPCM n. 3274</i> |             |             |             |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| $d_{max}(cm)$ | Suolo A         | B,C,E           | Suolo D         | $d_{max}(cm)$       | Suolo A     | B,C,E       | Suolo D     |
| zona 1        | <b>&gt;2,35</b> | <b>&gt;2,35</b> | <b>&gt;2,35</b> | zona 1              | <b>2,84</b> | <b>4,42</b> | <b>7,13</b> |
| zona 2        | 1,42            | <b>&gt;2,35</b> | <b>&gt;2,35</b> | zona 2              | 1,80        | <b>2,79</b> | <b>4,32</b> |

|        |         |      |      |        |      |      |      |
|--------|---------|------|------|--------|------|------|------|
| zona 3 | 0,55    | 0,80 | 0,91 | zona 3 | 0,91 | 1,17 | 1,52 |
| zona 4 | 0,16(*) | 0,21 | 0,21 | zona 4 | 0,30 | 0,38 | 0,41 |

Tab.7.9: Spostamenti richiesti Modello II

*ATC40**OPCM n. 3274*

| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E   | Suolo D     | $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E       | Suolo D     |
|---------------|---------|---------|-------------|---------------|---------|-------------|-------------|
| zona 1        | 7,80    | 12,7    | <b>33,0</b> | zona 1        | 10,9    | <b>17,0</b> | <b>28,5</b> |
| zona 2        | 6,33    | 8,50    | <b>17,8</b> | zona 2        | 7,76    | 12,1        | <b>20,1</b> |
| zona 3        | 4,66(*) | 6,15    | 8,75        | zona 3        | 4,66    | 7,28        | 11,7        |
| zona 4        | 1,55(*) | 2,43(*) | 3,64(*)     | zona 4        | 1,55    | 2,43        | 3,64        |

Anche per i risultati ottenuti mediante l'utilizzo delle curve di capacità fornite dal progetto del Risk-UE sono state eseguite le elaborazioni considerando gli spettri aventi probabilità di superamento  $\leq 2\%$  in 50 anni ed i risultati sono riportati nelle Tabelle 7.10 e 7.11, rispettivamente per i casi RC3.1L (low-code) e RC1L (low-code). Anche qui nel caso della classe RC3.1L, si hanno risultati identici sia per l'ATC40 che per l'OPCM 3274, perché lo spettro di domanda interseca lo spettro di capacità nel tratto lineare pertanto non viene mai superata la capacità massima (1.87 cm). Nel caso RC1L invece, con l'OPCM e con l'ATC40 viene superata la capacità massima (9.58 cm) in sei casi (zona 1, tutti i suoli; zona 2, suoli B,C,E e D; zona 3, suolo D). Anche nel caso dello SLCO per la tipologia RC1L, l'OPCM risulta più penalizzante quando  $d_{max} < d_{c,max}$  e l'ATC40 invece è più penalizzante nel caso opposto.

Tab.7.10: Spostamenti richiesti RC3.1L (low-code)

*ATC40**OPCM n. 3274*

| $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E   | Suolo D | $d_{max}(cm)$ | Suolo A | B,C,E | Suolo D |
|---------------|---------|---------|---------|---------------|---------|-------|---------|
| zona 1        | 0,36(*) | 0,46(*) | 0,42(*) | zona 1        | 0,36    | 0,46  | 0,42    |
| zona 2        | 0,26(*) | 0,33(*) | 0,30(*) | zona 2        | 0,26    | 0,33  | 0,30    |
| zona 3        | 0,16(*) | 0,20(*) | 0,18(*) | zona 3        | 0,16    | 0,20  | 0,18    |
| zona 4        | 0,05(*) | 0,07(*) | 0,06(*) | zona 4        | 0,05    | 0,07  | 0,06    |

Tab.7.11: Spostamenti richiesti RC1L (low-code)

*ATC40**OPCM n. 3274*

| $d_{max}(cm)$ | Suolo A     | B,C,E       | Suolo D     | $d_{max}(cm)$ | Suolo A     | B,C,E       | Suolo D     |
|---------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| zona 1        | <b>10,5</b> | <b>22,9</b> | <b>39,2</b> | zona 1        | <b>10,9</b> | <b>17,1</b> | <b>29,1</b> |
| zona 2        | 6,10        | <b>13,3</b> | <b>28,0</b> | zona 2        | 7,80        | <b>12,2</b> | <b>20,7</b> |
| zona 3        | 3,45        | 5,50        | <b>14,0</b> | zona 3        | 4,68        | 7,31        | <b>12,3</b> |
| zona 4        | 1,56(*)     | 2,44(*)     | 3,15        | zona 4        | 1,56        | 2,44        | 3,84        |

Quando si è considerata la curva di capacità della tipologia RC3.1L, rappresentativa di un modello che affida la resistenza dell'edificio esclusivamente alla tamponatura, rispetto al modello I i risultati sono meno cautelativi: nel Risk-UE infatti si sovrastima la capacità. Quando, invece, si è considerata la tipologia RC1L rappresentativa di un modello che non considera il contributo della tamponatura, i risultati ottenuti si sono rivelati più cautelativi rispetto al modello II: in questo caso si sottostima la capacità.



