

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Analisi di saldature laser su leghe di alluminio: effetto dei parametri di processo sulla geometria del cordone

Relatore:
Prof.ssa Erica Liverani

Candidato:
Manuele Merola

Sessione IV
Anno Accademico 2024/2025

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro è lo studio teorico e sperimentale delle saldature laser per sovrapposizione, una tecnologia chiave per l'industria moderna grazie alla sua precisione e versatilità. Sono stati analizzati campioni in lega di alluminio di due origini: lega 5754 prodotta tramite laminazione convenzionale e lega 43500-T5 (AlSi10MgMn) realizzata mediante additive manufacturing, una tecnologia innovativa che consente la creazione di geometrie complesse, non realizzabili con metodi tradizionali. Le saldature sono state esaminate valutando le loro dimensioni in relazione ai parametri di processo, come potenza del laser e velocità di saldatura, e classificate in base alla presenza di difetti, quali porosità o cricche. Inoltre, sono state condotte prove di durezza micro Vickers sui materiali base e sul cordone di saldatura per valutare le proprietà meccaniche. L'elaborazione dei dati ha permesso di identificare i parametri di processo ottimali per migliorare la qualità delle saldature in termini di resistenza e integrità strutturale, fornendo indicazioni preziose per applicazioni industriali, in particolare nei settori aerospaziale e automotive, dove le leghe di alluminio e le tecnologie additive sono sempre più adottate.

Indice

Abstract	1
1 Introduzione	5
2 Stato dell'arte	7
2.1 Introduzione teorica alle saldature laser	11
2.2 Sorgente Corona e Parametri	21
3 Materiali, strumenti e procedure	25
3.1 Materiali dei provini	25
3.2 Saldatura dei provini	27
3.3 Preparazione dei campioni	31
3.4 Analisi al microscopio e classificazione	33
3.5 Prove di durezza	34
4 Analisi dei risultati	37
4.1 Foto e commenti	38
4.2 Grafici durezza	44
5 Discussioni	49
6 Conclusioni	51
7 Bibliografia	53

Introduzione

Nata negli anni Settanta con i primi esperimenti, la tecnologia della saldatura laser si è rivelata subito promettente, evolvendosi costantemente nel tempo grazie a innovazioni tecnologiche e alla crescente domanda industriale, consolidandosi come una soluzione avanzata e affidabile per numerose applicazioni.

La versatilità del laser rappresenta uno dei suoi principali punti di forza: questa tecnologia può essere impiegata per saldare una varietà di materiali, includendo sia metalli che polimeri plastici. Inizialmente, l'attenzione industriale si è concentrata principalmente sull'acciaio, materiale largamente utilizzato grazie alle sue proprietà meccaniche. Tuttavia, negli ultimi anni, l'interesse si è spostato verso l'alluminio, sempre più apprezzato nei settori aerospaziale, automobilistico e manifatturiero per la sua combinazione unica di leggerezza e resistenza.

Questa tendenza ha spinto verso una maggiore sperimentazione e ottimizzazione delle tecniche di saldatura laser su questo materiale. Dal punto di vista tecnico, i meccanismi di saldatura laser si distinguono in due categorie principali: la saldatura per conduzione e quella per profonda penetrazione (keyhole welding).

A livello industriale, la seconda modalità risulta predominante grazie alla sua efficienza e capacità di penetrare materiali spessi, ed è proprio su questo approccio che si focalizza la presente tesi. L'analisi condotta in questo lavoro esplorerà le prestazioni della saldatura per profonda penetrazione su provini in lega di alluminio, con particolare attenzione ai parametri di processo e alle proprietà meccaniche risultanti. Nello specifico, nel contesto di questa tesi sono state effettuate saldature tra lamiere di alluminio della serie 5754, ottenute mediante laminazione tradizionale, e componenti realizzati in lega AlSi10MgMn tramite additive manufacturing, una tecnologia innovativa che, sfruttando anch'essa l'impiego di laser ad alta precisione, consente la produzione di geometrie complesse e strutture ottimizzate, altrimenti difficilmente realizzabili con metodi convenzionali. I due componenti sono stati sovrapposti durante il processo di saldatura, configurando un assetto ideale per l'applicazione della tecnica laser, che garantisce un'elevata controllabilità e un impatto termico localizzato. Il fascio laser, caratterizzato da un'elevata densità di energia, penetra i materiali riscaldandoli fino a raggiungere lo stato di fusione, creando una zona fusa altamente concentrata. Grazie al moto relativo tra il pezzo in lavorazione e il fascio laser, che si sposta lungo la superficie con una traiettoria predefinita, la zona appena fusa si raffredda e solidifica rapidamente non appena il laser si allontana, dando origine al cordone di saldatura. Questo processo, rinomato per la sua pre-

