



**Politecnico  
di Torino**

## **Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2021/2022

Sessione di Laurea Settembre 2022

# **Tailor welded blanks in lega di alluminio: ricerca dei parametri ottimali e analisi sperimentale delle proprietà del giunto.**

Relatori:

Raffaella Sesana  
Manuela De Maddis

Candidato:

Christian Giannone

## Ringraziamenti

Questo lavoro di tesi segna la fine del mio percorso universitario e l'inizio di una nuova fase della mia vita nel mondo del lavoro. Sono stati anni in cui ho avuto la fortuna di conoscere tante persone che hanno contribuito, in un modo o nell'altro, al raggiungimento di questo importante obiettivo. In particolare, voglio ringraziare i colleghi del primo anno: Niccolò, Francesca, Ginevra, Sara e Federico che mi hanno aiutato ad iniziare al meglio questa fantastica esperienza formativa. Ringrazio gli amici della residenza Borsellino che ho conosciuto nei 4 anni trascorsi come borsista Edisu, con una menzione particolare per i ragazzi del nono e del quinto piano. Ringrazio Lorenzo, Claudio e Samuele e tutti i colleghi con cui ho trascorso le centinaia di ore di lezione e le serate in questa meravigliosa città di Torino. Grazie alle professoressse Sesana e De Maddis, rispettivamente relatrice e co-relatrice di questa tesi, e anche ai dottorandi Dario Basile e Luca Santoro, per l'aiuto che mi hanno dato nel risolvere i problemi che si sono presentati nello sviluppo di questo lavoro. Infine, ma non perché meno importanti, ringrazio la mia famiglia e la mia ragazza, che mi hanno sopportato e supportato durante questi 5 anni, rimanendo sempre al mio fianco nonostante i 1638 km di distanza che ci dividono.

## Sommario

ABSTRACT.....	5
1 Leghe di alluminio .....	6
1.1 Generalità .....	6
1.2 Designazione delle leghe di Alluminio .....	10
1.3 Leghe non trattabili termicamente.....	12
1.4 Leghe trattabili termicamente.....	14
1.5 Leghe di alluminio-magnesio-silicio (6xxx).....	19
1.6 Produzione delle Lamiere.....	20
1.7 Corrosione .....	22
1.8 Tailored Blanks .....	23
2. Saldatura Laser.....	27
2.1 Saldatura laser delle leghe di alluminio .....	35
2.2 L'influenza del gas di protezione .....	37
2.3 Influenza della velocità di saldatura .....	39
2.4 Effetto della Potenza.....	41
3. Procedura sperimentale.....	43
3.1 Materiale e parametri di processo .....	43
3.2 Saldatura.....	44
3.3 Taglio dei provini .....	48
3.4 Inglobamento.....	48
3.5 Lucidatura.....	51
3.6 Attacco chimico.....	53

4. Test sui provini .....	56
4.1 Metallografie .....	56
4.2 Prove di Microdurezza Vickers .....	57
4.3 Test di Trazione.....	61
4.4 Prova Erichsen.....	63
5. Analisi dei risultati ottenuti.....	70
5.1 Risultati metallografie .....	70
5.2 Risultati prove di microdurezza .....	79
5.3 Risultati prove di trazione .....	81
5.4 Risultati prove Erichsen .....	86
6. Conclusioni .....	90
7. Sviluppi futuri .....	91
Bibliografia.....	96

## ABSTRACT

Gli effetti disastrosi dei cambiamenti climatici e dell'inquinamento sono un grido di allarme del pianeta a cui l'umanità non può sottrarsi dal rispondere. Sono necessarie soluzioni innovative, che riescano a dare un contributo immediato al problema. In questo senso, la riduzione del peso dei veicoli è fondamentale per l'abbattimento dei consumi e quindi delle emissioni. Tuttavia, il progresso tecnologico ha portato negli ultimi anni a vedere un aumento crescente del peso dei veicoli e una gran quantità di componenti elettronici ed elettrici sono stati montati a bordo per soddisfare la crescente richiesta di comfort e sicurezza. L'obiettivo da perseguire è quello di ridurre il peso della carrozzeria per compensare quello dei componenti addizionali. Tutto ciò deve essere studiato nell'ottica di garantire il massimo grado di sicurezza durante la guida. Per questo scopo sono nati i tailor welded blanks, componenti semilavorati costituiti da almeno due lamiere, di diverso materiale o spessore, saldate insieme prima del processo di stampaggio. Grazie ai TWBs è possibile rinforzare la carrozzeria solo dove è richiesta una più elevata resistenza e rigidità. Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo di studiare i principali parametri di saldatura laser e la loro influenza sulla qualità del cordone. In particolare, lo studio è focalizzato sulla saldatura di due lamiere di alluminio della lega 6016 di spessori diversi, rispettivamente 1.2 e 2 mm. Le caratteristiche del giunto saranno studiate tramite analisi metallografiche, prove di microdurezza, test di trazione ed imbutitura Erichsen.

# 1 Leghe di alluminio

In questo lavoro di tesi il materiale utilizzato per effettuare le saldature è l'alluminio.

## 1.1 Generalità

L'alluminio possiede tante proprietà che lo rendono largamente utilizzato in molte applicazioni. Alcune di queste sono:

- Buona resistenza all'ossidazione e alla corrosione;
- Elevata conduttività termica ed elettrica;
- Bassa densità;
- Alta riflettività;
- Alta duttilità e resistenza abbastanza elevata;
- Costo relativamente basso;

L'alluminio e le sue leghe sono usati in svariati campi, per la realizzazione di: lamiere, lattine, utensili da cucina, strutture per barche, aerei e altri veicoli di trasporto. Grazie alla formazione di un sottile strato di ossido superficiale ( $Al_2O_3$ ), le leghe di alluminio hanno un'eccezionale resistenza alla corrosione in molti ambienti. La bassa densità è molto importante per le applicazioni in cui il peso è il parametro da tenere sotto osservazione. La sua elevata conduttività termica lo rende ideale per la realizzazione di radiatori e utensili da cucina. Inoltre, i semilavorati in alluminio mostrano una buona combinazione di resistenza e duttilità.

L'alluminio è un metallo leggero con una densità di  $2.70 \text{ g/cm}^3$ , un modulo elastico di 70 GPa ed una temperatura di fusione relativamente bassa di  $655^\circ\text{C}$ . Grazie alla sua struttura cristallina cubica a facce centrate (CFC) l'alluminio e le sue leghe sono caratterizzati da una buona deformabilità e questo è facilitato dal basso tasso di incrudimento. [1] Il reticolo cristallino dell'alluminio è stabile per un range di temperatura molto ampio, che va da 4 K fino alla temperatura di fusione a circa 993 K. Questo rende l'alluminio ideale nelle applicazioni a bassa temperatura. [2]

Le proprietà meccaniche che caratterizzano l'alluminio puro in condizioni di temperatura ambiente sono riportate nella tabella seguente:

<b>Mechanical Properties of Pure Aluminum at Room Temperature</b>						
Purity, %	Tensile yield strength (0.2% offset)		Tensile strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %	
	MPa	ksi	MPa	ksi	(a)	(b)
99.99(a) . . . . .	10	1.4	45	6.5	50	65
99.8(a) . . . . .	20	2.9	60	8.7	45	55
99.6(a) . . . . .	30	4.4	70	10.2	43	...

(a) From Chapter 9, Table 3 of this Volume. (b) From Ref 15.

*Tabella 1 Proprietà meccaniche dell'alluminio puro [2]*

Le leghe di alluminio sono generalmente classificate in leghe per deformazione plastica e leghe da getto. Questo lavoro si occuperà delle leghe da deformazione plastica, le quali possono essere trattate con un processo di incrudimento oppure mediante rafforzamento da precipitazione in seguito a trattamento termico. Il controllo microstrutturale è estremamente importante nella produzione e lavorazione delle leghe di alluminio. In particolare, di grande importanza sono i composti intermetallici grossolani che si formano per decomposizione eutettica durante la solidificazione del lingotto. Alcuni sono solubili, mentre altri sono praticamente insolubili. I composti insolubili di solito contengono ferro o silicio e formano composti come  $Al_6(Fe,Mn)$ ,  $Al_2Fe$ ,  $Al_7FeCu_2$  e  $aAl(Fe,Mn,Si)$ . I composti solubili sono composti intermetallici di equilibrio di uno dei principali elementi di lega, come  $Mg_2Si$ . [2] Uno dei motivi principali per l'omogeneizzazione dei lingotti prima della lavorazione a caldo è la dissoluzione di questi composti solubili. Durante la lavorazione a caldo, quelli più grossi vengono frantumati e allineati lungo la direzione di lavoro. I dispersoidi sono particelle submicroniche più piccole (tipicamente da 0,05 a 0,5  $\mu m$ ) che si formano durante l'omogeneizzazione dei lingotti per precipitazione allo stato solido da elementi che hanno solo una solubilità limitata e che si diffondono lentamente. Una volta formati, resistono alla dissoluzione e/o all'ingrossamento. Di solito sono costituiti da uno degli elementi di transizione; esempi sono  $Al_{20}Cu_2Mn_3$ ,  $Al_{12}CrMg_2$  e  $Al_3Zr$ . I dispersoidi sono utili nel ritardare la ricristallizzazione e la crescita del grano.

Altre caratteristiche microstrutturali che possono influenzare le proprietà includono inclusioni di ossido, porosità, dimensione e forma dei grani e trame cristallografiche che possono portare a proprietà anisotropiche. [1]

Un gas da controllare molto attentamente per quanto riguarda l'alluminio è l'idrogeno. La concentrazione permessa nell'alluminio allo stato fuso è molto più elevata di quella permessa allo solido, a causa della forza motrice della reazione metallo-umidità. Se non rimosso durante la solidificazione, darà origine a porosità che possono compromettere la resistenza del materiale. Questo è un aspetto da tenere in considerazione durante tutti i processi in cui si determina un passaggio dell'alluminio dallo stato liquido allo stato solido.

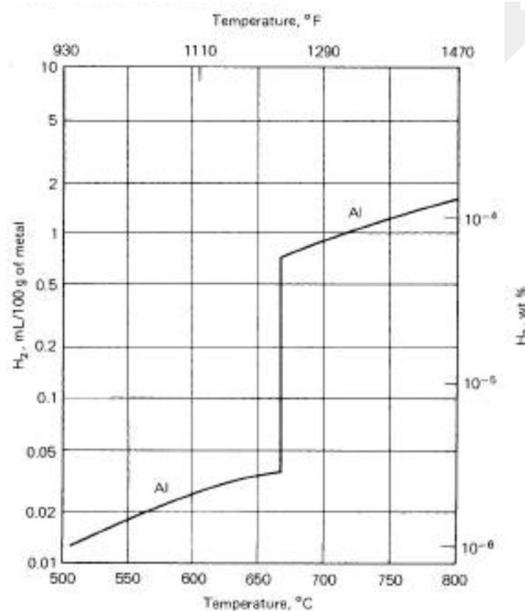


Figura 1 Concentrazione dell'idrogeno al variare della temperatura, Aluminium properties and physical metallurgy [2]

Ransley e Neufeld (1), Opie e Grant (2) e Eichenhauer, Hattenbach e Pebler (3) hanno cercato di misurare la solubilità dell'idrogeno nel metallo liquido. L'equazione che hanno ricavato fornisce la concentrazione dell'idrogeno come funzione della temperatura:

$$\log S = \frac{-2760}{T} + 2.796 \quad (1)$$

$$\log S = \frac{-2550}{T} + 2.62 \quad (2)$$

$$\log S = \frac{-3086}{T} + 2.969 \quad (3)$$

Dove S è la solubilità dell'idrogeno, espressa in centimetri cubi, per ogni 100 g di metallo e T è la temperatura in gradi Kelvin.

Ransley e Neufeld (1) e Eichenhauer, Hattenbach e Pebler (3) hanno determinato anche una formula per calcolare la concentrazione dell'idrogeno nel metallo solido [2]:

$$\log S = \frac{-2080}{T} + \frac{\log p}{2} - 0.652 \quad (1)$$

$$\log S = \frac{-3042}{T} + \frac{\log p}{2} + 0.521 \quad (3)$$

Generalmente la massima solubilità solida nelle leghe di alluminio si verifica alla temperatura eutettica, peritettica o monotettica. Al diminuire della temperatura, diminuisce anche il limite di solubilità. La diminuzione del limite di solubilità al diminuire della temperatura è una caratteristica fondamentale, che può essere utilizzata per aumentare la durezza e la resistenza delle leghe di alluminio mediante trattamento termico in soluzione e successive operazioni di invecchiamento per precipitazione.

Il rafforzamento delle leghe non trattabili termicamente è il risultato di una combinazione di rinforzo in soluzione solida, costituenti della seconda fase, precipitati e incrudimento. Le leghe normalmente rafforzate per lavorazione o incrudimento includono l'alluminio commercialmente puro (1xxx), le leghe di alluminio-manganese (3xxx), alcune leghe di alluminio-silicio (4xxx) e le leghe di alluminio-magnesio (5xxx). Questi possono essere rafforzati a vari livelli di resistenza con una contemporanea riduzione della duttilità. Dato che

queste leghe subiranno recovery a temperature moderate, vengono utilizzate principalmente per applicazioni a temperature più basse. [1]

I livelli di resistenza più elevati sono raggiunti dalle leghe trattabili termicamente, che includono le leghe di alluminio-rame (2xxx), le leghe alluminio-magnesio+silicio (6xxx), le leghe alluminio-zinco (7xxx) e le leghe alluminio-litio della serie 8xxx. Per le leghe fuse, questo include le leghe di alluminio-rame (2xx.x), alcune leghe di alluminio-silicio + rame e/o magnesio (3xx.x) e le leghe di alluminio-zinco (7xx.x). Come classe di metalli, le leghe di alluminio sono piuttosto difficili da saldare, ma possono essere saldate mediante saldatura ad arco, saldatura TIG, saldatura a resistenza e saldatura laser. Il 2xxx e il 7xxx contenente rame sono molto difficili da saldare o non possono essere saldati con i metodi di saldatura ad arco convenzionali. Tuttavia, un processo relativamente nuovo, chiamato friction stir welding è in grado di saldare anche le leghe di alluminio più difficili. In questo processo il giunto di saldatura non diventa mai un vero liquido; è un processo allo stato solido. [1]

## 1.2 Designazione delle leghe di Alluminio

Per le leghe di alluminio è stato pensato un sistema di designazione numerica a quattro cifre, sviluppato dall'Aluminium Association, viene utilizzato per designare le leghe di alluminio per lavorazione plastica.

Le diverse leghe di alluminio sono classificate da un codice composto da 4 cifre [1]:

1. La prima definisce l'elemento in lega più presente nella serie e si suddividono nelle seguenti:
  - 1xxx: Alluminio puro
  - 2xxx: Leghe Al-Cu
  - 3xxx: Leghe Al-Mn
  - 4xxx: Leghe Al-Si
  - 5xxx: Leghe Al-Mg
  - 6xxx: Leghe Al-Mg-Si
  - 7xxx: Leghe Al-Zn
  - 8xxx: Leghe Al e altri elementi non descritti nelle precedenti serie

2. La seconda cifra è pari a zero se la lega contiene elementi conformi alla propria famiglia di appartenenza, mentre è diversa da zero se sono presenti variazioni rispetto alla lega base.
3. La terza e la quarta cifra indicano:
  - Per l'alluminio non legato (serie 1xxx) la percentuale minima di alluminio. Il numero fa riferimento alle cifre decimali ( ad esempio 1050 indica alluminio puro al 99,50%).
  - Per le altre serie indicano un numero progressivo che definisce in modo univoco la lega all'interno della famiglia di appartenenza.

Le designazioni dei trattamenti termici per le leghe di alluminio sono le seguenti:

- ***As-fabricated (F)*** si applica a prodotti in cui non vi è alcun controllo speciale sulle condizioni termiche o sull'incrudimento.
- ***Annealed (O)*** si applica ai prodotti lavorati e fusi che sono ricotti per ottenere una resistenza più bassa. I prodotti fusi sono spesso ricotti per migliorare la duttilità e la stabilità dimensionale.
- ***Work hardened (H)*** si applica solo ai prodotti lavorati che sono stati rinforzati mediante lavorazione o incrudimento. Un successivo trattamento termico viene talvolta utilizzato per produrre una certa riduzione della resistenza. La condizione di incrudimento H è sempre seguita da una cifra e talvolta da due. La prima cifra indica il processo di incrudimento specifico e la seconda cifra indica la quantità di indurimento residuo.
- ***Solution heat treated (W)*** si applica ai prodotti trattati termicamente in soluzione. La condizione W è instabile poiché le leghe invecchiano lentamente a temperatura ambiente. Le leghe lavorate trattabili termicamente sono spesso formate allo stato W poiché la loro formabilità è buona quasi quanto lo stato ricotto. In questo caso vengono refrigerate dopo il trattamento termico in soluzione ma prima della formatura per ritardare l'invecchiamento naturale. La temperatura di refrigerazione deve essere compresa tra 45° e 75° C (da 50° a 100° F).

- ***Solution heated treated and aged (T)*** si applica ai prodotti che sono stati trattati termicamente in soluzione e invecchiati a temperatura ambiente (invecchiati naturalmente) o invecchiati a temperatura elevata (invecchiati artificialmente). Il trattamento specifico per l'invecchiamento è contrassegnato da una "T" seguita da un numero (da 1 a 10) per il trattamento specifico per l'invecchiamento

**Table 26.4 Temper designations for aluminum alloys**

Suffix letter "F," "O," "H," "T," or "W" indicates basic treatment condition	First suffix digit indicates secondary treatment used to influence properties	Second suffix digit for condition H only indicates residual hardening
F—As-fabricated		
O—Annealed-wrought products only		
H—Cold worked, strain hardened		
	1—Cold worked only	2—1/4 hard
	2—Cold worked and partially annealed	4—1/2 hard
	3—Cold worked and stabilized	6—3/4 hard
		8—Hard
		9—Extra hard
W—Solution heat treated		
T—Heat treated, stable		
T1—Cooled from an elevated-temperature shaping operation + natural aged		
T2—Cooled from an elevated-temperature shaping operation + cold worked + natural aged		
T3—Solution treated + cold worked + natural aged		
T4—Solution treated + natural aged		
T5—Cooled from an elevated-temperature shaping operation + artificial aged		
T6—Solution treated + artificial aged		
T7—Solution treated + overaged		
T8—Solution treated + cold worked + artificial aged		
T9—Solution treated + artificial aged + cold worked		
T10—Cooled from an elevated-temperature shaping operation + cold worked + artificial aged		

Source: Ref 3

*Tabella 2 Designazione trattamenti termici per le leghe di alluminio [1]*

### 1.3 Leghe non trattabili termicamente

Le leghe per deformazione plastica non trattabili termicamente includono le leghe di alluminio pure (1xxx), le leghe di alluminio-manganese (3xxx), le leghe di alluminio-silicio (4xxx) e le leghe di alluminio-magnesio (5xxx). Queste leghe non possono essere indurite mediante trattamento termico e sono quindi indurite mediante una combinazione di rinforzo in soluzione solida e lavorazione a freddo.

In Figura 2 e Figura 3 sono riportati gli effetti di questi trattamenti sulle leghe di alluminio.

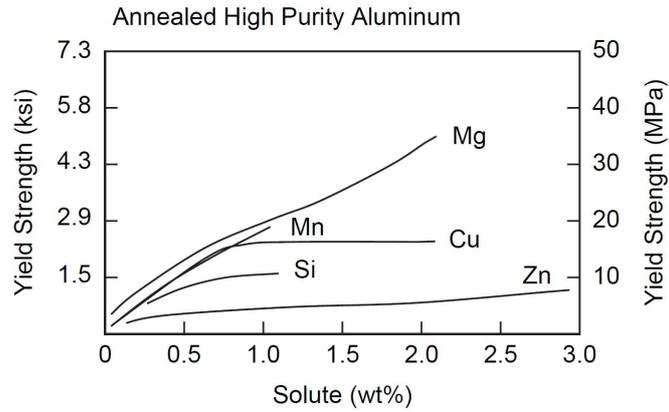


Figura 2 Rafforzamento per soluzione solida [1]

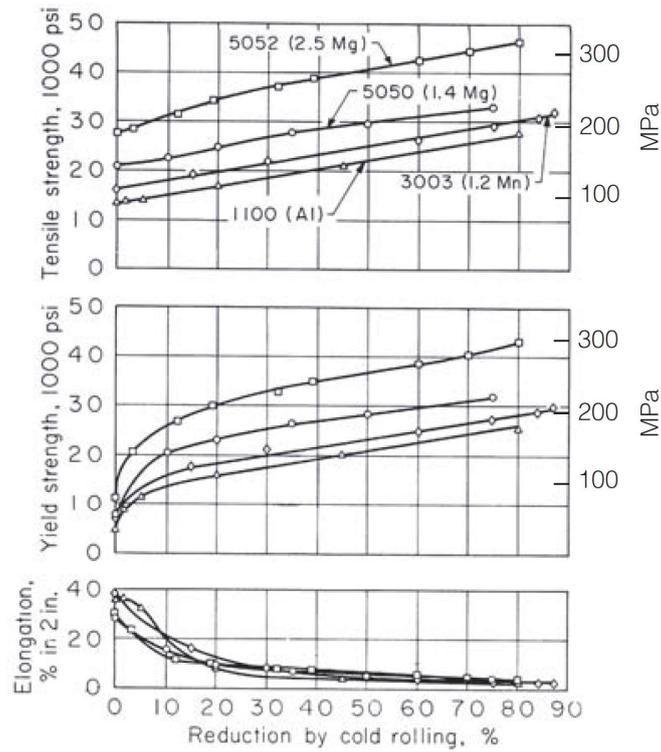


Figura 3 Rafforzamento per lavorazione a freddo [1]

## 1.4 Leghe trattabili termicamente

I trattamenti termici sono usati per [3]:

- Eliminare le tensioni residue sul pezzo aumentandone quindi lavorabilità e formabilità;
- Ottenere le caratteristiche meccaniche necessarie per le applicazioni finali;
- Stabilizzare nel tempo le proprietà meccaniche
- Migliorare la resistenza alla corrosione
- Assicurare la stabilità dimensionale durante l'utilizzo, nel caso di componenti che devono operare a temperature superiori di quella ambiente

Le leghe per deformazione plastica trattabili termicamente comprendono la serie alluminio-rame (2xxx), la serie alluminio-magnesio-silicio (6xxx), la serie alluminio-zinco (7xxx) e le leghe alluminio-litio della serie 8xxx. Queste leghe sono rafforzate per precipitazione. L'importanza dell'indurimento per precipitazione delle leghe di alluminio può essere apprezzata esaminando i dati presentati in Fig. 6 per il 2024 invecchiato naturalmente e il 7075 invecchiato artificialmente. Si noti il drammatico aumento della resistenza di entrambi a causa dell'indurimento per precipitazione, con riduzioni solo moderate dell'allungamento.

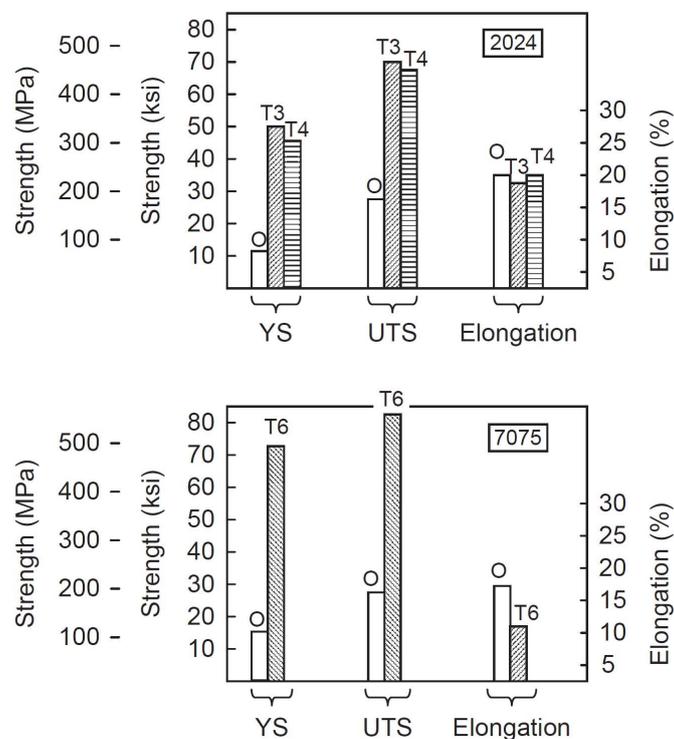


Figura 4 Variazione delle proprietà meccaniche in seguito al trattamento termico subito dalla lega 2024 e 7075 [1]

Le leghe trattabili termicamente contengono una quantità di elementi di lega solubili che superano il limite di solubilità a temperatura ambiente. La figura mostra una porzione del diagramma di equilibrio alluminio-rame e illustra due leghe contenenti il 4,5 e il 6,3% di rame, rappresentate dalle linee tratteggiate verticali (a) e (b). Le relazioni di solubilità e il comportamento di trattamento termico di queste composizioni si avvicinano a quelli delle leghe commerciali 2025 e 2219. I principi di queste considerazioni si applicano alle altre leghe trattabili termicamente.

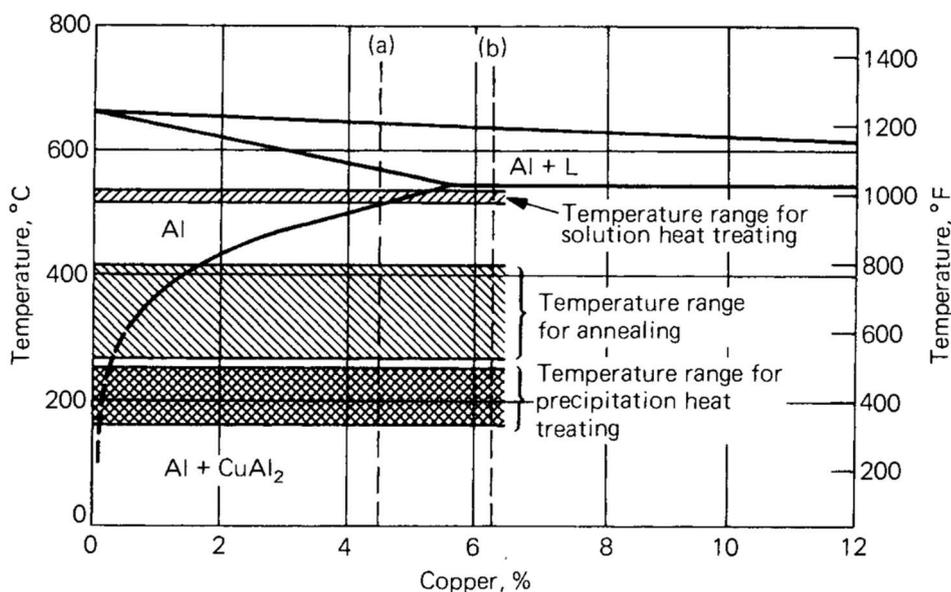


Figura 5 Diagramma di stato alluminio-rame [2]

Le fasi che bisogna prendere in considerazione per farsi un'idea del processo sono le seguenti [2] [3]:

- Il diagramma Fig. 7 mostra che, indipendentemente dalla struttura iniziale, mantenendo la lega di rame al 4,5% a una temperatura compresa tra 515 e 550 °C (da 960 a 1020 °F) fino al raggiungimento dell'equilibrio, il rame va completamente in soluzione solida;
- Riducendo la temperatura si origina una forza spingente, o forza motrice, che induce la formazione di precipitati dalla soluzione solida, ormai diventata sovrassatura.

Questa forza spingente aumenta all'aumentare della sovrassaturazione e al diminuire della temperatura;

- La velocità di precipitazione della seconda fase dipende dalla mobilità atomica, che si riduce al diminuire della temperatura;
- È possibile mantenere la soluzione solida che si forma ad alte temperature in condizione di sovrassaturazione raffreddando velocemente, evitando così la precipitazione alle temperature intermedie. La precipitazione avverrà comunque successivamente con una velocità che dipende dalla temperatura di trattamento e con un processo che può essere meglio controllato;
- Il fenomeno di precipitazione può avvenire in due modi: spontaneo e a temperatura ambiente e si parla in questo caso di “*Invecchiamento naturale*”; oppure può essere accelerato riscaldando i componenti e si parla in questo caso di “*Invecchiamento artificiale*”.

