

# DOCROS

Design Of CROSS Sections

Dimensionamento à flexão de estruturas de betão: modelo de secção. Formulação e manual do programa docros.

## **Manual do utilizador**

**Versão 1.1, Novembro de 2003**

---

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>3</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>5</b>
<b>Ficheiro de dados.....</b>	<b>5</b>
2.1 Considerações Gerais.....	5
2.2 Descrição dos vários blocos que constituem o ficheiro de dados .....	6
2.2.1 Parâmetros principais.....	7
2.2.2 Unidades .....	7
2.2.3 Propriedades do ensaio de flexão sugerido pela RILEM 162 TDF.....	8
2.2.4 Geometria das camadas de betão .....	10
2.2.5 Propriedades das camadas de betão .....	12
2.2.6 Leis de comportamento do betão à compressão.....	15
2.2.6.1 Lei de compressão do betão CEB-FIP 93 .....	15
2.2.7 Leis de comportamento do betão à tracção.....	16
2.2.7.1 Leis de tracção até ao pico .....	17
2.2.7.1.1 Lei linear do betão à tracção .....	17
2.2.7.2 Leis de tracção pós pico.....	19
2.2.7.2.1 Lei constante de amolecimento do betão .....	19
2.2.7.2.2 Lei trilinear $\sigma$ - $\varepsilon$ de amolecimento do betão .....	20
2.2.7.2.3 Lei free-form $\sigma$ - $w$ de amolecimento do betão .....	22
2.2.7.2.4 Lei trilinear $\sigma$ - $w$ de amolecimento do betão .....	24
2.2.7.2.5 Lei de Tension stiffening do betão.....	26
2.2.8 Geometria dos conjuntos de armadura.....	28
2.2.9 Propriedades dos conjuntos de armadura.....	29
2.2.10 Leis de comportamento do aço .....	31
2.2.10.1 Lei linear-parábola do aço .....	31
2.2.11 Geometria dos conjuntos de FRP.....	33
2.2.12 Propriedades dos conjuntos de FRP.....	34
2.2.13 Leis de comportamento do FRP.....	35
2.2.13.1 Lei linear do FRP.....	36
2.2.14 Bloco das Fases.....	37
2.2.15 Tipos de carregamento.....	38
2.2.15.1 Carregamento monotónico.....	39
2.2.16 Condições de paragem de fase.....	41
2.2.16.1 Condição de paragem no betão .....	41
2.2.16.2 Condição de paragem no FRP.....	42
2.2.17.3 Condição de paragem por momento .....	44
2.2.17.4 Condição de paragem no aço .....	45
2.3 Execução do programa .....	46
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>47</b>
<b>Saída de Resultados.....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>48</b>
<b>Modelo de cálculo .....</b>	<b>48</b>

4.1 Cálculo do Eixo Neutro .....	48
4.2 Cálculo da abertura de fenda .....	49
4.3 Determinação da curva Momento – Curvatura .....	50
4.3.1 Cálculo do Momento ( $M$ ) .....	50
4.3.2 Cálculo da Curvatura ( $\chi$ ) .....	50
4.4 Determinação da curva Força – Flecha ( $F$ - $\delta$ ) .....	50
4.5 Fluxograma do Docros.....	53
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>55</b>
<b>Exemplos de cálculo .....</b>	<b>55</b>
5.1 Exemplo 1.....	55
5.1.1 Ficheiro de dados.....	56
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>59</b>

# CAPÍTULO I

## Introdução

---

O presente manual descreve o programa de cálculo **DOCROS** (“*Design Of CROSS Section*”). O programa em questão visa o cálculo de secções planas sujeitas a flexão simples.

O desenvolvimento deste software foi realizado no âmbito do projecto de investigação POCTI/ECM/34793/2000, “*Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements*”, e foi levado a cabo por alunos de pós-graduação sob a supervisão do coordenador do referido projecto. O principal objectivo desta ferramenta é determinar a capacidade resistente de secções de elementos estruturais. Para tal é tido em conta o comportamento não linear dos materiais intervenientes. Nesta versão pode-se simular o comportamento do betão simples (BS), betão reforçado com fibras de aço (BRFA), reforços constituídos por armaduras de aço e de materiais compósitos.

O programa é constituído pelo módulo **docros** o qual se baseia num algoritmo implementado em *Linguagem C*, sendo a sua execução efectuada em ambiente *MS-DOS*. O ficheiro executável lê um conjunto de dados formatados fornecidos pelo utilizador num ficheiro com a extensão **\_sd.dat**. Este ficheiro pode ser gerado, formatado e alterado com recurso a um qualquer editor de texto. No entanto, o utilizador deve ter presente um número de regras que a estrutura do ficheiro deve respeitar e que serão identificadas nas secções seguintes.

Em paralelo, foi criado um outro módulo, **DOCROSdata**, para gerar, formatar e alterar dados no ficheiro referido. Este módulo foi implementado em *Linguagem Visual Basic*, sendo uma interface gráfica, do tipo *Windows*, que permite ao utilizador gerar o ficheiro de dados do programa DOCROS, de forma simples e rápida. Esta ferramenta será descrita em paralelo com o módulo **docros**.

Ambos os módulos sujeitam a informação gerada e fornecida pelo utilizador a uma verificação prévia, de forma a validar a consistência da mesma.

Como elementos de saída, o software fornece um ficheiro com a extensão **\_mc.csv**, o qual pode ser lido pelo *Microsoft Excel*, contendo a relação momento-curvatura ( $M-\chi$ ) para a secção em estudo (ver Figura 1). Mediante a opção do utilizador, pode ser gerado um outro ficheiro de resultados (extensão **\_out.dat**), que pode ser lido por um qualquer editor de texto, o qual contém os resultados referentes a tensões, forças e extensões intrínsecas a uma dada fase do carregamento e para cada camada que compõe a secção em estudo.

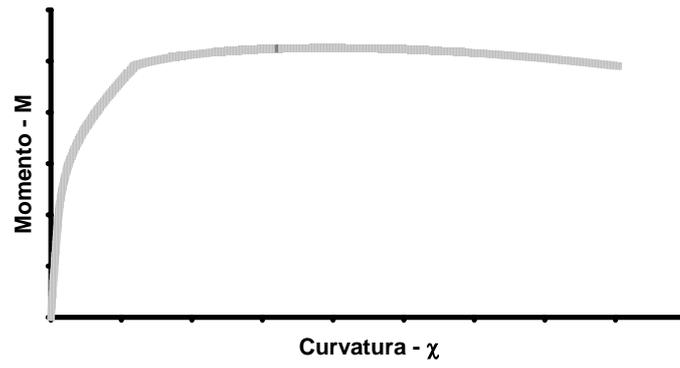


Figura 1 – Relação momento-curvatura determinada pelo *docros*.

Para o cálculo da relação momento-curvatura o modelo implementado considera a secção discretizada em camadas, e tem em consideração as equações de equilíbrio, as equações de compatibilidade de deformações e as leis constitutivas dos materiais intervenientes.

#### 2.1 Considerações Gerais

Neste capítulo é descrita a estrutura do ficheiro de dados necessária à boa execução do programa *docros*. O ficheiro em causa tem a extensão *\_sd.dat* e é um ficheiro que pode ser gerado e modificado com qualquer editor de texto ou com recurso ao módulo *DOCROSdata*.

O utilizador deve ter em atenção os seguintes aspectos que são comuns a qualquer ficheiro de dados do *docros*:

As linhas em branco são ignoradas pelo programa, podendo estas serem acrescentadas ou eliminadas em qualquer local.

Todos os caracteres à direita do símbolo cardinal (#) são ignorados pelo programa, tornando assim possível ao utilizador comentar livremente o ficheiro de dados de forma a torná-lo mais compreensível.

Os diferentes dados numéricos devem estar separados por um ou mais espaços em branco, sendo a leitura efectuada em formato livre, ou seja, um determinado conjunto de dados não precisa de estar necessariamente numa mesma linha, no entanto, cada conjunto de dados tem de terminar com o caractere ponto-e-vírgula (;).

O ficheiro de dados é constituído por diversos blocos independentes uns dos outros, sendo cada bloco identificado por duas *palavras-chave* que indicam o seu início e o seu fim. As *palavras-chave* devem respeitar os seguintes formatos:

<*keyword*> - inicia o bloco

</*keyword*> - finaliza o bloco

O ficheiro de dados é constituído por um só bloco que, por sua vez, está dividido em sub-blocos. Assim, o ficheiro deverá ser iniciado obrigatoriamente com a palavra-chave <*DOCROS\_DATA\_FILE*>, que por sua vez contém outros três blocos que deverão estar organizados sequencialmente da seguinte forma:

Bloco referente aos parâmetros principais, *palavra-chave* <*MAIN\_PARAMETERS*>

Bloco referente às unidades, *palavra-chave* <*UNITS\_INPUT\_OUTPUT\_DATA*>

Bloco referente à geometria e propriedades mecânicas dos vários materiais intervenientes, *palavra-chave* <*MESH*>.

Os blocos referidos anteriormente têm que ser obrigatoriamente usados e escritos pela ordem descrita. De forma a clarificar o ficheiro de dados, apenas deverão ser colocados os blocos e dados estritamente necessários à análise em questão.

No que diz respeito ao bloco <*MESH*> existe a particularidade de o conjunto de sub-blocos que o constituem não necessitarem de estar dispostos por uma determinada ordem, podendo assim serem dispostos consoante a vontade do utilizador.

Para além das obrigações já mencionadas, outra restrição imposta pelo programa é a obrigatoriedade de existirem camadas de betão, sendo opcional a existência dos restantes tipos de materiais de reforço disponíveis.

A estrutura base e todos os blocos actualmente implementados no software estão disponíveis no ficheiro de demonstração *Demo\_sd.dat* que acompanha o programa.

Em anexo apresenta-se a estrutura do ficheiro de dados de diversos exemplos que tipificam as várias possibilidades de cálculo.

## 2.2 Descrição dos vários blocos que constituem o ficheiro de dados

Tal como já foi referido, um determinado ficheiro de dados pode ser gerado e alterado com recurso a um qualquer editor de texto ou com recurso ao módulo *DOCROSdata*. Assim, nos seguintes pontos são descritos, um a um, os blocos implementados na actual versão do *docros*, juntamente com a descrição dos menus que compõem o módulo *DOCROSdata*.

Na Figura 2 está representada a janela principal do módulo *DOCROSdata*. Como opções iniciais o utilizador pode criar um novo ficheiro (*New*), abrir um ficheiro existente (*Open*) para proceder a alterações, ou terminar a aplicação (*Exit*), sendo que a opção para escrita (*Write*) só estará disponível quando alguns dados forem introduzidos.

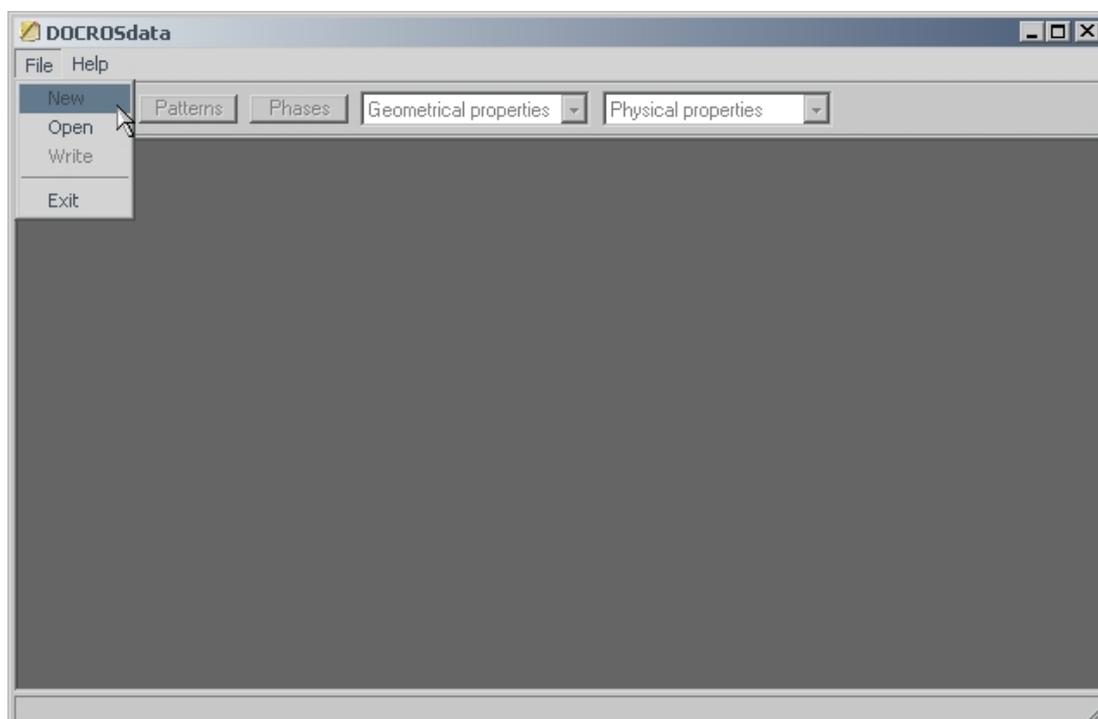


Figura 2 – Janela principal do módulo *DOCROSdata*.

Conforme a opção do utilizador, novos sub-menus serão apresentados, sendo a descrição dos mesmos apresentada nas secções seguintes.

## 2.2.1 Parâmetros principais

```
<MAIN_PARAMETERS>
  MAIN_TITLE = Nome ;
  NUM_CONCRETE_LAYERS = 50 ;
  NUM_STEEL_LAYERS = 2 ;      # Number of different conventional
                              # reinforcement sets
  NUM_FRP_LAYERS = 1 ;      # Number of different composite
                              # reinforcement sets
  NUM_ADHESIVES_LAYERS = 0 ; # Number of different adhesive sets
  JUMP_SURF = _NO ;         # _YES / _NO -> Activates jump
                              # to top surface

  CONTROL_FILE = _YES ;
</MAIN_PARAMETERS>
```

O primeiro bloco do ficheiro de dados é denominado de **MAIN\_PARAMETERS** sendo constituído por:

**MAIN\_TITLE** – Frase correspondente ao título do problema, a qual não pode exceder os 512 caracteres;

**NUM\_CONCRETE\_LAYERS** – Número total de camadas de betão em todas as fases do problema. O valor terá que ser obrigatoriamente maior que zero;

**NUM\_STEEL\_LAYERS** – Número total de camadas de aço em todas as fases do problema;

**NUM\_FRP\_LAYERS** – Número total de camadas de FRP em todas as fases do problema;

**NUM\_ADHESIVE\_LAYERS** – Número total de camadas de adesivo em todas as fases do problema;

**JUMP\_SURF** – O cálculo da secção é realizado pelo incremento da extensão no centro de gravidade de uma determinada camada de betão especificada. Esta opção, quando activada, permite o salto do incremento na camada de betão para o incremento da extensão no extremo da secção activa na presente fase assim que o eixo neutro atinja a camada referida. Este campo deverá ser preenchido com uma das seguintes *palavras-chave*: **\_YES** ou **\_NO** sendo que a primeira activa o salto e a segunda não o activa;

**CONTROL\_FILE** – Ficheiro de “controlo” com os resultados ao nível das tensões e extensões por camada para cada iteração, assim como o valor da profundidade do eixo neutro, entre outros. Este campo deverá ser preenchido com uma das seguintes *palavras-chave*: **\_YES** ou **\_NO** sendo que a primeira activa a escrita do ficheiro a segunda não a activa.

## 2.2.2 Unidades

```
<UNITS_INPUT_OUTPUT_DATA>
## Input

## Content of each column:
# A -> Input force unit
# B -> Input length unit
# A B
  N mm ;
</UNITS_INPUT_OUTPUT_DATA>
```

O segundo bloco do ficheiro de dados, *UNITS\_INPUT\_OUTPUT\_DATA*, inclui o tipo de unidades de força e comprimento dos dados inseridos, sendo que este serve de referência para todo o processo de cálculo, isto é, pode ser usado qualquer conjunto coerente de unidades.

### 2.2.3 Propriedades do ensaio de flexão sugerido pela RILEM 162 TDF

```
<RILEM_162TDF_PROPERTIES>
## Parameters for determining the tension-deflection curve

## Content of each column:
# A -> Name of beam
# B -> Span of beam
# C -> Height of beam
# D -> Width of beam
# E -> Length of the non-linear hinge
# A      B      C      D      E
Rilem_Example 500 150 150 75 ;
</RILEM_162TDF_PROPERTIES>
```

A introdução deste bloco permite calcular a relação força-flecha ( $F-\delta$ ) para a secção em questão, de acordo com as condições de ensaio representadas na Figura 3. As considerações para o cálculo interno estão especificadas num capítulo posterior.

Este bloco, designado de *RILEM\_162TDF\_PROPERTIES*, deve ser declarado dentro do bloco *MESH*, sendo o mesmo constituído por:

- 1ª Coluna – Nome de referência;
- 2ª Coluna – Distância entre os apoios do ensaio (L);
- 3ª Coluna – Altura da secção média da viga de ensaio (H);
- 4ª Coluna – Largura da secção média da viga de ensaio (B);
- 5ª Coluna – Dimensão da rótula não linear (s).

