



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

DESIGN DI UN SISTEMA SPERIMENTALE
PER PROVE DI ELETTROPLASTICITÀ

RELATORE: PROF. MICHELE FORZAN

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

LAUREANDO: MARCO MAGAROTTO

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013

Indice

Sommario	- 5 -
Acronimi, abbreviazioni e traduzioni.....	- 7 -
Introduzione	- 9 -
Possibili applicazioni industriali	- 10 -
Obiettivi	- 12 -
1. Teorie sull'elettroplasticità	- 15 -
1.1 Prime teorie sull'EPE.....	- 16 -
1.2 Teorie sviluppate in tempi più recenti.....	- 17 -
2. Test di piegatura.....	- 19 -
2.1 Dati dell'esperimento scelto.....	- 19 -
2.2 Analisi dell'esperimento	- 23 -
2.3 Scelta e caratteristiche della macchina adottata	- 26 -
2.4 Analisi mediante programma FLUX.....	- 32 -
2.5 Configurazione della macchina.....	- 34 -
2.6 Problemi nell'utilizzo della macchina saldatrice	- 36 -
3. Test di trazione.....	- 39 -
3.1 Dati dell'esperimento di riferimento	- 40 -
3.2 Analisi dell'esperimento	- 41 -
3.3 Macchinario test di trazione	- 43 -
3.4 Scelta e caratteristiche dell'alimentatrice elettrica.....	- 44 -
3.5 Analisi mediante programma FLUX.....	- 47 -

3.6	Configurazione del test.....	- 55 -
3.7	Situazione attuale	- 57 -
3.8	Primi test suggeriti	- 58 -
	Conclusioni.....	- 61 -
	Ringraziamenti	- 63 -
	Bibliografia.....	- 65 -

Sommario

Il fenomeno dell'elettroplasticità, ossia l'aumento di plasticità di alcuni materiali sottoposti a stress fisico e contemporaneamente percorsi da elevata corrente impulsiva, sta diventando negli ultimi anni un argomento di grande interesse. In Italia nessun centro di ricerca (se non pochissimi) si è ancora cimentato, lasciando far strada a Università di Paesi come Cina, Russia e Stati Uniti. Ecco perché si è deciso di fare richiesta per un PRAT (Progetto di Ricerca di Ateneo), all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale, che coinvolga Ingegneria Elettrica, Meccanica e dei Materiali, con lo scopo comune di iniziare una seria ricerca scientifica in questo ambito.

La bibliografia dal punto di vista elettrico su esperimenti sull'elettroplasticità già svolti da equipe estere risulta molto approssimativa, se non addirittura lacunosa. Prima d'intraprendere le sperimentazioni si è reso necessario uno studio più accurato di tale aspetto. Si è cercando quindi di far luce sulla predisposizione e il design di questi sistemi sperimentali, con l'obiettivo finale di progettarne per nostri test futuri.

Lo studio effettuato ha messo in evidenza la concreta possibilità di realizzare all'interno del nostro Ateneo esperimenti utili all'analisi del fenomeno dell'elettroplasticità. In questo elaborato vengono descritte due configurazioni per due differenti tipologie di test: una inerente alla piegatura di una lamina di metallo e un'altra dedicata allo stress di trazione di un classico campione di metallo a forma laminare.

Acronimi, abbreviazioni e traduzioni

DYN	Funzionamento in dynamic mode del TE700
ENE	Funzionamento con energia costante del TE700
EP	Electroplasticity (elettroplasticità)
EPB	Electroplastic bending (piegatura elettroplastica)
EPD	Electroplastic drawing (trafilatura elettroplastica)
EPE	Electroplastic effect (effetto elettroplastico)
EPP	Electroplastic punching (stampaggio elettroplastico)
EPR	Electroplastic rolling (laminazione elettroplastica)
FS	Flow stress (resistenza al flusso plastico o sforzo equivalente)
IK	Funzionamento con corrente costante del TE700
PWK	Funzionamento con potenza costante del TE700
VEK	Funzionamento con tensione secondaria costante del TE700

Introduzione

Processi industriali standard come la trafilatura, la laminatura e lo stampaggio utilizzano il calore per ridurre le forze in gioco durante la lavorazione. Questi procedimenti a caldo hanno lo svantaggio che richiedono un considerevole dispendio di tempo e di energia oltre che a lavori differenziati in diverse fasi. La richiesta di temperature abbastanza elevate poi può causare stress termici, deformazioni e la riduzione nel controllo della tolleranza. L'idea è di sfruttare il fenomeno dell'elettroplasticità nell'industria con gli obiettivi di: semplificare la lavorazione, aumentare l'efficienza e mantenere inalterate le caratteristiche dei prodotti.

I parametri che normalmente vengono considerati durante i processi di deformazione plastica dei metalli sono: lo stato di stress, la temperatura, le condizioni ambientali e il tempo. L'effetto della corrente nella maggior parte dei casi viene trascurato. Quest'ultima nei processi industriali viene sfruttata per aumentare la temperatura dei corpi da lavorare (metallici in particolare) attraverso il riscaldamento per induzione. Nel riscaldamento per passaggio diretto, il pezzo viene attraversato dalla corrente elettrica (continua o alternata) e grazie all'effetto Joule si ha un incremento di temperatura, che influisce enormemente sulle caratteristiche meccaniche dei corpi, aumentandone la duttilità. Quest'applicazione della corrente è fatta al fine di aumentare la temperatura e quindi per ridurre le forze in gioco nella lavorazione. L'elettroplasticità (EP) invece va ad influenzare le proprietà meccaniche, senza aumentare in modo considerevole la temperatura del corpo metallico. Infatti il processo permette di aumentare la plasticità del pezzo facendo fluire in esso una elevata corrente impulsiva durante la lavorazione non provocando un significativo effetto Joule.

La scoperta del fenomeno risale a quasi mezzo secolo fa ma solo nell'ultimo ventennio, grazie a strumentazioni più adeguate, gli studi sono stati più approfonditi. Uno fra i primi a notare l'effetto significativo della corrente sulla duttilità, o per meglio dire sul flow stress (resistenza al flusso plastico o sforzo equivalente), e sul rendimento di processo fu Machlin nel 1959. Successivamente nel 1967 Nabarro fece studi sull'influenza della corrente nelle dislocazioni cristalline. Due anni più tardi Troitskii osservò come la corrente riducesse il flow stress e influenzasse il movimento delle dislocazioni nello zinco, stagno ed indio. Nel 1988 Xu notò l'influenza della corrente continua nella microstruttura del titanio e dopo questi studi Chen spiegò la relazione tra corrente e la formazione di alcuni intermetalli. Solo nel 2000 Conrad provò che un'elevata corrente impulsiva influisce la fase di trasformazione di metalli e ceramiche. Negli anni successivi sia Roth che Ross fecero altri studi con corrente continua. Salandro nel 2009 scoprì la relazione lineare tra la durata dell'impulso e la densità di corrente nel test di elongazione del Magnesio AZ31B-O. Green scoprì la riduzione se non l'eliminazione dell'effetto di ritorno elastico (spring back) in alcuni metalli particolari.

L'effetto dell'elettroplasticità (EPE) è stato riscontrato in molti metalli testati, ed è stato significativo solo in oggetti sottoposti a deformazioni plastiche. I risultati sono trascurabili durante prove a deformazione elastica, e dopo lo stress, quando non ci sono più forze applicate, non mostrando effetto di memoria. Si parla nella maggior parte dei casi di densità di corrente superiori a 10^3A/cm^2 (10A/mm^2) con impulsi elettrici che vanno da un minimo di alcune decine di μs fino ad un massimo di pochi secondi. I parametri ottimali variano a seconda della forma del campione, del tipo di materiale e dalla sollecitazione meccanica. Alcuni metalli in cui si è notato l'EPE sono: acciaio puro (e con silicio), alluminio (e sue leghe), titanio (e sue leghe), bronzo, rame, zinco, tungsteno, argento, bismuto, leghe di magnesio e composti intermetallici come V_3Si oltre ad alcuni cristalli.

Un altro aspetto da sottolineare è l'importanza della polarizzazione elettrica. Perché si verifichi l'EP non è sufficiente applicare una tensione impulsiva (quindi una corrente impulsiva) al metallo sotto lavorazione. Per aumentare la plasticità la corrente dovrà fluire lungo la direzione in cui si sposteranno le dislocazioni del pezzo da deformare, quindi ad ogni stress meccanico corrisponde un determinato tipo di applicazione di corrente (ciò lo si può osservare nelle figure successive). Per fare un esempio, nel caso in cui si volesse ridurre lo sforzo durante una trapanatura la corrente dovrà fluire all'interno del corpo lungo la direzione di perforazione. Se invece viene fatta scorrere perpendicolarmente alla direzione del foro gli studi hanno che non si avranno aumenti di plasticità, però la superficie del foro risulterà di maggiore qualità. Di conseguenza risulta essere molto interessante anche lo studio degli effetti che producono diverse configurazioni elettriche per differenti prove meccaniche.

Possibili applicazioni industriali

Alcuni processi industriali di tipo tradizionale come la trafilatura, la laminatura e lo stampaggio utilizzano il calore per ridurre le forze in gioco durante la lavorazione. I processi a caldo hanno lo svantaggio che richiedono molto tempo, molta energia e lavori differenziati in diversi passi (pre-riscaldamento, riscaldamento intermedio e ricottura). Inoltre la richiesta di temperature abbastanza alte porta ad un probabile stress termico, deformazione e la riduzione nel controllo della tolleranza. Quindi i processi industriali elettroplastici si pongono come obiettivo di semplificare la lavorazione e di aumentarne l'efficienza, mantenendo inalterate le caratteristiche dei prodotti.

Gli studi sulla trafilatura elettroplastica (electroplastic drawing EPD) hanno messo in evidenza una riduzione del 25% della forza necessaria rispetto al processo classico per quanto riguarda una lega di magnesio. Anche esperimenti su fili di Cu, W e acciaio puro hanno dato buoni risultati, mostrando l'influenza della polarità della corrente nel processo. Anche l'EP applicata alla laminazione (electroplastic rolling EPR) ha avuto successo. Kilmov è stato in grado di ridurre lo spessore di lamine di W da 30mm a 20mm a temperatura ambiente e senza il vuoto. I vantaggi dello stampaggio elettroplastico (electroplastic punching EPP) sono stati messi in luce da alcuni esperimenti di Wang in cui una lamiera in lega di magnesio è stata deformata in una vaschetta rettangolare con profondità di 15mm rispetto a 2.5mm, dimensione ottenuta senza l'utilizzo di corrente. Ciò conferma ancora una volta l'aumento di plasticità grazie al fenomeno dell'EP, restando a valori di temperatura del pezzo relativamente bassi (200°C nella zona di maggior deformazione).

Dal punto di vista del materiale risultano interessanti le applicazioni che coinvolgono il Titanio. Le sue leghe, grazie alle caratteristiche di elevato rapporto resistenza-peso, elevata temperatura di fusione, resistenza alla corrosione e biocompatibilità, sono ampiamente impiegate in settori industriali come: l'aeronautico, l'aerospaziale, il biomedicale, i trasporti, l'impiantistica chimica e l'architettura. Però la ridotta formabilità che le leghe di titanio offrono quando deformate a temperatura ambiente rende problematica la produzione di componenti da lamiera, a differenza dei componenti massivi. Infatti, la struttura esagonale compatta delle leghe di titanio comporta una limitata duttilità del materiale quando deformato a temperatura ambiente, rendendo necessario il riscaldamento del semi-lavorato a temperature alle quali si attivano nuovi piani di scorrimento che ne consentono l'aumento di formabilità. Tale vantaggio competitivo è sfruttato da tempo nella forgiatura di componenti massivi e nella formatura superplastica di componenti in lamiera. Per quello che riguarda invece lo stampaggio ad elevata temperatura di lamiere, esistono diversi studi dedicati alle leghe leggere (di Al e Mg) e agli acciai che hanno permesso lo sviluppo di tale tecnologia su scala industriale, mentre la sua applicazione alle leghe di titanio rimane ancora da esplorare. Ad oggi sono stati effettuati esperimenti di formatura incrementale di lamiere in lega di titanio, basate sempre sul riscaldamento (utilizzando sorgenti laser oppure il passaggio di corrente). Questi hanno prodotto alcuni risultati positivi sulla fattibilità di produzione di componenti in lamiera in lega di titanio. Resta però ancora da verificare l'applicabilità a geometrie complesse. L'aumento di temperatura contribuisce sicuramente al miglioramento della formabilità, ma da un punto di vista metallurgico, la formabilità plastica delle lamiere in lega di titanio è strettamente correlata con la possibile formazione di bande di deformazione con, al loro interno, microvuoti che danneggiano il materiale e possono condurre alla frattura della lamiera. Gli studi hanno evidenziato come la velocità di deformazione sia il parametro più critico.

L'EPR e l'EPP applicate a tali leghe renderebbe possibile la produzione sostenibile di componenti e di prodotti assemblati in titanio che presentino elevate prestazioni, raggiungendo gli obiettivi di riduzione dell'energia e d'impatto ambientale nel corso dell'intero ciclo di vita del prodotto, incrementando inoltre la sicurezza, l'affidabilità e la qualità delle parti formate e saldate per un assemblaggio facile, economico ed affidabile. Non è quindi da sottovalutare l'aspetto economico della ricerca in tale settore. Basti pensare che in Italia l'intera filiera tecnologico-commerciale della lavorazione, fabbricazione e distribuzione di manufatti in lega di titanio annovera più di 450 aziende che impiegano circa 10000 lavoratori e l'industria legata alle lavorazioni della lamiera è uno dei più importanti settori industriali contando più di 950 aziende e 3500 impiegati. (dati Assomet 2011). Gli scarsi investimenti in ricerca a livello nazionali potrebbero compromettere seriamente lo sviluppo di queste tecnologie e dell'economia dei comparti in Italia, nonostante le prospettive che potrebbero derivare dallo sfruttamento industriale del giacimento di minerale di titanio più importante a livello europeo di recente scoperto in Liguria. Una soluzione a livello nazionale può essere il progetto ADVANTAGE (che raggruppa cinque Unità di Ricerca appartenenti a otto Università) che ha

l'obiettivo generale quello di ottenere una solida comprensione e modellazione dei fenomeni legati al materiale e al processo che insorgono durante le operazioni di formatura e di saldatura delle leghe di titanio in modo da consentire all'industria di implementare fattivamente le nuove tecnologie.

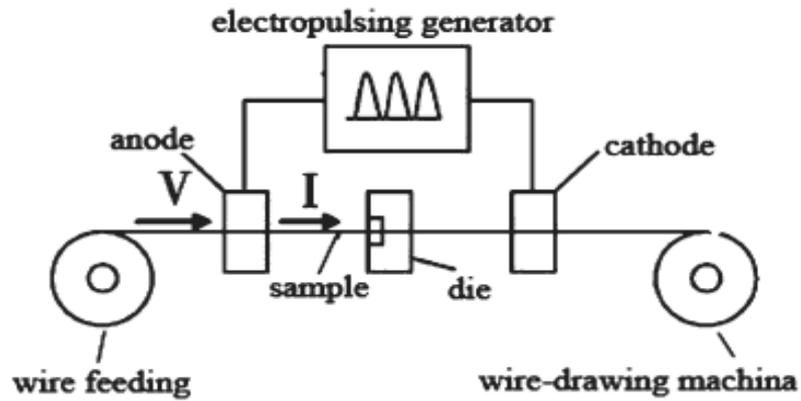


Figura 0.1 Schema di un applicazione industriale dell'electroplastic drawing EPD

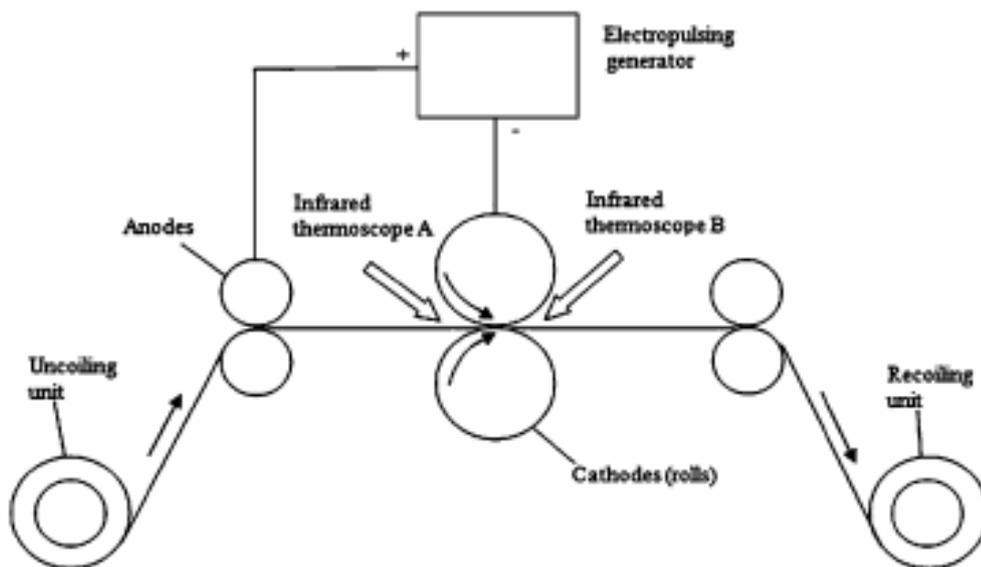


Figura 0.2 Schema di un applicazione industriale dell'electroplastic rolling EPR

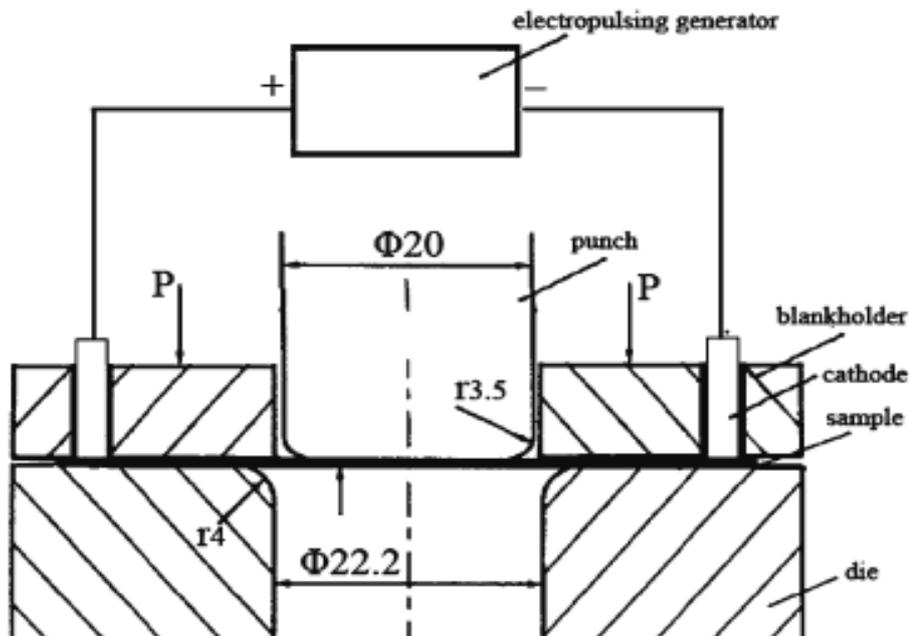


Figura 0.3 Schema di un applicazione industriale dell'electroplastic punching EPP

Obiettivi

L'intento che PRAT si prefigge è quello d'intraprendere una serie di esperimenti sull'argomento EP, studiando i suoi effetti e le sue possibili applicazioni industriali. Come primo passo s'intende prendere confidenza con la tematica e verificare la correttezza dei risultati esposti in letteratura replicando test già condotti da altre Università straniere. Difatti quando si prova a leggere un articolo inerente l'argomento elettroplasticità la prima cosa che salta all'occhio è la sua inconsistenza dal punto di vista elettrico, dovuto probabilmente alla natura dei test di carattere prettamente metallurgico e meccanico. La carenza d'informazioni elettriche in questi lavori ci ha indotto, prima di procedere alla replica degli esperimenti, a studiare le possibili configurazioni, ottimizzando al meglio gli strumenti e macchinari messi a disposizione dal Dipartimento d'Ingegneria Industriale. Come scelta iniziale di studio si sono presi ad esempio due relazioni inerenti due tipologie di test diversi: uno di piegatura ("Electroplastic modeling of bending stainless steel sheet metal using energy methods" realizzato da W. A. Salandro, C. Bunget e L. Mears)[4], e uno di trazione ("Experimental study of Electro-Plastic Effect on Advanced High Strength Steels" realizzato da X. Liu, S. Lan e J. Ni)[6], sempre di una lamina di metallo anche se con dimensioni leggermente diverse. Questi sono sembrati, dopo una prima analisi di parecchi altri lavori che la bibliografia offre, di semplice realizzazione e alla portata dei nostri mezzi. All'interno di questo documento tali relazioni verranno sviscerate, dando risalto alla parte elettrica, con l'obiettivo di predisporre al meglio nuovi sistemi.