### 7.5.1 Definizione degli effetti di eventi sismici sull'edificio oggetto di studio

Per l'edificio di Bagnoli, oggetto della prova sperimentale, sono state eseguite ulteriori analisi, questa volta si è considerato l'edificio non più come rappresentativo di una categoria di edifici. Pertanto, le elaborazioni sono state eseguite facendo le reali assunzioni relative alla zona sismica e al tipo di suolo da scegliere.

L'edificio, infatti, sorge nel Comune di Napoli, cioè in zona sismica di tipo 2, a cui corrisponde un valore dell'accelerazione orizzontale massima pari a:

$$a_g = 0.25g$$

Nell'ipotesi che il terreno di fondazione appartenga ad una delle categorie B, C o E definite dall'Ordinanza, ad essa corrispondono i parametri necessari a definire lo spettro di risposta delle componenti orizzontali. Essi sono i seguenti:

Tab. 7.12: Parametri dello spettro di risposta

| Categoria suolo | S    | $T_B$ | $T_C$ | $T_D$ |
|-----------------|------|-------|-------|-------|
| B,C,E           | 1,25 | 0,15  | 0,50  | 2,0   |

Avendo fatto queste assunzioni sono stati tracciati gli spettri di domanda per i tre livelli di stati limite considerati (SLCO, SLDS, SLDL) con smorzamento pari al 2%. Applicando il metodo proposto dall'OPCM n.3274 per la valutazione della performance, sono stati ricavati gli spostamenti richiesti relativi a ciascuno stato di danno. I tre valori di spostamento massimo richiesto sono stati confrontati con la risposta della struttura (Fig.7.6) ottenuta mediante la prova a collasso al fine di determinare il comportamento dell'edificio soggetto ad azioni sismiche con prefissati periodi di ritorno.

Dalla Figura 7.6 si evince che nel caso dello SLDL la risposta della struttura è ancora in campo elastico e quindi i danni sono di modesta entità. Resistenza e rigidità della struttura non sono compromesse e non sono necessarie riparazioni. Infatti, a questo livello di spostamento in base alle osservazioni sperimentali, è stato possibile riscontrare la comparsa di un quadro fessurativo, caratterizzato da lesioni di modesta ampiezza, negli elementi costituenti la tramezzatura e la fodera interna della tamponatura (Fig.7.7a). Gli elementi strutturali, così come gli altri elementi costruttivi non presentano danneggiamento evidente.

Nel caso invece di uno SLDS si verificano le prime escursioni plastiche, non viene ancora raggiunta la massima resistenza laterale. Dai rilievi eseguiti durante la sperimentazione è possibile far corrispondere a questo livello di danneggiamento una estensione, seppure limitata, del quadro fessurativo generatosi durante le prime due fasi di carico (estensione delle lesioni negli elementi murari costituiti da blocchi di cls e lapillo) (Fig.7.7b).

Per una richiesta di deformazione corrispondente allo SLCO negli elementi murari ortogonali alla direzione di carico del primo interpiano sono evidenti meccanismi di collasso riconducibili a rottura diagonale (in tutti i pannelli murari) e/o schiacciamento locale (negli spigoli in prossimità della testa dei pilastri d'angolo posti dal lato della struttura di contrasto) (Fig.7.7c). Nella struttura in c.a. si osserva il collasso per taglio alla testa dei pilastri dal lato struttura di contrasto. La maggior parte degli elementi non

strutturali sono gravemente danneggiati ma non si è ancora raggiunto la massima deformazione.

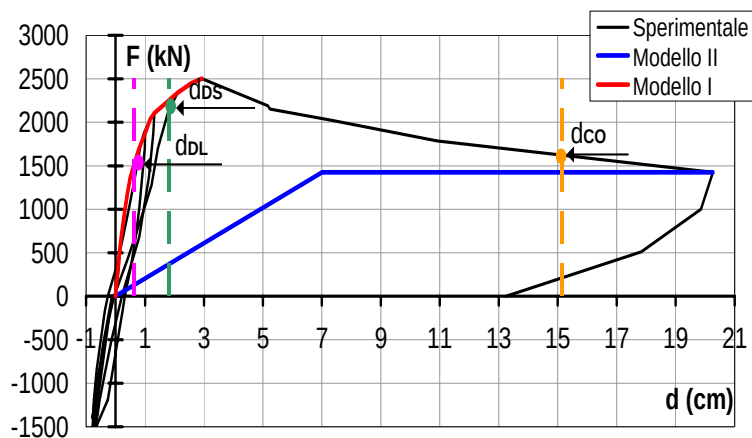


Fig.7.6: Rappresentazione degli spostamenti richiesti per ciascuno stato limite definito dall'OPCM 3274

Inoltre, si è calcolata l'accelerazione di picco al suolo che determina la configurazione della struttura ottenuta alla fine della prova sperimentale (Fig.7.7d), si è riscontrato che questa si verifica a seguito di un evento sismico caratterizzato da una  $a_g/g$  pari a 0,50, corrispondente ad una richiesta massima di spostamento pari a 16.2 cm. Per questo valore si è poi calcolato il corrispondente periodo di ritorno pari a circa 3800 anni e la probabilità di superamento in 50 anni pari a circa l'1%.