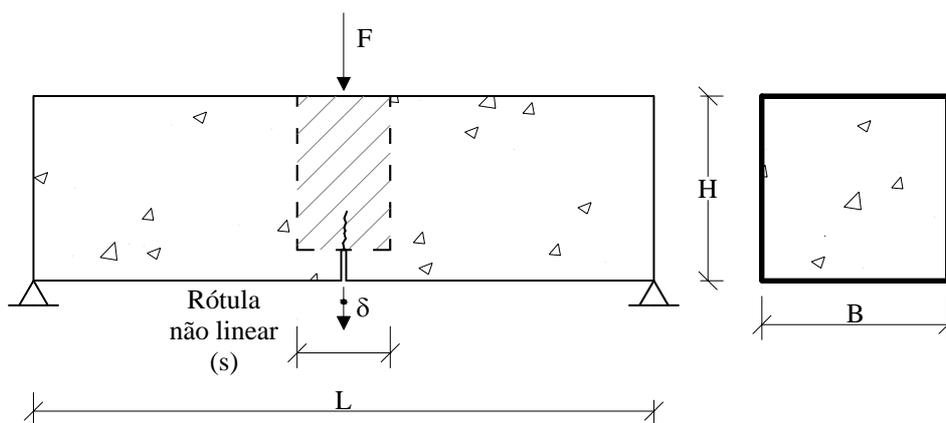


Figura 3 – Esquema da viga de ensaio tipo.

Nas Figuras 4 e 5 apresentam-se os menus do *DOCROSdata* que permitem introduzir os dados correspondentes aos três blocos de dados apresentados. Assim, no menu das opções gerais (*General Options*) o utilizador tem a possibilidade de inserir as

unidades da força (*Force*) e do comprimento (*Length*) em consonância com o bloco *UNITS\_INPUT\_OUTPUT\_DATA*. Pode também activar ou desactivar as funções *JUMP\_SURF* (*Jump to layer top surface*) e *CONTROL\_FILE* (*Create a control file*) descritas na secção 2.2.1. Disponível está ainda a opção de activar a determinação da relação Força-flecha definida pela RILEM, passando assim a serem pedidos ao utilizador os dados descritos na secção 2.2.3 referentes às dimensões geométricas do provete.

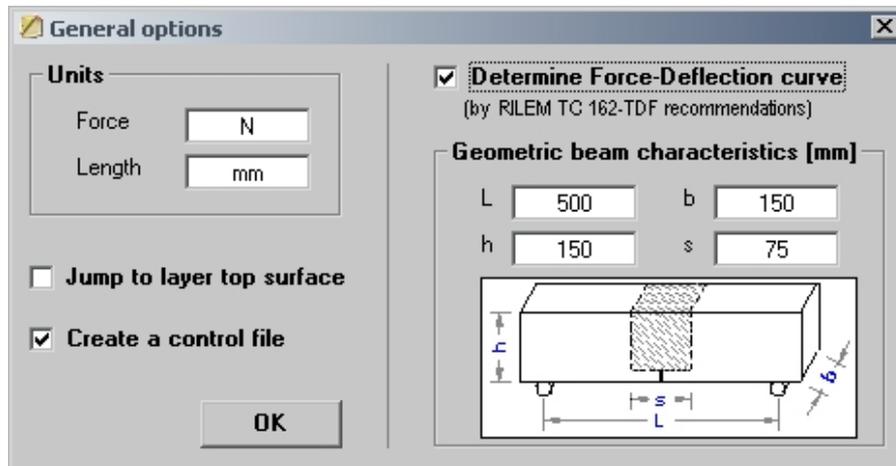


Figura 4 – Menu de opções gerais.

No menu da Figura 5 (*Section Patterns*) é pedido ao utilizador a informação referente à constituição material da secção em causa, em consonância com o bloco de dados descrito na secção 2.2.1, podendo o utilizador definir essa mesma secção como sendo constituída por betão, aço, FRP e adesivos (material utilizado na ligação dos FRP ao betão). Vários padrões constituídos por um mesmo tipo de material podem ser introduzidos, tendo o utilizador que estar ciente que a numeração das camadas que discretizam os vários padrões de um mesmo material será efectuada de forma incremental e pela ordem com que tais padrões sejam inseridos na grelha. Apenas a informação transposta para a grelha será tida em conta. Para isso o utilizador tem quatro opções à sua disposição, sendo elas o adicionar (*Add*), inserir (*Insert*), editar (*Edit*) e apagar (*Delete*) o padrão (pattern) em causa.

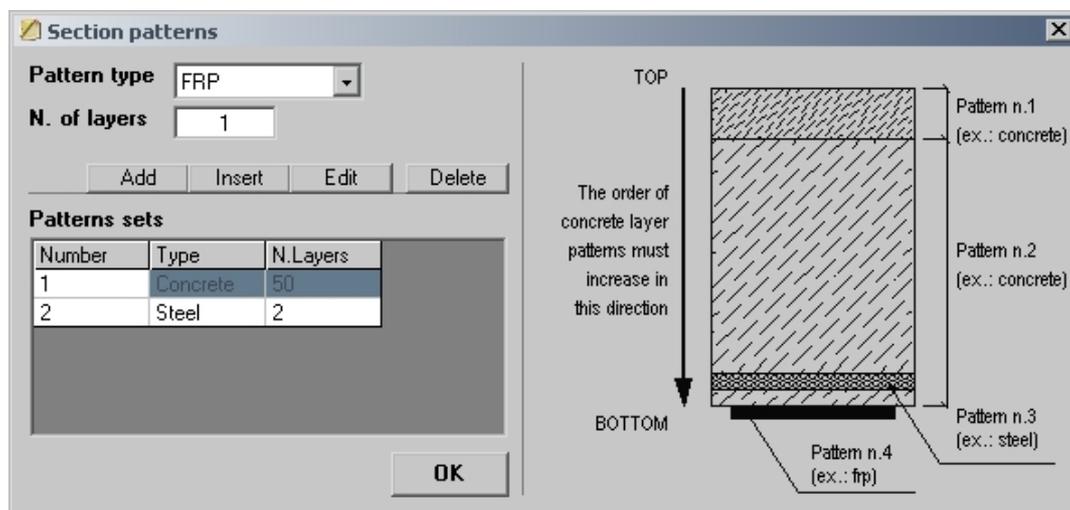


Figura 5 – Definição dos vários padrões que constituem a secção.

## 2.2.4 Geometria das camadas de betão

```
<CONCRETE_GEOMETRY_LAYER_DATA>
## Layer geometrical characteristics
  COUNT = 2 ; # N. of layer geometrical sets

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Group name
# C -> Layer (or layer range)
# D -> Height of layer (or layer range)
# E -> Width of layer (or layer range)
# F -> Distance from the top surface of the layer range
      # to the reference axis
# A   B     C         D   E     F
# 1   SL1   [1-5]    50  300   0 ;
# 2   SL2   [6-50]   50  200  250.0 ;
</CONCRETE_GEOMETRY_LAYER_DATA>
```

Este bloco, designado de **CONCRETE\_GEOMETRY\_LAYER\_DATA**, como todos os que se referem às propriedades geo-mecânicas da secção, deverão ser declarados dentro do bloco **MESH**. Este bloco é constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de camadas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades geométricas das camadas que se passa a descrever:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do grupo. Deverá ter menos que 512 caracteres;

3ª Coluna – Número da camada ou intervalo de camadas. No caso de uma só camada coloca-se simplesmente o número dessa camada. Para um intervalo deverá ser adoptado o formato  $[i-j]$ , em que  $i$  é a primeira camada do intervalo e  $j$  é a última. Deverão ser verificadas as condições  $i < j$  e  $j$  não ser superior ao número total de camadas de betão definidas no bloco dos parâmetros principais. A numeração das camadas tem que ser contínua;

4ª Coluna – Altura da camada ou do conjunto de camadas;

5ª Coluna – Largura da camada ou do conjunto de camadas;

6ª Coluna – Distância da camada  $i$  ao eixo de referência.

A Figura 6 representa o excerto para exemplo do bloco dado, na qual se esquematiza o eixo de referência e as disposições tomadas em consideração pelo programa.

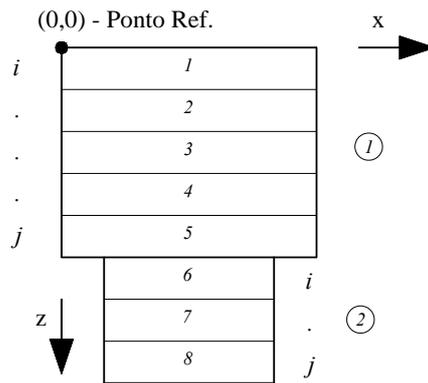


Figura 6 – Esquema representativo da secção exemplo.

Na Figura 7 está esquematizada a forma para aceder aos vários menus que permitem a definição das características geométricas dos vários padrões que definem a secção em causa.

Para o caso de um padrão de betão, o menu em causa está representado na Figura 8, no qual é pedido ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (*Name*), altura (*Height*) e largura (*Width*) da(s) camada(s) em causa, distância da(s) camada(s) ao eixo de referência (*Y of gravity point*) e o número da(s) camada(s) em questão (*Layer range*) sendo que uma mesma camada só pode ser declarada uma única vez. Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta.

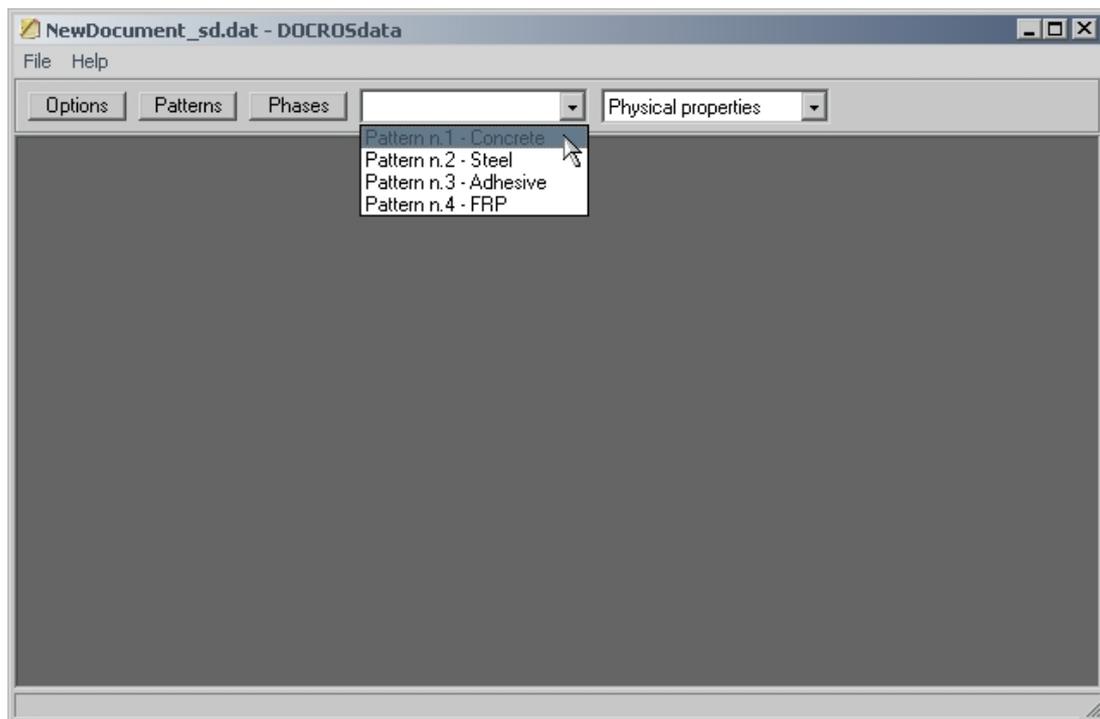


Figura 7 – Janela principal do módulo *DOCROSdata*.

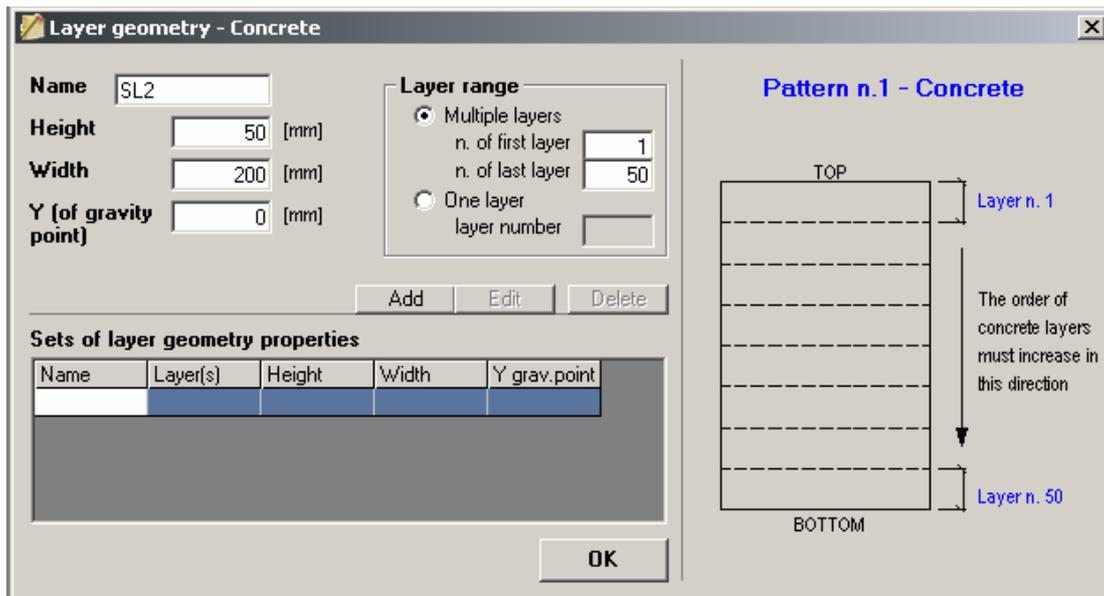


Figura 8 – Menu referente às propriedades geométricas dos agrupamentos de betão.

## 2.2.5 Propriedades das camadas de betão

```

<CONCRETE_LAYER_PROPERTIES>
## Specification of the concrete layer properties
  COUNT = 1 ; # N. of specifications

## Content of each column:
# A -> Counter (or counter range)
# B -> Group name
# C -> Phase
# D -> Layer (or layer range)
# E -> Type of compression constitutive law
# F -> Name of compression constitutive law
# G -> Type of tension up-to-peak constitutive law
# H -> Name of tension up-to-peak constitutive law
# I -> Type of tension softening constitutive law
# J -> Name of tension softening constitutive law
# K -> Type of tension stiffening constitutive law
# L -> Name of tension stiffening constitutive law
# A   B       C   D           E           F           G
  1   CLT1   1   [1-50]   _UNC_CEB_FIP93   Comp1   _LIN_UPPEAK
# H           I           J           K           L
  TracLin   _TRILINEAR_CRACK   TracCrack   _NONE   NONE ;
</CONCRETE_LAYER_PROPERTIES>

```

Neste bloco, designado de **CONCRETE\_LAYER\_PROPERTIES**, encontram-se os parâmetros necessários à escolha das várias leis constitutivas que definem o comportamento das camadas de betão, sendo constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de camadas com as mesmas propriedades

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades das mesmas, as quais se resumem a:

- 1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;
- 2ª Coluna – Nome do grupo de camadas com as mesmas propriedades;
- 3ª Coluna – Fase em que as camadas estão activas. As camadas atribuídas a uma fase *i* estarão activas em todas as outras fases posteriores;
- 4ª Coluna – Número da camada ou intervalo de camadas. No caso de uma só camada coloca-se, simplesmente, o número dessa camada. Para um intervalo de camadas deverá ser adoptado o formato *[i-j]*, em que *i* é a primeira camada do intervalo e *j* é a última. Deverão ser verificadas as condições  $i < j$  e *j* não ser superior ao número total de camadas de betão definidas no bloco dos parâmetros principais. A numeração das camadas tem que ser contínua;
- 5ª Coluna – Lei constitutiva de compressão. Neste campo deverá ser introduzida uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 1;
- 6ª Coluna – Nome da lei constitutiva de compressão;
- 7ª Coluna – Lei constitutiva de tracção até ao pico. Neste campo deverá ser introduzida uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 2;
- 8ª Coluna – Nome da lei constitutiva de tracção até ao pico;
- 9ª Coluna – Lei constitutiva de tracção após pico, representado a fase de amolecimento em tracção do material (*Tension Softening*). Neste campo deverá ser introduzida uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 3;
- 10ª Coluna – Nome da lei constitutiva de tracção após pico;
- 11ª Coluna – Lei constitutiva de pós pico das camadas sob influência de armaduras. Representa a fase de endurecimento em tracção do material (*Tension Stiffening*). Neste campo deverá ser introduzida uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 3;
- 12ª Coluna – Nome da lei constitutiva de *Tension Stiffening*.

Na Figura 9 está esquematizada a forma de aceder aos vários menus que permitem definir as propriedades materiais dos vários agrupamentos de camadas que constituem a secção em causa.

Para o caso de um padrão em betão, o menu em causa está representado na Figura 10, no qual é pedida ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (*Name*), fase em que o(s) layer(s) estão activos (*Phase*), número da(s) camada(s) em questão (*Layer range*), sendo que uma mesma camada só pode ser declarada uma única vez, e as respectivas leis constitutivas: compressão (*Compression*); tracção até ao pico (*Tension up-to-peak*); tracção após o pico (*Tension softening*); e *Tension stiffening*. Para cada lei constitutiva é pedido o tipo de lei (*Type*) e o respectivo nome (*Name*).

Para uma camada ou conjunto de camadas o utilizador terá que optar por uma lei de *Tension softening* ou uma lei de *Tension stiffening*, sendo que esta última opção só estará disponível caso hajam padrões de aço com as suas propriedades materiais já definidas.

Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta.