cisione millimetrica e la sua efficienza operativa, consente di ottenere giunzioni di alta qualità, la cui resistenza meccanica e integrità strutturale dipendono in modo cruciale dai parametri di saldatura, quali la potenza del laser, la velocità di avanzamento e la focalizzazione del fascio. Tali parametri sono stati oggetto di un'analisi approfondita nel presente lavoro, con l'obiettivo di ottimizzarne l'impatto sulle proprietà dei materiali e sulle prestazioni delle saldature, contribuendo così a validare l'applicabilità di questa tecnologia in contesti industriali avanzati.

In particolare, la tesi si focalizza sull'analisi dettagliata di diversi parametri chiave del processo di saldatura laser, al fine di studiarne l'impatto sui risultati ottenuti e ottimizzare le prestazioni delle giunzioni. Tra questi parametri, particolare attenzione è stata rivolta alla potenza del fascio laser, alla velocità di avanzamento, alla focalizzazione del raggio, alla durata dell'impulso e alla distribuzione della potenza del laser, ciascuno dei quali influenza direttamente la qualità del cordone di saldatura, la penetrazione del materiale e la presenza di eventuali difetti, come porosità o cricche. Questa analisi sistematica, condotta utilizzando la sorgente laser Corona di nLight, ha permesso di correlare le variazioni dei parametri alle proprietà meccaniche e microstrutturali dei materiali, fornendo dati preziosi per la validazione della tecnica in contesti applicativi reali.

L'analisi è stata condotta attraverso un approccio sperimentale che ha combinato prove di saldatura laser, test meccanici di durezza e analisi microstrutturali al microscopio, al fine di correlare i parametri di processo con le prestazioni delle giunzioni.

2

Stato dell'arte

Il termine LASER è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificazione della Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazioni), si tratta di un fascio di luce (fotoni) coerente, monocromatico e altamente direzionale. Il principio fondamentale del laser si basa su fenomeni quantistici come l'emissione stimolata, teorizzata da Albert Einstein nel 1917, e l'inversione di popolazione. Questo concetto è stato poi sviluppato da Theodore Maiman, che nel 1960 dimostrò il funzionamento del primo laser da lui costruito utilizzando un rubino. Il funzionamento del laser si basa su principi di fisica quantistica, che ci permettono di produrre un fascio di fotoni con caratteristiche uniche rispetto alle sorgenti di luce convenzionali. Il processo di emissione laser avviene attraverso tre fasi principali: pompaggio, emissione stimolata e amplificazione ottica. Durante la fase di pompaggio, un mezzo attivo (come un gas, un cristallo o una fibra ottica) viene eccitato tramite una sorgente di energia esterna, che può essere ad esempio luce o corrente elettrica, portando gli atomi o le molecole del mezzo a un livello energetico superiore. Quando questi atomi ritornano al loro stato fondamentale, emettono fotoni in modo spontaneo o stimolato. L'emissione stimolata, in particolare, è il cuore del funzionamento del laser: un fotone incidente stimola un atomo eccitato a emettere un secondo fotone con la stessa frequenza, fase e direzione, creando un fascio coerente. Questo processo è puramente quantistico, poiché coinvolge transizioni energetiche discrete tra livelli atomici. L'inversione di popolazione è essenziale: normalmente, più atomi si trovano nello stato energetico fondamentale che in quello eccitato (distribuzione di Boltzmann); tuttavia, attraverso il pompaggio, si inverte questa distribuzione, creando un mezzo attivo che amplifica la radiazione anziché assorbirla. Senza inversione, il laser non potrebbe funzionare. In questa fase si deve fornire energia al mezzo attivo, il pompaggio può essere di diversi tipi: Pompaggio ottico attraverso luce o un altro laser; Pompaggio elettrico che avviene tramite una scarica elettrica o una corrente che passa attraverso il mezzo attivo; Pompaggio chimico che sfrutta delle reazioni chimiche per fornire energia al mezzo attivo; Pompaggio termico in cui si usa il calore per eccitare il mezzo attivo.

