



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria meccanica

Tesina di Laurea

Proprietà meccaniche dei giunti saldati testa e testa con pattern sinusoidale

Relatore
Prof. Paolo Ferro

Anno Accademico 2022 / 2023

Laureando
Fabiano Leardini
n° matr.1143116

Dedico la tesi alla mia famiglia che mi ha sempre
supportato indipendentemente da tutto

Indice

Capitolo I. Introduzione.....	4
Capitolo II. Materiale e metodi.....	7
Capitolo III. Prova, risultati e discussioni.....	12
Capitolo IV. Conclusione.....	18
Capitolo V. Bibliografia.....	19

Abstract:

Realizzazione di lembi a *pattern* sinusoidali e rettilinei su due diversi lamierini in acciaio inossidabile 304 tramite lavorazione *water-jet*. Unione dei due lembi tramite una saldatura laser, estrazione dai lamierini dei provini per una successiva prova a trazione e confronto tra le proprietà meccaniche.

Keywords: Saldatura Laser, Aisi 304, Prove a trazione, Saldatura pattern sinusoidale, Saldatura pattern rettilinee

I. Introduzione

L'obiettivo prefissato è quello di calcolare la differenza di proprietà meccaniche che si verificano su due provini identici cambiando il *pattern* di saldatura nella mezzeria, si prevede che vi sia una differenza tra i due casi dovuta principalmente all'effetto geometrico della zona saldata. L'iter scelto per la realizzazione dei provini è composto principalmente da tre lavorazioni: prima di tutto si vuole creare il *pattern* rettilineo e sinusoidale sui lamierini, si è optato per una lavorazione a taglio ad acqua con abrasivo *water-jet*. La seconda lavorazione è una saldatura laser, questa è stata scelta in quanto la ZTA (zona termicamente alterata) risultante è di piccole dimensioni assicurandoci quindi che non vi siano sovrapposizioni lungo il *pattern* sinusoidale. Infine si procede con un secondo taglio *water-jet* per l'effettiva estrazione dei provini a osso di cane.

L'operazione più interessante del processo è sicuramente la saldatura laser, il controllo della zona termicamente alterata è infatti un fattore critico per massimizzare le proprietà meccaniche soprattutto in prossimità del giunto saldato, è quindi importante studiare questo fenomeno per poter prevedere il comportamento del nostro componente. Dal punto di vista del materiale per poter stimare la dimensione della ZTA il fattore più importante risulta essere il coefficiente di diffusività termica. Questa dipende dalla conducibilità termica, dalla densità del materiale e dal suo calore specifico. Più la diffusività è alta più velocemente si creano gradienti di temperature all'interno del pezzo, consegue un veloce raffreddamento del pezzo e la ZTA (o in inglese HAZ) risulta ridotta. Al contrario coefficienti più bassi significano che il calore non riesce a dissiparsi e la zona di influenza termica sarà più estesa. Per esempio l'acciaio inossidabile 304 ha una diffusività termica di $4,2 \text{ mm}^2/\text{s}$, molto inferiore rispetto all'acciaio da

costruzione $11,72 \text{ mm}^2/\text{s}$. Dal punto di vista produttivo la ZTA dipende da tre fattori: la quantità di calore applicato, la durata dell'esposizione e l'area interessata [1]. Alla luce di questi fattori la scelta della saldatura laser sembra ottimale in quanto è un processo molto veloce che si concentra su una zona del materiale ridotta, portando a una minimizzazione della zona termicamente alterata anche a fronte di alte potenze scambiate dal raggio laser.

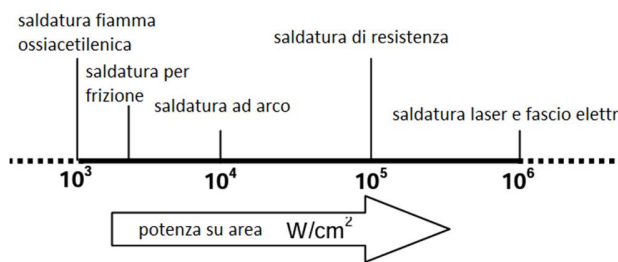


Fig. 1. Potenza scambiata da vari processi di saldatura

La scelta del taglio *water-jet* è dovuta alla sua particolarità di essere una lavorazione completamente meccanica. Questo porta a non avere zone termicamente alterate che, se sovrapposte a quelle ricavate dalla saldatura laser, comporterebbero una forte perdita di proprietà meccaniche.

[1] <https://www.teknoiring.com/news/ingegneria-meccanica/comportamento-dei-metalli-che-cose-la-haz-o-zona-termicamente-alterata/>

Questo avviene in quanto cambia la sua microstruttura e instaura delle tensioni residue sia di compressione che di trazione. Si evidenziano ora gli effetti che una saldatura ha su un acciaio, il materiale svilupperà 3 distinte zone:

- 1) Zona fusa: la solidificazione procede dal contorno della zona fusa verso l'interno con strutture dendritiche, l'entità di questa zona sono influenzati dalla massima temperatura raggiunta e severità del ciclo termico.
- 2) Zona termicamente alterata: risulta essere una delle sezioni più fragili nelle saldature. La ZTA è caratterizzata da un grano ingrossato andando incontro a una forte perdita di tenacità e resistenza a fatica causata principalmente dalla formazione di austenite residua.
- 3) Zona metallo base: il materiale non è stato sottoposto a una variazione di temperatura e mantiene la sua microstruttura originale [2].

