

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Comportamento meccanico dei materiali

PROVE SPERIMENTALI SU COMPONENTI DI
CONDENSATORI E MESSA A PUNTO DI UNA NUOVA
CELLA DI CARICO

CANDIDATO
Filippo Maria Casadio

RELATORE
Prof. Giorgio Olmi
CORRELATORI
Prof. Massimiliano De Agostinis
Prof. Dario Croccolo
Ing. Paolo Proli

Anno accademico 2013/2014

Sessione II

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Stato dell'arte	1
1.1.1	Saldatura per resistenza elettrica a punti	3
1.1.2	Brasatura	10
1.2	Motivazioni	16
2	Obiettivo della tesi	17
3	Prima campagna di prove: parte sperimentale	18
3.1	Materiali e metodi	18
3.1.1	Provini	18
3.1.2	Progetto dell'esperimento	19
3.1.3	Progetto della cella di carico	21
3.1.4	Strumentazione della cella di carico	24
3.1.5	Taratura della cella di carico	26
3.2	Procedura sperimentale	31
3.3	Elaborazione dati	33
4	Prima campagna di prove: risultati e discussione	34
4.1	Provini S1 e S2	35
4.2	Provini S3 e S4	36
4.3	Provini S5 e S6	37
4.4	Provini S7 e S8	38
4.5	Provini S9 e S10	39
4.6	Considerazioni finali	40
5	Seconda campagna di prove: parte sperimentale	42
5.1	Materiali e metodi	42

5.1.1	Provini	42
5.1.2	Progetto dell'esperimento	43
5.2	Procedura sperimentale	45
5.3	Elaborazione dati	46
6	Seconda campagna di prove: risultati e discussione	48
6.1	Provino 1	48
6.2	Provino 2	48
6.3	Provino 3	49
6.4	Provino 4	50
6.5	Provino 5	50
6.6	Provino 6	51
6.7	Provino 7	51
6.8	Provino 8	52
6.9	Provino 9	52
6.10	Provino 10	53
6.11	Considerazioni finali	53
7	Conclusioni	62
	Bibliografia	64

Capitolo 1

Introduzione

Per essere competitivi in un mercato così dinamico è necessario sviluppare prodotti nel minor tempo possibile, creando un progetto solido e del quale sono noti fin da subito i livelli di affidabilità ottenibili. In questo modo si hanno sotto controllo, dall'inizio, la gran parte dei fenomeni che provocano la rottura del componente.

Spesso per ottenere i risultati richiesti è necessaria la collaborazione tra settori quali l'ingegneria meccanica e quella elettronica.

Ad esempio, nella realizzazione di collegamenti elettronici è richiesta nella gran parte dei casi una bassa resistenza elettrica in modo da limitare il più possibile la dissipazione di energia. Inoltre in alcune applicazioni è necessario che il collegamento abbia rilevanti proprietà meccaniche tenendo conto che la scelta di quest'ultimo possa influenzare le caratteristiche elettriche.

1.1 Stato dell'arte

Per realizzare collegamenti elettrici che garantiscano una rilevante resistenza meccanica spesso si ricorre alla saldatura nella sua definizione più generale.

La saldatura è un processo di giunzione volto a vincolare permanentemente particolari strutturali solidi creando una continuità nel materiale stesso . A differenza quindi di altri metodi di giunzione, quali ad esempio l'imbullonatura, la chiodatura, la rivettatura, che consentono di trasmettere sollecitazioni da un membro all'altro tramite azioni superficiali di attrito o per interferenza di profili , la saldatura, creando una continuità a livello molecolare nei materiali interessati, presenta alcuni aspetti critici a causa dei quali occorre prestare estrema attenzione durante la progettazione dei giunti:

- Un'eventuale frattura si può propagare da un membro all'altro della struttura saldata e raggiungere quindi anche gli elementi principali.
- Si può avere uno scadimento della resistenza a fatica.

- Risulta difficile prevedere un facile disassemblaggio.

Restano comunque numerosi vantaggi che rendono tutt'oggi la saldatura un processo estremamente interessante:

- Il collegamento tra pezzi saldati risulta particolarmente rigido.
- La continuità del materiale non ostacola la conducibilità termica e/o elettrica intrinseca dei pezzi coinvolti.
- Il grande numero di varianti del processo lo rende applicabile a numerose situazioni di interesse industriale.
- L'assenza di elementi di giunzione svincolati dai pezzi (viti, chiodi, rivetti) rende non necessaria una periodica ispezione e manutenzione della struttura.

In generale un processo di saldatura vede coinvolti uno o più tipi di materiali che possono avere sostanzialmente due ruoli ben definiti:

- Materiale base: compone i particolari da vincolare tramite saldatura.
- Materiale d'apporto: viene aggiunto dall'esterno in varie forme (fili, bacchette, anelli, placchette), in modo continuo o intermittente, durante il processo.

Il materiale base può essere uguale per tutti i membri interessati dal giunto specifico, ma può essere anche differente da un membro all'altro: in questo caso si parla sempre di *saldatura dissimile*. Il materiale d'apporto ha solitamente una composizione molto simile a quella dei pezzi saldati, ma non necessariamente in quanto, agendo in modo opportuno con gli elementi che lo compongono, si possono ottenere giunti con caratteristiche mirate.

L'universo dei processi saldati può essere diviso in tre grandi famiglie:

- Saldature autogene: sono caratterizzate dal fatto che il materiale base raggiunge sempre la temperatura di fusione. Questa famiglia è ulteriormente divisa in due sottogruppi:
 - Saldature autogene per fusione: la fusione del materiale e a creazione del giunto sono frutto dell'apporto termico derivante da una sorgente di calore esterna.
 - Saldature autogene per pressione: la fusione del materiale e la creazione del giunto sono frutto della concomitanza di un apporto termico derivante da una sorgente di calore esterna e dall'applicazione

di una pressione tra i membri che concorrono alla formazione del giunto.

Nelle saldature autogene la presenza di materiale d'apporto non è tassativa: esistono processi classificabili in questa famiglia che non ne fanno uso e altri invece che se ne avvalgono.

- Saldature eterogene: sono caratterizzate dal fatto che il materiale base non raggiunge mai la temperatura di fusione e quindi la presenza di materiale d'apporto basso-fondente è obbligatoria per assicurare la formazione del giunto.
- Saldature allo stato solido: in questo caso la formazione del giunto avviene grazie ad un rimescolamento plastico per attrito del materiale base a temperature inferiori a quella caratteristica di fusione, per tale motivo, dunque, il materiale d'apporto non è mai presente.

In questa tesi sono state considerate, come richiesto dall'azienda committente, soltanto due procedimenti di saldatura:

1. Saldatura per resistenza elettrica a punti (procedimento autogeno per pressione);
2. Brasatura (procedimento eterogeneo).

1.1.1. Saldatura per resistenza elettrica a punti

La saldatura per resistenza elettrica a punti o *Resistance Spot Welding* (RSW) fa parte di quella categoria di processi che prevede l'applicazione, oltre che di calore, dovuto all'effetto Joule conseguente al passaggio di energia elettrica tra due elettrodi, anche di una pressione calibrata nella zona di saldatura. In questo modo si ha la coalescenza tra i materiali coinvolti mediante la formazione di un nocciolo fuso, circoscritto nello spessore dei lembi, senza che vi sia fuoriuscita verso l'esterno di fase liquida. Il processo prevede la realizzazione di giunti di sezione solitamente circolare, che devono interessare parzialmente lo spessore di entrambe i membri coinvolti nel processo, in una zona prossima all'interfaccia tra gli stessi. L'unica configurazione di saldatura ammessa, dunque, è quella per sovrapposizione/trasparenza in quanto consente di creare una adeguata superficie di contatto tra i membri da vincolare e di applicare correttamente il carico

necessario a creare le giunzione.

Con riferimento, per semplicità, alla saldatura di due lamiere, si può tracciare uno schema funzionale delle attrezzature coinvolte, come visualizzato in Figura 1.1.

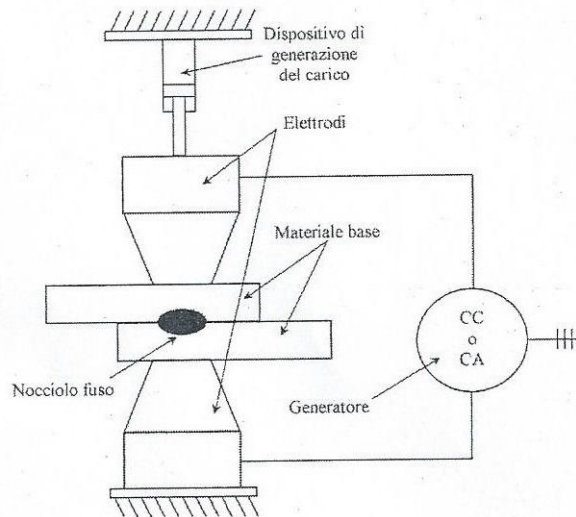


Figura 1.1 Schema di impianto di saldatura per punti.[1]

Come sottolineato precedentemente, il calore necessario a portare a fusione il materiale è generato per effetto Joule dovuto al passaggio di una corrente elettrica che fluisce tra due elettrodi contrapposti a contatto con il materiale base. L'entità del calore trasferito durante il processo dipende dalla resistenza elettrica del circuito R , dall'intensità di corrente di processo i e dal tempo di applicazione t secondo la formula:

$$Q = Ri^2 t$$

I tre parametri sopra menzionati devono essere tenuti sotto controllo durante il processo in modo tale da ottenere la fusione del materiale base localizzata in una zona ristretta (nocciolo) a cavallo dell'interfaccia tra i lembi, ma che non interessi completamente lo spessore degli stessi. Un eccessivo riscaldamento, infatti, porterebbe alla foratura delle lamiere, all'inevitabile fuoriuscita di fase liquida e all'incollaggio degli elettrodi al pezzo. Viceversa, una quantità troppo bassa determinerebbe una zona resistente troppo limitata oppure a una semplice incollatura, che non garantirebbero le prestazioni meccaniche richieste. Analizzando in dettaglio la formula si possono trarre alcune considerazioni importanti:

- La resistenza totale del circuito, ameno di contributi interni del generatore, dipende da alcuni valori caratteristici (Figura 1.2):
 - R_1 e R_7 : sono i valori di resistenza degli elettrodi utilizzati nel processo e devono essere bassi per creare il minor riscaldamento possibile in questi ultimi, in modo da evitare deformazioni indesiderate e rapida usura degli stessi. Occorre quindi selezionare per questi componenti materiali ad alta conducibilità elettrica e prevedere anche un sistema di refrigerazione ad acqua degli stessi in caso di applicazioni intensive.
 - R_2 e R_6 : sono i valori di resistenza all'interfaccia tra gli elettrodi e il materiale base e dipendono dalla rugosità superficiale dei due componenti e dall'area della sezione di contatto. Anche questi valori devono essere limitati per i motivi enunciati al punto precedente e per evitare fusioni indesiderate della superficie del materiale base. Per ottenere queste condizioni occorre che il materiale degli elettrodi sia più duttile di quello caratterizzante i membri coinvolti nel processo in modo tale che, applicando il carico, vi siano micro deformazioni delle superfici degli elettrodi in corrispondenza dei reali punti di contatto tra le creste caratterizzanti la rugosità superficiale all'interfaccia. Queste piccole deformazioni consentono alla superficie dell'elettrodo di modellarsi localmente, andando a riempire progressivamente le asperità determinate dalla scabrezza del materiale base, aumentando in questo modo l'area della sezione reale di contatto, con conseguente diminuzione della resistenza.
 - R_3 e R_5 : sono i valori totali di resistenza del materiale base e dipendono dal suo spessore, dalla sua resistività e dalla sezione di contatto.
 - R_4 : è il valore di resistenza all'interfaccia tra i due lembi. Questo dipende dalla rugosità superficiale degli stessi, nonché dalle caratteristiche intrinseche del materiale. Il valore deve essere mantenuto elevato per creare il massimo riscaldamento in questa zona. Solitamente, per ottenere ciò, si agisce sulla scabrezza delle superfici all'interfaccia.

I valori di resistenza individuati determinano diverse temperature nelle zone analizzate secondo lo schema in Figura 1.2.

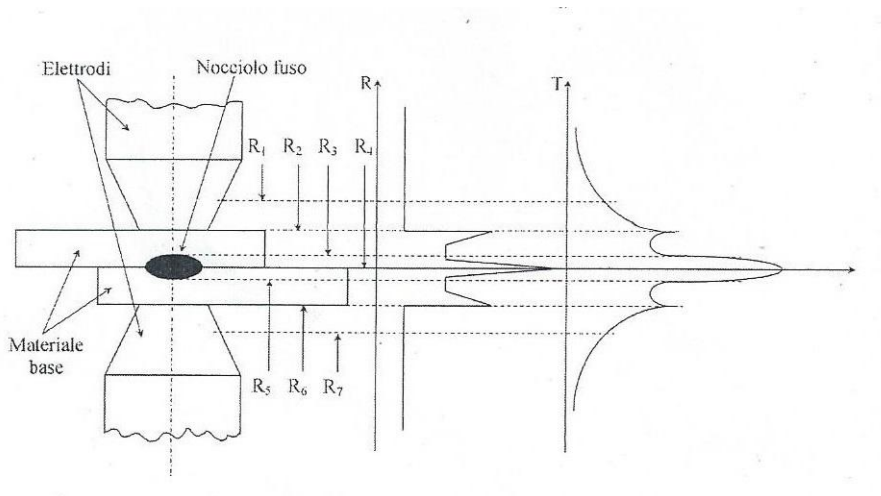


Figura 1.2 *Andamento della resistenza e della temperatura nelle varie zone dell'interfaccia.[1]*

- La corrente di saldatura, comparendo elevata al quadrato, influenza fortemente la quantità di calore generata nei punti cruciali analizzati nel punto precedente. Deve essere tenuta sotto controllo per evitare surriscaldamenti e deformazione degli elettrodi e fuoriuscita di fase liquida dal nocciolo. Di norma essa varia tra i 1'000 A e i 100'000 A.
- Il tempo di applicazione del flusso di corrente solitamente è piuttosto breve, in quanto non deve favorire la propagazione di calore all'interno del materiale base in zone non idonee alla formazione del nocciolo e verso gli elettrodi. Operativamente tale parametro varia da 1/100 s a vari secondi in base allo spessore dei lembi interessati al processo.
- La forza applicata assialmente agli elettrodi, che genera una pressione nella zona di contatto, assieme al riscaldamento produce la coalescenza necessaria tra i materiali che compongono i membri soggetti a saldatura. Questo parametro influenza direttamente, come già visto, la resistenza elettrodo-pezzo e pezzo-pezzo e deve essere controllata scrupolosamente per ottenere la corretta formazione del nocciolo, evitando tuttavia deformazioni degli elettrodi e forature del materiale base. La forza applicata può variare da 1 kN a 30 kN.

Il processo è costituito dalle seguenti fasi:

- A. **Preparazione:** le lamiera sovrapposte vengono posizionate tra i due robusti elettrodi della saldatrice.
- B. **Pressione:** le lamiera vengono strette dai due elettrodi con una pressione ottenuta manualmente o automaticamente, in modo da sviluppare un contatto effettivo nella zona di saldatura all'interfaccia lamiera/lamiera
- C. **Conduzione:** mantenendo la pressione, si fa scorrere la corrente nel circuito per il tempo che garantisce la fusione delle lamiere.
- D. **Mantenimento:** viene interrotto il passaggio di corrente, mentre la pressione rimane costante finché il punto di saldatura non si solidifica.
- E. **Allontanamento:** gli elettrodi vengono allontanati in modo da poter togliere agevolmente le due lamiere o eseguire un altro punto di saldatura.

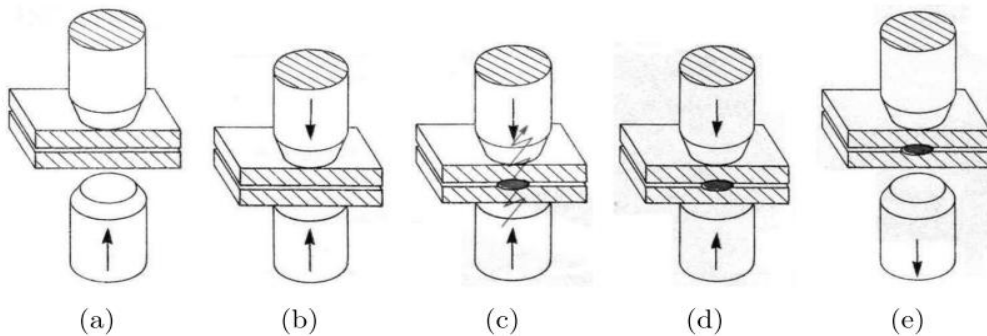


Figura 1.2 Fasi della saldatura per resistenza a punti per un ciclo di saldatura semplice.

I numerosi parametri coinvolti in questo tipo di saldatura permettono di avere a disposizione numerose tipologie di cicli di saldatura.

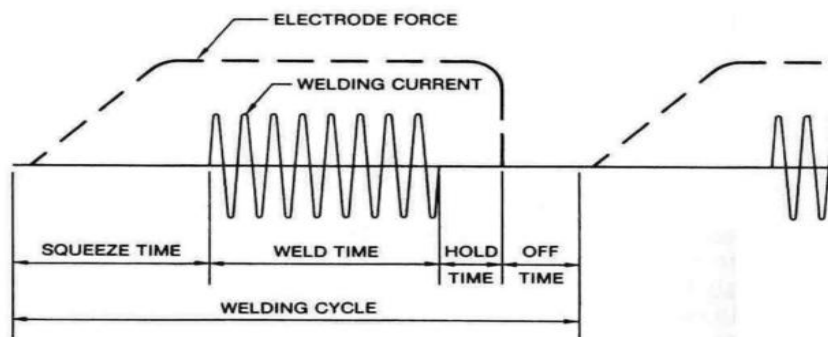


Figura 1.3 Andamenti di forza e intensità di corrente per un ciclo di saldatura semplice.[1]

Nella progettazione di un giunto saldato per punti intervengono anche fattori come: distanza dal centro del nocciolo dal bordo esterno delle lamiere, grado di sovrapposizione, luce tra i lembi sovrapposti, spaziatura fra i punti, accessibilità della zona di saldatura, resistenza del giunto.

La saldatura per punti viene utilizzata con successo sugli acciai al carbonio, acciai inossidabili, leghe di alluminio, di rame, di nickel e di titanio con spessori saldabili che variano normalmente da 0,5 mm a 6 mm e oltre.

Naturalmente i parametri del processo variano sensibilmente a seconda della conducibilità termica ed elettrica del materiale di interesse. In particolare, si privilegiano procedimenti a elevato valore di corrente e bassissimi tempi di applicazione per materiali quali leghe di alluminio e di rame, viceversa per per acciai, leghe di nickel e di titanio.