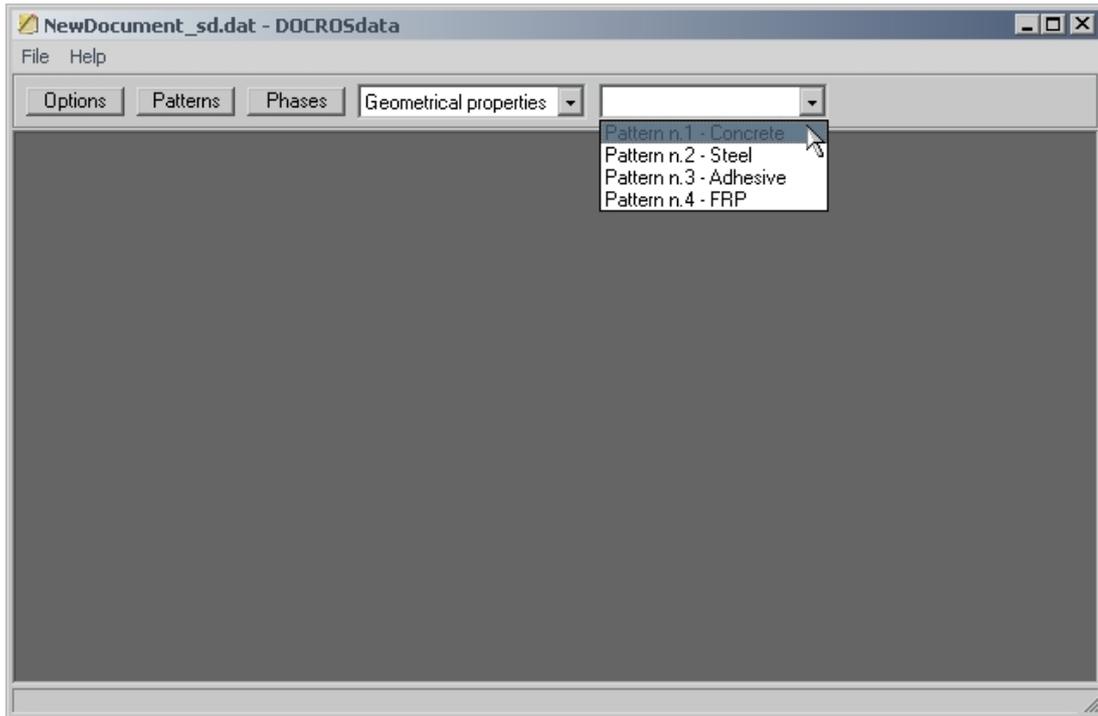


Figura 9 – Janela principal do módulo *DOCROData*.

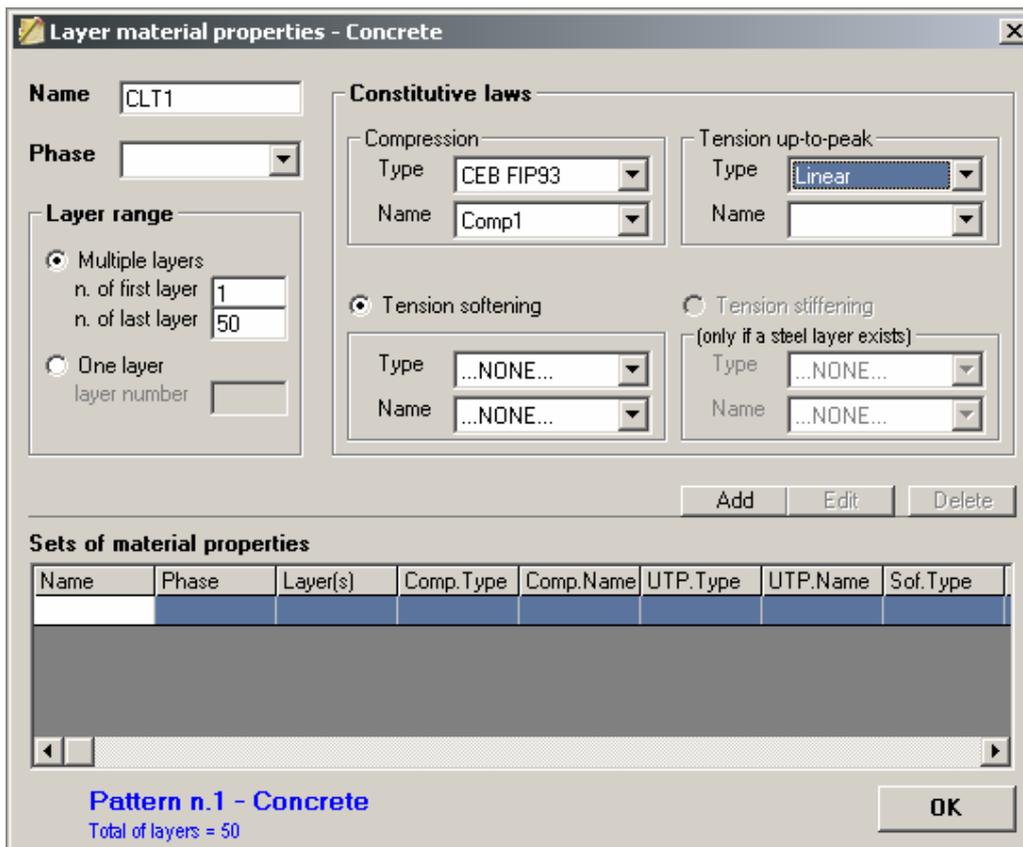


Figura 10 – Menu referente às propriedades materiais dos padrões de betão.

## 2.2.6 Leis de comportamento do betão à compressão

A modelação do comportamento do betão à compressão pode ser realizada por diversas leis. No entanto, na presente versão apenas está implementada a lei constitutiva do CEB-FIP 1993 (CEB-FIP, 1993).

Tabela 1 – Leis de compressão do betão presentes no *docros* e respectivas chaves

Lei de compressão	Palavra-chave
Nenhuma lei activa	_NONE
CEB-FIP	_UNC_CEB_FIP93

### 2.2.6.1 Lei de compressão do betão CEB-FIP 93

```
<CEB_FIP93_UNCONFINED_CONCRETE_COMPRESSION_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _UNC_CEB_FIP93
## Properties of the unconfined CEB-FIP 1993 concrete compression
## constitutive law
COUNT = 1 ; # N. of concrete compression constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (compression strength)
# D -> Young's modulus
# E -> Strain at peak stress
# A B C D E
1 C20_25 20.0 29.0e+03 2.2e-03 ;
</CEB_FIP93_UNCONFINED_CONCRETE_COMPRESSION_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei de compressão segundo o CEB\_FIP 1993 (ver Figura 11), sendo este constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas.

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;

3ª Coluna – Tensão de compressão de pico. O valor tem que ser positivo;

4ª Coluna – Valor do módulo de Young;

5ª Coluna – Extensão correspondente à tensão de pico.

Na Figura 12 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei de compressão segundo o código modelo CEB\_FIP. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da tensão de pico ( $f_{cm}$ ), o valor do módulo de Young ( $E_{ci}$ ) e a extensão correspondente à tensão de pico ( $\epsilon_{c1}$ ). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

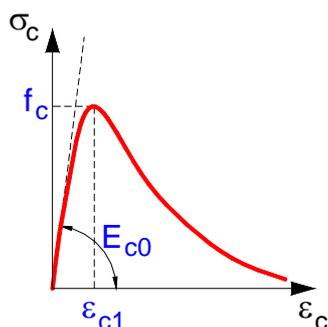


Figura 11 – Diagrama  $\sigma_c$ - $\epsilon_c$  proposto pelo código modelo CEB-FIP 1990 (1993) para simulação do comportamento do betão simples à compressão uniaxial.

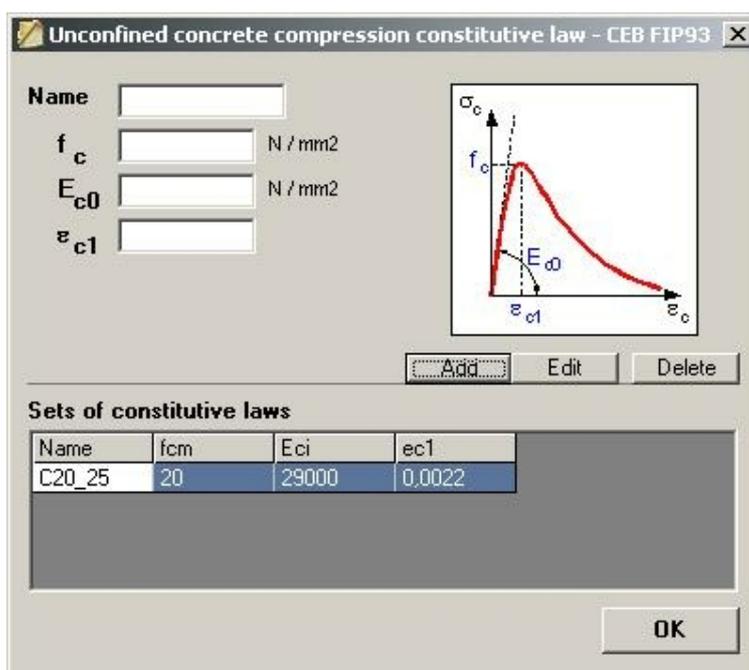


Figura 12 – Menu referente à definição da lei de compressão preconizada pelo código modelo CEB-FIP 1993.

## 2.2.7 Leis de comportamento do betão à tracção

A caracterização do comportamento do betão à tracção é composta por duas leis distintas, uma capaz de simular o comportamento até o pico de tensão, ou início de fendilhação, e outra lei para reproduzir o comportamento do mesmo após o ponto referido.

As leis de comportamento do betão à tracção pós-pico podem ainda diferenciar-se pelo tipo de curva, isto é, a curva pode apresentar um comportamento de amolecimento ou de endurecimento (“softening” ou “stiffening” na terminologia inglesa). Refere-se ainda que estão disponíveis duas leis que relacionam a tensão com abertura de fenda ( $\sigma$ - $w$ ), que podem ser utilizadas na simulação do comportamento pós fendilhado do betão. Estas leis são descritas em próximos capítulos.

A Tabela 2 e Tabela 3 apresentam todas as leis disponíveis de tracção até ao pico e após o mesmo, respectivamente.

Tabela 2 – Leis consideradas para modelação do comportamento do betão em tracção até início da fendilhação

Lei de tracção até o pico	Palavra-chave
Nenhuma lei activa	_NONE
Linear até ao pico	_LIN_UPPEAK
Linear-Parábola até ao pico	_PAR_UPPEAK

Tabela 3 – Leis consideradas para modelação do comportamento fendilhado do betão em tracção

Lei de tracção pós-pico	Palavra-chave
Nenhuma lei activa	_NONE
Pós pico de amolecimento ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ):	
Constante	_CONST_SOFT
Linear	_LINEAR_SOFT
Bilinear	_BILINEAR_SOFT
Trilinear	_TRILINEAR_SOFT
Cornelissen	_CORNELI_SOFT
Pós pico de amolecimento ( $\sigma$ - $w$ ):	
Free form	_FFORM_CRACK
Trilinear	_TRILINEAR_CRACK
Pós pico de endurecimento ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ):	
Massicotte	_MASSIC_STIF

## 2.2.7.1 Leis de tracção até ao pico

### 2.2.7.1.1 Lei linear do betão à tracção

```
<LINEAR_UP_TO_PEAK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _LIN_UPPEAK
## Properties of the linear up_to_peak concrete tension constitutive
law
  COUNT = 1 ; # N. of concrete tension constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (axial tension strength)
# D -> Young's modulus
# A   B       C       D
# 1   C20_25   3.0    29.0e+03 ;
</LINEAR_UP_TO_PEAK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei linear de tracção do betão (Figura 13), sendo constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

- 2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;
- 3ª Coluna – Tensão de tracção de pico. O valor tem que ser positivo;
- 4ª Coluna – Valor do módulo de Young.

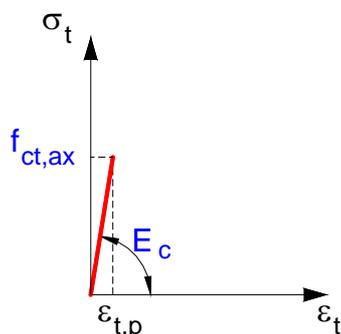


Figura 13 – Lei linear para simulação do comportamento do betão à tracção até ao pico.

Na Figura 14 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei linear de tracção até ao pico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da tensão de tracção de pico ( $f_{ct,ax}$ ) e o valor do módulo de Young ( $E_c$ ). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

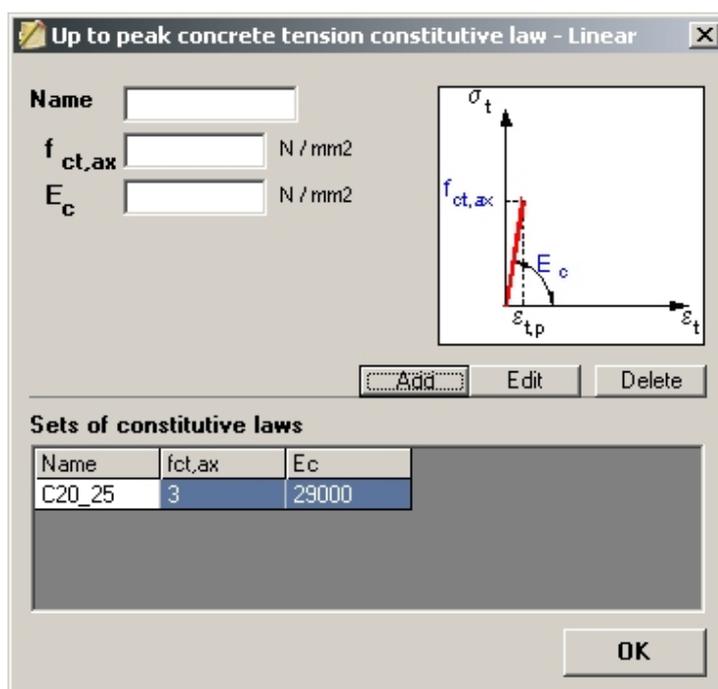


Figura 14 – Menu referente à definição da lei linear do comportamento do betão à tracção até ao pico.

## 2.2.7.2 Leis de tracção pós pico

### 2.2.7.2.1 Lei constante de amolecimento do betão

```
<CONSTANT_POST_PEAK_CONCRETE_TENSION_SOFTENING_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _CONST_SOFT
## Properties of the constant post_peak concrete tension softening
## constitutive law
  COUNT = 1 ; # N. of concrete tension softening constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Ratio between the post-peak residual
# stress and the tensile peak stress
# D -> Fracture energy (Gf)
# E -> Crack band width (lb)
# A   B       C     D     E
# 1   C20_25  0.5  0.1  50 ;
</CONSTANT_POST_PEAK_CONCRETE_TENSION_SOFTENING_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei constante de amolecimento do betão (ver Figura 15), sendo constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;

3ª Coluna – Razão entre a tensão residual pós-pico e a tensão de tracção de pico. Este valor deverá estar compreendido no seguinte intervalo: [0-1];

4ª Coluna – Energia de fractura do betão,  $G_f$ ;

5ª Coluna – Largura da banda de fendilhação,  $l_f$ .

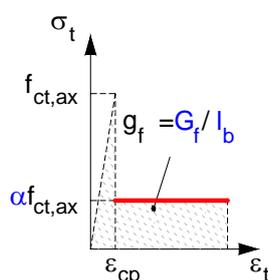


Figura 15 – Lei constante de amolecimento do betão.

Na Figura 16 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei constante de amolecimento do betão. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da razão entre a tensão residual pós-pico ( $\alpha f_{ct,ax}$ ) e a tensão de tracção de pico ( $f_{ct,ax}$ ), o valor da energia de fractura do betão ( $G_f$ ) e da largura da banda de fendilhação ( $l_b$ ). Apenas

os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

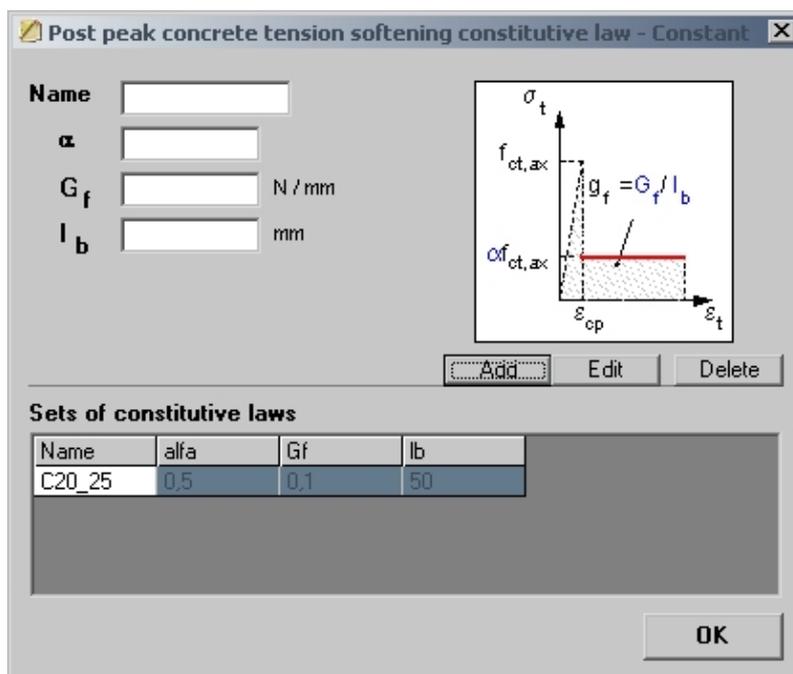


Figura 16 – Menu referente à definição da lei constante de amolecimento do betão.

### 2.2.7.2.2 Lei trilinear $\sigma$ - $\epsilon$ de amolecimento do betão

```
<TRILINEAR_POST_PEAK_CONCRETE_TENSION_SOFTENING_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _TRILINEAR_SOFT
## Properties of the trilinear post_peak concrete tension softening
## constitutive law
  COUNT = 1 ; # N. of concrete tension softening constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Percentage of the tensile strength, for defining the first
# post-peak point
# D -> Multiple of the peak strain, for defining the first
# post-peak point
# E -> Percentage of the tensile strength, for defining the
# second post-peak point
# F -> Multiple of the peak strain, for defining the second
# post-peak point
# G -> Fracture energy (Gf)
# H -> Crack band width (lb)
# A  B      C      D      E      F      G      H
# 1  C20_25  0.7   0.3   3     5     0.1   50 ;
</TRILINEAR_POST_PEAK_CONCRETE_TENSION_SOFTENING_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei trilinear de amolecimento do betão, no formato  $\sigma$ - $\epsilon$  (Figura 17), sendo constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;

3ª Coluna – Razão entre a tensão do primeiro ponto que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_1$ ). Este valor deverá estar compreendido no seguinte intervalo: [0-1];

4ª Coluna – Valor a multiplicar pela extensão de pico para definir o primeiro ponto da extensão que caracteriza a lei ( $\beta_1$ );

5ª Coluna – Razão entre a tensão do segundo ponto que caracteriza a lei e a tensão de pico ( $\alpha_2$ ). Este valor deverá estar compreendido no seguinte intervalo: [0-1];

6ª Coluna – Valor a multiplicar pela extensão de pico para definir o segundo ponto da extensão que caracteriza a lei ( $\beta_2$ );

7ª Coluna – Energia de fractura do betão,  $G_f$ ;

8ª Coluna – Largura da banda de fendilhação,  $l_f$ .