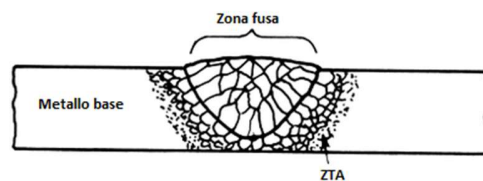


Fig. 2. Effetto della saldatura su un lamierino giunti testa a testa

[2] *Effetti termici e qualità della saldatura* [PDF] <http://didattica.uniroma.it>

Si parli ora in specifico della saldatura laser su un acciaio inossidabile austenitico 304, una volta riscaldata la zona di saldatura si nota un rapido aumento di temperatura fino a una trasformazione della lega da fase solida a liquida, durante la solidificazione, evidenziandone l'alta velocità di raffreddamento, si induce il materiale a compiere una trasformazione incompleta $\text{Ferro } \delta \rightarrow \text{Ferro } \gamma$, lasciando inevitabilmente una quantità di ferrite δ in condizioni metastabile [3].

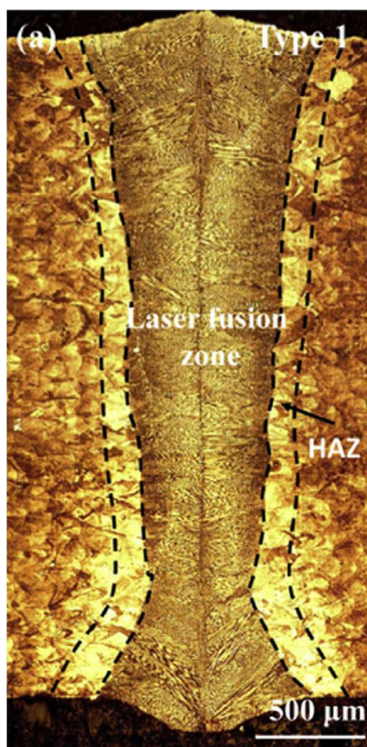


Fig. 3. Microstruttura acciaio 304 sottoposto a una saldatura laser

[3]Jingjing Yang, Yun Wang, Fangzhi Li, Wenpu Huang, Guanyi Jing, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Weldability, microstructure and mechanical properties of laser-welded selective laser melted 304 stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(9): 1817-1824

II. Materiali e metodi

La scelta del materiale sembra quindi ovvia, per ridurre la HAZ si userà un acciaio inossidabile austenitico 304. Gli acciai austenitici sono una particolare classe di acciai caratterizzata da una presenza di Cromo di almeno il 12%, il quale crea una pellicola in aria di ossido che conferisce una passività all'acciaio. Lo spessore del cromo può variare da 10-100 Å e tende a riformarsi immediatamente una volta danneggiata, inoltre vantano un'ottima resistenza alla corrosione [4]. L'Aisi 304 in particolare il è capostipite della famiglia degli acciai austenitici. Anche se non è resistente come altri acciai inossidabili questo materiale vanta un'ottima duttilità, è amagnetico e gradevole alla vista. I suoi principali utilizzi sono nel campo della lavorazione alimentare, casalingo e chimico.

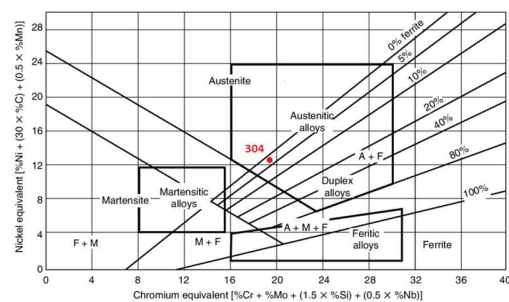


Fig. 4. Diagramma di shaeffler con rappresentazione Aisi 304

[4] F. Bonolo P. Ferro G. Timelli *Dispense di materiali metallici con esercizi capitolo acciai inossidabili: Introduzione slide 1:10*

Le proprietà meccaniche del materiale sono le seguenti:

Proprietà fisiche	Metrico	Imperiale
Densità	8.00 g/cm ²	0.289 lb/in ²

Proprietà meccaniche	Metrico	Imperiale
Durezza Brinell	123	123
Durezza Knopp	138	138
Durezza Rockwell B	70	70
Resistenza ultima a trazione	505 Mpa	73200 psi
Carico di snervamento 0.2%	215 Mpa	31200 psi
Allungamento % massimo	70 %	70 %
Modulo elastico	193 Gpa	28000 ksi
Modulo di Poissons	0.29	0.29
Energia prova Charpy	325 J	240 ft-lb

Proprietà termiche	Metrico	Imperiale
Dilatazione termica	17.3 μm/m-°C T=100°C	9.61 μin/in-°F T=212°F
	17.8 μm/m-°C T=315°C	9.89 μin/in-°F T=599°F
	18.7 μm/m-°C T=650°C	10.4 μin/in-°F T=1200°F
Calore specifico	0.5 J/g-°C T=100°C	0.12 BTU/lb-°F T=212°F
Conducibilità termica	16.2 W/m-K T=100°C	112 BTU-in/hr-ft ² -°F T=212°F
	21.5 W/m-K T=500°C	149 BTU-in/hr-ft ² -°F T=212°F
Temperatura di transizione S-L	1400-1455 °C	2550-2651 °F
Solidus	1400 °C	2550 °F
Liquidus	1455 °C	2651 °F