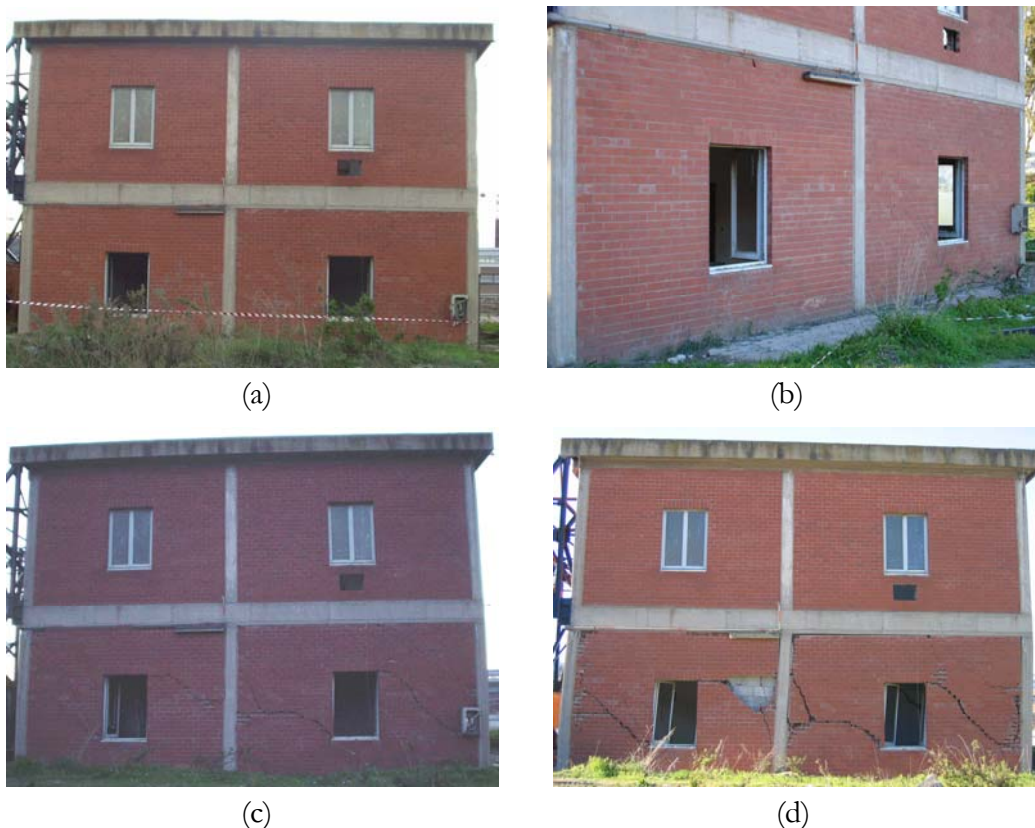


Fig. 7.7: Danneggiamento riscontrato nel prospetto ovest dell'edificio per una richiesta di deformazione corrispondente rispettivamente a: (a) SLDL, (b) SLDS, (c) SLCO, (d) massima accelerazione di picco al suolo

Si è così riscontrato che l'edificio è in grado di resistere senza danni strutturali ad un evento sismico con periodo di ritorno di 225 anni (SLDL), di resistere con danni strutturali limitati ad un evento sismico con periodo di ritorno di 475 anni (SLDS) e di riuscire a sopportare, seppure con gravi danni strutturali ad un evento sismico caratterizzato da un periodo di ritorno di 2475 anni (SLCO).

I risultati ottenuti mediante l'applicazione dei tre stati limite sono rappresentati nella Tabella 7.13. In questa sono riportati per ciascuno stato limite di danno definito i corrispondenti periodi di ritorno con le relative probabilità di superamento in 50 anni.

Tab.7.13: Sintesi dei risultati ottenuti dall'applicazione degli SL definiti dall'OPCM 3274

| Stato Limite | T (anni) | Prob. di<br>superamento in<br>50 anni | (ag/g) | $d_{\max}$<br>(cm) |
|--------------|----------|---------------------------------------|--------|--------------------|
| <i>DL</i>    | 225      | $\leq 20\%$                           | 0,10   | 0.63               |
| <i>DS</i>    | 475      | $\leq 10\%$                           | 0,25   | 1.80               |
| <i>CO</i>    | 2475     | $\leq 2\%$                            | 0,38   | 15.1               |

## 7.6 CURVE DI FRAGILITÀ

### 7.6.1 Applicazione ad un caso reale

I modelli di fragilità forniscono la probabilità condizionata che un edificio eguagli o superi un certo livello di danno  $ds$  per un terremoto avente una certa intensità. La valutazione delle perdite e dei danni agli edifici richiede modelli di fragilità che identifichino i diversi stati di danno degli edifici.