Il fascio viene poi amplificato all'interno di una cavità ottica, composta da specchi che riflettono i fotoni avanti e indietro, intensificando l'emissione luminosa fino a ottenere il fascio laser finale. Poi viene fatto passare attraverso una lente di focalizzazione che gli dà una forma ben specifica chiamata iperboloide di rotazione, la quale descrive il profilo del fascio in modalità TEM_{00} (Transverse Electromagnetic

Mode fondamentale, con distribuzione gaussiana dell'intensità). Questa geometria non permette di focalizzare il fascio in un punto infinitesimale, ma piuttosto in un'area a forma di cilindro conico rastremato, con un "waist" minimo (raggio w_0) e una divergenza controllata dall'angolo θ_G nel campo lontano. Parametri cruciali indicati nella (2.1) consentono di ottimizzare il fascio per applicazioni come la saldatura, dove la densità di potenza deve essere precisamente controllata per evitare riflessioni eccessive sui materiali metallici.

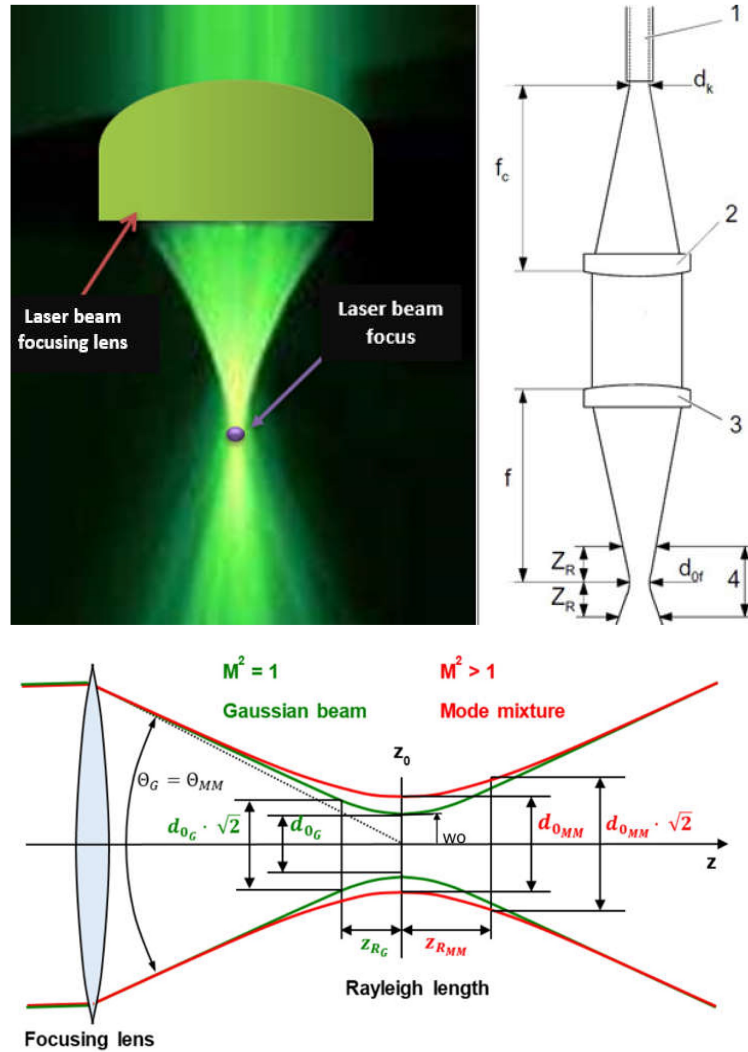


Figura 2.1: Vista del fascio laser focalizzato, in modalità TEM_{00} , dalla lente di focalizzazione sopra la superficie del giunto da saldare, e schemi dei parametri di un fascio laser focalizzato: d_{00} - diametro ideale dello spot focalizzato, θ_G - angolo di deflessione del fascio nel campo lontano, w_0 - raggio della costrizione del fascio laser (diametro del focus d_{OG} o d_{of}), 1 - fascio laser, 2 - collimatore, 3 - lente di focalizzazione, 4 - doppia lunghezza di Rayleigh (profondità di focus), d_k - diametro del nucleo della fibra ottica, f_c - lunghezza focale del collimatore, f - lunghezza focale della lente di focalizzazione, Z_R - lunghezza di Rayleigh.