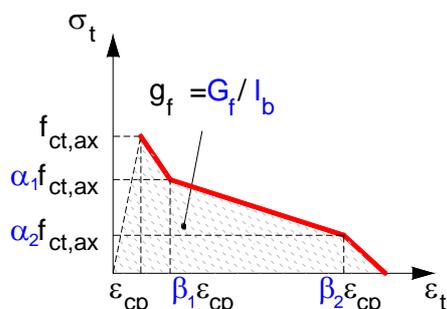


Figura 17 – Lei trilinear de amolecimento do betão no formato  $\sigma$ - $\epsilon$ .

Na Figura 18 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei trilinear de amolecimento do betão no formato  $\sigma$ - $\epsilon$ . É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da razão entre a tensão residual pós-pico do primeiro ponto que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_1$ ), o múltiplo da extensão de pico que define o primeiro ponto caracterizador da lei ( $\beta_1$ ), o valor da razão entre a tensão residual pós-pico do segundo ponto que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_2$ ), o múltiplo da extensão de pico que define o segundo ponto caracterizador da lei ( $\beta_2$ ), o valor da energia de fractura do betão ( $G_f$ ) e da largura da banda de fendilhação ( $l_b$ ). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

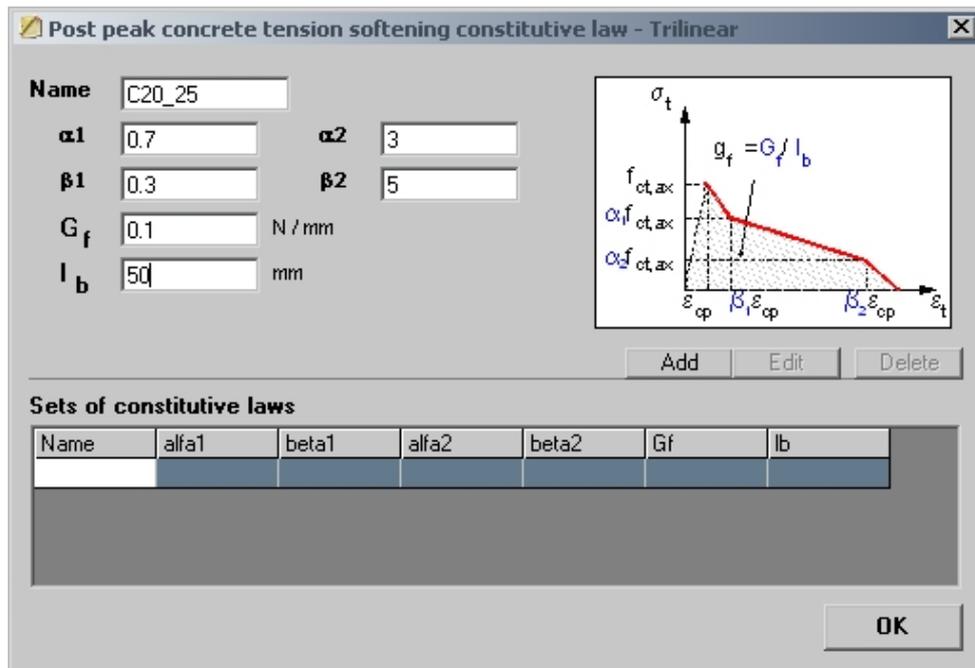


Figura 18 – Menu referente à definição da lei trilinear de amolecimento do betão no formato  $\sigma$ - $\epsilon$ .

### 2.2.7.2.3 Lei free-form $\sigma$ - $w$ de amolecimento do betão

```
<FREE_FORM_CRACK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _FFORM_CRACK
## Properties of the free form crack concrete tension
## constitutive law
COUNT = 1 ; # N. of concrete tension constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (axial tension strength)
# C -> Reference crack width
# E -> Shape parameter
# A B C D
1 C20_25 0.2 0.2 ;
</FREE_FORM_CRACK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei free-form  $\sigma$ - $w$  de amolecimento do betão (Figura 19), sendo constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

- 1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;
- 2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;
- 3ª Coluna – Tensão de pico;
- 4ª Coluna – Valor da abertura de referência ( $W^*$ );
- 5ª Coluna – Parâmetro relativo à forma ( $p$ ).

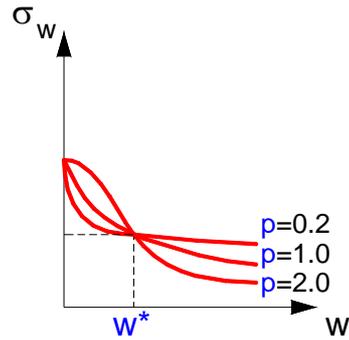


Figura 19 – Lei free-form  $\sigma$ - $w$  de amolecimento do betão.

Na Figura 20 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei free-form  $\sigma$ - $w$  de amolecimento do betão. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da abertura de fenda de referência ( $w^*$ ) e do parâmetro caracterizador da forma da curva ( $p$ ). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

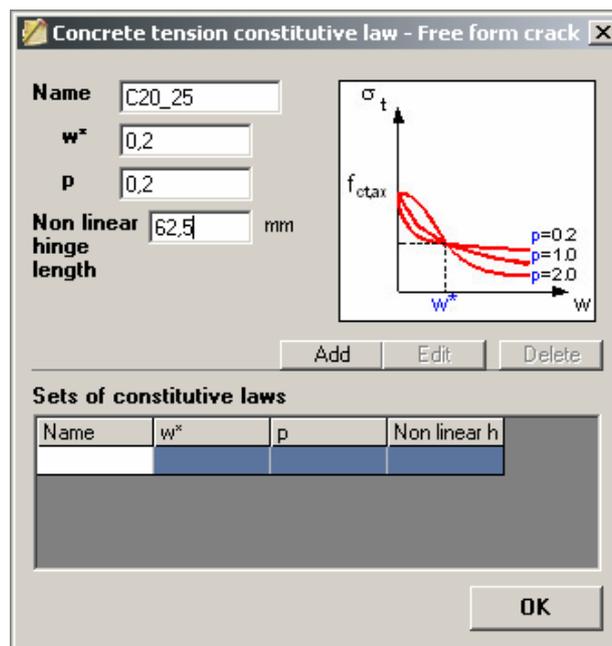


Figura 20 – Menu referente à definição da lei free-form de amolecimento do betão no formato  $\sigma$ - $w$ .

## 2.2.7.2.4 Lei trilinear $\sigma$ -w de amolecimento do betão

```
<TRILINEAR_CONCRETE_CRACKING_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _TRILINEAR_CRACK
## Properties of the trilinear concrete cracking constitutive law
  COUNT = 1 ; # N. of concrete cracking constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Percentage of the tensile strength, for defining the
# first post-peak point
# D -> Ratio of the maximum crack open, for defining the
# first post-peak point
# E -> Percentage of the tensile strength, for defining the
# second post-peak point
# F -> Percentage of the maximum crack open, for defining the
# second post-peak point
# G -> Maximum crack open
# H -> Non linear hinge length
# A B C D E F G H
# 1 TracCrack 0.40 0.125 0.20 0.625 8.00 62.5;
</TRILINEAR_CONCRETE_CRACKING_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei trilinear  $\sigma$ -w de amolecimento do betão (Figura 21), sendo constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;

3ª Coluna – Razão entre a tensão do primeiro ponto de que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_1$ ). Este valor deverá estar compreendido no seguinte intervalo: [0-1];

4ª Coluna – Razão entre a abertura de fenda máxima e a abertura que define o primeiro ponto que caracteriza a lei ( $\beta_1$ );

5ª Coluna – Razão entre a tensão do segundo ponto de que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_2$ ). Este valor deverá estar compreendido no seguinte intervalo: [0-1];

6ª Coluna – Razão entre a abertura de fenda máxima e a abertura que define o segundo ponto que caracteriza a lei ( $\beta_2$ );

7ª Coluna – Abertura máxima.

8ª Coluna – Dimensão da rótula não linear considerada.

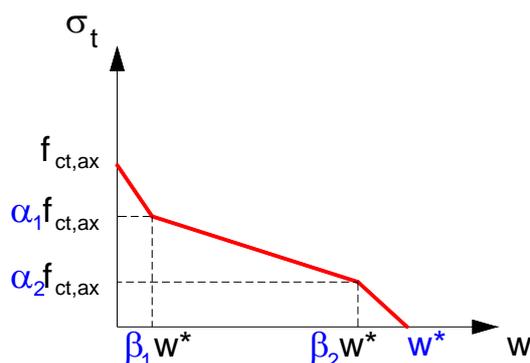


Figura 21 – Lei trilinear  $\sigma$ - $w$  de amolecimento do betão.

Na Figura 22 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei trilinear  $\sigma$ - $w$  de amolecimento do betão. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da razão entre a tensão residual pós-pico do primeiro ponto que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_1$ ), a percentagem da abertura máxima que define o primeiro ponto caracterizador da lei ( $\beta_1$ ) e o valor da abertura máxima de fenda ( $w^*$ ), o valor da razão entre a tensão residual pós-pico do segundo ponto que caracteriza a lei e a tensão de tracção de pico ( $\alpha_2$ ), a percentagem da abertura máxima que define o segundo ponto caracterizador da lei ( $\beta_2$ ) e o valor da abertura máxima de fenda ( $w^*$ ). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

**Concrete cracking constitutive law - Trilinear**

Name:

$\alpha_1$ :        $\alpha_2$ :

$\beta_1$ :        $\beta_2$ :

$w^*$ :

Non linear hinge length:  mm

Edit    Delete

Sets of constitutive laws						
Name	alfa1	beta1	alfa2	beta2	w	Non linear h
TracCrack	0,4	0,125	0,2	0,625	8	62,5

Figura 22 – Menu referente à definição da lei trilinear de amolecimento do betão no formato  $\sigma$ - $w$ .

## 2.2.7.2.5 Lei de Tension stiffening do betão

```
<MASSICOTTE_TENSION_STIFFENING_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _MASSIC_STIF
## Properties of the Massicotte concrete tension stiffening
## constitutive law
  COUNT = 2 ; # N. of concrete tension stiffening constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Number of reinforcement sets contributing for the
# tension stiffening
# D -> Name of the reinforcement sets
# A   B       C   D
# 1   MASSIC_1  1   Steel_1 ;
# 2   MASSIC_2  2   Steel_1 Steel_2 ;
</MASSICOTTE_TENSION_STIFFENING_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco são definidos os conjuntos de reforços afectos a cada uma das leis constitutivas que definem o comportamento das camadas de betão em *tension stiffening* (ver Figura 23), sendo constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de camadas com as mesmas propriedades

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis de *tension-stiffening*. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente aos reforços que influenciam a referida lei:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor de COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome da lei de *tension-stiffening*;

3ª Coluna – Número de reforços que contribuem para o *tension-stiffening* da referida lei;

4ª Coluna – Nome dos reforços que contribuem para o *tension-stiffening* da referida lei. Os nomes terão que estar definidos na segunda coluna do bloco, <STEEL\_LAYER\_PROPERTIES>.

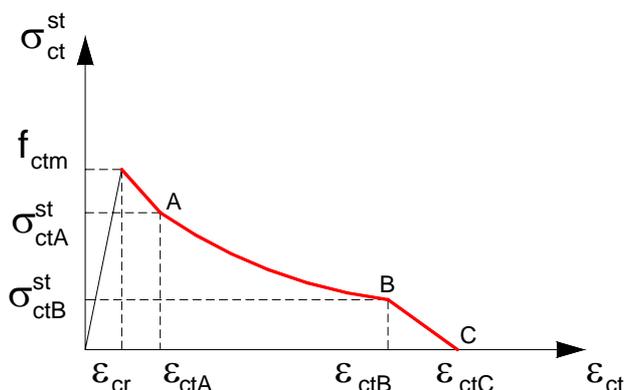


Figura 23 – Lei de *tension-stiffening* para o betão sob influência de armaduras.

A lei de *tension-stiffening* é definida por três pontos característicos. O ponto A corresponde à estabilização da fendilhação, o ponto B à cedência da armadura na

secção da fenda e finalmente o ponto C corresponde ao momento em que a extensão média na armadura alcança a extensão de cedência do aço.

Na Figura 24 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei de *tension-stiffening* do betão. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*) e o nome dos reforços de aço que contribuem para o *tension-stiffening* da referida lei (*Reinforcement sets*), nomes esses que estão de acordo com os definidos no bloco **STEEL\_LAYER\_PROPERTIES**. O procedimento a adoptar por parte do utilizador é adicionar (*add =>*) os vários nomes disponíveis dos conjuntos de propriedades que definem o reforço, pela ordem pretendida. Está também acessível a opção de eliminar todos os nomes adicionados (*clear*). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

**Concrete stiffening constitutive law - Massicotte**

Name

**Sets of steel properties**

Pattern	Name
2	Steel_1
2	Steel_2

add =>  
clear

Pattern	Name

Add Delete

**Sets of constitutive laws**

Name	N. reinforcements	Reinforc. sets
MASSIC_1	1	Steel_1
MASSIC_2	2	Steel_1 Steel_2

OK

Figura 24 – Menu referente à definição da lei *tension-stiffening* para o betão sob influência de armaduras.

## 2.2.8 Geometria dos conjuntos de armadura

```
<STEEL_LAYER_GEOMETRY_DATA>
## Layer geometrical characteristics
   COUNT = 2 ; # N. layer geometrical sets

## Content of each column:
# A -> Layer counter
# B -> Group name
# C -> Cross section area
# D -> Equivalent diameter
# E -> Position (from bottom surface of the cross section)
# F -> Position of gravity point
# G -> Bond properties (low or high adherence)
# A   B     C       D       E       F     G
# 1   AS1   402.0   0.0    300.0   0    0.7 ;
# 2   AS2   402.0   0.0    50.0    0    0.7 ;
</STEEL_LAYER_GEOMETRY_DATA>
```

Este bloco, designado de *STEEL\_LAYER\_GEOMETRY\_DATA*, descreve as propriedades geométricas da armadura convencional sendo constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de armaduras

De seguida são dispostas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades geométricas das camadas, as quais se passa a descrever:

- 1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;
- 2ª Coluna – Nome do grupo de armaduras com as mesmas propriedades;
- 3ª Coluna – Área da armadura;
- 4ª Coluna – Diâmetro equivalente no caso do grupo de armaduras ser constituído por varões de distintos diâmetros;
- 5ª Coluna – Posição da armadura relativa à face inferior da secção de betão. Valores positivos indicam que a armadura se encontra acima da face inferior, o contrário, significa que o reforço estará fora da secção;
- 6ª Coluna – Esta opção é ignorada na presente versão do programa;
- 7ª Coluna – Factor que tem em conta os diferentes tipos de aderência das armaduras. Deverão ser adoptados os seguintes valores: 0.7 para armaduras de baixa aderência, e 1.0 para elevada aderência.

Na Figura 7 está esquematizada a forma para aceder ao menu que permite a definição das características geométricas dos eventuais padrões de aço existentes na secção em causa.

Para o caso de um padrão de aço, o menu em causa está representado na Figura 25, no qual é pedida ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (*Name*), o número do layer em causa (*Layer*), a área da armadura (*Area*), diâmetro equivalente dos eventuais diversos tipos de varões presentes na secção (*Diameter*), a posição da armadura relativamente à face inferior da secção de betão (*Position*), a distância na horizontal do centro de gravidade da armadura (*Grav. Center*) e o valor do factor que

tem em atenção a qualidade de aderência das armaduras ao betão. Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta.

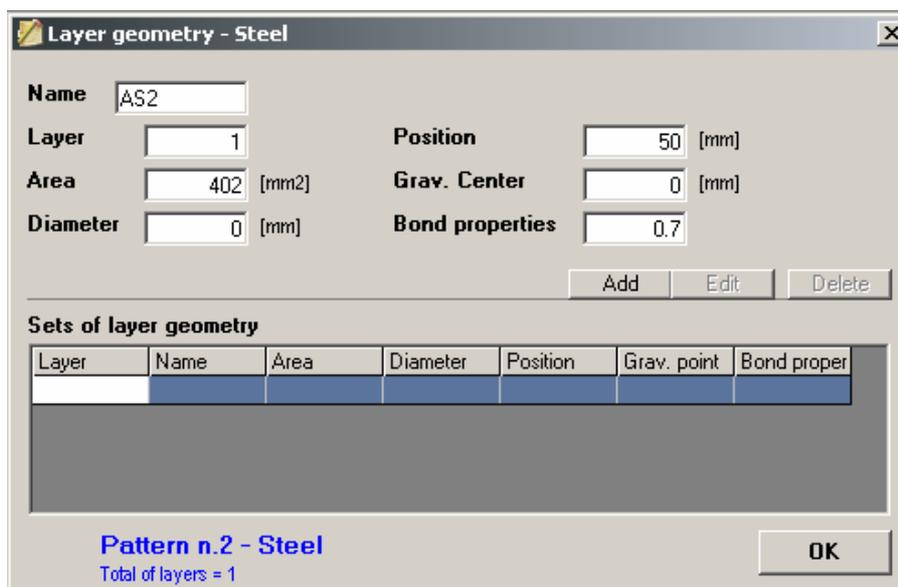


Figura 25 – Menu referente às propriedades geométricas dos padrões de aço.

## 2.2.9 Propriedades dos conjuntos de armadura