Composizione	Metrico	Imperiali
Carbonio C	≤0.08 %	≤0.08 %
Cromo Cr	18-20 %	18-20 %
Ferro Fe	66.345-74 %	66.345-74 %
Manganese Mn	≤2.0 %	≤2.0 %
Nickel Ni	8.0-10.5 %	8.0-10.5 %
Fosforo P	≤ 0.045 %	≤ 0.045 %
Silicio Si	≤ 1.0 %	≤ 1.0 %
Zolfo S	≤0.03 %	≤0.03 %

Tab. 1. Tabella delle proprietà fisiche meccaniche termiche e composizione dell'aisi 304^[5]

[5] <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=>

Preso come a riferimento la normativa vigente per la determinazione della geometria del provino a osso di cane, la BS EN ISO 4136:2012 ISO 4136:2012(E):

Denominazione	Simbolo	Dimensione
Lunghezza totale del provino	Lt	Appropriato per una buona presa alla macchina
Spessore del provino	ts	dato di input
Larghezza spallamento	b1	$b + 12$
Larghezza tratto utile	b	12 per $ts \leq 2$ mm 25 per $ts > 2$ mm
Lunghezza tratto utile	Lc	$Ls + 60$ mm
Raggio di raccordo	r	≥ 25 mm

Tab. 2. BS EN ISO 4136:2012 ISO 4136:2012(E)

I dati di ingresso forniti sono lo spessore del provino, dato da quello del lamierino da cui verrà estratto e la lunghezza del tratto utile, voluto di di 90 mm. Si procede allora al calcolo delle grandezze del provino.

Denominazione	Simbolo	Dimensione
Lunghezza totale del provino	Lt	168.5 mm
Spessore del provino	ts	2 mm
Larghezza spallamento	b1	24 mm
Larghezza tratto utile	b	15 mm
Lunghezza tratto utile	Lc	90 mm
Raggio di raccordo	r	25 mm

Tab. 3. Grandezze significative del provino

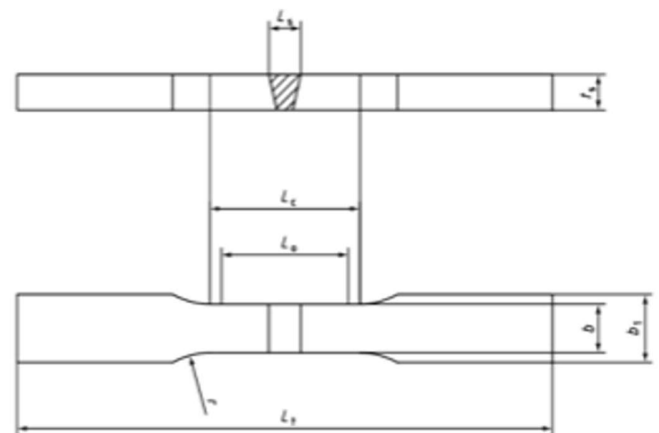


Fig. 5. Rappresentazione delle grandezze caratteristiche data dalla normativa BS EN ISO 4136:2012

Definita univocamente la geometria possiamo ora realizzarne una rappresentazione grafica portandoci ad avere il seguente provino:



Fig. 6. Geometria provino a osso di cane

Il pattern sinusoidale è stato studiato prendendo spunto dalla natura, vogliamo quindi che il periodo sia uguale all'ampiezza moltiplicata per la sezione aurea:

- Ampiezza = 4.5 mm
- Periodo = $4.5 \times 1,618 = 7.5$ mm

Abbiamo quindi la seguente geometria della sinusoide in mezzeria al provino:

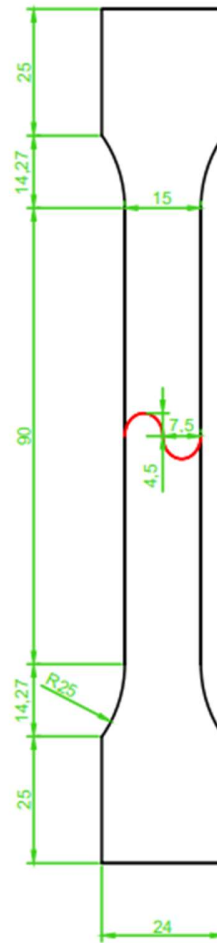


Fig. 7. Dettaglio lembi di saldatura in mezzeria

Con la seguente disposizione nel lamierino di dimensioni 300x200 mm fornito

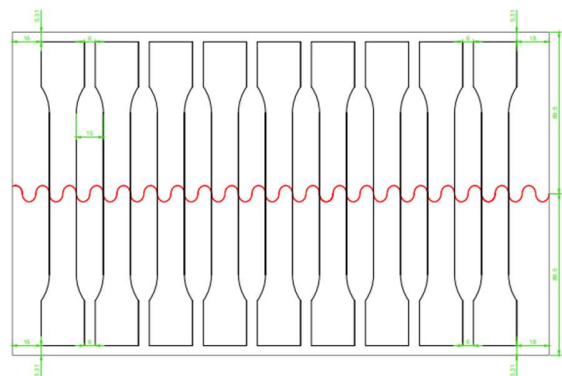


Fig. 8. Disposizione dei provini all'interno del lamierino

Come abbiamo già accennato il controllo della zona termicamente alterata è critico, stimandone le dimensioni di circa 3 mm possiamo quindi accertarci che non vi sia alcuna sovrapposizione con un procedimento grafico:

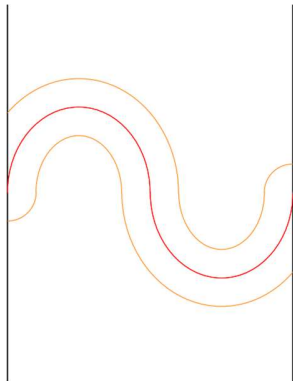


Fig. 9 Rappresentazione grafica zona termicamente alterata

Finite le verifiche possiamo passare alla realizzazione dei provini, la prima operazione è quella della creazione dei lembi da saldare, la lavorazione scelta è un taglio *water-jet* con abrasivo, un processo di taglio industriale in grado di tagliare un'ampia varietà di materiali. È un metodo di taglio non termico che si basa su un getto d'acqua ad alta velocità [6]. Sul macchinario, chiamato OMAX2625, sono presenti 5 possibili programmi che in ordine crescente di numerazione migliorano la precisione e finitura superficiale del materiale

[6] <https://muototera.com/it/come-funziona-il-sistema-di-taglio-a-getto-dacqua/>



Fig. 10. Omax 2625

nel nostro caso ci è stato suggerito dall'azienda di usare il programma intermedio, principalmente in quanto il lamierino è di piccole dimensioni. Per esempio se il nostro componente fosse stato di 20 mm avremmo dovuto usare un programma più complesso. I parametri di processo sono quindi i seguenti:

Parametri	Valore
Perforazione	ad alta pressione
Pressione	3650 bar
Φ tubo miscelazione	0.76 mm
Φ pietra	0.3048 mm
Portata abrasiva	0.34 kg/min
Dimensione abrasivo	80.00 mesh
Indice abrasivo	0.9
Velocità lineare ideale	600 mm/min
Lunghezza di taglio	767.19 mm

Inoltre si vuole prestare attenzione alla conicità del getto d'acqua con abrasivo che aumenta di dimensioni più è distanti si è

dall'ugello, questa caratteristica fortunatamente non crea alcun problema per lamierini poco spessi assicurandoci dei lembi perfettamente combacianti. Procediamo quindi con il processo di saldatura laser, è una particolare lavorazione che usa un raggio di luce altamente concentrato, chiamato laser, che fornisce calore nella zona in cui entra in contatto con il pezzo portandolo a compiere un cambiamento di fase. Di seguito riportiamo i parametri di processo:

Parametri	Valore
Velocità della torcia	600 mm/min
Spot calcolato	0,27 mm
Clampatura	tavola con regoli
Fuoco	+3 mm
Potenza laser	600 W
Gas: azoto	20 l/min

Con il seguente setup della clampatura:

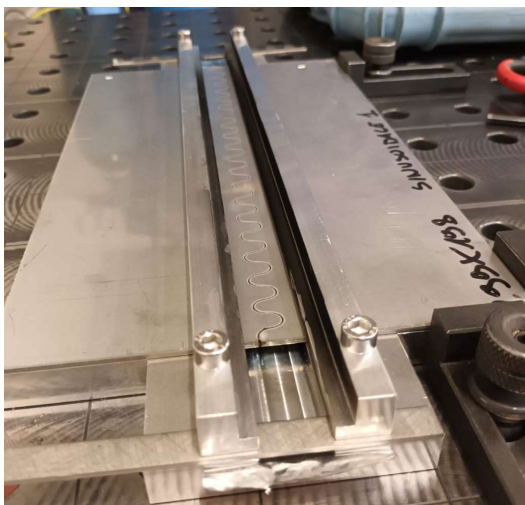


Fig. 11. Clampaggio saldatura laser 1



Fig. 12. Clampaggio saldatura laser 2

Inoltre si vuole sottolineare la minimale deformazione che il materiale ha mostrato a fine del processo.

L'ultima lavorazione necessaria è quella dell'estrazione dei provini immersi nel lamierino, la scelta è ricaduta ancora una volta sul *water-jet* in quanto non crea nessuna zona termicamente alterata, i parametri di processo sono gli stessi rispetto la prima lavorazione eccetto la lunghezza di taglio:

Parametri	Valore
Perforazione	ad alta pressione
Pressione	3650 bar
Φ tubo miscelazione	0.76 mm
Φ pietra	0.3048 mm
Portata abrasiva	0.34 kg/min
Dimensione abrasivo	80.00 mesh
Indice abrasivo	0.9
Velocità lineare ideale	600 mm/min
Lunghezza di taglio	3560 mm

III. Prova, risultati e discussione

Procediamo quindi con la prova di laboratorio, la macchina di trazione cui qui si fa riferimento è un MTS criterion serie 40, che è una macchina per prove su materiali metallici con acquisizione ed elaborazione dati computerizzati



Fig. 13. Macchinario utilizzato nella prova a trazione

e comprende i seguenti componenti:

- Un basamento;
- Colonne di sostegno;
- Una traversa fissa;
- Una traversa mobile;
- Due pinze come elementi di afferraggio;
- Due aste montanti;
- Una colonna rettangolare con corsa verticale



Fig. 14. Provino inserito nel macchinario di prova

In mezzeria al provino inseriamo un estensimetro, è uno strumento di precisione che serve a misurare le deformazioni dimensionali del corpo a cui è applicato. Una problematica legata a questo tipo di misurazione è quella che, anche se abbiamo altissime precisioni sulla lettura della misura essa viene calcolata solo su un tratto di solo circa 20 mm.