Immagine estratta da: [1]

Il fascio laser specialmente in modalità TEM_{00} , ha un profilo trasversale descritto da una funzione gaussiana:

$$I(r) = I_0 e^{\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right)}$$

dove w è il raggio del fascio e I_0 l'intensità centrale. Lungo la direzione di propagazione z , il raggio varia come:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

dove w_0 è il raggio minimo al waist (focus) e $Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ è la lunghezza di Rayleigh (profondità di focus). Questa equazione descrive una geometria iperbolica, poiché il contorno del fascio (superficie a intensità costante) forma un iperboloide di rotazione intorno all'asse z . Nei laser moderni per saldatura il focus può essere modellato tramite ottiche avanzate. Queste distribuzioni di energia (TEM multimodali) permettono versatilità, per esempio: circolare per keyhole profondo, rettangolare per melt-in superficiale. In questo lavoro è stata utilizzata una sorgente Corona nLight che permette di sfruttare la forma circolare, anello o la combinazione di queste due.

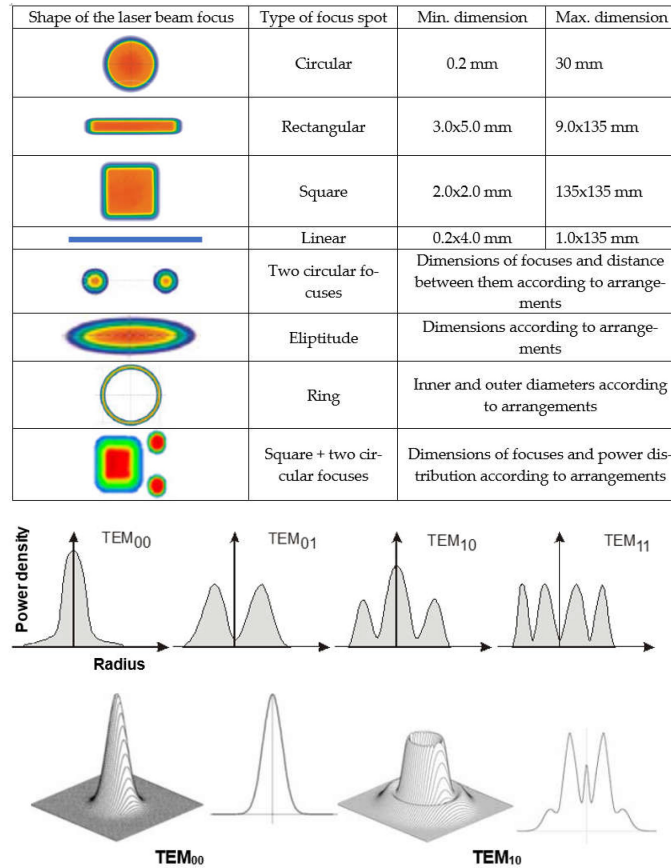


Figura 2.2: Forma dei fasci laser focalizzati con moderni laser allo stato solido e distribuzione della potenza, esempi di distribuzione di energia tipicamente utilizzati.

Immagine estratta da: [\[1\]](#)

La lunghezza d'onda λ del laser è determinata principalmente dal mezzo attivo (es. 10.6 μm per CO2, 1.06 μm per Nd:YAG), ma con laser sintonizzabili può essere regolata. Alcuni metodi sono: utilizzo di prismi o reticoli di diffrazione per selezionare una λ specifica nella cavità ottica; oscillatori parametrici ottici (OPO) che raddoppiano o triplicano λ ; variazione della temperatura o pressione nel mezzo gassoso; o iniezione di corrente in laser a semiconduttore per spostare il bandgap.