```
<STEEL_LAYER_PROPERTIES>
## Specification of the steel layer properties
  COUNT = 1 ; # N. of specifications

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Group name
# C -> Phase
# D -> Layer (or layer range)
# E -> Type of constitutive law
# F -> Name of the constitutive law
# G -> YES/NON (Activate - or not - the tensile stress
# reduction according to Steven's law)
# A  B          C  D          E          F          G
  1  Armaduras1  1  [1-2]  _PAR_STEEL  A400A  _YES ;
</STEEL_LAYER_PROPERTIES>
```

Neste bloco, designado por **STEEL\_LAYER\_PROPERTIES**, encontram-se os parâmetros necessários à escolha das várias leis constitutivas que definem o comportamento dos grupos de armaduras, sendo este constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de camadas com as mesmas propriedades

De seguida são apresentadas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades das camadas, que se passa a descrever:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

- 2ª Coluna – Nome do grupo de armaduras;
- 3ª Coluna – Fase em que as camadas estão activas. As camadas atribuídas a uma fase  $i$  estarão activas em todas as outras fases posteriores;
- 4ª Coluna – Número da camada ou intervalo de camadas. No caso de uma só camada coloca-se, simplesmente, o número dessa camada. Para um intervalo deverá ser adoptado o formato  $[i-j]$ , em que  $i$  é a primeira camada do intervalo e  $j$  é a última. Deverão ser verificadas as condições  $i < j$  e  $j$  não ser superior ao número total de camadas de armadura definidas no bloco dos parâmetros principais. A numeração das camadas tem que ser contínua;
- 5ª Coluna – Lei constitutiva do aço. Este campo deverá ser preenchido com uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 4;
- 6ª Coluna – Nome da lei constitutiva do aço;
- 7ª Coluna – Redução da tensão de tracção pelos princípios de Steven *et al.* (1987). Este campo deverá ser preenchido com uma das seguintes *palavras-chave*: *\_YES* ou *\_NO*; a primeira activa a redução da tensão e a segunda não a considera.

Na Figura 9 está esquematizada a forma para aceder aos vários menus que permitem a definição das características físicas dos vários padrões que definem a secção em causa.

Para o caso de um padrão de aço, o menu em causa está representado na Figura 26, no qual é pedida ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (*Name*), fase em que as camadas estão activas (*Phase*), número do(s) layer(s) em questão (*Layer range*), sendo que um mesmo layer só pode ser declarado uma única vez, o tipo de lei (*Type*) e o respectivo nome (*Name*) da lei constitutiva. Também é deixado ao critério do utilizador o facto de a tensão de tracção ser ou não reduzida mediante a proposta de Steven *et al.* (1987) (*Tensile stress reduction*).

Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta.

Figura 26 – Menu referente às propriedades materiais dos padrões de aço.

## 2.2.10 Leis de comportamento do aço

O comportamento do aço é caracterizado por diversas leis constitutivas estando indicadas as leis disponíveis na presente versão na Tabela 4.

Tabela 4 – Leis constitutivas presentes no *docros* para o aço e respectivas chaves.

Lei constitutiva	Palavra-chave
Nenhuma lei activa	<u>NONE</u>
Lei linear-parábola	<u>_PAR_STEEL</u>
Lei tri-linear	<u>_TRI_STEEL</u>
Mengotto & Pinto	<u>_MP_STEEL</u>

### 2.2.10.1 Lei linear-parábola do aço

```
<PARABOLA_STEEL_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _PAR_STEEL
## Properties of the constitutive law for the steel bar
## in tension (linear-parabola function)
  COUNT = 1 ; # N. of linear parabola steel bar tension constitutive
laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (axial tension strength)
# D -> Young's modulus
# E -> Strain at peak stress
# F -> Ratio between the up limit stress
# of the linear branch and the peak stress
# A   B       C         D           E           F
# 1   A400    348.0     200.0e+03  10.0e-3    0.7 ;
</PARABOLA_STEEL_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei linear-parábola do aço (Figura 27), admitindo igual comportamento para a tracção, e para a compressão, sendo este constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;

3ª Coluna – Tensão axial de pico ( $f_{sy}$ ). O valor deverá ser positivo. O diagrama definido é o da tracção admitindo para compressões um diagrama simétrico;

4ª Coluna – Módulo de Young ( $E_s$ );

5ª Coluna – Extensão referente à tensão de pico ( $\epsilon_{sp}$ ). O valor deverá ser positivo;

6ª Coluna – Parâmetro  $\alpha$  que define a relação entre a tensão limite do ramo linear e a tensão de pico. O valor de  $\alpha$  deverá estar compreendido no intervalo [0,1].

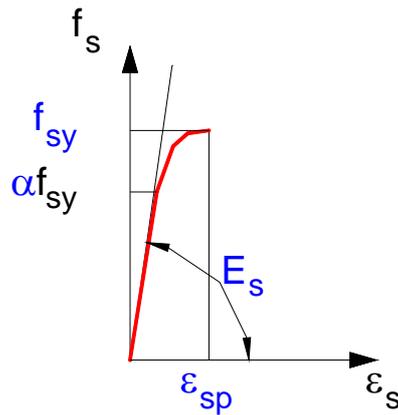


Figura 27 – Lei linear-parábola do aço.

Na Figura 28 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários á caracterização da lei linear-parábola que define o comportamento do aço. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor da tensão axial de pico ( $f_{sy}$ ), o valor do módulo de Young ( $E_s$ ), o valor da extensão relativa à tensão axial de pico ( $\epsilon_{sp}$ ) e o valor do parâmetro  $\alpha$ . Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

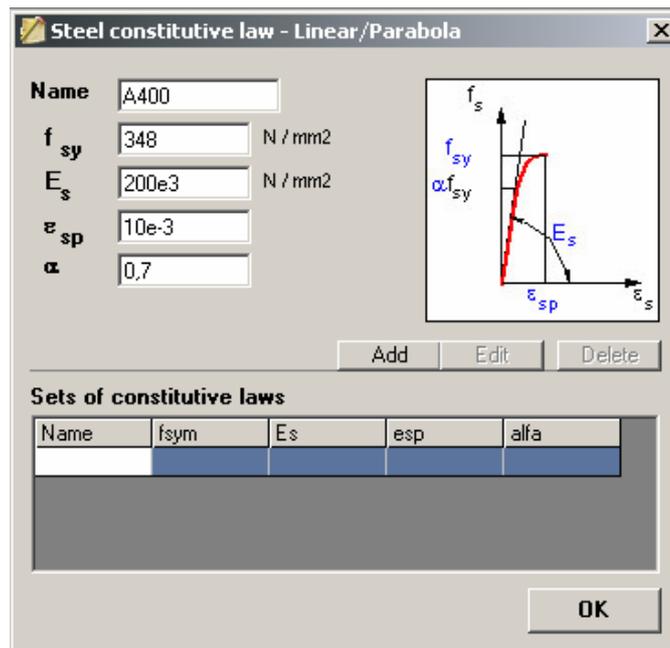


Figura 28 – Menu referente à definição da lei linear-parábola que define o comportamento do aço.

## 2.2.11 Geometria dos conjuntos de FRP

```
<FIBER_REINFORCED_POLYMER_LAYER_GEOMETRY_DATA>
## Layer geometrical characteristics
   COUNT = 1 ; # N. layer geometrical sets

## Content of each column:
# A -> Layer counter
# B -> Group name
# C -> Cross section area
# D -> Position (from bottom surface of the cross section)
# A   B       C         D
# 1   FRP    15.54     0 ;
</FIBER_REINFORCED_POLYMER_LAYER_GEOMETRY_DATA>
```

Este bloco, designado por ***FIBER\_REINFORCED\_POLYMER\_LAYER\_GEOMETRY\_DATA***, descreve as propriedades geométricas dos materiais de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP- fiber reinforced polymer), sendo constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de FRP

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades geométricas das camadas, que se passa a descrever:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do grupo de FRP com as mesmas propriedades;

3ª Coluna – Área de FRP;

4ª Coluna – Posição do FRP relativa à face inferior da secção de betão. Valores positivos indicam que o FRP se encontra acima da face inferior. Caso contrário, significa que o reforço estará fora da secção.

Na Figura 7 está esquematizada a forma para aceder ao menu que permite definir as características geométricas de padrões de FRP existentes na secção em causa.

Para o caso de um padrão de FRP, o menu em causa está representado na Figura 29, no qual é pedida ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (***Name***), número da camada em causa (***Layer***), área da secção transversal de FRP (***Area***) e a posição do FRP relativamente à face inferior da secção de betão (***Position***). Apenas os dados adicionados à grelha (***Add***) serão tidos em conta.

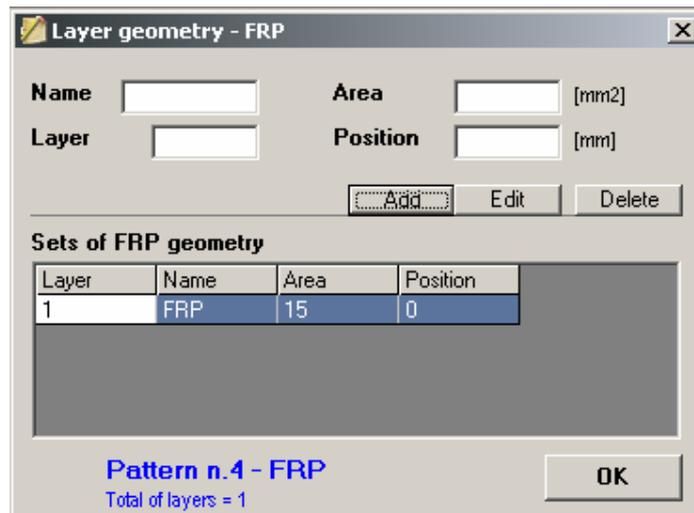


Figura 29 – Menu referente às propriedades geométricas dos padrões de FRP.

## 2.2.12 Propriedades dos conjuntos de FRP

```
<FIBER_REINFORCED_POLYMER_LAYER_PROPERTIES>
## Specification of the FRP layer properties
  COUNT = 1 ; # N. of specifications

## Content of each column:
# A -> Counter (or counter range)
# B -> Group name
# C -> Phase
# D -> Layer (or layer range)
# E -> Type of constitutive law
# F -> Name of the constitutive law
# A   B   C   D   E       F
  1   FRP  1   1   _LIN_FRP  Linear ;
</FIBER_REINFORCED_POLYMER_LAYER_PROPERTIES>
```

Neste bloco, designado por ***FIBER\_REINFORCED\_POLYMER\_LAYER\_PROPERTIES***, encontram-se os parâmetros necessários à escolha das várias leis constitutivas que definem o comportamento dos grupos de FRP, sendo constituído por:

COUNT – Número de conjuntos de camadas com as mesmas propriedades

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de camadas. Cada linha é constituída por várias colunas com a informação correspondente às propriedades das camadas, que se passa a descrever:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome do grupo de FRP;

3ª Coluna – Fase em que as camadas estão activas. As camadas atribuídas a uma fase  $i$  estarão activas em todas as outras fases posteriores;

4ª Coluna – Número da camada ou intervalo de camadas. No caso de uma só camada coloca-se, simplesmente, o número dessa camada. Para um conjunto de camadas

deverá ser adoptado formato  $[i-j]$ , em que  $i$  é a primeira camada do intervalo e  $j$  é a última. Deverão ser verificadas as condições  $i < j$  e  $j$  não ser superior ao número total de camadas de FRP definidas no bloco dos parâmetros principais. A numeração das camadas tem que ser contínua;

5ª Coluna – Lei constitutiva do FRP. Este campo deverá ser preenchido com uma *palavra-chave* referente à lei desejada. As *palavras-chave* disponíveis encontram-se enumeradas na Tabela 5;

6ª Coluna – Nome da lei constitutiva do FRP.

Na Figura 9 está esquematizada a forma para aceder aos vários menus que permitem a definição das características físicas dos vários padrões que definem a secção em causa.

Para o caso de um padrão em FRP, o menu em causa está representado na Figura 30, no qual é pedida ao utilizador informação relativa ao nome do grupo (*Name*), fase em que as camadas estão activas (*Phase*), número da(s) camada(s) em questão (*Layer range*), sendo que uma mesma camada só pode ser declarada uma única vez, o tipo de lei (*Type*) e o respectivo nome (*Name*) da lei constitutiva. Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta.

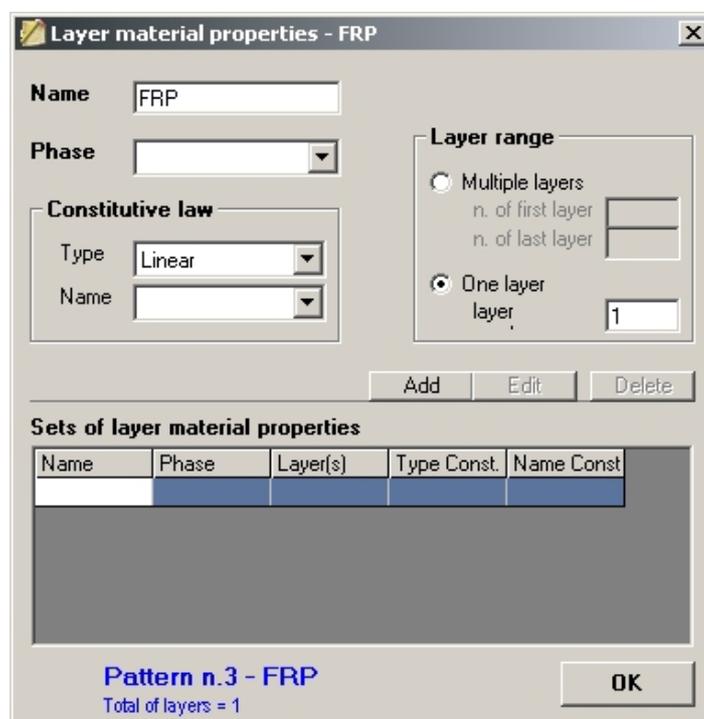


Figura 30 – Menu referente às propriedades físicas dos padrões de FRP.

### 2.2.13 Leis de comportamento do FRP

O comportamento do FRP é caracterizado pelo programa por apenas uma lei constitutiva. A lei considerada é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Lei constitutiva do FRP presente no docros e respectiva chave

Lei constitutiva	Palavra-chave
Nenhuma lei activa	_NONE
Lei linear	_LIN_FRP

## 2.2.13.1 Lei linear do FRP

```
<FIBER_REINFORCED_POLYMER_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _LIN_FRP
## Properties of the constitutive law for the FRP reinforcement
## in tension (linear function)
  COUNT = 1 ; # N. of linear FRP reinforcement tension
  # constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Constitutive law name
# C -> Ultimate tensile strength (design)
# D -> Tensile modulus of elasticity
# E -> Rupture strain (design)
# F -> Environmental-reduction factor
# A   B           C           D           E           F
# 1   Linear     3700.00     240.00e+03     15.00e-3     1.00 ;
</FIBER_REINFORCED_POLYMER_CONSTITUTIVE_LAW>
```

Neste bloco encontram-se os parâmetros necessários à caracterização da lei linear do FRP (ver Figura 31), admitindo igual comportamento para a tracção e para a compressão, sendo este constituído por:

COUNT – Número de leis constitutivas

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de leis. Este bloco é constituído por:

- 1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;
- 2ª Coluna – Nome do material com determinada lei constitutiva;
- 3ª Coluna – Tensão axial de pico ( $f_{fr}$ ). O valor deverá ser positivo;
- 4ª Coluna – Módulo de Young ( $E_f$ );
- 5ª Coluna – Extensão referente à tensão de pico, ou rotura ( $\epsilon_{fr}$ ). O valor deverá ser positivo;
- 6ª Coluna – Factor de redução ambiental. O valor deverá estar compreendido no intervalo [0,1].

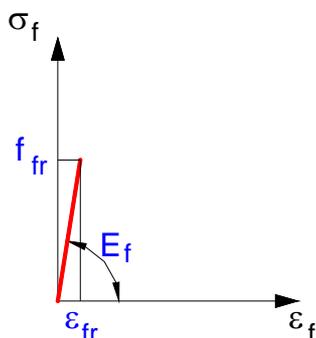


Figura 31 – Lei linear constitutiva para o FRP.

Na Figura 32 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da lei linear que define o comportamento do FRP. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a lei constitutiva em questão (*Name*), o valor

da tensão axial de pico ( $f_{fr}$ ), o valor do módulo de Young ( $E_f$ ), o valor da extensão relativa à tensão axial de pico ( $\epsilon_{fr}$ ) e o factor de redução ambiental de acordo com a norma do ACI Committee 440 (2002) (*Env. factor*). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos da lei em causa.

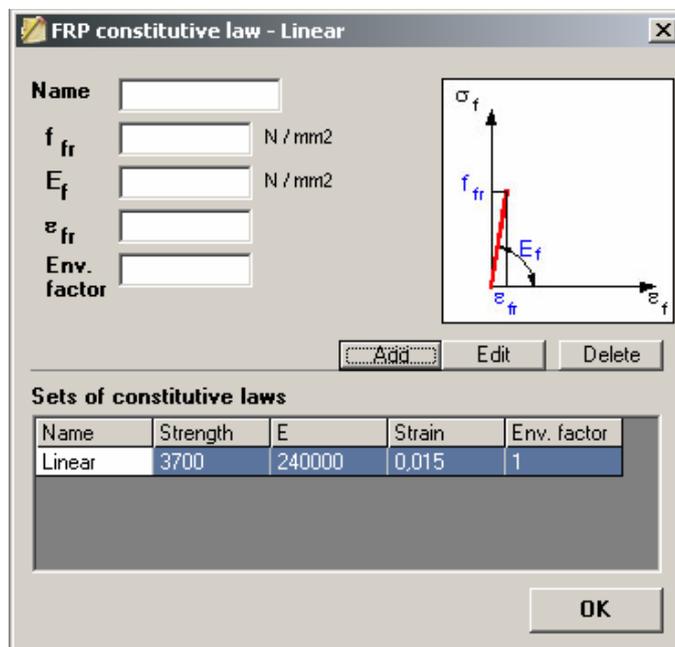


Figura 32 – Menu referente à definição da lei linear que define o comportamento do FRP.