I principali vantaggi di tale processo sono:

- Elevata produttività.
- Possibilità di trattare buona parte dei materiali di interesse industriale.
- Versatilità di impiego in vari campi di applicazione industriale.

I punti deboli invece sono:

- Impossibilità di creare cordoni continui e conseguente inapplicabilità del processo in ambiti in cui sia richiesta la tenuta di fluidi.
- Resistenza abbastanza contenuta a causa dell'inevitabile effetto intaglio che si genera sul bordo del nocciolo.
- L'unica configurazione del giunto concessa è quella per sovrapposizione.
- Il rendimento delle macchine elettriche coinvolte nel processo è molto basso a causa delle elevate correnti in gioco.
- Il costo dei sistemi per saldatura per punti è mediamente elevato.

Il processo di saldatura per punti è ampiamente usato nel campo dell'automotive, si consideri infatti che in una vettura ci sono dai 2'500 ai 5'000 punti di saldatura. Vista la crescente attenzione alla capacità di assorbire urti da parte della automobili, per incrementare la sicurezza dei conducenti, sono stati fatti nel campo della saldatura per punti notevoli studi.

Normalmente ci sono tre indici che si sfruttano per il controllo della qualità di un

punto di saldatura:

1. **Dimensione della zona fusa** definita come la larghezza del nocciolo all'interfaccia tra le lamiere nella direzione longitudinale.
2. **Prestazioni meccaniche della saldatura**, considerando sollecitazioni statiche o quasi-statiche e dinamiche (fatica e impatti). Le prestazioni meccaniche ottenute applicando carichi dinamici sono l'indice migliore, se si vogliono ottenere risultati sulla capacità di assorbire energia, mentre quelle ottenute con carichi statici o quasi-statici sono più semplici da ottenere. Il *tensile-share test* (sollecitazione di taglio) è il più usato per valutare il comportamento del punto di saldatura in condizioni statiche. Il carico massimo ottenuto da tale test descrive appieno il comportamento del punto di saldatura.
3. **Modalità di rottura**. Si osservano due modalità di rottura del punto di saldatura: interfacciale e per asportazione.

Nella modalità interfacciale si ha una propagazione della cricca che parte dal bordo del nocciolo all'interfaccia delle due lamiere, mentre nell'asportazione il nocciolo rimane in una delle due lamiere e in questo caso la rottura ha inizio da luoghi differenti, in funzione del materiale base e dalle condizioni di carico.

La modalità di rottura è un indice qualitativo della qualità della saldatura e influenza significativamente il carico massimo e la capacità di assorbire energia. Quando si ha asportazione del nocciolo, si osserva una elevata deformazione plastica alla quale si associa una grande energia assorbita, tale modalità di rottura si verifica perché il nocciolo è in grado di resistere ad elevate forze.

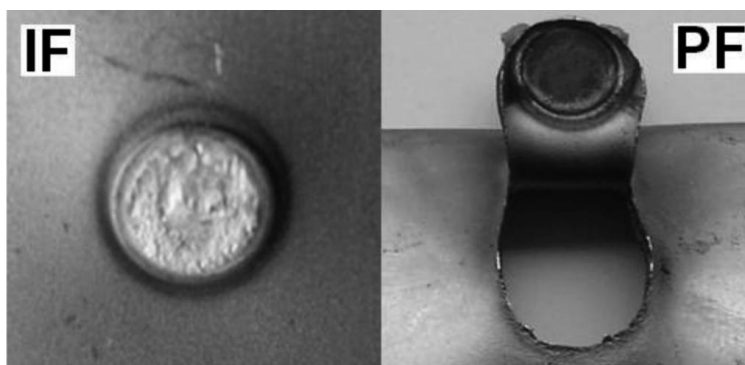


Figura 1.4 A sinistra la modalità di rottura interfacciale e a destra la modalità di rottura per asportazione. [6]

Spesso la dimensione del nocciolo d è ricavata dalla relazione:

$$d = 4s^{0,5}$$

dove s è lo spessore della singola lamiera. In funzione di questa formula quindi si aggiustano i parametri di processo.

Tuttavia tale formula non da nessuna indicazione su quale tipo di rottura possa verificarsi.

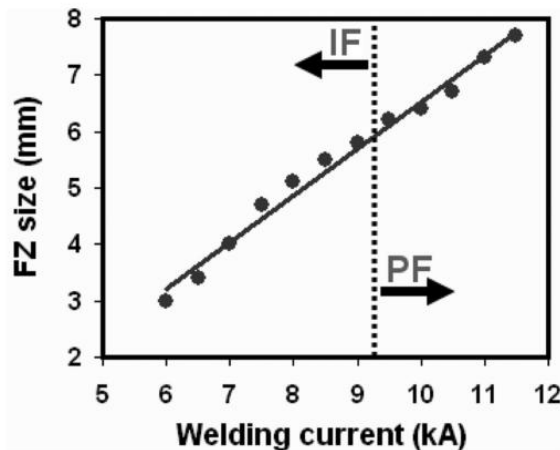


Figura 1.5 [6]

Si è osservato, mediante sperimentazione, che il tipo di rottura è direttamente dipendente, oltre che dalle caratteristiche geometriche del giunto, dall'intensità della corrente applicata tra i due elettrodi. Si è inoltre riscontrata una proporzionalità diretta tra intensità di corrente e dimensione del nocciolo (Figura 1.5).

1.1.2. Brasatura

Con il termine brasatura si identifica una ben precisa tecnologia di giunzione in cui il materiale base non entra mai in fase liquida e in cui, di conseguenza, tutta la creazione del giunto è demandata all'azione del materiale d'apporto che deve avere una temperatura di fusione sensibilmente inferiore a quella del materiale base. Esistono normalmente due tipi fondamentali di brasature:

- **Brasature forti:** la temperatura caratteristica di fusione del materiale d'apporto è superiore a 450°C.
- **Brasature dolci:** la temperatura caratteristica di fusione del materiale d'apporto è inferiore a 450°C.

Il fenomeno fisico che sta alla base della realizzazione di un giunto per brasatura è la *capillarità*: questa è dovuta al complesso meccanismo di forze che si

instaurano in prossimità della superficie di separazione tra un liquido e un solido. Sulla superficie stessa agiscono le forze di adesione, mentre all'interno del volume di liquido agiscono le forze di coesione che ne tengono unite le molecole. Quando il fluido si trova in una situazione in cui la superficie di contatto con il recipiente che lo contiene è molto grande rispetto al volume occupato dal fluido stesso le forze di adesione prevalgono su quelle di coesione e questo comincia a risalire spontaneamente sulle pareti.

Alla luce di ciò le condizioni necessarie per ottenere una buona brasatura sono:

- Una fonte di calore che porti a fusione il materiale base.
- Un materiale d'apporto che abbia buone caratteristiche di fluidità e bagnabilità.
- Un flusso protettivo della fase liquida.
- Un meato sottile (compreso solitamente tra 0,025 mm e 0,25 mm) che favorisca la diffusione della fase liquida per capillarità.

Il materiale d'apporto utilizzato in brasatura deve avere alcune caratteristiche fondamentali:

- Capacità di creare una giunzione con le caratteristiche meccaniche, fisiche ed estetiche desiderate.
- Temperatura di fusione compatibile con il materiale base e sufficiente fluidità per riempire correttamente il meato.
- Composizione chimica omogenea a tutte le temperature caratteristiche del processo per evitare separazioni di fase e liquazione.
- Capacità di bagnare correttamente le superfici interessate alla giunzione.
- Capacità di reagire con il materiale base per creare composti metallici alto-fondenti.

Nella maggior parte dei casi il materiale d'apporto consiste in una lega composta da elementi basso-fondenti e per questo motivo non fonde ad una temperatura ben definita. L'intervallo di temperature nel quale questo passa da fase solida a fase liquida deve essere il più ristretto possibile per evitare, durante il riscaldamento, la separazione di fasi alcune delle quali potrebbero essere espulse dalla zona di saldatura e favorire la formazione di un giunto non accettabile. La composizione della lega brasante inoltre, deve essere tale da non favorire i seguenti effetti:

- Diffusione di elementi nel materiale.
- Diluizione con il materiale base.
- Erosione del materiale base.
- Formazione di composti inter-metallici fragilizzanti.
- Volatilizzazione di elementi di lega alle temperature di brasatura.

In generale la selezione del materiale d'apporto avviene tenendo presente alcune regole fondamentali:

- Compatibilità con il materiale base.
- Idoneità a sopportare le sollecitazioni termiche e meccaniche per le quali il giunto è progettato.
- Temperatura di brasatura: le leghe a temperatura di fusione più bassa sono più costose e meno resistenti, ma richiedono meno energia per la realizzazione del processo.
- Metodo di riscaldamento: le leghe con un intervallo di liquefazione contenuto possono essere riscaldate con qualsiasi metodo e possono essere sia pre-posizionate sul giunto che alimentate con continuità, mentre le altre devono essere riscaldate velocemente per sfavorire il processo della liquefazione. A tale proposito è quindi consigliabile posizionarle in loco quando il materiale base ha già raggiunto la temperatura ottimale.

Questo tipo di processo richiede che i giunti abbiano un'apposita configurazione (Figura 1.6), infatti le superfici devono essere necessariamente sovrapposte lasciando un piccolo meato per sfruttare la proprietà di bagnatura del metallo d'apporto, che viene appunto richiamato per capillarità entro questo spazio. In funzione dell'altezza del meato varia la resistenza del giunto.

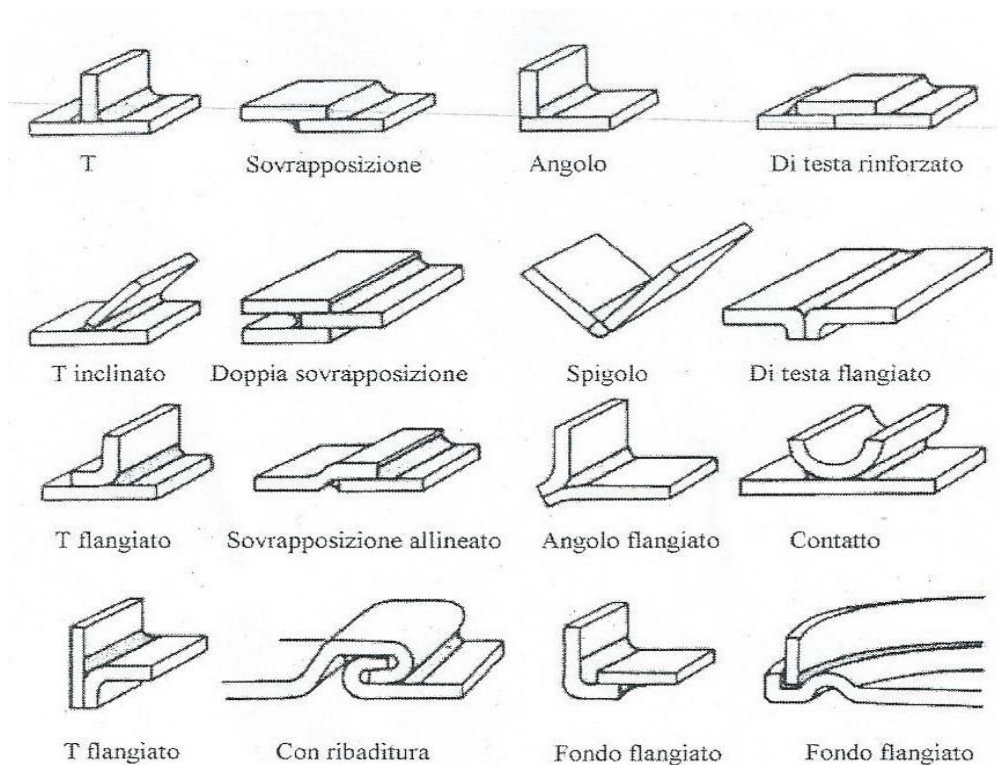


Figura 1.6 *Tipologie comuni di giunti utilizzati.* [1]

Nelle operazioni di brasatura generalmente si hanno, pertanto, le seguenti fasi:

1. Fusione, per riscaldamento, del materiale d'apporto;
2. Riscaldamento, senza pervenire alla fusione, dei giunti da collegare;
3. Diffusione per capillarità del metallo d'apporto tra i giunti da collegare;
4. Formazione locale di una lega di composizione gradualmente variabile per la progressiva diffusione del metallo d'apporto nei giunti.

La temperatura più corretta di brasatura si situa circa 50°C sopra la temperatura di fine fusione (liquidus) del metallo d'apporto. I metalli d'apporto per brasatura capillare sono disponibili in varie forme quali: fili, anelli, nastri, polveri, paste, fili rivestiti, etc.

Affinché la brasatura dia buoni risultati è necessaria una perfetta pulizia e disossidazione dei lembi dei giunti e che le superfici da collegare presentino una certa rugosità. E' consigliabile l'utilizzo di flussi protettivi durante il processo, in modo da evitare la formazione di ossidi.

Brasature dolci

E' una saldatura di resistenza meccanica limitata, usata quando gli spessori in gioco sono molto piccoli e la temperatura di fusione del materiale base è bassa.

E' usata particolarmente in campo elettronico, di oreficeria e di idraulica.

Le leghe brasanti comunemente più usate sono:

- Leghe Piombo-Stagno: tipicamente nelle proporzioni 50 Sn-50 Pb per processi manuali o 63 Sn-37 Pb per avere una buona resistenza meccanica e la conduttività elettrica.

Le temperature di fusione si aggirano attorno tra i 180°C e 240°C.

- Leghe Piombo-Stagno-Antimonio: per incrementare la resistenza meccanica si aggiunge un contenuto dal 3% al 6% di Antimonio.
- Altre leghe come: Stagno-Zinco, Stagno-Antimonio, Stagno-Argento, Piombo-Argento, etc.

Per fondere il materiale d'apporto si può usare un riscaldamento a induzione o a resistenza elettrica, si possono anche utilizzare fiamme ossi-gas come la ossimetanica, la ossidrica, la ossipropanica e l'ossiacetelinica.

Brasature forti

In generale con le brasature forti si conferisce una maggiore resistenza meccanica ai pezzi saldati. Di solito si applica a giunti di discreto spessore e di maggior resistenza termica e meccanica, come ad esempio gli acciai.

Le possibili leghe d'apporto per la brasatura forte sono numerose:

- *Leghe Alluminio-Silicio*: hanno una temperatura di fusione che va dai 450 ai 650°C e sono utilizzate per brasare l'Alluminio e le leghe leggere con tenore di Silicio dal 5 al 12%.
- *Leghe Rame-Fosforo*: hanno grande capacità disossidante quindi non richiedono l'ausilio di flussi e sono utilizzate per brasare il Rame.
- *Leghe Rame-Zinco*: hanno una temperatura di fusione che si aggira attorno ai 900°C e sono utilizzate per la saldatura di materiali ferrosi.
- *Leghe Rame-Argento*: hanno una temperatura di fusione che va dai 700 ai 820°C e sono utilizzate per tutti i metalli ferrosi e non, ad eccezione dell'Alluminio e le sue leghe. L'Argento favorisce il fenomeno della

capillarità.

In Tabella 1.1 sono riportati i principali vantaggi e svantaggi del processo di brasatura (sia dolce che forte).

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none">- Preparazione molto semplice- Possibilità di unire giunti dalle forme complesse- I materiali base rimangono inalterati data la bassa temperatura raggiunta- Le deformazione dei metalli rimangono basse- Possibilità di unire metalli diversi- Economicità e possibilità di lavorare su grandi volumi produttivi- Non sono richieste operazioni di finitura dopo il processo	<ul style="list-style-type: none">- Resistenza inferiore ai processi autogeni- Possibile formazione di composti intermetallici che portano alla fragilità della struttura- Necessità di riscaldare in modo omogeneo le parti, quindi possono esserci difficoltà nella realizzazione di giunti di grandi dimensioni- Maggiore suscettibilità del giunto alla corrosione galvanica

Tabella 1.1 *Vantaggi e svantaggi della brasatura.*

1.2 Motivazioni

Un'azienda locale leader nella produzione di componentistica elettronica ha commissionato all'Università di Bologna il compito di determinare sperimentalmente la resistenza delle giunzioni degli elettrodi di alcune tipologie di condensatori da loro prodotti. L'azienda quindi confronterà i dati, frutto di questa tesi, con i risultati in suo possesso cercando di capire quale correlazione è presente tra resistenza della giunzione e bontà del collegamento elettrico.

Essendo l'azienda molto attenta a non diffondere il proprio *know how* non è stato possibile a noi confrontare i dati ottenuti e quindi verificare eventuali differenze.

Capitolo 2

Obiettivo della tesi

Sono stati fornite due tipologie di provini:

1. dei lamierini di rame rivestiti di stagno sovrapposti e saldati per punti (che simulano parte di un condensatore),
2. dei condensatori semi-finiti con elettrodi saldati mediante brasatura dolce.

Sono state fornite anche ulteriori tipologie di provini, con modalità di giunzione differenti, che saranno che saranno esaminate in una tesi futura.

Per entrambe le tipologie di provini era richiesta la misurazione dell'entità della forza resistente delle giunzioni.

E' stato quindi allestito un banco prova per ciascuna campagna ed è stato svolto anche il progetto di una cella di carico estensimetrica, in quanto la strumentazione già presente non era adeguata.

Entrambe le campagne di prove sono state svolte a temperatura ambiente.

Capitolo 3

Prima campagna di prove: parte sperimentale

3.1 Materiali e metodi

3.1.1. Provini

I provini oggetti di studio sono stati forniti direttamente dall'azienda produttrice e consistevano in lastre di rame stagnato di spessore differente sovrapposte e proprio in questo luogo unite mediante saldatura per resistenza (in particolare un unico punto di saldatura centrato nella zona di sovrapposizione dei due lamierini).

Le dimensioni dei provini sono riportate nella Figura 3.1 .

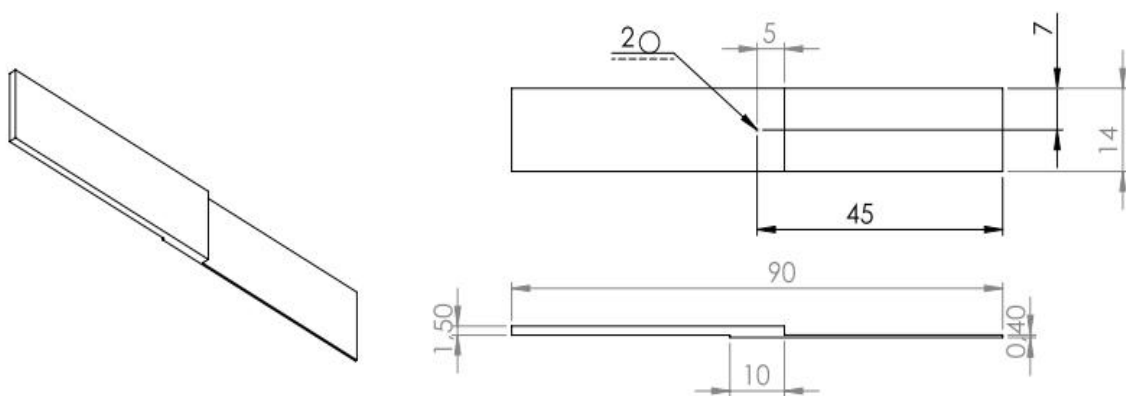


Figura 3.1 *Dimensioni del provino in esame.*

3.1.2. Progetto dell'esperimento

Per la determinazione del valore della forza di rottura della giunzione si è deciso di usare una cella di carico estensimetrica, in modo da ricondursi dalla deformazione alla forza applicata al provino.