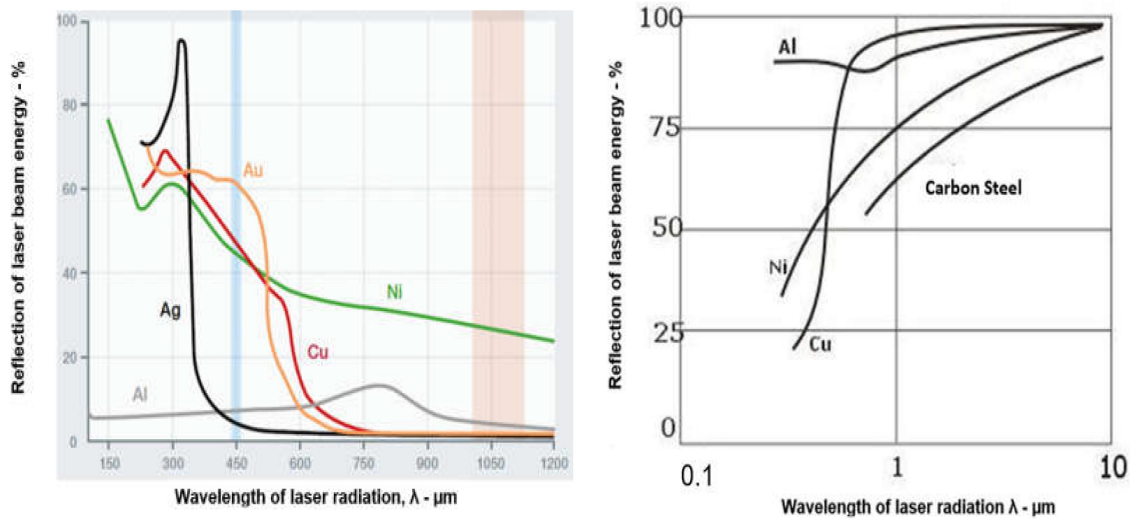


Figura 2.3: Effetti della lunghezza d'onda λ sulla riflessione del fascio laser da parte della superficie di alcuni materiali metallici: Ni, Al, Ag, Au, Cu.

Immagine estratta da: [1]

2.1 Introduzione teorica alle saldature laser

La saldatura è un processo tecnologico fondamentale per unire materiali, prevalentemente metalli o leghe, creando una continuità strutturale e funzionale tra i componenti. Questo processo può essere realizzato attraverso diverse tecniche, ciascuna con caratteristiche specifiche e limitazioni connesse, soprattutto in termini di qualità del giunto, distorsione termica, zona termicamente alterata (ZTA) e applicabilità a materiali difficili. Tra i metodi di saldatura tradizionale, si annoverano la saldatura ossiacetilenica, che utilizza una fiamma generata dalla combustione di ossigeno e acetilene per fondere i materiali, e la saldatura ad arco elettrico, come la saldatura ad elettrodo rivestito (MMA), a gas inerte (TIG) o a gas attivo (MIG/MAG), che sfrutta un arco elettrico per generare il calore necessario alla fusione. Questi metodi, sebbene ampiamente utilizzati, presentano problematiche, come un'ampia HAZ, deformazioni residue, necessità di preparazione complessa dei giunti e difficoltà nella saldatura di materiali ad alta riflettività o con scarsa saldabilità, come alluminio, magnesio o leghe di rame. In questo contesto, la saldatura laser si distingue come una tecnologia avanzata, capace di superare molte di queste limitazioni grazie alla sua precisione, efficienza e versatilità, come illustrato nel seguito di questo capitolo. Con il termine Saldatura si intende un processo di unione metallurgica in cui due lembi di materiale si fondono, dando origine al cordone di saldatura. I materiali coinvolti, denominati materiali base, presentano generalmente una composizione chimica molto simile, se non identica. Alla formazione del cordone può contribuire anche un ulteriore elemento, noto come materiale di apporto, che possiede una composizione chimica affine a quella del materiale base. Il giunto risultante dalla saldatura si configura come un continuum sia dal punto di vista fisico che chimico, garantendo un'elevata resistenza strutturale.

La Brasatura, al contrario, è un processo di unione in cui solo il materiale di apporto si fonde, realizzando il legame tra i due lembi senza sciogliere i materiali base. In questo caso, il materiale di apporto deve necessariamente differire dal materiale base, poiché richiede una temperatura di fusione inferiore. Il giunto ottenuto tramite brasatura presenta proprietà meccaniche inferiori rispetto a quelle di un giunto saldato, ma offre il vantaggio di consentire l'unione di materiali che non risultano idonei alla saldatura, ampliando così le possibilità applicative.