Dalla Figura 6 è possibile osservare i comportamenti tipici delle leghe trattate termicamente al variare del tempo e della temperatura di trattamento.

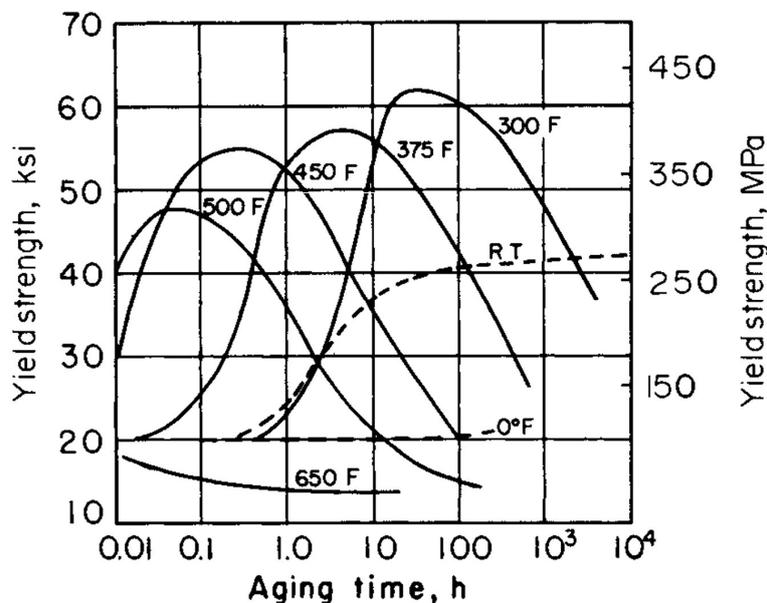


Figura 6 Influenza della temperatura di invecchiamento sulle proprietà meccaniche della lega Alluminio-Rame [2]

Le principali considerazioni che possono essere fatte sono le seguenti:

- Il rafforzamento può essere ritardato o soppresso abbassando la temperatura;
- La velocità di rafforzamento, e poi di softening, aumentano all'aumentare della temperatura;
- Sopra il range di temperatura che permette di vedere il primo massimo di resistenza, si osserva che il massimo diminuisce all'aumentare della temperatura di trattamento;
- A temperature sufficientemente elevate non si osserva nessun tipo di rafforzamento;

Nel selezionare il tempo e la temperatura di trattamento devono essere tenuti in conto tutti questi aspetti, oltre a valutazioni di natura economica. In generale, si tende a preferire quelle combinazioni di temperatura-tempo che garantiscono il più ampio range in prossimità del massimo di proprietà meccaniche.

Nelle leghe Alluminio-Rame il rafforzamento è determinato da zone composte da atomi di rame chiamate Guinier-Preston (GP). Sono regioni bidimensionali ricche di rame in forma discoidale. Il numero di tali zone aumenta con il tempo. Con un trattamento a 130°C, o a temperature superiori, queste zone GP(1) scompaiono, lasciando spazio alle zone GP (2) o  $\theta'$  che ha struttura tridimensionale. La fase di transizione  $\theta'$  ha la stessa composizione della fase stabile ed è coerente con il reticolo della soluzione solida. Questa si forma dopo GP(2), ma coesistono insieme in un intervallo di tempo e temperatura. La sequenza delle fasi è la seguente:



La correlazione tra queste strutture e la durezza è illustrata in Figura 7

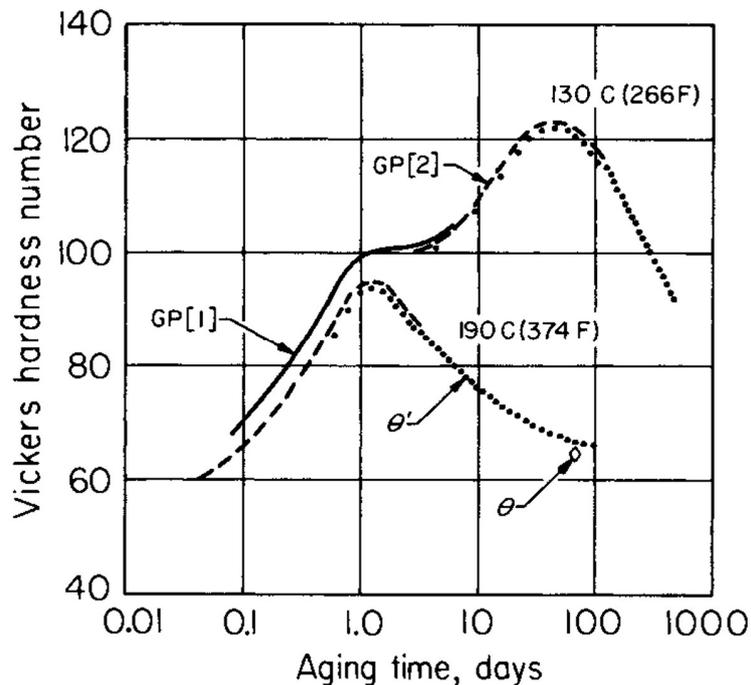


Figura 7 Variazione della durezza al variare dei precipitati nelle leghe alluminio-rame [2]

Il valore massimo di durezza si ha quando la quantità di Gp (2) è al valore massimo e coesiste anche la fase  $\theta'$ . Le fasi Gp(1) e Gp(2) sono delle fasi coerenti, che distorcono il reticolo e determinano il rafforzamento della lega. La fase  $\theta'$  è semicoerente, mentre la fase  $\theta''$  è incoerente e ciò determina una notevole riduzione in durezza, perché ha un reticolo completamente diverso rispetto a quello della soluzione solida sovrasatura.

Una fase molto delicata del trattamento termico è sicuramente la tempra. L'obiettivo della tempra è quello di ottenere una soluzione solida sovrasatura a temperatura ambiente, la cui composizione chimica sia il più possibile uguale alla soluzione ottenuta dal processo di solubilizzazione. Questo si ottiene raffreddando molto velocemente fino a temperatura ambiente. Oltre a questo, è necessario mantenere un certo numero di difetti reticolari (vacanze) per favorire la diffusione alle basse temperature per la formazione di precipitati metastabili [2] [3].

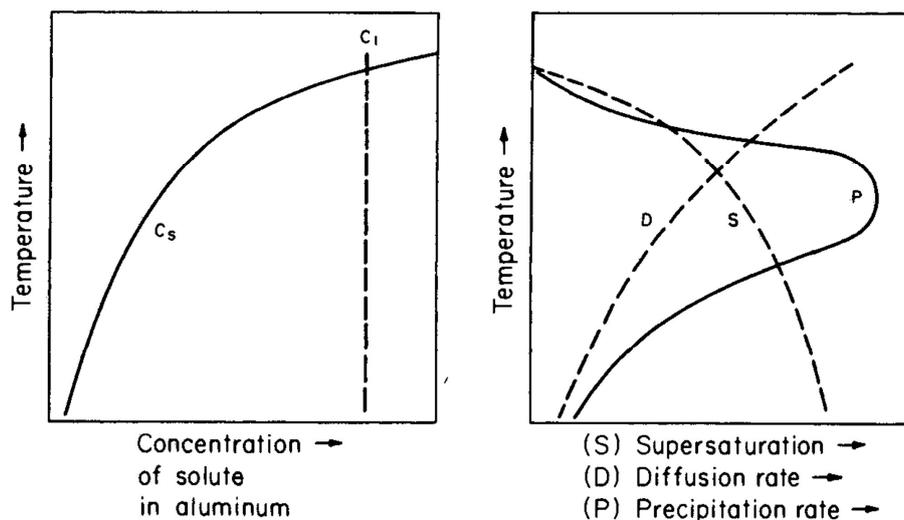


Figura 8 Influenza della temperatura sui fattori che determinano la velocità di precipitazione [2]

Durante la tempra deve essere evitato il picco della curva di velocità precipitazione, per evitare i fenomeni diffusivi. In generale, i maggiori valori di rafforzamento ottenibili sono quelli associati alle maggiori velocità di tempra [3].

## 1.5 Leghe di alluminio-magnesio-silicio (6xxx)

La combinazione di magnesio (da 0,6 a 1,2% in peso) e silicio (da 0,4 a 1,3% in peso) in alluminio costituisce la base delle leghe induribili per precipitazione 6xxx. [1] Durante l'indurimento per precipitazione, il composto intermetallico  $Mg_2Si$  fornisce il rinforzo. Manganese o cromo viene aggiunto alla maggior parte delle leghe 6xxx per maggiore forza e controllo della granulometria. Il rame aumenta anche la resistenza di queste leghe, ma se presente in quantità superiori allo 0,5% in peso, riduce la resistenza alla corrosione. Queste leghe sono ampiamente utilizzate nell'industria in applicazioni di saldatura, sono utilizzate prevalentemente sotto forma di estrusioni e sono incorporate in molti componenti strutturali. Le leghe 6xxx sono trattabili termicamente fino a livelli di resistenza moderatamente elevati, hanno una migliore resistenza alla corrosione rispetto alle leghe 2xxx e 7xxx, sono saldabili e offrono un'estrusibilità superiore. Con un carico di snervamento paragonabile a quello dell'acciaio dolce, il 6061 è una delle leghe di alluminio più utilizzate. Le forze più elevate si ottengono quando l'invecchiamento artificiale viene avviato immediatamente dopo la tempra.

Perdite di resistenza da 21 a 28 MPa (da 3 a 4 ksi) si verificano se queste leghe vengono invecchiate a temperatura ambiente da 1 a 7 giorni. La lega 6063 è ampiamente utilizzata per estrusioni strutturali per uso generale perché la sua chimica ne consente l'estinzione direttamente dalla pressa di estrusione. La lega 6061 viene utilizzata dove è richiesta una maggiore resistenza e 6071 dove è richiesta la massima resistenza. Le leghe 6xxx possono essere saldate, mentre la maggior parte delle leghe 2xxx e 7xxx hanno una saldabilità molto limitata. Tuttavia, queste leghe sono sensibili alla cricca di solidificazione e non dovrebbero essere saldate ad arco senza materiale d'apporto. L'aggiunta di adeguate quantità di materiale d'apporto durante i processi di saldatura ad arco è essenziale per prevenire la diluizione del metallo base, prevenendo così il problema del cracking a caldo. Sono saldati con materiali di riempimento sia 4xxx che 5xxx, a seconda dell'applicazione e dei requisiti di servizio. Sebbene le leghe 6xxx non siano tradizionalmente in grado di competere con le leghe 2xxx e 7xxx in applicazioni che richiedono un'elevata resistenza, una lega relativamente nuova (6013-T6) ha una resistenza superiore del 12% rispetto alla 2024-T3 rivestita, con tenacità alla frattura e resistenza paragonabili a tasso di crescita delle cricche da fatica e non deve essere rivestito per la protezione dalla corrosione [1].

## 1.6 Produzione delle Lamiere

L'alluminio laminato è la forma più comune di prodotti in alluminio lavorato. La lamiera è il laminato con uno spessore compreso tra 0,15 e 6,3 mm (da 0,006 a 0,250 pollici). Se lo spessore è maggiore di 6,3 mm (0,250 pollici), viene chiamato lastra. Il foglio è invece il lavorato di alluminio prodotto con uno spessore inferiore a 0,15 mm (0,006 pollici). Fogli, lamiere e lastre di alluminio vengono prodotti da lingotti di alluminio utilizzando i seguenti passaggi:

1. Scalping del lingotto;
2. Preriscaldamento e omogeneizzazione del lingotto;
3. Riscaldare il lingotto, se necessario, alla temperatura di laminazione a caldo;
4. Laminazione a caldo per formare una lastra;
5. Ricottura intermedia;

6. Laminazione a freddo con ricotture intermedie per formare fogli e lamiere;

Lo scalping rimuove eventuali irregolarità o composizioni chimiche indesiderate lasciate sulla superficie del lingotto dal processo di colata.

**Scalping di lingotti.** Per evitare che i difetti superficiali del lingotto fuso vengano laminati, vengono rimossi dalle superfici da rullare da 6,3 a 9,5 mm circa. Alcune leghe, come 1100, 3003 e 3015, dopo colatura hanno superfici abbastanza lisce e non richiedono scalping. Altri lingotti più altamente legati, come leghe contenenti magnesio e leghe aeronautiche ad alta resistenza, vengono sempre sottoposti a scalping.

**Il preriscaldamento o l'omogeneizzazione** mette in soluzione solida tutti i costituenti solubili e riduce il sottoraffreddamento che si verifica durante il processo di colata. Allevia le sollecitazioni nel lingotto e rende la struttura del getto più uniforme e più facilmente lavorabile a caldo. Le temperature ed i tempi di omogeneizzazione dipendono dalla lega specifica. Ad esempio, l'alluminio 1100 viene immerso per circa 1 ora a 455-510 °C, mentre il 7075 richiede fino a 24 ore a 455-470 °C. I lingotti che verranno rivestiti durante la laminazione a caldo vengono sottoposti a scalping dopo il preriscaldamento per evitare la forte ossidazione che si verifica durante il lungo ciclo di preriscaldamento. Ciò consente al rivestimento di formare un legame migliore durante la laminazione a caldo.

**La laminazione a caldo** condotta al di sopra della temperatura di ricristallizzazione produce una struttura fine e un minimo di direzionalità dei grani. Il limite superiore è fissato dall'eutettico del punto di fusione più basso presente nella lega, mentre la temperatura inferiore è la temperatura alla quale il metallo è sufficientemente caldo da essere sufficientemente ridotto ad ogni passaggio attraverso la macchina senza rotture. Il lingotto è lavorato attraverso una serie di laminatoi a quattro altezze. Le temperature di rottura sono comprese tra 400 e 540 °C, con temperature di laminazione continua da circa 290 a 455 °C. Poiché il pezzo lavorato si allunga rapidamente nella direzione di laminazione, è necessario rimuovere la bramma dalla macchina, girarla e quindi laminarla nell'altra direzione per produrre lamiere o lastre larghe. La struttura del grano si allunga nella direzione di laminazione. Ciò si traduce in proprietà meccaniche anisotropiche in cui le proprietà sono più basse nella direzione dello spessore (corto-trasversale). La laminazione in lastre e fogli più sottili viene quindi condotta su mulini a cinque gabbie a quattro altezze, con riduzioni

successive ad ogni mulino. I fogli di alluminio, che possono uscire dall'ultimo macchinario a velocità prossime a 485 km/h (300 mph), vengono avvolti in grandi bobine prima della laminazione a freddo.

**Ricottura intermedia.** Poiché la laminazione a caldo produce un certo incrudimento, le lamiere di alluminio, avvolte in bobine, ricevono una ricottura intermedia prima della laminazione a freddo. Poiché il grado di incrudimento introdotto durante la laminazione a caldo è sufficiente da causare la ricristallizzazione, la ricottura non solo riduce la resistenza e aumenta la duttilità, ma conferisce anche una struttura dei grani più fine.

**Laminazione a freddo.** Fogli e lamiere vengono laminati a freddo dopo la laminazione a caldo per produrre una finitura superficiale migliore e controllare la resistenza e la duttilità attraverso l'incrudimento. Anche in questo caso, vengono utilizzati macchinari a quattro altezze insieme a lubrificanti. A seconda della quantità di riduzione e della resistenza finale richiesta, vengono eseguite ricotture intermedie durante il processo di laminazione a freddo [1].

## 1.7 Corrosione

La resistenza alla corrosione e all'ossidazione dell'alluminio è dovuta ad un film di ossido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) molto aderente che si forma immediatamente con l'esposizione all'aria. L'alluminio è resistente alla corrosione in soluzioni neutre ma viene attaccato sia da soluzioni basiche che acide. La maggior parte, ma non tutte, le leghe di alluminio sono meno resistenti alla corrosione dell'alluminio puro. La resistenza generale alla corrosione delle leghe di alluminio è solitamente una funzione inversa della quantità di rame utilizzata nella lega. Pertanto, le leghe della serie 2xxx sono le leghe meno resistenti alla corrosione, poiché il rame è il loro elemento di lega principale e tutte hanno livelli di rame apprezzabili (circa il 4% in peso). La maggior parte delle leghe della serie 6xxx contiene poco rame. Tra le leghe temprabili per precipitazione, le leghe 6xxx hanno la migliore resistenza alla corrosione ma non sono forti come le leghe 2xxx e 7xxx trattate termicamente.

## 1.8 Tailored Blanks

Il peso delle auto è aumentato costantemente nel corso degli anni da quando le dimensioni complessive sono state ampliate e sono stati inclusi una gran quantità di componenti elettrici ed elettronici per soddisfare le crescenti esigenze di sicurezza e comfort. L'aumento del peso del veicolo è associato ad un maggiore consumo di carburante, quindi, bisogna alleggerire la carrozzeria per compensare il peso dei componenti aggiuntivi. A questo scopo vengono utilizzati i tailored blanks che rinforzano la struttura solo nelle aree in cui è necessaria una maggiore resistenza o rigidità.

Il termine tailored blanks indica dei semilavorati prodotti a partire da lamiere di differenti leghe, spessori, rivestimenti o proprietà del materiale. Dopo la giunzione questi sono destinati a processi di imbutitura profonda o stampaggio.

I tailored blanks sono generalmente realizzati in acciaio. Sono disponibili anche grezzi su misura in alluminio e materiali diversi, ma meno comuni. [4] [5]

In linea di principio si possono distinguere quattro diversi approcci per realizzare grezzi su misura:

1. Tailor welded blanks che prevedono di unire materiali con diversa composizione, spessore o rivestimento mediante un processo di saldatura;
2. Patchwork blanks che puntano a rinforzare localmente il grezzo aggiungendo una seconda lamiera di rinforzo;
3. Tailor rolled blanks che crea una variazione continua dello spessore della lamiera mediante un processo di laminazione;
4. Tailor blanks trattati termicamente: controllano le proprietà del materiale mediante un trattamento termico locale;

Il principale vantaggio dei prodotti realizzati con tailor blanks rispetto ai prodotti convenzionali è una riduzione del peso perché il numero degli elementi di giunzione richiesto è minore. Gli svantaggi sono gli elevati costi per i processi di saldatura e la necessità di strumenti di formatura opportunamente realizzati.

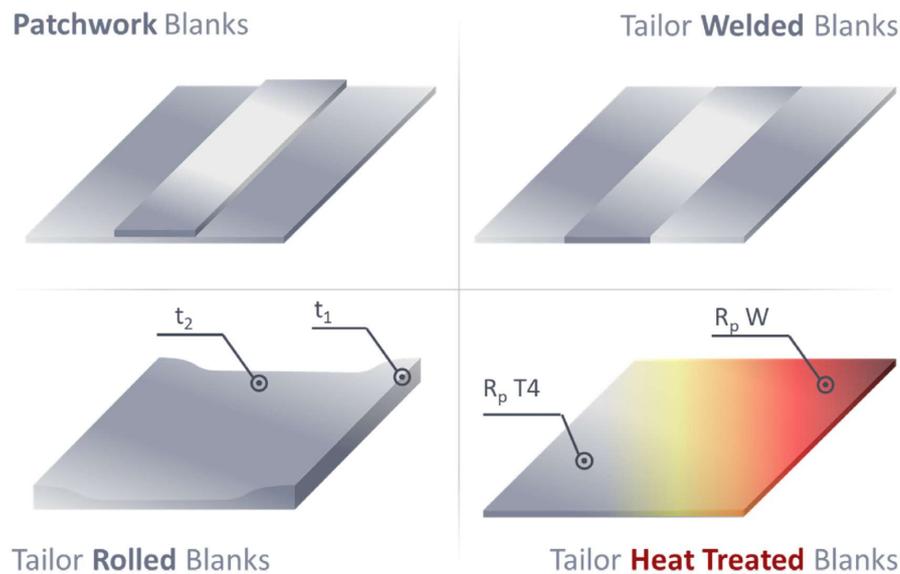


Figura 9 Principali tipi di tailor blank [5]

In generale, tutti e quattro i tipi di tailor blanks portano a una riduzione di peso rispetto ai componenti realizzati con l'uso delle tecniche convenzionali. Di contro, è richiesto uno sforzo maggiore per la produzione. In dettaglio, i TWBs offrono la possibilità di gestire localmente le caratteristiche dei componenti realizzati in termini di spessore e composizione del materiale. Inoltre, nel processo di fabbricazione sono necessari meno strumenti di formatura e l'uso di linee di saldatura continue porta a migliori prestazioni di assorbimento dell'energia durante gli urti. È necessario molto sforzo per la preparazione dei cordoni. Inoltre, la linea di saldatura provoca anche una ridotta formabilità e la variazione discontinua di spessore sulla linea di giunzione porta ad una elevata concentrazione di sollecitazioni. I grezzi patchwork hanno rispetto ai TWBs una maggiore flessibilità nella forma geometrica, quindi, è necessaria una precisione di preparazione inferiore. Al contrario, i TBs laminati mostrano una buona formabilità poiché la transizione dello spessore è continua. Un altro vantaggio è la loro migliore qualità superficiale perché non presentano cordoni di saldatura. Tuttavia, il processo di laminazione porta a sollecitazioni interne variabili in base allo spessore della lamiera. I grezzi trattati termicamente su misura mostrano una migliore formabilità e la forma e la posizione delle aree trattate termicamente è arbitraria. Uno svantaggio è la presenza di gradienti termici che devono essere considerati nel processo. [5]

I tailored blanks sono stati sviluppati da ThyssenKrupp. Il primo brevetto relativo ai tailor welded blanks è stato depositato nel 1964. In Europa, I TWBs sono stati introdotti da Volvo nel 1979. I TWBs sono stati inizialmente saldati insieme mediante saldatura a filo continuo. Successivamente è stato utilizzato un processo di saldatura testa a testa a induzione che ha portato a una produzione più efficiente e facilità nella progettazione. All'inizio degli anni '80 è apparsa la tecnologia di saldatura laser. L'azienda siderurgica ThyssenKrupp in collaborazione con Audi ha utilizzato la saldatura laser a CO2 per realizzare i pannelli del pavimento dell'Audi nel 1983. Poiché le lastre zincate non erano disponibili nella dimensione desiderata, ne sono state saldate due insieme. Dagli anni '90 la saldatura laser è diventata la tecnologia di saldatura preferita, anche per il fatto che la saldatura a filo continuo ha i suoi limiti nell'unire lamiere di acciaio completamente zincato. Al giorno d'oggi, i TWBs vengono utilizzati per realizzare elementi come i pannelli delle porte che sono spessi vicino ai cardini e sottili vicino alla serratura per resistere a diversi tipi di carichi o attacchi di corrosione. Sono utilizzati in una varietà di applicazioni automobilistiche, ad es. pannelli laterali, portiere, passaruota, longheroni e pavimenti. Se i pezzi sono realizzati con tailor welded blanks, la resistenza agli urti del corpo è aumentata. Inoltre, vi è una riduzione del peso perché il numero dei rinforzi può essere ridotto al minimo. [5]

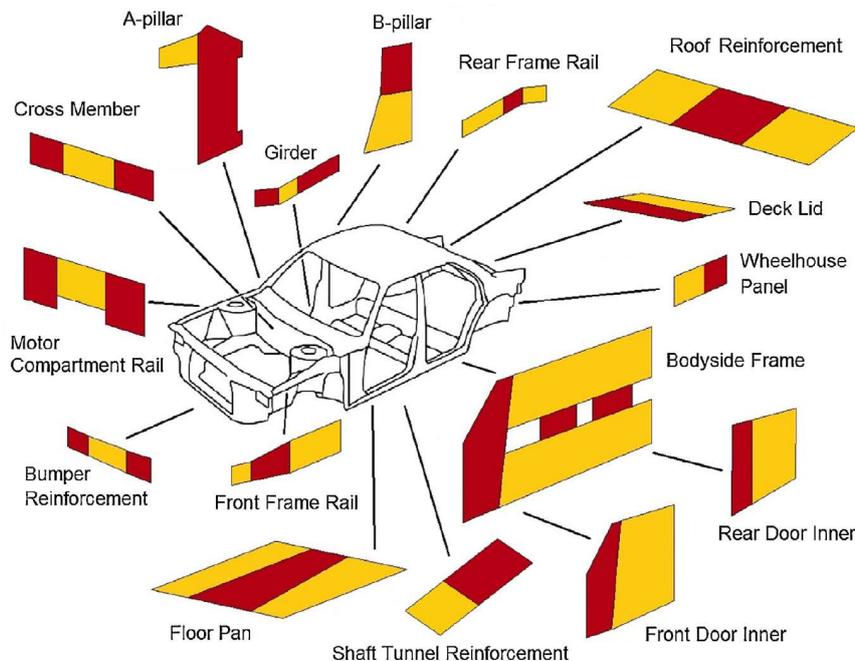


Figura 10 Tailor welded blanks applicati nelle carrozzerie automobilistiche [5]

Un'ulteriore riduzione di peso nelle applicazioni automobilistiche può essere ottenuta utilizzando le leghe di alluminio. Tuttavia, l'alluminio ha una scarsa saldabilità a causa della sua elevata riflettività, bassa viscosità nello stato liquido e presenza di strati di ossido. Ciò porta a porosità, cricche a caldo nella zona di fusione, riduzione della resistenza e perdita di elementi di lega. Nel caso della saldatura laser si verifica inoltre un cattivo accoppiamento. Pertanto, sono in corso molte ricerche per migliorare il processo di saldatura di questo materiale. [5]

## 2. Saldatura Laser

Il laser è un raggio coerente e amplificato di radiazione elettromagnetica. Per la generazione di un raggio laser sono indispensabili queste tre componenti:

- Un materiale (gas, cristallo o liquido) che opportunamente eccitato emette la luce e prende il nome di mezzo ottico attivo (1);
- Un sistema di pompaggio che si occupa di eccitare il mezzo attivo fornendo energia (2);
- Una cavità ottica che ha il compito di intrappolare la luce;

Il mezzo attivo è in grado di emettere radiazioni elettromagnetiche quando viene stimolato ed è quello che determina la lunghezza d'onda del laser. Può essere sia solido, liquido o gassoso. Dopo che il sistema di pompaggio stimola l'eccitazione del mezzo attivo, le radiazioni emesse vengono concentrate, per mezzo di una cavità ottica con pareti riflettenti (3) e una zona di uscita con pareti semiriflettenti (4). Quest'ultima superficie deve garantire l'uscita del raggio (5), che successivamente viene convogliato attraverso un sistema di lenti e specchi nel punto desiderato. Di seguito è proposta una schematizzazione semplificata. [6]

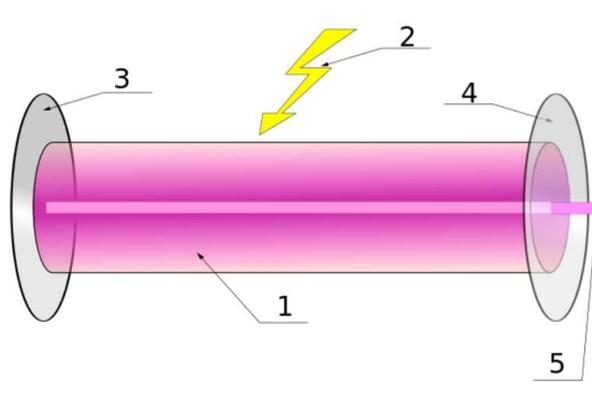


Figura 11 Schema illustrativo del sistema di generazione del raggio laser [6]

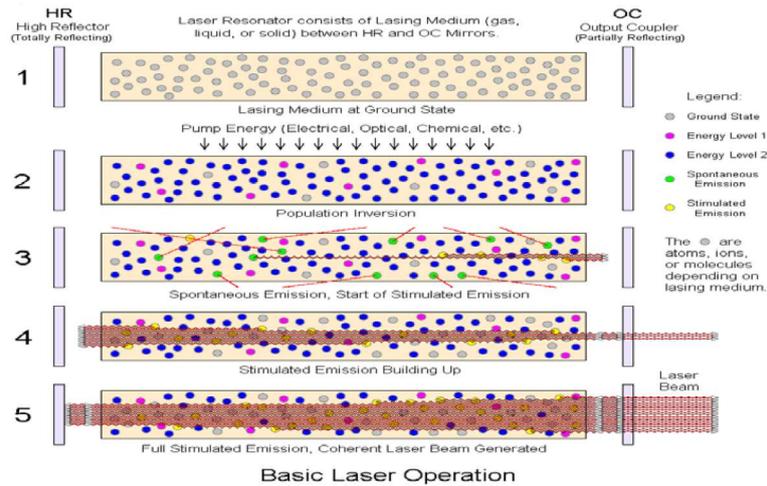


Figura 12 Varie fasi della formazione di un raggio laser [7]

La saldatura è il metodo di giunzione più versatile applicabile in ogni campo industriale. Un laser è una fonte di calore ad alta densità di potenza. La Saldatura laser è una tecnica di saldatura senza contatto usata per unire pezzi di materiali simili o dissimili con l'uso di un laser. Questa tecnologia è ampiamente adoperata nell'industria automobilistica e anche in quella aerospaziale grazie alla sua versatilità, velocità di saldatura e precisione. Il raggio fornisce una sorgente concentrata di calore, che consente una saldatura sottile e profonda, e un alto rapporto profondità/larghezza del cordone dovuto alle piccole dimensioni dello spot. Il processo è usato frequentemente in applicazioni ad alto volume produttivo, come l'industria automobilistica.