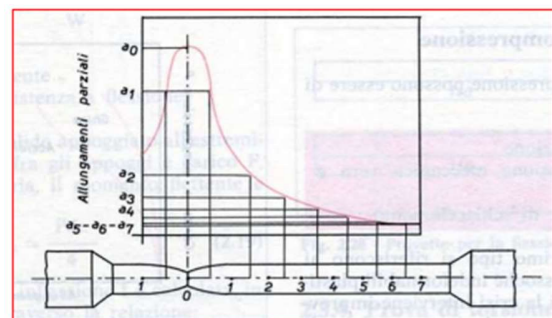


Fig. 15. Allungamenti parziali lungo il provino

Che, come si vede in figura, non comprende la completa deformazione del provino. Abbiamo ovviato alla problematica segnando il componente agli estremi del tratto utile con due linee parallele poste a una distanza misurata equidistanti dalla mezzeria della saldatura, calcolandone poi la distanza una seconda volta a rottura del provino possiamo effettivamente stimare la variazione totale di lunghezza, avendo però ovviamente una misura meno raffinata. Prendiamo inoltre dimensioni geometriche del provino, come spessore, larghezza e lunghezza del tratto utile per realizzare il grafico “tensione deformazione” partendo da quello di “forza allungamento”. Come primo test inseriamo il campione di riferimento, cioè quello con saldatura retta, necessario per il confronto delle proprietà meccaniche.

Il macchinario ci fornisce con una lettura computerizzata i parametri:

- Lunghezza della traversa [mm]
- Carico [kN]
- Tempo [sec]
- Estensimetro [mm]

Da questi parametri e altre grandezze significative del materiale ci si può calcolare varie grandezze:

La tensione di snervamento (Y_s), che rappresenta la tensione di passaggio del componente dalla zona elastica a quella plastica. Per materiali fragili, dove non vi è una netta distinzione tra le due si prende la tensione che comporta una deformazione dello 0.2%

La tensione di rottura (UTS), cioè la massima sollecitazione ingegneristica che è stata applicata al provino.

Deformazione plastica a rottura, con la particolare attenzione che, una volta rotto il provino, grazie all'effetto del ritorno elastico si potrà calcolare immediatamente la componente plastica. Si calcola con la seguente formula:

$$A_n\% = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100$$

Le prove sono state svolte su 3 provini per tipologia, in quanto, non presentando grandi variazioni sono state considerate un numero più che sufficiente, dato il modulo di Young di 195 Mpa:

Per i provini con *pattern* rettilineo:

N° provino	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Lunghezza [mm]	YS [Mpa]	UTS [Mpa]	An% []
1	15.2	2	90	293	688	55
2	15.2	2	90	295	659	46
3	15.2	2	90	294	666	52
Media	15.2	2	90	294	671	51
Deviazione standard (σ)	0	0	0	0.816	12.356	3.742

Tab 4. Grandezze significative provini *pattern* rettilineo

Per i provini con *pattern* sinusoidale:

N° provino	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Lunghezza [mm]	YS [Mpa]	UTS [Mpa]	An% []
1	15.2	2	90	319	678	50
2	15.2	2	90	318	682	54
3	15.2	2	90	315	677	53
Media	15.2	2	90	317	679	52
Deviazione Standard (σ)	0	0	0	1.7	2.16	1.7

Tab 5. Grandezze significative provini *pattern* sinusoidali

Da questo primo confronto si può notare prima di tutto un aumento delle tensioni di snervamento di almeno di qualche decina di Mpa mentre per le altre grandezze non si vedono variazioni significative tra le due tipologie di provini. Si procede ora con la

realizzazione dei grafici. La macchina di trazione fornisce una tabella Excel con i valori significativi dei vari parametri che, una volta processati da Matlab si possono utilizzare per la creazione dei seguenti grafici:

Per i provini a *pattern* rettilineo:

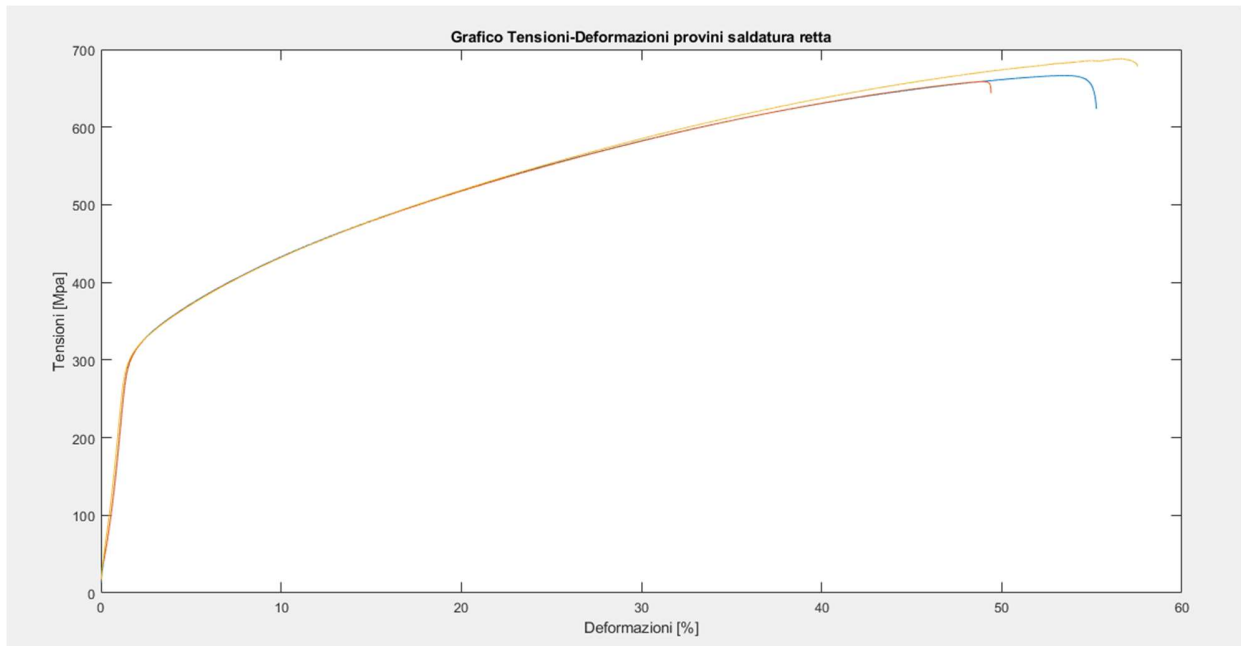


Fig. 16. Grafico tensioni deformazioni provini a saldatura rettilinea

Mentre per i provini con pattern sinusoidale abbiamo il seguente risultato:

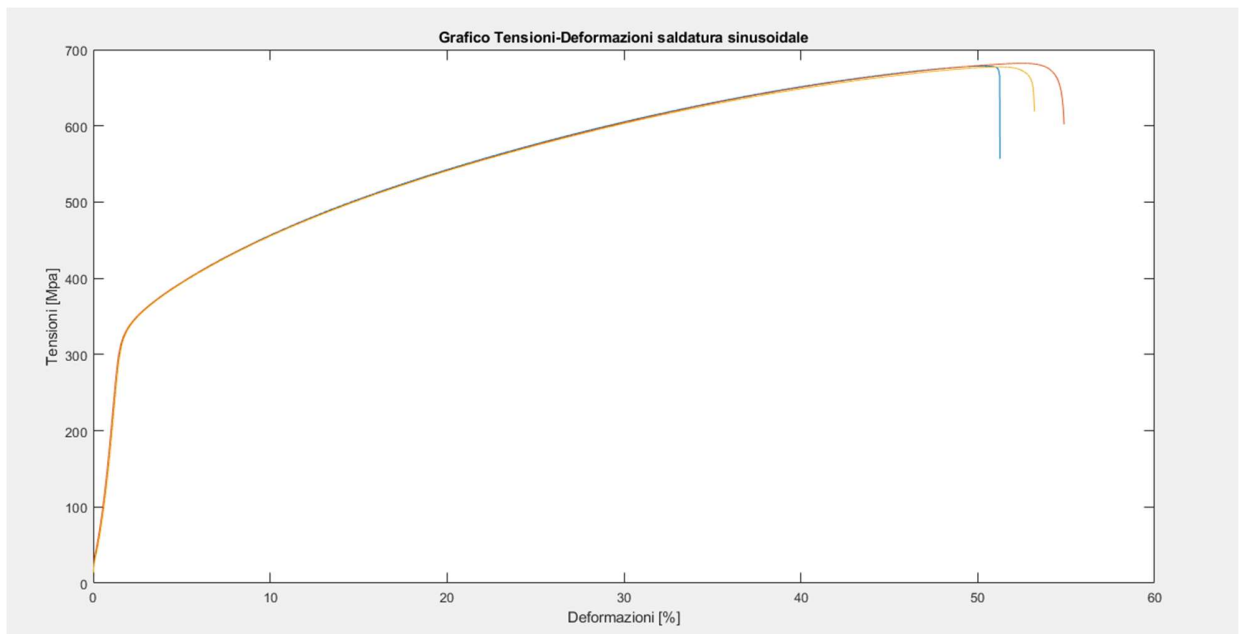


Fig. 17. Grafico tensioni deformazioni provini a saldatura sinusoidale

Unendo insieme tutti i risultati possiamo effettivamente cominciare a notare le differenti proprietà meccaniche dei due diversi pattern di saldatura