Seguono quindi, dopo il primo Capitolo dedicato alla descrizione del fenomeno dell'elettroplasticità e delle sue spiegazioni teoriche non del tutto concordi, tre Capitoli, ognuno riferito agli esperimenti presi ad esempio. Qui verranno analizzate in dettaglio le modalità della realizzazione pratica dei test descritti, seguiranno le proposte di design per l'attuazione di prove nei nostri laboratori in base alle disponibilità strumentali, supportate da studi sulle attrezzature candidate e da elaborazioni numeriche dei campioni secondo le possibili specifiche di configurazione mediante programma di simulazione FLUX. Infine si propongono soluzioni ai vari problemi riscontrati e linee guida per il proseguo

dell'attività di ricerca intrapresa, suggerendo anche le caratteristiche e modalità dei primissimi test. Nelle conclusioni, verrà descritta dettagliatamente la situazione di realizzazione pratica aggiornata alla termine di stesura di questo elaborato.

1. Teorie sull'elettroplasticità

Negli anni si sono succedute molte teorie sull'origine dell'EPE e nonostante le analisi effettuate è tutt'oggi oggetto di studio. È ormai assodato che si tratta di un insieme di fenomeni. Osservando gli studi di Conrad si vede come applicando densità di corrente 10^3 - 10^6 A/cm² con impulsi di 100μs durante la deformazione per trazione si ottiene una significativa riduzione del "flow stress", ovvero un aumento del tasso di deformazione di tensione $\dot{\epsilon}_j$. In Fig. 1.1 è riportato l'andamento di tale coefficiente, rapportato allo stesso in assenza di corrente, in funzione della densità di corrente elettrica J per diversi metalli (oltre che a mono e a policristallino) e per alcuni tipi di deformazione: tasso di sollecitazione costante, stress di rilassamento e scorrimento. Il valore di $\dot{\epsilon}_j$ è stato ottenuto rimuovendo tutti gli altri effetti secondari della corrente: effetto Joule, effetto pelle ("skin effect") ed effetto di magnetostrizione o strizione magnetica ("magnetostrictive effect" o "pinch effect"). Tra questi quello più consistente è ovviamente il riscaldamento per effetto Joule, però, come già è stato detto, nel caso di metalli come Ag, Al, Cu e Zn l'incremento di temperatura risulta di pochi gradi Celsius, dando solo un piccolo contributo alla deformazione.

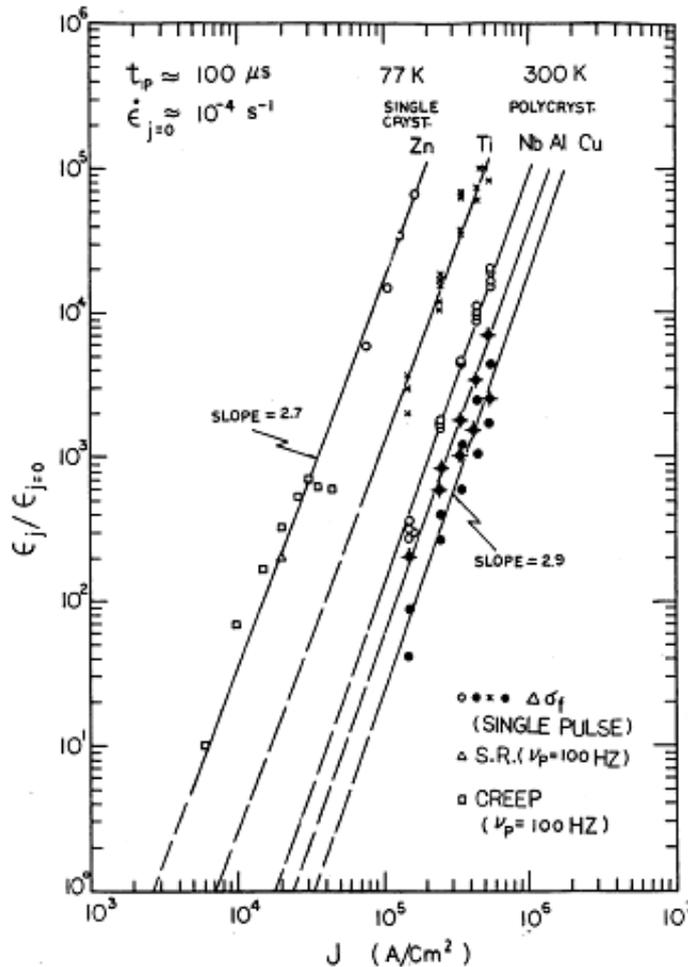


Fig. 1.1 Log-log di $\dot{\epsilon}_j / \dot{\epsilon}_{j=0}$ in funzione di J per impulsi di 100μs durante deformazione plastica di diversi metalli a 78K e a 300K [14]

1.1 Prime teorie sull'EPE

A differenza di quello che accade per le deformazioni di tipo elastico, con le deformazioni plastiche, togliendo le forze applicate al pezzo, esso non ritorna alla forma originale. Ciò si deve alla creazione e allo spostamento di dislocazioni nel materiale. Con corrente elettrica ovviamente viene inteso il movimento di elettroni all'interno del reticolo del materiale. Durante i primi studi vennero prese in considerazione come possibili spiegazioni dell'EP alcuni effetti secondari della corrente elettrica come quello termico, di strizione magnetica e pelle, i quali sono importanti al fine dell'EP, ma non spiegarono completamente il processo.

Con effetto pelle s'intende la concentrazione di corrente sulla parte più esterna del conduttore, vicina alla superficie. Il suo parametro fondamentale è lo spessore di penetrazione:

$$\delta = \left(\frac{\pi f \mu}{\rho} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

con f s'identifica la frequenza della pulsazione, ρ la resistività elettrica e μ la permeabilità del campione. Gli esperimenti di Cornad e la sua équipe dimostrarono che tutto sommato la distribuzione di corrente in questi casi era piuttosto uniforme, scartandolo tra le cause principali dell'EP.

Anche l'effetto di strizione magnetica (pressione creata dal campo magnetico intrinseco che produce una compressione radiale) risultò piccolo se paragonato al "load drops", ovvero al carico meccanico applicato al pezzo. Tale effetto si può quantificare mediante la formula:

$$\Delta\sigma_{pinch} = \nu \mu J^2 a^2 / 2$$

dove ν è il tasso di Poisson, a è l'area del pezzo, μ la permeabilità del campione e J la densità di corrente.

Il più importante è l'effetto Joule che causa il riscaldamento del corpo attraversato da corrente. L'aumento di temperatura nel caso adiabatico di può così definire nel seguente modo:

$$\Delta T = \frac{\rho J^2 t_p}{c_p d} \quad (2)$$

dove oltre ai termini già visti t_p indica la durata dell'impulso, c_p è il calore specifico e d la densità del materiale. Anche l'effetto termico secondo Conrad e Troitskii, nonostante l'apporto energetico superiore dei due casi precedenti, non è abbastanza significativo per spiegare l'EP. Nonostante ciò alcuni ricercatori (in base a studi effettuati negli anni '80) sostennero che l'EP potesse essere totalmente dovuto alla componente termica e che l'effetto diretto degli elettroni fosse trascurabile.

Quest'ultimo fenomeno, definito come "electron wind force", prende in considerazione la forza risultante derivata dal momento creato dagli elettroni durante la collisione con gli atomi. Nel caso di singolo cristallo di metallo si ha:

$$F_{ew} = e n_e J \left(\frac{\rho}{N_D} \right) \quad (3)$$

dove F_{ew} è la forza di electron wind per unità di lunghezza di dislocazione, ρ/N_D è la resistività specifica per unità di lunghezza di dislocazione, N_D è la densità di dislocazione e n_e è la densità di elettroni. Con electron wind s'intende una corrente di flusso ionizzato generato da un forte campo elettrico. Secondo gli esperimenti condotti da Conrad l'aumento della plasticità è dovuto dall'effetto diretto degli elettroni sul movimento delle dislocazioni. Successivi studi però, effettuati da Molotskii e Fleurov, mostrarono come anche questo contributo fosse troppo basso per spiegare l'EPE. Essi invece proposero che la componente maggiore derivasse dal campo magnetico indotto dalla corrente.

1.2 Teorie sviluppate in tempi più recenti

Secondo Xu la combinazione di effetti termici e non-termici dovuti dall'elettropulsione sono responsabili della ricristallizzazione dinamica nel caso di EPR. L'accelerazione di lacune indotte dagli impulsi di corrente promuove la propagazione di dislocazioni. Questo assieme ad altri due fattori: il flusso totale di lacune relative allo stress esterno e la forza di electron wind sono alla base del fenomeno. Il flusso totale di diffusione di atomi j corrispondente all'attività delle lacune si può esprimere come:

$$j = \frac{D_1}{kT} (\tau\Omega + K_{ew}\Omega J_m + N_1\rho e Z_1^* J_m) \quad (4)$$

dove D_1 è il coefficiente di diffusione del reticolo, k è la costante Boltzmann, T è la temperatura, τ è lo stress esterno, Ω è il volume dell'atomo, K_{ew} è il coefficiente della forza electron wind, J_m è l'ampiezza della densità di corrente, N_1 è il numero di atomi del reticolo per unità di volume e Z_1^* è l'effettiva carica degli atomi del reticolo. È possibile che gli effetti atermici riescano a compensare quelli termici nella propagazione di dislocazioni.

In una deformazione classica la distribuzione di difetti cristallini è eterogenea e la resistività elettrica è sensibile alla composizione della microstruttura (come dislocazioni, lacune, ecc). Con la conduzione di corrente impulsiva durante la deformazione di metalli gli effetti termici e atermici sono più forti a causa della maggiore resistività locale e della forte deviazione di corrente nell'area con difetti. Questo prende il nome di effetto selettivo ("selective effect").

Nel caso di EP oltre alla pressione meccanica esercitata entrano in gioco altre due forze legate alla densità di corrente: P_{th} e P_{ath} . La prima si riferisce allo stress di compressione termico locale dato da $P_{th} = (2a\Delta S \text{grad}T)/\phi$, in cui ΔS è la differenza di entropia tra bordo di grano e cristallo, $2a$ è lo spessore del bordo di grano e ϕ il volume atomico. P_{ath} è la forza di electron wind data da $P_{ath} = (\rho_D/N_D)en_e j$, dove ρ_D/N_D è la resistività specifica per unità di lunghezza di dislocazione, N_D è la densità di dislocazioni, n_e è la densità di elettroni e j è la densità di corrente. Durante l'EPR la velocità di movimento del bordo è dato da:

$$v_{EP} = MP_{EP} \quad (5)$$

$$M = M_0 e^{(-Q/RT)} \quad (6)$$

dove M è la mobilità del bordo funzione della temperatura, T è la temperatura assoluta, M_0 è una costante, Q è l'energia di attivazione del bordo di migrazione e R è la costante dei gas. L'effetto di tutte e tre le forze in gioco è determinante per la velocità di movimento del bordo. Gli studi mostrano come P_{th} e P_{ath} crescano rapidamente. Grazie quindi alla maggiore energia immagazzinata e alla maggiore velocità, la ricristallizzazione dinamica può avvenire a basse temperature.

2. Test di piegatura

Come primo esperimento da replicare si è scelto la piegatura di una lamina di acciaio puro effettuato da Salandro e la sua equipe presso la Clemson University di Greenville (USA) nel 2012[4]. Dalle pubblicazioni del test sono stati raccolti i seguenti dati tecnici:

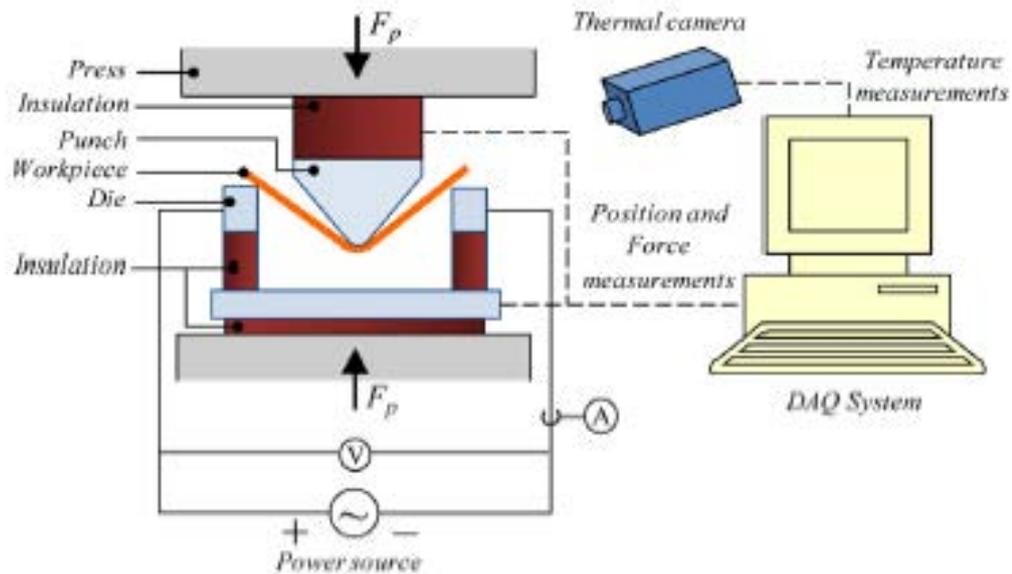


Fig. 2.1 Schema funzionale del test di EPB[4]

2.1 Dati dell'esperimento scelto

Campione

Materiale: acciaio puro 304
Dimensioni: 12.38mm x 0.864mm x 127mm tagliato lungo la direzione di laminazione

Prova meccanica

È stata impiegata una classica macchina per effettuare test di piegatura.

Forza, F_p : sono riportati due coefficienti (coefficiente di resistenza K e l'esponente di sforzo d'indurimento n) che sostituiti all'interno della formula sottostante assieme ad altri valori del campione è possibile determinare la forza da applicare (F_p) per piegarlo di un determinato angolo (α). Il significato dei diversi termini è comprensibile osservando i disegni geometrici della struttura di Fig. 2.2 e Fig. 2.3.

$$F_p = K \frac{wt_b^2 \cos \frac{\alpha}{2} \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \mu \sin \frac{\alpha}{2} \right)}{\mu t_b \cos \frac{\alpha}{2} + w_d - 2(r_p + t_b) \sin \frac{\alpha}{2}} \left(\ln \left(\sqrt{1 + \frac{t_b}{r_p}} \right) \right)^n \quad (2.1)$$

$K=1275\text{MPa}$

$n=0.51$

$w=12.38\text{mm}$

$t_b=0.864\text{mm}$

w_d : distanza tra i dadi d'appoggio

r_p : raggio della punta dell'incisore

μ : coefficiente di frizione

Dai grafici degli esperimenti s'evince che F_p ha come valore massimo circa 100N (nella prova senza corrente applicata).

Profondità: 15mm

Velocità, v : 6.35mm/min

Dadi: adottando due diverse distanze fra i punti d'appoggio del pezzo ($w_d=38.1\text{mm}$ e 50.8mm) sono stati in grado di effettuare test con diversi raggi di piegatura del pezzo (con rispettivi angoli 91.5° e 109°).

La prima configurazione scelta da Salandro e il suo gruppo prevedeva per l'appoggio e contatto elettrico del pezzo due mezzi cilindri di raggio 15.9mm (a di Fig. 2.4). Notarono però che la piastra tendeva durante la prova a saldarsi ai sostegni, aumentando la forza necessaria per la piegatura. A causa del raggio degli appoggi troppo grande la velocità relativa tra il campione e gli appoggi era bassa permettendo di la saldatura in determinate circostanze. Come soluzione adottarono basi a forma parallelepipedica con gli spigoli smussati, aventi quindi un raggio inferiore (b di Fig. 2.4). Inoltre aggiunsero una pasta dielettrica sui punti di contatto tra provino e appoggi.

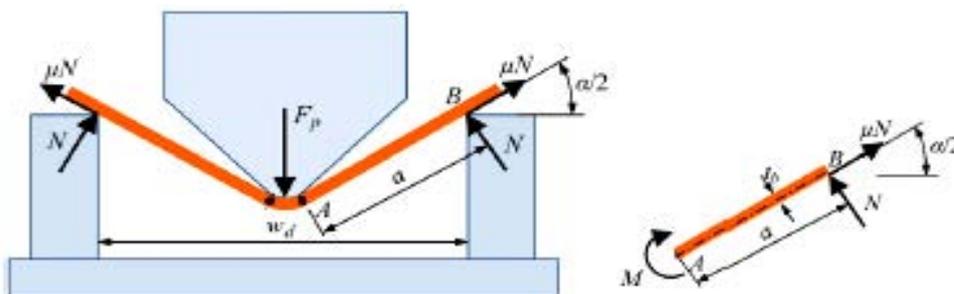


Fig. 2.2 Modello semplificato delle forze di piegatura[4]

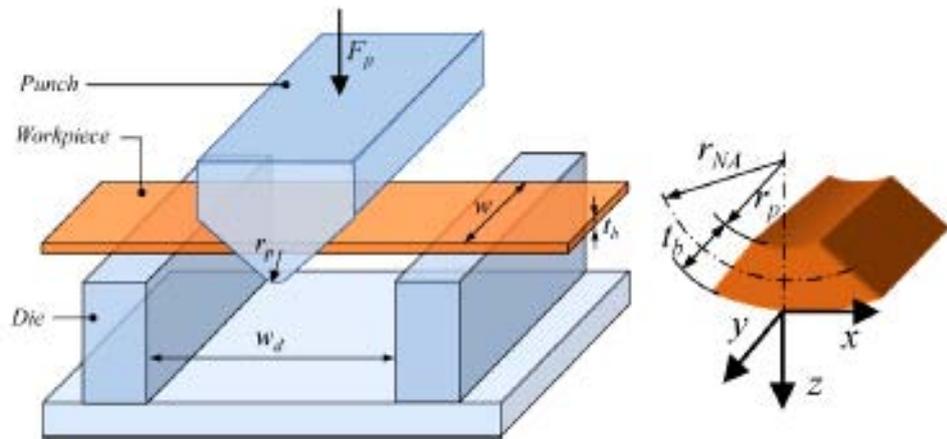
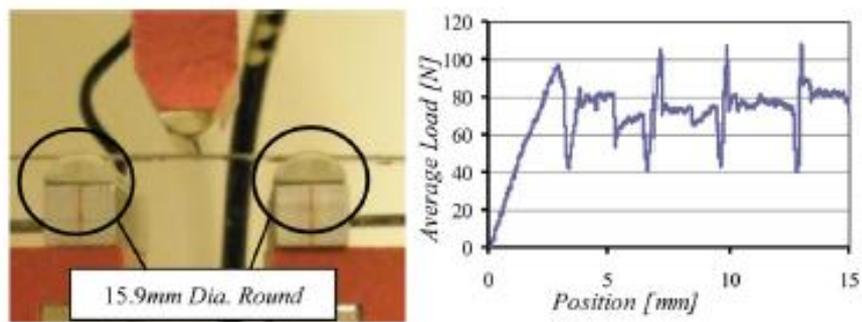
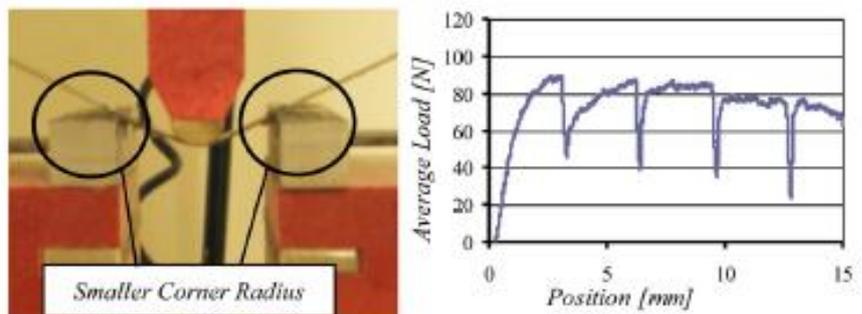


Fig. 2.3 Geometria del modello[4]



(a) Poor Design – Led to a varying contact point and welding



(b) Good Design – Led to a single contact point and no welding

Fig. 2.4 Variazione delle basi[4]

Corrente

La corrente elettrica di tipo impulsivo è stata fornita al pezzo durante la piegatura tramite una macchina saldatrice opportunamente modificata (Lincoln R3R-500). Sfortunatamente gli autori non entrano nel merito di tali modifiche. Anche se in base alle tempistiche in gioco (secondi) non si ritiene

che abbiamo utilizzato software per il controllo della corrente, molto probabilmente questo lavoro è stato effettuato manualmente. Sono stati effettuati diversi esperimenti con diversi valori dei parametri elettrici. La Fig. 2.5 vuole dare un'idea qualitativa del tipo di segnale elettrico fornito al provino e spiegare la terminologia successiva.