La Saldabilità è una proprietà tecnologica dei materiali, è definita come l'attitudine con cui un materiale si presta a realizzare unioni saldate effettuate con i procedimenti sopra elencati. Non è una misura assoluta, nel senso che il materiale in esame può essere più saldabile o meno in funzione della tecnologia di saldatura che si utilizza. La saldabilità riguarda principalmente Fattori metallurgici: che considerano la struttura metallurgica del giunto, ad esempio se esso è troppo fragile o più soggetto alla corrosione allora la saldabilità è bassa; e Fattori costruttivi: che considerano le caratteristiche meccaniche del giunto, che non deve compromettere la sicurezza della struttura. In molti casi la saldatura laser rende saldabili anche materiali che con le altre tecnologie non si prestano a questo tipo di processo.

Il ciclo termico nella saldatura laser descrive l'evoluzione temporale della temperatura nei materiali durante il processo, determinando le trasformazioni strutturali e le zone che si formano nel giunto saldato. Durante la saldatura i materiali subiscono

un riscaldamento che li porta a fusione, una permanenza ad alta temperatura e di seguito un raffreddamento. Il ciclo termico si determina in funzione della temperatura massima raggiunta, del tempo di permanenza e dalla velocità di raffreddamento (2.4).

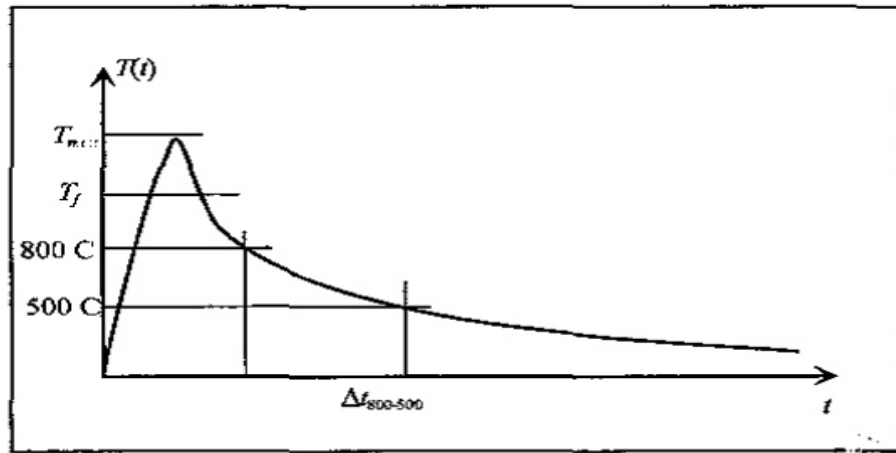


Figura 2.4: Andamento qualitativo del ciclo termico subito dal materiale durante una saldatura.

Immagine estratta da: [2]

Questo ciclo termico subito dal giunto durante il processo di saldatura rappresenta un fattore determinante per le sue caratteristiche meccaniche e metallurgiche, caratterizzato da gradienti di temperatura elevati e variazioni temporali rapide, induce trasformazioni microstrutturali nella zona fusa (ZF) e nella zona termicamente alterata (ZTA) adiacente. Ad esempio, nei materiali ferrosi, il rapido raffreddamento può portare alla formazione di strutture martensitiche o bainitiche, che influenzano la durezza e la fragilità del giunto. La severità del ciclo termico dipende da diversi parametri, tra cui la tecnica di saldatura utilizzata, l'energia di apporto, la velocità di saldatura e le proprietà termofisiche del materiale. Questi fattori determinano l'estensione della ZTA, il grado di distorsione e la presenza di tensioni residue, che a loro volta influiscono sulla resistenza meccanica, la tenacità e la resistenza a fatica del giunto.

La Zona Fusa (ZF) è l'area del giunto saldato in cui il materiale, sia quello base che, eventualmente, il materiale d'apporto, ha raggiunto lo stato liquido durante il processo di saldatura, per poi risolidificarsi al termine del ciclo termico. Questa regione è caratterizzata da una microstruttura distinta rispetto al materiale base e alla zona termicamente alterata (ZTA), a causa delle trasformazioni metallurgiche indotte dal riscaldamento e dal raffreddamento rapido. Un parametro fondamentale per descrivere la ZF è il rapporto di diluizione, definito come il rapporto percentuale tra il volume di metallo base fuso e il volume totale della zona fusa. Questo parametro quantifica la proporzione di materiale base che contribuisce alla composizione della ZF rispetto al materiale d'apporto, influenzando direttamente le proprietà meccaniche e metallurgiche del giunto, come la resistenza, la durezza e la suscettibilità alla formazione di cricche.