Per l'implementazione degli scenari di Catania, nell'ambito del progetto del Risk-Ue non sono state considerate le curve di fragilità definite nel capitolo 5 del presente lavoro. Anche per l'applicazione eseguita sull'edificio di Bagnoli si sono utilizzate le stesse curve di fragilità adottate per la città di Catania (WP11, Faccioli et al. 2004)

In questo caso, a differenza delle curve proposte nella metodologia generale, le soglie dello stato di danno sono delle funzioni di  $D_u$  (spostamento corrispondente alla capacità ultima) e  $D_y$  (spostamento corrispondente alla capacità al limite di snervamento):

$$S_{d,1} = 0.7D_y$$

$$S_{d,2} = 1.5D_y$$

$$S_{d,3} = 0.5(D_y + D_u)$$

$$S_{d,4} = D_u$$

La distribuzione di probabilità del livello di danno è rappresentata dalla probabilità di attingere o superare un dato stato di danno, nella forma di una distribuzione lognormale standard:

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left[ \frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right] \right]$$

analogamente a quanto definito nel cap.5 dove:  $\Phi$  è sempre la funzione di distribuzione cumulata normale standard;  $\bar{S}_{d,ds}$  è la mediana dello spostamento spettrale al quale

l'edificio attinge la soglia dello stato di danno  $d_s$ ,  $\beta_{ds}$  è la deviazione standard lognormale che descrive la variabilità totale dello stato di danno strutturale, espressa come una funzione della duttilità  $\mu$  della classe dell'edificio:

$$\beta = 0.45 \ln(\mu)$$

$$\text{essendo } \mu = \frac{D_u}{D_y}$$

Le curve di fragilità rappresentate nelle Figg. 7.8, 7.9 e 7.10 sono quelle relative rispettivamente al modello I (relativo alla curva di capacità bi-lineare elasto-incrudente), al modello I (relativo alla curva di capacità bi-lineare elasto-plastica), ed al modello II ed alle classi RC3.1L e RC1L (low-code) .

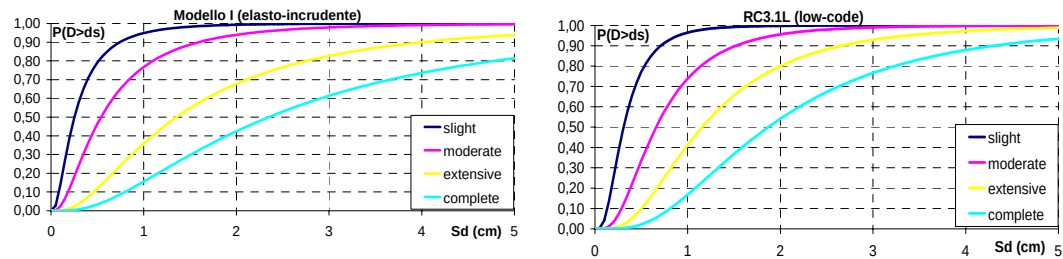


Fig. 7.8: Curve di fragilità relative al modello I (relativo alla curva di capacità bi-lineare elasto-incrudente) ed alla tipologia RC3.1L

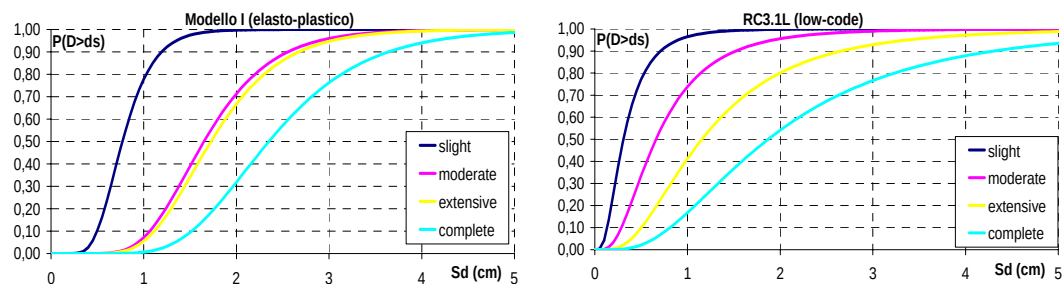


Fig. 7.9: Curve di fragilità relative al modello I (relativo alla curva di capacità bi-lineare elasto-plastica) ed alla tipologia RC3.1L

Confrontando le curve di fragilità del modello I di Figura 7.8 con quelle della tipologia RC3.1L si nota che per piccoli valori di spostamento  $S_d$  ( $S_d \approx 1$ ) le previsioni relative al danneggiamento sono simili; al crescere di  $S_d$  ( $S_d \approx 2-3$ ) le curve relative alla RC3.1L prevedono un danneggiamento leggermente superiore per gli stati danno “estensive” e “complete”. La dispersione risulta la stessa nei due casi.