Il provino viene afferrato mediante morse (tenuta per attrito) alle due estremità, una delle quali fissa e l'altra mobile direttamente alloggiata sulla cella di carico.

Non avendo già a disposizione una cella di carico si è deciso di realizzarla ex novo. Se si volesse testare un solo provino alla volta esso dovrebbe essere allineato con la direzione di applicazione della forza (coincidente con l'asse della cella) per non far nascere momenti flettenti che inclinano il sistema, quindi per non dare una forma asimmetrica alla cella si è deciso di testare due provini contemporaneamente.

Da osservare come non essendo coincidenti le rette d'azione delle forze che sollecitano il provino si crea un momento che tende a inflettere il lamierino facendo così nascere una sollecitazione diversa da quella di taglio puro (Figura 3.2). Tuttavia il braccio della forza è molto piccolo, circa 0,95mm, quindi il momento che nasce è trascurabile.

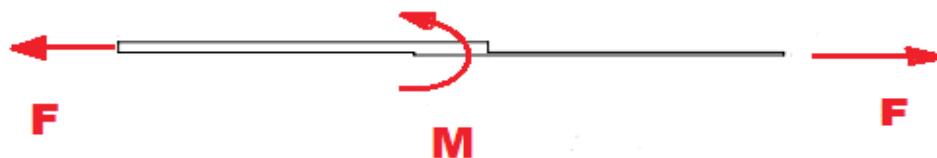


Figura 3.1.2 Sollecitazione del provino.

Con questa soluzione tuttavia la cella misura la somma delle forze alle quali sono sottoposti i provini.

Quindi la forza con la quale si rompe la giunzione è la metà della forza misurata dalla cella di carico nel momento in cui uno dei due provini cede (cioè il più debole).

Ad ogni prova quindi si rileva e salva la deformazione in uscita dalla cella, indi per cui ad essa si associa una forza conoscendo la retta di taratura.

La configurazione del banco prova allestito la si può visualizzare in Figura 3.3.

Si può osservare come il fissaggio dei provini è stato realizzato per attrito grazie a collegamenti filettati. L'estremità dei provini opposta a quella vincolata dalla

cella è fissata da un apposito blocchetto fisso a telaio dotato di morse azionate da collegamenti filettati.

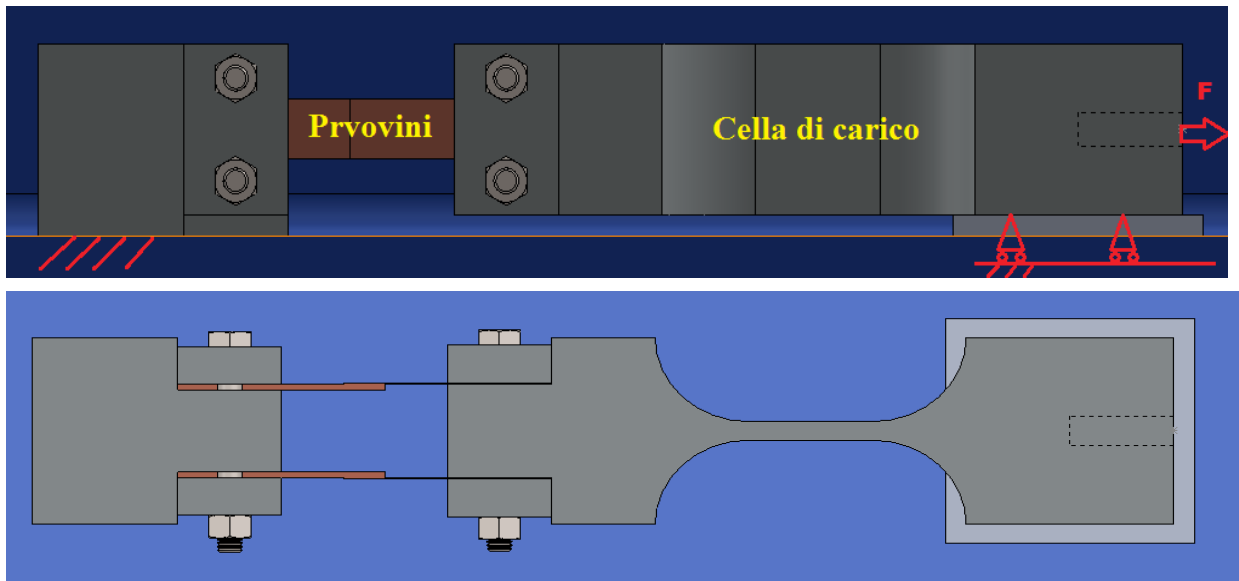


Figura 3.3 Funzionamento banco di prova 1.

Ad una estremità della cella è allocata una vite prigioniera sufficientemente lunga sulla quale viene avvitato manualmente un dado che appoggia su una lamiera fissa a telaio in modo da far muovere la cella avvitando quest'ultimo (visibile in Figura 3.4). Questa configurazione, grazie alla sua rigidità, permette di continuare la prova anche quando uno dei due provini abbia già ceduto, non inclinando la cella di carico.

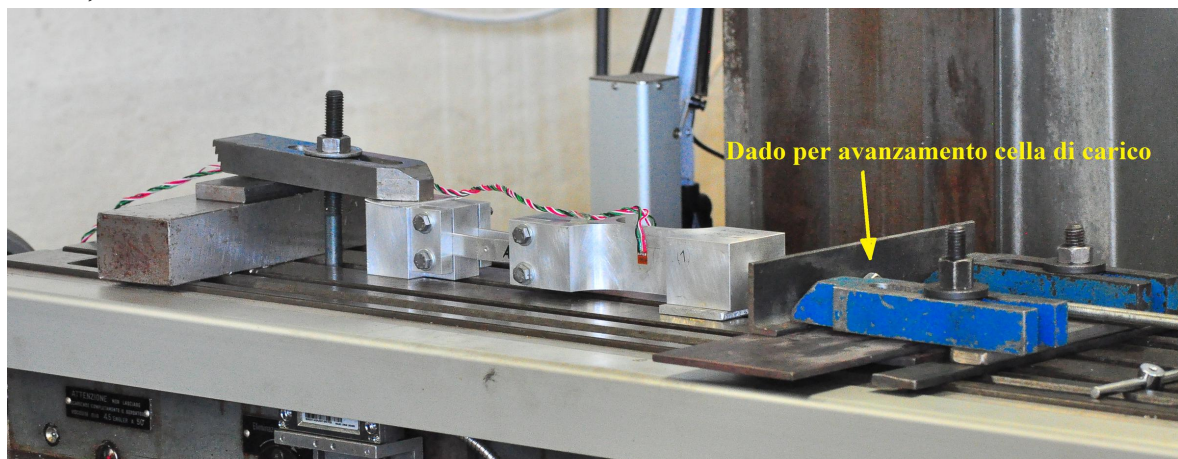


Figura 3.4 Funzionamento banco di prova 2.

La testa della cella di carico, dove è presente il foro filettato, è libera di traslare

su una piastrina fissa sulla quale è posto del lubrificante, in questa maniera la cella rimane in posizione, non ruotando, e si evita che l'attrito influenzi la misura. Infatti la cella non misura la forza che si genera avvitando la vite, bensì la differenza di quest'ultima e la forza d'attrito generata all'interfaccia *testa della cella/piastrina lubrificata*, ossia la forza trasmessa ai provini.

3.1.3. Progetto cella di carico

Parte rilevante di questa tesi è stata proprio la progettazione, realizzazione e taratura della cella di carico.

Gli unici vincoli di tale progetto sono stati:

- la forma di una estremità, poiché in questo luogo andavano alloggiati direttamente i provini.
- la massima forza rilevabile, infatti l'azienda produttrice aveva inizialmente comunicato che il valore atteso di forza per ogni provino si attestasse attorno agli 800 N.

Per semplificare il progetto e la realizzazione della cella si è deciso di farla lavorare nel tratto utile, dove verranno applicati gli estensimetri, a sforzo normale puro.

Preliminarmente si è deciso di adottare come materiale costituente la cella, l'alluminio in quanto, a parità di geometria rispetto ad un acciaio, aumenta la sensibilità della stessa. Infatti a parità di forza e geometria l'alluminio si deforma maggiormente rispetto all'acciaio.

Come valore massimo di forza F_{max} sopportabile dalla cella si è assunto 10 kN.

Scegliendo un alluminio AA 2024-O con :

- tensione di snervamento pari a $S_y = 100 \text{ MPa}$,
- modulo di Young pari a $E = 70000 \text{ MPa}$,
- coefficiente di Poisson pari a $\nu = 0,33$,

e scelto un coefficiente di sicurezza statico CS pari a 2 si ricava la sezione resistente A del tratto utile della cella:

$$A = \frac{F_{max} CS}{S_y} = 200 \text{ mm}^2 .$$

Si è deciso di realizzare la cella di carico con uno snellimento del tratto utile lungo un solo piano di simmetria per evitare di avere la rimanente parte molto più voluminosa.

La geometria definitiva della cella è visibile in Figura 3.5 .

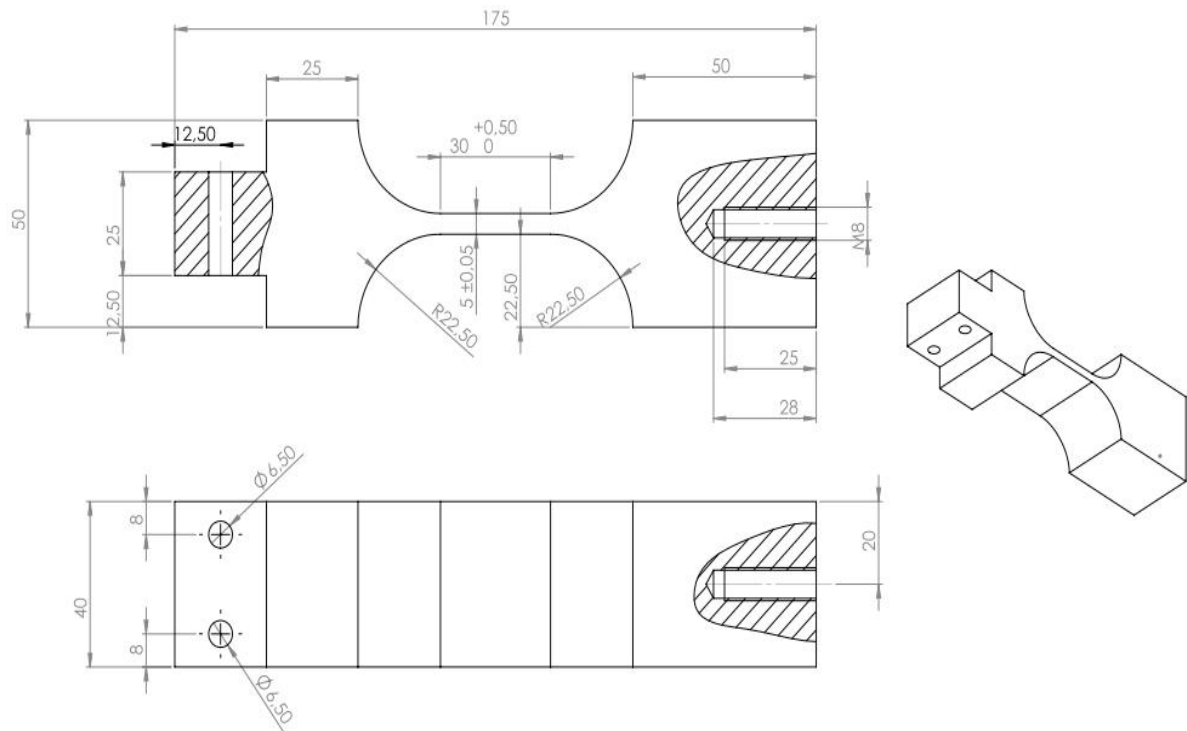


Figura 3.5 *Disegno costruttivo cella di carico.*

Per verificare il corretto funzionamento, si è eseguita una simulazione F.E.M. in *SolidWorks* (Figura 3.6) dalla quale si può osservare l'andamento costante delle tensioni e quindi deformazione nel tratto utile e una leggera sovratensione al termine del raccordo a causa della concentrazione di tensioni dovuta dallo stesso.

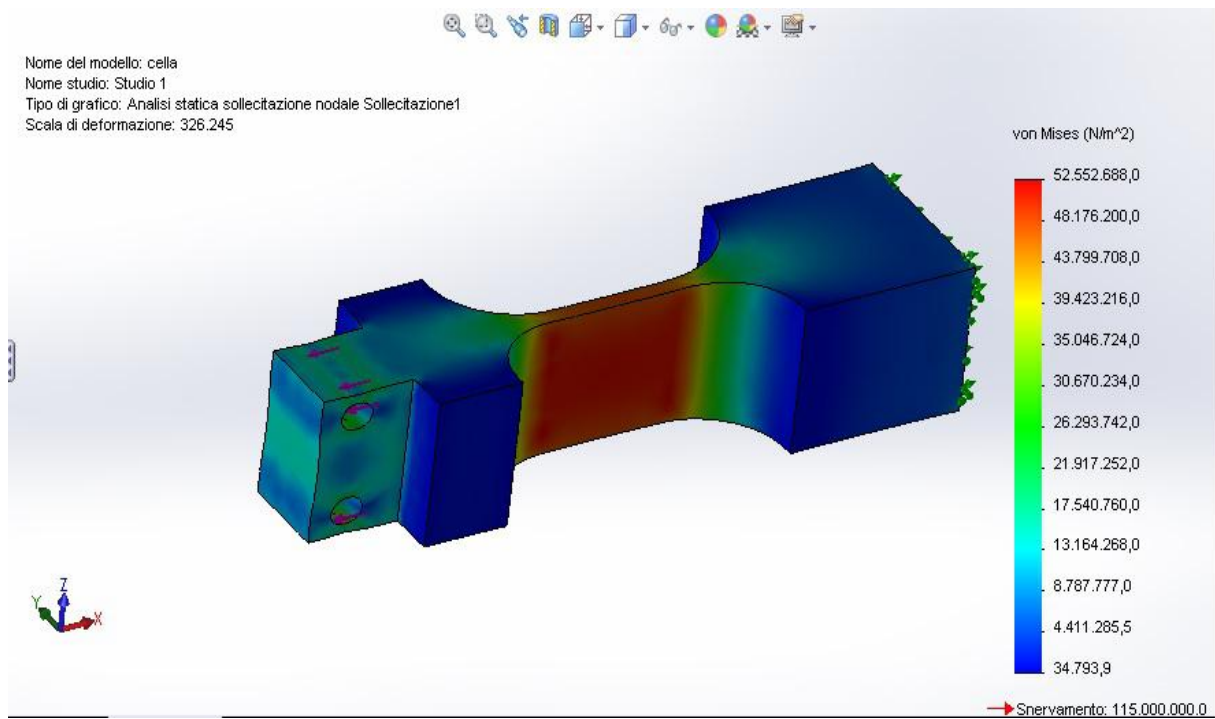


Figura 3.6 *Andamento tensioni di Von Mises per una forza di 10 kN.*

La cella è stata ricavata dal pieno tramite lavorazione con macchine a controllo numerico (Figura 3.1.8).

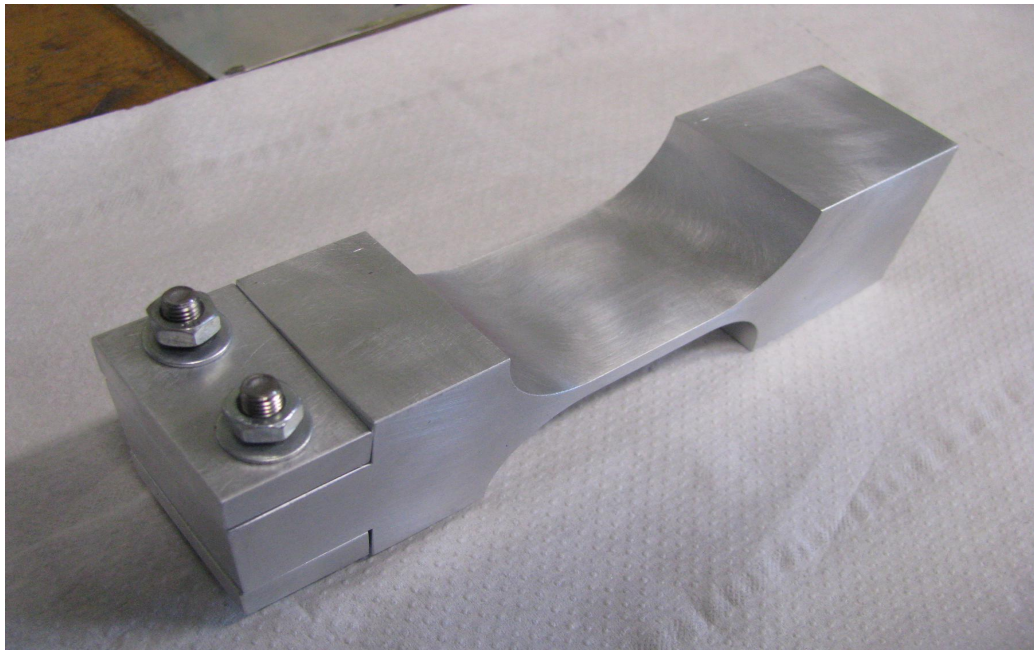
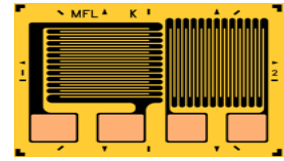


Figura 3.7 *Cella di carico finita.*

3.1.4. Strumentazione cella di carico

La cella di carico è stata strumentata con 4 estensimetri elettrici a foglio collegati al “Ponte di Wheatstone” secondo la configurazione “Ponte intero”.



Seguendo la semplice regola che segnali uguali su lati *opposti* si sommano e che segnali uguali su lati *contigui* si sottraggono si è strumentata la cella.

Siano ε_1 la deformazione longitudinale e ε_2 la deformazione trasversale del tratto utile della cella.