Vantaggi saldatura laser [7]:

- Elevato rapporto profondità/larghezza relativamente al cordone di saldatura (in confronto con con le saldature convenzionali ad arco);
- Velocità di saldatura che assicura un'alta produttività;
- Basse distorsioni dovute alla dimensione molto piccola dello spot;
- Zona termicamente alterata ristretta;
- Capacità di saldare leghe di alluminio e materiali dissimili;
- Saldature facilmente ripetibili
- Non è generalmente richiesto materiale di apporto

Alcuni degli svantaggi sono invece:

- Bassa capacità di colmare le lacune
- Materiali ad alta riflettività rendono complicata la saldatura
- Perdita di elementi per evaporazione
- Alto costo delle apparecchiature e per la manutenzione

A parità di spessore del materiale da saldare, la larghezza di un cordone ottenuto con saldatura laser è circa un quarto di quella ottenuta utilizzando saldatura TIG. Di contro, la precisione nel fissaggio degli elementi da saldare e l'allineamento del fianco è molto più critico a causa della piccola dimensione dello spot.

I profili dei cordoni rappresentativi delle diverse tecniche di saldatura per fusione sono illustrati in Figura 13: [8]

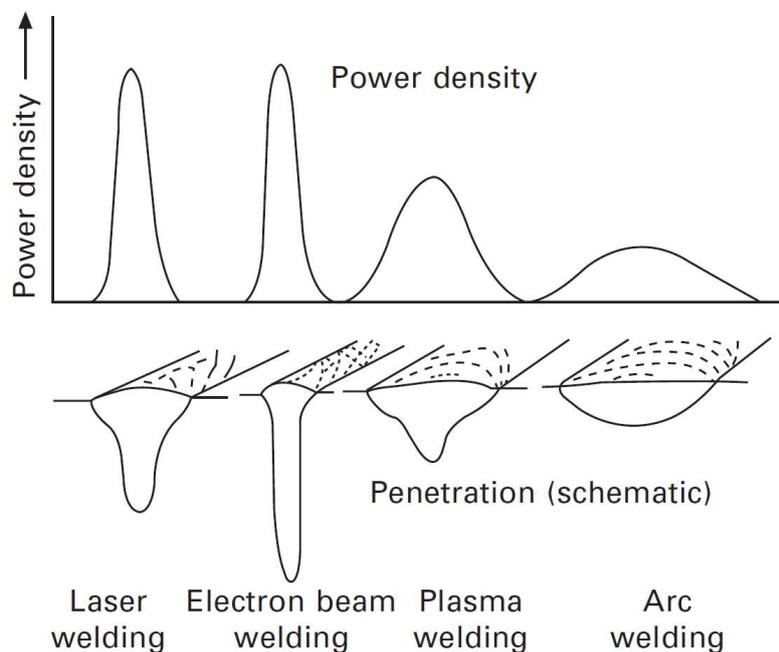


Figura 13 Rappresentazione della densità di potenza e della geometria del cordone al variare del metodo di saldatura utilizzato [8]

La densità di potenza usata nella saldatura può permettere due tecniche distinte di saldatura [7]:

- Se determina una fusione del materiale in corrispondenza del giunto saldato si parla di “conduction welding”
- Se, invece, determina una vaporizzazione parziale del materiale durante la saldatura si parla di “keyhole welding”

La saldatura laser in modalità conduction determina un minor livello di perturbazioni durante la saldatura, perché il raggio laser non penetra il materiale. Quindi questo tipo di saldatura è meno suscettibile a intrappolare gas durante la saldatura. È però una tecnica di saldatura meno efficace in quanto soggetta a un’importante perdita di energia per riflessione.

La saldatura laser in modalità keyhole, invece, è caratterizzata dal fatto che il fascio laser entra nel pezzo attraverso il buco che si origina dall’evaporazione del materiale. Il raggio laser subisce una riflessione multipla all’interno della cavità. Per generare questo tipo di saldatura deve essere impiegata una densità di potenza  $> 10^6 \text{ W/cm}^2$  sulla superficie del metallo. In questo caso l’efficienza del processo è migliore. La stabilità del keyhole dipende da un equilibrio tra pressione di tensione superficiale e pressione di vapore: la pressione di tensione superficiale tende a chiudere il keyhole mentre la contropressione di vaporizzazione tende a mantenerlo aperto. [8]

La transizione tra saldatura per conduzione e keyhole avviene aumentando l’intensità del laser e la durata dell’impulso applicato al pezzo da saldare [7].

Per controllare il processo di saldatura e ottenere una buona qualità del cordone è di fondamentale importanza trovare il giusto compromesso tra i parametri di processo che sono [9]:

- Potenza di uscita;
- Velocità di saldatura;
- Posizione del fuoco;
- Portata del Gas di protezione;
- Posizionamento del pezzo;

Settando bene questi parametri è possibile una varietà di giunti di metalli o plastica che vanno da fogli molto sottili di circa 0,01 mm di spessore a lastre spesse di circa 50 mm, utilizzando gas protezione come elio (He), argon (Ar) o talvolta azoto (N<sub>2</sub>). La saldatura laser ha guadagnato grande popolarità come promettente tecnologia di giunzione di alta qualità, alta precisione, alte prestazioni, alta velocità, buona flessibilità e bassa distorsione. È anche possibile automatizzare il processo riducendo la manodopera.

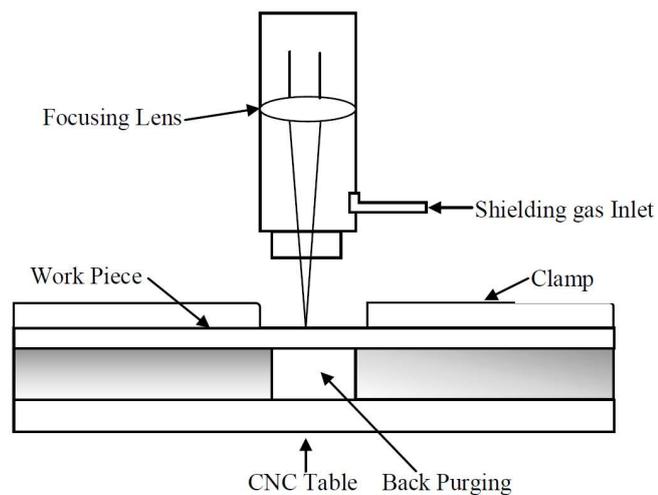


Figura 14 Rappresentazione schematica della saldatura laser [7]

È possibile realizzare diversi tipi di giunti:

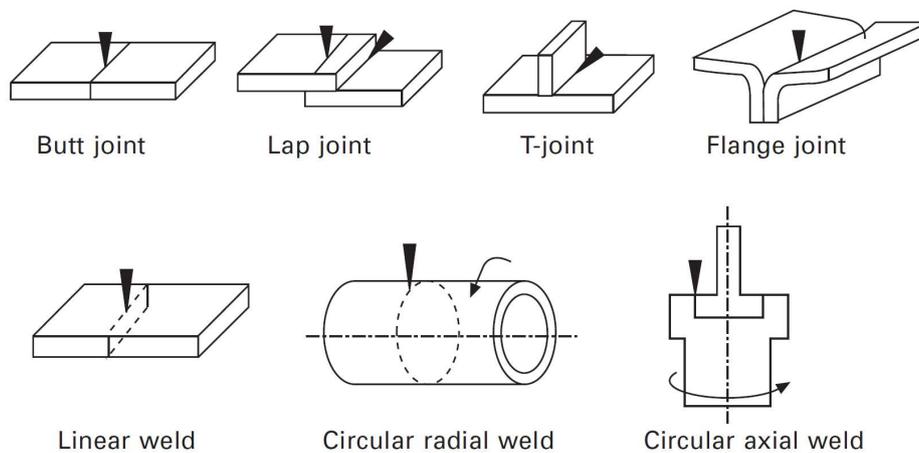


Figura 15 Tipici esempi di giunti realizzati tramite saldatura laser [8]

In generale i principali tipi di laser usati per operazioni di saldatura sono raccolti nella tabella seguente, accompagnati da una breve descrizione delle principali proprietà.

Types of laser	Laser characteristics
CO <sub>2</sub> laser	Wavelength: 10.6 μm; far-infrared ray Laser media: CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He mixed gas (gas) Average power [CW]: 50 kW (Maximum) (Normal): 1–15 kW
Lamp-pumped YAG laser	Wavelength: 1.06 μm; near-infrared ray Laser media: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> garnet (solid) Average power [CW]: 10 kW (cascade-type max & fiber-coupling max) (Normal): 50 W–7 kW (Efficiency: 1–4%)
Laser diode (LD)	Wavelength: 0.8–1.1 μm; near-infrared ray Laser media: InGaAsP, etc. (solid) Average power [CW]: 10 kW (stack-type max.), 15 kW (fiber-delivery max.) Merits: Compact, and high efficiency (20–60%)
LD-pumped solid-state laser	Wavelength: about 1 μm; near-infrared ray Laser media: Nd <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> garnet (solid), etc. Average power [CW]: 13.5 kW (fiber-coupling max.) [PW]: 6 kW (slab-type max.)
Disk laser	Wavelength: 1.03 μm; near-infrared ray Laser media: Yb <sup>3+</sup> :YAG or YVO <sub>4</sub> (solid), etc. Average power [CW]: 16 kW (cascade-type Max.) Merits: Fiber delivery, high brightness, high efficiency (15–25%)
Fiber laser	Wavelength: 1.07 μm; near-infrared ray Laser media: Yb <sup>3+</sup> :SiO <sub>2</sub> (solid), etc. Average power [CW]: 100 kW (fiber-coupling max.) Merits: Fiber delivery, high brightness, high efficiency (20–30%)

*Figura 16 Principali tipi di sorgenti laser in commercio [8]*

I laser CO<sub>2</sub>, con lunghezza d'onda di 10,6 mm, sono sviluppati per un'elevata qualità del raggio e il facile raggiungimento di una potenza maggiore, la potenza massima del laser raggiunge fino a 50 kW e livelli di potenza da 1 a 15 kW sono utilizzati principalmente nella saldatura di acciai, componenti automobilistici, aeroplani, navi, ecc.

I laser Nd:YAG, con lunghezza d'onda di 1,06 mm, possono essere erogati attraverso una fibra ottica e funzionano in modalità CW o PW. I laser PW vengono utilizzati nella saldatura di piccole parti come custodie di batterie, componenti elettrici, telai in vetro, ecc.

I laser CW di potenza da 2 a 7 kW vengono utilizzati per la saldatura laser di tailor welded blanks, automobili in alluminio, lamiere di acciaio rivestite di Zn, tubi e serbatoi in acciaio inossidabile, ecc.

I giunti di testa-testa e quelli sovrapposti sono comunemente saldati con laser PW o CW. La saldatura laser può avvenire secondo due tecniche principali PW e CW che sono schematicamente illustrati in fig. 17. A seconda della densità di potenza, si forma un punto o cordone di saldatura del tipo a conduzione termica o del tipo a keyhole. Quando un raggio laser viene sparato sulla lastra metallica, l'assorbimento di energia laser è causato dall'interazione con gli elettroni liberi nel metallo, di conseguenza temperatura della superficie della lastra aumenta per la trasformazione dell'energia laser in energia termica. L'assorbimento del fascio laser aumenta leggermente all'aumentare della temperatura nel solido e notevolmente al di sopra della temperatura di fusione. La temperatura dell'area irradiata dal laser aumenta fino alla temperatura di ebollizione e in particolare fino alla formazione di una cavità o un keyhole. [8]

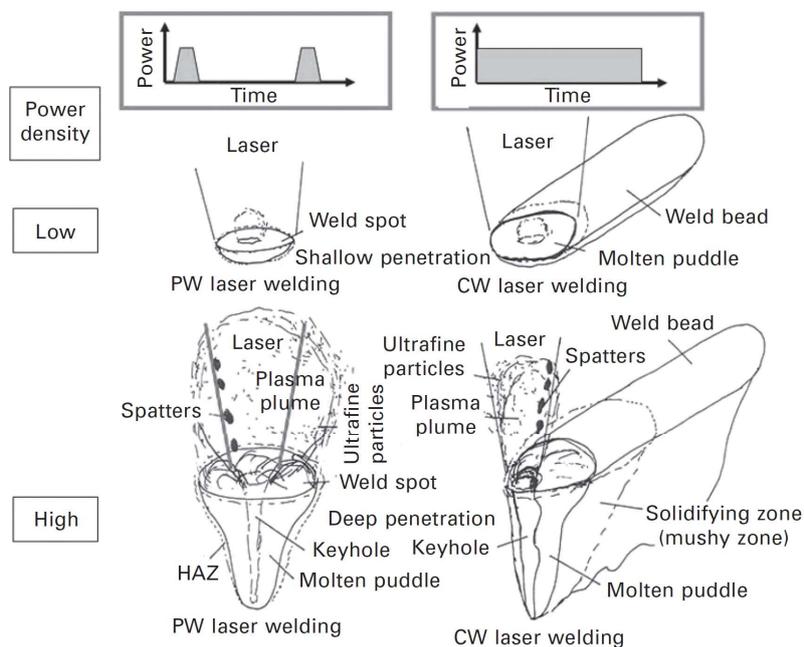


Figura 17 Illustrazione schematica dello spot e del cordone di saldatura con le due tecniche laser PW e CW [8]

Nel caso della saldatura a keyhole l'assorbimento del laser è estremamente elevato a causa della multiriflessione verso l'interno della cavità che si è formata. È un tipo di saldatura a penetrazione profonda ed considerato un processo di giunzione efficiente soprattutto per saldare lamiere di grandi spessori. Il keyhole è mantenuto stabile dalla pressione dell'evaporazione del materiale metallico. [8]

Il fascio penetra nel keyhole e vien assorbito dalle pareti del foro determinando la formazione di vapori ionizzati (plasma) che escono dalla superficie. Questo plasma, uscendo dalla superficie del pezzo, assorbe parte del fascio limitando di molto l'energia che arriva nel keyhole. [10] Si può provare ad aumentare l'energia del keyhole sparando degli opportuni gas inerti ad una certa velocità e allontanando il plasma che sta sulla superficie del pezzo.

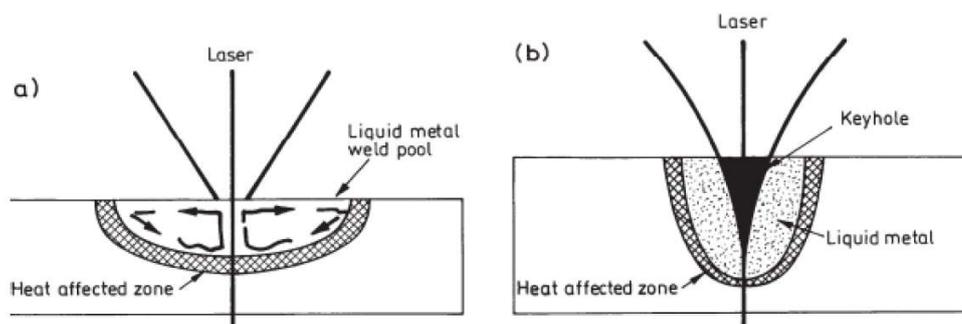


Figura 18 Conduzione mode e keyhole mode [7]

Sia i laser a disco che quelli a fibra vengono utilizzati come sorgenti di calore per la saldatura a distanza. La saldatura laser a distanza con robot e scanner è la tecnologia di giunzione più promettente, in grado di garantire alta velocità, alta produttività e flessibilità.

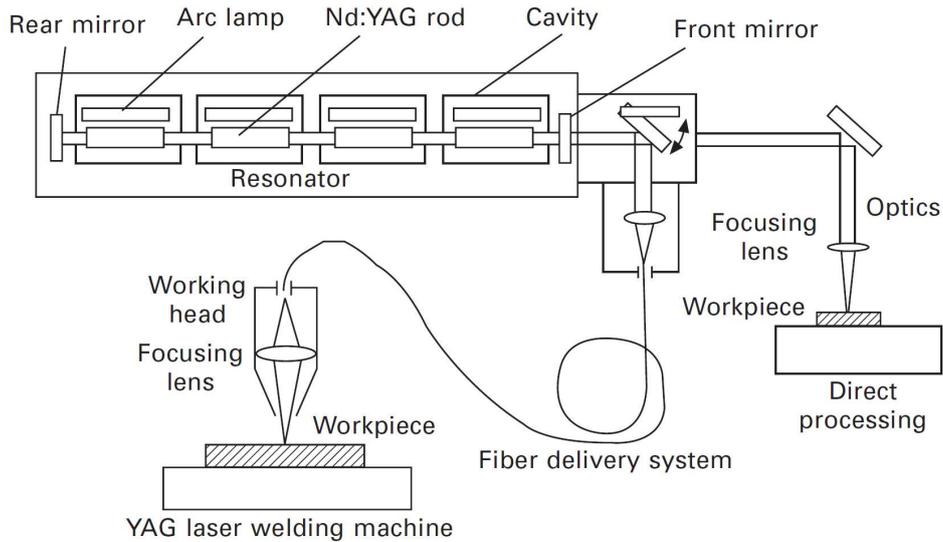


Figura 19 Schematizzazione sistema di saldatura con laser Nd:YAG [8]

## 2.1 Saldatura laser delle leghe di alluminio

Durante la saldatura laser, nel momento in cui il raggio laser arriva sul pezzo da saldare solo una parte dell'energia viene assorbita, mentre parte viene riflessa. Nei processi di saldatura laser, l'efficienza dipende dal coefficiente di assorbimento della superficie oltre che dalle proprietà del raggio stesso. Nell'istante in cui il raggio incide sulla superficie il valore di riflettività è molto elevato, tanto che solo una piccola parte dell'energia è assorbita. In un brevissimo intervallo di tempo comincia a formarsi un bagno fuso che determina una drastica diminuzione della riflettività. [10]

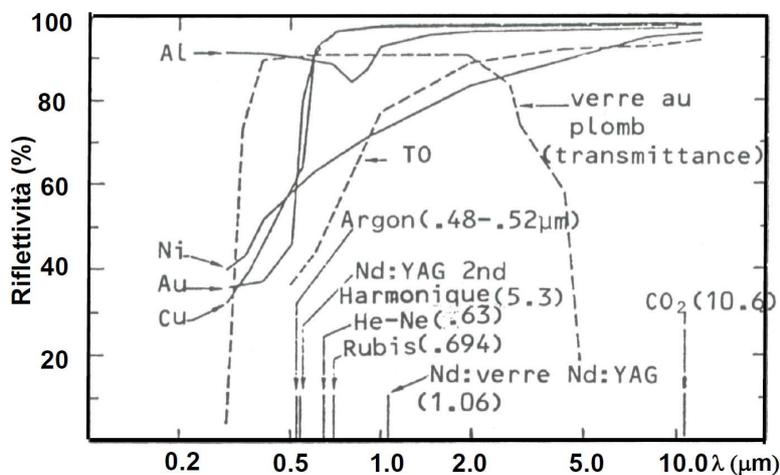


Figura 20 Riflettività al variare della lunghezza d'onda per alcuni materiali metallici [10]

L'alluminio è più sensibile a lunghezze d'onda dell'ordine del micrometro e quindi è tipicamente saldato con laser Nd:Yag (1,06 $\mu$ m) piuttosto che con laser CO<sub>2</sub> (10,6 $\mu$ m). [9]

I laser con lunghezza d'onda più bassa sono più facilmente assorbiti dal pezzo, pertanto il laser Nd:YAG necessita di una quantità di potenza minore rispetto al CO<sub>2</sub> per poter saldare a parità di altre condizioni. Ciò vuol dire che l'alluminio ha una più alta riflettività verso il laser a CO<sub>2</sub> rispetto a Nd:YAG. Un laser Nd:YAG ad alta potenza può facilmente superare lo strato di ossido superficiale, senza bisogno di pretrattare il componente eliminando tale strato protettivo. Comunque c'è da considerare che questo strato di ossido può intrappolare dell'umidità o scorie che durante il processo di saldatura possono trasformarsi in difetti e porosità. Quindi è sempre consigliato rimuovere questo strato di ossido superficiale o per mezzo di metodi meccanici oppure grazie ad attacchi chimici. [7]

Esiste ancora il problema fondamentale che l'affidabilità di saldatura delle leghe di alluminio è inferiore a quella di altri metalli industriali, come gli acciai. Il motivo risiede nelle proprietà fisiche delle leghe di alluminio, in particolare nella loro elevata conduttività termica, alta riflettività e bassa viscosità.

Il coefficiente di conducibilità termica delle leghe di alluminio dipende da diversi fattori, come la temperatura, la quantità e la natura degli elementi di lega e il precedente trattamento termico della lega (T3/T4 solitamente diminuisce la conducibilità termica rispetto a T0).

I valori di conducibilità termica relativamente elevati provocano un rapido riscaldamento quando le leghe di alluminio sono esposte ad un raggio laser. Questo effetto costituisce un importante inconveniente per LBW, in quanto il calore si diffonde su tutto il pezzo da saldare, evitando la concentrazione di energia nel bagno di saldatura. Pertanto, le leghe di alluminio richiedono energie laser maggiori rispetto ad altre leghe per essere saldate, poiché sono necessarie concentrazioni maggiori per raggiungere la temperatura di fusione delle zone di saldatura. Va tenuto presente che ogni elemento di lega ha un'influenza diversa sul coefficiente di conducibilità termica.

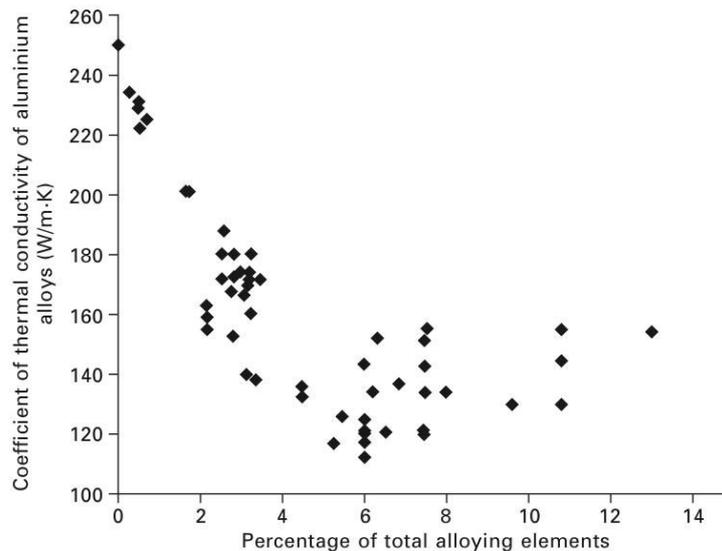


Figura 21 influenza della presenza di alcuni elementi in lega sul coefficiente di conducibilità termica di alcune leghe di alluminio, a temperatura ambiente [8]

Il secondo importante fattore che limita l'applicabilità della saldatura laser alle leghe di alluminio è la loro elevata riflettività. L'assorbimento di radiazione delle leghe di alluminio dipende fortemente dalla lunghezza d'onda del laser in ingresso. L'elevata riflettività fa sì che le leghe di alluminio assorbano una piccola frazione della radiazione incidente. Inoltre, l'effettivo assorbimento è influenzato dalla presenza di uno strato di ossido superficiale di allumina che per una corretta saldatura deve essere rimosso durante le fasi di preparazione. Possono essere usati i trattamenti superficiali, come la sabbiatura o l'applicazione di rivestimenti scuri, che riducono la riflettività delle leghe di alluminio. [8]

## 2.2 L'influenza del gas di protezione

Il gas di protezione ha una forte influenza sulla saldatura laser delle leghe di alluminio. Mentre i gas a bassa densità (He) sono volatili e quindi portano a una protezione peggiore, i gas ad alta densità (Ar) possono essere mantenuti per tempi più lunghi durante la saldatura, ma hanno anche un coefficiente di assorbimento più elevato (portando all'assorbimento di una radiazione laser maggiore). L'uso di Ar è vantaggioso per saldare leghe più altamente conduttive e riflettenti a potenza inferiore e superiore velocità di saldatura, mentre l'uso di He è preferito per una maggiore potenza e una velocità di saldatura inferiore. [8]

Per velocità di saldature basse, in condizioni stazionarie, la pressione di evaporazione non è sufficientemente intensa da mantenere aperto il keyhole. È possibile sparare il gas neutro dentro il keyhole per mezzo di un piccolo ugello. Se il gas è correttamente indirizzato, la pressione del getto può essere regolata in modo da bilanciare la pressione di chiusura determinata dagli effetti di tensione superficiale. In questo modo il raggio laser riesce a raggiungere profondità di penetrazione maggiori all'interno del materiale. Allo stesso tempo il processo risulta molto più stabile ed è possibile osservare una notevole riduzione delle porosità nel cordone.

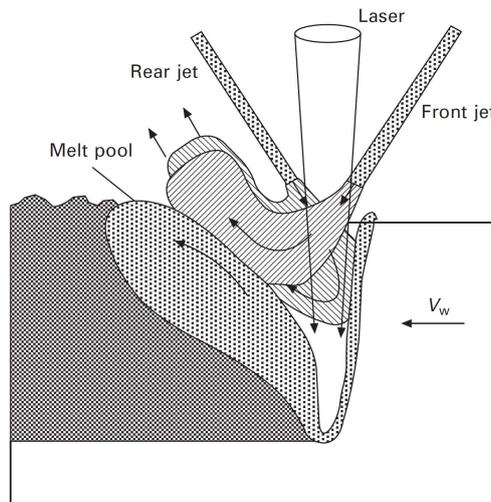


Figura 22 schema dell'apertura del keyhole utilizzando un getto di gas inerte [8]

Se non si indirizza correttamente la portata di gas protettivo si può ottenere l'effetto opposto e quindi portare a un'ulteriore instabilità del keyhole, come evidenziato nella figura seguente:

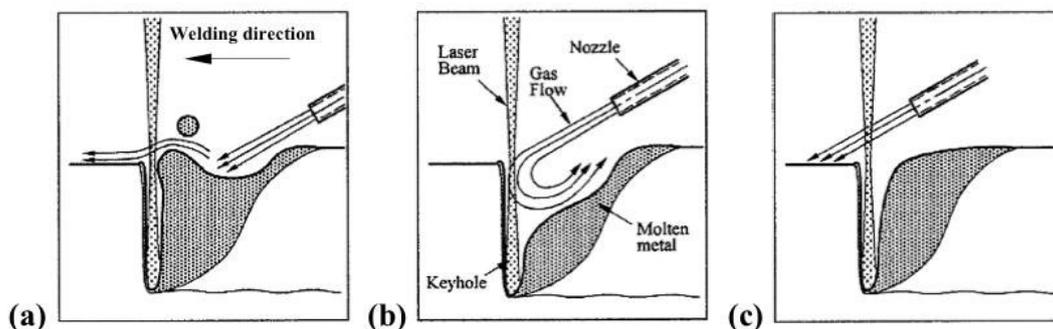


Figura 23 Effetto della posizione dell'ugello sul bagno fuso e l'interazione del gas nel processo di saldatura. La soluzione che rende l'applicazione del gas di protezione efficace è indicata con la lettera (b) [11]

Un altro effetto che genera l'uso del gas di protezione è quello mantenere il plasma in prossimità del keyhole. Bisogna prestare attenzione a non usare una portata troppo elevata, che potrebbe causare delle turbolenze nel processo di saldatura. Come risultato dell'uso del gas, si osserva un guadagno del 40–50% nella penetrazione del keyhole, e una riduzione delle porosità.