Dal confronto delle curve di fragilità relative al modello I che tiene conto della curva di capacità elasto-plastica con le curve della tipologia RC3.1L si nota che per piccoli valori di spostamento  $S_d$  ( $S_d \approx 1$ ) le previsioni relative alle RC3.1L prevedono un maggiore danneggiamento; al crescere di  $S_d$  le previsioni diventano simili. E' inoltre importante notare come nel modello I la curva relativa allo stato di danno moderate risulta praticamente coincidente con quella relativa allo stato di danno estensive. La dispersione risulta maggiore nel modello RC3.1L.

Considerando le curve di figura 7.10 si nota che quelle relative alla tipologia RC1L prevedono un danneggiamento maggiore, anche qui le differenze aumentano per piccoli valori di  $S_d$  ( $S_d \approx 5$ ). La dispersione risulta maggiore nel modello II.

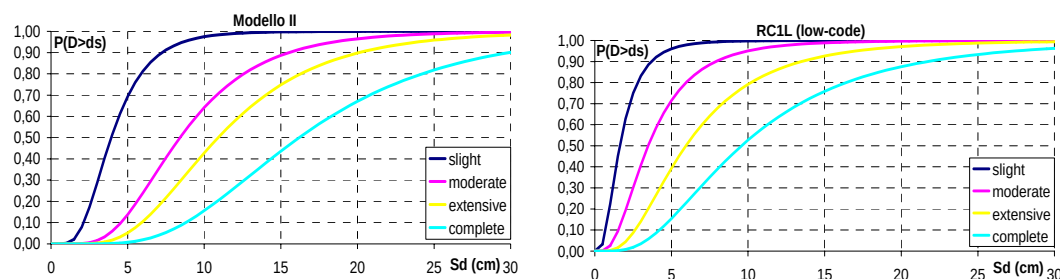


Fig 7.10: Curve di fragilità relative al modello II ed alla tipologia RC1L.

Infine, dall'osservazione dei modelli I relativi alle due curve di capacità considerate per le precedenti elaborazioni (elasto-incrudente ed elasto-plastica) si nota come considerando le curve di fragilità che fanno riferimento alla capacità elasto-incrudente siano più simili a quelle definite attraverso la RC3.1L.

## 7.7 EFFETTI DELLA TAMPONATURA

La risposta sismica degli edifici può essere fortemente condizionata dalla tamponatura, il ruolo delle tamponature può rivelarsi fondamentale in alcune costruzioni non progettate per dover resistere al sisma. Nel caso di studio qui trattato la tamponatura offre un importante contributo ai fini della resistenza al sisma e ciò porterebbe a tener conto anche degli elementi non strutturali in fase di progettazione di edifici per motivi economici.

In realtà a causa della notevole rigidezza, le tamponature possono originare configurazioni irregolari, innescando dei fenomeni che possono comprometterne il comportamento. In funzione dell'interazione delle strutture portanti con gli elementi di tamponatura, sia i pannelli prefabbricati sia quelli murari, ed anche in relazione alla severità dell'azione sismica, si sono verificate le situazioni più disparate nel senso della sopravvivenza inaspettata della costruzione all'evento oppure, viceversa, nel senso del danno subito in maniera maggiore del previsto, fino al crollo. A titolo di esempio, tra gli eventi negativi si cita:

- il distacco del telaio e la caduta delle tamponature;
- la crisi delle strutture con distribuzione planimetrica regolare degli elementi portanti ma con irregolarità nella posizione delle tamponature;
- la formazione di meccanismi di piano soffice a causa della distribuzione irregolare in altezza delle tamponature;
- la plasticizzazione dei pilastri per la presenza di un notevole sforzo di trazione dovuto alle tamponature;
- la rottura localizzata e fragile di elementi portanti a causa della presenza di aperture irregolari nelle tamponature.

Facendo riferimento agli eventi sismici italiani più recenti, durante il terremoto del 1976 nella regione del Friuli si sono verificate alcune situazioni tipiche, tra quelle sopra elencate, assai significative.

La Fig.7.11 (a) mostra il caso di un edificio per il quale non è stata valutata opportunamente la disposizione e l'efficienza delle tamponature. La loro configurazione irregolare (sui prospetti nord ed est sono presenti delle vetrates di negozi, quelli sud ed ovest sono invece provvisti di tamponatura), dall'altro si è dimostrata essenziale nella definizione del centro di torsione del fabbricato e quindi, essendo stata trascurata in sede di progetto, ha condotto alla crisi per torsione.

La Fig.7.11 (b) riporta il caso dell'ospedale di Gemona, che ha subito la formazione di cerniere plastiche alla base ed in sommità dei pilastri del secondo livello.

In Fig.7.12 riporta l'esempio di un edificio che ha visto il degrado notevole delle tamponature al piano terra, col lesionamento innescatosi in corrispondenza delle aperture e delle solette a sbalzo dei balconi.