$$R_d = \frac{V_{mb}}{V_{ZF}} \cdot 100$$

La Zona Termicamente Alterata (ZTA) è la regione del materiale base adiacente alla zona fusa (ZF) che, pur non raggiungendo lo stato liquido durante il processo di saldatura, subisce un significativo apporto termico a causa del ciclo termico. Questo riscaldamento, seguito da un raffreddamento più o meno rapido, provoca modifiche nella microstruttura cristallina del materiale, senza alterarne lo stato fisico. Le trasformazioni microstrutturali nella ZTA dipendono fortemente dalla composizione chimica del materiale, dalla temperatura massima raggiunta e dalla velocità di raffreddamento. Ad esempio, nei materiali ferrosi, si possono osservare fenomeni come la precipitazione di carburi metallici, la formazione di fasi cristalline come la martensite o la bainite, o la ricristallizzazione della struttura ferritica, che influenzano direttamente le proprietà meccaniche del giunto, come la durezza, la tenacità e la resistenza alla fatica. Queste variazioni microstrutturali sono particolarmente rilevanti nelle saldature tradizionali, come la saldatura ad arco, dove il ciclo termico è meno controllato rispetto alla saldatura laser, oggetto di questa tesi, in cui l'alta densità di energia riduce l'estensione della ZTA e le sue alterazioni.

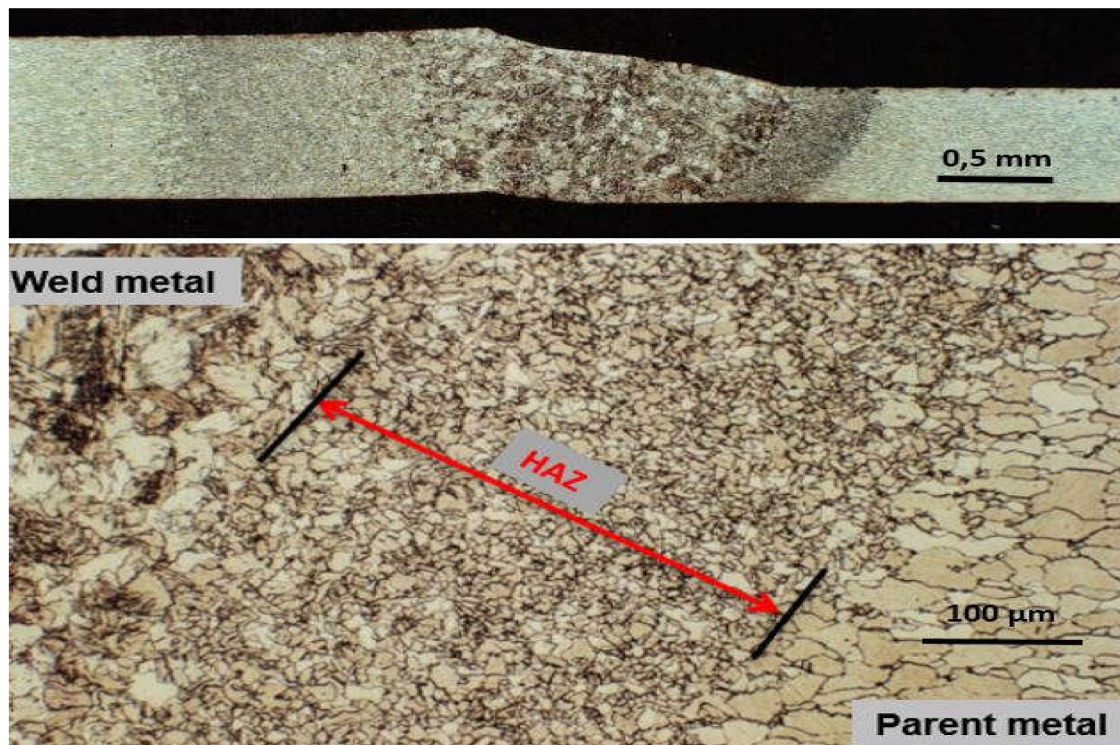


Figura 2.5: Foto di Zona Fusa (Weld metal) e Zona Termicamente Alterata (HAZ).
Immagine estratta da: [1]