L'effetto plasma ridotto, nella saldatura con laser Nd:YAG, consente anche l'uso dell'argon come gas di protezione, mentre l'elio è essenziale per un laser CO<sub>2</sub>. [9]

### 2.3 Influenza della velocità di saldatura

La velocità di saldatura deve essere modulata per ottenere la massima qualità del cordone alla massima velocità possibile. [11] La velocità di saldatura è funzione del materiale, della potenza laser, e della profondità di passata. Una più alta velocità di saldatura riduce la perdita di elementi di lega e produce una microstruttura più fine, determinando un'incremento nella resistenza della saldatura. La velocità di saldatura nel campo dei tailored blanks nell'industria automobilistica varia da 6 a 15 m/min per garantire convenienza dal punto di vista economico. [9]

A un dato spessore o profondità di passata, la velocità di saldatura aumenta all'aumentare della potenza, come indicato in figura:

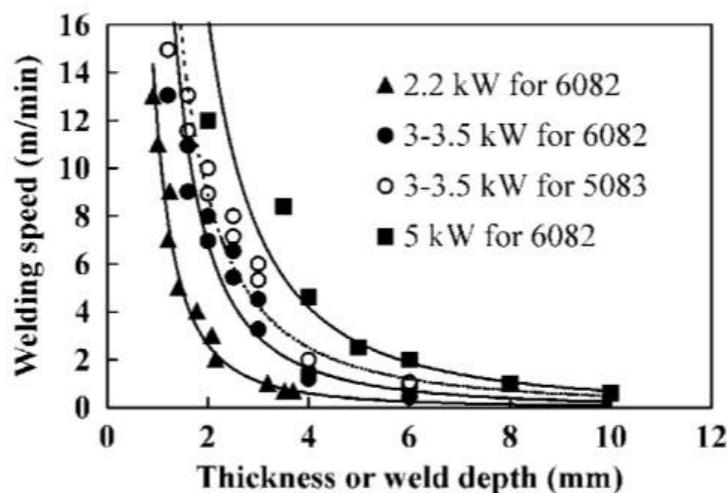


Figura 24 Effetto della potenza sulla velocità di saldatura nel caso di laser Nd:YAG [9]

A basse velocità di saldatura, il KH è piuttosto profondo, verticale e molto instabile, può portare a cedimenti irregolari. Il raggio laser colpisce la parete liquida e la spinge verso il basso generando bolle all'interno del bagno di fusione che non sono facilmente eliminabili (con possibile generazione di pori).

Le porosità sono presenti in percentuale maggiore nella saldatura in modalità keyhole, rispetto a quella in modalità conduttiva. Oltre a questo, è stato dimostrato che la velocità di saldatura ha un'influenza significativa sulla formazione delle porosità. In particolare, a basse velocità le porosità sono create dal collasso della parte frontale del keyhole e di conseguenza le porosità si trovano nella parte finale del keyhole. La dinamica del bagno fuso aiuta ad intrappolarle nel cordone ed a distribuirle in modo random. A velocità di saldature più importanti il keyhole è più stabile e si osservano minori concentrazioni di porosità. [11]

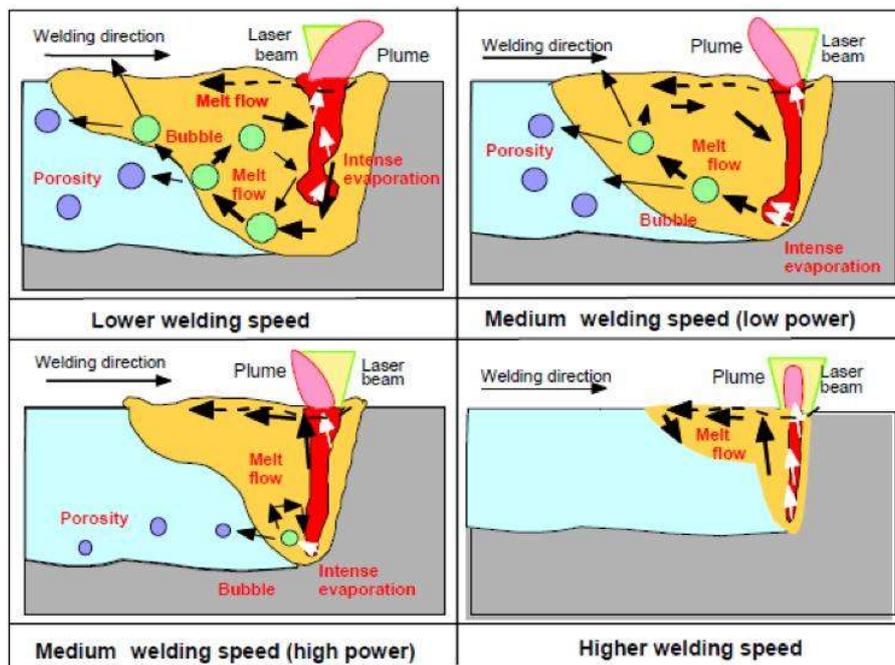


Figura 25 Effetto della velocità di saldatura sulla formazione di porosità [11]

## 2.4 Effetto della Potenza

La saldatura laser è un processo caratterizzato da un'alta densità di potenza. Il range di potenza utilizzato permette il passaggio da una saldatura a modalità conduttiva piuttosto che una a modalità keyhole. Per le leghe di alluminio, rispetto agli acciai, è richiesta una densità di potenza più elevata nella fase iniziale della saldatura, a causa dell'alta riflettività al raggio laser e della grande conducibilità termica. Se la densità di potenza è troppo bassa l'accoppiamento può risultare incompleto, mentre densità di potenza troppo elevate possono causare schizzi di metallo liquido e difetti di sottotaglio. La potenza laser deve essere scelta in accordo con il materiale da saldare e con il suo spessore. Inoltre, è strettamente collegata alla velocità di saldatura scelta. Materiali più spessi richiedono una potenza più alta a parità di velocità rispetto a materiali più sottili. [9] Nel caso della saldatura laser Nd:YAG, utilizzando una lunghezza d'onda più corta, la stabilità del processo è migliore in due aspetti: riduce il valore di soglia per la formazione del keyhole; secondo aspetto, l'effetto plasma è meno severo a causa del minore coefficiente di assorbimento del plasma, che cresce con il quadrato della lunghezza d'onda. [9] Quindi a parità di potenza, con il laser Nd:YAG può essere ottenuta una profondità di passata maggiore rispetto al laser CO<sub>2</sub> e può essere raggiunta una più elevata velocità di saldatura.

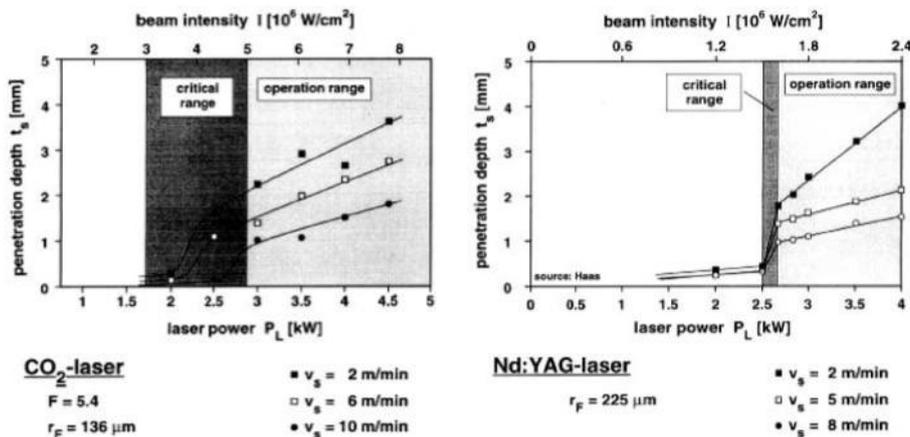


Figura 26 Valore di soglia della potenza laser che determina il passaggio da modalità conduttiva a modalità keyhole [9]

Oltre alla potenza laser, per determinare con precisione la densità di potenza che impatta sulla superficie del pezzo, è necessario conoscere la dimensione dello spot. Più piccolo è lo spot, maggiore è la densità di potenza del raggio laser. La densità di potenza è il parametro che

bisogna tenere sotto osservazione per determinare il passaggio da saldatura in modalità conduttiva a modalità keyhole.

### 3. Procedura sperimentale

Nei prossimi paragrafi verrà descritta la procedura seguita per lo studio delle proprietà dei cordoni di saldatura. Dopo una prima fase di ricerca bibliografica sono stati selezionati dei parametri con cui effettuare delle saldature di 100 mm di lunghezza. Dai giunti ottenuti sono stati ricavati dei provini, che dopo essere stati inglobati, levigati e attaccati chimicamente, sono stati esaminati attraverso un'analisi metallografica. Questa fase ci ha permesso di misurare, secondo normativa specifica, le dimensioni dei principali difetti di saldatura e la concentrazione di porosità. In seguito a questa analisi metallografica sono stati scelti i cordoni che presentano i difetti di dimensioni minori e sono state ripetute delle saldature di 408 mm di lunghezza. Da questa seconda fase di saldature sono stati ricavati, tramite taglio ad acqua, i provini a trazione e imbutitura erichsen, serviti per caratterizzare il carico di rottura e l'indice di deformazione del materiale saldato. In tutte queste fasi, grazie all'uso di excel, sono stati plottati dei grafici che hanno permesso di mettere in evidenza l'influenza dei parametri di saldatura.

#### 3.1 Materiale e parametri di processo

Il materiale studiato in questa tesi è la lega di alluminio EN AW 6016 che ha la seguente composizione chimica:

EN AW 6016		Al	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Ti	Cr	Residui
	Min	96,40%	1%	0,25%							
	Max	98,80%	1,50%	0,60%	0,50%	0,20%	0,20%	0,20%	0,15%	0,10%	0,15%

Tabella 3 Composizione chimica della lega EN AW 6016

È stata eseguita una prima campagna sperimentale in azienda con l'obiettivo di individuare i migliori parametri di processo. A tal fine sono stati realizzati dei cordoni di 100 mm di lunghezza unendo insieme due lamiere di alluminio di spessori differenti, rispettivamente 1,2

e 2 mm. I parametri gestiti durante il processo sono 3: potenza, velocità e posizione del fuoco rispetto al pezzo. Riuscire a far giungere sul pezzo un'alta densità di potenza è di fondamentale importanza in quanto le leghe di alluminio sono caratterizzate da un'alta riflettività nella fase iniziale della saldatura e abbassa notevolmente il suo valore dopo la fusione del materiale che sta in superficie. La velocità di saldatura si seleziona in funzione della potenza scelta, del materiale da saldare e del suo spessore. Una velocità troppo bassa porta a una fusione eccessiva, perdita di materiale e perforazione del pezzo. Di contro una velocità troppo elevata non garantisce una corretta penetrazione del raggio laser sullo spessore da saldare. La posizione focale indica la posizione del fuoco del raggio laser rispetto alla superficie del pezzo e assume il valore 0 se il fuoco è posizionato sulla superficie del pezzo, assume valore negativo se si trova sotto la superficie del pezzo e positivo se si trova sopra. In tutte le prove è stato usata una focalizzazione positiva che consiste nel posizionare il fuoco sopra la superficie del pezzo. Questo perché secondo studi presenti in bibliografia si ritiene che questa soluzione garantisca una maggiore stabilità del keyhole (Effect of focal position offset on joint integrity of AA1050 battery busbar assembly during remote laser welding). In tutto il processo di saldatura l'Argon è usato come gas di protezione per proteggere il bagno fuso dall'ossidazione e per favorire la stabilità del processo riducendo la formazione di porosità.

## 3.2 Saldatura

Il processo di saldatura si è svolto presso gli stabilimenti della CO.ST.AT. s.r.l. È stato utilizzato un impianto TRUMPF TruLaser Cell 7040 che a seconda della testa operatrice montata sulla macchina può essere utilizzato sia per la saldatura che per il taglio laser. Il laser utilizzato è un laser a disco TRUMPF TruDisk 4001, che possiede una potenza massima di 4000 W e una lunghezza d'onda del fascio di 1,030  $\mu\text{m}$ .

È molto importante scegliere la giusta sorgente per la produzione del raggio laser, in quanto una lunghezza d'onda più corta permette di ottenere un più elevato assorbimento da parte dell'alluminio e ridurre i problemi legati alla presenza dello strato di ossido superficiale.

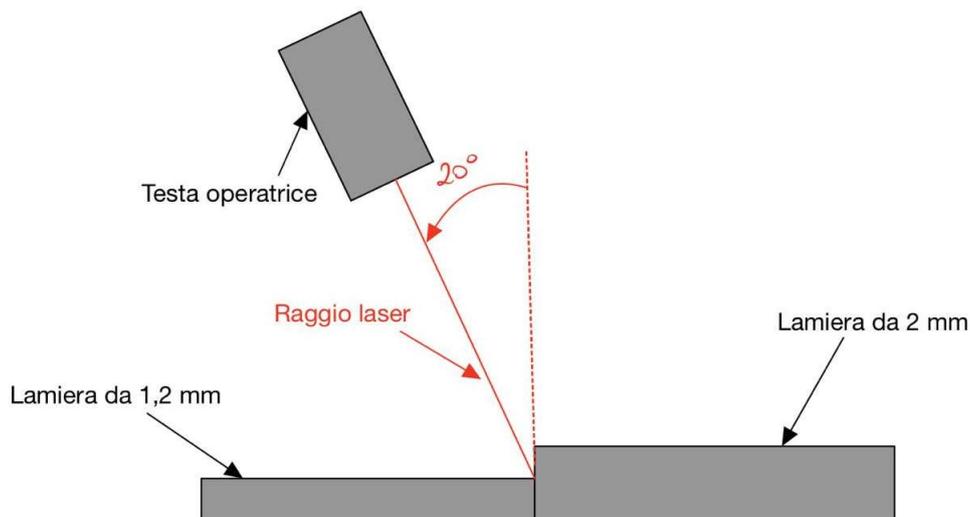


*Figura 27 TruLaser Cell 7040*



*Figura 28 Testa di saldatura*

Al fine di ottenere i provini sono state saldate insieme 20 coppie di lamiera (100x100 mm) di due diversi spessori ( 1,2 mm e 2 mm). La saldatura è eseguita in modalità testa-testa, ponendo a contatto le due facce delle lamiera da saldare e mantenendo la testa operatrice inclinata di  $\alpha=20^\circ$  rispetto alla verticale, come indicato nella seguente immagine riassuntiva.



*Figura 29 Schema di saldatura*

Essendo che si tratta di un cordone abbastanza piccolo non è stato necessario eseguire delle tacche di posizionamento ed è possibile eseguire la saldatura in un'unica passata. Il processo è reso più stabile grazie all'uso di una portata di gas protettivo di Argon di 15 l/min e senza l'utilizzo di metallo d'apporto. È stato scelto Argon come gas di protezione, piuttosto che Elio perché è indicato in letteratura che l'Argon fornisce una migliore protezione con l'uso di laser a bassa lunghezza d'onda. [9]

Prima di procedere con l'operazione di saldatura è necessario preparare le lamiere da saldare asportando lo strato di ossido superficiale per mezzo di una spugna abrasiva imbevuta di acetone. Per sistemare correttamente le lamiere garantire il loro corretto posizionamento durante il processo si utilizza una maschera di saldatura precedentemente realizzata da S. Bergamo (2021) [12] e successivamente modificata ed irrobustita da D. Basile (2022) [13] durante i loro rispettivi lavori di tesi sullo stesso argomento. La maschera utilizzata è schematizzata nella figura seguente.

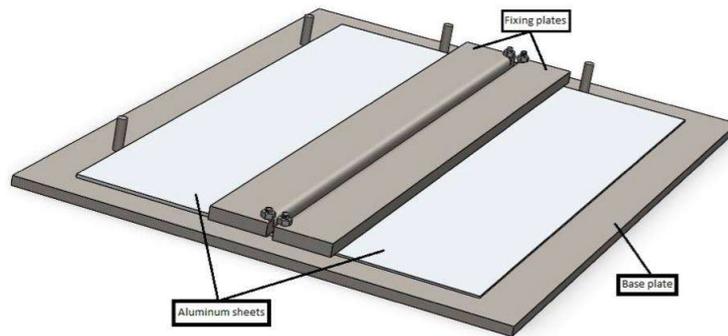


Figura 30 Rappresentazione maschera di saldatura [13]

Dato che questa maschera di saldatura è stata realizzata per saldare lamiere di dimensioni diverse a quelle presenti in questo lavoro e non essendo stato possibile realizzare in azienda una nuova maschera di foratura, si è reso necessario l'uso di alcuni spessori per adattarla ai nuovi pezzi da saldare. Tutto ciò ha aggiunto un certo grado di imprecisione a tutta l'operazione e sicuramente se ne dovrà tenere conto nella fase di analisi dei dati.

Il risultato di una delle coppie di lamiere saldate è visibile nella figura seguente.

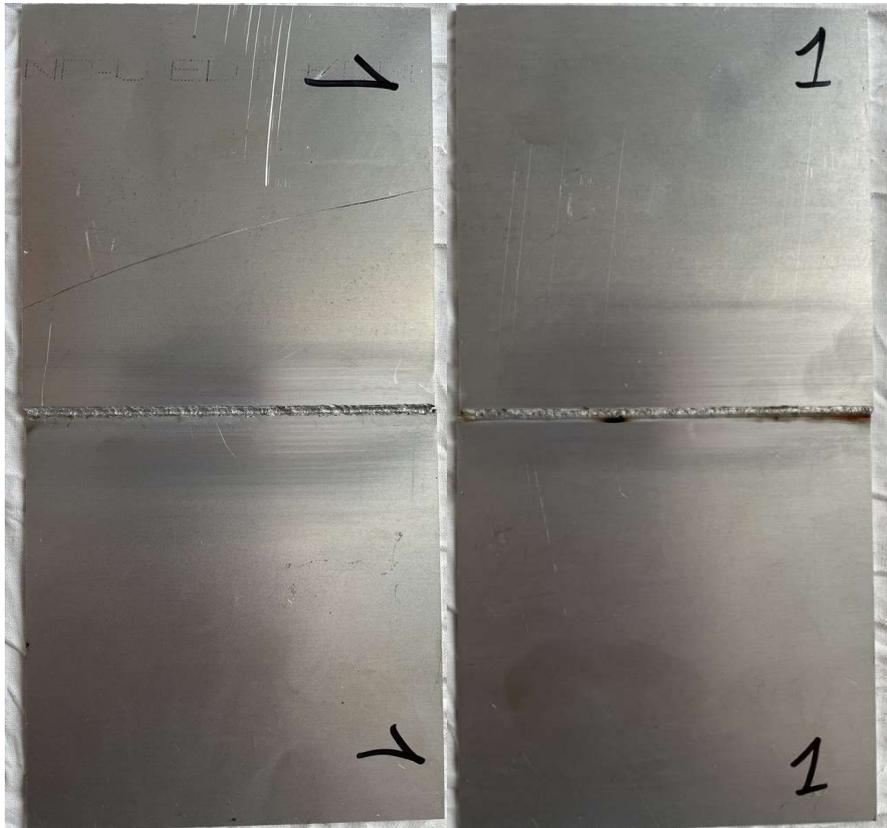
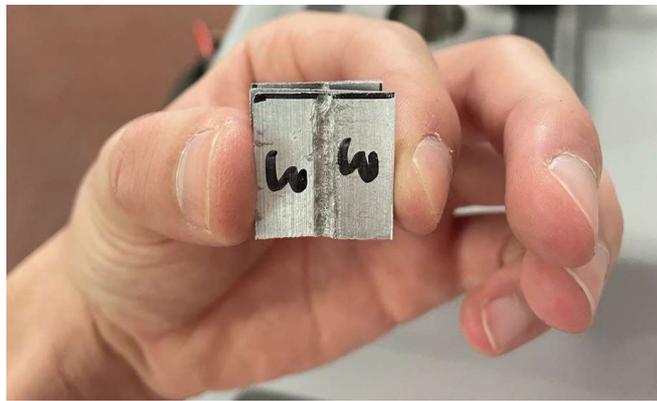


Figura 31 Lamiere dopo saldatura, a sinistra la vista dall'alto

### 3.3 Taglio dei provini

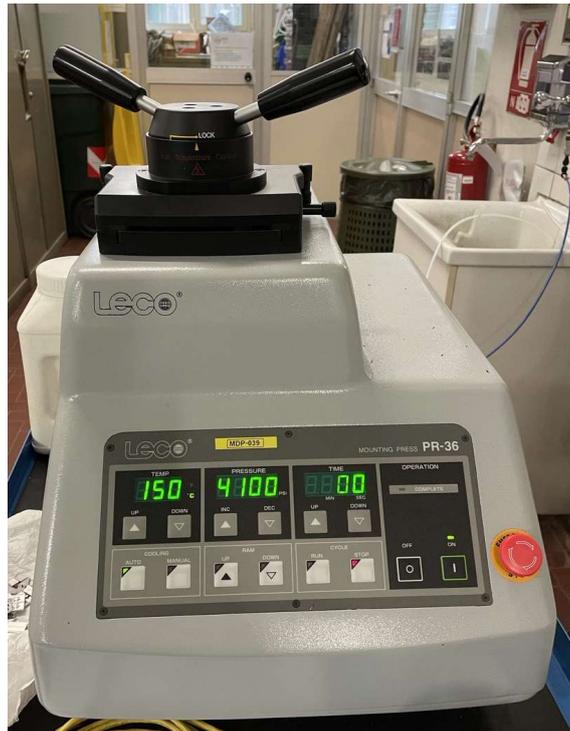
Da queste piastre saldate sono stati ricavati dei provini di forma quadrata di 2 cm di lato da utilizzare al fine di eseguire delle macrografie, con cui si andrà ad analizzare l'aspetto del cordone di saldatura e la presenza di eventuali porosità o di altri difetti macroscopici nello stesso. Questa fase di preparazione post saldatura dei provini è stata svolta interamente presso i laboratori del del DIMEAS del Politecnico di Torino. A causa dello svolgimento di alcuni lavori di manutenzione e ristrutturazione il taglio dei cordoni è stato svolto manualmente dal tesista con l'ausilio di una morsa e di un seghetto idoneo al taglio dell'alluminio. Il risultato di questa operazione è visibile nell'immagine sottostante.



*Figura 32 Provini destinati alle metallografie*

### 3.4 Inglobamento

Una volta ottenuti i provini delle dimensioni desiderate si può procedere con l'inglobamento degli stessi. Data la geometria dei provini, questa operazione è necessaria per facilitare la manipolazione dei pezzi nelle successive fasi di lucidatura e analisi di laboratorio. Per l'alluminio si può utilizzare l'inglobamento a caldo ottenuto con una pressa che polimerizza la resina grazie al calore e alla pressione generati. La resina utilizzata è la bachelite, una resina fenolica termoindurente. La macchina utilizzata è una Inglobatrice LECO PR-36 disponibile presso i laboratori del DIMEAS.



*Figura 33 Macchina inglobatrice*

I parametri di processo impostati sono i seguenti:

- Temperatura 150°C
- Pressione 4100 PSI
- Tempo 9 min

La procedura utilizzata è riportata di seguito:

- La prima operazione da fare è quella di posizionare i provini nella macchina per l'inglobatura, utilizzando degli spessori ricavati da materiali di scarto per riuscire a tenere tutto nella giusta posizione e avendo l'accortezza di posizionare la faccia da analizzare a contatto con il pistone inferiore della macchina;
- Successivamente si procede ad abbassare con cura il pistone tramite tasti presenti nel pannello di controllo della macchina, creando così una cavità che permetta di inserire la giusta quantità di bachelite in granuli. Alla fine di questa operazione i provini appaiono completamente sommersi dalla resina granulare;
- L'ultimo passo prima dell'azionamento della macchina è quello di chiusura della cavità cilindrica portando in avanti il piatto che contiene le due leve a forma di V

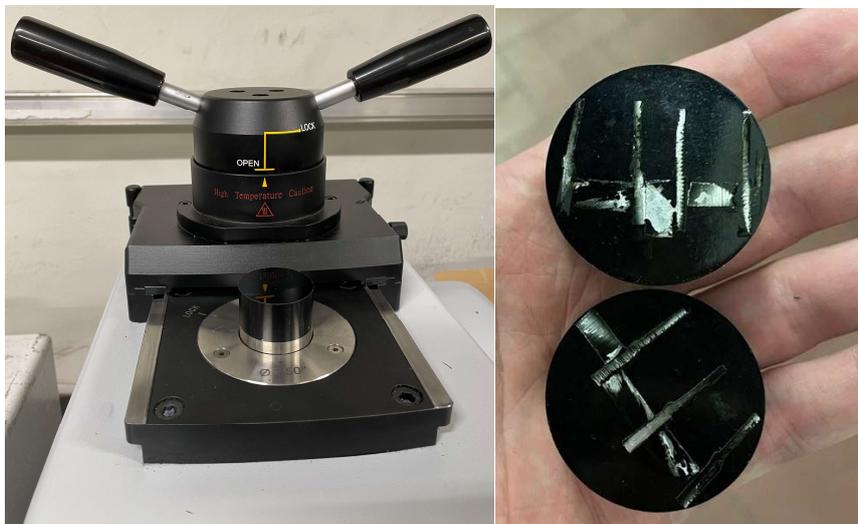
allargata, premendo le stesse verso il basso e ruotandole in senso orario fino ad indicare con la freccia gialla la posizione bloccata (lock);

- Adesso si può avviare la macchina;



*Figura 34 Operazioni di inglobatura*

- Passati i 9 minuti la macchina procede al raffreddamento della resina e successivamente è possibile girare la leva e tirare fuori il pezzo finito e pronto per essere sottoposto a lucidatura. È necessario porre su ciascun provino un codice inciso sulla parte superiore per identificare i campioni contenuti in esso;



*Figura 35 Provini dopo inglobatura*

I campioni contenuti in ogni provino sono 4 per un totale di 5 provini. Dopo l'inglobatura i provini presentano un sottile strato di bachelite che sarà rimosso nelle successive operazioni di lucidatura.