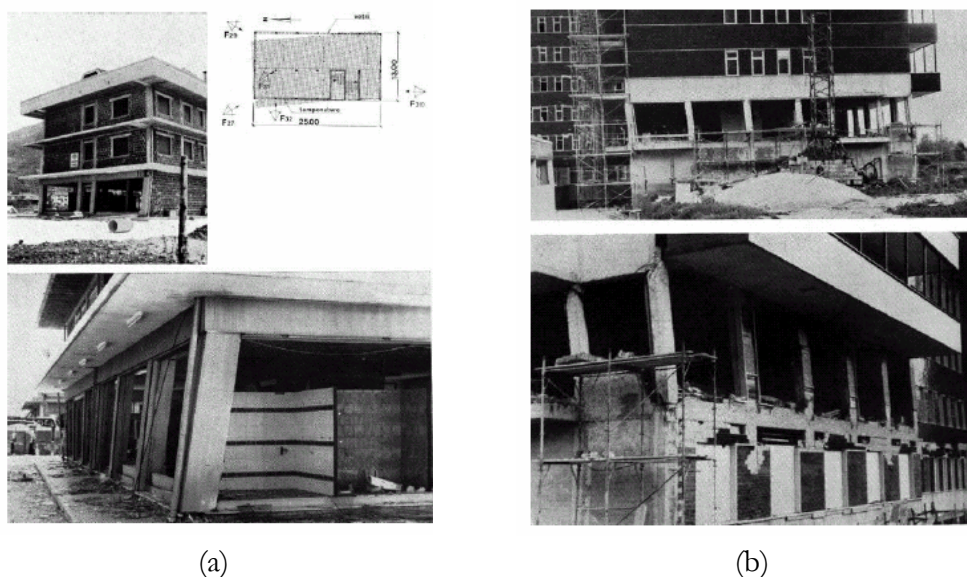


Fig.7.11: Torsione per tamponature irregolari in pianta (a) ed in altezza (b)



Fig.7.12: Daneggiamento delle tamponature con la struttura integra



## CONCLUSIONI

La possibilità di effettuare una sperimentazione su un edificio esistente rappresenta senza dubbio una opportunità eccezionale, che dovrebbe essere colta quando possibile. La sperimentazione al collasso della costruzione in oggetto ha consentito di annullare alcune delle incertezze legate alla definizione della capacità della classe di edifici che esso rappresenta (edifici in c.a. con tamponatura).

Attraverso la definizione dei due modelli considerati nell'ambito di questo lavoro è stato possibile trarre importanti conclusioni: la risposta sismica dell'edificio è qui fortemente condizionata dalla tamponatura, il ruolo della tamponatura può rivelarsi quindi fondamentale in alcune costruzioni non progettate per dover resistere al sisma.

In particolare, nel caso di studio qui trattato la tamponatura offre un importante contributo ai fini della resistenza al sisma e ciò porterebbe a tener conto anche degli elementi non strutturali in fase di progettazione di edifici per motivi economici.

In realtà a causa della notevole rigidità, in alcuni casi le tamponature possono originare configurazioni irregolari, innescando dei fenomeni che possono compromettere il buon comportamento sismico di un edificio. Infatti, dalle molte osservazioni condotte successivamente ad eventi sismici, si sono riscontrate, in funzione dell'interazione delle strutture portanti con gli elementi di tamponatura, sia i pannelli prefabbricati sia quelli murari, ed anche in relazione alla severità dell'azione sismica, le situazioni più disparate, nel senso della sopravvivenza inaspettata della costruzione all'evento oppure, viceversa, nel senso del danno subito in maniera maggiore del previsto, fino al crollo.

L'edificio oggetto della sperimentazione è stato considerato, in un primo momento, come rappresentativo di una classe tipologica; in questo caso le elaborazioni hanno avuto carattere generale e sono state considerate, nella valutazione della performance sismica, tutte le zone sismiche e tutti i tipi di suolo definiti dall'OPCM 3274. Successivamente si è considerato l'edificio come appartenente al sito dove è effettivamente collocato e qui le elaborazioni hanno tenuto conto della sola zona 2 e di un suolo del tipo B,C,E. In entrambi i casi sono stati considerati due modelli:

Modello I che tiene conto del massimo contributo della tamponatura e quindi di un comportamento isteretico scadente; per questo modello è stata considerata come curva di capacità l'involuppo della curva sperimentale fino alla massima capacità portante.

Modello II rappresentativo di un edificio costituito dal solo telaio in c.a. e perciò si è considerata una rigidità pari a quella secante allo scarico ed una resistenza pari a quella residua in modo da considerare un contributo minimo della tamponatura ed un comportamento isteretico medio.