## 2.2.14 Bloco das Fases

```
<PHASE_DATA>
## Data for characterizing the phases
COUNT = 3 ; # N. of phases

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Load type (_MONOTONIC, _CYCLIC, _FATIGUE)
# C -> Load type name
# A   B   C
1  _MONOTONIC  Mono_1 ;
2  _CYCLIC    Cyclic_1 ;
3  _FATIGUE   Fat_1 ;
</PHASE_DATA>
```

Este bloco, designado de *PHASE\_DATA* destina-se a simular as fases de carregamento, ou mudanças geométricas, a que a secção esteja sujeita, sendo constituído por:

COUNT – Número de fases

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de fase. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Tipo de carregamento. Neste campo deverá ser introduzido uma palavra-chave relativa ao carregamento desejado. Na Tabela 6 indicam-se as palavras chave disponíveis;

3ª Coluna – Nome do tipo de carregamento. Este nome deverá estar definido na segunda coluna do bloco relativo ao tipo de carregamento.

As camadas atribuídas a uma fase estarão sempre activas numa fase posterior.

Seleccionando o botão **Phases** presente na janela principal do módulo **DOCROSdata**, o utilizador tem acesso ao menu que permite a introdução da informação referente ao bloco **PHASE\_DATA** (ver Figura 33).

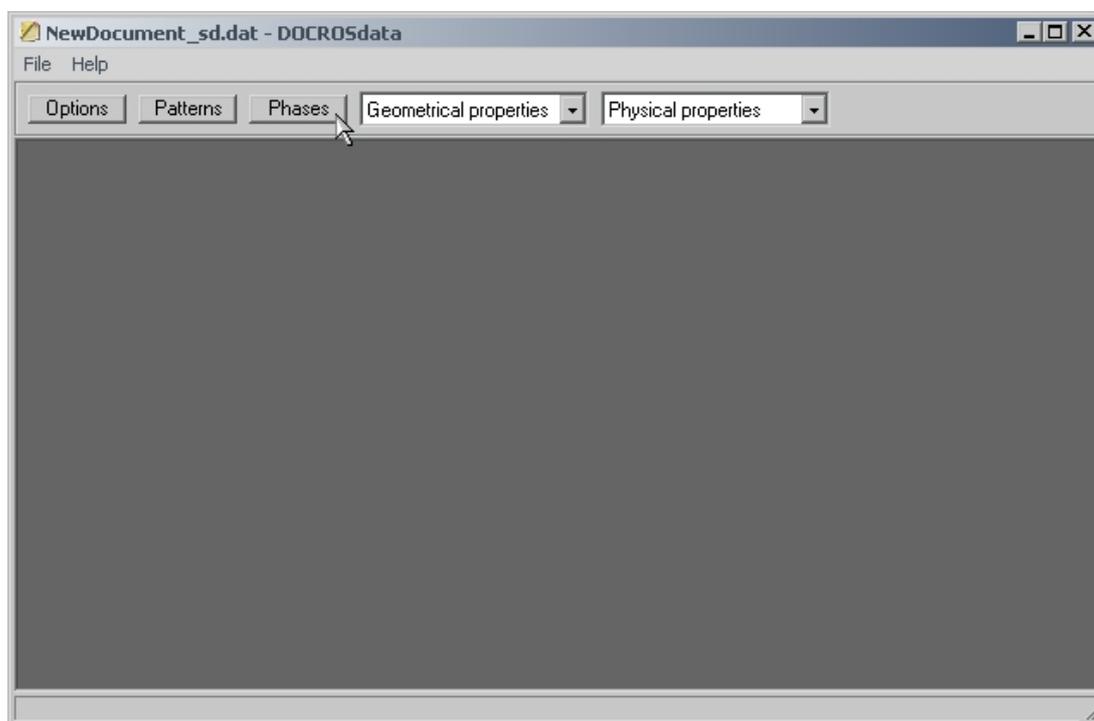


Figura 33 – Janela principal do módulo **DOCROSdata**

## 2.2.15 Tipos de carregamento

Está previsto a possibilidade de submeter uma secção aos tipos de carregamento indicadas na tabela 6. No entanto, na presente versão apenas o carregamento monotónico está disponível

Tabela 6 – Tipos de carregamentos disponíveis e respectivas palavras-chave

Carregamento	Palavra-chave
Cíclico	_CYCLIC
Fadiga	_FATIGUE
Monotónico	_MONOTONIC

Na Figura 34 está representado o menu que permite ao utilizador a introdução da informação relativa ao tipo de carregamento (*Load type*) e o nome do carregamento em causa (*Load name*). A ordem pela qual o utilizador introduz os carregamentos é a ordem pela qual as fases são numeradas, sendo esta numeração que permite identificar em que fase as camadas dos diversos tipos de padrões estão activas (menus relativos à definição das propriedades físicas dos diversos padrões – *Phase*). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversas fases de carregamento.

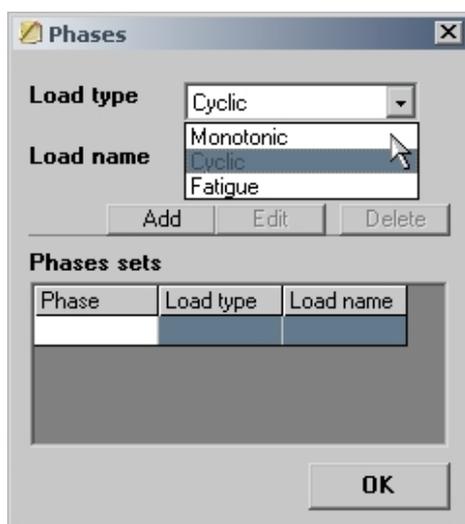


Figura 34 – Menu referente às fases e respectivos carregamentos.

### 2.2.15.1 Carregamento monotónico

```
<MONOTONIC_LOAD_TYPE_DATA>
## Keyword: _MONOTONIC
## Data to define monotonic load type
  COUNT = 1 ; # N. of monotonic load types

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> Number of control layer
# D -> Compression strain increment
# E -> Stop condition type
# F -> Stop condition name
# G -> Tolerance for the force equation [force units]
# A B C D E F G
  1 Mono_1 20 -1.0e-04 _SCT_CONCRETE SCT_Conc_1 10.0 ;
</MONOTONIC_LOAD_TYPE_DATA>
```

Este bloco, designado de *MONOTONIC\_LOAD\_TYPE\_DATA*, engloba os parâmetros necessários à caracterização do carregamento monotónico, sendo constituído por:

COUNT – Número de tipos de carregamentos monotónicos

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de carregamentos. Este bloco é constituído por:

- 1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;
- 2ª Coluna – Nome do carregamento;
- 3ª Coluna – Número da camada de controlo, isto é, camada onde se efectua o incremento de extensão durante o processo de cálculo;
- 4ª Coluna – Incremento de extensão de compressão na camada de controlo. O valor tem obrigatoriamente que ser negativo;
- 5ª Coluna – Tipo de condição de paragem. A este campo deverá ser atribuída uma palavra-chave referente ao tipo de paragem desejada, (ver Tabela 7).
- 6ª Coluna – Nome da condição de paragem. Esta condição de paragem tem que obrigatoriamente estar definida na segunda coluna do bloco correspondente à condição de paragem;
- 7ª Coluna – Tolerância usada na equação de equilíbrio de forças, em unidades de força.

Na Figura 35 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização do carregamento monotónico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para o carregamento em questão (*Name*), o número da camada de controlo (*Control layer*), o valor do incremento da extensão ( $\Delta\epsilon$ ), o tipo (*Type*) e o nome (*Name*) da condição de paragem, o valor do incremento do eixo neutro ( $\Delta$  of *neutral axis*) e o valor da tolerância a ser usada na equação do equilíbrio de forças (*Force tolerance*). De referir que, para estes dois últimos campos, por defeito, são definidos dois valores, ficando ao critério do utilizador o seu uso. Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos de carregamento.

Name	Layer	Strain Increr	Stop Cond.	Stop Cond. I	Force Tolera

Figura 35 – Menu referente ao carregamento monotónico.

## 2.2.16 Condições de paragem de fase

Na tabela 7 indicam-se os critérios de paragem e suas correspondentes palavras-chave disponíveis na presente versão do programa.

Tabela 7 – Tipos de critérios de paragem disponíveis e respectivas palavras-chave

Tipo de paragem	Palavra-chave
Paragem para determinada extensão no adesivo	_SCT_ADHESIVE
Paragem quando é atingida determinada extensão numa camada de betão	_SCT_CONCRETE
Paragem para determinada extensão no FRP	_SCT_FRP
Paragem quando atingido determinado momento	_SCT_MOMENT
Paragem para determinada extensão no aço	_SCT_STEEL

### 2.2.16.1 Condição de paragem no betão

```
<STOP_CONDITION_CONCRETE_TYPE_DATA>
## Keyword: _SCT_CONCRETE
  COUNT = 1 ; # N. of concrete stop conditions

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> Concrete layer
# D -> Strain
# E -> Crack opening
# A   B           C   D           E
# 1   SCT_Concl  1   -0.0035  1.0 ;
</STOP_CONDITION_CONCRETE_TYPE_DATA>
```

Este bloco, designado de *STOP\_CONDITION\_CONCRETE\_TYPE\_DATA*, engloba os parâmetros necessários à caracterização da paragem do processo de cálculo, sendo constituído por:

COUNT – Número de condições de paragem quando atingida determinada extensão no betão

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de condições de paragem. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome da condição de paragem;

3ª Coluna – Camada onde é verificada a condição de paragem a nível de extensões da superfície média da camada;

4ª Coluna – Extensão para a qual é terminada a fase a decorrer;

5ª Coluna – Abertura de fenda para a qual é terminada a fase a decorrer.

Na Figura 36 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da condição de paragem no betão relativa ao carregamento

monotónico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a condição de paragem em causa (*Name*), o número do padrão de camadas de betão (*Pattern*), o número da camada, onde a condição deverá ser verificada (*Layer*), o valor da extensão (*Strain*) e/ou o valor da abertura de fenda (*Crack opening*). Quando na camada de controlo é alcançada a extensão (ou abertura de fenda) indicadas, o programa passa para a fase seguinte (caso haja mais fases de carga). Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos de condições de paragem para o carregamento em causa.

Tal como descrito na secção 2.2.3, a numeração das várias camadas é efectuada de forma incremental e pela ordem com que os vários padrões de materiais foram introduzidos pelo utilizador. Assim, na opção *Layer* o número da camada que o utilizador deve fornecer deve estar em consonância com o padrão definido mas, efectivamente, o número da camada que é passado para a grelha corresponde aquele pelo qual internamente o programa o identifica, ou seja, quando seleccionado um padrão posterior, de um mesmo material, o número passado para a grelha resulta da soma das camadas que lhe são anteriores.

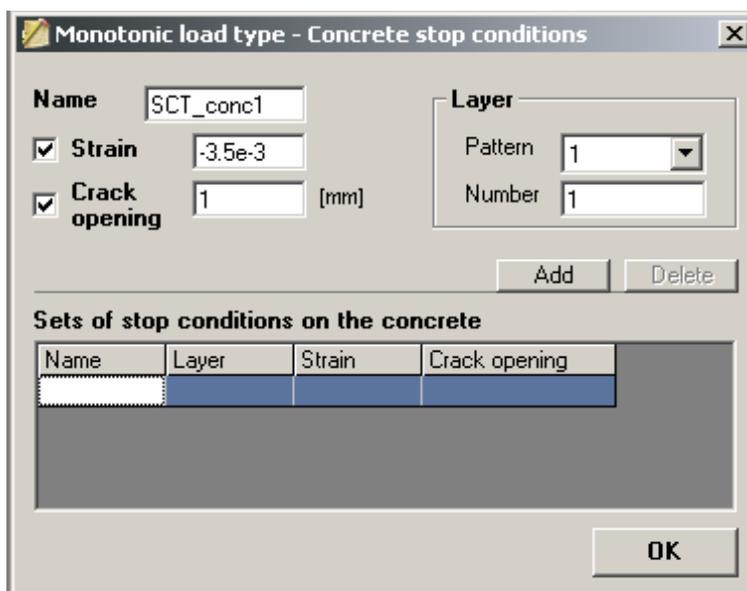


Figura 36 – Menu referente à condição de paragem no betão: carregamento monotónico.

### 2.2.16.2 Condição de paragem no FRP

```
<STOP_CONDITION_FRP_TYPE_DATA>
## Keyword: _SCT_FRP
  COUNT = 1 ; # N. of Frp stop conditions

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> FRP layer
# D -> Strain
# A   B       C   D
  1   SCT_Frp  1   8.07e-3 ;
</STOP_CONDITION_FRP_TYPE_DATA>
```

Este bloco, designado de **STOP\_CONDITION\_FRP\_TYPE\_DATA**, engloba os parâmetros necessários à caracterização da paragem do processo de cálculo, sendo constituído por:

COUNT – Número de condições de paragem quando atingida determinada extensão no FRP

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de condições de paragem. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome da condição de paragem;

3ª Coluna – Número do FRP onde é verificada a condição de paragem;

4ª Coluna – Extensão para a qual é terminada a fase a decorrer.

Na Figura 37 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da condição de paragem no FRP relativa ao carregamento monotónico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a condição de paragem em causa (**Name**), o número da camada de FRP onde a condição deverá ser verificada (**Layer**) e o valor da extensão (**Strain**) que dá por terminada a análise. Apenas os dados adicionados à grelha (**Add**) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos de condições de paragem para o carregamento em causa.

Tal como descrito na secção 2.2.3, a numeração das várias camadas (layers) é efectuada de forma incremental e pela ordem com que os vários padrões de materiais foram introduzidos pelo utilizador. Assim, na opção **Layer** o número do layer que o utilizador deve fornecer deve estar em consonância com o padrão definido mas, efectivamente, o número do layer que é passado para a grelha corresponde aquele pelo qual internamente o programa o identifica, ou seja, quando seleccionado um padrão posterior, de um mesmo material, o número passado para a grelha resulta da soma das camadas que lhe são anteriores.

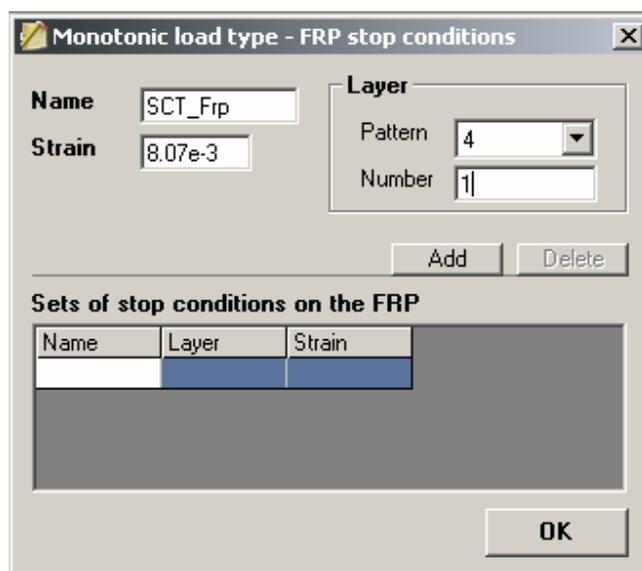


Figura 37 – Menu referente à condição de paragem no FRP: carregamento monotónico.

### 2.2.17.3 Condição de paragem por momento

```
<STOP_CONDITION_MOMENT_TYPE_DATA>
## Keyword: _SCT_MOMENT
COUNT = 1 ; # N. of moment stop conditions

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> Moment in cross section
# A   B           C
# 1   Momento_1   100e6 ;
</STOP_CONDITION_MOMENT_TYPE_DATA>
```

Este bloco, designado de **STOP\_CONDITION\_MOMENT\_TYPE\_DATA**, engloba os parâmetros necessários à caracterização da paragem do processo de cálculo, sendo constituído por:

COUNT – Número de condições de paragem por momento na secção

De seguida são fornecidas  $n$  linhas de dados para os  $n$  conjuntos de condições de paragem. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome da condição de paragem;

3ª Coluna – Valor do momento de paragem.

Na Figura 38 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da condição de paragem por valor do momento, no caso de carregamento monotónico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a condição de paragem em causa (**Name**) e o valor do momento (**Moment**) que dá por terminada a análise. Apenas os dados adicionados à grelha (**Add**) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos de condições de paragem para o carregamento em causa.

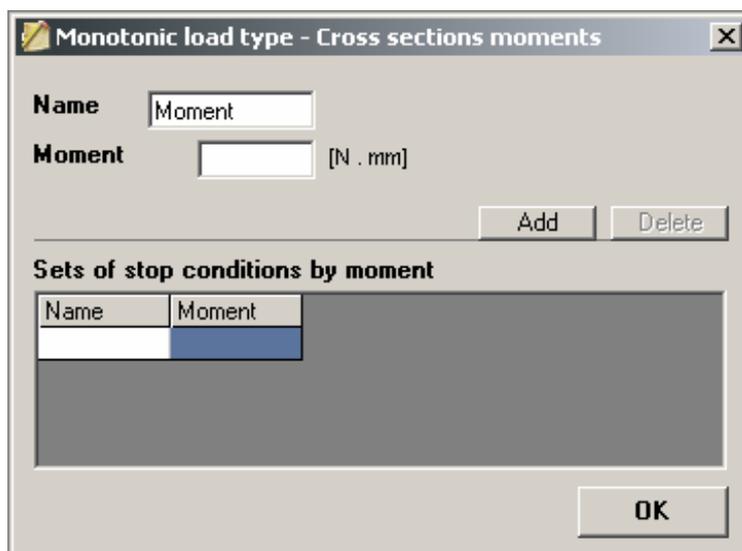


Figura 38 – Menu referente à condição de paragem por intermédio do valor do momento na secção: carregamento monotónico.