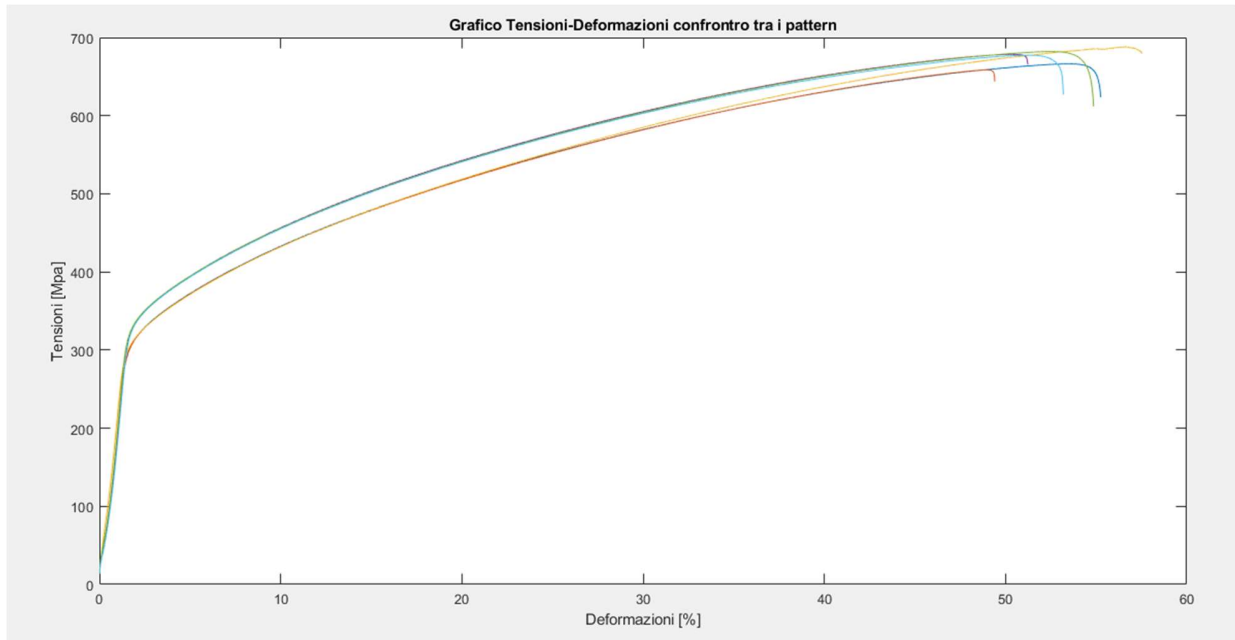


Fig. 18. Grafico tensioni deformazioni provini a saldatura sinusoidale e rettilinea a confronto

Mettendo in particolare evidenza il tratto elasto-plastico e inizio della fase plastica

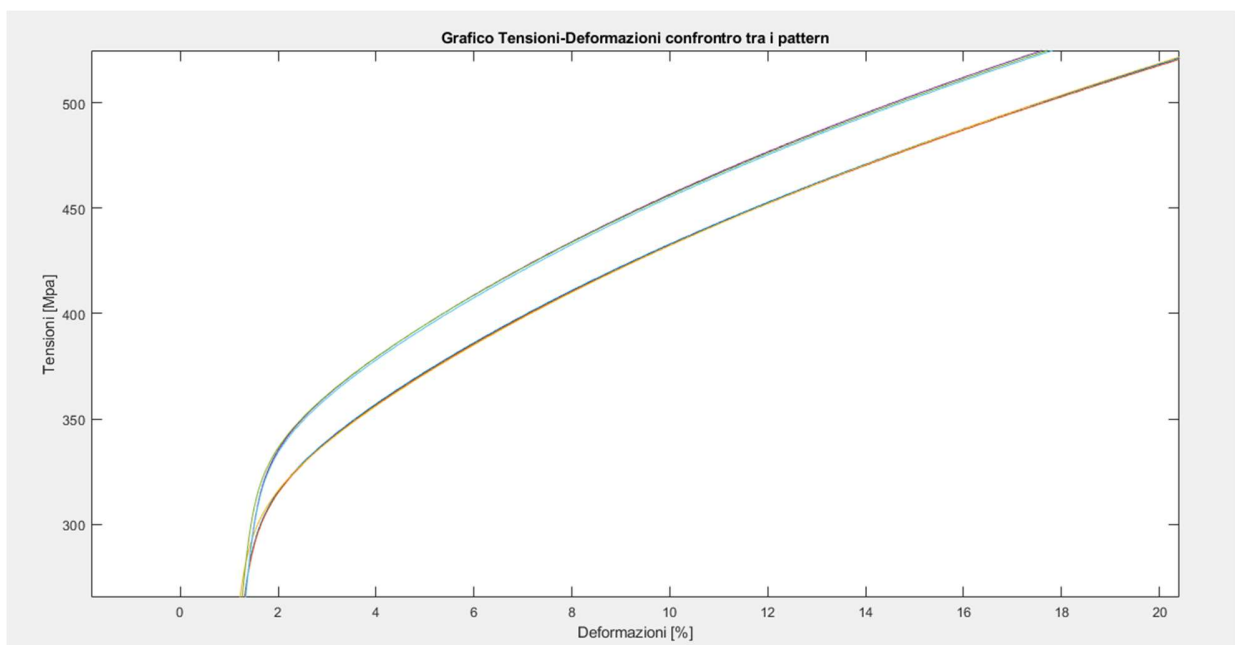


Fig. 19. Grafico tensioni deformazioni differenza di proprietà meccaniche in zona elasto-plastica