### 3.5 Lucidatura

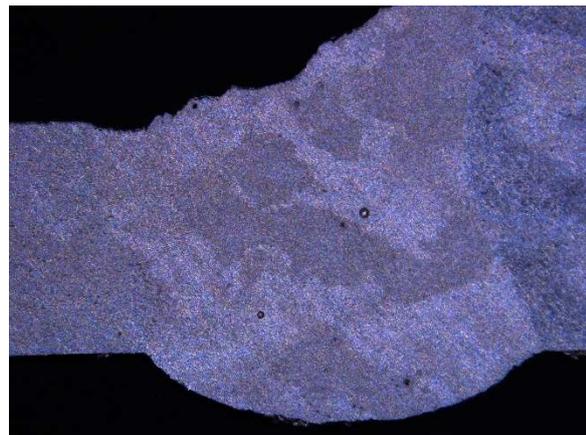
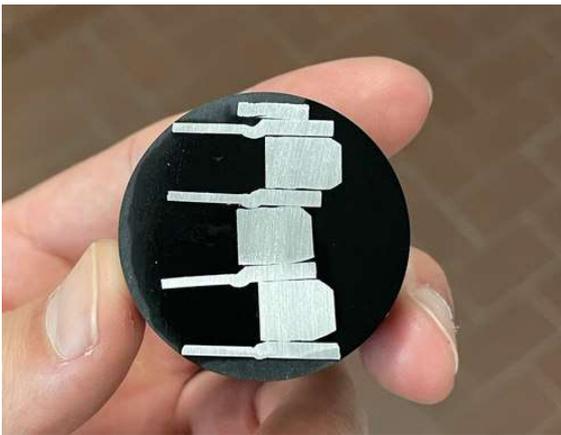
La lucidatura avviene per mezzo di una levigatrice Remet LS1, che è costituita da un disco ruotante su cui vengono montate delle carte di granulometria via via sempre più fine in modo da ottenere una superficie liscia, idonea ad essere osservata al microscopio.



*Figura 36 Levigatrice*

Ogni provino è trattato con 7 carte abrasive di granulometria via via sempre più fine. Si parte dalla 180 e a seguire 320, 600, 800, 1200, 2500, 4000. La macchina presenta un tubo che manda acqua sul disco in rotazione. Quest'acqua ha due effetti principali, innanzitutto asporta il calore dovuto all'attrito tra provino e carte abrasive, in secondo luogo aiuta ad allontanare le scorie prodotte verso il sistema di scarico della macchina. La portata di acqua è regolata in base alla granulometria delle carte utilizzate. Il flusso è maggiore con carte più grossolane per evitare impuntamento del pezzo sul disco e minore con carte più fini per evitare l'effetto

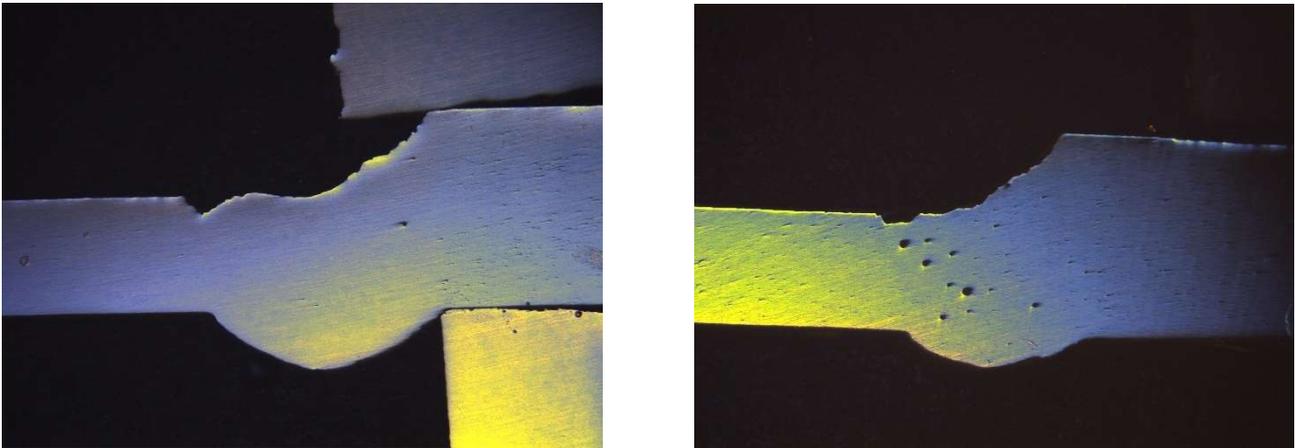
aquaplaning. Le carte abrasive più grossolane asportano il materiale molto velocemente e sono quindi idonee per la prima fase della lucidatura, per asportare quindi lo strato di bachelite rimasto dalla precedente operazione di inglobamento. Durante l'uso di queste carte non si deve esercitare una grande pressione sul provino ed è buona norma controllare più volte il pezzo per essere sicuri di asportare in maniera omogenea il materiale dal provino. Prima di passare all'uso della carta successiva si controlla che le linee lasciate dalla carta abrasiva sul pezzo siano tutte nella stessa direzione. Se questo è verificato è possibile passare alla carta successiva. A questo punto si poggia il provino nuovamente sul disco avendo cura di ruotarlo di 90° rispetto alla lavorazione precedente. Il cambio di carta verrà nuovamente fatto non appena tutte le linee della lavorazione precedente avranno lasciato il posto a quelle nella nuova direzione. Si continua così fino alla carta 4000.



*Figura 37 A sinistra un provino dopo lucidatura con carta abrasiva 180, a destra immagine acquisita al microscopio di un cordone di saldatura dop lucidatura con carta 4000.*

Come si può ben osservare dall'immagine sopra riportata, dopo lucidatura con carta 4000, la superficie da analizzare al microscopio non è liscia abbastanza per poter essere studiata con cura tramite l'osservazione al microscopio. Quindi, si è deciso di continuare la lucidatura sostituendo alle carte abrasive un panno su cui viene spruzzata una pasta abrasiva liquida. Le paste utilizzate sono di 4 granulometrie differenti, 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 0,25  $\mu\text{m}$ . Ad ogni cambio della pasta liquida è necessario sciacquare i provini e pulire bene il panno con acqua e sapone, per togliere i residui di quella più grossolana precedentemente usata. In questa fase della lavorazione non è necessario l'uso dell'acqua e pertanto il rubinetto viene mantenuto

chiuso. Questo perché la quantità di scorie prodotte durante questa fase della lucidatura è trascurabile e inoltre l'acqua मदerebbe a scarico la pasta abrasiva. Il risultato finale è notevolmente migliore.



*Figura 38 Provini dopo la lucidatura con il panno*

### 3.6 Attacco chimico

Dopo la fase di lucidatura non è ancora possibile vedere distintamente il cordone di saldatura. È necessario sottoporre il provino ad un attacco di tipo chimico, che corrodendo selettivamente le fasi più reattive, mette in evidenza la microstruttura del materiale. Durante la saldatura ci sarà una zona di materiale fuso e una zona che non arriva a fusione. Di conseguenza ci saranno delle differenze nella microstruttura di queste zone che è possibile evidenziare con l'attacco acido. Per ogni metallo è necessario uno specifico reagente. Nel caso dell'alluminio è stato utilizzato l'acido fluoridrico, il quale evidenzia il contorno dei grani e attacca, colorandoli i composti  $Mg_2Si$  e  $NiAl_3$ . L'acido si applica a temperatura ambiente e la durata dell'attacco, dopo vari tentativi, è stata scelta di 20 s.

L'attacco chimico è stato eseguito sotto cappa presso i laboratori del J-tech e sono state svolte le seguenti operazioni:

1. Lavaggio con acqua e sapone della superficie per rimuovere la pasta abrasiva utilizzata nella fase di lucidatura, utilizzando i guanti in lattice per non graffiare il provino;
2. Attacco acido sotto cappa con acido fluoridrico per 20 s;

3. Risciacquo sotto acqua corrente per fermare l'attacco;
4. Asciugatura con aria compressa;

È importante eseguire l'attacco chimico subito dopo la fase di lucidatura, perché l'eventuale formazione di uno strato di ossido superficiale potrebbe compromettere la reazione. L'uso di carta per asciugare il provino dopo la lucidatura potrebbe graffiarlo compromettendo il lavoro precedentemente svolto. La sezione del provino da analizzare può essere toccata soltanto avendo l'accortezza di utilizzare dei guanti di lattice. Il risultato che si ottiene in seguito all'attacco chimico è riportato nelle immagini che seguono.

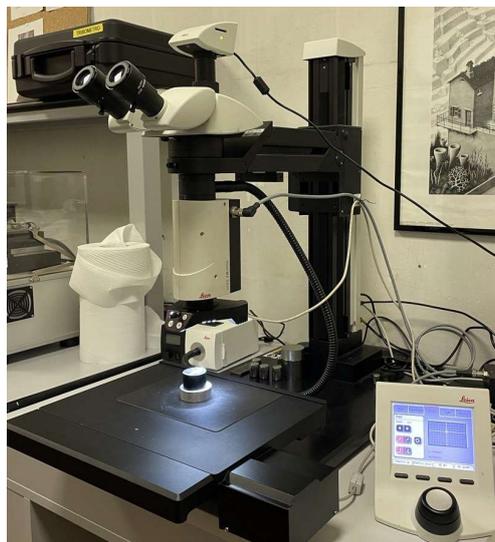


*Figura 39 Metallografia del cordone di saldatura dopo attacco acido*



*Figura 40 Ingrandimento sul bordo destro del cordone*

Sia nella fase di lucidatura che di attacco metallografico il provino è stato osservato per mezzo di un microscopio ottico Leica Z16 APOA con fotocamera Leica MC170HD.



*Figura 41 Microscopio ottico Leica*

## 4. Test sui provini

Sui provini così realizzati è ora possibile procedere con alcune analisi sperimentali. In particolare, si effettuano:

- Metallografia, permettono di osservare la dimensione e la forma dei grani;
- Prove di microdurezza Vickers, volte a definire la dimensione delle diverse aree che caratterizzano il cordone di saldatura;
- Test di trazione, per caratterizzare il carico di rottura dei provini realizzati con i nuovi set di parametri;
- Prove Eichen, per testare l'attitudine del materiale ad assumere forme cave o sagomate e l'idoneità allo stampaggio di media profondità.

### 4.1 Metallografie

Le metallografie delle sezioni trasversali delle piastre saldate, ottenute da microscopio ottico, sono necessarie per la determinazione della geometria del cordone e verificare la presenza di difetti, perché, in seguito all'attacco chimico, le diverse microstrutture realizzate dal processo di saldatura sono state messe in risalto. In particolare per misurare i principali difetti di saldatura si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 10359:2015 che descrive i requisiti per i profili saldati al laser (Tailored Blanks) aventi spessori uniformi o differenti. [14]

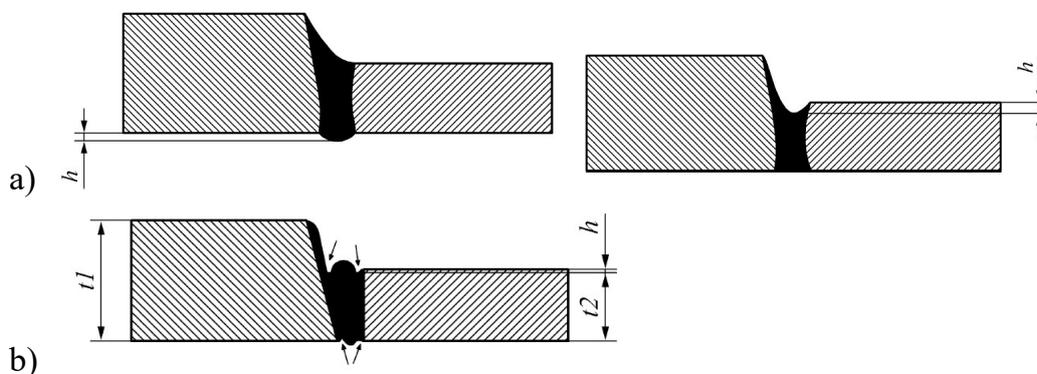


Figura 42 Principali difetti di saldatura riscontrati nei cordoni, (a) da sinistra a destra: eccesso di penetrazione alla radice e concavità; (b) sottotaglio. [14]

Per la misura dei difetti si è usato il programma ImageJ che è un programma informatico di elaborazione digitale delle immagini. [15] I risultati sono riportati nel capitolo successivo.

## 4.2 Prove di Microdurezza Vickers

L'operazione di saldatura determina a distanza crescente dalla saldatura 3 zone distinte:

- Zona fusa: caratterizzata fusione e risolidificazione del materiale di provini
- Zona termicamente alterata (ZTA): in questa zona la temperatura non è tale da portare a fusione il materiale, ma determina un cambiamento nella microstruttura del metallo
- Materiale base: il metallo originario rimane inalterato

La prova di microdurezza si differenzia da quella di durezza standard per via dei piccoli carichi applicati per effettuare le misure sul materiale, in generale minori di 1 Kg forza. La prova consiste nel misurare la resistenza che esercita il materiale per opporsi a un'azione localizzata di compressione ( indentazione ). L'applicazione del carico lascia sul provino un'impronta che nel caso della prova Vickers è di forma piramidale. Il valore di microdurezza è valutato dalla misura dell'impronta lasciata sul pezzo ed è indicato con numeri adimensionali. L'immagine seguente descrive in modo schematico le fasi salienti dell'esecuzione della prova.

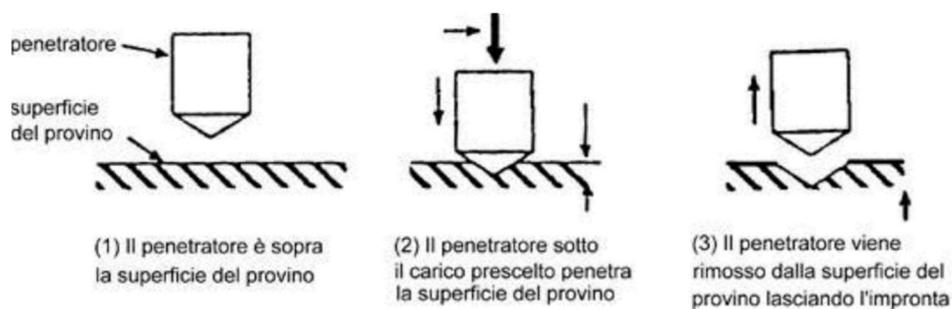


Figura 43 Esecuzione prove di microdurezza [16]

La relazione tra durezza e geometria dell'impronta nel caso della prove Vickers è la seguente:

$$H_v = \frac{2F * 0.102 * \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)}{D^2}$$

Dove:

- F è il carico di prova in [N];
- D è la media delle dimensioni delle diagonali dell'impronta in [mm];
- $\omega$  è l'angolo di apertura della piramide, paria 136°.

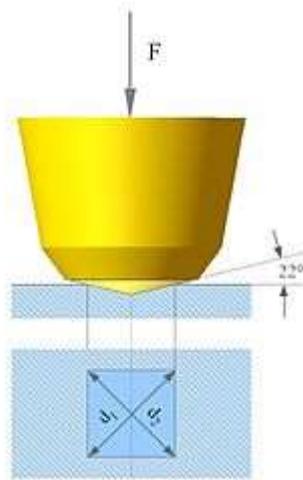


Figura 44 Prova di microdurezza [17]

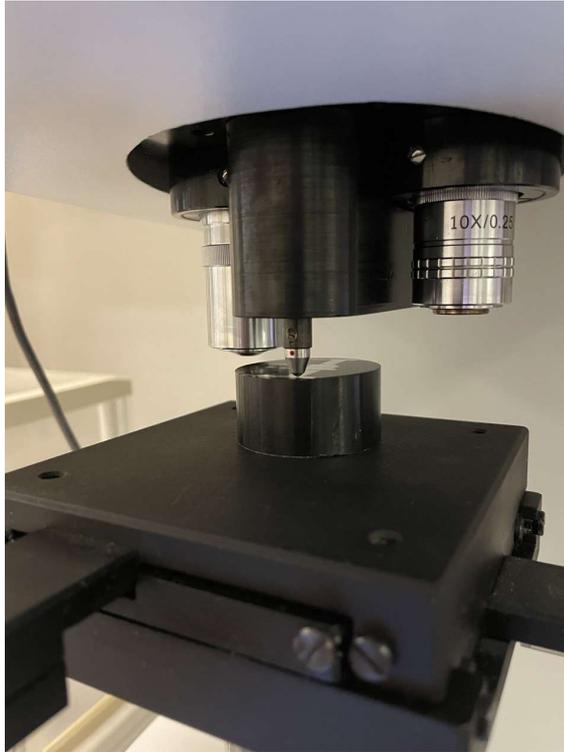
La macchina utilizzata per la prova è una Rupac Innovatest. Nella testa operatrice presenta due lenti di ingrandimento (10x e 40x) e l'utensile per l'esecuzione della prova Vickers. L'interfaccia è molto intuitiva e gestibile tramite un pannello touch posto a fianco della macchina stessa. Prima dell'esecuzione delle indentazioni è necessario settare i parametri della prova, in particolare il carico esercitato dal punzone sul pezzo e il tempo di mantenimento di tale carico. Il carico utilizzato è di 200 g/forza che deve essere mantenuto per un tempo di 15 secondi. [18] Oltre che dal pannello di controllo digitale il carico deve essere impostato fisicamente alla macchina tramite la rotazione di una manopola posta in alto a destra nel microdurometro. Tramite la manopola in basso a destra è possibile regolare la

posizione sull'asse z del provino. Tale manopola viene usata per mettere a fuoco l'immagine osservata a microscopio. Le operazioni sono eseguite nel seguente ordine:

- Viene posizionato il pezzo sul piano di lavoro della macchina e regolata l'intensità della luce del microscopio a un valore medio basso, dato che l'alluminio è molto riflettente;
- Tramite l'uso della lente 10x e l'uso delle manopole presenti sul piano di lavoro della macchina, che permettono di gestire i movimenti lungo l'asse x e l'asse y, si posiziona il provino nella posizione voluta;
- Il posizionamento è reso ancora più preciso utilizzando l'ingrandimento 40x;
- Una volta posizionato il pezzo è possibile avviare la procedura di indentazione del materiale cliccando sul pulsante start presente sull'interfaccia di comando;
- Dopo aver completato l'indentazione appare a schermo l'immagine dell'impronta che può essere misurata cliccando sull'apposito comando "Misura", fornendo così il valore di durezza del materiale.

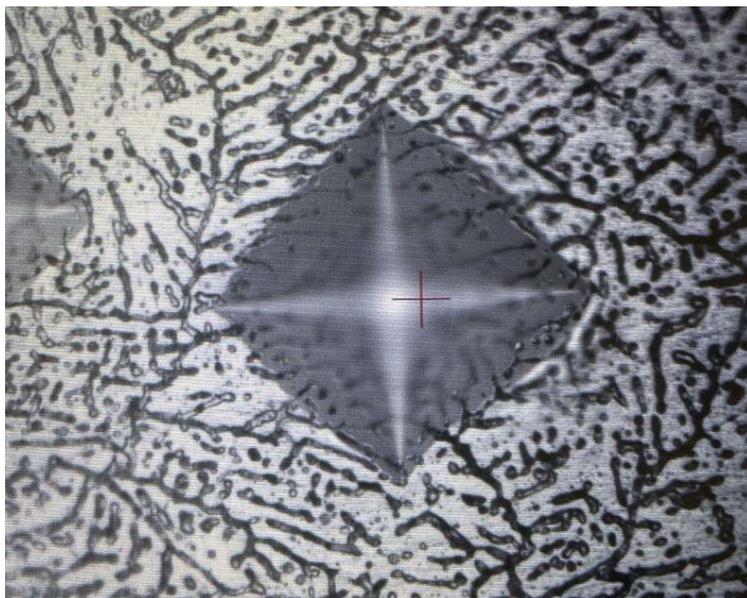


*Figura 45 Microdurometro*



*Figura 46 Indentazione del provino*

Per ogni provino sono state realizzate delle triplette di indentazioni rispettivamente nel materiale base e nel bordo di saldatura della lamiera da 1,2 mm, nella zona fusa, nel bordo di saldatura e nel materiale base della lamiera da 2 mm. Per un totale di 15 indentazioni per provino.



*Figura 47 Impronta realizzata nella zona fusa e visionata con ingrandimento 40x*

### 4.3 Test di Trazione

Le prove di trazione sui provini saldati sono eguite presso i laboratori DIMEAS del Politecnico di Torino. L'esecuzione delle stesse è stata effettuata seguendo le norme UNI EN ISO 6892-1:2020 e la norma UNI EN ISO 4136:2022 e utilizzando la macchina servo-idraulica INSTRON 8801 visibile in figura.



*Figura 48 Macchina servo-idraulica Instron 8801*

In sintesi l'esecuzione della prova prevede diverse fasi:

- In primo luogo è necessario azionare la centralina idrauliche necessaria per mettere l'olio in pressione;
- Essendo la prova eseguita in modo automatico con l'ausilio di un PC, è necessario inserire il corretto programma, impostando i vincoli per l'arresto della prova stessa;
- Si carica manualmente il provino da testare sulla machina di trazione;
- A questo punto si può iniziare la prova.

La macchina di trazione è costituita da due morse, una fissa e una mobile tramite un attuatore pneumatico. Il provino opportunamente tagliato deve essere inserito tra le due morse manualmente, in modo che su di esso sia applicato un carico unidirezionale in direzione assiale. [19] Questa è una fase molto delicata della prova, in quanto un maldestro posizionamento del provino può compromettere il risultato finale. Per l'esecuzione della prova è stata scelta una velocità di deformazione di 1 mm/s.



*Figura 49 Particolare del posizionamento del provino sulla macchina di prova*

In totale sono state eseguite 3 prove di trazione per ogni set di parametri utilizzati per le diverse saldature, per un totale di 33 prove di trazione. Le prove restituiscono in output un

grafico forza-spostamento dal quale è possibile ricavare il carico di rottura del componente ( $R_m$ ). Per il calcolo della tensione di rottura è sufficiente dividere il valore di forza ottenuto per la sezione resistente espressa in  $\text{mm}^2$ , avendo l'accortezza di scegliere la sezione di spessore minore. Alla fine delle prove deve essere stilato un report che deve includere [19]:

- Il tipo e la dimensione dei provini, eventualmente accompagnato da uno schizzo per maggiore chiarezza;
- La temperatura di test;
- La posizione in cui è avvenuta la frattura;
- Eventuale presenza di imperfezioni sul provino testato.

#### 4.4 Prova Erichsen

La prova Erichsen permette di studiare la capacità delle lamiere, con spessori compresi tra 0,1 e 2 mm e larghezza  $\geq$  a 90 mm, di essere lavorata per deformazione plastica in processi di formatura a freddo. (Norma UNI EN ISO 20482:2013)

L'attrezzatura prevista da normativa per l'esecuzione della prova è descritta dettagliatamente dalla norma UNI EN ISO 20482:2013. Non disponendo in laboratorio di una macchina di prova specifica, è stato usato un dispositivo appositamente progettato, la cui geometria è visibile in figura.

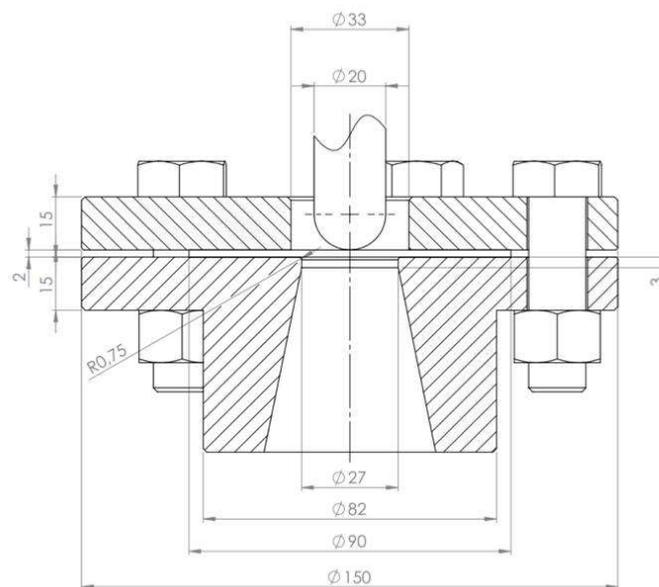


Figura 50 Schema dispositivo realizzato per l'esecuzione della prova Erichsen

La forza di serraggio sul provino da analizzare è esercitata per mezzo di collegamenti filettati, mentre la movimentazione del punzone per l'esecuzione della prova è gestita tramite la macchina servo-idraulica INSTRON 8801, precedentemente utilizzata per le prove di trazione. Tutti i componenti sono stati fabbricati in acciaio C40 in CO.ST.AT.

Le superfici di matrice, prelamiera e punzone sono state temprate, in quanto, secondo normativa, la durezza minima richiesta è di 750 HV 30. Oltre a ciò, sempre seguendo le indicazioni date da normativa, il punzone è stato lucidato in modo tale da garantire una rugosità  $\leq 4 \mu\text{m}$ . Le quattro superfici piane sono state sottoposte a un processo di lapidellatura, per ottenere la planarità desiderata.

Inoltre, poiché i provini presentano spessori differenti ( 1,2 e 2 mm ) è stato utilizzato uno spessore di acciaio spesso 0,8 mm ed è stata prevista una distanza di 3 mm per evitare che questo dispositivo entri in contatto con la saldatura. Il tutto è schematizzato nella seguente figura.

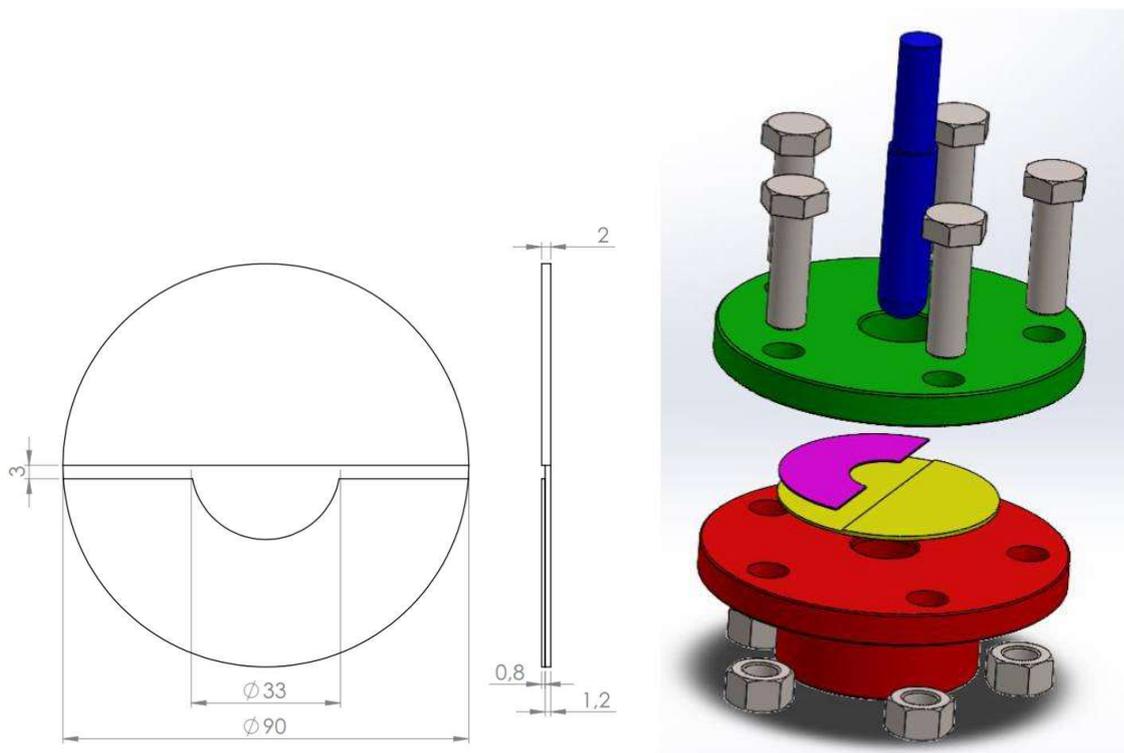


Figura 51 CAD del sistema di esecuzione della prova Erichsen

#### 4.4.1 Calcolo del collegamento filettato

Per il serraggio dei pezzi sono state utilizzate 5 viti M16x60 a testa cilindrica di classe 8.8 brinite e oliate, le cui caratteristiche principali sono riportate in tabella.