## 2.2.17.4 Condição de paragem no aço

```
<STOP_CONDITION_STEEL_TYPE_DATA>
## Keyword: _SCT_STEEL
COUNT = 1 ; # N. of steel stop conditions

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> Steel layer
# D -> Strain
# A   B       C   D
# 1   Steel_1  1   10.0e-3 ;
</STOP_CONDITION_STEEL_TYPE_DATA>
```

Este bloco, designado de *<STOP\_CONDITION\_STEEL\_TYPE\_DATA>*, engloba os parâmetros necessários à caracterização da paragem do processo de cálculo, sendo constituído por:

COUNT – Número de condições de paragem quando atingida determinada extensão no aço

De seguida são fornecidas *n* linhas de dados para os *n* conjuntos de paragem. Este bloco é constituído por:

1ª Coluna – Contador. Terá que ser menor ou igual ao valor do COUNT e deverá ser sempre crescente;

2ª Coluna – Nome da condição de paragem;

3ª Coluna – Camada onde é verificada a condição de paragem;

4ª Coluna – Extensão para a qual é terminada a fase a decorrer.

Na Figura 39 está representado o menu que permite definir os parâmetros necessários à caracterização da condição de paragem no aço, relativa ao carregamento monotónico. É pedido ao utilizador que introduza um nome para a condição de paragem em causa (*Name*), o número da camada onde a condição deverá ser verificada (*Layer*) e o valor da extensão (*Strain*) que dá por terminada a análise. Apenas os dados adicionados à grelha (*Add*) serão tidos em conta, sendo possível adicionar vários conjuntos de dados que permitem definir diversos tipos de condições de paragem para o carregamento em causa.

Tal como descrito na secção 2.2.3, a numeração das várias camadas é efectuada de forma incremental e pela ordem com que os vários padrões de materiais foram introduzidos pelo utilizador. Assim, na opção *Layer* o número da camada que o utilizador deve fornecer deve estar em consonância com o padrão definido mas, efectivamente, o número da camada que é passado para a grelha corresponde aquele pelo qual internamente o programa o identifica, ou seja, quando seleccionado um padrão posterior, de um mesmo material, o número passado para a grelha resulta da soma das camadas que lhe são anteriores.

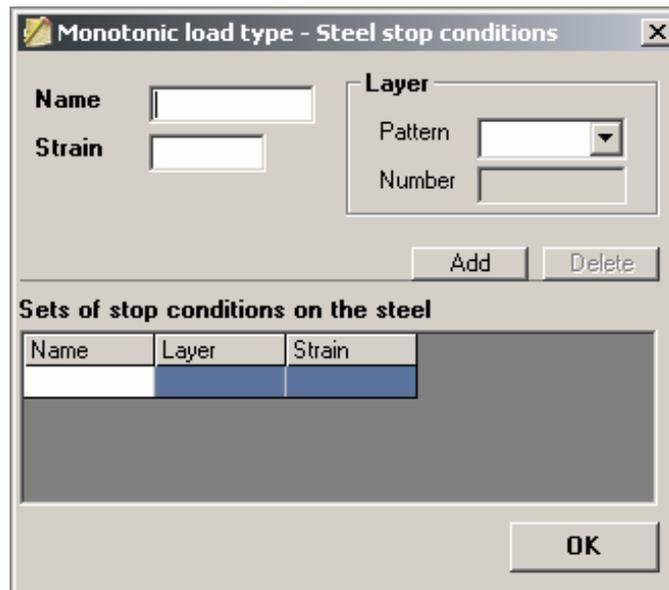


Figura 39 – Menu referente à condição de paragem no aço: carregamento monotónico.

## 2.3 Execução do programa

O programa *docros* pode ser executado sem qualquer argumento na linha de comandos, sendo toda a informação necessária solicitada interactivamente ao utilizador. A primeira pergunta corresponde sempre ao *jobname*, palavra que antecede a extensão *\_sd.dat*, no nome do ficheiro de dados. Após a introdução do nome do ficheiro no ecrã surgirá um menu de opções.

O programa *docros* pode também ser executado com o *jobname* como argumento da linha de comandos. Por exemplo:

```
C:\> docros jobname
```

Após a execução do módulo *docros*, o qual permite determinar a relação momento-curvatura de uma determinada secção, é escrito um ficheiro standard de resultados com duas colunas. A primeira contendo a curvatura e a segunda contendo o momento resistente. Este ficheiro tem o nome do *jobname* e a extensão *\_mc.csv*.

Caso seja do desejo do utilizador, poderá ser escrito um segundo ficheiro de dados, mais detalhado. Esta opção encontra-se no bloco *<Main\_Parameters>* e pode ser activada ou desactivada. O ficheiro de resultados tem o nome do *jobname* e a extensão *\_out.dat*. De seguida passa-se a descrever o conteúdo deste ficheiro.

O ficheiro de resultados *\_out.dat* é constituído por dois blocos: o primeiro, que nada tem a ver com o cálculo propriamente dito, refere-se às propriedades geométricas das camadas de betão e armaduras. O segundo bloco contém diversa informação relativa ao cálculo. Este último bloco é constituído por outros blocos relativos a cada uma das fases.

Passa-se a descrever o ficheiro de resultados *\_out.dat* referido anteriormente para uma determinada configuração de equilíbrio de uma determinada fase do problema. O bloco é constituído por:

**Strain Step** – Extensão correspondente ao passo em questão;

**Incremental Layer** – Camada onde se procede o incremento de extensão;

**Neutral Axis** – Posição do eixo neutro na secção para a iteração calculada. O valor referido é relativo ao eixo de referência;

**Number of Iterations** – Número de iterações efectuadas durante o processo iterativo;

**Moment** – Momento-flector. É adoptada a convenção de resistência materiais para o sentido deste;

**Curvature** – Curvatura a que está sujeita a secção;

**Total Crack height** – Abertura de fenda calculada;

**Residual Force** – Resíduo relativo à equação de equilíbrio de forças.

De seguida é disposta uma matriz, em que as linhas representam, primeiramente, o número de camadas de betão e por último os conjuntos de armaduras e de seguida os conjuntos de FRP, tendo as colunas a seguinte informação:

**Strain** – Extensão no folheto médio da camada de betão relativa á fase em questão

**Total Strain** – Extensão total no folheto médio da camada de betão

**Stress** – Tensão no folheto médio da camada de betão. Valores positivos e negativos indicam tracção e compressão, respectivamente

**Force** – Força na respectiva camada de betão

**Moment** – Momento na respectiva camada de betão

Para as camadas de betão estão presentes ainda as seguintes colunas:

**Crack width** – Abertura de fenda no folheto médio da camada de betão relativa á fase em questão

**Total Crack width** – Abertura total de fenda no folheto médio da camada de betão.

O modelo de cálculo adoptado admite distribuição linear das extensões ao longo da secção discretizada. Desta forma o cálculo do eixo neutro (*EN*) resume-se ao equilíbrio das forças normais na secção.

#### 4.1 Cálculo do Eixo Neutro

A profundidade do eixo neutro,  $z_{EN}$  (Figura 40) é determinada por intermédio de um ciclo em que se faz variar a posição do mesmo até se atingir o equilíbrio estático verificado pela seguinte expressão,

$$\sum_{i=1}^{nLc} F_{c,i} + \sum_{j=1}^{nLj} F_{s,j} + \sum_{k=1}^{nLf} F_{f,k} \leq tolef \quad (1)$$

em que *tolef* é uma dada tolerância,  $F_{c,i}$ ,  $F_{s,j}$  e  $F_{f,k}$  são as forças na camada *i* de betão, na armadura *j* e no FRP *k*, respectivamente. Estas forças são determinadas pelas seguintes expressões:

$$F_{c,i} = b_i h_i \sigma_{c,i} \quad (2)$$

$$F_{s,j} = A_{s,j} \sigma_{s,j} \quad (3)$$

$$F_{f,k} = A_{f,k} \sigma_{f,k} \quad (4)$$

em que  $b_i$ ,  $h_i$  e  $\sigma_{c,i}$  são, respectivamente, a largura, a espessura e a tensão da camada *i* de betão. Em (3),  $A_{s,j}$  e  $\sigma_{s,j}$  são, respectivamente, a área e a tensão na armadura *j*. Em (4),  $A_{f,k}$  e  $\sigma_{f,k}$  são, respectivamente, a área e a tensão na camada *k* de FRP.

O cálculo da tensão em cada camada é efectuado por intermédio da extensão ou abertura de fenda e das leis constitutivas atribuídas ao material em questão. As respectivas extensões, abertura de fenda, tensões e forças são referidas ao centro de cada camada, como se constata na Figura 40.

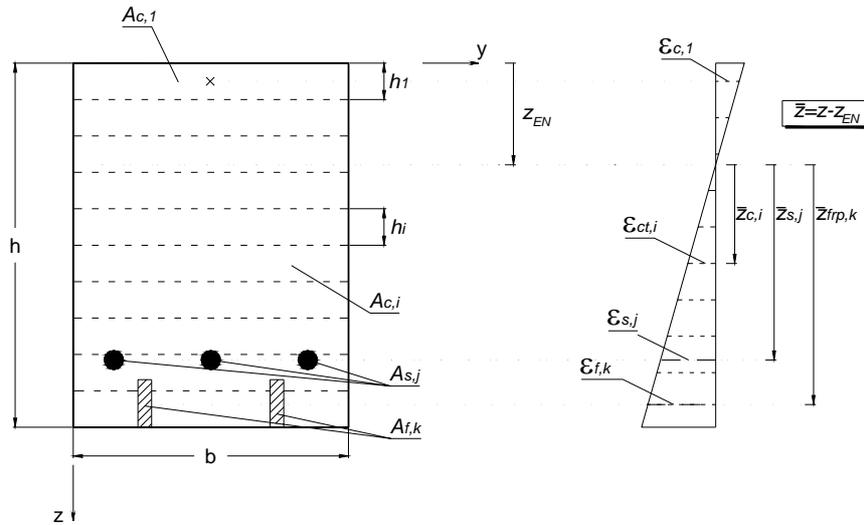


Figura 40 – Discretização e distribuição das extensões numa secção

## 4.2 Cálculo da abertura de fenda

O cálculo da abertura de fenda é imprescindível para a caracterização do comportamento do betão fendilhado, dado que a capacidade de transferência de tensões entre as faces da fenda é modelada por uma relação tensão-abertura de fenda,  $\sigma-\omega$ , recorrendo-se aos conceitos de fenda fictícia (Hillerborg *et al.*, 1976). Para determinada abertura de fenda, o valor da tensão residual de tracção depende dos mecanismos de reforço mobilizados, normalmente associados com o embricamento entre as faces da fenda e com a existência de fibras a ligar essas faces. Assim, em cada iteração é calculado um novo diagrama linear da abertura de fenda e, para cada uma das camadas que discretizam a parte fendilhada da secção, obtém-se a abertura de fenda e a respectiva tensão através da lei  $\sigma-\omega$  seleccionada (Figura 41).

As expressões seguintes permitem determinar a abertura de fenda para uma dada curvatura e comprimento de propagação de fenda:

$$\varepsilon = \frac{u}{s}, \quad (5)$$

$$\chi = \frac{\varepsilon}{z_{EN}}, \quad (6)$$

$$\varphi = \left(\frac{s}{2}\right)\chi, \quad (7)$$

$$w = (2\varphi)a = s\chi a, \quad (8)$$

em que  $s$  é a largura da banda não linear considerada (descrita posteriormente),  $u$  é o deslocamento na camada superior da secção,  $\varepsilon$  é a extensão nesta camada,  $\chi$  é a curvatura para uma determinada posição do eixo neutro,  $z_{EN}$  é a distância do topo da secção ao eixo neutro,  $a$  representa a profundidade de progressão da fenda,  $\varphi$  é a rotação das faces da rótula não linear e  $w$  representa a abertura da fenda.

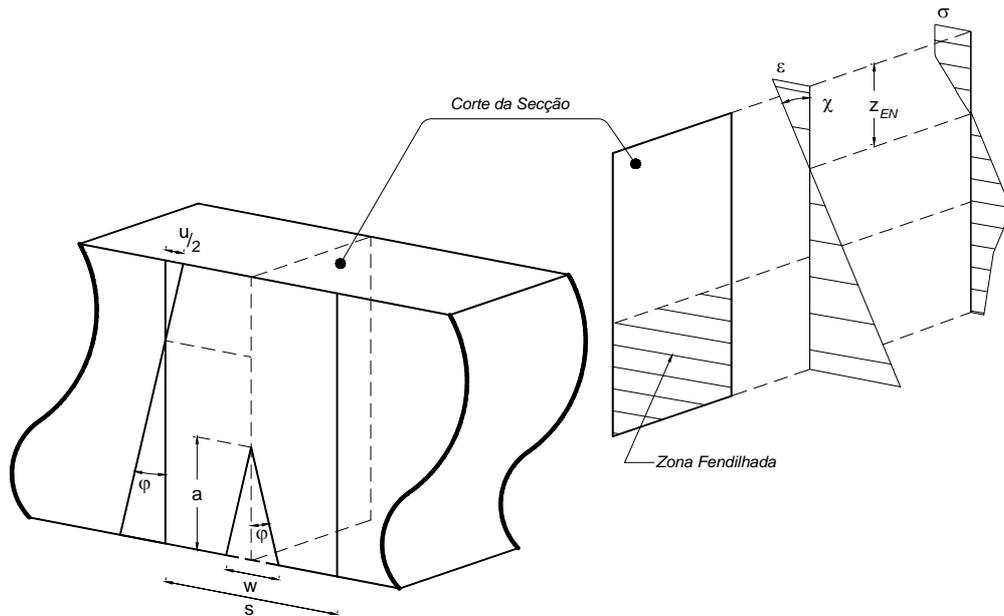


Figura 41 – Ideologia para o cálculo da abertura de fenda

### 4.3 Determinação da curva Momento – Curvatura

#### 4.3.1 Cálculo do Momento ( $M$ )

Em cada iteração o momento é determinado pela seguinte expressão:

$$M = \sum (F_{c,i} \cdot \bar{z}_{c,i}) + \sum (F_{s,j} \cdot \bar{z}_{s,j}) + \sum (F_{f,k} \cdot \bar{z}_{f,k}), \quad (9)$$

em que  $\bar{z}_{c,i}$ ,  $\bar{z}_{s,j}$  e  $\bar{z}_{f,k}$  correspondem, respectivamente, à distancia entre o eixo neutro e o centro de cada camada de betão, aço e FRP.

#### 4.3.2 Cálculo da Curvatura ( $\chi$ )

A curvatura,  $\chi$ , é determinada através do diagrama de extensões linear obtido na iteração convergida, efectuando o seguinte procedimento:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{c,1}}{z_{EN} - \frac{h_1}{2}}, \quad (10)$$

em que  $\varepsilon_{c,1}$  corresponde à extensão no ponto médio da primeira camada, e  $h_1$  representa a espessura dessa camada.

### 4.4 Determinação da curva Força – Flecha ( $F-\delta$ )

A relação força-flecha,  $F-\delta$ , determina-se por intermédio da utilização da equação da linha elástica e da rigidez à flexão,  $EI$ , conhecida a partir da relação  $M-\chi$  de cada secção tipo do elemento em análise. A determinação do valor das constantes que

surtem da integrao das equaoes da linha elstica efectua-se por imposio de condies de compatibilidade de deslocamentos e rotaes entre os tramos que discretizam o elemento estrutural em estudo.

O desempenho do modelo ir ser efectuado por intermdio de resultados obtidos em ensaios efectuados com viga entalhada, ver Figura 42. Neste caso r necessrio saber qual o comprimento do tramo em que se desenvolvem os fenmenos de no linearidade material (principalmente devidos a progresso da fenda), designada no presente trabalho por banda no linear. Segundo a RILEM (2002), o comprimento desta banda,  $s$ , r de metade da altura da secao entalhada,  $h_{sp}/2$ . Assim, no caso do provete da Figura 42, este r discretizado em trs tramos: central, constitudo pela banda no linear; laterais, em que se admite que o material se encontra em regime linear e elstico. A dimenso da banda no linear r considerada constante durante a progresso da fenda. Para o caso do provete representado na Figura 42.

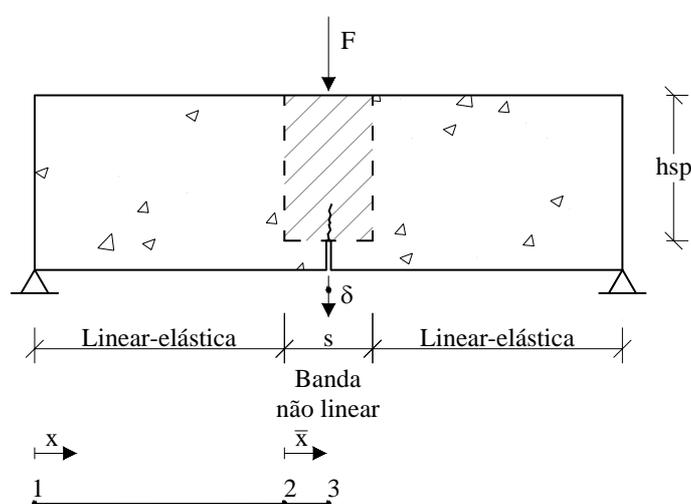


Figura 42 – Idealizao na modelao do provete utilizado pela RILEM na caracterizao experimental do BRFA.