Dal confronto si può notare quindi che, mentre per la deformazione a rottura non si nota una grande differenza tra i due casi, durante la loro fase elasto-plastica invece i provini con saldatura a *pattern* sinusoidale riescono a sopportare maggiori carichi a fronde della stessa deformazione imposta. Si ipotizza che questo sia dovuto a un effetto geometrico della saldatura. La sezione di rottura del provino rettilineo è perfettamente normale alla lunghezza del tratto utile del provino, mentre quella dei provini sinusoidali tendono ad avere una geometria del piano di separazione più complessa. Essa non è più normale alla direzione di applicazione delle forze comportando due effetti diversi che fanno aumentare la resistenza del componente:

- 1) Parte del materiale che resiste nel provino sinusoidale è materiale vergine che non ha una microstruttura alterata dalla saldatura portandola ad avere migliori proprietà meccaniche.
- 2) La sezione di rottura, non essendo parallela all'asse del tratto utile, comporta un aumento dell'area resistente alle sollecitazioni aumentando quindi la sua capacità di opporsi a queste ultime.

Un'altra caratteristica interessante è l'angolo a cui si rompe il provino, normalmente nelle prove a trazione i componenti duttili si rompono con un certo angolo di inclinazione.

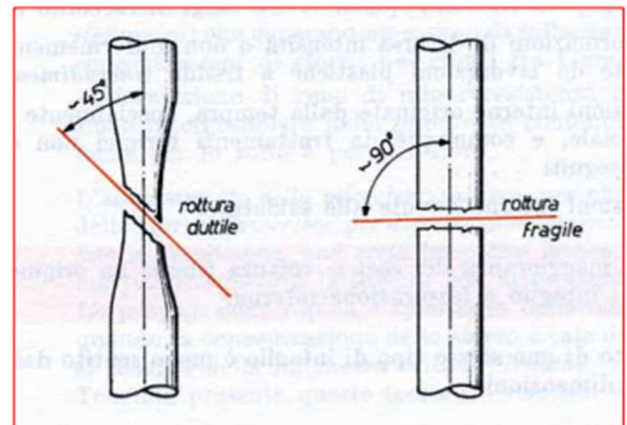


Fig. 22. Differenze sezioni di rottura duttili fragili

Questa tipologia di rottura avviene per deformazione plastica e conseguente scorrimento dei piani cristallini, orientati a circa 45° gradi rispetto alla sollecitazione esterna [7]. Tuttavia alcuni provini presentano una variazione di questo angolo di rottura, si ipotizza sia dovuto a micro-difetti e variazioni delle proprietà meccaniche che si vengono a formare dopo il processo di saldatura. Essi creano quindi piani di scorrimento preferenziali diversi rispetto a quelli che si avrebbero in condizioni standard.

[7] Tecnologie mecc. di proc. e prod. – Uda n° 3: Prove e controlli
– Prova di trazione [PDF]

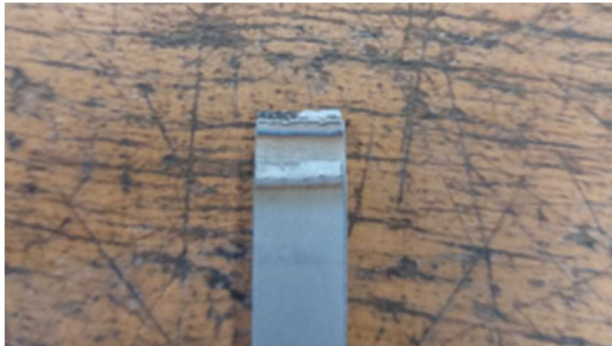


Fig. 20. Provini rettilinei dopo rottura



Fig. 21. Provini sinusoidali dopo rottura

IV. Conclusione

Le prove di laboratorio hanno messo in evidenza che i provini sinusoidali riescono a resistere a sollecitazioni di trazione superiori rispetto alla loro controparte. La tensione di snervamento aumenta di circa 7.8% mentre la resistenza ultima a trazione migliora solo di 1.2%. Inoltre si può notare che le variazioni di proprietà meccaniche tra il materiale vergine e i provini non sono particolarmente evidenti nella resistenza ultima a trazione, mentre con Y_s abbiamo un aumento dovuto alla presenza di tensioni residue.

V. Bibliografia

[1]<https://www.teknoring.com/news/ingegneria-meccanica/comportamento-dei-metalli-che-cose-la-haz-o-zona-termicamente-alterata/>

[2] *Effetti termici e qualità della saldatura* [PDF]

[3] Jingjing Yang, Yun Wang, Fangzhi Li, Wenpu Huang, Guanyi Jing, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. *Weldability, microstructure and mechanical properties of laser-welded selective laser melted 304 stainless steel joints*[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(9): 1817-1824

[4] F. Bonolo P. Ferro G. Timelli *Dispense di materiali metallici con esercizi capitolo acciai inossidabili: Introduzione slide 1:10*

[5]<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=>

[6]<https://muototera.com/it/come-funziona-il-sistema-di-taglio-a-getto-dacqua/>

[7] *Tecnologie mecc. di proc. e prod. – Uda n° 3: Prove e controlli – Prova di trazione* [PDF]