A questi due modelli sono state applicate le metodologie proposte dall'OPCM 3274 e dall'ATC40 per la valutazione della performance. Quando si è considerato l'edificio come rappresentativo di una classe tipologica si è riscontrato un buon comportamento sismico: l'edificio solo in pochi casi non è stato in grado di resistere ad uno SLDS (la capacità massima viene superata con l'ATC40, modello I, una sola volta (zona 1 suolo D) mentre con l'OPCM 3274, modello I, due volte (zona 1- suoli B,C,E e D) ed in un solo caso nel modello II (zona 1- suolo D))

Per l'edificio, considerato appartenente al sito dove è effettivamente collocato si è applicata la metodologia prevista dall'OPCM 3274 per la valutazione della performance sismica considerando tutti e tre gli stati limite definiti.

Da queste elaborazioni si è riscontrato che la struttura è in grado di resistere, seppur con un certo danneggiamento degli elementi non strutturali, ad una richiesta di deformazione corrispondente addirittura allo SLCO. Inoltre, la struttura raggiunge la configurazione ottenuta alla fine della prova sperimentale a seguito di un evento sismico caratterizzato da una  $ag/g$  pari a 0,50.

Volendo fare un confronto tra i risultati ottenuti con l'OPCM 3274 e quelli ricavati mediante l'applicazione dell'ATC40 si deduce che l'ordinanza fornisce, nella maggior parte dei casi, risultati più penalizzanti.

Per confrontare i risultati ottenuti nell'ambito del progetto del Risk-UE per edifici aventi tipologia analoga a quella dell'edificio in oggetto, sono state considerate le seguenti classi:

tipologia corrispondente al modello I: RC3.1L (Low code), edifici caratterizzati da un telaio in c.a. con pannelli murari di tamponatura non armata, costituito da massimo due piani (low-rise) e progettato con un codice sismico privo di appropriate regole sismiche e senza la definizione di dettagli strutturali (low-code);

tipologia corrispondente al modello I: RC1L (Low code), edifici con telaio in c.a. costituito da massimo due piani e progettato con un codice sismico che non prevede la definizione di dettagli strutturali.

Per queste sono state tracciate le curve di capacità nel Risk-Ue e si è riscontrato che quando si è considerata la curva di capacità della tipologia RC3.1L, rappresentativa di un modello che affida la resistenza dell'edificio esclusivamente alla tamponatura, rispetto al modello I i risultati sono meno cautelativi: nel Risk-UE infatti si sovrastima la capacità. Quando, invece si è considerata la tipologia RC1L rappresentativa di un modello che non considera il contributo della tamponatura, i risultati ottenuti si sono rivelati più cautelativi rispetto al modello II: in questo caso si sottostima la capacità.



## BIBLIOGRAFIA

- Angeletti P., Gavarini C., 1984. *Un metodo di valutazione della vulnerabilità sismica per edifici esistenti di cemento armato. Confronti sperimentali*, Atti del II Convegno Nazionale sulla Ingegneria Sismica in Italia, Rapallo
- ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Vol. 1, ATC Applied Technology Council, California Seismic Safety Commission, Report SSC 96-01.
- Balbi A., Lagomarsino S., Cortellesi D., De Luigi G., Eva C., Spallarossa D., Giovinnazzi S., Ugolini P., 2004. *Analisi di rischio ai fini preventivi e strumenti per la gestione dell'emergenza sismica nella regione Liguria*, Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia., Genova
- Benedetti D., Petrini V., 1984. *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure*, L'industria delle costruzioni; 18, 66-78
- Borri A., Speranzini E., 2004. *Stima della vulnerabilità di edifici di culto a pianta "non convenzionale"*, Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia., Genova
- Bramerini, F., Di Pasquale, G., Orsini, A., Pugliese, A., Romeo, R., Sabetta, F., 1995. *Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari*. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale SSN/RT/95/01, Roma: Servizio Sismico Nazionale
- Calvi G.M., 1999. *A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings*, Journal of Earthquake Engineering, Vol.3., N.3. pp 411-438.
- Chopra A.K. and R.K. Goel, 1999. *Capacity-Demand-Diagram Methods For Estimating Seismic Deformation Of Inelastic Structures: SDOF Systems*, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 72 p.
- CNR-GNDT, 1994. *Seismic Risk for Public Buildings, Part I, Methodological aspects*, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma (in Italian).
- Coburn, A., Spence, R., 1992. *Earthquake Protection*. Chinchester: John Wiley & sons.
- Cornell, C.A., 1968. *Engineering seismic risk analysis*. Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
- Corsanego A., Petrini V., 1990. *Seismic Vulnerability of Buildings*, SEISMED 3, Trieste
- Della Corte G., Faggiano B., Mazzolani F.M., 2004. The ILVA-IDEM Project: Full-Scale Pushover Test on an Existing RC Structure – Part II: Modelling Issues. In XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia" (ANIDIS 2004). Genova.
- Dolce M., 1997. *La valutazione della vulnerabilità per le analisi di rischio e gli scenari di danno*, Atti del VIII Convegno Nazionale ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia, Taormina
- FEMA 1999, HAZUS 1999. *HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology*. Technical Manual. Federal Emergency Management Agency U.S.A.