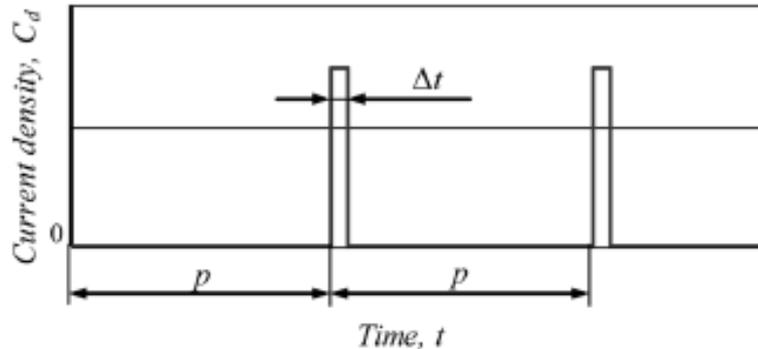


Fig. 2.5 Andamento richiesto della corrente elettrica

Densità, C_d (J): 20A/mm² e 30A/mm²
 Periodo, p: 60s, 30s, 20s e 15s.
 Impulso, Δt : 2s e 3s
 Isolante: per isolare elettricamente il macchinario sono stati usati quattro pezzi di fibra di vetro: sull'incisore, sui due dadi di appoggio del pezzo (entrambi in tensione) e tra la base e la cella di carico. Sono i componenti color rosa distinguibili in Fig. 2.6.

Misurazioni

Forza: Posizionato al di sotto dei supporti del campione vi è un sensore (capacità 22250N con risoluzione $\pm 4.45N$) per registrare istantaneamente il valore della forza applicata.
 Temperatura: Camera a infrarossi (FLIR). Le temperature massime misurate (nella prova con impulso di durata 2s) sono state 115°C con 20A/mm² e 335°C con 30A/mm².

Test condotti

Verifica modello: densità 20 A/mm² -30A/mm²
 $w_d=38.1mm$
 durata impulso 2s
 durata periodo 30s

Effetto densità di corrente sulla forza: densità 20 A/mm² -30A/mm²
 $w_d=38.1mm-50.8mm$
 durata impulso 2s
 durata periodo 30s

Effetto densità di corrente sullo springback: densità (0-)20 A/mm² -30A/mm²
 durata impulso 2s
 durata periodo 30s
 $w_d=38.1mm$

Effetto dura impulso sulla forza:	durata impulso 2s-3s densità 30A/mm ² durata periodo 60s w _d =38.1mm
Effetto dura impulso sullo springback:	durata impulso 2s-3s densità 30A/mm ² durata periodo 30s w _d =38.1mm
Effetto periodo pulsazione sulla forza:	durata periodo 20s-30s densità 30A/mm ² durata impulso 2s w _d =38.1mm
Effetto periodo pulsazione sullo springback:	durata periodo 20s-30s-60s densità 30A/mm ² durata impulso 2s w _d =38.1mm

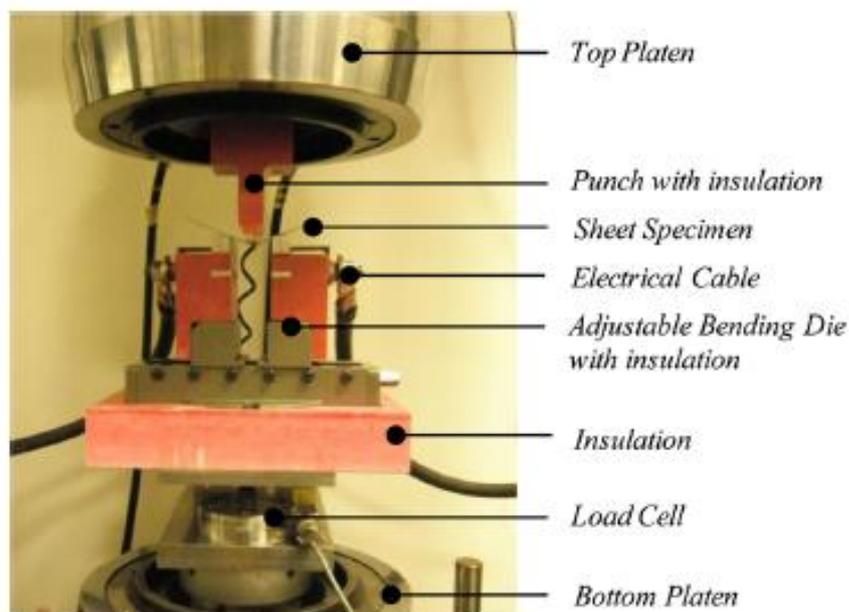


Fig. 2.6 Configurazione del test[4]

2.2 Analisi dell'esperimento

Per effettuare i calcoli preliminari presentati nel seguito è stato necessario decidere che materiale adottare in modo da definire le sue caratteristiche fisiche. Si è scelto lo stesso metallo dell'esperimento precedentemente descritto: acciaio AISI 304 (304 stainless steel). Le sue proprietà fisiche principali e le percentuali dei suoi componenti sono riportate nella Tabella 2.1 e Tabella 2.2.

Tabella 2.1 Caratteristiche fisiche peculiari dell'acciaio AISI 304

ACCIAIO AISI 304		
Proprietà	Valore	Unità di misura
Densità	8000	kg/m ³
Resistività elettrica (20°C)	0.0000720	Ωcm
Resistività elettrica (650°C)	0.000116	Ωcm
Permeabilità magnetica	1.08	
Calore specifico	0.5J/g°C	J/(g°C)
Conducibilità termica	16.2	W/(mK)
Punto di fusione	1400-1455	°C

Tabella 2.2 Composizione fisica dell'acciaio AISI 304

ACCIAIO AISI 304		
Componenti	Simboli	%
Carbonio	C	≤ 0.080
Cromo	Cr	18 - 20
Ferro	Fe	66.345 - 74
Manganese	Mn	≤ 2.0
Nickel	Ni	8.0 - 10.5
Fosforo	P	≤ 0.045
Silicio	Si	≤ 1.0
Zolfo	S	≤ 0.030

Si è proceduto con una valutazione analitica per determinare alcuni parametri ancora incogniti. Se si considera l'applicazione della tensione alle basi d'appoggio e la configurazione del pezzo ancora allo stato di riposo si ottiene:

$$l = 127mm$$

$$w_d = 50.8mm$$

$$S = a \cdot b = (0.864 \cdot 12.38)mm^2 = 10.70mm^2$$

$$\rho = 0.72\Omega mm^2/m$$

$$J = 30A/mm^2$$

$$P = \frac{\rho w_d}{S} I^2 = \rho w_d J^2 S = 0.72 \cdot 50.8 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 \cdot (0.864 \cdot 12.38) = 352W \quad (2.2)$$

$$I = \sqrt{\frac{PS}{\rho w_d}} = \sqrt{\frac{880 \cdot (0.864 \cdot 12.38)}{0.72 \cdot 50.8 \cdot 10^{-3}}} = 321A \quad (2.3)$$

$$V = \frac{P}{I} = \frac{352}{321} = 1.10V \quad (2.4)$$

Per evitare possibili problemi di saldature indesiderate alle basi, e per ragioni di convenienza realizzativa, si è pensato di fornire la tensione agli estremi della lamina, mediante calze in rame fissate al campione con delle viti, e non più alla basi d'appoggio. Se consideriamo di applicare la tensione alle estremità del pezzo i valori cambiano leggermente:

$$\text{Con } J = 30A/mm^2$$

$$P = \frac{\rho l}{S} I^2 = \rho l J^2 S = 0.72 \cdot 127 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 \cdot (0.864 \cdot 12.38) = 880W \quad (2.5)$$

$$I = \sqrt{\frac{PS}{\rho l}} = \sqrt{\frac{880 \cdot (0.864 \cdot 12.38)}{0.72 \cdot 127 \cdot 10^{-3}}} = 320A \quad (2.6)$$

$$V = \frac{P}{I} = \frac{880}{320} = 2.75V \quad (2.7)$$

$$\text{Con } J = 20A/mm^2$$

$$P = \rho l J^2 S = 391W \quad (2.8)$$

$$I = \sqrt{\frac{PS}{\rho l}} = 213A \quad (2.9)$$

$$V = \frac{P}{I} = 2.75V \quad (2.10)$$

2.3 Scelta e caratteristiche della macchina adottata

La macchina scelta preliminarmente come possibile alimentatrice/piegatrice è un prototipo di puntatrice che riproduce il funzionamento del banco di saldatura in dotazione alle macchine industriali “Mesh Line BB” e “Mesh Line BC” destinato alla produzione di reti per cemento armato, costruita dall’azienda Schnell SpA © di Montemaggiore al Metauro (PU).



Fig. 2.7 Puntatrice selezionata

L'alimentazione è trifase a 400V 50Hz. La tensione di funzionamento dei circuiti ausiliari è di 24VDC. La conversione dell'energia elettrica è effettuata mediante un inverter a media frequenza tipo 1506RW prodotto dalla Tecna ® di Castel San Pietro (BO); alimentato direttamente in trifase fornisce in uscita un'onda quadra (con duty cycle controllato) di ampiezza pari a 500V e corrente regolabile fino a 1200A ad una frequenza di 1KHz. Il valore efficace della tensione in uscita, in funzione della corrente erogata, non può superare i limiti imposti dalla potenza complessiva della macchina (indicati dal costruttore in 60kVA).

Il controllo di saldatura è realizzato dal TE700 con versione software n° 1.09; anch'esso è realizzato dalla Tecna ® di Castel San Pietro (BO).

Alcune caratteristiche salienti sono le seguenti:

- comando ad inverter con IGBT a media frequenza, con possibilità di scelta della frequenza di funzionamento dell'inverter tra 1000Hz e 4000Hz;

- funzioni di salita corrente, discesa corrente, pulsazioni, pre-saldatura, post-saldatura e regolazione dei tempi di saldatura con risoluzione 1ms;
- limiti in corrente, tensione agli elettrodi, energia, potenza, percentuale di utilizzo dell'inverter, resistenza iniziale e finale del materiale da saldare;
- limite sullo spessore e sull'indentazione del materiale (opzionale);
- modalità di funzionamento: parzializzazione costante, corrente costante, potenza costante, tensione costante, energia costante e a compensazione dinamica.

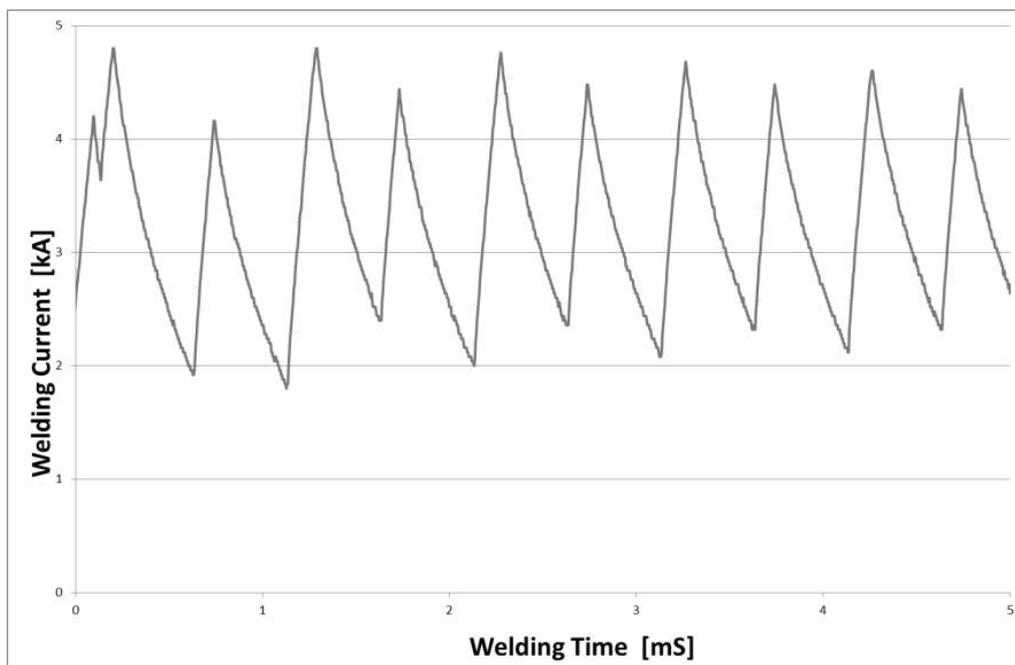


Fig. 2.8 Tipo di corrente fornita dalla puntatrice durante la saldatura a croce di due tondini in acciaio

La macchina inoltre non fornisce una vera corrente continua, ma un segnale del tipo riportato in Fig. 2.8 e Fig. 2.9.

Dal confronto con persone che hanno precedentemente adoperato tele saldatrice s'è evinto che possiede funzioni programmabili tali da consentire l'ottenimento di alimentazioni adeguate allo scopo. Per capire se risulta essere adatta per le prove è stato necessario comunque consultare il manuale. Esso in un primo momento non è stato trovato, neanche nel sito internet dell'azienda. Questo è stato uno dei motivi che ha spinto a cambiare, almeno per i primi esperimenti che s'intendono fare sull'EP, tipologia di macchina e quindi di test. Contattando l'azienda infine si è riusciti a reperire il manuale che descrive il controllo di saldatura TE700 [9], permettendo di terminare l'analisi.

Il TE700 è un controllo di saldatura a microprocessore per saldatrici a resistenza con tecnologia inverter. La funzione del controllo di saldatura è quella di gestire gli organi della saldatrice, in particolar modo il gruppo di potenza a IGBT che effettua la regolazione della corrente di saldatura. Risulta molto versatile in quanto si può adattare a diversi tipi di saldatrici, oltre che a quelle a punti e a proiezioni, può essere installato anche su saldatrici a rulli. L'unità di controllo può gestire fino ad un massimo di 4 trasformatori di saldatura differenti. Si possono memorizzare 300 diversi programmi di saldatura, 255 dei quali richiamabili direttamente dall'esterno. Ogni programma è costituito da parametri programmabili che descrivono il ciclo di lavoro. Il controllo inoltre consente l'esecuzione di saldature con la regolazione di corrente di pre-saldatura, post-saldatura, slope e pulsazioni variabili.

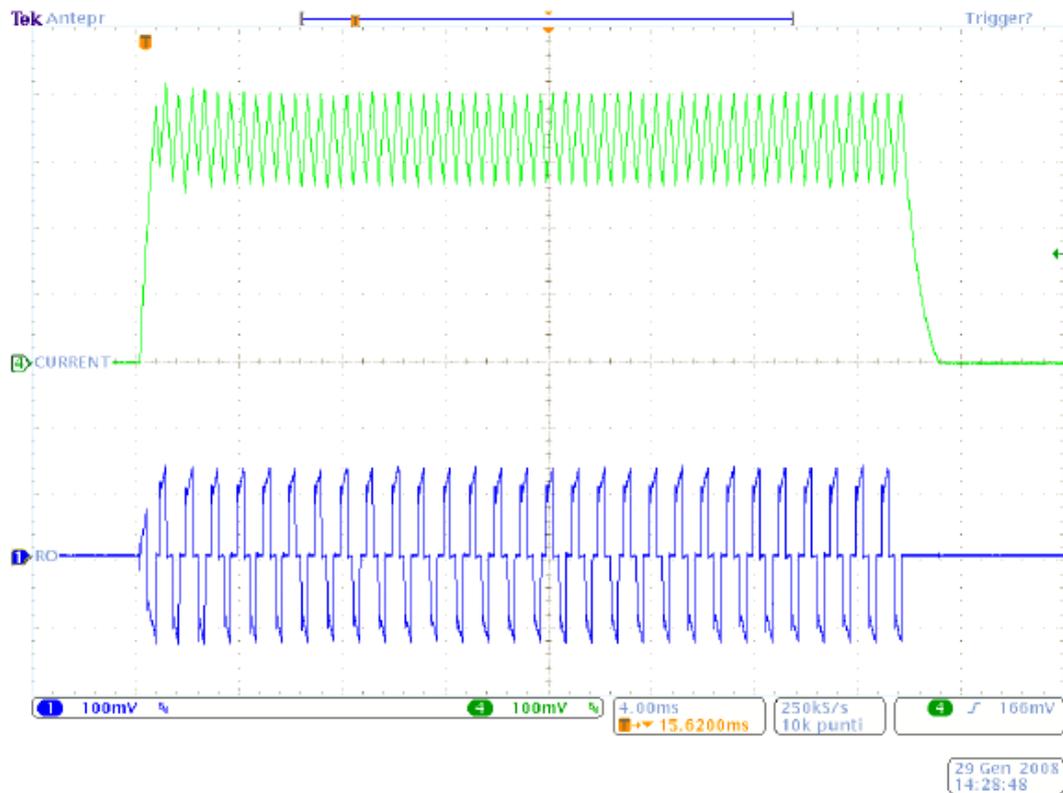


Fig. 2.9 Tipo di corrente fornita dalla puntatrice durante la saldatura IK[9]

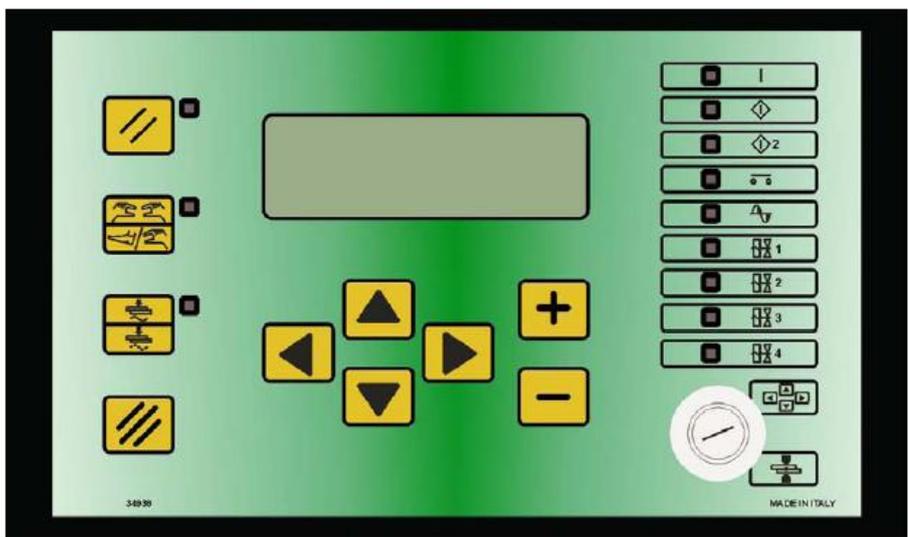


Fig. 2.10 Pannello di controllo del TE700 [9]

Consultando il manuale si è scoperta appieno l'enorme versatilità di tale saldatrice. Sono possibili infatti diversi tipi di controlli:

- Funzionamento a corrente costante (IK): è possibile impostare direttamente il valore di corrente con cui si vuole eseguire la saldatura. Durante la saldatura il controllo misura ogni millisecondo il vero valore efficace (RMS) della corrente di saldatura e, in base ad un algoritmo matematico di correzione mantiene la corrente impostata. Il valore massimo impostabile come corrente di saldatura risulta limitato automaticamente al livello massimo erogabile dal trasformatore impostato nel menù.
- Funzionamento in FIX: l'unità saldatrice inverter non applica nessuna regolazione alla corrente erogata in saldatura. L'utente deve impostare la percentuale di parzializzazione della potenza erogata dall'inverter, il valore può variare tra il 5% ed il 100%. A valori maggiori della parzializzazione corrisponde un aumento della potenza erogata durante la saldatura. La corrente effettivamente erogata dall'inverter diventa in questo caso funzione di vari fattori e non risulta essere più costante. I fattori che possono influenzare la regolazione di corrente sono: variazioni di resistenza nel materiale da saldare, usura degli elettrodi, variazioni nella geometria del circuito secondario, fluttuazioni della tensione di linea. Consigliabile nella saldatura di breve durata con grosse variazioni di resistenza oppure come dispositivo di riscaldamento del metallo.
- Funzionamento con tensione secondaria costante (VEK): l'unità saldatrice calcola il vero valore efficace (RMS) ogni millisecondo della tensione agli elettrodi ed in base ad un algoritmo mantiene costante il valore di tensione impostato. La corrente erogata sarà inversamente proporzionale alla resistenza del circuito secondario e del pezzo da saldare. La corrente risulterà essere indipendente dalle fluttuazioni della linea di alimentazione. La tensione resterà costante fino a che la corrente non raggiungerà il valore CURR.MAX impostabile, altrimenti corrispondente al limite della macchina, al fine di evitare danneggiamenti.
- Funzionamento con potenza costante (PWK): ogni millisecondo verrà calcolato l'RMS della corrente e della tensione secondaria e attraverso un algoritmo viene calcolato e mantenuto costante il prodotto al variare della tensione di rete. Di conseguenza se si verifica una diminuzione della resistenza secondaria si assisterà ad un aumento della corrente di saldatura e viceversa con un aumento della resistenza secondaria si avrà una diminuzione della corrente di saldatura. La regolazione in potenza costante funziona correttamente fino a che la corrente non raggiungerà il valore impostato CORR.MAX. Utile per compensare l'usura degli elettrodi o per saldare materiali che presentano notevoli variazioni di resistenza durante il processo.
- Funzionamento con energia costante (ENE): si effettuano regolazioni come in un controllo convenzionale, a parte per il valore ENERGIA e del tempo di saldatura per il quale s'imposta un valore massimo e minimo. L'inverter regola in maniera costante la corrente di saldatura in modo da farla coincidere con il valore impostato. Durante la saldatura l'inverter rileva la corrente di saldatura in vero valore efficace (RMS), la componente ohmica della tensione agli elettrodi in volt e la durata della saldatura in ms. Il prodotto corrente-tensione-tempo esprime l'energia termica che è stata prodotta durante la saldatura. Poiché l'energia sottratta per conduzione, quella dissipata fra le lamiere e gli elettrodi, riduce la precisione dell'energia misurata, è opportuno saldare con tempi brevi ed elevata forza agli elettrodi.
- Funzionamento in dynamic mode (DYN): è una modalità di funzionamento dell'inverter di tipo attivo. L'unità durante il processo è in grado di rilevare condizioni anomale come un non perfetto contatto delle lamiere da saldare, presenza d'impurità tra i pezzi da saldare, presenza di shunt nelle vicinanze degli elettrodi e usura di essi. Una volta individuate una o più condizioni anomale l'unità di controllo è in grado di modificare dinamicamente il processo di saldatura per effettuare una compensazione delle stesse. La compensazione del processo di saldatura avviene con un allungamento del tempo di saldatura, fino ad un limite massimo definibile dall'utente. Si ha quindi la regolazione della corrente di saldatura con lo scopo di ottenere una saldatura più corretta possibile.