Con riferimento alla Figura 3.8 si ha che:

- la resistenza R_1 rappresenta la griglia longitudinale dell'estensimetro 1 (misura la deformazione longitudinale ε_1 del tratto utile delle cella).
- la resistenza R_2 rappresenta la griglia trasversale dell'estensimetro 1 (misura la deformazione trasversale del tratto utile della cella).
- la resistenza R_3 rappresenta la griglia longitudinale dell'estensimetro 2 (misura la deformazione longitudinale della cella).
- la resistenza R_4 rappresenta la griglia trasversale dell'estensimetro 2 (misura la deformazione trasversale del tratto utile della cella).

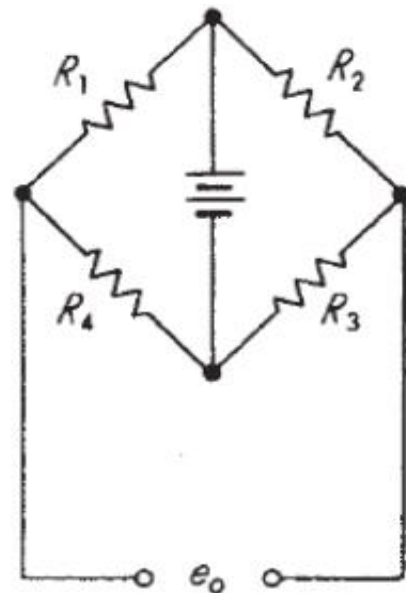


Figura 3.8 Schema ponte di Wheatstone. [2]

A seguito di uno sforzo di trazione della cella si avranno: ε_1 maggiore di zero dovuto alla tensione che si crea, mentre ε_2 sarà minore di zero e dovuto all'effetto Poisson, infatti $\varepsilon_2 = \nu \varepsilon_1$.

L'uscita del ponte di Wheatstone ε' , che rappresenta la lettura, è per le considerazioni fatte pari a:

$$\varepsilon' = 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 2\varepsilon_1(1 + \nu)$$

I vantaggi di questa configurazione sono:

- Aumento della sensibilità.
- Compensazione di eventuali effetti termici.
- Compensazione di eventuali flessioni della cella di carico secondo un asse

verticale od uno orizzontale.

- Compensazione di eventuali torsioni della cella di carico, anche se non presenti in questo caso.

Si sono applicati due estensimetri della *Vishay Micro-measurements* codice *CAE-13-062UT-120* dove in ogni foglio sono presenti due griglie ortogonali fra loro le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.1.

Grid resistance in Ohms	120,0±0.5%
Gage factor at 24°C (Grid 1)	2,110±0.5%
Transverse sensitivity (Grid 1)	(+1,9±0.2)%
Gage factor at 24°C (Grid 2)	2,110±0.5%
Transverse sensitivity (Grid 2)	(+1,9±0.2)%

Tabella 3.1 *Carta dell'estensimetro.*

L'applicazione degli estensimetri è stata eseguita secondo la procedura classica:

1. Abrasione della zona di applicazione con carta abrasiva sempre più fine.
2. Pulizia della zona di applicazione con successione di prodotti sgrassanti/acidi/basici.
3. Tracciatura della cella con truschino per un posizionamento esatto dell'estensimetro.
4. Posizionamento dell'estensimetro.
5. Incollaggio dell'estensimetro con cianoacrilati (perché polimerizzano velocemente e sono adatti a prove temperatura ambiente e di breve durata).
6. Stagnatura dei terminali.
7. Verifica con Resistometro della bontà dei collegamenti.
8. Fissaggio dei cavi.
9. Applicazione del protettivo.
10. Siglatura dei collegamenti/cavi.

I due estensimetri sono stato applicati sulle due superfici maggiori del tratto utile della cella (Figura 3.9).

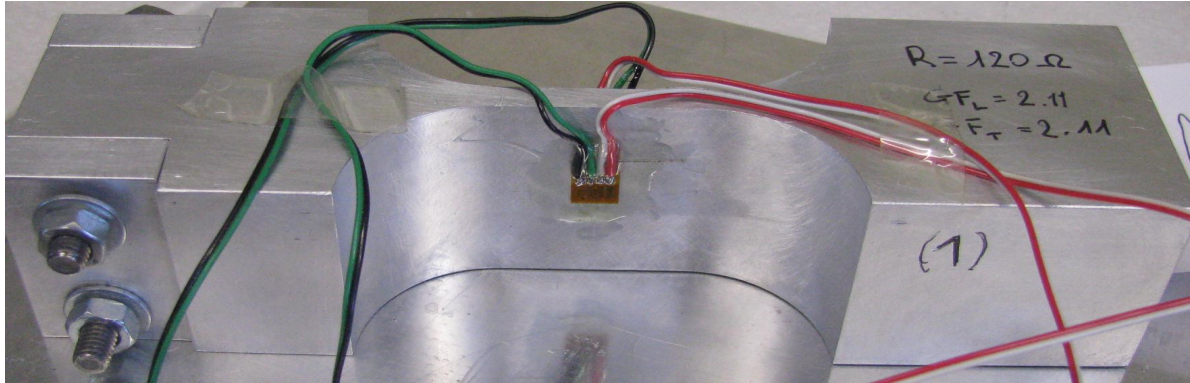


Figura 3.9 *Strumentazione della cella di carico.*

3.1.5. Taratura cella di carico

Prima di eseguire la taratura vera è propria sono stati eseguiti calcoli analitici con l'ausilio di *Excel*, in modo da avere già un'idea dei risultati ottenibili.

Sapendo che:

$$\sigma = F / A$$

(dove A è la sezione trasversale del tratto utile della cella, in particolare $A=200\text{mm}^2$)

e che:

$$\sigma = E \varepsilon_1$$

e anche che :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon'}{2(1+\nu)}$$

si ricava la relazione tra lettura del ponte ε' (in m/m) e forza F (in N), infatti:

$$F = \frac{EA\varepsilon'}{2(1+\nu)}$$

Si è anche in grado quindi di trovare una retta rappresentante tale funzione nella forma:

$$F = m' \varepsilon' + q'$$

dove:

- il coefficiente angolare teorico vale $m' = \frac{AE}{2(1+\nu)} = 5,263 \cdot 10^6 \text{ N}$;

- l'intercetta dell'asse F teorica vale $q' = 0 \text{ N}$.

Le tarature eseguite della cella di carico sono state tre.

Prima taratura

Si è collegata la cella di carico ad una centralina della *Vishay Micro-measurements* modello “*P-3500 strain indicator*” che rileva e visualizza direttamente il valore in uscita dal ponte di Wheatstone una volta impostato il Gage factor e eseguito il cablaggio della configurazione a ponte intero. Una volta fissata la cella in posizione verticale con opportuni accorgimenti, fissando un'estremità su una morsa, si sono applicati alla cella pesi calibrati e partendo da 0 kg (0 N) si è arrivati a 50 kg (490,3 N) con passo di 5 kg (49,03 N) , cioè si è ottenuta una rampa lineare. Per ogni livello di carico si è registrata la lettura del ponte in $\mu\text{m/m}$.

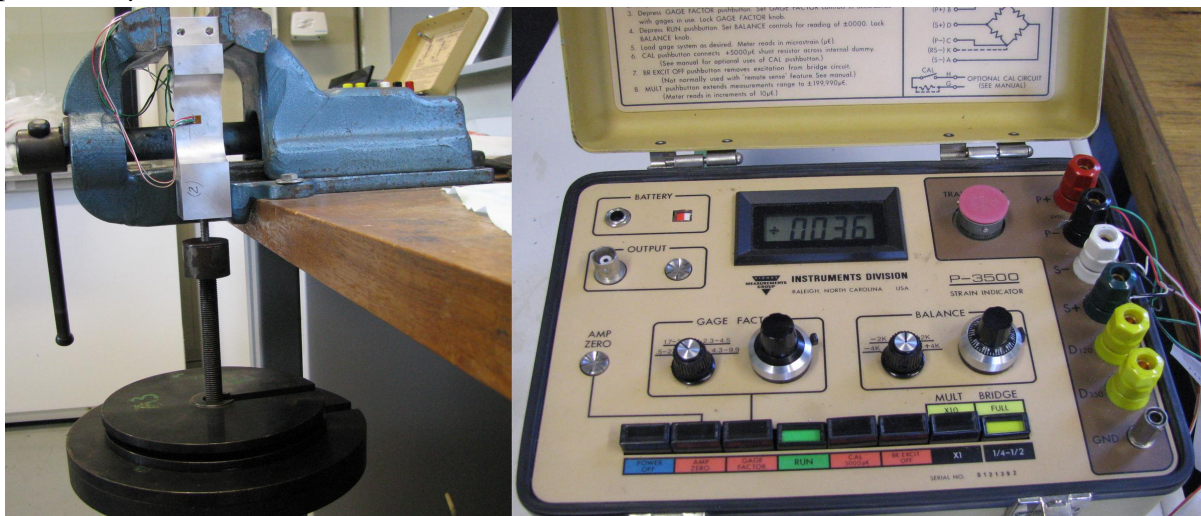


Figura 3.10 *Prima taratura.*

Per avere senso statistico il procedimento è stato ripetuto 6 volte con andamenti dei carichi prima crescenti poi decrescenti, in questo modo si è valutato anche l'effetto dei fenomeni di isteresi durante la misura.

Quindi si è passati all'elaborazione dei dati in *Excel* , trovando la regressione lineare della relazione tra *forza/lettura* e successivamente la relazione tra *lettura/forza* che rappresenta la retta di taratura, visibile in Figura 3.11 .

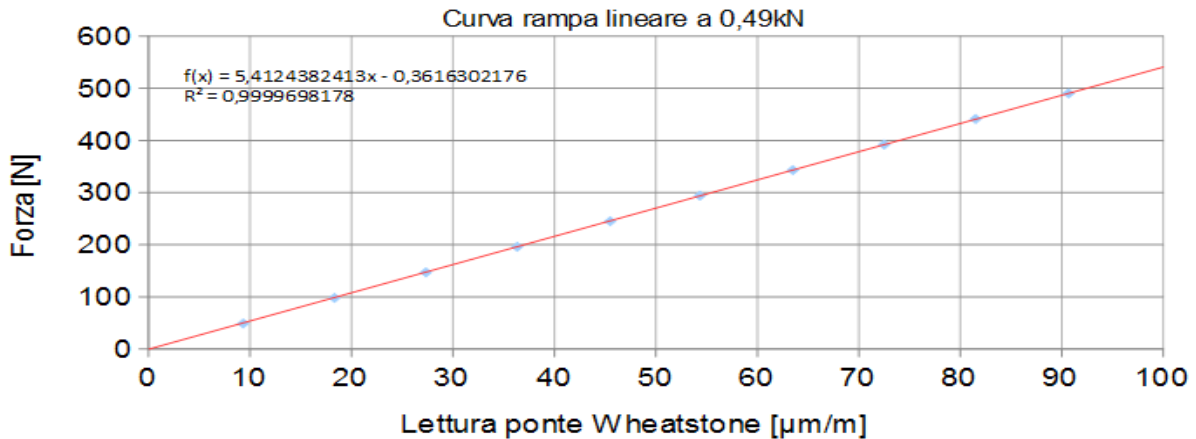


Figura 3.10 Retta di taratura: in blu i punti ottenuti e in rosso la corrispondente regressione lineare.

I valori della retta $F = m\varepsilon' + q$ individuata sono rispettivamente:

- coefficiente angolare: $m = 5,4124 \cdot 10^6 \text{ N}$;
- intercetta asse F: $q = -0,36163 \text{ N}$.

Si può osservare che non sono presenti fenomeni di isteresi e che la relazione forza/lettura è perfettamente lineare come atteso ed inoltre la retta di taratura passa praticamente dall'origine degli assi.

Tuttavia questa procedura non è molto attendibile in quanto non si è spaziato tutto il campo di misura previsto, infatti si sono raggiunti 490,3 N a fronte dei 10'000 N previsti in progetto cioè circa il 5% del campo di utilizzo.

Seconda taratura

La taratura è stata eseguita con l'ausilio di una macchina servo-idraulica di capacità massima pari a 100 kN. Si è fissata la cella di carico tra gli afferraggi della macchina costituiti da morse azionate manualmente da viti , assicurandosi che fosse in posizione perfettamente verticale con opportuni accorgimenti (Figura 3.11).

La prova è stata effettuata operando un'acquisizione su due canali, relativi alla deformazione della cella di carico in $\mu\text{m/m}$ e l'uscita in tensione della cella di carico estensimetrica della macchina in V a cui corrisponde la forza di trazione.

Le due uscite erano acquisite da un apposito programma in *LabView* su un

computer portatile.

A questo punto si è avviata la prova facendo variare la forza da 0 kN a 11 kN con un andamento a rampa lineare e avendo fissato la frequenza di campionamento a 10 Hz.

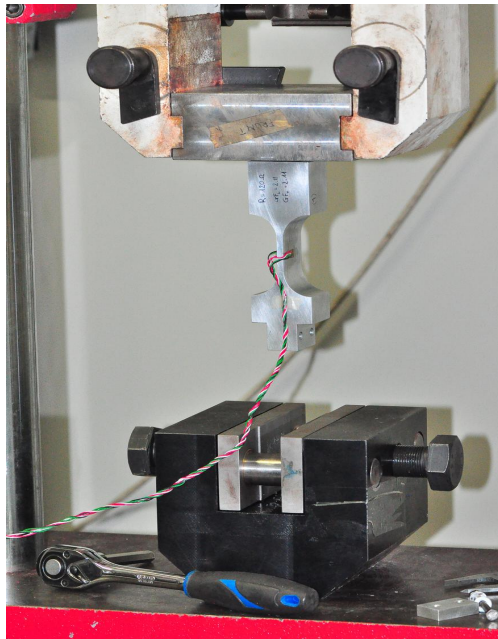


Figura 3.11 Banco di taratura.

Introdotti i dati in *Excel* si è dapprima convertita la tensione in forza sapendo che nella macchina 1V corrisponde ad 1kN e successivamente dalla deformazione della cella ε_1 si è calcolata la lettura del ponte ε' secondo l'equazione:
$$\varepsilon' = 2(1+\nu)\varepsilon_1$$
 dove ν è il coefficiente di Poisson.

Passando quindi all'elaborazione dei dati si è trovata la regressione lineare dei dati *lettura ponte/forza*

individuando i coefficienti della retta che valgono rispettivamente:

- coefficiente angolare: $m = 5,362 * 10^6 N$;
- intercetta asse F: $q = -0,3023 N$.

Con questa prova si è spaziato l'intero campo di misura della cella di carico, tuttavia non è stato possibile valutare eventuali effetti di fenomeni di isteresi.

Anche in questo caso la retta ottenuta approssima in maniera molto soddisfacente i dati ottenuti, passando anche in questo caso molto vicino all'origine degli assi.

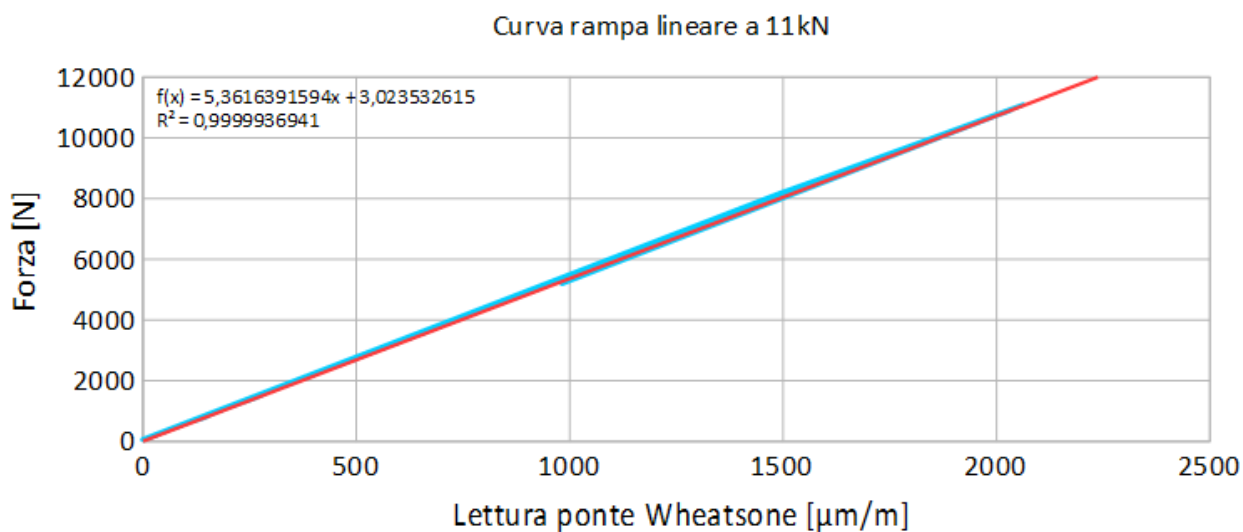


Figura 3.12 Retta di taratura: in blu i punti ottenuti e in rosso la corrispondente regressione lineare.

Terza taratura (definitiva)

In quest'ultima prova si è seguito lo stesso iter della seconda taratura con l'unica differenza che si è applicato un carico periodico, formato da due rampe lineari simmetriche di cui una crescente e l'altra decrescente. Il valore minimo e massimo di forza delle rampe sono rispettivamente 0,5 kN e 10,5 kN.

Si sono eseguiti tre cicli per avere maggiore senso statistico (Figura 3.13).

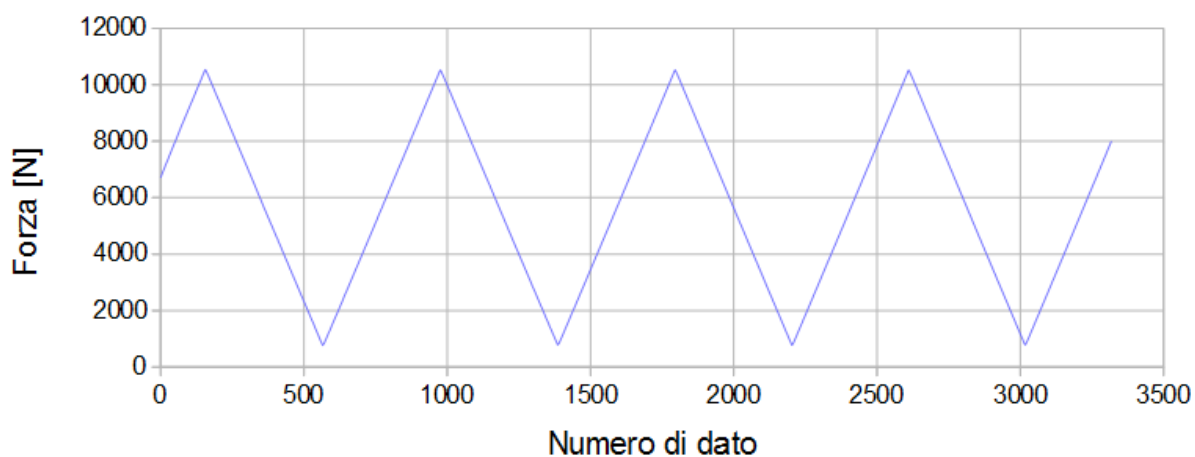


Figura 3.13 Andamento della forza.