GRANDEZZA	SIMBOLO	VALORE	UDM
Diametro nominale	d	16	mm
Passo	p	2	mm
Diametro medio	d <sub>m</sub>	14,701	mm
Diametro di nocciolo	d <sub>n</sub>	13,546	mm
Diametro “Efficace” su cui agisce la forza fra testa e sottotesta (≈ 1,3d)	d <sub>t</sub>	20,8	mm
Angolo di semi-apertura del profilo triangolare	α	30	°
Coefficiente di attrito sottotesta-pezzi (viti brinite e oliate)	tanφ <sub>s</sub> = f <sub>s</sub>	0,12 ÷ 0,18	
Coefficiente di attrito vite madrevite (vite brinite e oliate)	tanφ = f	0,12 ÷ 0,18	
Carico di rottura	R <sub>m</sub>	800	MPa
Carico di snervamento	R <sub>p0,2</sub>	640	MPa

Tabella 4 Caratteristiche delle viti utilizzate

La normativa UNI EN ISO 20482:2020 indica una forza di serraggio dei provini di circa 10 kN, considerando la superficie descritta da normativa. Poiché, invece, la superficie considerata nel dispositivo realizzato è maggiore, si è reso necessario aumentare la forza in modo che la pressione esercitata sul componente rimanga entro i limiti imposti dalla normativa. Nella trattazione che svilupperemo di seguito, si consideri F forza di serraggio del provino ed S la superficie di contatto. Si usa il pedice 2 per indicare il sistema definito da normativa, mentre con il pedice 1 si indica il sistema costruito ad hoc per l'esecuzione della prova. Affinchè le pressioni esercitate sul provino siano uguali, è necessario che:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

Quindi la forza di serraggio necessaria secondo questa relazione è:

$$F_1 = F_2 \frac{S_1}{S_2} = 10000 \frac{(90)^2 - (33)^2}{(55)^2 - (33)^2} = 36214 \text{ N}$$

Che corrisponde ad una forza di serraggio per singola vite ( $F_v$ ) di:

$$F_v = \frac{F_1}{5} = 7243 \text{ N}$$

Dalla necessità di garantire questo valore di forza, si è calcolato il momento di serraggio da applicare a ciascuna vite: (Inserire libro di riferimento)

$$M_T = \frac{F_v}{2} \left( \frac{p}{\pi} + d_m \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha} + d_t \tan \varphi_s \right) = 18,72 \div 26,93 \text{ Nm}$$

Il range ottenuto è dovuto al range di variazione dei coefficienti di attrito. Nell'esecuzione delle prove si è deciso di applicare un momento di serraggio di 25 Nm in ottica conservativa.

È necessario verificare che le viti possano gestire l'applicazione di tale momento senza incorrere a snervamento. Pertanto si è pensato di eseguire anche il calcolo della  $F_{v,lim}$  applicabile affinché la tensione ideale limite  $\sigma_{id,lim}$  sia pari al 90 % del carico di snervamento  $R_{p0.2}$ :

$$F_{v,lim} = \sigma_{a,lim} A_n = \frac{0,9 R_{p0.2}}{\sqrt{1 + 3k^2}} \frac{\pi d_n^2}{4} = 68525 \text{ N}$$

Essendo:

$$k = \left[ \frac{2}{d_n} \left( \frac{p}{\pi} + d_m \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha} \right) \right] = 0,395$$

Sempre seguendo una logica cautelativa, si è deciso di scegliere, ai fini del calcolo, il valore inferiore del coefficiente di attrito, in modo tale da ottenere un valore di  $M_{t,lim}$  minore:

$$M_{t,lim} = \frac{F_{v,lim}}{2} \left( \frac{p}{\pi} + d_m \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha} + d_t \tan \varphi_s \right) = 177,12 \text{ Nm}$$

Dato che:

$$M_T < M_{T,lim}$$

Le viti risultano staticamente verificate.

#### *4.4.2 Procedura di esecuzione della prove*

Sono state condotte 33 prove Erichsen. La macchina servoidraulica è stata opportunamente preparata fissando una piattaforma di acciaio in corrispondenza dell'attuatore inferiore e il punzone nell'afferraggio statico. Tutto ciò è ben visibile nella figura di seguito illustrata.

La norma UNI EN ISO 20482:2014 [20] indica una serie di procedure da seguire durante l'esecuzione della prova:

1. Lubrificare la superficie della matrice e la parte del provino su cui va ad agire il punzone con grasso alla grafite.
2. Posizionamento del provino e serraggio delle viti del sistema matrice-premilamiera applicando, con l'ausilio di una chiave dinamometrica, il momento calcolato nel precedente paragrafo;
3. Prima di avviare la prova il punzone deve essere portato in contatto con la superficie del provino da testare;
4. Una volta completata la fase 3 può essere avviata la prova, con velocità di avanzamento del punzone di 5 mm/s;
5. Durante l'esecuzione della prova compare a schermo un grafico forza-avanzamento del punzone;
6. La prova va stoppata quando si ha un decremento del valore del carico applicato, associabile ad una frattura del provino;
7. L'indice di Erichsen è il valore dello spostamento del punzone che si legge in corrispondenza della fase 6;

8. Assumere come indice di Erichsen (IE) quello ottenuto come la media di almeno 3 prove;
9. Dopo ogni prova sollevare il punzone in modo da liberare il sistema matrice-premilamiera e dopo aver svitato le viti procedere con la rimozione del provino e all'acquisizione di immagini che serviranno nella fase di analisi dei risultati.

Leggendo le fasi precedentemente elencate, se vogliamo definirne due più critiche in tutta l'esecuzione della prova possiamo scegliere la 3 e la 6. In particolare durante il posizionamento del punzone si deve fare particolare attenzione perché è un'operazione che avviene con comando manuale della macchina servo-idraulica. In un primo momento si avvicina il punzone al pezzo in modo grossolano, utilizzando le frecce di movimentazione presenti sul controllo e poi quando si è in prossimità della superficie, si effettua uno spostamento molto più accurato utilizzando una rotella presente nella parte superiore del controllo.



*Figura 52 Interfaccia per il comando manuale della macchina servo-idraulica*

La fase 6 è critica perché il valore dell'indice di Erichsen è da leggere esattamente nel momento in cui si ha una caduta del carico letto a schermo. La macchina non si ferma autonomamente, ma deve essere arrestata manualmente, altrimenti il punzone continuerebbe ad avanzare compromettendo il risultato della prova.

Nel report del test devono essere inclusi [20]:

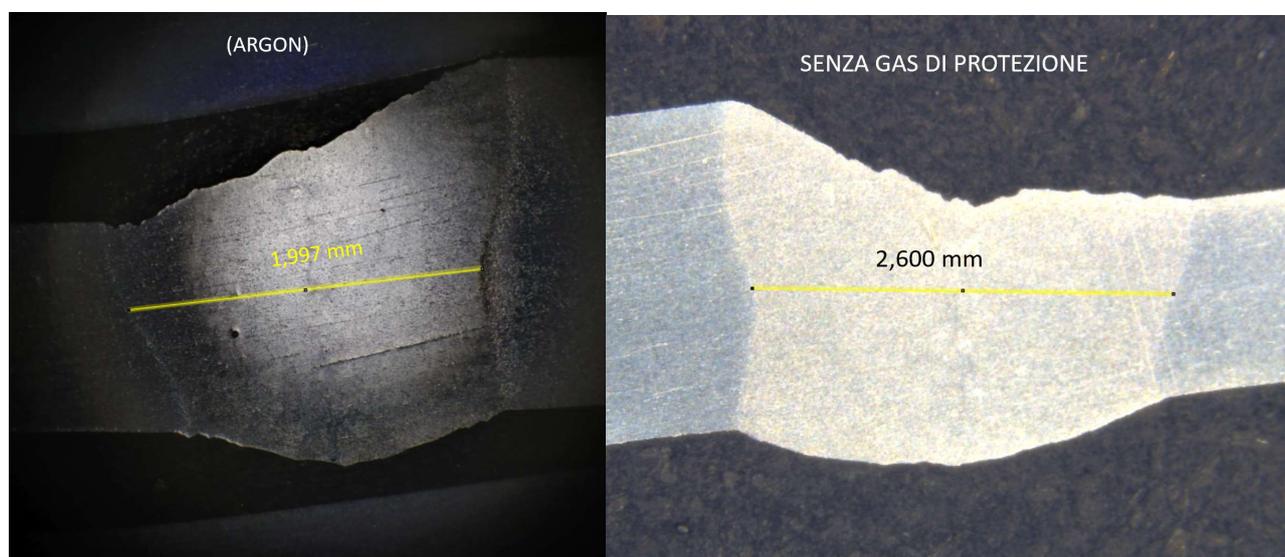
- Descrizione del provino;
- Spessore del provino;
- Tipo di lubrificante usato;
- Foto del pezzo dopo rottura;
- Indice di Erichsen valutato.

## 5. Analisi dei risultati ottenuti

In questa sezione sono stati raccolti tutti i risultati ricavati dalle prove descritte nel capitolo precedente. Questi dati saranno usati per dimostrare gli obiettivi di questo lavoro di tesi. I parametri di saldatura usati in questo studio non possono essere pubblicati per accordi con l'azienda che ha fornito il materiale ed ha realizzato le saldature. Pertanto è stato deciso di normalizzare questi valori rispetto ad un numero di rifetimento scelto in modo casuale. In questo modo si riesce ad avere un'idea sull'influenza dei parametri di saldatura, senza andare contro le richieste dell'azienda.

### 5.1 Risultati metallografie

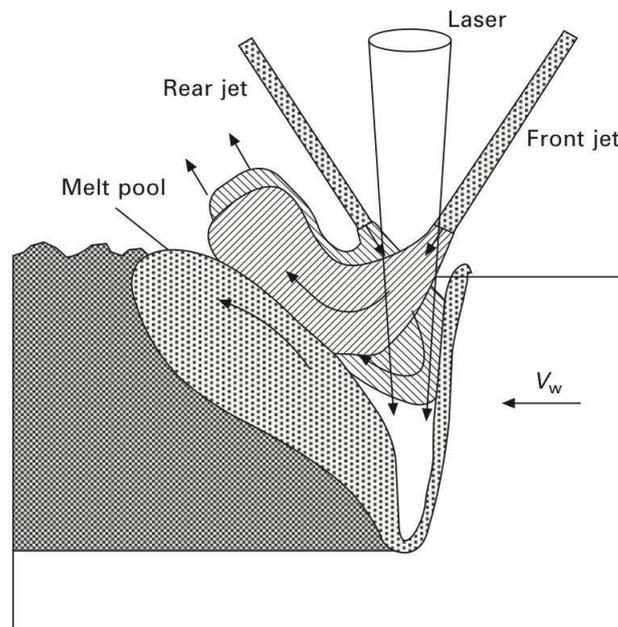
Le osservazioni delle metallografie hanno permesso di notare importanti benefici nell'utilizzo dell'Argon come gas di protezione.



*Figura 53 Saldature eseguite con o senza gas, a parità di set di parametri*

È possibile notare come l'utilizzo del gas di protezione, a parità di altri parametri di saldatura, permetta di ottenere un cordone di saldatura meno ampio in larghezza, oltre che ad aiutare la stabilità del processo di saldatura. Questo avviene perché il gas, se correttamente indirizzato, permette di bilanciare la pressione di chiusura del keyhole dovuta agli effetti di tensione

superficiale. Quindi, permette di mantenere una certa distanza fra la parte posteriore e quella anteriore del keyhole, stabilizzandolo. In questo modo il raggio laser riesce a penetrare meglio in profondità nel materiale. Come risultato di ciò, in letteratura è riportato un guadagno del 40-50% nella profondità di passata e una conseguente riduzione in larghezza del cordone. [8] Quindi l'uso del gas permette di sfruttare al meglio la potenza laser a disposizione. Per una migliore comprensione di quanto descritto si può fare riferimento alla seguente immagine:



*Figura 54 Effetto del gas di protezione sulla profondità di penetrazione del raggio laser*

Le metallografie sono inoltre servite per osservare gli effetti dei diversi parametri di saldatura sulle caratteristiche del cordone ed è stato possibile realizzare una tabella in cui raccogliere, per ogni prova realizzata, le misure dei difetti e quelle del cordone.

	Potenza normalizzata(W)	Velocità normalizzata(m/min)	Fuoco normalizzato (mm)	HI (J/mm)	Gas (l/min)	Sottotaglio (mm)	Eccesso di penetrazione (mm)	Concavità nella faccia superiore (mm)	Altezza cordone (mm)	Larghezza del cordone (mm)
1-1	1471	1,2	0,6	75	15	0,300	0,494	0,000	2,04	2,70
1-2	1471	1,5	0,9	60	15	0,000	0,541	0,196	1,55	2,60
1-3	1471	1,8	1,2	50	15	0,000	0,189	0,000	1,856	2
1-4	1471	1,8	0,6	50	15	0,000	0,300	0,000	1,95	1,95
1-5	1588	1,8	0,3	54	15	0,116	0,564	0,198	1,63	2,21
1-6	1588	1,8	0,6	54	15	0,000	0,330	0,000	1,925	2,1
1-7	1588	1,2	0,9	81	15	0,000	0,627	0,545	1,40	3,15
1-8	1588	1,5	1,2	65	15	0,000	0,553	0,255	1,50	2,75
1-9	1588	2,4	0,6	40,5	15	0,000	0,312	0,000	2	1,6
1-10	1765	1,8	0,3	60	15	0,185	0,618	0,000	1,84	2,27
1-11	1765	1,8	0,6	60	15	0,000	0,471	0,220	1,45	2,12
1-12	1765	2,4	0,6	45	15	0,090	0,400	0,000	1,81	1,91
1-13	1765	2,9	0,6	36	15	0,114	0,376	0,000	1,80	1,75
1-14	1765	1,8	0,9	60	15	0,000	0,500	0,103	1,76	2,33
1-15	1765	2,4	0,9	45	15	0,070	0,487	0,000	1,76	2,10
1-16	1765	3,5	0,6	30	15	0,098	0,364	0,000	1,90	1,57
1-17	1765	2,9	0,6	36	15	0,229	0,419	0,000	2,16	1,67
1-18	1765	1,8	0,6	60	15	0,109	0,185	0,000	1,77	1,88
1-19	1765	2,6	0,6	40	15	0,090	0,455	0,000	1,88	2,04
1-20	2059	1,8	0,6	70	15	0,368	0,527	0,240	1,50	2,30
1-21	2059	2,4	0,6	52,5	15	0,078	0,428	0,000	2,00	2,00
1-22	2059	2,9	0,6	42	15	0,000	0,300	0,000	1,86	1,583
1-23	2059	3,5	0,6	35	15	0,177	0,329	0,000	1,87	1,51
1-24	2059	1,8	0,9	70	15	0,000	0,436	0,316	1,30	2,31
1-25	2059	2,4	0,9	52,5	15	0,000	0,334	0,000	1,85	1,9
1-26	2059	2,9	0,9	42	15	0,290	0,391	0,000	1,70	1,84
1-27	2353	4,7	1,2	30	15	0,000	0,389	0,000	2,00	1,33

Tabella 5 Misure dei difetti di saldatura e della geometria del cordone al variare dei parametri di saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati

Di seguito sono riportati dei grafici in cui si analizzano gruppi di 3 cordoni, in cui solo uno dei parametri di potenza, velocità e fuoco viene fatto variare di volta in volta, mentre gli altri 2 sono mantenuti costanti. In questo modo si riesce a vedere in modo chiaro l'effetto dei singoli parametri sul processo di saldatura:

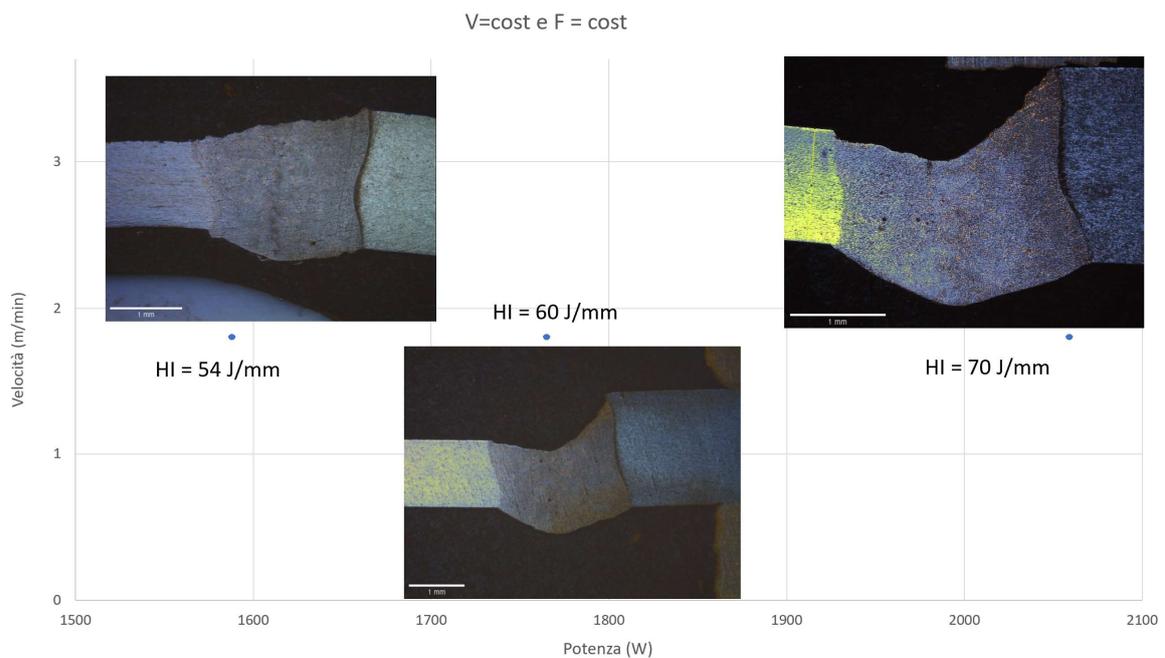


Figura 55 Influenza della Potenza sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati

Dalla Figura 56 si osserva che, mantenendo costanti velocità e fuoco e, aumentando la potenza del raggio laser, si ha un aumento in larghezza del cordone. Infatti, l'apporto di calore (HI), calcolato come Potenza/Velocità, con la velocità espressa in mm/s, aumenta e determina una fusione maggiore del materiale base. Si ottengono cordoni con difetti sempre più evidenti. L'eccesso di penetrazione, ad esempio, passa da 0,398 mm a 527 mm e si nota anche un aumento del difetto di concavità.

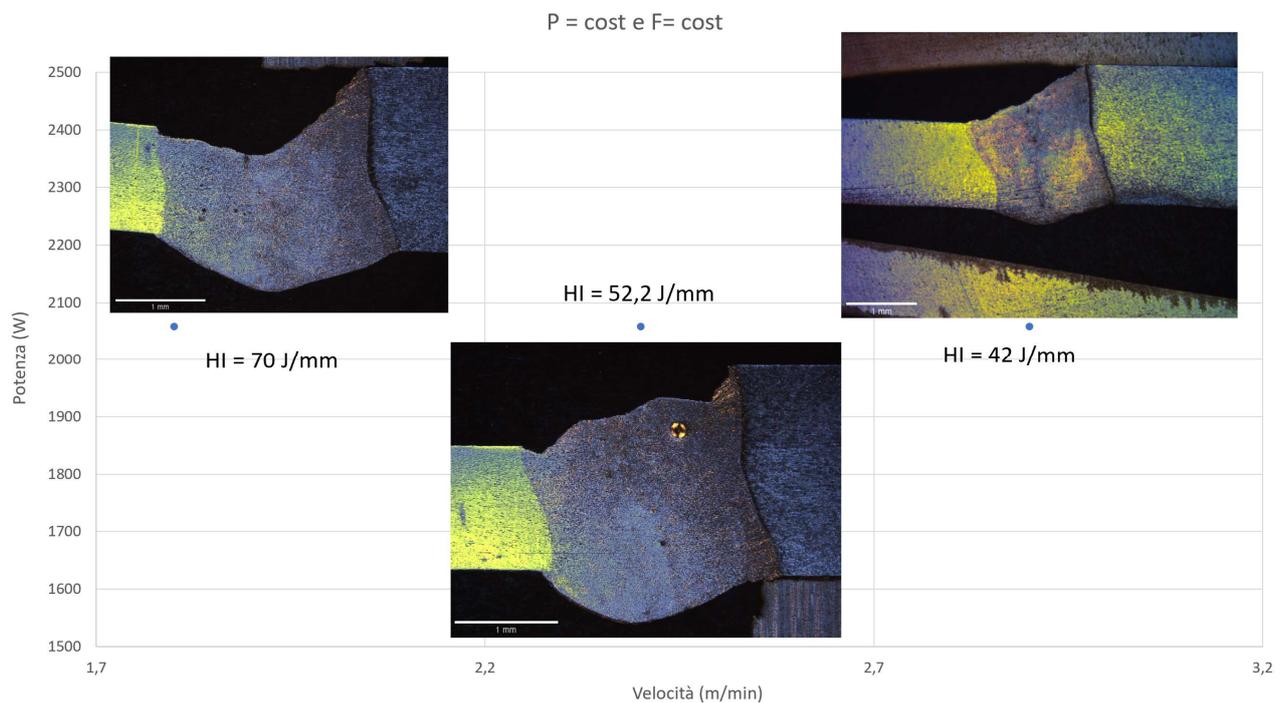
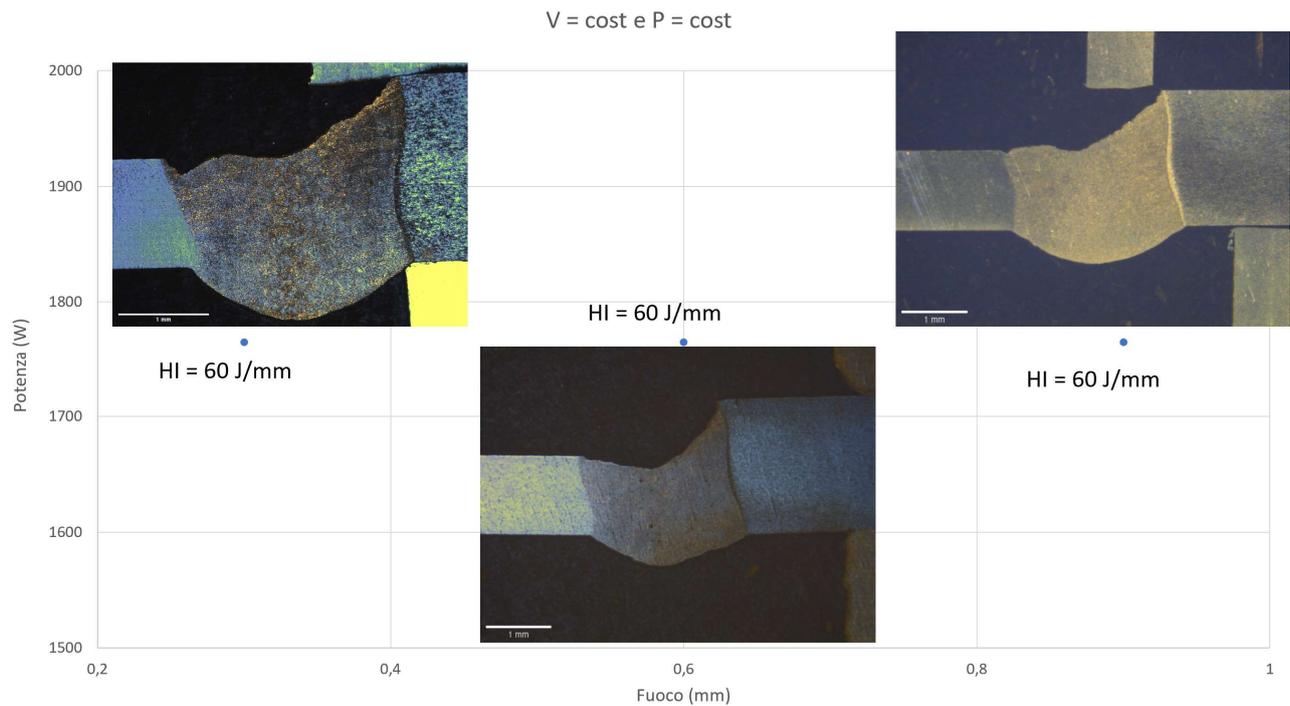


Figura 56 Influenza della velocità sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati

Dalla Figura 57 si nota l'effetto della velocità di saldatura. L'aumento del valore di questo parametro genera degli andamenti opposti quelli visti aumentando la potenza. Infatti, saldando a velocità più elevate, si registra una riduzione della larghezza del cordone e di conseguenza anche dell'eccesso di penetrazione. Tutto ciò è giustificato da una riduzione dell'HI. Al limite, per velocità eccessivamente elevate si avrà mancanza di penetrazione. La scelta del corretto valore di velocità è fondamentale per prevenire la formazione delle porosità. [21]



*Figura 57 Influenza del fuoco sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati*

L'influenza del fuoco, a parità degli altri due parametri, è meno evidente. Comunque in generale, aumentando la distanza focale dal pezzo, si aumenta la dimensione dello spot che incide sul pezzo. Di conseguenza, a spot maggiori corrispondono profondità di passata minori, in quanto la densità del raggio laser risulta essere minore e larghezze della zona fusa maggiori. I dati raccolti sono stati plottati su dei grafici x-y che permettono di avere una visione più ampia dell'effetto dei parametri di saldatura.

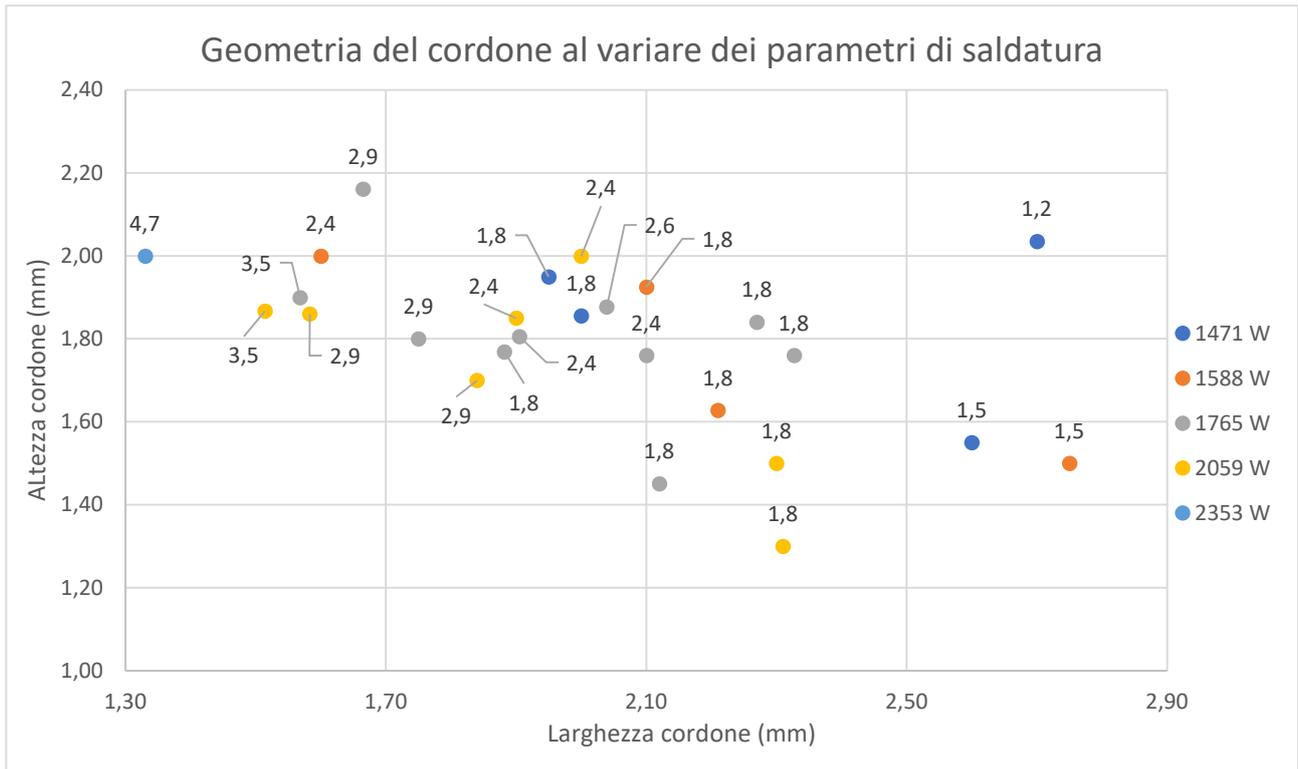


Figura 58 Variazione delle dimensioni della zona fusa al variare dei parametri di saldatura normalizzati

Nella Figura 58 è rappresentata la variazione della geometria del cordone di saldatura al variare dei parametri di processo. Le etichette dei dati indicano il valore di velocità normalizzata, mentre i diversi colori descrivono valori differenti di potenza normalizzata. È possibile notare chiaramente che l'aumento della velocità di saldatura determina una riduzione della larghezza della zona fusa e, generalmente, anche un aumento dell'altezza del cordone.