Tabella 2.3 Parametri regolabili della saldatrice nel funzionamento a IK[9]

PARAMETRO	RANGE VALORE
PROGRAMMA N.	001 – 300
MODO LAVORO	IK
MODO CONTROLLO *	NO
QUALITY – T*	OFF
QUALITY – R *	OFF
ACCOSTAGGIO1	0.5 – 99.0 cicli
ACCOSTAGGIO	00.0 – 99.0 cicli
PRESSIONE	00.5 – 10.0 bar
FORGIATURA	00 – 99 cicli
PRES-FORG.	00.5 – 10.0 bar
PRE-SALDAT.	0000 – 1000 mS
PRE-CORR.	000.30 – 200.00 KA
T.FREDDO 1	0000 – 1000 mS
SALITA COR.	0000 – 1000 mS
SALDATURA	0001 – 2000 mS
CORRENTE	000.30 – 200.00 KA
T.FREDDO 2	0000 – 1000 mS
N. IMPULSI	1 – 9
SALDATURA 2	0000 – 1000 mS
CORRENTE 2	000.30 – 200.00 KA
DISCESA COR.	0000 – 1000 mS
T.FREDDO 3	0000 – 1000 mS
POST-SALDAT.	0000 – 1000 mS
POST-CORR.	000.30 – 200.00 KA
MANTENIMENTO	00.5 – 99.0 cicli
PAUSA	00.0 – 99.0 cicli

MODO CONTROLLO *	CUR
LIM I MIN	000.30 – 200.00 KA
LIM I MAX	000.30 – 200.00 KA

MODO CONTROLLO *	RO
LIM RO MIN	005.0 – 100.0%
LIM RO MAX	005.0 – 100.0%

MODO CONTROLLO *	VE
LIM V MIN	00.20 – 20.00 V
LIM V MAX	00.20 – 20.00 V

MODO CONTROLLO *	PW
LIM P MIN	000.20 - 600.00 KW
LIM P MAX	000.20 – 600.00 KW

MODO CONTROLLO *	ENE
LIM E MIN	00000 – 60000 J
LIM E MAX	00000 – 60000 J

QUALITY -T *	THICK
THICK. MIN	00.00 – 60.00 mm
THICK MAX	00.00 – 60.00 mm

QUALITY -T *	IDENT
IDENT. MIN	0.000 – 6.000 mm
IDENT. MAX	0.000 – 6.000 mm

QUALITY -T *	TH+ID
THICK. MIN	00.00 – 60.00 mm
THICK MAX	00.00 – 60.00 mm
IDENT. MIN	0.000 – 6.000 mm
IDENT. MAX	0.000 – 6.000 mm

QUALITY -T *	ZERO
--------------	------

QUALITY -R *	PRE
RMIN PRE	0 – 60000 uOhm
RMAX PRE	0 – 60000 uOhm

QUALITY -R *	POST
RMIN POST	0 – 60000 uOhm
RMAX POST	0 – 60000 uOhm

QUALITY -R *	PRE+POST
RMIN PRE	0 – 60000 uOhm
RMAX PRE	0 – 60000 uOhm
RMIN POST	0 – 60000 uOhm
RMAX POST	0 – 60000 uOhm

QUALITY -R *	ZERO
--------------	------

Inoltre per ognuno di questi controlli sono disponibili particolari regolazioni. Viene riportata la Tabella 2.3 riassuntiva di queste particolarità per il primo funzionamento (IK) in quanto essere quello di nostro maggiore interesse al momento.

Da tale tabella s'evince che il valore minimo di corrente di saldatura imponibile è pari a 300A, rendendo possibile il test per il campione scelto con densità di corrente di 30A/mm². In questo tipo di funzionamento risulta disponibile la modalità ad impulsi, adatta a realizzare l'esperimento dell'EP. Nella tabella sono riportati anche i valori limite di settaggio dei tempi del segnale d'alimentazione. Il tempo di saldatura può essere regolato nel range 1ms-2s, l'ideale per noi. Sono configurabili anche i tempi di salita e discesa della corrente, oltre che al tempo di assenza corrente. Tutte queste tempistiche risultano regolabili al millisecondo tra 0s e 1s. Ovviamente 0s è una situazione ideale e anche settando tale valore non si riscontrerà un impulso perfetto, ma limitato dalle caratteristiche costruttive della macchina. Nel funzionamento ad impulsi c'è il vincolo massimo di 9 impulsi per ogni operazione di saldatura.

In base all'analisi del manuale condotta non è possibile ripetere gli stessi test precedentemente elencati. Questo non significa che non si possono effettuare esperimenti sull'EP con questa saldatrice, anzi, se ne possono fare anche di migliori. Le principali limitazioni emerse sono due: quella del

numero d'impulsi (9 è il massimo per ogni lavoro) e il tempo di assenza corrente (massimo 1s). La prima non sembra essere un vincolo, in quanto nell'esperimento di riferimento se ne contano all'incirca 4 per ogni piegatura. Quindi 9 dovrebbero essere più che sufficienti permettendo anche test più interessanti, con la possibilità anche del doppio d'impulsi. Le prove con periodi di 60s utilizzano infatti 4 impulsi, quelle invece con periodi di 20s ne contano 7. Questo, sommando anche il limite del tempo di attesa, sembra compromettere irrimediabilmente l'esperimento. C'è però da dire che ci stiamo riferendo ad una saldatrice accoppiata con una macchina per test di piegatura. Tale macchinario ha tempistiche di lavoro molto lente, 6.35mm/min. Non è nota la velocità di discesa del braccio della nostra puntatrice ma è di sicuro molto più veloce. Da tenere in considerazione nelle impostazioni è inoltre il tempo d'accostamento del braccio al pezzo, in tale lasso di tempo la macchina non eroga corrente. Questo fa sì che anche con periodi più brevi sia possibile configurare esperimenti interessanti. Si comprende come sia necessario effettuare una serie di calcoli preliminari al fine di ottimizzare le tempistiche in base alle diverse configurazioni pensate.

2.4 Analisi mediante programma FLUX

Si è proceduto con la realizzazione di un modello 2D, successivamente evoluto in 3D, mediante il programma FLUX (di tipo FEM), al fine di valutare al meglio le caratteristiche elettriche dell'esperimento. Il modello della lamina è stato creato completamente parametrizzato in modo da rendere più agevole lo studio nelle fasi successive, nel caso in cui non si fosse riuscito a reperire un pezzo di identiche dimensioni. Inoltre è stata prevista la possibilità di creare scenari di studio con la variazione della geometria della lamina in conseguenza della deformazione di piegatura.

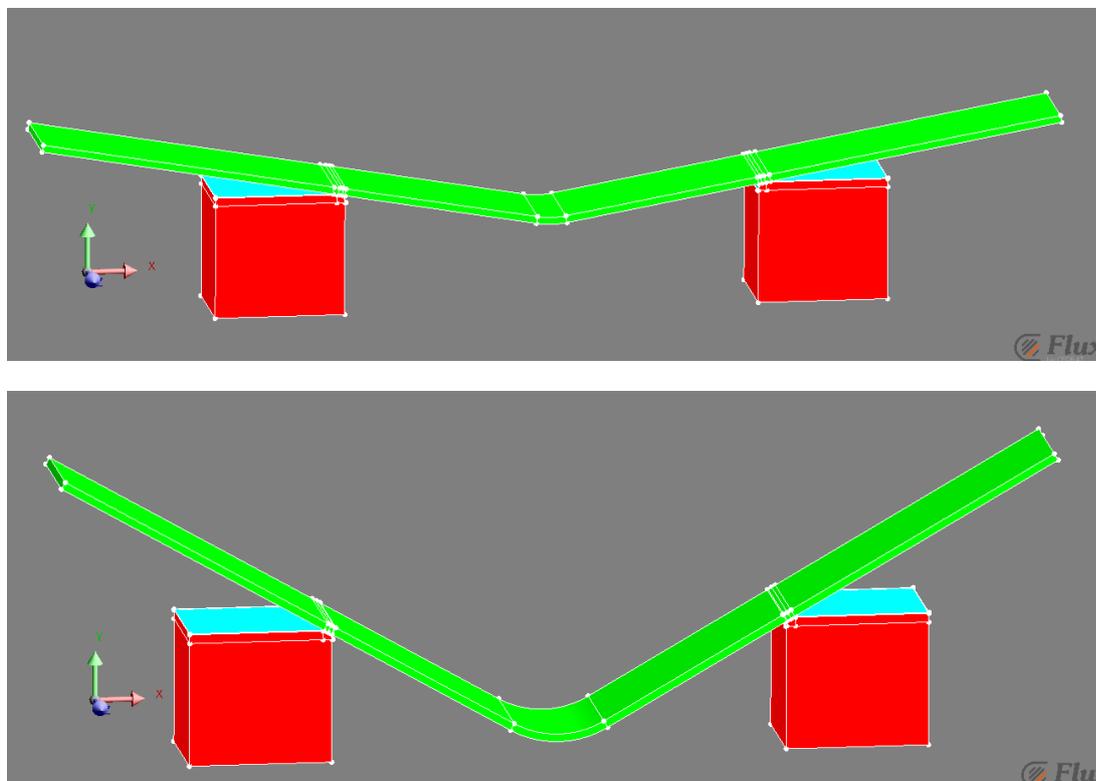


Fig. 2.11 - Fig. 2.12 Modello 3D FLUX parametrizzato del pezzo con variazione dell'angolo di piegatura

Sono state effettuate alcune analisi in condizione di “electric conduction” da cui si è potuto osservare come la corrente si distribuisca uniformemente lungo tutta la sezione del pezzo, a parte il tratto centrale in cui avviene la piegatura. Qui, come era prevedibile, la corrente si addensa nella parte superiore ovvero dove il tratto da percorrere è più breve. Queste simulazioni non sono molto veritiere in quanto la macchina che s’intende utilizzare non fornisce una corrente perfettamente continua in uscita e inoltre è stata utilizzata la configurazione di alimentazione iniziale, cioè con le basi a fare da elettrodi. Hanno consentito però al sottoscritto d’imparare l’utilizzo del programma gradualmente.

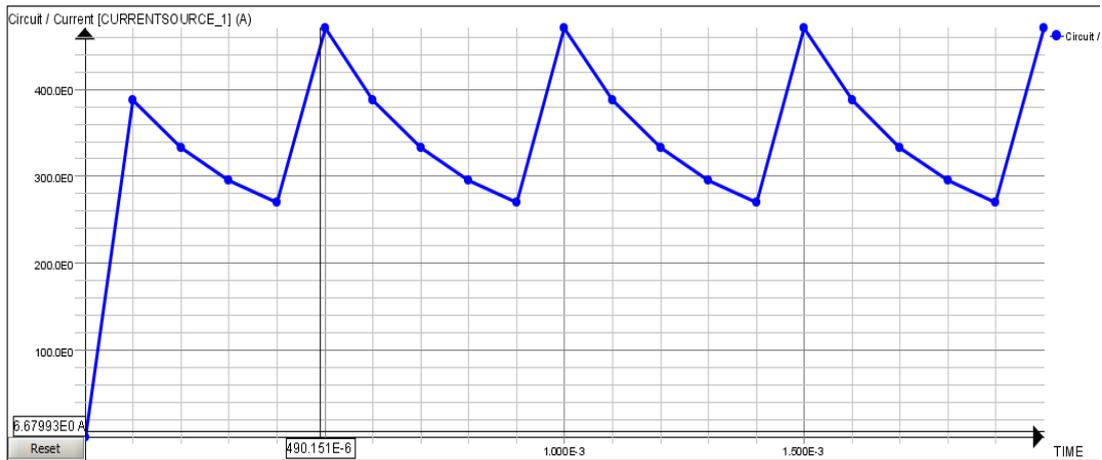


Fig. 2.13 Andamento della corrente con cui si sono fatte le simulazioni in transient magnetic

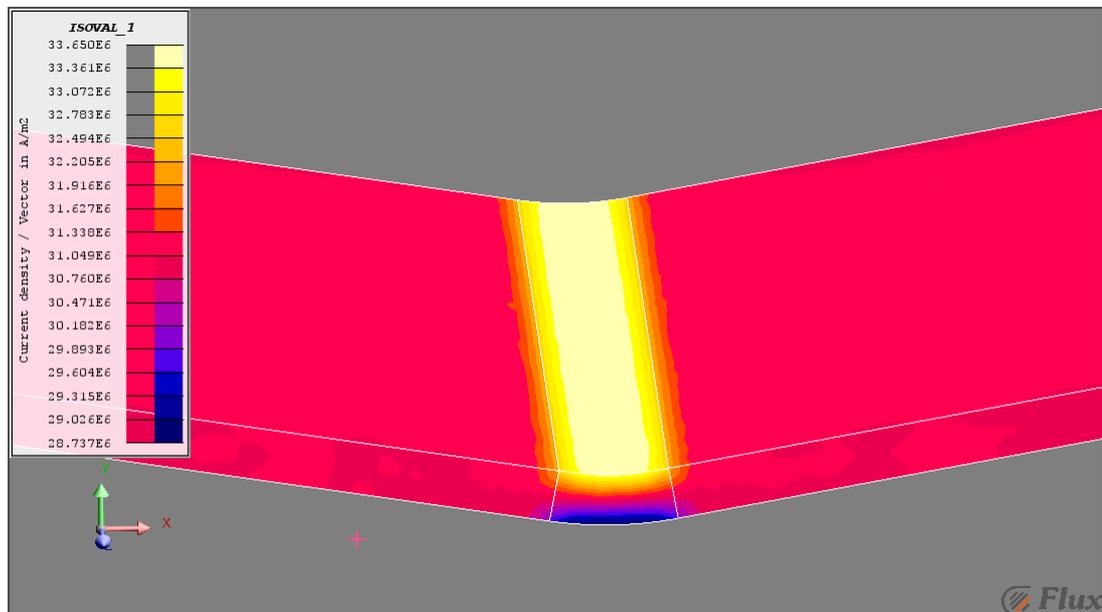


Fig. 2.14 Simulazione FLUX: distribuzione della densità di corrente (A/m^2) in transient magnetic della lamina nella zona di piegatura all’istante 0.0017s (con l’applicazione di 350A)

Sotto l'ipotesi di alimentazione del campione alle estremità, sono state effettuate prove sia in condizione "electric conduction" che "transient magnetic", simulando in quest'ultimo caso che il pezzo venga percorso da una corrente impulsiva con andamento simile a quello fornito in uscita dalla puntatrice, al fine di comprendere al meglio il fenomeno (vedi Fig. 2.14).

2.5 Configurazione della macchina

La macchina così com'è non è adatta a svolgere i test di elettroplasticità applicati alla piegatura. Essa infatti è progettata per saldare tra loro tondini di acciaio che vanno a costituire l'armatura del cemento armato. La procedura prevede il posizionamento a croce di due sbarre. Al di sotto, come base, è posizionato un elettrodo, il secondo sta sopra, all'estremità di un braccio pneumatico, il quale viene fatto abbassare andando a comprimere l'intersezione dei tondini da saldare. La Fig. 2.15 mostra nel dettaglio la fase di saldatura, la freccia rossa indica il movimento del braccio. L'idea è quella di sfruttare questo movimento verticale del secondo elettrodo per realizzare la piegatura del campione. Gli elettrodi invece vanno spostati dalla posizione attuale al fine di alimentare correttamente la lamina alle estremità come scelto precedentemente.

Sono state rilevate le geometrie del piano di lavoro della saldatrice e dei diversi componenti della macchina in modo da creare un modello CAD 3D della configurazione attuale, vedi Fig. 2.16. In tale disegno si vede la base rettangolare di lavoro stabile entro la quale bisogna restare. Si è successivamente studiata la possibile forma e dimensione dell'incisore e delle basi. Importante infatti è assicurarsi che l'incisore riesca a penetrare tra le due basi piegando il pezzo almeno con una profondità di 15mm. Poi modificando la distanza tra di esse si possono ottenere diversi angoli di piegatura. La soluzione immaginata è riportata in Fig. 2.17.

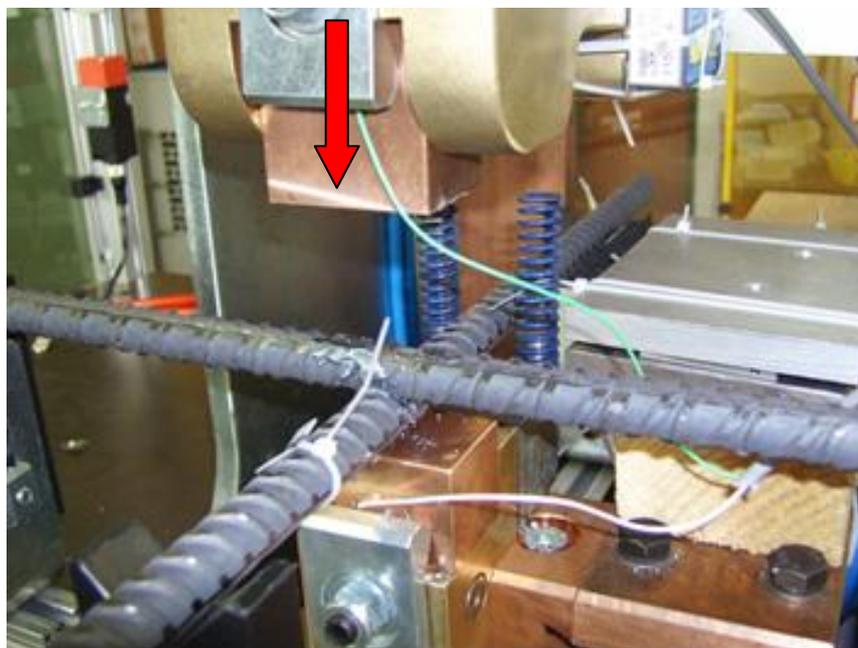


Fig. 2.15 Foto della puntatrice con tondini posizionati per la saldatura

La macchina è corredata da strumenti di misura aggiuntivi: una sonda per la misura della differenza di potenziale agli elettrodi, un sensore di pressione (GEFRAN TKE1E-B01D-HV) e un misuratore di distanza ottico (MICRO-EPSILON optoNCDT 1402). Il primo è collegabile direttamente ad un oscilloscopio in quanto la tensione agli elettrodi è di pochi volt, come il secondo, che è in grado di fornire come valore d'uscita una tensione. Lo strumento ottico necessita invece di una considerazione maggiore, non tanto perché genera una corrente in uscita (per convertirlo in tensione è già presente una resistenza del valore opportuno), ma per la sua capacità di misura: ha un range di 20mm di misura. Non sufficiente alla misurazione completa del fenomeno di piegatura. Per angoli di piegatura via a via più piccoli si raggiungeranno profondità maggiori, comunque anche per piegature modeste (110°-90°) il valore di tale lunghezza dovrebbe essere grossomodo 20-25mm. Senza dover ricorrere all'utilizzo di un altro strumento si può sfruttarlo misurando magari solo il tratto finale di piegatura.