I coefficienti della retta di taratura trovata in questo caso sono (Figura 3.1.12) :

- coefficiente angolare: $m = 5,3643 \cdot 10^6 N$.
- intercetta asse F: $q = -15,08 N$.

I risultati ottenuti in questa prova sono da ritenersi definitivi, perché sono riferiti ad un processo di taratura esemplare, l'affidabilità statistica è elevata e si possono escludere fenomeni rilevanti di isteresi.

Si può comunque osservare come le rette ottenute nelle tre tarature siano molto coerenti e che la retta di taratura teorica è molto simile a quella reale.

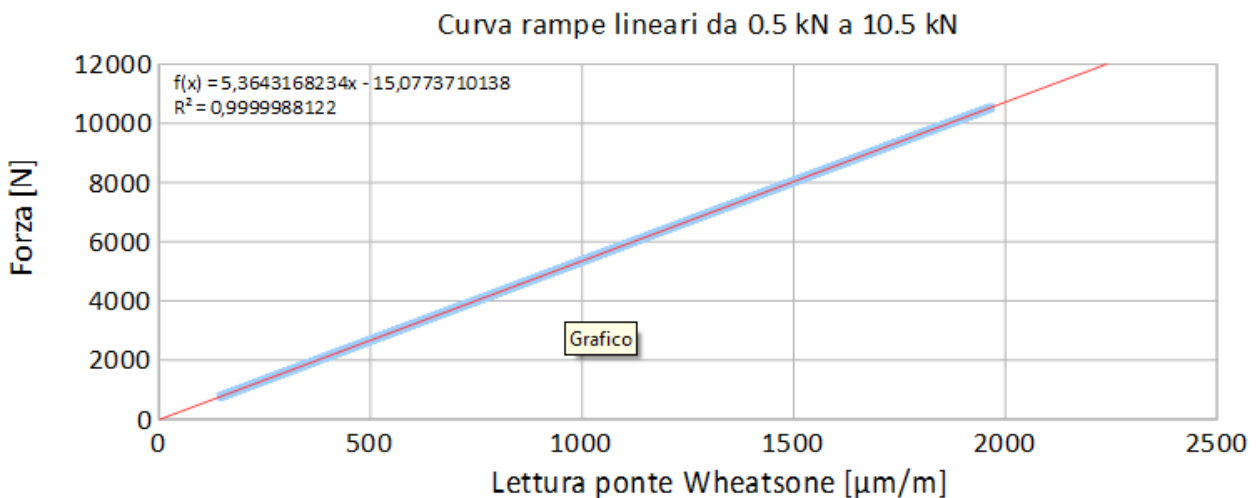


Figura 3.14 Retta di taratura: in blu i punti ottenuti e in rosso la corrispondente regressione lineare.

•

3.2 Procedura sperimentale

Tutte le prove sono state condotte sull'attrezzatura già descritta.

I provini sono stati montati avendo cura del loro posizionamento perfettamente orizzontale e facendo attenzione di non deformarli durante il montaggio. Un dettaglio dei provini durante la prova è visibile in Figura 3.15 .

Nel corso della prova si è operata un' acquisizione ad un canale relativo alla deformazione della cella di carico.

Il ponte di Wheatstone della cella di carico è stato collegato ad una amplificatore analogico *Vishay Micro-measurements* modello “A-2”, a sua volta connessa ad un computer portatile tramite una scheda di acquisizione DAQ Card NI 6036E.

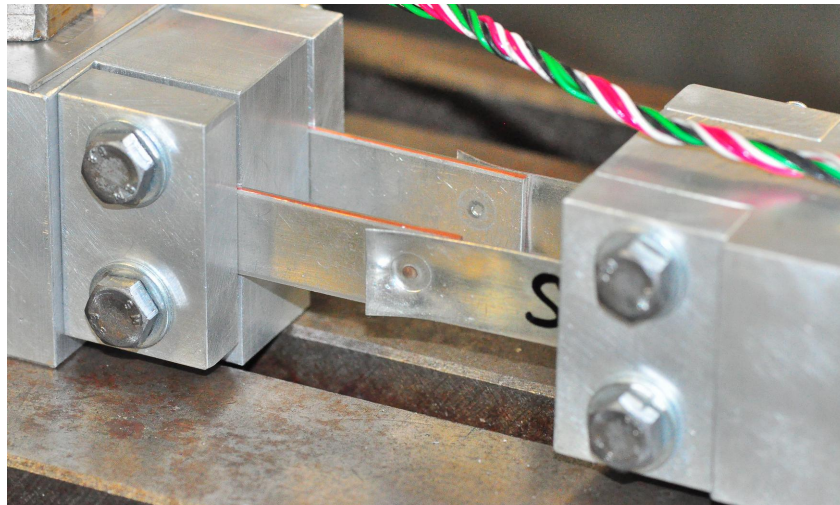


Figura 3.15 *Dettaglio dei provini durante la prova.*

Per supportare l'intera fase di acquisizione, è stato realizzato appositamente un programma in *LabView*. La frequenza di acquisizione è stata fissata a 10 Hz (in realtà 10'000 Hz con esecuzione di una media ogni 1'000 dati acquisiti).

Il programma in *LabView* ha permesso di visualizzare in tempo reale l'andamento della deformazione sotto forma di grafico *deformazione/tempo*. Un esempio di grafico ottenuto è visibile in Figura 3.16.

L'acquisizione è stata arrestata una volta che entrambi i provini si sono rotti.

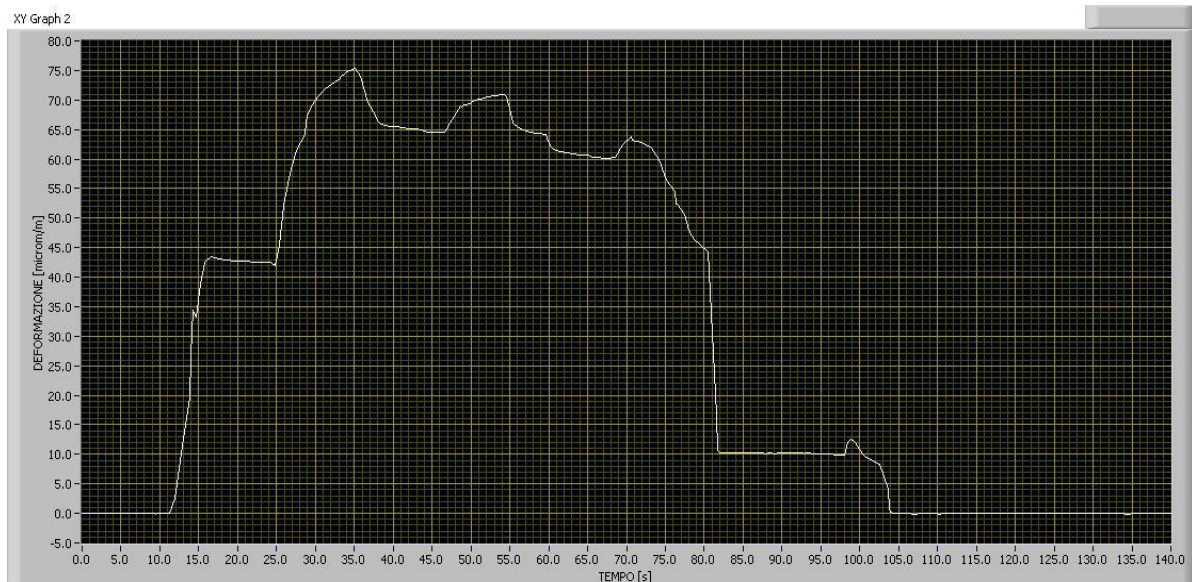


Figura 3.16 *Grafico deformazione/tempo.*

3.3 Elaborazione dati

Introdotti tutti i valori della deformazione della cella ε_1 registrati durante ogni prova in un foglio *Excel* è stata calcolata la lettura del ponte di Wheatstone ε' .

Infatti essendo:

$$\varepsilon' = 2(1 + \nu)\varepsilon_1$$

dove:

- ε' è la lettura del ponte
- ν è il coefficiente di Poisson
- ε_1 è la deformazione della cella di carico

Perciò si ricava facilmente la lettura del ponte ε' .

A questo punto si ricava la forza F alla quale è sottoposta la cella di carico, cioè la somma delle forze a cui sono sottoposti i provini, poiché si conoscono i parametri della retta di taratura infatti:

$$F = m\varepsilon' + q$$

dove m ed q sono i parametri riportati a pagina 31 della taratura definitiva della cella di carico.

Dimezzando tale forza è possibile trovare la forza F' alla quale è sottoposto ogni singolo provino.

Quindi il massimo valore di F' corrisponde alla massima forza sopportabile da ogni provino.

Una volta eseguite tutte le prova quindi si possono trovare i valori medi e le deviazioni standard della forza a cui il singolo provino cede.

Capitolo 4

Prima campagna di prove: risultati e discussione

Sono stati testati 10 provini in 5 prove (2 provini alla volta).

Di seguito vengono riportati i risultati di ogni prova in particolare il grafico *deformazione cella/tempo*, resistenza e dettagli della zona di rottura.

Da ora in poi si usa, per comodità, la notazione S1S2, S3S4, eccetera, per indicare i provini testati dove la S sta per “saldato”.

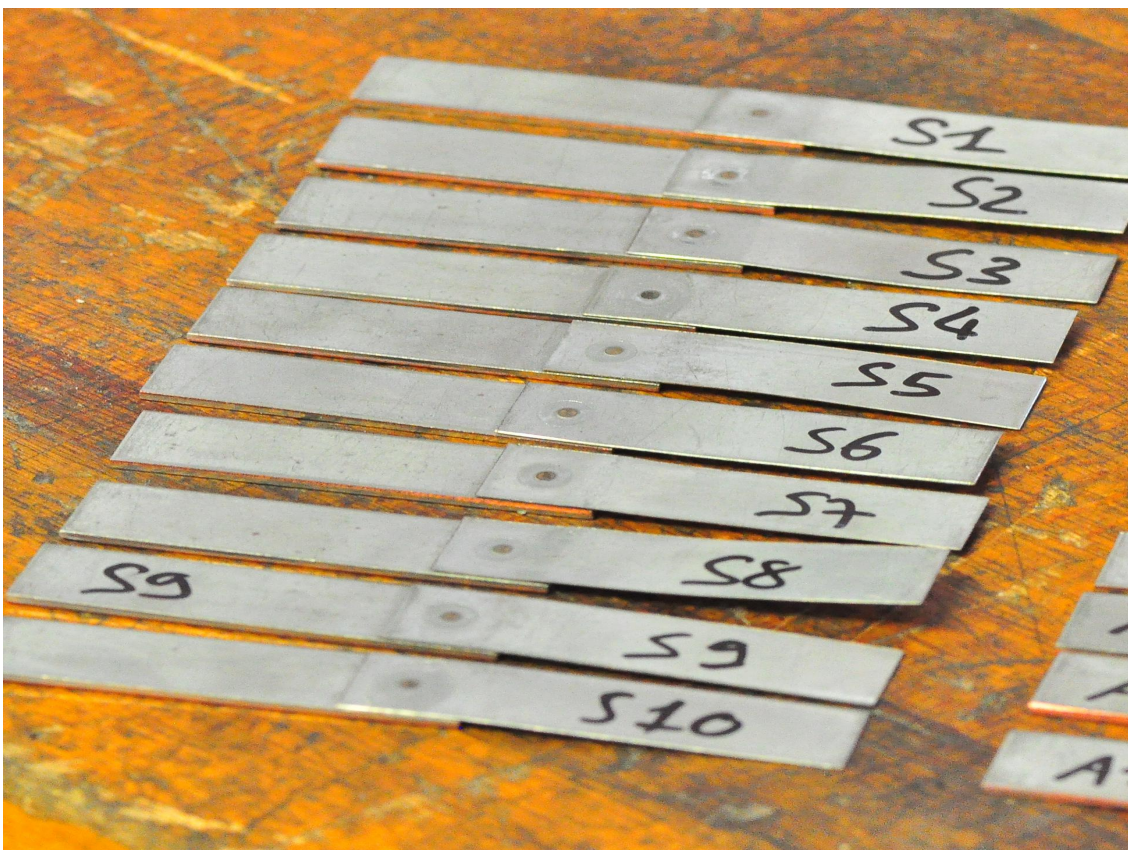


Figura 4.1 *Provini da testare.*

4.1 Provini S1 e S2

La rottura è avvenuta in entrambi i provini proprio nel punto di saldatura (Figura 4.3).

I provini in oggetto hanno resistito ad una forza massima $F = 1073,6 N$, dalla quale ci si riconduce ad una resistenza di ogni singola giunzione di $F' = 536,8 N$.

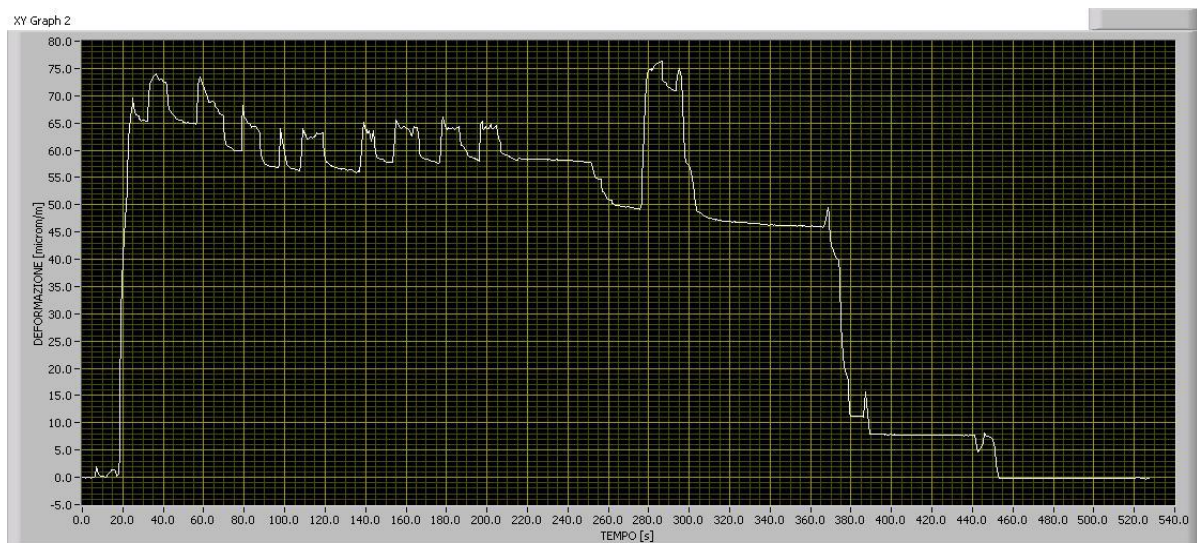


Figura 4.2 *Andamento deformazione cella/tempo.*



Figura 4.3 *Dettaglio delle zone di rotture dei due provini.*

4.2 Provini S3 e S4

I provini in oggetto hanno resistito ad una forza massima $F=1092\text{ N}$, dalla quale ci si riconduce ad una resistenza di ogni singola giunzione di $F'=546\text{ N}$.

La rottura è avvenuta in entrambi i provini proprio nel punto di saldatura (Figura 4.4).

L'intorno della zona di rottura del provino S4 presenta un' anomalia rispetto agli altri. Infatti si può osservare come la stagnatura sia differente dagli altri provini, probabilmente questo a causa di una propagazione eccessiva di calore durante il processo di saldatura che ha fuso temporaneamente il rivestimento di stagno (Figura 4.5).

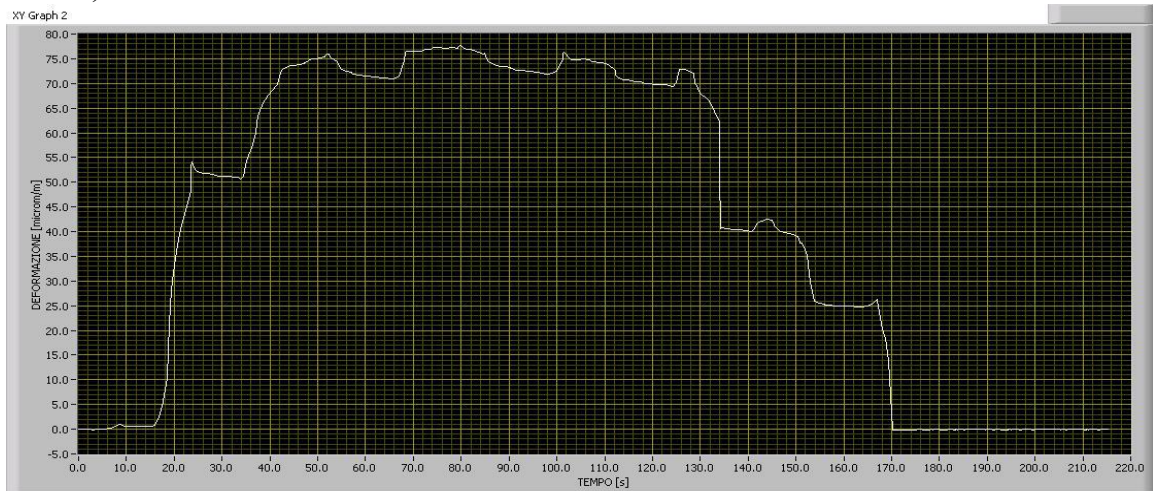


Figura 4.4 *Andamento deformazione cella/tempo.*



Figura 4.5 *Dettaglio delle zone di rotture dei due provini.*

4.3 Provini S5 e S6

La rottura è avvenuta in entrambi i provini proprio nel punto di saldatura (Figura 4.7).

I provini in oggetto hanno resistito ad una forza massima $F = 1060,4 N$, dalla quale ci si riconduce ad una resistenza di ogni singola giunzione di $F' = 530,2 N$.