- Frassine L., Giovinazzi S., 2004. *Basi di dati a confronto nell'analisi di vulnerabilità sismica dell'edilizia residenziale: un'applicazione per la città di Catania*. Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia., Genova
- GNDT 1994. *Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e di secondo livello (muratura e cemento armato)*, Gruppo Nazionale per la Difesa dai terremoti- Roma
- Freeman S.A., 1998. *Development and use of capacity spectrum method*, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland California.
- Freeman S.A., J.P. Nicoletti, and J.V. Tyrell, 1975. *Evaluations of existing buildings for seismic risk - A case study of Puget Sound Naval Shipyard*, Bremerton, Washington.
- Giovinazzi S., & Lagomarsino S., 2001. *Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito*, Atti del X Convegno Nazionale ANIDIS L'Ingegneria sismica in Italia, Potenza
- Giovinazzi S., Lagomarsino S., 2003. *Seismic Risk Analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas*. European Safety and Reliability Conference – ESREL 2003, Maastricht, The Netherlands.
- Giovinazzi S., Balbi A., Lagomarsino S., 2004. *Un modello di vulnerabilità per gli edifici nei centri storici*. Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia., Genova
- Giovinazzi S., Lagomarsino S., 2004. *A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings*. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada
- Grimaz S., Meroni F., Petrini V., Tomasoni R., Zonno G., 1996. *Il ruolo dei dati di danneggiamento del terremoto del Friuli nello studio di modelli di vulnerabilità sismica degli edifici in muratura*, Istituto di ricerca sul rischio sismico, Milano
- Grunthal G., 1998. *“European Macroseismic Scale”*. Centre Europeen de Géodynamique et de Sismologie, Luxembourg
- Iervolino I., Fabbrocino G., Manfredi G., 2004. *Un Metodo per la Analisi di Rischio Sismico a Scala Territoriale*, Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia., Genova
- Kramer, S.L., 1995. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall
- Lagomarsino S., Maggiolo L., Podestà S., 2001. *Vulnerabilità sismica delle chiese: proposta di una metodologia integrata per il rilievo la prevenzione ed il rilievo del danno in emergenza*. Atti del X Convegno Nazionale ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia, Potenza
- Lagomarsino S., Podestà S., 1999. *Metodologia per l'analisi di vulnerabilità delle chiese*, Atti del IX Convegno Nazionale ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia, Torino
- Lagomarsino S., Podestà S., Risemini S., 2004. *Observational and mechanical models for the vulnerability assessment of monumental buildings*. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada
- Mazzolani F.M., Dolce M., Landolfo R., Nicoletti M., 2004a. *Seismic upgrading of RC buildings by means of innovative techniques: the ILVA-IDEM project*. In XI Congresso Nazionale “L'ingegneria Sismica in Italia” (ANIDIS 2004), Genova.
- Mazzolani F.M., Della Corte G., Calderoni B., De Matteis G., Faggiano B., Panico S., Landolfo R., Dolce M., Spina D., Valente C., 2004b. *The ILVA-IDEM Project: Full-Scale Pushover Test on an*

Existing RC Structure – Part Experimental Results. In XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia” (ANIDIS 2004). Genova.

Mazzolani F.M., Calderoni B., Spina D., Valente C., 2004c. Identificazione strutturale dell'edificio esistente: il progetto ILVA-IDEM. In XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia” (ANIDIS 2004). Genova.

Meroni, F., Petrini V., Zonno G., 1999. *Valutazione della vulnerabilità di edifici su aree estese tramite dati ISTAT*. Atti 9° Convegno Nazionale ANIDIS: L’ingegneria Sismica in Italia, Torino

Meroni, F., Petrini V., Zonno G., 2000. *Distribuzione nazionale della vulnerabilità media comunale*. in A. Bernardini, *La vulnerabilità degli edifici*, CNR-GNDT, Roma, pp.105-131.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 , 20/03/2003 e successivi aggiornamenti.

Park Y.J. and A.H. Ang ,1985. *Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete*. Journal of Structural Engineering. ASCE vol. 111 (4): 722-739, 1985.

Sandi H., Floricel I. , 1995. *Analysis of seismic risk affecting the existing building stock*, X European Conference on earthquake Engineering; Vol. 3, pp:1105-1110

WP1 “*European distinctive features, inventory database and typology*” D. Lungu, A. Aldea, A. Arion, R. Vacareanu, F. Petrescu, T. Cornea, 2001.

WP4. “*Vulnerability Assessment of Current Buildings. Guidelines for the Implementation of the II Level Vulnerability Methodology*” , 2002.

WP5: “*Vulnerability assessment of historical and monumental building*” Sergio Lagomarsino, Sonia Giovinazzi, Stefano Podestà, Sonia Resemini DISEG, University of Genoa, Italy, 2000.

WP11: “*Synthesis of the application to Catania city*” E. Faccioli, L. Frassinè, D. Finazzi, V. Pessina S. Lagomarsino (co-ordinator), S. Giovinazzi, S. Resemini, E. Curti, S. Podestà with the collaboration of S. Scuderi, 2004