2.6 Problemi nell'utilizzo della macchina saldatrice

Mentre si procedeva all'analisi dell'esperimento si sono effettuate indagini più approfondite sul funzionamento della macchina saldatrice scelta inizialmente. Utile è stato il confronto con l'ing. Ezio Toffano, che precedentemente aveva condotto analisi sulle prestazioni della puntatrice. In questa circostanza si è venuti a conoscenza di un possibile problema al filtro-riduttore MS6-LFR-3/8-D7-CUV-AS – 530348 prodotto dalla Festo AG & Co. KG di Esslingen (Germania). La puntatrice infatti necessita di una connessione ad un sistema di distribuzione di aria compressa ad una pressione massima di 10bar per azionare il braccio. La funzione di filtraggio del fluido e la sua impostazione ad un valore fisso è assolta dal filtro-riduttore montato a bordo macchina. Una volta tarato il regolatore, non è possibile variare né modulare il valore di pressione durante il processo di saldatura. Negli esperimenti realizzati a suo tempo con questa macchina si è tarato ripetutamente tale componente al fine di realizzare prove a diverse pressioni, compromettendo probabilmente il suo corretto funzionamento. Il guasto non è stato accertato.

Non c'è la piena certezza che il braccio della saldatrice sia in grado di piegare il campione. La massima pressione che esso è in grado di fornire è di 10bar. Valore teoricamente appena sufficiente alla piegatura. Per mettere in movimento il braccio è necessario alimentare il circuito ad aria compressa e questo è possibile collegando alla macchina un compressore. Quello in dotazione al laboratorio non è in grado di fornire la massima pressione. I valori raggiunti nei test condotti dall'ingegnere Ezio Toffano con tale compressore risultano essere stati 5.5-8.5bar.

Inoltre l'iniziale mancanza del manuale del controllo di saldatura TE700 e le difficoltà nel suo reperimento non ha consentito di determinare la corrente minima fornibile. L'esperimento infatti richiede valori molto bassi (300A) rispetto a quelli che normalmente fornisce la saldatrice. Senza contare l'incertezza sul tipo di segnale che la macchina fosse in grado di erogare. Il rilievo della corrente di saldatura viene effettuato all'interno della macchina mediante una sonda Rogowski. Questo strumento consente però la misura diretta di sole correnti alternate. Probabilmente i costruttori hanno adottato questa soluzione (economica) affiancandola un algoritmo particolare riuscendo forse così ad ottenere una misura della corrente valida. Di certo la non reale costanza della corrente di saldatura mette in dubbio i valori che vengono impostati.

Tutto questo ha spinto, almeno in questa fase iniziale, a cambiare le modalità dell'esperimento rinunciando all'utilizzo della puntatrice.

Successivamente, grazie al suo reperimento, si è ritornati almeno allo studio preliminare della macchina. Ciò ha portato a dimostrare l'infattibilità della replica esatta degli esperimenti di Salandro presi come riferimento. Le tempistiche lente impiegate nei suoi test non sembrano essere riproducibili dal TE700. Con un controllo manuale di certo sì, ma non ci sarebbe più a disposizione il braccio per la piegatura. I tempi che il software di controllo della saldatrice mette a disposizione sono molto brevi. Non tanto quelli dell'impulso, ma quelli del periodo. La bibliografia sull'elettroplasticità infatti è ricca di esperimenti che hanno adottato impulsi molto brevi, inferiori al secondo, raggiungendo ottimi risultati. Ciò che frena in questi casi è l'effetto termico. Valori elevati di corrente ripetuti a distanza temporale ravvicinata provocano un riscaldamento non trascurabile. L'eccessivo aumento di

temperatura potrebbe vanificare i risultati degli esperimenti, non dimostrando a pieno la bassa influenza dell'effetto Joule sull'EPE.

Il suo utilizzo non è completamente da escludere. Facendo delle simulazioni termiche si possono cercare quali materiali sono idonei per tali configurazioni d'impulsi elettrici. Inoltre forse è possibile modificare il controllo TE700 al fine di allungare i tempi del periodo. Per questo sarebbe necessario contattare l'azienda costruttrice. L'ipotesi più remota e audace è quella di realizzare gli esperimenti raffreddando il provino in olio durante il trattamento elettro-meccanico.

3. Test di trazione

L'altro esperimento sull'elettroplasticità che si vuole ora cercare di realizzare riguarda lo stress per trazione. Come modello di riferimento sono state studiate alcune ricerche sull'EP applicata allo sforzo di trazione, in particolare gli esperimenti effettuati: da Janming Mai, Linfa Peng, Zhongqin Lin, Xinmin Lai nel 2010 presso la Shanghai Jiao Tong University (Cina)[5] e da XunLiu, ShuhuaiLan, JunNi nel 2013 presso la University of Michigan (USA)[6]. Entrambi gli esperimenti sono molto simili:

- per applicare la forza di trazione utilizzano una normale macchina per test di trazione;
- i provini sono a forma laminare, in acciaio e di dimensioni paragonabili (vedi Fig. 3.1);
- congruenti valori elettrici di densità di corrente J ;
- applicazione di convezione forzata in aria per cercare di mantenere il pezzo a temperatura ambiente (vedi Fig. 3.2).

Si farà riferimento maggiormente all'esperimento effettuato dall'Università del Michigan perché più completo d'informazioni e più recente. In quest'ultimo caso lo sforzo di tensione assiale è realizzato da una testatrice MTS810, mentre l'impulso elettrico è prodotto da una saldatrice Lincoln Electric Power Wave 455. Modificando il valore della corrente in uscita vario la densità di corrente interna al pezzo. C'è da tenere presente che la densità di corrente varierà durante la prova, in quanto la sezione del provino, man mano che la deformazione ha luogo, si riduce, provocando l'aumento di J . Quindi nell'esperimento con i diversi valori di densità di corrente s'intendono quelli imposti all'inizio del test, quando la deformazione non ha ancora avuto luogo. Comunque la variazione viene considerata accettabile poiché inferiore all'8%.

La configurazione adottata è visibile in Fig. 3.2 e si nota come gli elettrodi in rame siano stati inseriti all'interno delle presse idrauliche le quali garantiscono oltre che la presa del pezzo anche un migliore contatto elettrico tra elettrodi e provino. Per isolare la testatrice elettricamente sono stati messi degli strati di mica tra le presse e gli elettrodi. Al fine di mantenere l'attrito, per evitare lo scivolamento del pezzo durante la prova, sono stati creati dei solchi lungo le piastre di mica. Inoltre viene soffiata aria fredda sul pezzo al fine di ridurre il riscaldamento, almeno sulla superficie. La Fig. 3.1 riporta le dimensioni del provino utilizzato, congruente a quelli normalmente impiegati nelle prove di trazione. Il punto grigio al centro della figura indica il posizionamento del sensore di temperatura (termo coppia) sulla superficie del pezzo. Infatti prima di procedere con gli esperimenti gli autori dell'articolo hanno effettuato delle simulazioni, mediante programma COMSOL, per valutare il riscaldamento del campione. Hanno constatato che la temperatura massima nelle varie condizioni di lavoro non supererà i 62°C e che grazie al raffreddamento forzato il riscaldamento sarà piuttosto uniforme.

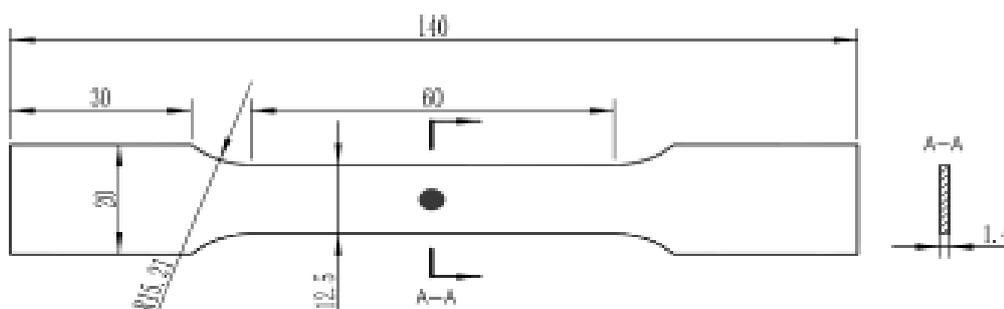


Fig. 3.1 Dimensioni del provino[6]

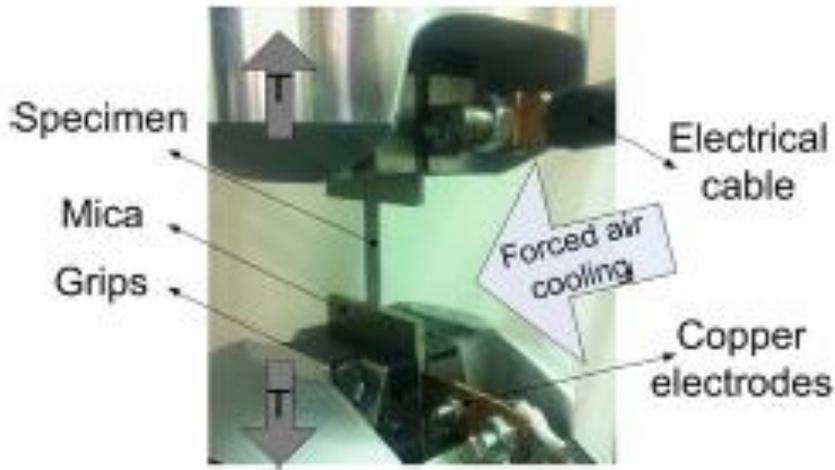


Fig. 3.2 Preparazione dell'esperimento[6]

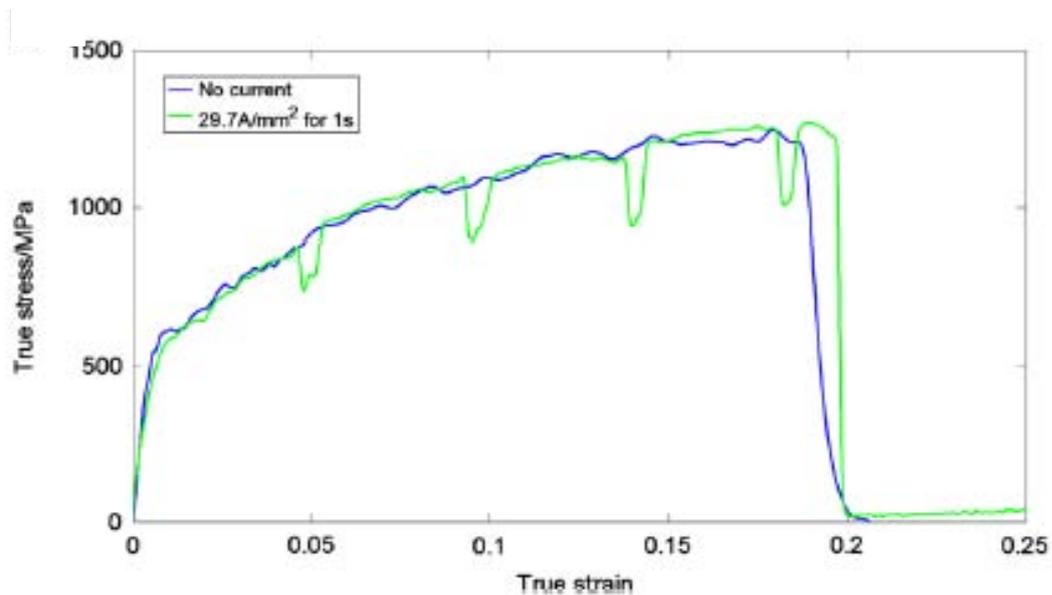


Fig. 3.3 Diagramma forza applicata-deformazione che mostra l'EPE con applicazione di 4 impulsi di durata 1s con densità di corrente di $30\text{A}/\text{mm}^2$ [6]

3.1 Dati dell'esperimento di riferimento

Xun Liu e la sua equipe hanno effettuato diverse prove, applicando al campione diversi valori di densità di corrente. Il valore massimo raggiunto è stato approssimativamente di $30\text{A}/\text{mm}^2$ con un tempo di durata dell'impulso pari a 1s. È con questa configurazione che si sono ottenuti i risultati migliori. Si vogliono citare due prove in particolare (evidenziati da due cornici nella Tabella 3.1).

- Le analisi hanno portato ad evidenziare che con densità di corrente pari a 15.3A/mm^2 e durata dell'impulso di 4s risultano applicati al pezzo durante la deformazione 4 impulsi. Questi hanno prodotto 4 riduzioni di sforzo da parte della macchina quantificabili approssimativamente in: 70MPa, 95MPa 115MPa e 90MPa.
- Applicando invece 29.7A/mm^2 per il tempo di 1s le riduzioni sono ben più maggiori: 120MPa, 205MPa, 285MPa e 265MPa. Risultano essere circa il doppio rispetto a prima (Fig. 3.3).

Osservando i risultati ottenuti dalla seconda prova (30A/mm^2) si vede come negli ultimi impulsi l'EPE sia maggiore, questo perché la deformazione del pezzo durante la prova si manifesta con la riduzione della sezione nel tratto centrale e ciò, visto che si alimenta a corrente costante, causa un aumentando la densità di corrente reale. Per entrambi i test sono riusciti ad avere all'incirca la stessa temperatura dimostrando quindi l'esistenza dell'EPE.

Si ritiene che dal punto di vista elettrico i test siano stati limitati dal tipo di alimentatore usato (una saldatrice). Probabilmente questa non consentiva regolazioni fini del duty cycle della corrente. Sarebbe molto interessante riprendere gli esperimenti da tale configurazione, procedendo poi con tempi d'impulso più brevi, da centinaia fino anche all'ordine delle decine di millisecondi. Riducendo tali tempi si potranno avere periodi inferiori rispetto a 10s in quanto l'effetto del riscaldamento sarà minore.

Tabella 3.1 Condizioni dell'esperimento[6]

Experimental conditions	1	2	3	4	5	6	7	8
Current density (A/mm^2)	0	7.4	11.4	15.3	15.3	22.2	25.7	29.7
Pulse duration (s)	0	4	4	4	1	1	1	1
Pulse period (s)	0	10	10	10	10	10	10	10
Highest temperature ($^{\circ}\text{C}$)	24	28	36	61	30	41	56	61

3.2 Analisi dell'esperimento

Si è effettuata una valutazione analitica come già fatto per la tipologia di test precedente al fine di determinare alcuni parametri ancora incogniti. Dopo uno studio del pezzo e della morsa della macchina si ipotizza l'applicazione della tensione all'estremità della zona a sezione ridotta considerando per semplicità che la corrente fluisca solo in tale settore. Si prende ad esempio per il momento lo stesso acciaio 304 adottato nel Capitolo precedente (vedi caratteristiche in Tabella 2.1).

Lunghezza tratto sezione ridotta $l = 65\text{mm}$

Spessore lamina $a = 1.5\text{mm}$

Larghezza lamina inferiore $b = 12\text{mm}$

Sezione ridotta $S = a \cdot b = (1.5 \cdot 12)\text{mm}^2 = 18\text{mm}^2$

Resistività elettrica $\rho = 0.72\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Densità di corrente $J = 30\text{A}/\text{mm}^2$

$$P = \frac{\rho l}{S} I^2 = \rho J^2 S = 0.72 \cdot 65 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 \cdot (1.5 \cdot 12) = 758\text{W} \quad (3.1)$$

$$I = \sqrt{\frac{PS}{\rho l}} = \sqrt{\frac{758 \cdot 18}{0.72 \cdot 65 \cdot 10^{-3}}} = 540\text{A} \quad (3.2)$$

$$V = \frac{P}{I} = \frac{758}{540} = 1.40\text{V} \quad (3.3)$$

Considerando anche le altre parti che vengono percorse dalla corrente, ovvero le zone di restrizione di sezione (approssimando la loro proiezione a dei trapezi) si ottengono i seguenti valori.

$$J = 30\text{A}/\text{mm}^2$$

$$l_{rest} = 5\text{mm}$$

$$S_{media} = \frac{(15 \cdot 1.5 + 12 \cdot 1.5)}{2} = 20.25\text{mm}^2 \quad (3.4)$$

$$P_{tot} = P + 2 \cdot \frac{\rho \cdot l_{rest}}{S_{media}} I^2 = 758 + 2 \cdot \frac{0.72 \cdot 0.005}{20.25} \cdot 540^2 = (758 + 104)\text{W} = 862\text{W} \quad (3.5)$$

$$V = \frac{P}{I} = \frac{862}{540} = 1.60\text{V} \quad (3.6)$$

Utile è fare qualche conto termico preliminare al fine di valutare il riscaldamento della lamina causato dal passaggio della corrente. Nonostante questa sia di tipo impulsivo, quindi di breve durata, si vedrà come generi comunque un aumento di temperatura non trascurabile. S'ipotizza un riscaldamento adiabatico.

Calore specifico $C = 0.5\text{J}/\text{g}^\circ\text{C} = 500\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$

Densità $\gamma = 8000 \text{ kg/m}^3$

Volume interessato (si considerano anche le zone di restrizione di sezione approssimando la loro proiezione a dei trapezi)

$$V = (0.065 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.012) + 2 \cdot \left[(0.012 + 0.015) \cdot \frac{5}{2} \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \right]$$

$$= (1.17 + 0.203) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 1.373 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (3.7)$$

$$C \cdot \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta = P \cdot \Delta t \quad (3.8)$$

$$500 \cdot 8000 \cdot 1.373 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta\theta = 1000 \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1000}{5.492} = 182^\circ \text{C/s} \quad (3.10)$$

3.3 Macchinario test di trazione

A differenza di quanto scelto nel primo test descritto nel precedente Capitolo non si può più adottare un unico macchinario. È necessario “assemblare” due macchine come hanno fatto gli autori delle esperienze prese come riferimento: uno per applicare le forze di deformazione al provino e uno per fornire la corrente impulsiva adeguata. Per quanto concerne la selezione del macchinario atto a creare le forze di stress sul pezzo si è verificata la disponibilità di attrezzatura del laboratorio d’Ingegneria Meccanica.

È stata scelta la MTS 322 Test Frame. Si tratta di una macchina per effettuare prove di trazione ed è impiegata dal gruppo di ricerca del laboratorio di Net-Shape Forming. Il modello in dotazione “Hydraulic wedge grips 647.10”, riportato in Fig. 3.5, è in grado di esercitare lungo l’asse verticale una forza statica di 120kN e una forza dinamica (di nostro interesse) di 100kN, non raggiungibili nella pratica, in quanto la cella di carico adoperata, di tipo piezoelettrico, ha come limite massimo di funzionamento 50kN. La pressione idraulica, necessaria al funzionamento del sistema di presa del campione e di trazione, viene fornita al circuito dall’alimentatrice “Hydraulic Grip Supplies 685” prodotta sempre dall’MTS.

Normalmente con tale macchinario vengono effettuate prove su due tipi di campioni: a forma laminare e a tondino. La professoressa Stefania Bruschi ha fornito le dimensioni del primo campione normalmente impiegato per le prove di trazione standard del DIMEG. Osservando in Fig. 3.4 il disegno tecnico quotato di questo si nota come sia molto simile al campione del test di riferimento. Si ritiene per il momento che il provino che utilizzeremo avrà tali dimensioni.

Nonostante il ridotto spessore del campione (1.5mm) si prevedono già difficoltà nella predisposizione dell’esperimento. L’apertura massima delle pinze in dotazione atte ad afferrare il provino si aggira intorno a 15mm. Il che induce a pensare all’impossibilità d’inserire al loro interno provino, elettrodi e piastre isolanti. Ma questo argomento verrà affrontato successivamente, durante l’analisi di configurazione del test.