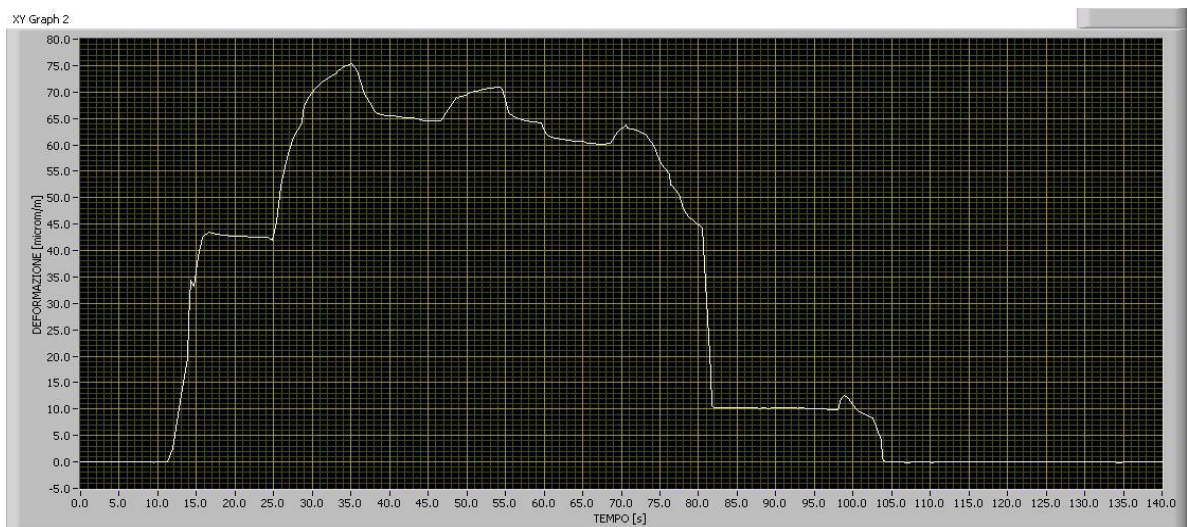


Figura 4.6 *Andamento deformazione cella/tempo.*

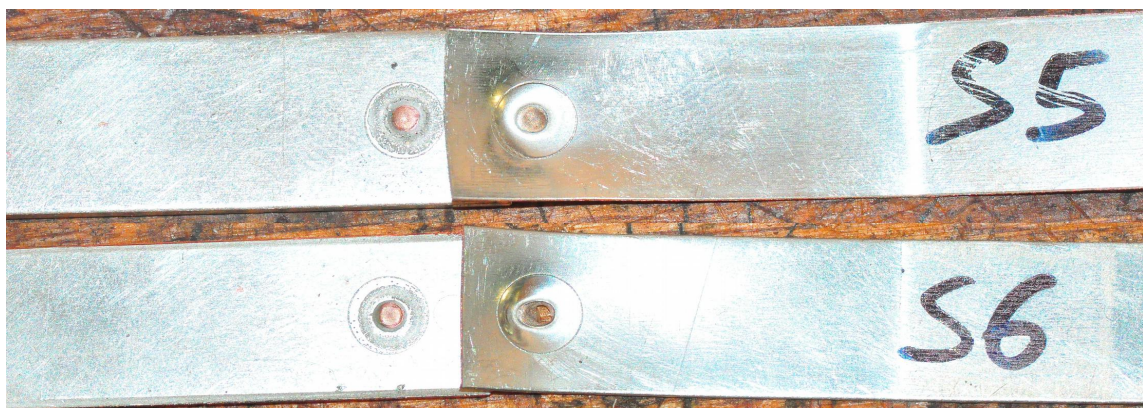


Figura 4.7 *Dettaglio delle zone di rotture dei due provini.*

4.4 Provini S7 e S8

La rottura è avvenuta in entrambi i provini proprio nel punto di saldatura (Figura 4.9).

I provini in oggetto hanno resistito ad una forza massima $F = 1158,8 N$, dalla quale ci si riconduce ad una resistenza di ogni singola giunzione di $F' = 579,4 N$.

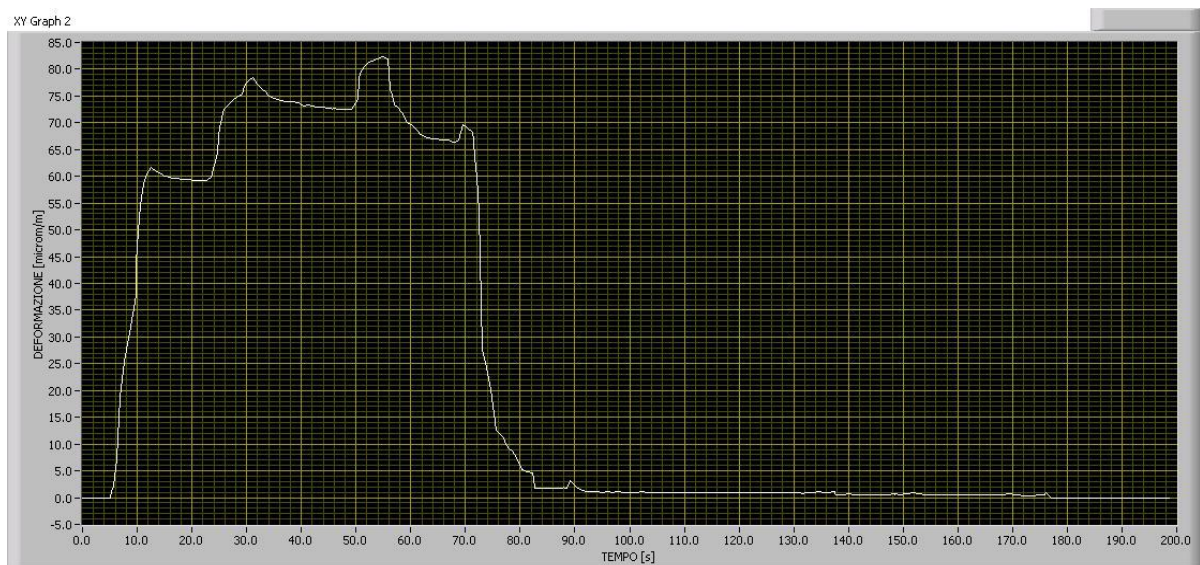


Figura 4.8 *Andamento deformazione cella/tempo.*

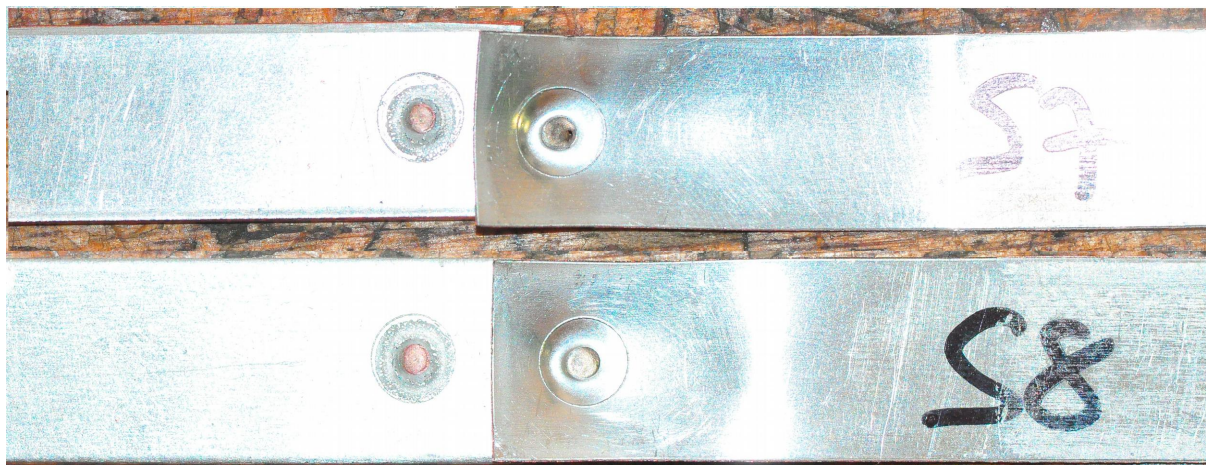


Figura 4.9 *Dettaglio delle zone di rotture dei due provini.*

4.5 Provini S9 e S10

Come nel caso del provino S4 l'intorno della zona di rottura del provino S10 presenta un'anomalia rispetto agli altri. Infatti si può osservare come la stagnatura sia differente dagli altri provini, probabilmente questo a causa di una propagazione eccessiva di calore durante il processo di saldatura che ha fuso temporaneamente il rivestimento di stagno (Figura 4.11).

I provini in oggetto hanno resistito ad una forza massima $F = 1190,8 N$, dalla quale ci si riconduce ad una resistenza di ogni singola giunzione di $F' = 595,4 N$.

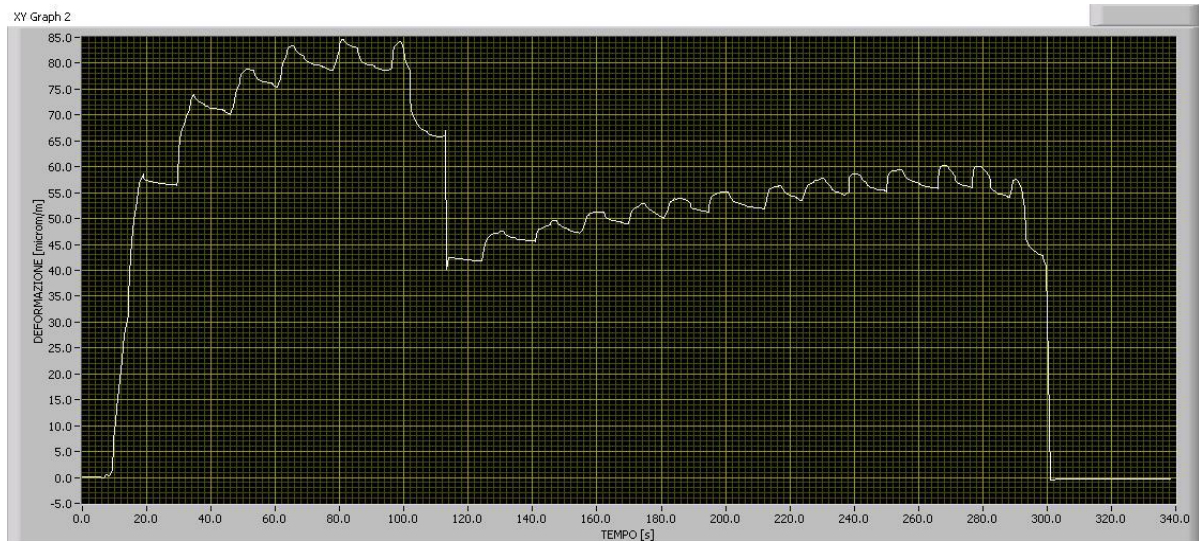


Figura 4.10 *Andamento deformazione cella/tempo.*

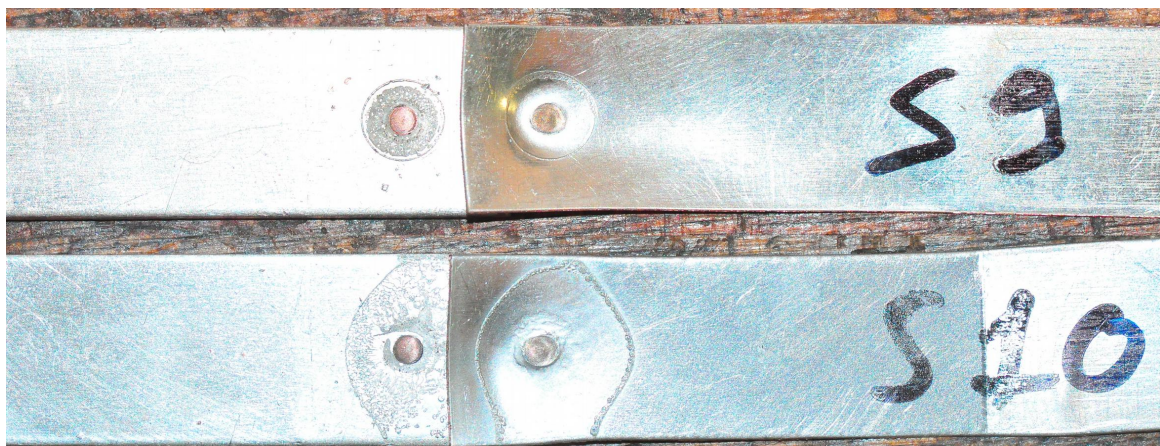


Figura 4.11 *Dettaglio delle zone di rotture dei due provini.*

4.6 Considerazioni finali

Tutti i provini si sono rotti nella zona di giunzione, cioè nel punto di saldatura, senza presentare anomalie.

Durante ogni prova si è assistito ad un rialzamento della parte scarica del lamierino più sottile del provino.

Dai grafici *deformazione celle/tempo* si può osservare come vi sia presenza di massimi relativi corrispondenti al momento in cui si interrompe temporaneamente l'avvitamento seguiti da piccole riduzioni della deformazione, associabili a snervamenti del punto di saldatura del provino.

I risultati delle prove sono mostrati nella Tabella 4.1 e in Figura 4.12.

Provini	Lettura ponte ϵ' [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Forza agente sulla cella F [N]	Forza massima su un provino F' [N]
S1S2	203	1073,6	536,8
S3S4	206	1092,1	546
S5S6	200	1060,4	530,2
S7S8	219	1158,8	579,4
S9S10	225	1190,8	595,4
Valore medio	211	1115	558
Dev. Standard	10,58	56,73	25,37

Tabella 4.1

Il valore di forza alla quale resiste il singolo provino è molto inferiore al valore atteso comunicato dall'azienda, tuttavia il valore della deviazione standard indica che il processo produttivo offre una buona ripetibilità in termini di resistenza.

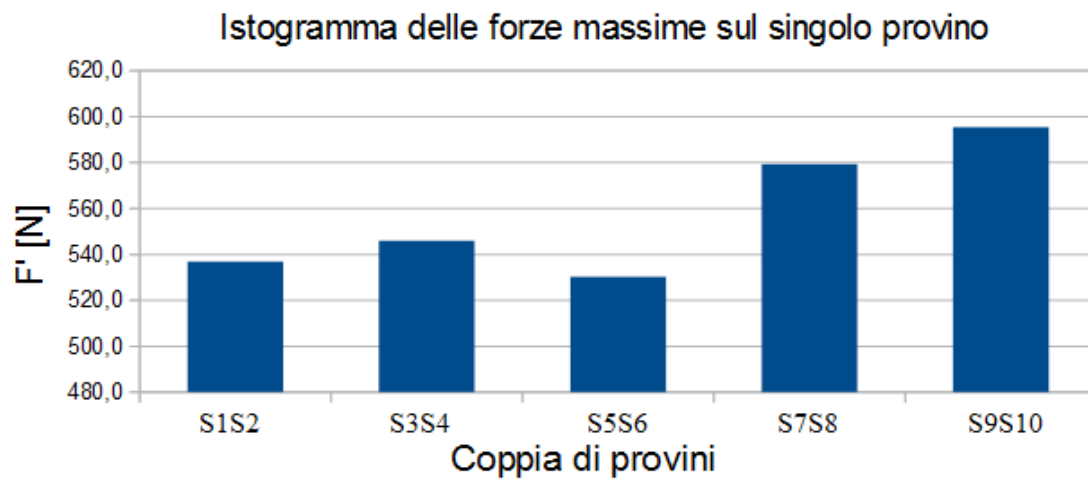


Figura 4.12

elettrodi di rame rivestiti con stagno.

Viene utilizzata la brasatura dolce, in modo da non raggiungere temperature tali da compromettere la funzionalità del condensatore.

In questo caso durante il processo di saldatura non viene sfruttato principalmente il fenomeno della capillarità, perché questo richiederebbe il riscaldamento prolungato sia del condensatore che degli elettrodi per dare tempo alla fase liquida di penetrare nel meato. Infatti la resistenza dell'accoppiamento è data da uno spessore rilevante (maggiore di 0,4 mm) del materiale d'apporto solidificato che lambisce il bordo del lamierino costituente l'elettrodo.

Il componente in esame è semi-finito poiché andrebbe inglobato in un corpo polimerico.

5.1.2. Progetto dell'esperimento

Per la determinazione della forza di rottura delle giunzione *corpo del condensatore/elettrodi*, anche in questo caso, si è deciso di usare una cella di carico estensimetrica in modo da ricondursi alla forza dalla lettura della cella di carico.

La prova viene eseguita direttamente su un singolo componente.

Il corpo del condensatore viene direttamente fissato a telaio mediante una morsa mentre gli elettrodi vengono fissati alla cella di carico, avendo cura che questi ultimi rimangano paralleli tra loro, tramite collegamenti per attrito azionati da viti.

Per tale motivo si è deciso di usare una cella di carico già esistente, fabbricata in alluminio EN-AW 6082-T6 e progettata per un carico massimo di 1 kN (visibile in Figura 5.2) visto che l'azienda ha comunicato una resistenza attesa inferiore a 1000 N .

Le caratteristiche meccaniche e geometriche di tale cella sono:

- sezione resistente $A=24\text{mm}^2$;
- modulo di Young $E=75000\text{MPa}$;
- coefficiente di Poisson $\nu=0,3$;

La cella in questione era già strumentata con 4 estensimetri della *HBM* codice “2LY11” (le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 5.1) disposti sul ponte di

Wheatstone secondo la configurazione a “ponte intero” per la quale valgono le stesse considerazioni fatte a pagina 24 per la cella di carico della prima campagna di prove.

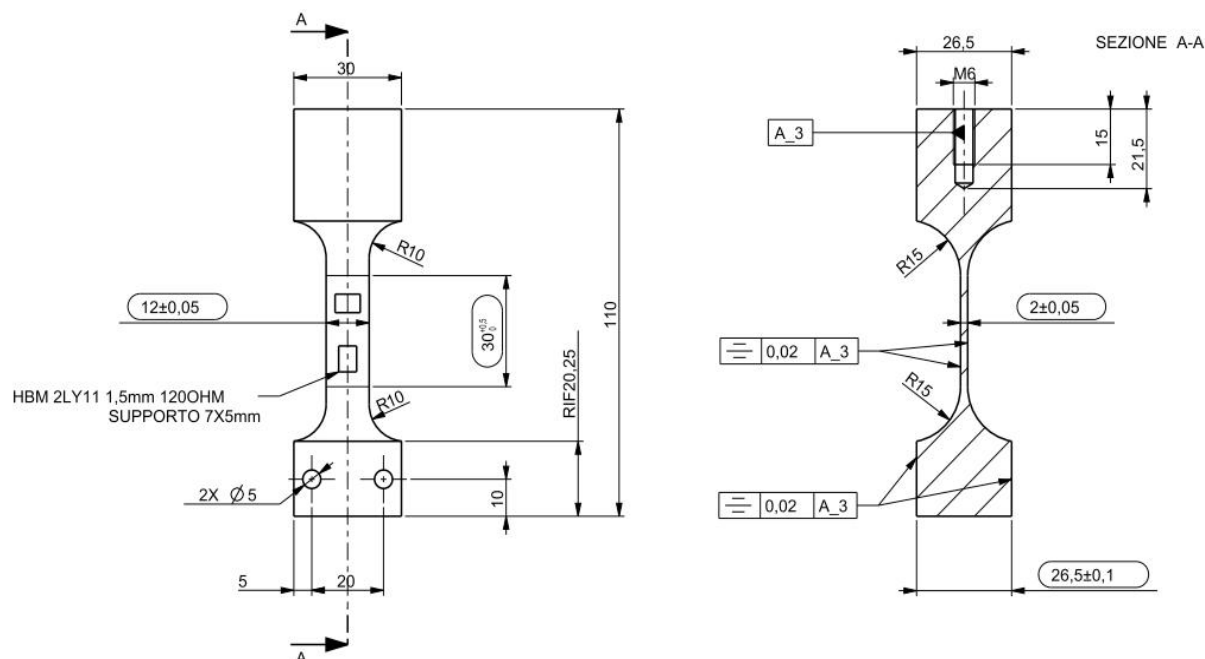


Figura 5.2 Disegno costruttivo cella di carico.