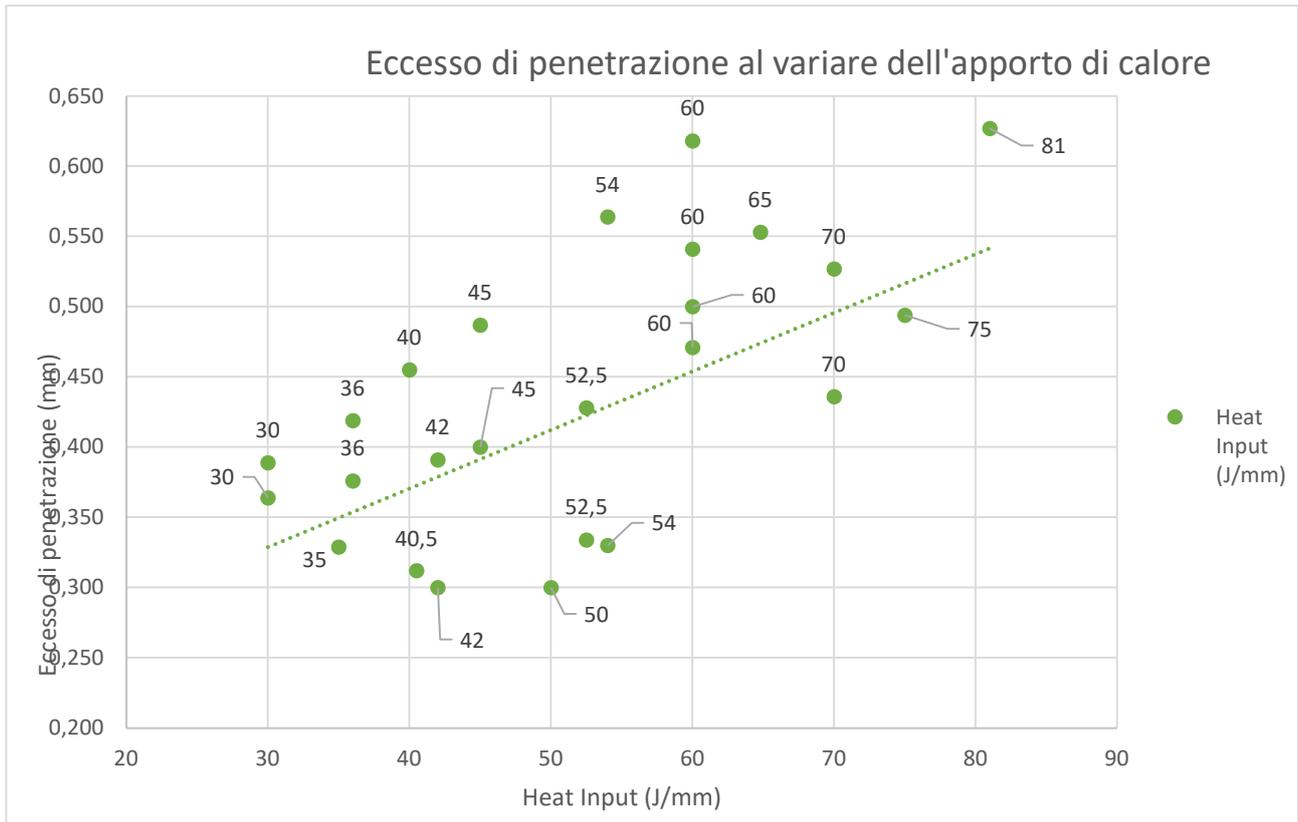
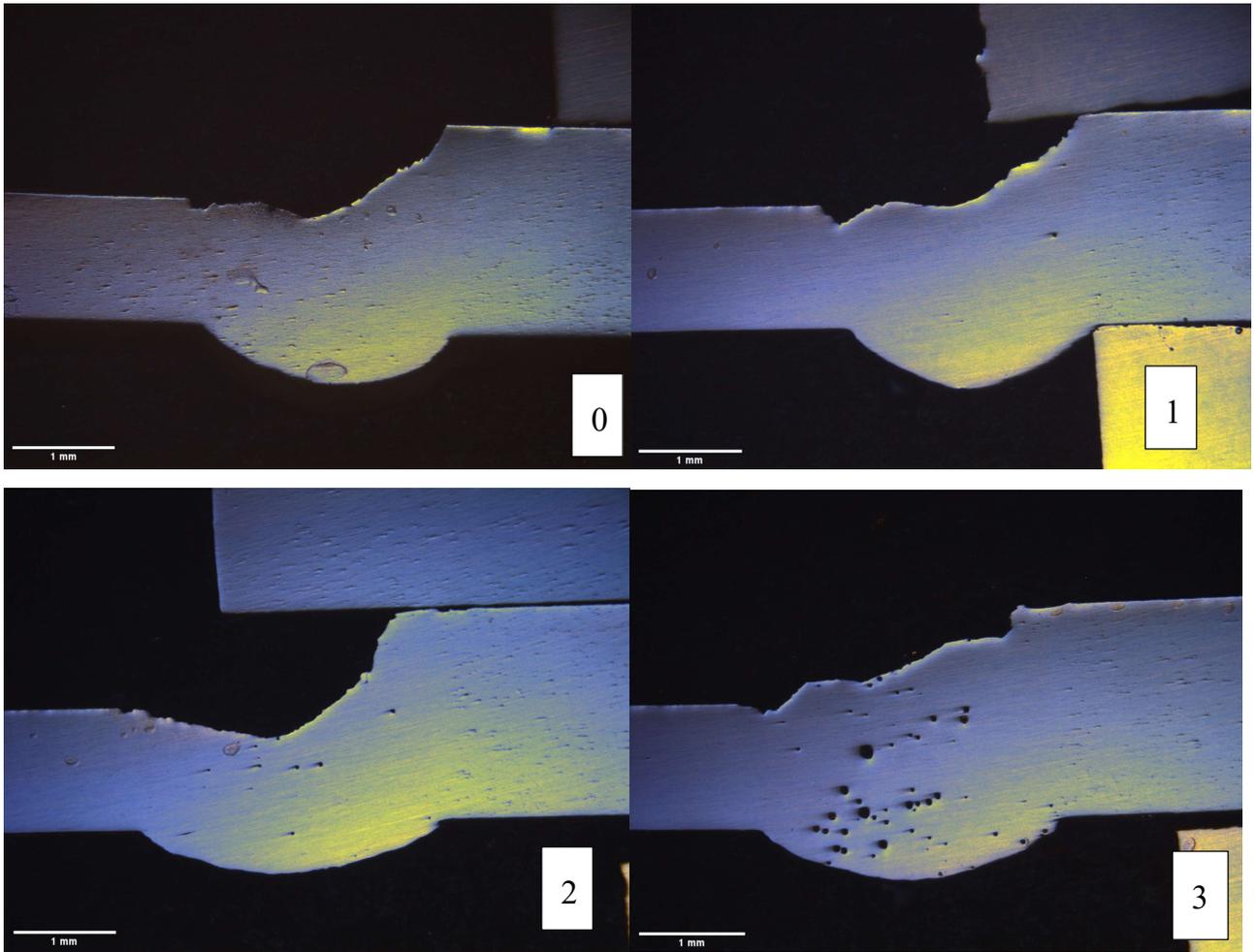


Figura 59 Eccesso di penetrazione al variare dell'HI

Dal grafico in Figura 59 si nota invece come l'eccesso di penetrazione sia fortemente dipendente dall'HI. A HI maggiori corrispondono dimensioni del difetto maggiori.

In una buona saldatura il livello di porosità deve essere ridotto, in quanto un'eccessiva presenza di questo tipo di difetto può causare cricche, diminuzione della duttilità e cedimento per fatica. Si è quindi ritenuto necessario misurare, in qualche modo, questo tipo di difetto. La classificazione è stata effettuata indicando con un numero che va da 0 a 3 il livello di porosità presente in ogni singola saldatura: indicando con 0 assenza di porosità, con 1 poche porosità di dimensioni ridotte, con 2 livello intermedio di porosità e 3 un eccesso di porosità.



*Figura 60 Esempio della valutazione dei livelli di porosità*

Di seguito è riportato un grafico in cui sono plottati i dati in base al livello di porosità e all'eccesso di penetrazione.

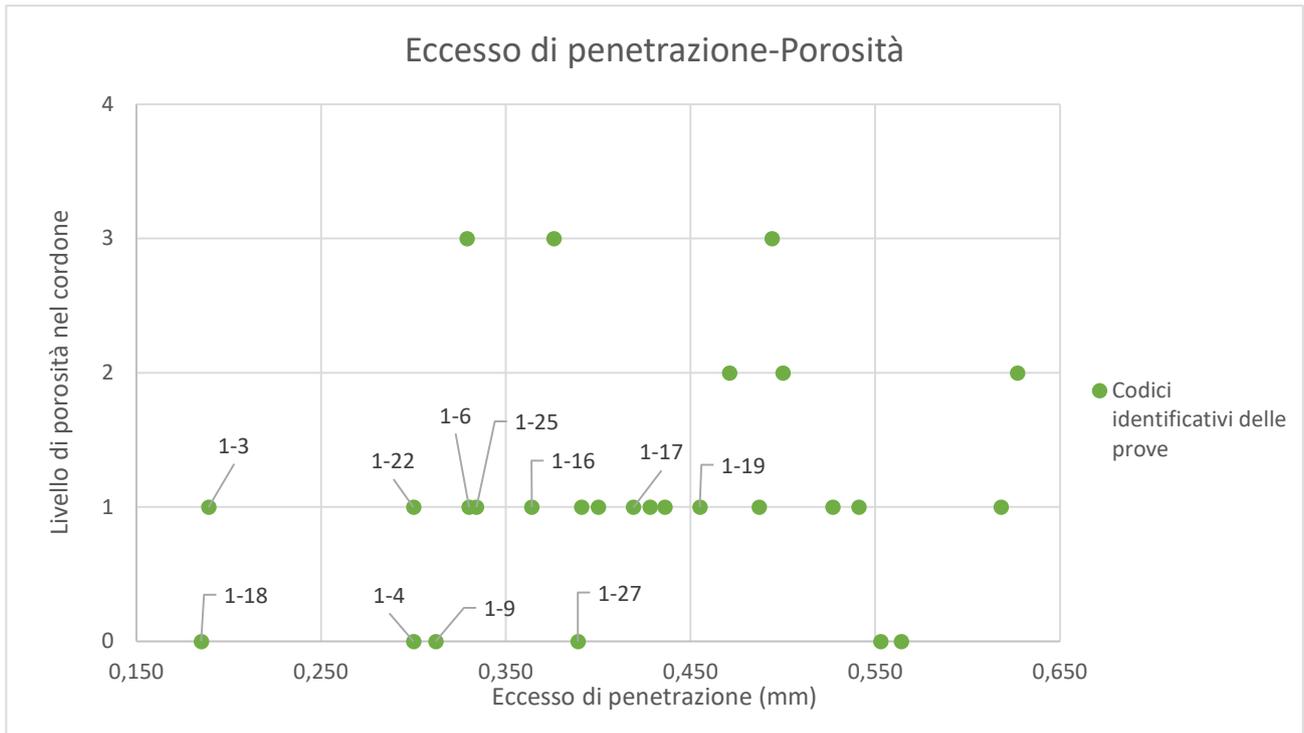


Figura 61 Concentrazione delle porosità nei cordoni in relazione all'eccesso di penetrazione

A partire dai risultati che sono stati ricavati in questo grafico, si è potuta fare una prima selezione dei migliori parametri di saldatura, escludendo quelli che generavano i difetti di dimensione maggiore. Le migliori saldature, etichettate in Figura 61, sono state ripetute su piastre di dimensioni maggiori, 408x122 mm, in modo da consentire il taglio di provini di trazione e di deformazione Erichsen, testati per un'analisi più approfondita sulle proprietà meccaniche del giunto.

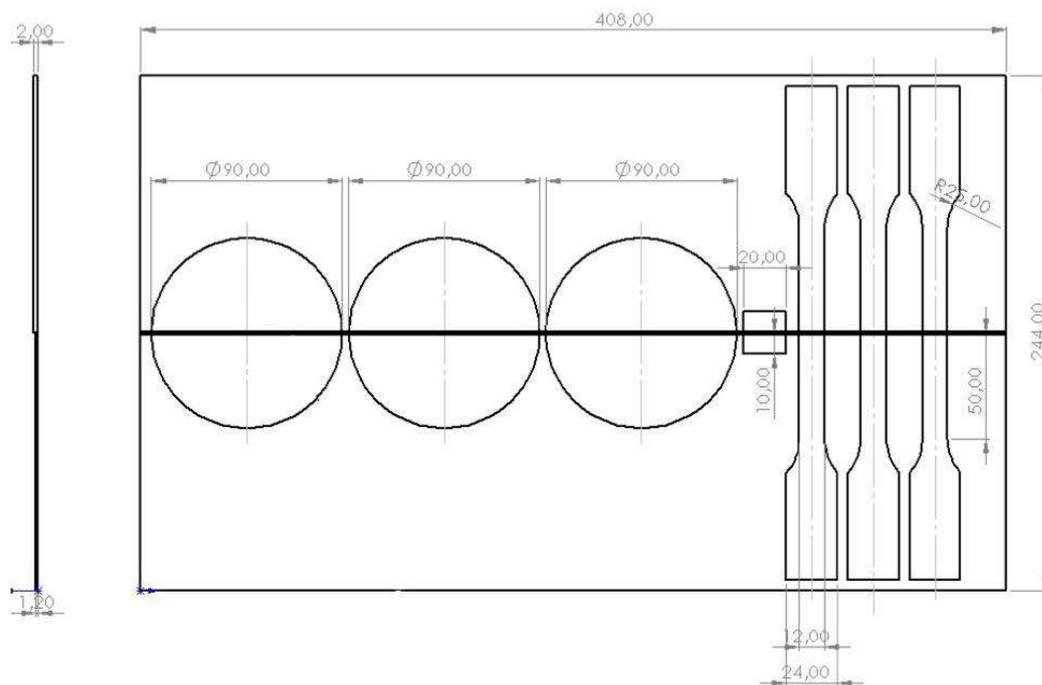
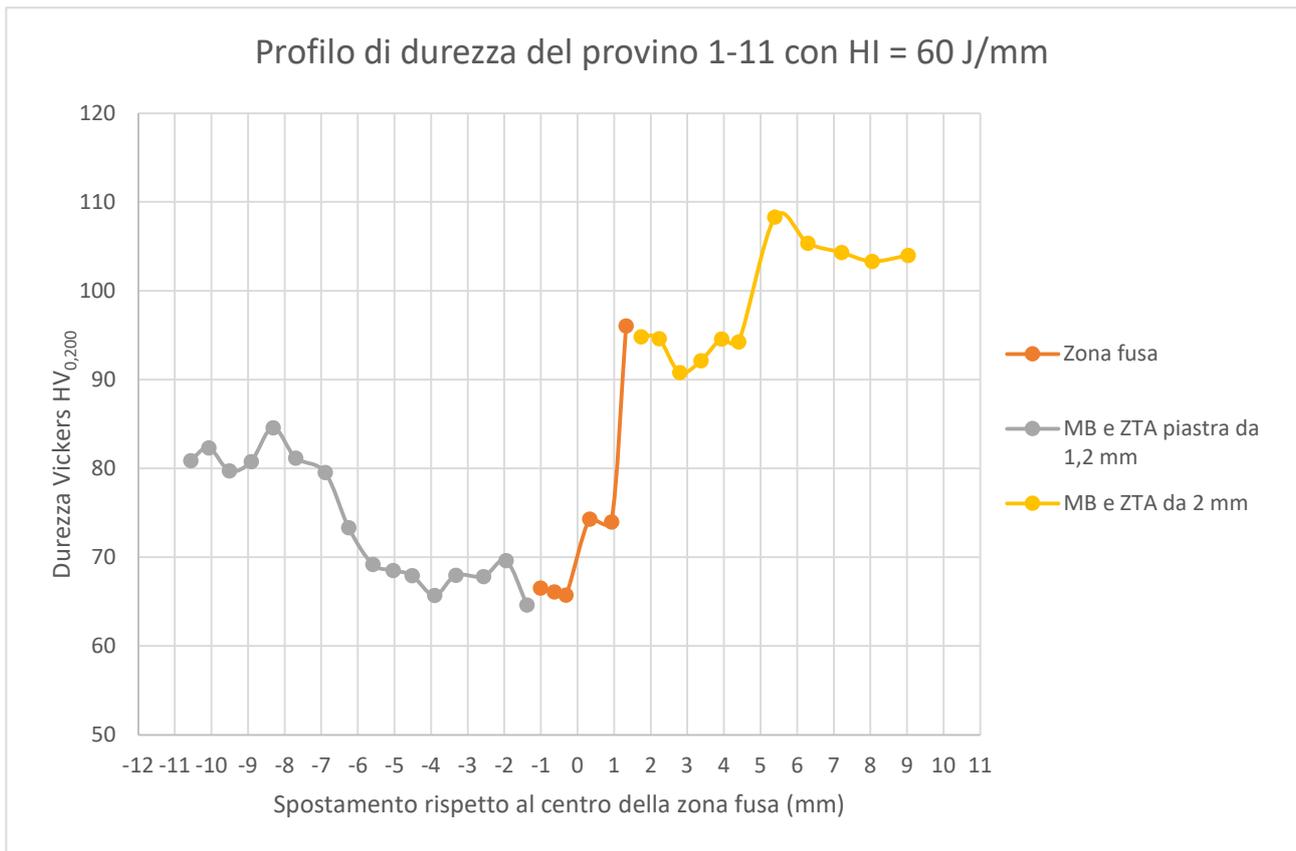


Figura 62 Tagliodei provini per le prove di trazione ed Erichsen

I risultati di tali analisi sono discussi nei paragrafi 5.3 e 5.4.

## 5.2 Risultati prove di microdurezza

I dati raccolti dalla prova di microdurezza permettono la realizzazione di grafici che descrivono la variazione di durezza al variare della distanza dal centro del cordone. Questo permette di individuare le varie zone del cordone di saldatura: zona fusa, zona termicamente alterata e materiale base.



*Figura 63 Profilo di durezza del provino 1-11*

Dal grafico in Figura 63 si riesce ad osservare la presenza delle diverse zone formate in seguito al processo di saldatura. La zona fusa ha una larghezza di 2,12 mm, la ZTA della piastra più sottile risulta essere larga 5,88 mm, mentre la ZTA della piastra più spessa 3,01 mm. La differente dimensione delle due ZTA è probabilmente dovuta al diverso spessore delle piastre saldate, che determina gradienti termici differenti nelle due piastre durante il processo di saldatura. Dal grafico del profilo di durezza è possibile osservare che nel caso dell'alluminio, a differenza di quello che succede per l'acciaio, la durezza della zona fusa diminuisce rispetto a quella del materiale base. Questo perché, quando il materiale fonde, perde le proprietà ricavate per mezzo trattamenti termici precedentemente eseguiti. Si potrebbe pensare di sottoporre il provino ad un nuovo trattamento termico nel tentativo di recuperare le proprietà microstrutturali anche nella zona fusa. Durante l'esecuzione delle saldature sono state fornite lamiere caratterizzate dallo stesso codice identificativo e quindi con la stessa composizione chimica e stesso trattamento termico. Sperimentalmente si nota che queste due lamiere non sono caratterizzate dalle stesse proprietà di durezza. Ciò fa pensare

che in realtà i due materiali non abbiano subito lo stesso trattamento e questo dubbio è supportato anche dal diverso comportamento delle lamiere all'attacco acido. Mentre la lamiera da 2 mm risulta più sensibile alla soluzione chimica e si riesce con facilità a distinguere i grani del materiale base, quella da 1,2 mm non permette la stessa analisi.

### 5.3 Risultati prove di trazione

I parametri di saldatura da cui sono state ricavati i nuovi giunti sono riassunti nella tabella seguente. Anche qui sono indicati dei valori normalizzati rispetto ad un numero scelto in modo casuale.

	Potenza (W)	Velocità (m/min)	Fuoco(mm)	HI (J/mm)	Gas (l/min)
1-4	1471	1,8	0,6	50	15
1-3	1471	1,8	1,2	50	15
1-6	1588	1,8	0,6	54	15
1-9	1588	2,4	0,6	40,5	15
1-16	1765	3,5	0,6	30	15
1-17	1765	2,9	0,6	36	15
1-18	1765	1,8	0,6	60	15
1-19	1765	2,6	0,6	40	15
1-22	2059	2,9	0,6	42	15
1-25	2059	2,4	0,9	52,5	15
1-27	2353	4,7	1,2	30	15

*Tabella 6 Parametri di saldatura normalizzati usati in questa seconda fase di prove*

In tutto sono stati testati 33 provini di trazione, con dimensioni scelte in riferimento alla normativa UNI EN ISO 4136:2022. [19]

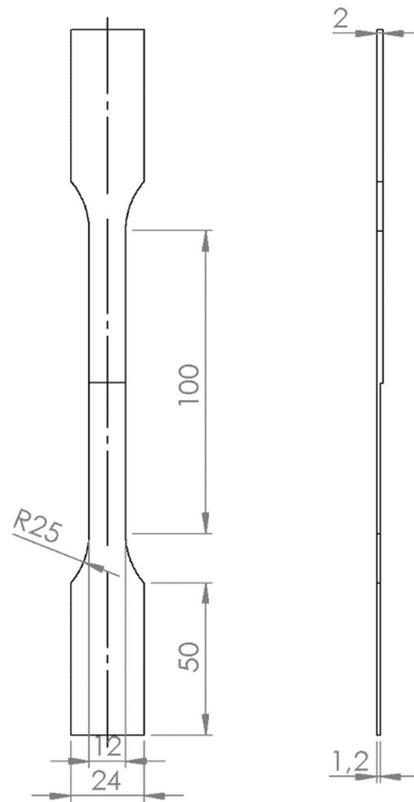


Figura 64 Schema di un provino di trazione realizzato tramite Solidworks

Alla fine di ogni test di trazione compare a schermo la curva Carico-Deformazione e l'indicazione del carico di rottura del provino.



Figura 65 Grafico Carico-Spostamento provino 2-1

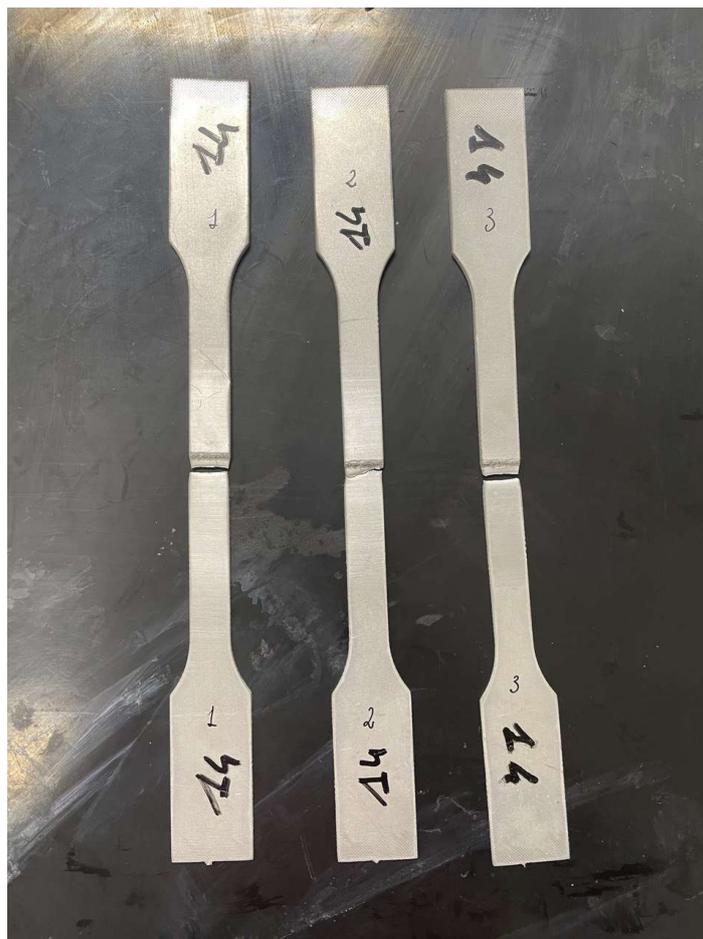


Figura 66 Provini in seguito ai test di trazione

I risultati di tali prove sono riassunti nella seguente tabella (si indica con MB il materiale base, mentre con BS il bordo della saldatura):

	Rm1 (N)		Rm2 (N)		Rm3 (N)		Rm MEDIA (N)	DEV.ST
1-4	2886,4	MB	2879,1	BS	2832,4	MB	2866,0	29,3
1-3	2800,8	MB	2810,3	MB	2797,2	MB	2802,8	6,8
1-6	2806,2	MB	2799,3	MB	2149,8	MB	2802,8	4,9
1-9	2837,3	MB	2815,3	MB	2830,3	MB	2827,6	11,2
1-16	2848,5	MB	2861,1	MB	2819,0	MB	2842,9	21,6
1-17	2805,9	MB	2836,7	MB	2854,3	MB	2832,3	24,5
1-18	2852,7	MB	2796,3	BS	2818,9	MB	2822,6	28,4
1-19	2802,1	MB	2804	MB	2836,5	MB	2814,2	19,3
1-22	2833,7	MB	2848,9	MB	2829,4	MB	2837,3	10,2
1-25	2852	MB	2736,1	MB	2869,4	MB	2860,7	12,3
1-27	2833,2	MB	2811,6	MB	2830,9	MB	2825,2	11,9

Tabella 7 Risultati dei test di trazione dei giunti saldati

Questo report è stato realizzato in conformità alla norma UNI EN ISO 4136:2022. [19] Tale normativa prevede di specificare, per ogni provino testato:

- Dove è localizzata la frattura;
- La temperatura di test (Ambiente 15°C);
- L'eventuale presenza di difetti che possano condizionare i risultati delle prove.

Nel caso delle due prove evidenziate in rosso, la rottura è avvenuta a un carico decisamente inferiore rispetto agli altri due risultati svolti sugli stessi set di parametri. Questo perché era presente sul cordone una discontinuità, probabilmente causata in fase di saldatura da un'eccessivo apporto termico, oppure da uno spostamento delle lamiera causato dalla dilatazione del materiale, che ha determinato la fusione completa del materiale e la completa espulsione dello stesso dal cordone. Per una migliore comprensione si riporta l'immagine di quanto appena descritto. I risultati ricavati da queste due prove non sono stati tenuti in conto nel calcolo del valore medio di carico di rottura del materiale.



*Figura 67 Difetto di discontinuità nel cordone di saldatura, a sinistra vista superiormente, a destra vista da sotto*

In quasi tutti i casi la rottura dei provini è avvenuta nel materiale base, in prossimità della ZTA della piastra di 1,2 mm. Questo è un risultato che rispetta le attese, in quanto essendo la saldatura tra due lamiere di diverso spessore, la zona saldata ha uno spessore intermedio tra 1,2 e 2 mm. Per questo motivo la parte più debole risulta essere la ZTA della piastra più sottile. Questo perché il ciclo termico determinato dal processo di saldatura, altera le proprietà microstrutturali delle lamiere di alluminio, che erano state precedentemente ottenute in seguito a dei trattamenti termici specifici. Nel caso, invece, di una saldatura tra lamiere di uguale spessore, la rottura è attesa nella zona saldata. [5] Questo perché, nel caso dell'alluminio, la microstruttura da fusione è quella meno resistente a livello di proprietà meccanica. Ciò è testimoniato anche dal profilo di microdurezza riportato nel precedente paragrafo.