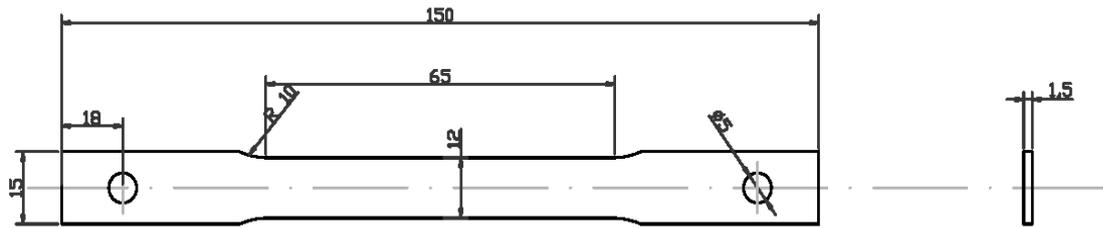


Fig. 3.4 Disegno tecnico quotato in mm del provino normalmente usato dal DIMEG



Fig. 3.5 MTS 322 Test Frame

3.4 Scelta e caratteristiche dell'alimentatrice elettrica

Esclusa la possibilità, almeno al momento, d'utilizzo della puntatrice precedentemente descritta, si è proceduto all'analisi delle possibili macchine adatte allo scopo. Le saldatrici sembrano essere le candidate migliori date la loro capacità di fornire elevate correnti, anche impulsive, per brevi periodi di tempo. Non ne sono però state trovate di altrettanto performanti all'interno dei nostri laboratori. Informandoci presso una ditta delle vicinanze abbiamo appreso che il costo di saldatrici in grado di soddisfare le nostre richieste in termini di prestazioni potessero costare intorno alle migliaia di euro.

Si è cercato di trovare quindi un'altra tipologia di alimentatrice possibilmente già in dotazione al nostro dipartimento: il generatore di corrente continua Powerel SM_06000_010 (vedi Fig. 3.6). Destinato principalmente all'industria galvanica, il raddrizzatore switching racchiude in sé le peculiarità di uno strumento tecnologicamente avanzato, preciso ed economico. Con esso è possibile configurare sistemi di raddrizzamento che vanno da 50A a 100000A e a tensioni da 0V a 100V. La corrente erogata, grazie a robusti filtri di uscita, permette di avere un ripple molto contenuto in tutte le condizioni di carico. Il generatore si compone di 6 moduli collegabili in parallelo che consentono d'avere in uscita una corrente massima di 6000A (ogni modulo eroga al massimo 1000A) e una potenza di 60kW.

I raddrizzatori switching prodotti dalla Powerel erogano corrente e tensione continua stabilizzata e regolabile nel range 0-100% del valore di fondo scala, ripple contenuti entro il 2% della massima erogazione di targa. Grazie alla tecnologia switching ad alta frequenza è possibile effettuare il controllo e la regolazione con due ordini di grandezza superiori rispetto ai tradizionali sistemi SCR. La reattanza interna di soppressione del ripple garantisce inoltre la completa ed intrinseca protezione contro i cortocircuiti accidentali ed anche permanenti che si possono verificare sul carico durante il normale funzionamento della macchina. Le uscite sono completamente isolate sia dal lato alimentazione che dal lato segnali permettendo qualsiasi tipologia di collegamento tra macchine diverse. Grazie alla connessione digitale è possibile collegare il pannello di controllo remoto anche a centinaia di metri di distanza, è possibile inoltre avere più unità di controllo della stessa macchina dislocate in posti diversi utilizzando un solo cavetto di connessione. Principalmente i raddrizzatori a corrente continua sono utilizzati nel settore galvanico, per lo sgrassaggio anodico e catodico, per l'elettro-deposizione, in particolari processi di depurazione e trattamento acque, per impianti di cataforesi e per altre applicazioni meno comuni.

La macchina è dotata del menù funzionale di base DE10 (gli altri disponibili sono il DE40, DE50 e DE60) utilizzato per il completo controllo del raddrizzatore. Questo consente fondamentalmente la marcia, l'arresto, la visualizzazione della corrente e della tensione. Mediante il pannello di controllo è quindi possibile fissare una corrente di uscita costante (inferiore ai 6000A) oppure un valore di tensione costante (non superiore a 10V). Se fosse così non ci sarebbe d'alcun aiuto nel realizzare l'esperimento di EP.

Leggendo attentamente il manuale del generatore[7], disponibile nel sito internet dell'azienda, si è appreso però la possibilità del funzionamento "modo pulsato". Questo viene visualizzato solo negli strumenti DE10 dotati di tale funzione. Si possono impostare alimentazioni con forma del segnale impulsivo settando il valore di corrente (o eventualmente tensione), l'intervallo di tempo in cui si ha tale valore (in ms) e il periodo totale del segnale. Si può anche settare un valore di corrente anche nel periodo di non conduzione.

Tabella 3.2 Caratteristiche specifiche del modello di generatore in dotazione[8]

CARATTERISTICHE ELETTRICHE								
Tensione max uscita	V DC	10	Corrente uscita	A DC	6000	Potenza max uscita	kW	60000
Alimentazione		400 VAC + T				Rendimento tipico	%	88%
Range regolazione potenza		2%-100%	Potenza max assorbita	VA	68182	Isolamento da rete	V RMS	3500
DIMENSIONI E PESI								
Larghezza	mm	540	Altezza	mm	680	Profondità	mm	1660
Peso	kg	354	Piatti rame uscita	mm	2X100 X 10			
ALTRE CARATTERISTICHE								
Controllo	IGBT	Controllo bordo macchina	DE10	Controllo PLC/PC	RS422-485(opz)			
Funzione inversione polarità	a richiesta	Numero moduli	6	Protezione corto circuito	X			
Verniciatura carpenterie	epoxy	Protezione sovratemperatura	X	Protezione sovratensioni	X			
Raffreddamento	aria forzata	Tropicalizzazione schede	X	Separazione elettronica/potenza	X			
Garanzia	24 mesi	Temperatura max. lavoro	C	40	Unidità max lavoro	%	80	
Erogazione corrente pulsata	inclusa	Range frequenza (pulsato)		a richiesta	Duty cycle (pulsato)		0 + 100 %	



Fig. 3.6 Foto fronte e retro del Generatore di corrente Powerel Serie SM 600

Tabella 3.3 Caratteristiche tecniche del generatore[10]

Alimentazione	Trifase 400 VAC senza neutro
Correnti erogate	50 ÷ 6000A
Tensioni Erogate	8 - 10 - 12 - 16 - 20 V
Rendimento Standard	82%
Rendimento massimo	88%
Range regolazione potenza	2 ÷ 100%
Ripple	<2%
Isolamento da rete	3500 V RMS
Interfaccia di connessione	Profinet, Profibus, RS485 ASCII, RS485 modbus RTU, RS232, CANOPEN, 0-10V, 0-20Ma
Max temperatura di esercizio	40° C
Massima umidità	85%
Protezioni e mantenimento	Sovratensione, Corto circuito, Mancanza fase,

	Sovratemperatura, Tropicalizzazione schede elettroniche, Protezioni e mantenimento verniciatura epossidica o zincatura parti in metallo, filtri aria
Raffreddamento	Aria forzata

Dopo alcune brevi prove di funzionamento ci si è accorti dell'assenza nel menù del modo pulsato. Inoltre interrogativi ruotavano attorno al tipo di segnale che realmente la macchina avrebbe fornito in questa modalità di funzionamento. Soprattutto alle rampe e tempi di risposta. La corrente da noi richiesta è di circa 540A (per ottenere $30A/mm^2$), bassa se paragonata ai valori di funzionamento normale del generatore.

Si è deciso d'interpellare l'azienda Powerel di Alte di Montecchio Maggiore (VI). La risposta è giunta dall'ing. Luca Gandolfi ha assicurato la possibilità di effettuare lavori in modo pulsato previa abilitazione sullo strumento. Ha consigliato inoltre la modifica del filtro attuale che non permette la corretta visualizzazione del valore medio. Inoltre per generare onde quadre con periodi del millisecondo bisogna ridurre/eliminare i filtri in uscita. Tali operazioni risultano molto economiche in quanto prevedono come unico costo la trasferta degli addetti (da Vicenza) e la manodopera di 3 ore (a circa 30€ l'ora). Si sono dimostrati molto disponibili garantendo tempi d'intervento di pochi giorni.

3.5 Analisi mediante programma FLUX

Si è creato un modello 3D del campione, sempre mediante programma FLUX, ancora una volta completamente parametrizzato in modo da rendere più agevole lo studio nelle fasi successive nel caso in cui si fosse optato per un pezzo di diverse dimensioni. Il modello della lamina è stato creato al fine di valutare il suo comportamento elettrico e termico nei domini ipotizzati come probabili configurazioni.

Si è iniziato studiando la configurazione a corrente costante, la quale non sarà ovviamente messa in pratica, ma ha consentito al sottoscritto di prendere confidenza col modello e col programma, in quanto di semplice realizzazione. Si sono verificati i parametri di corrente, tensione e potenza precedentemente calcolati per via analitica. L'analisi ha riguardato la densità di corrente più critica attuata dal gruppo di lavoro di Liu, $30A/mm^2$. Anche noi prenderemo per i nostri esperimenti tale valore come limite superiore.

Di maggiore concretezza risulta essere lo studio nel caso di "transient magnetic", simulando l'applicazione dell'impulso di corrente al campione. Si è impostato un impulso di 540A, sempre con l'obiettivo di ottenere al centro del pezzo una densità di corrente di $30A/mm^2$. La durata di applicazione della corrente è stata scelta di 1s, il valore più basso di applicazione nell'esperimento ma di maggiore interesse. Si sceglie questa come situazione critica, ovvero di maggior durata di alimentazione in quanto ci si prefigge l'obiettivo futuro di sostenere test con tempistiche inferiori, conformi alla maggioranza degli esperimenti che la bibliografia offre in merito. Non essendo ancora note a pieno le caratteristiche del segnale che la macchina saldatrice è in grado di fornire s'ipotizzano rampe di discesa e salita lineari, ognuna di durata pari a 0.7s. In Fig. 3.7 vengono riportati i valori di corrente, tensione e potenza risultanti dalla simulazione, graficati mediante programma FLUX, che confermano i calcoli analitici precedenti. Si evidenzia che fornendo durante l'impulso la corrente di 540A, si ha che la tensione agli elettrodi è circa 1.75V e la potenza assorbita la pezzo è circa 940W.

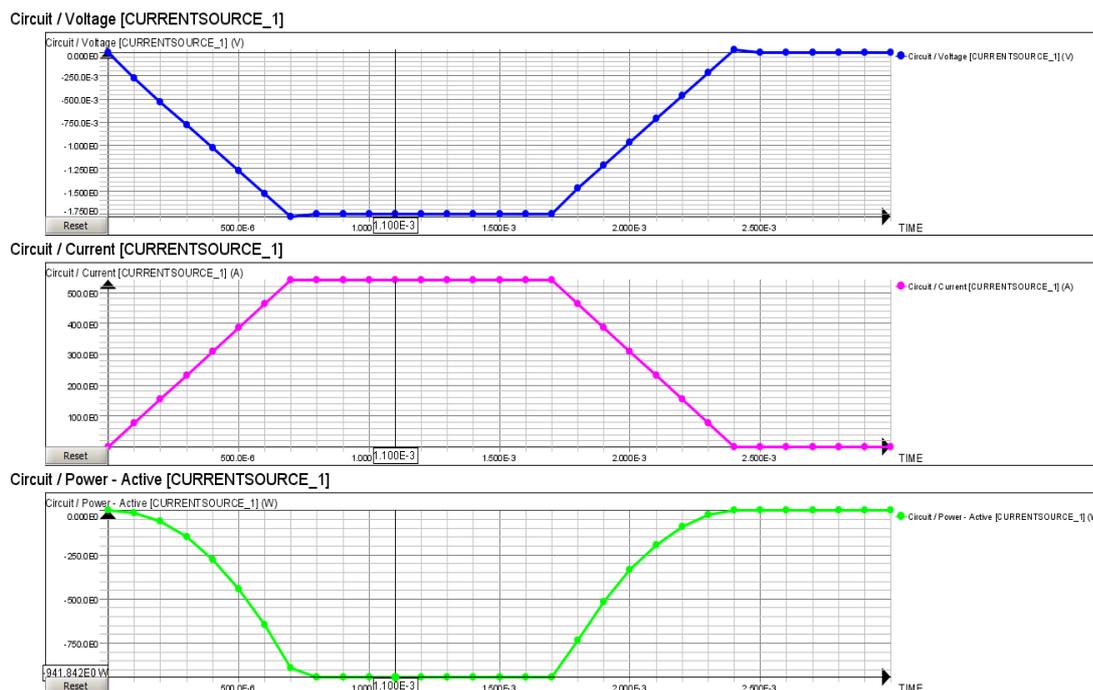


Fig. 3.7 Caratteristica della tensione, corrente e potenza in funzione del tempo



Fig. 3.8 Caratteristica della densità di corrente (A/m^2) nel baricentro in funzione del tempo

La simulazione effettuata ha messo in evidenza la distribuzione della densità di corrente nel campione, vedi Fig. 3.9. Essa si accentua dopo il restringimento, ai bordi laterali della lamina. In successione, viene evidenziato il valore della densità di corrente assunto all'interno della lamina (nel suo baricentro) durante l'impulso, confermando ciò che è già stato detto. La Fig. 3.8 mostra invece l'andamento della densità di corrente in un punto specifico del pezzo (nel baricentro) durante tutto l'arco della simulazione. Il massimo della densità di corrente si attesta sui $30A/mm^2$ confermando l'esattezza della scelta della corrente d'impulso di 540A.

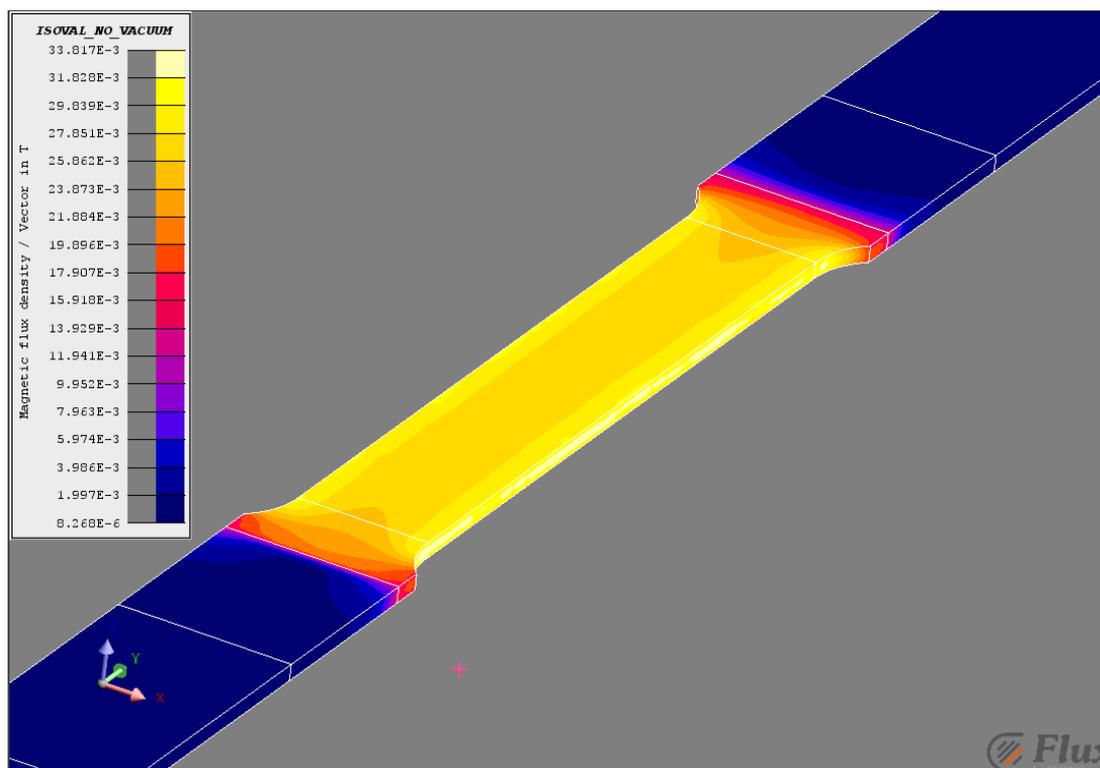


Fig. 3.9 Simulazione FLUX: distribuzione della densità di corrente (A/m^2) in transient magnetic della lamina con applicazione dell'impulso di 1s di 540A

Individuata e simulata la situazione più spinta che per il momento ci si prefigge d'attuare sotto il profilo elettrico, si procede con l'analisi termica. Anche il riscaldamento che il campione avrà sotto queste condizioni sarà il più critico. Prima di giungere a questa configurazione si vogliono esaminare altre situazioni meno gravose, ipotizzando durate dell'impulso di: 20ms, 200ms, 0.5s e 1s.

La Fig. 3.10, che si riferisce ai risultati della prima di queste, evidenzia lo scarso aumento di temperatura, appena qualche grado (rispetto alla temperatura ambiente ipotizzata di $20^{\circ}C$), nonostante l'ipotesi aria a convezione naturale (coefficiente di scambio termico pari a $10W/m^2K$).

I risultati della prova con "riscaldamento" per 200ms viene vengono mostrati in Fig. 3.11. Si vede che la temperatura come prima non costituisce un parametro influente restando nettamente sotto i $60^{\circ}C$.

Superiore è il riscaldamento del campione dopo il passaggio di 540A di corrente per mezzo secondo, vedi Fig. 3.12. Questa volta si è ipotizzato uno scambio termico con raffreddamento ad aria a convezione forzata, con coefficiente di scambio termico pari a $100W/m^2K$. La temperatura raggiunge il valore massimo di $105^{\circ}C$. Nell'esperimento di riferimento scartato il massimo valore di temperatura misurato si aggirava intorno i $115^{\circ}C$.

Con l'applicazione invece per un secondo della corrente, mantenendo l'ipotesi di convezione forzata, la temperatura supera in alcuni punti i $180^{\circ}C$. Ciò si discosta da quanto esposto nella relazione di riferimento, in cui le loro simulazioni sostengono, che sotto le condizioni di quest'ultimo caso, la temperatura massima del pezzo si aggiri sui $60^{\circ}C$, confermata anche dalle misure sperimentali verificabili nella Tabella 3.1. La spiegazione sta nel fatto che stiamo simulando un diverso tipo d'acciaio da quello adottato nell'esperimento di Liu. In quel caso hanno adottato un acciaio così detto AHSS (advanced high strength steel), invece fin'ora si sono fatte simulazioni con un acciaio 304 (304 Stainless Steel). Quest'ultimo risulta facilmente reperibile e di minor costo rispetto all'altro e inoltre è stato adottato oltre che nell'esperimento di piegatura di Salandro anche in uno simile a quello trattato nel Capitolo in questione ("Experimental study of electrical resistivity and flow stress of stainless steel 316L in electroplastic deformation" realizzato da J. Mai, L. Peng, Z. Lin, X. Lai)[5], scelto in un primo momento come esempio e poi scartato in quanto carente d'informazioni sotto il profilo elettrico.