Grid resistance in Ohms	120,0±0.5%
Gage factor at 24°C (Grid 1)	1,89±0.5%
Transverse sensitivity (Grid 1)	(+1,9±0.2)%

Tabella 5.1 Carta dell'estensimetro.

La taratura già eseguita di tale cella forniva la relazione esatta tra lettura del ponte ε' e forza F . Infatti vale la relazione $F = m\varepsilon' + q$ dove:

- coefficiente angolare: $m = 0,6908 * 10^6 N$,
- intercetta asse F: $q = 2,292 N$.

Per scrupolo si è verificato che la taratura fosse corretta applicando l'analisi, da questa si ricava che la retta teorica di taratura $F = m'\varepsilon' + q'$ possiede i coefficienti:

- coefficiente angolare: $m' = \frac{EA}{2(1+\nu)} = 0,6923 * 10^6 N$,

- intercetta asse F: $q' = 0 N$.

Per cui si può affermare che la taratura è corretta.

La configurazione del banco di prova è analogo a quello della prima campagna, infatti anche in questo caso la cella presenta un foro filettato nella testa opposta a quella dove vengono afferrati gli elettrodi. In tale foro viene alloggiata una vite prigioniera che serve per la movimentazione della cella. Avvitando manualmente il dado presente nella vite prigioniera, che appoggia su una lamiera fissa, si muove la cella.

La testa recante il foro filettato appoggia su una piastrina fissa che impedisce la rotazione della cella e, come nel caso della prima campagna, questo impedisce all'attrito di influenzare la prova e misurare quindi l'effettiva forza alla quale sono sottoposti i provini.

Fondamentale è che l'insieme elettrodi e cella di carico sia allineato con la direzione della forza impressa, coincidente con l'asse della cella cioè della vite prigioniera ed anche che all'atto del serraggio le porzioni degli elettrodi non all'interno delle morse sulla cella siano uguali, altrimenti durante la prova si potrebbe verificare che un elettrodo assorba una quota maggiore di forza, falsando la misura.

Un esempio della preparazione del banco di prova è visibile in Figura 5.3 .



Figura 5.3 Banco di prova 1.

5.2 Procedura sperimentale

La totalità delle prove è stata condotta sul banco allestito come descritto sopra.

Il ponte di Wheatstone è stato collegato alla centralina della *Vishay Micro-measurements* modello “P-3500 strain indicator” che ha permesso di

visualizzare la progressione in tempo reale, tramite un display, del valore della deformazione uscente dal ponte in $\mu\text{m}/\text{m}$ (Figura 5.4).

Ogni prova è iniziata con il provino, quindi anche la cella, completamente scarichi. Si è aumentata progressivamente la forza e, tenendo sempre sotto controllo visivo la centralina, si è arrivati alla rottura registrando il valore di deformazione indicato dalla centralina.

La prova è terminata non appena uno dei due elettrodi ha ceduto.

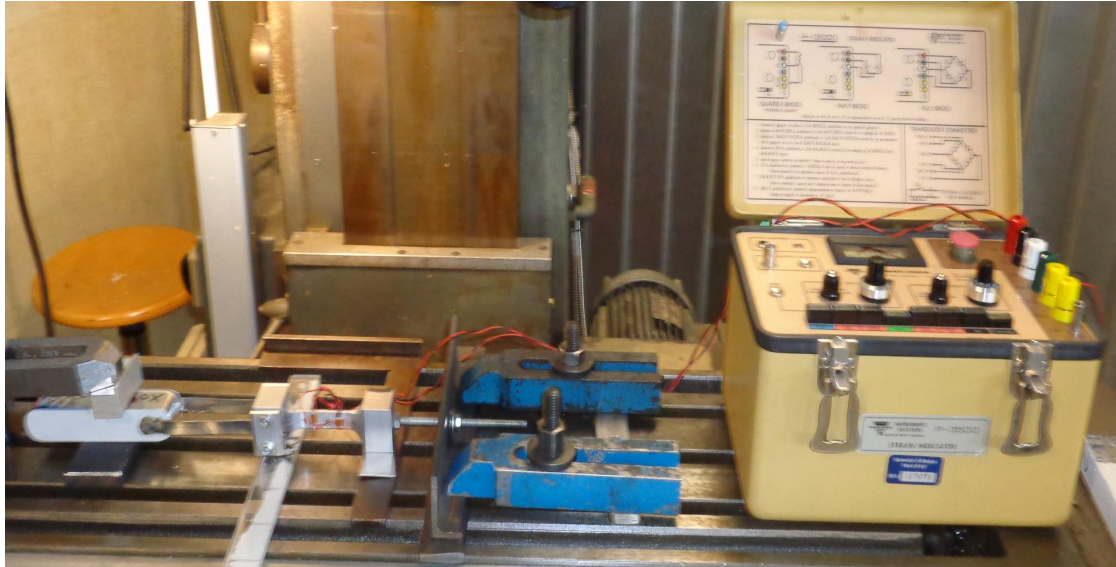


Figura 5.4 Banco di prova 2.

Il momento della rottura è stato facilmente prevedibile in quanto poco prima che si verificasse si è assistito ad una diminuzione della coppia da applicare al dado per far muovere la cella.

5.3 Elaborazione dati

Introdotti i valori massimi delle letture del ponte trovati per ogni prova, in un foglio *Excel* si è calcolato il valore della forza corrispondente.

Infatti conoscendo la retta di taratura della cella di carico, cioè la relazione tra forza F e lettura del ponte ε' , si ricava la forza alla quale sono sottoposti i provini: $F = m\varepsilon' + q$.

A questo punto si è divisa tale forza per due in modo da ricondursi alla forza F' alla quale è soggetta un singolo elettrodo del condensatore: $F' = F/2$.

Quindi si sono calcolati i valori medi e le deviazioni standard dei valori delle letture ε' , delle forze F e infine delle forze F'.

Capitolo 6

Seconda campagna di prove: risultati e discussione

Sono stati forniti 10 condensatori, quindi si sono eseguite 10 prove.

Di seguito vengono riportati i risultati di ogni prova, in particolare la resistenza riscontrata e dei dettagli della zona di rottura.

6.1 Provino 1

Il provino in oggetto ha ceduto nel punto di saldatura (Figura 6.1) resistendo ad una forza totale pari a $F = 693,1 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F' = 346,5 N$.



Figura 6.1 Dettaglio della rottura del provino 1.

6.2 Provino 2

Il provino in oggetto ha ceduto nel punto di saldatura (Figura 6.2) resistendo ad una forza totale pari a $F = 662,7 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F' = 331,3 N$.



Figura 6.2 *Dettaglio della rottura del provino 2.*

6.3 Provino 3

Il provino in oggetto ha ceduto rompendosi nell'elettrodo (Figura 6.3) resistendo ad una forza totale pari a $F=662,7 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F'=331,3 N$.

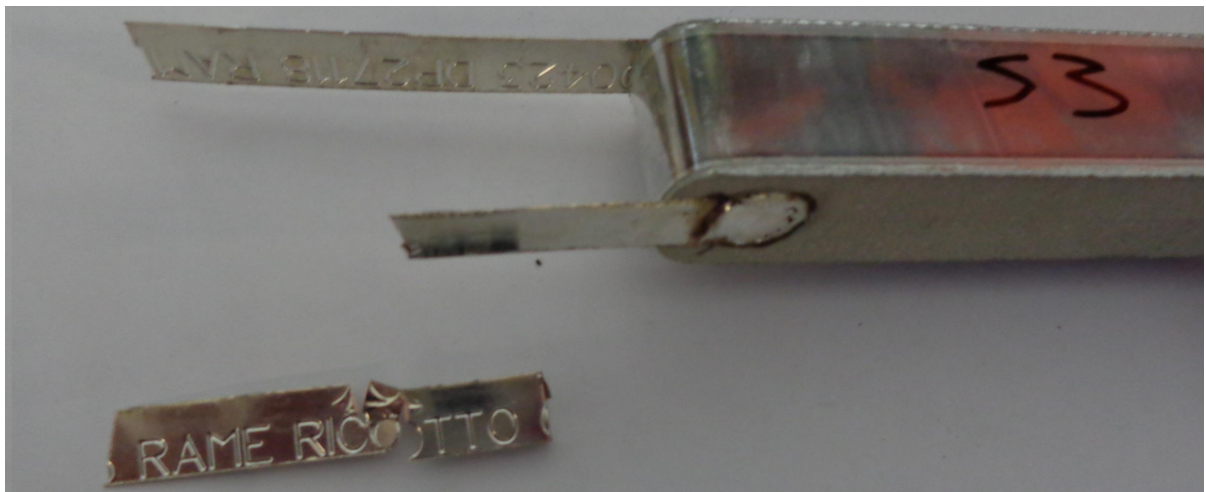


Figura 6.3 *Dettaglio della rottura del provino 3.*

Si osservi che in questo caso l'elettrodo è stampigliato.

6.4 Provino 4

Il provino in oggetto ha ceduto nel punto di saldatura (Figura 6.4) resistendo ad una forza totale pari a $F = 762,2 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F' = 381,1 N$.



Figura 6.4 Dettaglio della rottura del provino 4.

6.5 Provino 5

Il provino in oggetto ha ceduto rompendosi nell'elettrodo (Figura 6.5) resistendo ad una forza totale pari a $F = 503,1 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F' = 251,6 N$.

Anche in questo caso l'elettrodo è stampigliato.



Figura 6.5 Dettaglio della rottura del provino 5.

6.6 Provino 6

Il provino in oggetto ha ceduto nel punto di saldatura (Figura 6.6) resistendo ad una forza totale pari a $F=858,9 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo par a $F'=429,4 N$.

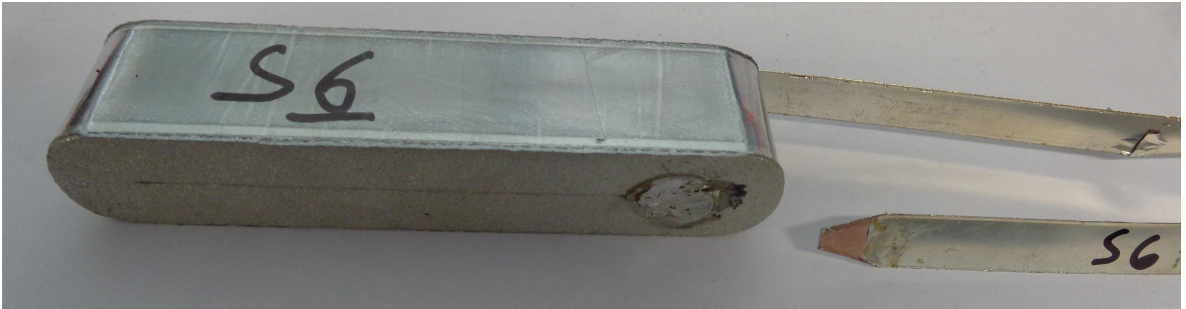


Figura 6.6 *Dettaglio della rottura del provino 6.*

6.7 Provino 7

Il provino in oggetto ha ceduto rompendosi nell'elettrodo (Figura 6.7) resistendo ad una forza totale pari a $F=976,3 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo par a $F'=488,2 N$.

Anche in questo caso gli elettrodi sono stampigliati.

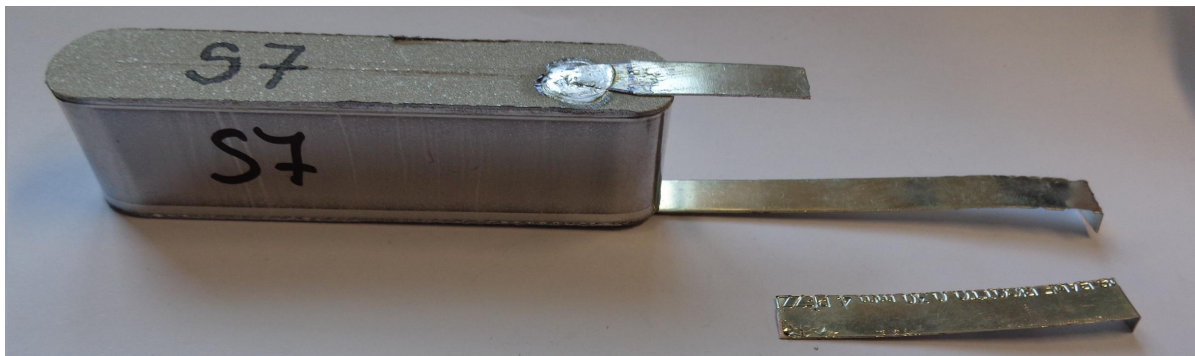


Figura 6.7 *Dettaglio della rottura del provino 7.*

6.8 Provino 8

Il provino in oggetto ha ceduto nel punto di saldatura (Figura 6.8) resistendo ad una forza totale pari a $F=997\text{ N}$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F'=498,5\text{ N}$.



Figura 6.8 *Dettaglio della rottura del provino 8.*

6.9 Provino 9

Il provino in oggetto ha ceduto rompendosi nell'elettrodo vicino al punto di saldatura (Figura 6.9) resistendo ad una forza totale pari a $F=603,3\text{ N}$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo pari a $F'=301,6\text{ N}$. Anche in questo caso gli elettrodi sono stampigliati.



Figura 6.9 *Dettaglio della rottura del provino 9.*

6.10 Provino 10

Il provino in oggetto ha ceduto rompendosi nell'elettrodo (Figura 6.10) resistendo ad una forza totale pari a $F=582,6 N$, dalla quale ci si riconduce alla forza del singolo elettrodo par a $F'=291,3 N$.
Anche in questo caso gli elettrodi sono stampigliati.

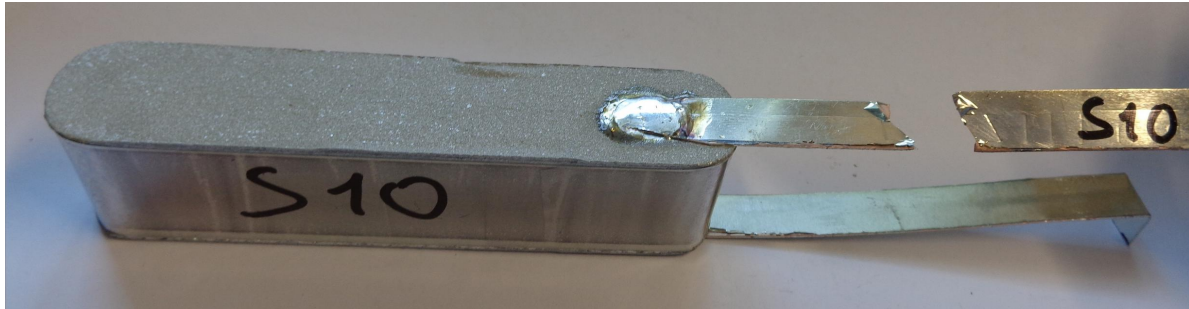


Figura 6.10 Dettaglio della rottura del provino 10.

6.11 Considerazioni finali

In questa campagna si sono verificate due differenti tipologie di rottura:

1. rottura dell'elettrodo,
2. rottura del punto di saldatura.

La ripartizione dei tipi di rottura è stata del 50%.

In particolare la rottura di tipo 1 si è verificata unicamente nei provini aventi elettrodi stampigliati. Tale caratteristica introduce una concentrazione di tensioni rilevante nell'elettrodo, portandolo a rottura per forze non sufficienti alla rottura del punto di saldatura (Figura 6.10).



Figura 6.10 Rottura di tipo 1 (sinistra) e rottura di tipo 2 (destra).

Si può osservare inoltre come nella rottura di tipo 1 si ha il cedimento del solo punto di saldatura e asportazione di una parte della stagnatura che riveste l'elettrodo.

I risultati delle prove sono visibili in Tabella 6.1 e in Figura 6.11.

Provini	Letture ponte ϵ' [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Forza agente cella F [N]	Forza agente sul singolo elettrodo F' [N]	Tipo di rottura
S1	1000	693,1	346,5	2
S2	956	662,7	331,3	2
S3	900	624	312	1
S4	1100	762,2	381,1	2
S5	725	503,1	251,6	1
S6	1240	858,9	429,4	2
S7	1410	976,3	488,2	1
S8	1440	997	498,5	2
S9	870	603,3	301,6	1
S10	840	582,6	291,3	1
Valore medio	1048	726,3	363,2	
Dev. Standard	244,09	168,6	84,3	

Tabella 6.1

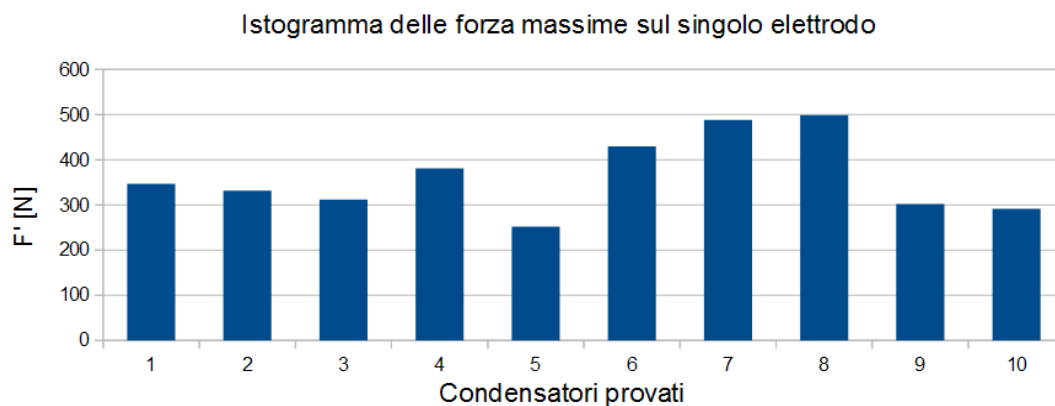


Figura 6.11

Si è preliminarmente osservato che la stampigliatura presente nell'elettrodo avrebbe potuto comportare un abbassamento delle prestazioni medie del condensatore, quindi lo si è verificato considerando separatamente i provini che hanno riscontrato esclusivamente una rottura di tipo 1 e poi una rottura di tipo 2.

Considerando esclusivamente i condensatori che hanno ceduto rompendosi nel punto di stagnatura, cioè rottura di tipo 2 (Tabella 6.2), si osserva come il valore medio della forza resistente sul singolo elettrodo cresca (da 363,2 N a 397,4 N) e come la deviazione standard di tale forza decresca (da 84,3 a 67,9).

Provini	Letture ponte ε' [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Forza agente sulla cella F [N]	Forza agente sul singolo elettrodo F' [N]
S1	1000	693,1	346,5
S2	956	662,7	331,3
S4	1100	762,2	381,1
S6	1240	858,9	429,4
S8	1440	997	498,5
Valore medio	1147,2	794,8	397,4
Dev. Standard	196,7	135,9	67,9

Tabella 6.2 Sintesi dei risultati dei condensatori che hanno ceduto nel punto di stagnatura.