A relao  $F-\delta$  r aferida pelas expresses baseadas na equao diferencial da linha elstica,

$$EI \cdot \chi = M, \quad (11)$$

em que  $E$  e  $I$  representam, respectivamente, o mdulo de elasticidade do material e a inrcia da secao.

O momento instalado numa secao qualquer entre o ponto 1 e 2 (ver Figura 42) r determinado por:

$$M_{1,2} = \frac{F}{2} \cdot x. \quad (12)$$

Por sua vez, para o segundo tramo, o momento r determinado por:

$$M_{2,3} = \frac{F}{2} \cdot (l_1 + \bar{x}), \quad (13)$$

em que o parâmetro  $l_1$  representa a distância entre os pontos 1 e 2.

Substituindo as expressões (A.2) e (A.3) em (A.1) e procedendo a uma dupla integração obtém-se,

$$(EI)_L \cdot u_{1,2} = \left(\frac{F}{4}\right) \cdot \left(\frac{x^3}{3}\right) + C_1 \cdot x + C_2, \quad (14)$$

$$(EI)_{NL} \cdot u_{2,3} = \frac{F}{2} \cdot l_1 \cdot \frac{\bar{x}^2}{2} + \frac{F}{4} \cdot \frac{\bar{x}^3}{3} + C_3 \cdot \bar{x} + C_4. \quad (15)$$

em que  $(EI)_{NL}$ ,  $u_{1,2}$  e  $u_{2,3}$  correspondem, respectivamente, à rigidez não linear na zona central, à flecha para um qualquer ponto no tramo  $\overline{12}$  e à flecha para um qualquer ponto no tramo  $\overline{23}$ .

As constantes de integração são determinadas por intermédio das condições fronteira, isto é, da compatibilização das deformações ao longo dos vários tramos.

As condições adoptadas são expressas pelas seguintes equações:

$$u_{1,2}(x=0) = 0, \quad (16)$$

$$\theta_{2,3}\left(\bar{x} = \frac{s}{2}\right) = 0, \quad (17)$$

$$\theta_{1,2}(x=l_1) = \theta_{2,3}(\bar{x}=0), \quad (18)$$

$$u_{1,2}(x=l_1) = u_{2,3}(\bar{x}=0). \quad (19)$$

Da substituição das condições fronteira estabelecidas determina-se que,

$$C_1 = \frac{(EI)_L}{(EI)_{NL}} \cdot \left[ -F \cdot \left[ \left(\frac{l_1 \cdot s}{4}\right) + \left(\frac{s^2}{16}\right) \right] \right] - \left[ \left(\frac{F}{2}\right) \cdot \left(\frac{l_1^2}{2}\right) \right], \quad (20)$$

$$C_2 = 0, \quad (21)$$

$$C_3 = -F \cdot \left[ \left(\frac{l_1 \cdot s}{4}\right) + \left(\frac{s^2}{16}\right) \right], \quad (22)$$

$$C_4 = \frac{(EI)_{NL}}{(EI)_L} \cdot \left[ \left( \frac{F}{4} \right) \cdot \left( \frac{l_1^3}{3} \right) + C_1 \cdot l_1 \right]. \quad (23)$$

A flecha a meio vão da viga,  $\delta$ , é determinada após substituição das constantes de integração na expressão (A.5) resultando,

$$\delta = u_{2,3} \left( \bar{x} = \frac{s}{2} \right), \quad (24)$$

$$\delta = \frac{\left( \frac{F \cdot l_1 \cdot s^2}{16} + \frac{F \cdot s^3}{96} + \frac{C_3 \cdot s}{2} + C_4 \right)}{(EI)_{NL}}, \quad (25)$$

em que  $F$  é a força correspondente ao momento actuante,  $M_{act}$  :

$$M_{act} = M_{23} \left( \bar{x} = \frac{s}{2} \right), \quad (26)$$

que substituído em (A.3) resulta em,

$$F = \frac{2 \cdot M_{act}}{\left( l_1 + \frac{s}{2} \right)}. \quad (27)$$

## 4.5 Fluxograma do Docros

O algoritmo central é constituído por dois ciclos iterativos, o mais externo que procede ao incremento das extensões numa camada seleccionada pelo utilizador e um mais interno em que a posição do eixo neutro é determinada por condições de equilíbrio. Dentro do ciclo mais interno são chamadas funções que calculam as tensões nas camadas e nos materiais que constituem a secção, tendo por base as correspondentes leis constitutivas e extensões ou abertura de fissura. Após o equilíbrio de forças, calcula-se o momento para essa configuração de equilíbrio, e caso haja interesse (opção no ficheiro de dados) pode-se determinar a relação força-flecha do elemento estrutural em análise.

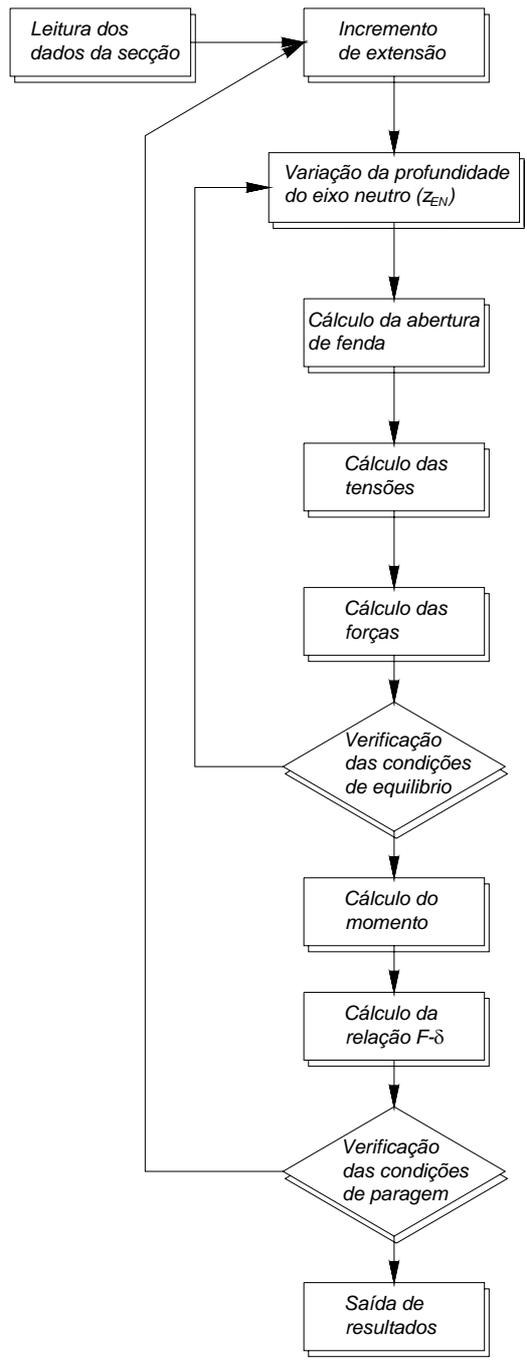


Figura 43 – Fluxograma do programa de cálculo.

### 5.1 Exemplo 1

A avaliação do desempenho do modelo desenvolvido é realizada pela comparação dos resultados da relação  $F-\delta$ , obtidos por este modelo, com os que são apresentados em (RILEM 2002). A secção de estudo (Figura 44) refere-se à modelação da secção a meio da viga (secção do entalhe). O ponto A, indicado na figura, representa o centro de gravidade da primeira camada, tendo-se seleccionado este ponto para controlo do incremento das extensões na secção. Para critério de paragem no cálculo da relação momento-curvatura utilizou-se um valor limite de  $3.5/\infty$  na extensão de compressão nesse ponto A. As camadas de betão em compressão foram simuladas por intermédio da lei tensão – extensão proposta pelo CEB-FIP 1993, o comportamento à tracção até à fendilhação foi simulado por um diagrama linear e, após pico, por um diagrama de amolecimento constituído por três tramos lineares. Os valores das propriedades dos materiais estão indicados na Figura 44, os quais foram retirados de outro trabalho (RILEM 2002).

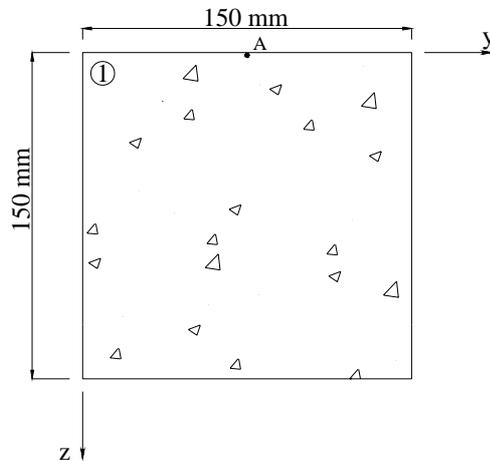


Figura 44 – Representação da secção de cálculo.

Características:

Compressão  
CEB-FIP (1993)  
 $\sigma_{cm} = 25 \text{ MPa}$   
 $E_c = 35.0 \text{ GP}$

Tracção

Lei linear  
 $f_{ctm,axial} = 3.0 \text{ MPa}$

Lei trilinear de  $\sigma-w$   
 $\alpha_1 = 0.497$   
 $\alpha_2 = 0$   
 $\beta_1 = 0.005$   
 $\beta_2 = 1$   
 $W_u = 10 \text{ mm}$

Na Figura 45 apresenta-se a relação força flecha obtida por outros autores e a determinada com o modelo desenvolvido no âmbito do presente trabalho. Constata-se que este modelo conduz a simulações similares às obtidas por outros investigadores.

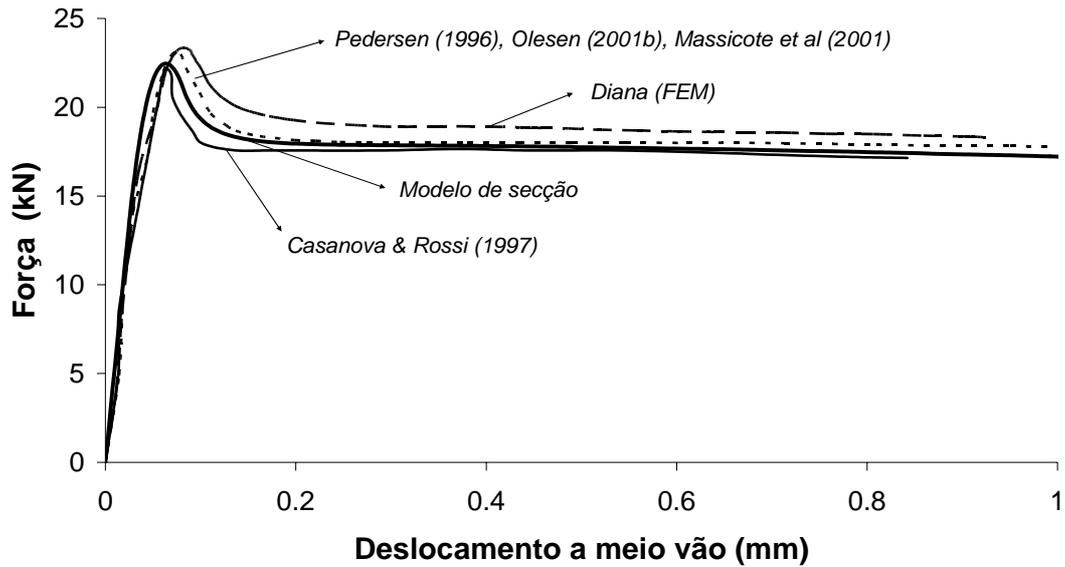


Figura 45 – Relação F- $\delta$  obtida por vários autores para a secção apresentada.

### 5.1.1 Ficheiro de dados

```

<MAIN_PARAMETERS>
  MAIN_TITLE = Exemplo1 ;
  NUM_CONCRETE_LAYERS = 120 ;
  NUM_STEEL_LAYERS = 0 ; # Number of different conventional reinforcement sets
  NUM_FRP_LAYERS = 0 ; # Number of different composite reinforcement sets
  NUM_ADHESIVES_LAYERS = 0 ; # Number of different adhesive sets
  JUMP_SURF = _NO ; # _YES / _NO -> Activates jump to top surface
  CONTROL_FILE = _YES ;
</MAIN_PARAMETERS>

<UNITS_INPUT_OUTPUT_DATA>
## Input

## Content of each column:
# A -> Input force unit
# B -> Input length unit
#   A           B
#   N           mm ;
</UNITS_INPUT_OUTPUT_DATA>

<MESH>
<RILEM_162TDF_PROPERTIES>
## Parameters for determining the tension-deflection curve

## Content of each column:
# A -> Name of beam
# B -> Span of beam
# C -> Height of beam
# D -> Width of beam
# E -> Length of the non-linear hinge
# A           B           C           D           E
Rilem_Exemplo 500       150       150       75 ;
</RILEM_162TDF_PROPERTIES>

<CONCRETE_GEOMETRY_LAYER_DATA>
## Layer geometrical characteristics
COUNT = 1 ; # N. layer geometrical sets

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Group name
# C -> Layer (or layer range)
# D -> Height of layer (or layer range)
# E -> Width of layer (or layer range)

```

```

# F -> Distance from the top surface of the layer range to the reference axis
#   A   B       C       D       E       F
#   1 CLT1   [1-120]  1.25  150   0 ;
</CONCRETE_GEOMETRY_LAYER_DATA>

<CEB_FIP93_UNCONFINED_CONCRETE_COMPRESSION_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _UNC_CEB_FIP93
## Properties of the unconfined CEB-FIP 1993 concrete compression constitutive law
COUNT = 1 ; # N. of concrete compression constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (compression strength)
# D -> Young's modulus
# E -> Strain at peak stress
#   A   B       C       D       E
#   1 Comp1   25.0  35.0e+03  -2.2e-03 ;
</CEB_FIP93_UNCONFINED_CONCRETE_COMPRESSION_CONSTITUTIVE_LAW>

<LINEAR_UP_TO_PEAK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _LIN_UPPEAK
## Properties of the linear up_to_peak concrete tension constitutive law
COUNT = 1 ; # N. of concrete tension constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Peak stress (axial tension strength)
# D -> Young's modulus
#   A   B       C       D
#   1 TracLin  3.0  35.0e+03 ;
</LINEAR_UP_TO_PEAK_CONCRETE_TENSION_CONSTITUTIVE_LAW>

<TRILINEAR_CONCRETE_CRACKING_CONSTITUTIVE_LAW>
## Keyword: _TRILINEAR_CRACK
## Properties of the trilinear concrete cracking constitutive law
COUNT = 1 ; # N. of concrete cracking constitutive laws

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Material name
# C -> Ratio of the tensile strength, for defining the first post-peak point
# D -> Ratio of the peak crack opening, for defining the first post-peak point
# E -> Ratio of the tensile strength, for defining the second post-peak point
# F -> Ratio of the peak crack opening, for defining the second post-peak point
# G -> Peak crack opening
# H -> Non linear hinge length
#   A   B       C       D       E       F       G       H
#   1 TracCrack  0.497  0.005  0.0  1.00  10.00  75 ;
</TRILINEAR_CONCRETE_CRACKING_CONSTITUTIVE_LAW>

<CONCRETE_LAYER_PROPERTIES>
## Specification of the concrete layer properties
COUNT = 1 ; # N. of specifications

## Content of each column:
# A -> Counter (or counter range)
# B -> Group name
# C -> Phase
# D -> Layer (or layer range)
# E -> Type of compression constitutive law
# F -> Name of compression constitutive law
# G -> Type of tension up-to-peak constitutive law
# H -> Name of tension up-to-peak constitutive law
# I -> Type of tension softening constitutive law
# J -> Name of tension softening constitutive law
# K -> Type of tension stiffening constitutive law
# L -> Name of tension stiffening constitutive law
#   A   B       C       D   E       F       G       H       I
#   1 CLT1  1   [1-120]  _UNC_CEB_FIP93  Comp1  _LIN_UPPEAK  TracLin  I
#   J       K       L
#   TracCrack  _NONE  NONE ;
</CONCRETE_LAYER_PROPERTIES>

```

```
<MONOTONIC_LOAD_TYPE_DATA>
## Keyword: _MONOTONIC
## Data to define monotonic load type
COUNT = 1 ; #

## Content of each column:
# A -> Counter
# B -> Name
# C -> Number of control layer
# D -> Compression strain increment
# E -> Stop condition type
# F -> Stop condition name
# G -> Tolerance value of the neutral axis depth [length units]
# H -> Tolerance for the force equation [force units]
#           A           B           C           D           E           F           G           H
#           1           Mono_1     1           -1.0e-05     _SCT_CONCRETE     SCT_Concl     0.01 1 ;
</MONOTONIC_LOAD_TYPE_DATA>
```

## BIBLIOGRAFIA

ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI, Technical report, May, 118 pp, 2002.

Casanova, P.; Rossi, P., "Analysis and design of steel fiber reinforced concrete beams", ACI Structural Journal, 94(5), 595-602, 1997.

CEB FIP model code 1990, Comité Euro-International du Béton, 1993.

Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.E., "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773-782, 1976.

Massicotte, B.; Moffatt, K.; Bastian, D. "Behaviour analysis and design of fibre reinforced concrete structural members containing or not conventional reinforcement", Technical Report, Report EPM/GCS-2001-10, Department of Civil, Geological and Mining Engineering, École Polytechnique de Montréal, 2001.

Olesen, J.F., "Fictitious crack propagation in fiber-reinforced concrete beams", Journal of Engineering Mechanics, 127(3), 272-280, 2001.

Pedersen, C., "New production processes, materials and calculation techniques for fiber reinforced concrete pipes", PhD thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Series R, n° 14, 1996.

RILEM TC 162-TDF, "Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced using  $\sigma$ -w method: principles and applications", Material and Structures Vol. 35, pp. 262-278, June 2002.

Stevens, N. J., "Analytical modelling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loadings", Publication No. 87-1, ISBN 0-7727-7088-3, University of Toronto, January, 1987.