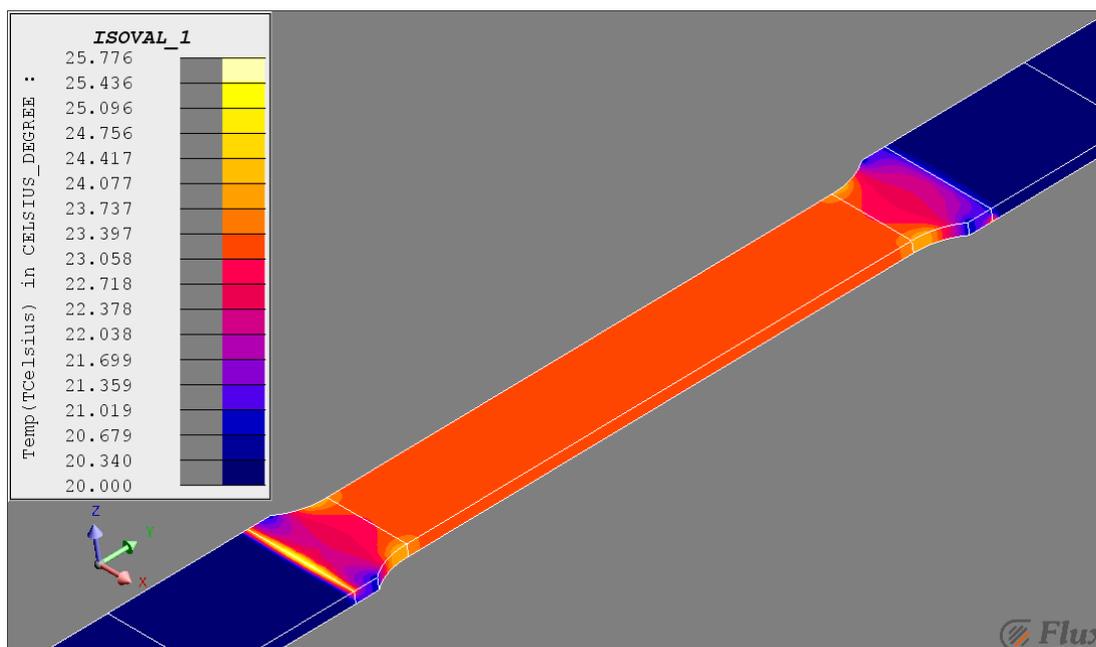


Fig. 3.10 Simulazione FLUX: distribuzione della temperatura (°C) in transient termic della lamina con applicazione dell'impulso di 20ms di 540A

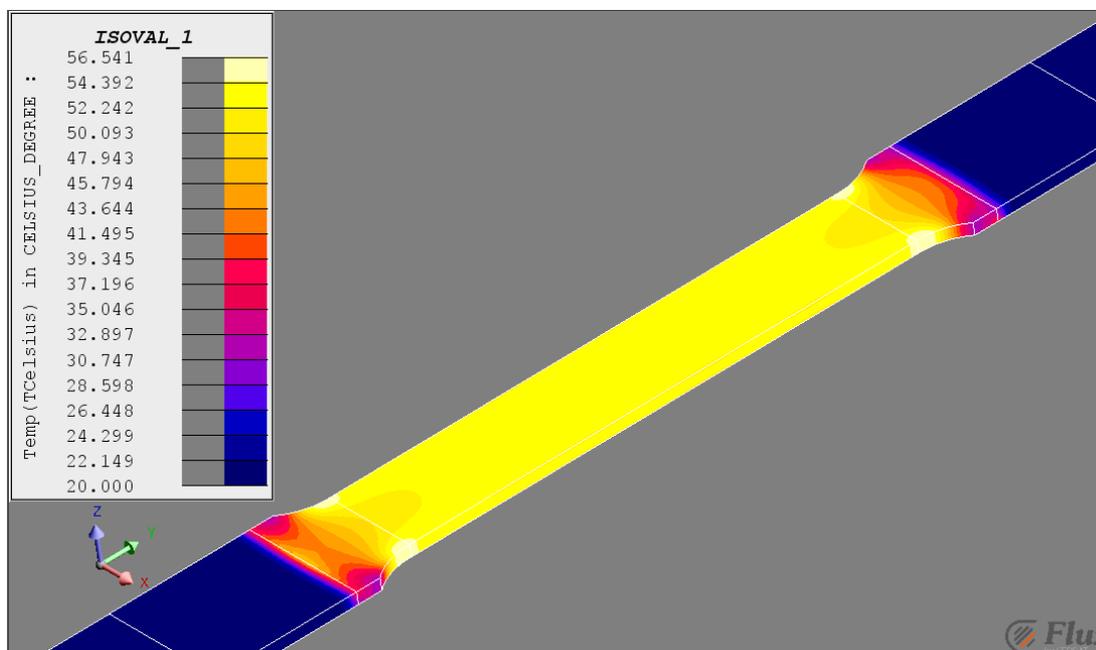


Fig. 3.11 Simulazione FLUX: distribuzione della temperatura (°C) in transient termic della lamina con applicazione dell'impulso di 200ms di 540A

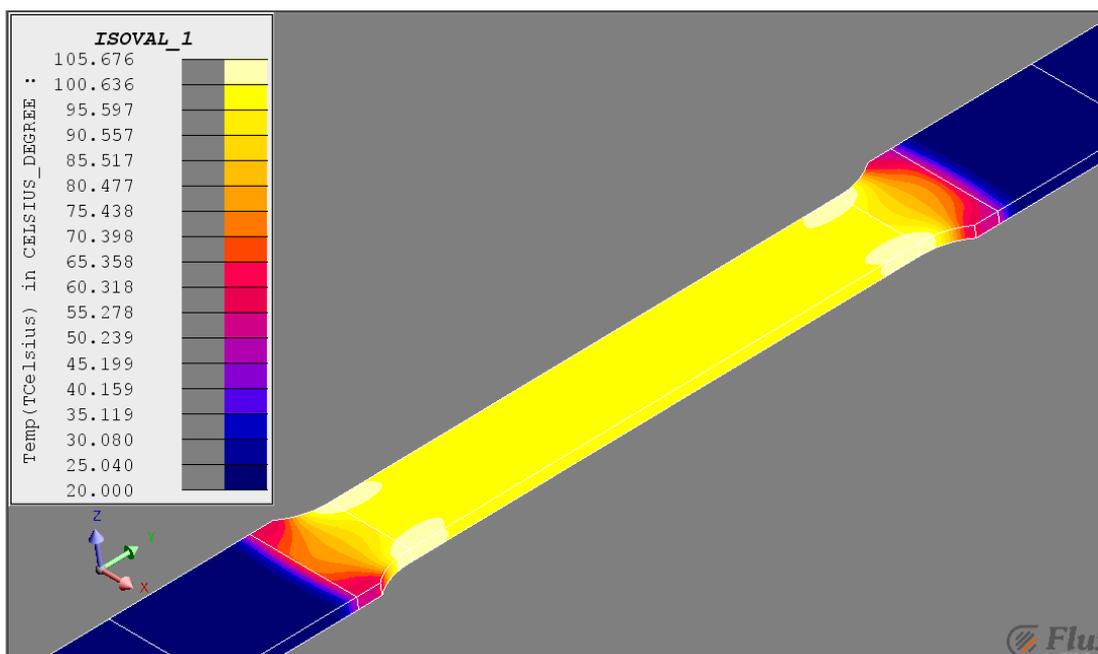


Fig. 3.12 Simulazione FLUX: distribuzione della temperatura (°C) in transient termic della lamina con applicazione dell'impulso di 500ms di 540A

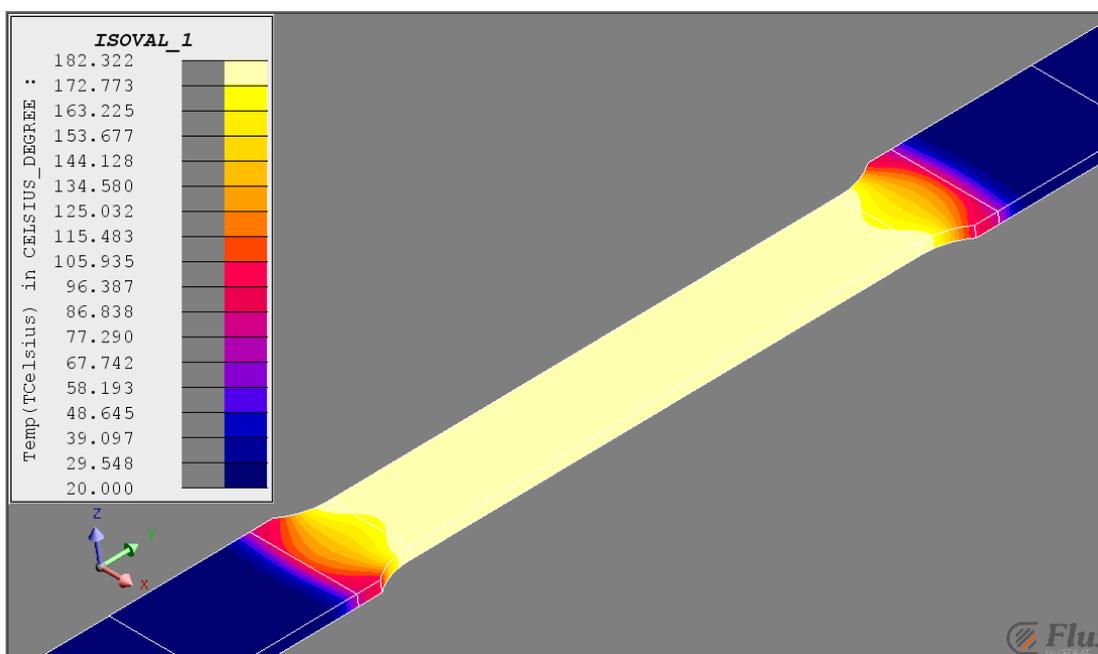


Fig. 3.13 Simulazione FLUX: distribuzione della temperatura (°C) in transient termic della lamina con applicazione dell'impulso di 1s di 540A

Le caratteristiche dell'acciaio adottato sono già state riportate in Tabella 2.1, mentre per l'altro acciaio si riportano ora alcune caratteristiche fisiche in Tabella 3.4. Da tali dati si può facilmente verificare la considerevole differenza di resistività:

$$\rho_{304} = 0.72 \cdot 10^{-6} \Omega mm^2 / m$$

$$\rho_{ASHH} = \frac{1}{\sigma_{ASHH}} = \frac{1}{5.36 \cdot 10^{-6}} = 0.1866 \cdot 10^{-6} \Omega mm^2 / m \quad (3.11)$$

Tabella 3.4 Caratteristiche fisiche peculiari dell'acciaio ASHH a 25°C

ACCIAIO ASHH			
Proprietà	Simbolo	Valore	Unità di misura
Densità	ρ	8027	kg/m ³
Conducibilità elettrica	σ	5.36 10 ⁶	S/m
Conducibilità termica	k	16.2	W/(mK)
Capacità termica a pressione costante	C _p	500	J/(kgK)

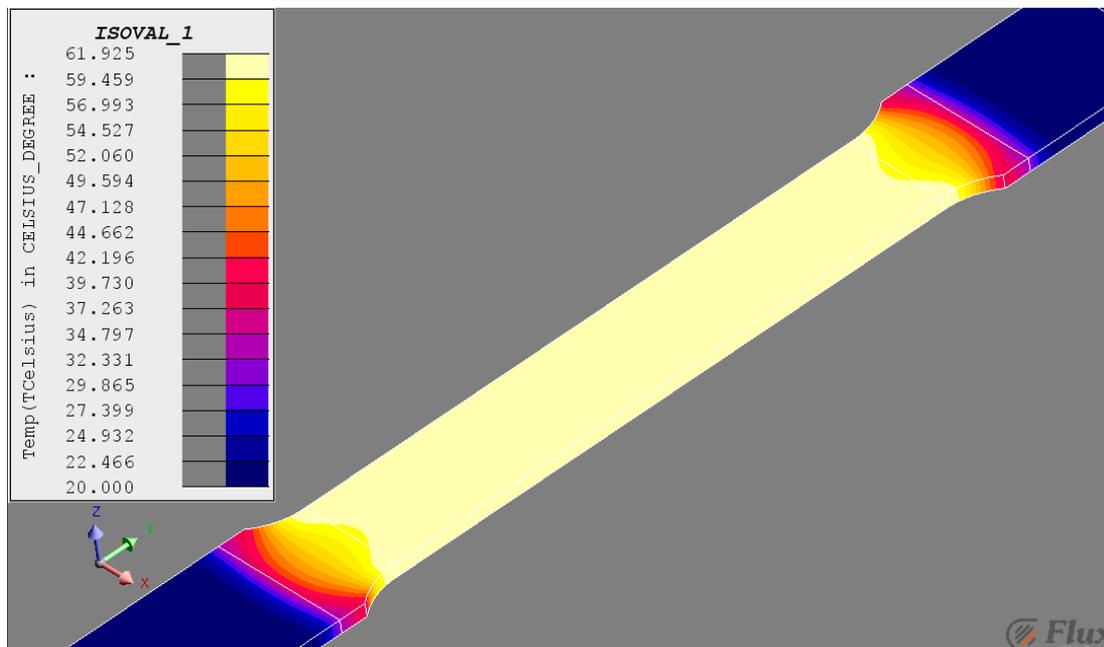


Fig. 3.14 Simulazione FLUX: distribuzione della temperatura (°C) in transient termic della lamina in acciaio ASHH con applicazione dell'impulso di 1s di 540A

Per controllare la veridicità dell'esperimento di riferimento si è deciso di simulare l'effetto termico di un impulso che determina la densità di corrente di 30A/mm^2 (sempre di 540A in quanto è variata la resistività ma non la sezione sostanzialmente) di durata un 1s . I risultati sono esposti in Fig. 3.14. Come previsto la temperatura non supera i 61°C .

Le simulazioni fatte precedentemente per valutare la temperatura massima che il campione può raggiungere durante le possibili prove non sono sufficienti. Va ricordato che il test consiste in una serie d'impulsi intervallati da periodi di riposo (elettrico non meccanico). Quindi è vero che in questi frangenti si verifica un raffreddamento del corpo, ma di quale entità? Probabilmente non abbastanza per tornare alla temperatura ambiente (20°C). Di conseguenza l'ondata di corrente successiva provocherà il raggiungimento di una temperatura massima superiore a quella dell'impulso precedente, e questo per tutti i periodi successivi fino alla fine della prova. Sono state effettuate perciò ulteriori simulazioni con FLUX, ipotizzando l'applicazione di quattro impulsi da 540A intervallati da 10s di pausa. In Fig. 3.18 è riportato l'andamento della temperatura nel baricentro del provino in funzione del tempo di prova ottenuto con impulsi di durata pari a 1s . Si vede che la temperatura massima raggiunta è di quasi 360°C .

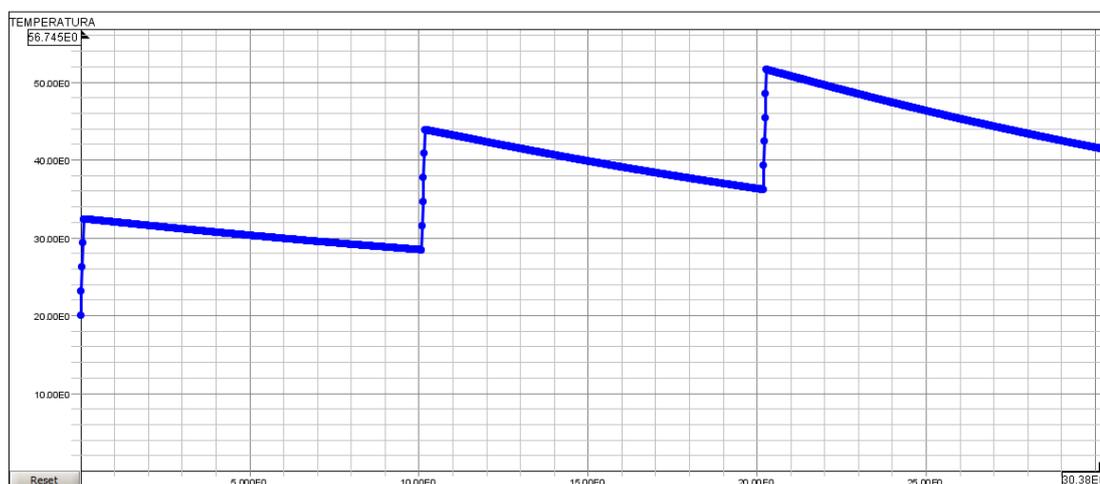


Fig. 3.15 Caratteristica della temperatura ($^\circ\text{C}$) al baricentro del provino in funzione del tempo, impulso 0.1s , intervallo 10s , corrente 540A

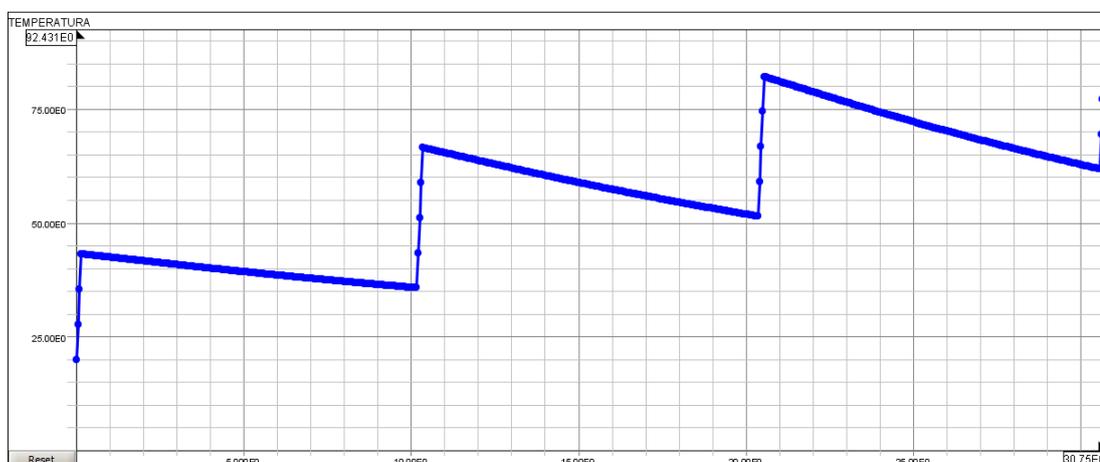


Fig. 3.16 Caratteristica della temperatura ($^\circ\text{C}$) al baricentro del provino in funzione del tempo, impulso 0.2s , intervallo 10s , corrente 540A

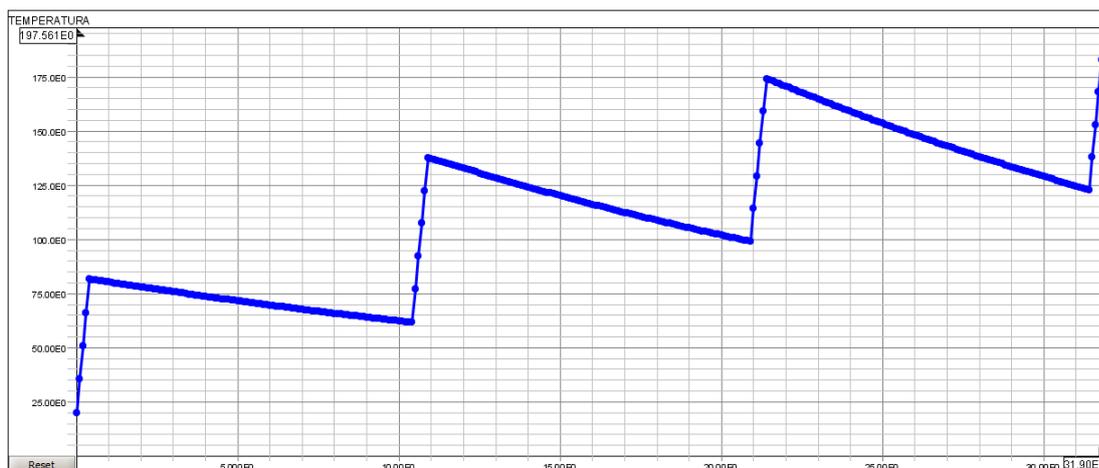


Fig. 3.17 Caratteristica della temperatura (°C) al baricentro del provino in funzione del tempo, impulso 0.5s, intervallo 10s, corrente 540A

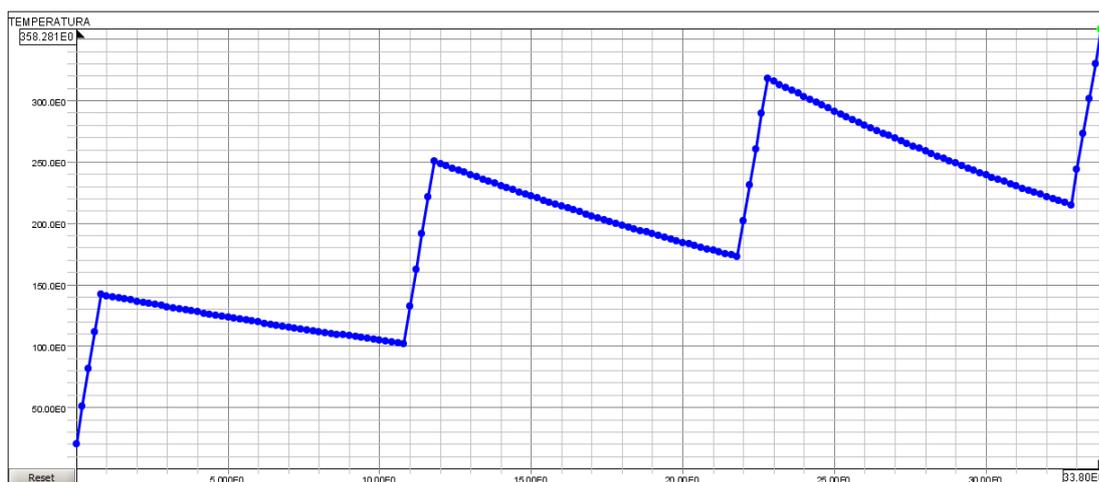


Fig. 3.18 Caratteristica della temperatura (°C) al baricentro del provino in funzione del tempo, impulso 1s, intervallo 10s, corrente 540A

Sono state fatte simulazioni dello stesso tipo anche per impulsi di durata inferiore al secondo: 0.5s, 0.2s e 0.1s. Le rispettive temperature massime calcolate sono state: 198°C, 93°C e 57°C (vedi Fig. 3.15, Fig. 3.16 e Fig. 3.17). Ciò mostra che tempi d'impulso sotto il mezzo secondo non provocano riscaldamento eccessivi del campione in esame.