Se invece si considerano solo i provini che hanno ceduto nell'elettrodo (Tabella 6.3) si riscontra che il valore medio della forza resistente sul singolo elettrodo decresce (da 363,2 N a 328,9 N) e come la deviazione standard di tale forza cresce (da 84,3 a 91,9).

Provini	Lettura ponte ε' [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Forza agente sulla cella F [N]	Forza agente sul singolo elettrodo F' [N]
S3	900	624	312
S5	725	503,1	251,6
S7	1410	976,3	488,2
S9	870	603,3	301,6
S10	840	582,6	291,3
Valore medio	949	657,9	328,9
Dev. Standard	266,1	183,8	91,9

Tabella 6.2 Sintesi dei risultati dei condensatori che hanno ceduto nell'elettrodo.

Le evidenze di queste osservazioni sono visibili nell'istogramma in Figura 6.12.

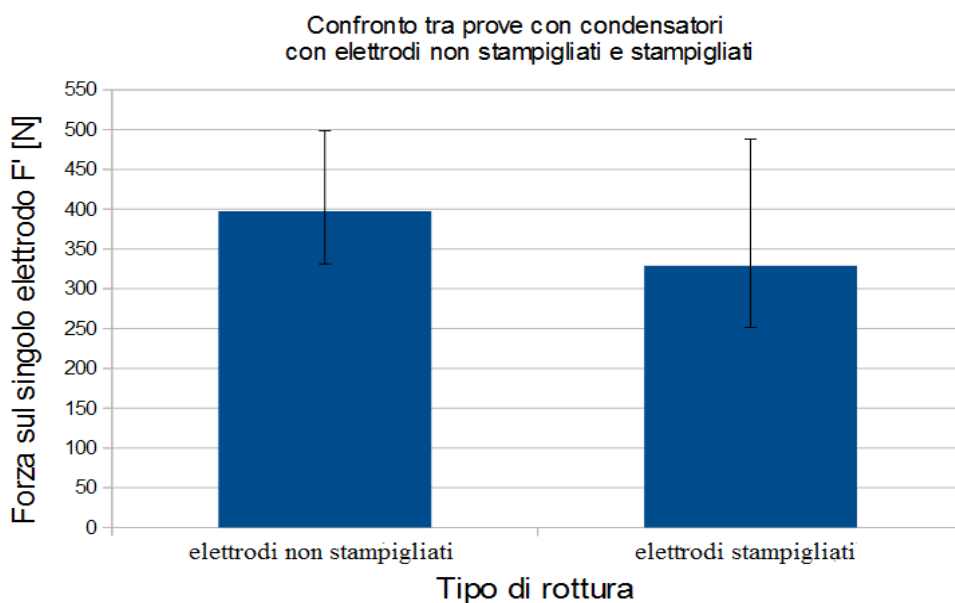


Figura 6.12 Iistogramma dei valori medi delle forze F' con relativi range di variazione nei due tipi di rottura.

Si potrebbe affermare prematuramente che la stampigliatura porta a un decadimento certo delle prestazioni meccaniche del componente, quindi per trarre conclusioni più esatte si è svolta un' ANOVA (“analisi della varianza”) ad un fattore relativa alla forza sul singolo provino F' .

Il fattore in questione presenta due soli livelli che sono rispettivamente la presenza o meno della stampigliatura sugli elettrodi; per ogni livello si sono considerate 5 ripetizioni.

ripetizioni	Elettrodi stampigliati: F' [N]	Elettrodi non stampigliati: F' [N]	
1	346,5	312	
2	331,3	251,6	
3	381,1	488,2	
4	429,4	301,6	
5	498,5	291,3	Media totale [N]
Medie sul livello [N]	397,4	328,9	363,2

Tabella 6.3 ANOVA ad un fattore.

Considerando la Tabella 6.3 si è proceduto calcolando:

1. la varianza legata alla variabilità fra i livelli del fattore $SSBc$ (“Sum of Squares Between Columns”):

$$SSBc = 5 * [(397,4 - 363,2)^2 + (328,9 - 363,2)^2] = 11716,17 N^2 ,$$

2. la varianza legata all'influenza di tutti i fattori, tranne quello considerato, cioè tutti quei fattori che determinano l'incertezza sperimentale $SSWc$ (“Sum of Squares Within Columns”):

$$SSWc = (346,5 - 397,4)^2 + (331,3 - 397,4)^2 + (381,1 - 397,4)^2 + (429,4 - 397,4)^2 + (498,5 - 397,4)^2 + (312,0 - 328,9)^2 + (251,6 - 328,9)^2 + (488,2 - 328,9)^2 + (301,6 - 328,9)^2 + (291,3 - 328,9)^2 = 52255,16 N^2$$

Tali grandezze non possono non essendo direttamente confrontabili quindi sono state divise per i rispettivi gradi di libertà, cioè per il numero di confronti possibili:

1. $SSBc$ misura la varianza fra le colonne della Tabella 6.3 quindi ha un grado di libertà:

$$MSBc = \frac{SSBc}{1} = SSBc = 11716,17 N^2 ,$$

2. SSW_c misura la varianza fra le righe per ogni colonna della Tabella 6.3 quindi ha $2*(5-1)=8$ gradi di libertà:

$$MSW = \frac{SSW_c}{8} = 6531,89 N^2 .$$

Si è trovato quindi il rapporto:

$$F_{calc.} = \frac{MSB_c}{MSW} = 1,7936 ,$$

che essendo maggiore di uno suggerisce che il fattore potrebbe influenzare la resistenza meccanica del condensatore.

Per averne la certezza si è calcolato il livello di significatività dei risultati ottenuti tramite la distribuzione di Fisher con l'ausilio di *Excel*.

Il valore ottenuto, 21,73%, indica che il fattore non influenza significativamente la resistenza del componente in quanto solitamente esso deve essere inferiore al 5%.

VARIANZ A	SSQ	GdL	MSQ	F_{calc}	p_value
SSBc	11716,17	1	11716,17	1,7936	21,73%
SSWc	52255,16	8	6531,89		
Toltale	63971,33	9			

Tabella 6.5 Sintesi dell'ANOVA.

Si è svolta un'ulteriore ANOVA in quanto per ognuno dei due livelli del fattore vi è la presenza di dati (ripetizioni) che “sporcano” i risultati, ed essi sono relativi ai condensatori testati:

- S8 per la porzione di condensatori con elettrodi non stampigliati,
- S7 per la porzione di condensatori con elettrodi stampigliati (si osservi in Figura 6.7 che tale condensatore ha la stampigliatura sugli elettrodi non centrata come in tutti gli altri casi).

Questi due dati falsano il risultato dell'ANOVA, in quanto per i relativi livelli entrambi aumentano la media ma anche la deviazione. Il risultato della loro eliminazione lo si può comprendere meglio confrontando gli istogrammi in Figura 6.12 e in Figura 6.13. In Figura 6.13 si può notare come non vi siano sovrapposizioni dei campi dei dati per entrambi i livelli, suggerendo proprio che

il fattore possa influenzare la resistenza, osservazione che non può essere fatta invece per la Figura 6.12.

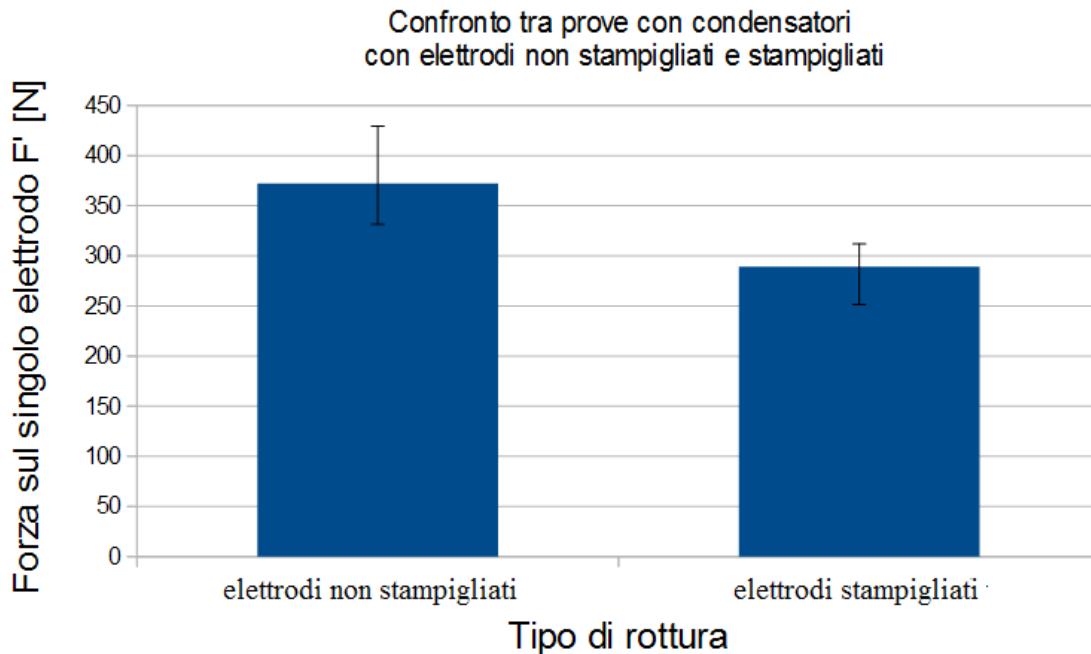


Figura 6.13 Istogramma dei valori medi delle forze F' con relativi range di variazione nei due tipi di rottura eliminando i condensatori S7 e S8.

ripetizioni	Elettrodi non stampigliati: F' [N]	Elettrodi stampigliati: F' [N]	
1	346,5	312	
2	331,3	251,6	
3	381,1	301,6	
4	429,4	291,3	Media totale [N]
Medie sul livello [N]	372,1	289,1	330,6

Tabella 6.5 ANOVA ad un fattore eliminando i dati dei condensatori S7 e S8.

Considerando la Tabella 6.5 si è proceduto calcolando nuovamente:

1. la varianza legata alla variabilità fra i livelli del fattore SS_{Bc}:

$$SSBc = 4 * [(372,1 - 330,6)^2 + (289,1 - 330,6)^2] = 13771,4 N^2 ,$$

2. la varianza legata all'influenza di tutti i fattori tranne quello considerato SSWc:

$$SSWc = (346,5 - 330,6)^2 + (331,3 - 330,6)^2 + (381,1 - 330,6)^2 + (429,4 - 330,6)^2 + (312,0 - 289,1)^2 + (251,6 - 289,1)^2 + (301,6 - 289,1)^2 + (291,3 - 289,1)^2 = 7778,41 N^2 .$$

Dividendo tali grandezze per i rispettivi gradi di libertà si è potuto operare un confronto diretto:

1. SSBc misura la varianza fra le colonne della Tabella 6.4 quindi ha un grado di libertà:

$$MSBc = \frac{SSBc}{1} = SSBc = 13771,4 N^2 ,$$

2. SSWc misura la varianza fra le righe per ogni colonna della Tabella 6.4 quindi ha $2 * (4 - 1) = 6$ gradi di libertà:

$$MSW = \frac{SSWc}{6} = 1296,40 N^2 .$$

Si è trovato quindi il rapporto:

$$F_{calc.} = \frac{MSBc}{MSW} = 10,623$$

che essendo maggiore di uno suggerisce ancora che il fattore potrebbe influenzare la resistenza meccanica del condensatore.

Per averne la certezza si è calcolato il livello di significatività dei risultati ottenuti tramite la distribuzione di Fisher con l'ausilio di *Excel*.

Il valore ottenuto, 1,73%, indica che il fattore influenza significativamente la resistenza del componente visto che solitamente esso deve essere inferiore al 5%, come già detto.

VARIANZA	SSQ	GdL	MSQ	F _{calc}	p_value
SSBc	13771,4	1	13771,4	10,623	1,73%
SSWc	7778,41	6	1296,4		
Toltale	21549,81	7			

Tabella 6.6 Sintesi dell'ANOVA.

Quindi si può concludere affermando che la presenza di elettrodi stampigliati nei

condensatori produca un decadimento delle prestazioni meccaniche del componente in quanto abbassa il valore medio e la deviazione della forza sopportabile.

E' consigliabile quindi che l'azienda non utilizzi più rame recante stampigliatura per realizzare gli elettrodi dei condensatori, anche perché questo sicuramente non induce a incremento dei costi di produzione.

Infine si è calcolato il coefficiente di concentrazione delle tensioni massimo $K_{E_{max}}$ che introduce la stampigliatura nell'elettrodo.

Visto che il produttore non ha fornito le caratteristiche meccaniche del rame ricotto di cui sono costituiti gli elettrodi si è presa come tensione ammissibile σ_{amm} la tensione massima a cui è stato sottoposto l'elettrodo del provino S8, in quanto in questo non si sono riscontrate anomalie.

$$\sigma_{amm} = F' / A = 498,5 / 0,3 * 10 = 166,2 \text{ MPa} .$$

La tensione di rottura minima di rottura $\sigma_{R_{min}}$ dell'elettrodo stampigliato la si ha per il provino S5 vale:

$$\sigma_{R_{min}} = F'_{S5} / A = 251,6 / 0,3 * 10 = 83,9 \text{ MPa}$$

Quindi si può stimare un coefficiente di concentrazione delle tensioni massimo pari a:

$$K_{E_{max}} = \sigma_{amm} / \sigma_{R_{min}} = 166,2 / 83,9 = 1,98 .$$

Conclusioni

Il lavoro di Tesi analizzato nelle pagine precedenti, ha permesso la realizzazione di due banchi di prova per la determinazione del carico di rottura delle saldature con riferimento a due tipologie di provini. Le prove sono state eseguite in due differenti campagne.

Per quanto riguarda la prima, si è determinata la struttura generale del banco di prova, avendo cura che questo permettesse di misurare effettivamente ed in sicurezza la sola forza di rottura. Si è quindi progettata la cella di carico, facendo in modo che avesse una geometria semplice e che permettesse la misurazione con una buona sensibilità- Essa è stata strumentata con estensimetri collegati secondo la configurazione a “ponte intero” di Wheatstone, avendo così la certezza di cancellare eventuali effetti termici, flessioni e torsioni, aumentando ulteriormente la sensibilità.

Successivamente, è stata determinata la serie di strumenti che compone la catena di misura, rendendo possibile l'acquisizione e memorizzazione dei dati per la successiva elaborazione.

Si è passati quindi all'esecuzione della campagna, che ha riguardato 10 provini a coppie, costituiti da lamierini di rame sovrapposti e uniti mediante un punto di saldatura.

Tutti i provini hanno ceduto nella stessa maniera, cioè per scorrimento interfacciale, evidenziando una bassa deviazione standard, indice di un processo produttivo con un'ottima ripetibilità e di una catena di misura esente da disturbi esterni.

Per la seconda campagna di prove si è usata la stessa struttura del banco di prova della prima campagna, utilizzando una cella di carico già esistente, anch'essa strumentata con estensimetri collegati secondo la configurazione a “ponte intero”.

In questo caso si è rilevato soltanto il dato corrispondente alla forza massima.

Sono stati portati a rottura 10 provini, costituiti da condensatori semi-finiti con elettrodi brasati mediante stagnatura.

I provini si sono rotti con due modalità differenti: alcuni per la rottura dell'elettrodo e altri per il cedimento della saldatura. Si è riscontrato che la

rottura dell'elettrodo si è verificata solo quando questo era stampigliato.

Osservando che la presenza o meno della stampigliatura sull'elettrodo avrebbe potuto comportare due livelli di resistenza, si è eseguita una prima Analisi della Varianza con test di Fisher che ha inizialmente escluso tale ipotesi. Tuttavia, la presenza di alcuni dati anomali in entrambe le famiglie di provini (con elettrodi stampigliati e non stampigliati) ha suggerito l'esecuzione di una seconda analisi statistica, eliminando tali dati dalle popolazioni, che ha evidenziato proprio l'effettiva influenza della stampigliatura sulla resistenza del provino.

Si è infine stimato il coefficiente di concentrazione delle tensioni massimo introdotto dalla stampigliatura sull'elettrodo.

Si può quindi affermare che la Tesi, nella sua generalità, potrebbe rappresentare un valido punto di partenza per studi futuri, considerando, ad esempio, anche l'influenza della temperatura sulla resistenza, in quanto i condensatori in esercizio lavorano a temperature maggiori di quella ambientale, ed anche l'influenza della velocità di applicazione del carico.

Bibliografia

1. Alessandro Ascari e Alessandro Fortunato, *Tecnologie di giunzione mediante saldatura Volume 1*, Esculapio, 2007.
2. Ernest O. Doebelin, *Strumenti e metodi di misura*, McGraw-Hill, 2008.
3. Gert Gommola, *Impiego e montaggio delle celle di carico*, Hottinger Bladwin Messtechnik GmbH, 2005.
4. Giangiacomo Minak, *Tecnica delle costruzioni meccaniche*, Dispense ad uso didattico, DIN, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2014.
5. Giorgio Olmi, *Design of Experiment*. Dispense ad uso didattico, DIN, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2013.
6. Majid Pouranvari, *On the failure mode of resistance spot welded 420 steel*, Archives of metallurgy and materials, 2013
7. Karl Hoffman, *Introduzione alla tecnica di misura con gli estensimetri*, Hottinger Bladwin Messtechnik GmbH, 2008.
8. Raffaella Di Sante. *Misure di dimensioni e spostamenti*. Dispense ad uso didattico, DIN, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2013.
9. Raffaella Di Sante. *Misure di massa e forza*. Dispense ad uso didattico, DIN, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2013.
10. Vincenzo Dal Re, *Comportamento meccanico dei materiali L*, Dispense ad uso didattico, DIN, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2013.
11. Wikipedia, *Brasatura*, URL: <http://it.wikipedia.org/wiki/Brasatura>, 2014.

12. Wikipedia, *Saldatura a resistenza*, URL:
http://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura_a_resistenza, 2014.

Ringraziamenti

Innanzitutto vorrei ringraziare i miei genitori che mi hanno aiutato più di tutti, sopportandomi e spronandomi. E' grazie a loro che ho potuto coltivare, fin da piccolo, la mia passione per la meccanica.

Intendo ringraziare anche tutti i miei amici e compagni, dai più datati ai nuovi, poiché insieme alla mia ragazza, Giulia, hanno avuto la forza di sopportarmi nei momenti difficili e stressanti.

Infine desidero ringraziare tutti i docenti e il personale dell'Università di Bologna a cui ho chiesto aiuto tra i quali l'Ingegnere Proli, il Professor De Agostinis e il Professor Ascari. Un particolare ringraziamento va al mio relatore, il Professor Giorgio Olmi, per tutto il tempo che mi ha dedicato, per la sua infinita disponibilità e efficienza “unitaria”.