Per un'interpretazione più immediata dei risultati riportati in tabella, è stato realizzato un grafico Carico-Heat Input per visualizzare l'effetto dell'apporto termico sulle proprietà di resistenza del cordone.

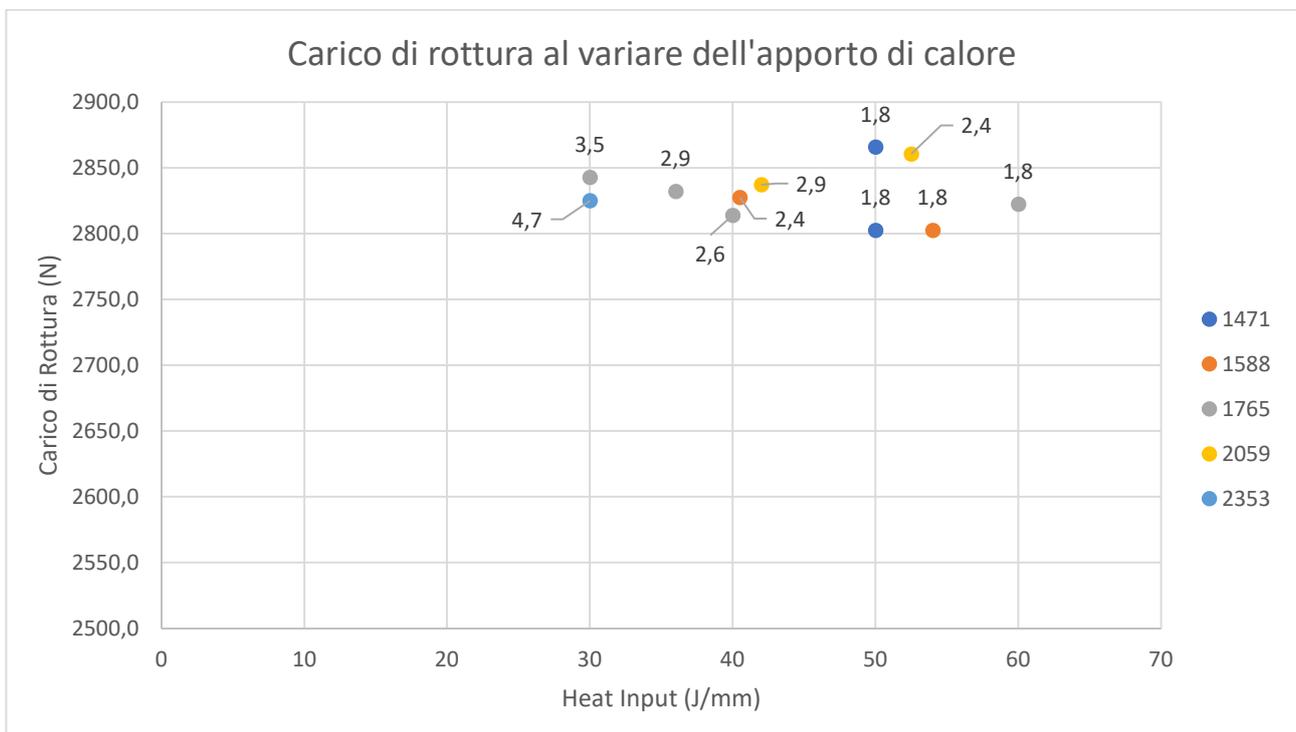


Figura 68 Grafico Carico-Heat Input dei valori medi delle prove di trazione

I valori di carico di rottura per tutte le prove ricadono nello stesso range di valori, intorno ai 2800 N. Questo risultato dimostra che un heat Input che varia da 30 a 60 J/mm non influisce

in modo drastico sulla resistenza a trazione del giunto e prova che il processo di selezione dei parametri di saldatura eseguito sulla base dell'analisi metallografica svolto nel paragrafo 5.1 è stato uno strumento utile per escludere i giunti peggiori.

## 5.4 Risultati prove Erichsen

I risultati delle prove Erichsen sono stati gestiti facendo riferimento alla normativa UNI EN ISO 20482:2014. [20] In particolare sono state eseguite 3 prove per ogni set di parametri e da queste è stato ricavato l'indice Erichsen (IE) come media dei risultati ottenuti. Il report della prova richiesto dalla normativa include:

- Descrizione del provino;
- Tipo di lubrificante usato;
- Valutazione IE;
- Indicare la zona di frattura sul pezzo ed eventualmente allegare una foto di supporto;

Il provino testato ha le seguenti caratteristiche geometriche:

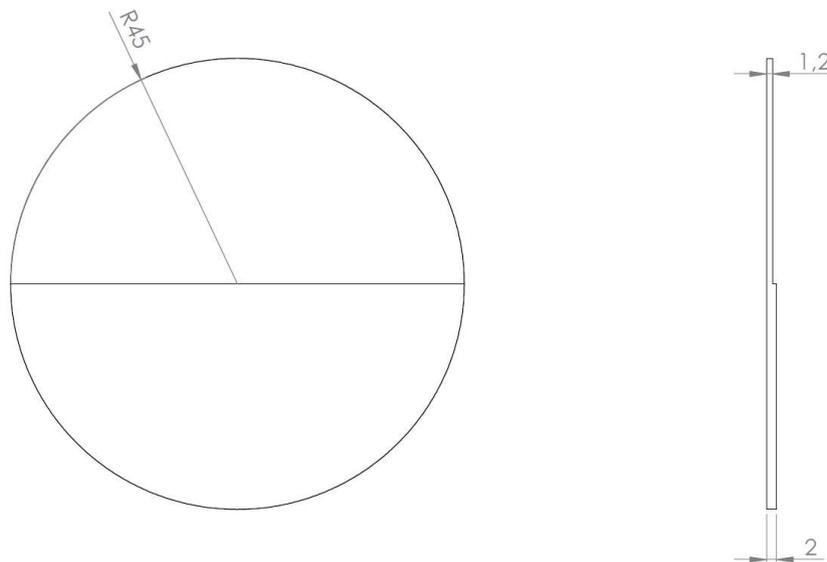
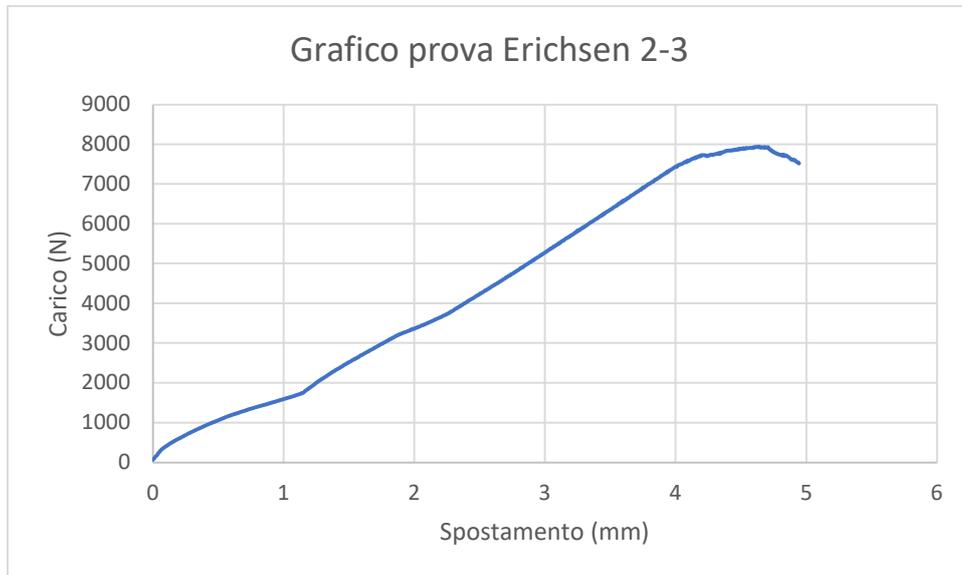


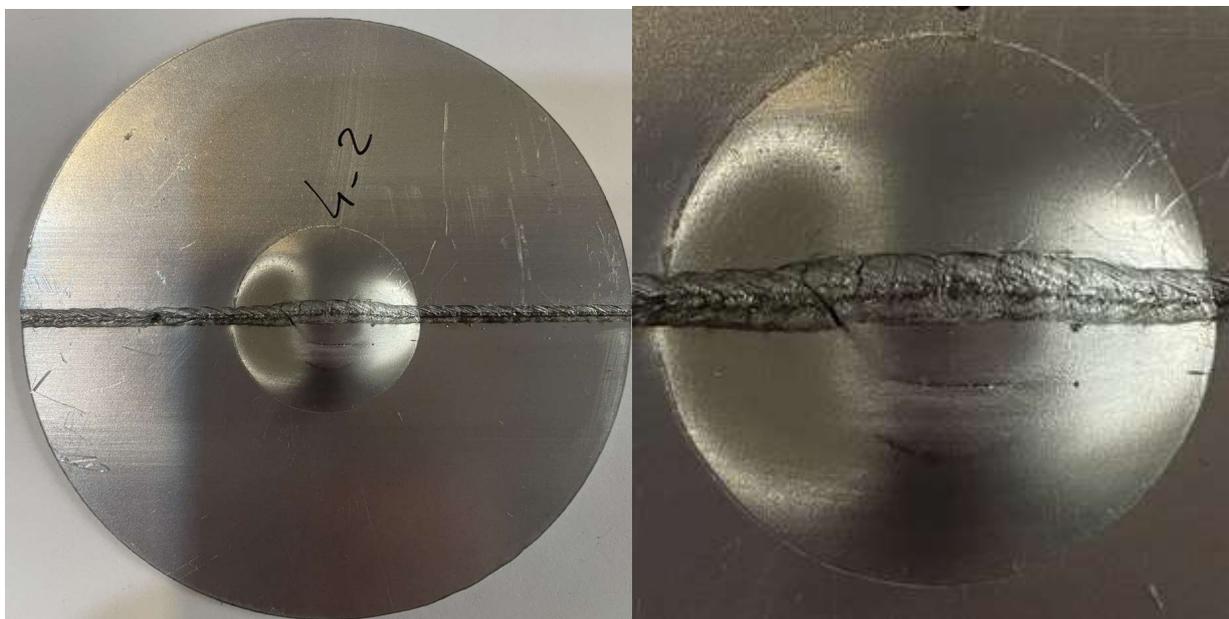
Figura 69 Schema di un provino per prova Erichsen realizzato tramite Solidworks

Alla fine dell'esecuzione di ogni prova a schermo compare un grafico simile a quello della prova di trazione, con la differenza che in questo caso il carico è di compressione e il

parametro di interesse è lo spostamento del punzone in corrispondenza del carico massimo raggiunto.



*Figura 70 Grafico ottenuto dalla prova Erichsen*



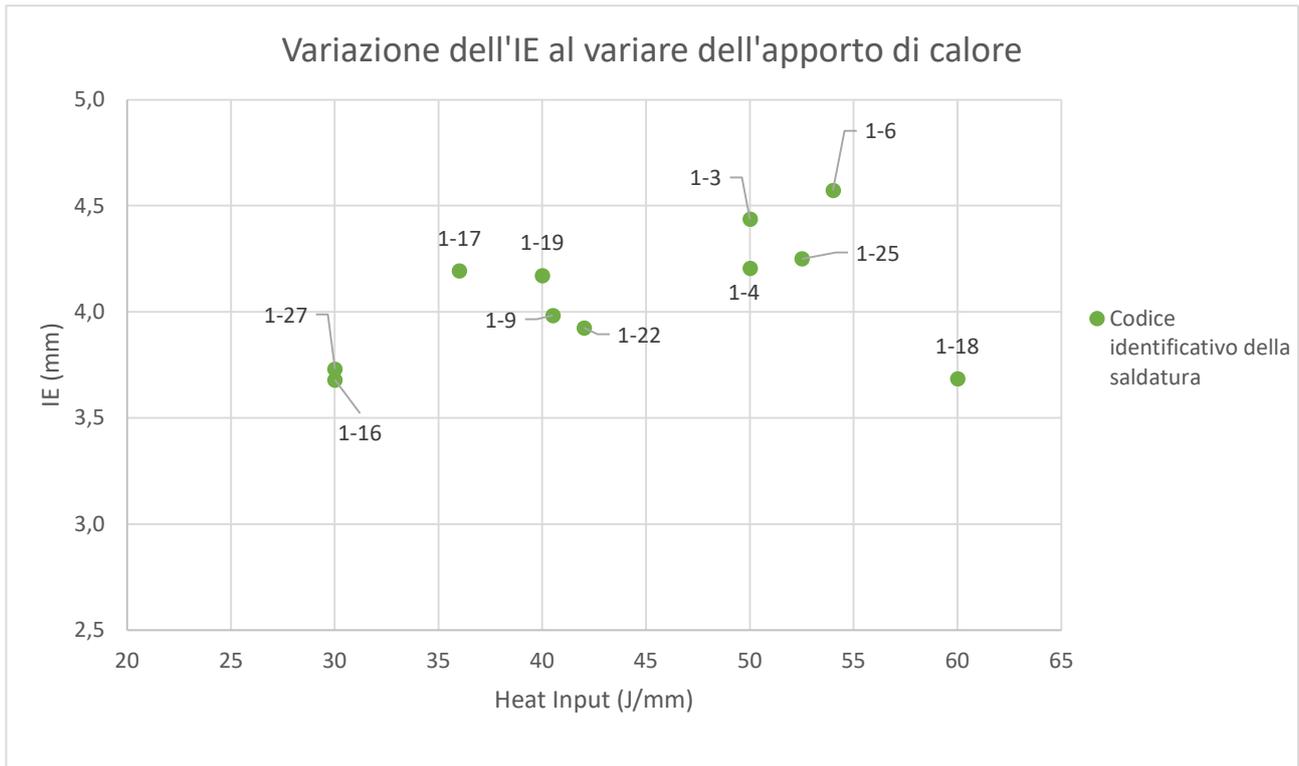
*Figura 71 Provino dopo esecuzione della prova Erichsen, a destra un dettaglio della zona di frattura*

I risultati delle prove sono stati raccolti nella tabella seguente (si indica con MB una rottura avvenuta nel materiale base, con S una rottura avvenuta nel centro della saldatura e con BS una rottura partita dal bordo della saldatura):

	IE1 (mm)		IE2(mm)		IE3 (mm)		IE MEAN (mm)	DEV ST
1-4	4,4	S	4,2	S	4,0	S	4,2	0,21
1-3	4,4	S	4,9	S	4,0	S	4,4	0,46
1-6	4,6	BS	5,1	S	4,0	S	4,6	0,54
1-9	4,0	S	3,8	S	4,2	BS	4,0	0,18
1-16	3,7	MB	3,6	S	3,8	S	3,7	0,08
1-17	4,2	MB	4,4	S	4,1	S	4,2	0,15
1-18	3,7	BS	3,6	BS	3,8	S	3,7	0,15
1-19	4,2	BS	4,1	S	4,2	S	4,2	0,06
1-22	4,4	S	3,6	S	3,7	BS	3,9	0,44
1-25	4,2	S	4,3	S	4,2	S	4,3	0,08
1-27	3,9	S	3,8	S	3,7	S	3,7	0,11

*Figura 72 Risultati prove di imbutitura Erichsen*

Dai risultati delle prove si nota come le rotture avvengano prevalentemente sulla saldatura. Il ciclo termico dato dall'operazione di saldatura riduce tanto l'indice di Erichsen rispetto al materiale base. I valori di caratterizzazione del materiale base sono stati ricavati da S. Bergamo nel suo lavoro di tesi. [12]



*Figura 73 Risultati dei test di imbutitura Erichsen*

Dal grafico in Figura 73 si nota che i migliori IE si ottengono in corrispondenza di un valore di HI compreso tra 48 e 55 J/mm. I parametri associati a questi valori di HI sono quelli che hanno fatto registrare le migliori proprietà sia nel campo della trazione, dato che tutti i punti erano nell'intorno di 60 N, sia nel campo della deformazione.

## 6. Conclusioni

Questo lavoro di tesi è stato incentrato sullo studio dell'influenza dei principali parametri di saldatura laser nella realizzazione di TWBs in lega di alluminio. La lega utilizzata è la 6016 ed i risultati ottenuti in questo lavoro sono riassunti di seguito:

- Si è osservato che a parità di altri parametri di saldatura, l'uso dell'Argon come gas di protezione permette di ridurre la larghezza del cordone di saldatura, oltre che a stabilizzare il keyhole;
- La larghezza della zona fusa si riduce all'aumentare della velocità di saldatura;
- La presenza del difetto di eccesso di penetrazione aumenta all'aumentare dell'HI fornito dal processo di saldatura;
- L'impiego del gas di protezione non basta da solo per evitare la formazione di porosità, ma va anche selezionato il giusto valore di velocità di saldatura. Oltre a questo, nella saldatura delle leghe di alluminio, è sempre buona norma lavorare in ambienti puliti e a bassi livelli di umidità, limitando così le porosità da idrogeno;
- I provini di trazione si rompono tutti nel materiale base, nella ZTA della piastra più sottile, infatti i cicli termici del processo di saldatura modificano la microstruttura, indebolendo quella ottenuta dopo i trattamenti di lavorazione meccanica e invecchiamento. Sul carico di rottura non si evidenzia una netta dipendenza rispetto ai valori di HI testati;
- Gli indici di Erichsen migliori si registrano in corrispondenza di un HI di circa 50 J/mm e le rotture avvengono quasi sempre nella zona fusa, a confermare il fatto che la saldatura, nelle leghe di alluminio, determina una riduzione delle proprietà di deformabilità;

## 7. Consigli e Sviluppi Futuri

L'argomento trattato in questo lavoro di tesi è quello dei TWBs in lega di alluminio. In letteratura si trovano tanti articoli e paper sui TWBs in acciaio, ma su quelli in alluminio. È un argomento di grande attualità, soprattutto ora che serve una soluzione immediata che porti ad un drastico abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Gli studi da fare sono ancora tanti e la ricerca in questo campo è tutt'ora in corso. Alcuni perseguibili nei prossimi lavori possono essere:

- Ottenere la legge della macchina laser che descrive la variazione dello spot al variare della distanza focale in modo da poter ricavare la densità di energia che impatta sul pezzo. In questo modo si può conoscere la modalità di saldatura: conduttiva o keyhole;
- Approfondire il trattamento di pulizia laser delle piastre pre-saldatura. Grazie a questa pulizia laser è possibile rimuovere i residui di olio e grasso dalla superficie del pezzo da saldare, riducendo la formazione di porosità da idrogeno;
- Studiare e ridurre le tensioni residue indotte dal processo di saldatura;

Figura 1 Concentrazione dell'idrogeno al variare della temperatura, Aluminium properties and physical metallurgy [2].....	8
Figura 2 Rafforzamento per soluzione solida [1] .....	13
Figura 3 Rafforzamento per lavorazione a freddo [1].....	13
Figura 4 Variazione delle proprietà meccaniche in seguito al trattamento termico subito dalla lega 2024 e 7075 [1].....	14
Figura 5 Diagramma di stato alluminio-rame [2] .....	15
Figura 6 Influenza della temperatura di invecchiamento sulle proprietà meccaniche della lega Alluminio-Rame [2] .....	16
Figura 7 Variazione della durezza al variare dei precipitati nelle leghe alluminio-rame [2].	18
Figura 8 Influenza della temperatura sui fattori che determinano la velocità di precipitazione [2] .....	19
Figura 9 Principali tipi di tailor blank [5] .....	24
Figura 10 Tailor welded blanks applicati nelle carrozzerie automobilistiche [5].....	25
Figura 11 Schema illustrativo del sistema di generazione del raggio laser [6].....	27
Figura 12 Varie fasi della formazione di un raggio laser [7] .....	28
Figura 13 Rappresentazione della densità di potenza e della geometria del cordone al variare del metodo di saldatura utilizzato [8].....	29
Figura 14 Rappresentazione schematica della saldatur laser [7] .....	31
Figura 15 Tipici esempi di giunti realizzati tramite saldatura laser [8] .....	31
Figura 16 Pricipali tipi di sorgenti laser in commercio [8] .....	32
Figura 17 Illustrazione schematica dello spot e del cordone di saldatura con le due tecniche laser PW e CW [8].....	33
Figura 18 Conductione mode e keyhole mode [7] .....	34
Figura 19 Schematizzazione sistema di saldatura con laser Nd:YAG [8] .....	35
Figura 20 Riflettività al variare della lunghezza d'onda per alcuni materiali metallici [10].	35

Figura 21 influenza della presenza di alcuni elementi in lega sul coefficiente di conducibilità termica di alcune leghe di alluminio, a temperatura ambiente [8].....	37
Figura 22 schema dell'apertura del keyhole utilizzando un getto di gas inerte [8].....	38
Figura 23 Effetto della posizione dell'ugello sul bagno fuso e l'interazione del gas nel processo di saldatura. La soluzione che rende l'applicazione del gas di protezione efficace è indicata con la lettera (b) [11] .....	38
Figura 24 Effetto della potenza sulla velocità di saldatura nel caso di laser Nd:YAG [9] ....	39
Figura 25 Effetto della velocità di saldatura sulla formazione di porosità [11].....	40
Figura 26 Valore di soglia della potenza laser che determina il passaggio da modalità conduttiva a modalità keyhole [9].....	41
Figura 27 TruLaser Cell 7040 .....	45
Figura 28 Testa di saldatura .....	45
Figura 29 Schema di saldatura .....	46
Figura 30 Rappresentazione machera di saldatura [13] .....	47
Figura 31 Lamiera dopo saldatura, a sinistra la vista dall'alto .....	47
Figura 32 Provini destinati alle metallografie.....	48
Figura 33 Macchina inglobatrice.....	49
Figura 34 Operazioni di inglobatura .....	50
Figura 35 Provini dopo inglobatura .....	50
Figura 36 Levigatrice .....	51
Figura 37 A sinistra un provino dopo lucidatura con carta abrasiva 180, a destra immagine acquisita al microscopio di un cordone di saldatura dop lucidatura con carta 4000.....	52
Figura 38 Provini dopo la lucidatura con il panno .....	53
Figura 39 Metallografia del cordone di saldatura dopo attacco acido .....	54
Figura 40 Ingrandimento sul bordo destro del cordone .....	55
Figura 41 Microscopio ottico Leica .....	55

Figura 42 Principali difetti di saldatura riscontrati nei cordoni, (a) da sinistra a destra: eccesso di penetrazione alla radice e concavità; (b) sottotaglio. [14] .....	56
Figura 43 Esecuzione prove di microdurezza [16] .....	57
Figura 44 wikipedia.....	58
Figura 45 Microdurometro .....	59
Figura 46 Indendazione del provino.....	60
Figura 47 Impronta realizzata nella zona fusa e visionata con ingrandimento 40x.....	60
Figura 48 Macchina servo-idraulica Instron 8801 .....	61
Figura 49 Particolare del posizionamento del provino sulla macchina di prova .....	62
Figura 50 Schema dispositivo realizzato per l'esecuzione della prova Erichsen .....	63
Figura 51 CAD del sistema di esecuzione della prova Erichsen .....	64
Figura 52 Interfaccia per il comando manuale della macchina servo-idraulica .....	68
Figura 53 Saldature eseguite con o senza gas, a parità di set di parametri .....	70
Figura 54 Effetto del gas di protezione sulla profondità di penetrazione del raggio laser ....	71
Figura 55 Influenza della Potenza sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati .....	72
Figura 56 Influenza della velocità sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati .....	73
Figura 57 Influenza del fuoco sulla saldatura, valori dei parametri di processo normalizzati .....	74
Figura 58 Variazione delle dimensioni della zona fusa al variare dei parametri di saldatura normalizzati .....	75
Figura 59 Eccesso di penetrazione al variare dell'HI .....	76
Figura 60 Esempio della valutazione dei livelli di porosità.....	77
Figura 61 Concentrazione delle porosità nei cordoni in relazione all'eccesso di penetrazione .....	78

Figura 62 Tagliodei provini per le prove di trazione ed Erichsen.....	79
Figura 63 Profilo di durezza del provino 1-11 .....	80
Figura 64 Schema di un provino di trazione realizzato tramite Solidworks.....	82
Figura 65 Grafico Carico-Spostamento provino 2-1.....	82
Figura 66 Provini in seguito ai test di trazione .....	83
Figura 67 Difetto di discontinuità nel cordone di saldatura, a sinistra vista superiormente, a destra vista da sotto .....	84
Figura 68 Grafico Carico-Heat Input dei valori medi delle prove di trazione.....	85
Figura 69 Schema di un provino per prova Erichsen realizzato tramite Solidworks.....	86
Figura 70 Grafico ottenuto dalla prova Erichsen .....	87
Figura 71 Provino dopo esecuzione della prova Erichsen, a destra un dettaglio della zona di frattura .....	87
Figura 72 Risultati prove di imbutitura Erichsen.....	88
Figura 73 Risultati dei test di imbutitura Erichsen.....	89

# Bibliografia

- [1] F. Campbell e F. C. Campbell, *Elementof metallurgy and engineering alloys*, ASM International, 2008.
- [2] J. E. Hatch, *Aluminum : Properties and physical metallurgy*, A S M International, 1984.
- [3] G. Ubertalli, *Slide del corso di Metallurgia, laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino*, Torino, 2019.
- [4] T. Blank, «Wikipedia,» [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tailored\\_blank](https://en.wikipedia.org/wiki/Tailored_blank).
- [5] M. J. M. L. A. K. Marion Merklein, «A review on tailored blanks-Production, applications and evaluation,» *Journal of Materials Processing Technology*, n. 214, pp. 151-164, 2013.
- [6] Laser, «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser>.
- [7] D. Narsimhachary, «Effect of Laser Welding Parameters on 6061 Aluminium Alloy,» Rourkela, 2014.
- [8] S.Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies*, Osaka: Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [9] X. Cao, W. W. e P. C. & I. J.-P., «Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. I. Laser Welding Processes,» *Material and Manufacturing process*, vol. 18, n. 1, pp. 1-22, 2003.
- [10] E. Atzeni, *Slide del corso di "Tecnologia Meccanica", Politecnico di Torino*, Torino, 2020.

- [11] A. W. A. Shaer, «Porosity Reduction and Elimination in Laser Welding of AA6014 Aluminium Alloys for Automotive Components Manufacture and Industrial Applications,» The University of Manchester, Manchester, 2016.
- [12] S. Bergamo, *Saldatura laser su leghe di alluminio: studio delle proprietà meccaniche e microstrutturali*, Torino: Politecnico di Torino, 2022.
- [13] D. Basile, *Experimental Analysis of the mechanical properties of Aluminum Tailor Welded Blanks*, Torino, 2022.
- [14] UNI, *Norma UNI EN ISO 10359:2015 - Profili saldati al laser (Tailored Blanks) - Condizioni tecniche di fornitura*, 2015.
- [15] ImageJ, «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/ImageJ>.
- [16] S. Spriano, *Appunti del corso "Scienza e tecnologia dei materiali"*, Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [17] M. Vickers, «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Durezza>.
- [18] W. G. & T. C. TOTEMEIR, *Smietthels Metals Reference Boon*, ELSEVIER, 2003.
- [19] UNI, *UNI EN ISO 4136:2022 - Prove distruttive sulle saldature di materiali metallici - Prova di trazione trasversale*, 2022.
- [20] UNI, *UNI EN ISO 20482:2014 - Materiali metallici - Lamiere e nastri - Prova di imbutitura Erichsen*, 2014.
- [21] R. D. Ardika, T. Triyono, N. Muhayat e Triyono, «A review on porosity in aluminum welding,» *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 171-180, 2021.
- [22] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys*, Cambridge: Elsevier Science & Technology, 2002.

[23] X. Cao, W. W. e P. C. & I. J.-P., «Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties,» *Taylor & Francis Group*, vol. 18, n. 1, pp. 23-49, 2003.