Un'unica prova è stata fatta con tempo di riposo di 5s anziché 10s come in tutti quanti gli altri test. La simulazione ha riguardato come sempre quattro impulsi da 540A della durata di 0.1s. Il riscaldamento finale è stato inferiore ai 66°C. C'è d'aggiungere che per quest'ultimo caso sarebbe stato meglio effettuare una simulazione più prolungata nel tempo, ovvero con un numero d'impulsi doppio, in quanto si è dimezzato il tempo di d'intervallo.

Si precisa che tutte le analisi termiche condotte con FLUX avevano come ipotesi fondamentale lo scambio termico con raffreddamento ad aria a convezione forzata, con coefficiente di scambio termico pari a 100W/m²K. Il laboratorio di Net-Shape Forming ha in dotazione un dispositivo per creare la convezione ad aria forzata. Inoltre al disotto dei 400°C l'acciaio non ha aumenti significativi di plasticità a causa del calore.



Fig. 3.19 Caratteristica della temperatura (°C) al baricentro del provino in funzione del tempo, impulso 1s, intervallo 5s, corrente 540A

3.6 Configurazione del test

Osservando i setup del test di riferimento sopra citato, vedi Fig. 3.2, si nota che in entrambi la scelta sia stata quella d'inserire gli elettrodi all'interno della morsa della macchina di trazione. Facendo questo si è provveduto anche ad isolare elettricamente il macchinario onde evitare possibili danni ad esso, sensori e persone. Per la prova effettuata da Mai e il suo staff non è specificata nel dettaglio la configurazione adottata, le uniche informazioni le si possono dedurre dall'analisi delle foto messe a disposizione.



Fig. 3.20 Campione dell'isolante elettrico

L'altro esperimento, fornito di descrizione adeguata, spiega che per l'isolamento sono state adottate due lastre di mica. Guardando Fig. 3.2 s'intuisce che lo spessore risulta essere di diversi millimetri di spessore. L'utilizzo nei nostri laboratori della mica si limita all'adozione di fogli di spessori modesti, inferiori a 0.5mm, la quale inoltre, al tatto, risulta essere molto liscia e fragile. Si consiglia per tanto l'adozione di un materiale alternativo come isolante. Infatti, oltre al rischio della sua rottura, causato dalla pressione in gioco e dalle morse dentellate della MTS (per aumentare l'attrito), si teme lo scivolamento del pezzo.

Soluzione semplice ed efficace sembra subito essere l'utilizzo del legno. Per l'esattezza si prendono in considerazione delle tavolette in "legno compensato" imbevuto di resine isolanti (vedi Fig. 3.20) fornite dall'ingegnere Renato Gobbo, professore del dipartimento d'Ingegneria Industriale. Tale materiale viene adoperato solitamente ad esempio per distanziare gli avvolgimenti di trasformatori ad AT. Spessori di pochi millimetri sono quindi in grado di garantire l'isolamento anche con tensioni dell'ordine di migliaia di Volt. Ovviamente buone sono anche le sue proprietà d'isolante termico. Restano comunque due incognite: che tale materiale resista alla compressione delle morse, ovvero che mantenga le prestazioni descritte, e che il campione non scivoli durante la trazione. Per scongiurare questi dubbi sono stati fatti alcuni test di trazione preliminari. Coinvolgendo solo l'MTS si è provato a trascinare, assieme all'ingegnere Michele Novella, alcuni provini standard interponendo tra il campione e le morse i blocchetti di legno (adeguatamente tagliati e sagomati). Si è così constatato, per mezzo di un multimetro digitale, il corretto mantenimento delle proprietà d'isolante elettrico e, dall'elaborazione dei dati meccanici, il perfetto mantenimento del pezzo.

Il posizionamento degli elettrodi non può essere lo stesso effettuato nei test di riferimento, ovvero all'interno delle pinze per l'afferraggio. Lo spazio a disposizione tra le morse non è sufficiente perché trovino posto provino, due strati d'isolante e capicorda del cavo di alimentazione (elettrodo). Senza dover ricorrere all'acquisto di nuove prese meccaniche si consiglia l'inserimento tra le morse del provino e dei due strati di legno, posizionando gli elettrodi esternamente. Questi potrebbero essere allocati all'estremità della zona a sezione ridotta (12mm), magari imbullonandoli direttamente al campione. Sorge a questo punto il problema della mancanza di spazio longitudinale visto che la lunghezza della zona a sezione maggiore (15mm) del provino era calibrata per consentire il semplice afferraggio. È necessario quindi utilizzare un campione di dimensioni diverse rispetto alle solite applicazioni. Si suggerisce di realizzare la parte a sezione maggiore più lunga rispetto al normale, 5cm per lato dovrebbero essere sufficienti a garantire la presa salda del pezzo e il posto per gli elettrodi, senza compromettere i risultati del test meccanico. In Fig. 3.21 si possono notare le dimensioni del campione modificato.

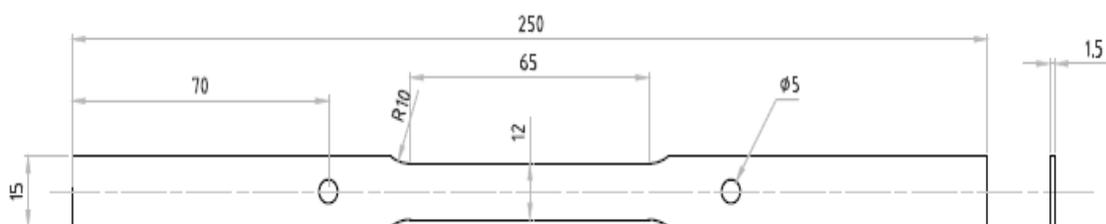


Fig. 3.21 Disegno tecnico quotato in mm del provino da adottare

Non inserendo gli elettrodi all'interno delle morse il collegamento non sarà ottimale. Difatti quando si parla di contatti elettrici si sa che maggiore è la pressione di contatto e minore è la resistenza equivalente della connessione. Si rende necessario l'impiego di viti e bulloni per garantire il collegamento elettrico. Per questo nel taglio va specificata anche la realizzazione di due fori per il passaggio delle viti. Si tiene a precisare che fori nel provino non modificato non avevano alcuna importanza se utilizzati nell'MTS (servivano se i test avevano luogo su di un'altra macchina per il loro corretto posizionamento). Sarebbe bene che i fori fossero i più larghi possibile in modo da inserire una vite consona. La dimensione è però vincolata dai limiti meccanici, il provino sottoposto a trazione potrebbe non fornire risultati adeguati, spezzandosi all'altezza dei fori se questi risultassero troppo larghi. Si decide la realizzazione di essi col diametro di 5mm e ci si adatterà dal punto di vista elettrico per garantire la migliore connessione possibile dei capicorda al campione. Sarebbe stato utile

che i campioni avessero la zona larga 15mm ancora più larga per semplificare la connessione, ma questo porterebbe ad uno spreco eccessivo di materiale, in quanto i campioni verranno ricavati da un'unica grande lamiera d'acciaio. S'intende iniziare da tale metallo in quanto più economico del Titanio (il costo di una lamiera di 1m² si aggira sui 1000€).

3.7 Situazione attuale

Il generatore serie SM6 fortunatamente era già presente all'interno dello stesso laboratorio in cui giace la macchina MTS per prove di trazione. Lo spostamento del generatore, del peso di 350kg, non risulta semplice in quanto sprovvisto di un'adeguata strutta per il trasporto. L'ingegnere Stefano Girardi, tecnico di riferimento del laboratorio di Net-Shape Forming, ha provato a studiare alcune soluzioni al problema, come la creazione ad hoc di una struttura per il sollevamento. Si è provato anche ad affidare tale compito all'azienda Powerel, produttrice del generatore di corrente continua. A loro è stato richiesta una configurazione che preveda l'adozione di ruote con dispositivo di bloccaggio. Questa soluzione non completamente condivisa potrebbe lasciar spazio all'idea dell'ing. Stefano Girardi. Nelle vicinanze ci si è assicurati la presenza dell'alimentazione richiesta dal generatore: 400Vac senza neutro.

L'ingegnere Stefano Girardi ha sollevato anche la questione di avere a disposizione un sistema d'interruzione dell'alimentazione della macchina più intuitivo al fine di aumentare la sicurezza, suggerendo di far installare un interruttore tipo "fungo" (o teleruttore), che questo sia permanentemente fissato al generatore (non esterno) e che fosse disponibile da entrambi i lati (due teleruttori). La Powerel ha fatto sapere che non vi è spazio sufficiente per posizionare il teleruttore all'interno della macchina, si ritiene comunque che un unico dispositivo di sicurezza esterno sia più che adeguato.

Come già accennato, l'azienda Powerel è già stata contattata più volte. Hanno confermato che per disporre della modalità pulsata è sufficiente che l'attivino riprogrammando il software di controllo. Con questo tipo funzione è possibile generare impulsi con periodi compresi tra 1s e 16s, e durate d'impulso non inferiori al secondo. Con tali valori però si è visto che si hanno problemi di elevato riscaldamento. Alla richiesta di ottenere impulsi di durata minore la Powerel ha proposto di rivedere i filtri in uscita della macchina. Questa modifica consentirà di raggiungere valori minimi da 1ms a 3ms, anche se, non avendolo mai fatto da loro prima d'ora su una macchina a 6 moduli, sarà necessario verificare come reagirà il nuovo filtro e il controllo mediante analisi con oscilloscopio. Ci hanno avvertito che il controllo permette l'impostazione della durata dell'impulso anche di qualche millisecondo senza modificare i filtri, ma essendo la costante RC troppo alta non c'è il tempo di caricare e scaricare la capacità del filtro. Il filtro non verrà sostituito, ma soltanto modificato, non gravando così sul costo dell'operazione.

Se si considera l'attivazione del modo pulsato e la modifica del filtro, unici interventi ad essere veramente necessari secondo il sottoscritto, è da considerarsi solo il costo della trasferta da Vicenza fino a Padova e della manodopera, quantificabile in 30€ l'ora. Tenendo conto che il lavoro comprenderà solo poche ore il costo dell'operazione risulterà irrisorio.

È stato inviato l'ordine del taglio dei provini ad una ditta esterna all'Università che realizza tagli al laser. I campioni avranno le dimensioni del provino di Fig. 3.21. In prima battuta saranno in acciaio 304, il metallo usato nelle simulazioni, poi si procederà con lo studio del titanio.

Con la conclusione di questo elaborato cessa anche il mio contributo al progetto. Proseguirà il lavoro da me avviato la dottoranda russa Elizabeta (Lisa) Beridze giunta apposta dall'Università di Novosibirsk (Novosibirsk State University, Siberia, Russia) per effettuare nei successivi mesi esperimenti e studi sul fenomeno dell'elettroplasticità. Ad essa è stata illustrata dal sottoscritto la situazione e le è stato fornito tutto il materiale necessario.

3.8 Primi test suggeriti

Come prima è stato accennato risulta interessante sfruttare a pieno le maggiori capacità della nostra macchina alimentatrice rispetto a quella impiegata nella relazione di riferimento. Si è visto infatti che con tempi di passaggio della corrente di alcuni secondi (4s) ci sono dei miglioramenti nella plasticità del pezzo ma non significativi quanto per il valore di 1s, il quale risulta essere il valore limite inferiore dei test fatti. Molti trattati sull'EP mostrano ottimi risultati anche per tempi nell'ordine delle decine di millisecondi.

Trattandosi però dei primissimi test che il nostro dipartimento si appresta a condurre su tale argomento è consigliabile iniziare gradualmente, non conoscendo ancora le reazioni del campione, del generatore e degli altri macchinari. Conviene procedere in prima battuta con una scelta della densità di corrente più idonea: 10, 20 o 30A/mm². Da quel che si è visto dovrebbe essere quella di valore maggiore, ma è bene accertarsene sul campo.

Individuata la corrente che porta alla maggior riduzione di flow stress ci si può inoltrare nell'analisi delle tempistiche, provando diverse durate d'impulso elettrico: 0.05s, 0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.4s e 0.5s; e differenti durate d'intervallo: 10s e 5s; monitorando come sempre il riscaldamento del campione. Infatti man mano che i tempi d'impulso aumentano, crescerà anche la temperatura raggiunta dal pezzo, rischiando di compromettere la concretezza dei risultati. Si consigliano per tanto le configurazioni di Tabella 3.5 per prendere confidenza con le macchine e le dinamiche della prova. Ovviamente in base alle reazioni che si risconteranno in fase di lavoro questi valori potranno essere corretti al momento.

Tabella 3.5 Configurazioni consigliate per i primi test

Densità di corrente	Corrente da impostare	Durata impulso	Durata periodo	Notazioni
[A/mm ²]	[A]	[s]	[s]	
10	180	0.1	10	Non dovrebbero esserci problemi d'influenza del riscaldamento
20	360	0.1	10	
30	540	0.1	10	
Corrente che fornirà i risultati migliore riduzione di flow stress nei test precedenti (3 campionature per ogni prova)		0.05	10	
		0.05	5	
		0.1	5	
		0.2	10	
		0.2	5	
		0.3	10	
		0.3	5	
		0.4	10	Da valutare il riscaldamento del provino
		0.5	10	

Dopo riunioni preliminari si è delineata l'idea di far tagliare una lamiera d'acciaio in modo da ottenere un numero uguale di campioni con direzione di laminazione longitudinale, trasversale e a 45°. Dall'analisi della bibliografia la maggior riduzione di flow stress dovrebbe riscontrarsi nei provini aventi la direzione di laminazione parallela alle forze applicate.

È stato deciso inoltre di adottare fattore di ripetitività pari a 3, ovvero ogni prova sarà ripetuta 3 volte con le stesse specifiche, al fine di essere in grado di individuare i risultati coerenti. Se fosse solo 2 e i due test producessero risultati discordanti non si sarebbe in grado d'individuare quello errato, 5 porterebbe ad uno spreco di denaro e di tempo soprattutto. In base a questa ipotesi, ai tipi di campioni, e alle configurazioni da eseguire si prevedono necessari come minimo 108 provini.

Conclusioni

A fronte del lavoro condotto, lo studio dell'effetto dell'elettroplasticità diviene ora una concreta possibilità per il nostro Dipartimento. Con la realizzazione di questo elaborato si sono poste le basi per procedere con i primi test di trazione, i quali quasi certamente si intraprenderanno nell'Autunno 2013. Giunto alla stesura finale della tesi, per la messa in pratica di prove di trazione non resta che:

- dare il via libera all'azienda Powerel per la modifica del controllo del generatore, l'inserimento sistema di sicurezza e la creazione struttura per il trasporto;
- spostare il generatore nelle vicinanze della MTS;
- attendere il taglio laser dei provini in acciaio 304 e successivamente di quelli in titanio.

Al termine del Capitolo 3 si propone una serie di valori per effettuare le prime prove al fine di prendere confidenza con le attrezzature ed i loro limiti.

Per quanto riguarda gli esperimenti di piegatura, al momento non è possibile procedere con i test. Lo studio condotto ha comunque dimostrato la fattibilità teorica della realizzazione di un sistema. Si consiglia quindi, al fine d'intraprendere analisi d'EPB:

- la verifica del danno al filtro-riduttore del sistema di distribuzione d'aria compressa, per procedere poi alla riparazione o sostituzione con un nuovo elemento;
- mettere in funzione la macchina per verificarne le prestazioni, con tentativo di misura della corrente realmente erogata dalla macchina, soprattutto in vista del fatto che ci si troverà a lavorare nelle vicinanze del suo limite inferiore.
- realizzando simulazioni del riscaldamento del provino, in base ai tempi di erogazione di corrente della saldatrice, determinare i possibili materiali da adottare per i provini al fine che non si raggiungano temperature elevate;
- interpellare la ditta produttrice del controllo TE700 per la possibile modifica di esso in modo da ottenere periodi del segnale d'impulso più lunghi (almeno 5-10s);
- la misura accurata delle tempistiche di accostaggio e piegatura del pezzo, ovvero velocità d'avanzamento del braccio, con lo scopo di calcolare successivamente i tempi da impostare nel controllore TE700;
- la realizzazione di un piano di lavoro e di un incisore, simile a quello proposto nel Capitolo 2;
- ipotizzare d'effettuare l'esperimento col campione immerso in olio di raffreddamento.

Una volta che si saranno intrapresi i primi esperimenti, si consiglia come obiettivi futuri di passare allo studio del Titanio e delle sue leghe. Come già esposto, le criticità nella formabilità che tale materiale ha rendono molto interessanti soluzioni alternative all'uso di processi a calore. Ancor più rilevanti, e anche audaci, sarebbero studi sullo stampaggio del Titanio coadiuvato da corrente impulsiva.

Ringraziamenti

Al relatore prof. ing. Michele Forzan

Al tecnico di laboratorio ing. Marco Bullo

Al prof. ing. Renato Gobbo

Alla prof.ssa ing. Stefania Bruschi

Alla prof.ssa ing. Irene Calliari

Al dottorando attivo nel laboratorio di Net-Shape Forming ing. Michele Novella

All'ing. Ezio Toffano

All'ing. Luca Gandolfi e all'ing. Mirco Rancan della Powerel s.r.l.

Al tecnico di laboratorio di Net-Shape Forming ing. Stefano Girardi

Bibliografia

- [1] H. Conrad, “Electroplasticity in metals and ceramics”, Materials Science and Engineering Department, Campus Box 7907, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695- 7907, USA, *Materials Science and Engineering A*, pag 276–287, 2000
- [2] H. Conrad, “Some effects of an electric field on the plastic deformation of metals and ceramics”, *Springer-Verlag*, Mat Res Innovat 2: pag 1–8, Marzo 1998
- [3] L. Guan, G. Tang, P. K. Chu “Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals”, *Journal of Materials Research*, Vol. 25, N° 7, Luglio 2010
- [4] W. A. Salandro, C. Bunget, L. Mears, “Electroplastic modeling of bending stainless steel sheet metal using energy methods”, Clemson University - International Center for Automotive Research, Automotive Engineering, Greenville, SC 29607, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133 / 041008-1, Agosto 2011
- [5] J. Mai, L. Peng, Z. Lin, X. Lai, “Experimental study of electrical resistivity and flow stress of stainless steel 316L in electroplastic deformation”, State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China, *Materials Science and Engineering A*, pag 3539–3544, journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea, 26 Gennaio 2011
- [6] X. Liu, S. Lan, J. Ni, “Experimental study of Electro-Plastic Effect on Advanced High Strength Steels”, S.M. Wu Manufacturing Research Center, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA, *Materials Science & Engineering A*, pag 211–218, journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea, 21 Aprile 2013
- [7] Powerel s.r.l. current rectifiers, “Manuale uso e manutenzione, raddrizzatori: RF, RP,SM, RR, RH e strumenti: DE10, DE40, DE50, DE60”, revisione Gennaio 2012, www.powerel.it
- [8] Poewerel s.r.l. powerelectronic, “Scheda tecnica SM_06000_010 raddrizzatore di corrente switching”, www.powerel.it
- [9] TECNA® S.p.a., “Controllo di saldatura TE700 dalla versione software n° 1.13”, MAN 4146, Aprile 2010, www.tecna.net
- [10] “Caratteristiche tecniche serie SM”, www.powerel.it/IT/serieSM.php
- [11] G. Tanga^a, J. Zhanga^a, Y. Yana^a, H. Zhoua^a, W. Fang^b, “The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire”, a - Electron Microscopy Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, PR China, b - The Metallurgical Research Institute of Capital Iron and Steel Co., Beijing 100083, PR China, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 137 pag 96–99, journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea, 2003
- [12] G. Tang^a, J. Zhang^a, M. Zheng^a, J. Zhang^a, W. Fang^b, Q. Li^b, “Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L”, a - Department of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, People ’s Republic of China, b - The Metallurgical Research Institute of Capital Iron and Steel Co., Beijing 100085, People ’s Republic of China, *Materials Science and Engineering*, A281, pag 263–267, journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea, 2000, ricevuto 16 Novembre 1998; ricevuto in rivista dal 7 Ottobre 1999
- [13] L. Guan^a, G. Tanga^b, Paul K. Chub^c, “Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals”, a - Advanced Materials Institute, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China, and Department of Physics and

Materials Science, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China, b - Advanced Materials Institute, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China, c - Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China, *Materials Research Society*, Vol. 25, n° 7, Luglio 2010, ricevuto 17 Novembre 2009; accettato 1 Marzo 2010

- [14] H. Conrad, A. F. Sprecher, "Dislocations in Solids", ch. 43, ed. F. R. N. Nabarro, New York: *Elsevier Science*, 1989, pag. 497
- [15] MTS Systems Corporation, "MTS Series 647 Hydraulic Wedge Grips Product Information Axial Grips / Axial-Torsional Grips / All Temperature Grips", Eden Prairie Minnesota USA, 2000
- [16] MTS Systems Corporation, "MTS Series 685 Hydraulic Grip Supply Product Information Model 685.10 / 685.22 / 685.60", Eden Prairie Minnesota USA, 2000