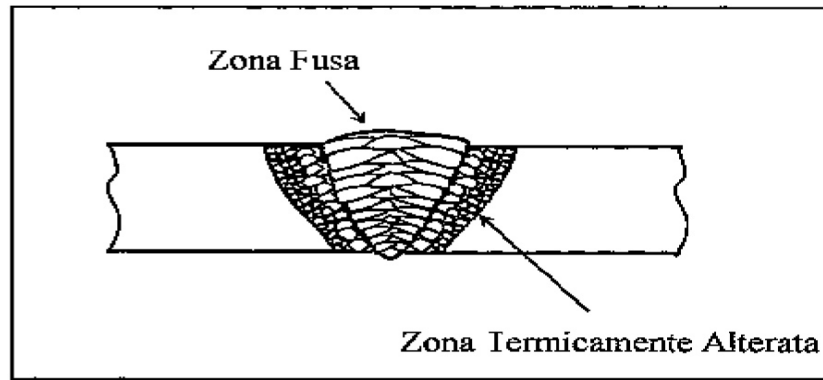


Figura 2.6: Disegno schematico di Zona Fusa (ZF) e Zona Termicamente Alterata (ZTA).

Immagine estratta da: [2]

I difetti delle saldature rappresentano un aspetto critico nei processi di saldatura tradizionali, in quanto possono compromettere l'integrità strutturale e le proprietà meccaniche del giunto. Tra i difetti più comuni si annoverano le porosità, causate dall'intrappolamento di gas nella zona fusa durante la solidificazione, spesso dovute a contaminazioni o a un raffreddamento troppo rapido; le cricche, che possono formarsi per tensioni residue o per la presenza di fasi fragili nella zona termicamente alterata (ZTA); le inclusioni non metalliche, come scorie derivanti da elettrodi o flussi; e le imperfezioni geometriche, quali sovrapposizioni o sottosquadri, che alterano la resistenza meccanica del giunto. Questi difetti dipendono da parametri di processo, come l'energia di apporto, la velocità di saldatura e la preparazione del giunto, oltre che dalla qualità dei materiali utilizzati. Nelle saldature tradizionali, come la saldatura ad arco o a gas, il controllo di questi difetti è più complesso rispetto alla saldatura laser.

Possiamo fare distinzione tra Pezzi Tozzi e Pezzi Snelli, i primi sono più soggetti alla generazione di tensioni residue, mentre la deformazione è generalmente limitata grazie allo spessore rilevante del materiale; nel secondo caso invece si osserva un comportamento opposto, vi è la presenza di grandi deformazioni ma con limitate tensioni residue.

La composizione dell'atmosfera di lavoro, ovvero la miscela di gas presente durante il processo di saldatura, riveste un ruolo fondamentale nel determinare la qualità e l'integrità del giunto saldato. Questo perché la maggior parte dei materiali metallici portati ad alta temperatura subisce alterazioni chimiche da parte dei gas che compongono l'atmosfera, in particolare Ossigeno, Azoto e Idrogeno.

L'Ossigeno, in quanto potente agente ossidante, promuove reazioni di ossidazione favorite dalle elevate temperature raggiunte durante il processo di saldatura, portando alla potenziale ossidazione del materiale esposto.

L'Azoto invece ha una solubilità che aumenta all'aumentare della temperatura nei materiali metallici, quindi tende a legarsi facilmente al materiale base durante il processo di saldatura, formando nitruri o altre strutture particolari che in generale sono molto fragili.

L'Idrogeno, pur non reagendo chimicamente con i materiali metallici, favorisce la

formazione di porosità e l'insorgenza di cricche a freddo nel giunto saldato.

Le cricche rappresentano uno dei difetti più critici nei giunti saldati, in quanto possono compromettere gravemente l'integrità strutturale e la resistenza meccanica del componente. Si distinguono principalmente in cricche a caldo e cricche a freddo, in base al momento del ciclo termico in cui si formano.

Le cricche a caldo si verificano durante la solidificazione della zona fusa (ZF) o subito dopo, a temperature elevate, a causa di tensioni residue indotte dal ritiro del materiale e dalla presenza di fasi fragili o segregazioni chimiche, come inclusioni di zolfo o fosforo nei materiali ferrosi. Queste cricche sono spesso intergranulari e si formano nella ZF o al confine con la zona termicamente alterata (ZTA).

Le cricche a freddo, invece, si sviluppano a temperature più basse, generalmente dopo il completo raffreddamento del giunto, e sono tipicamente associate alla formazione di microstrutture fragili, come la martensite, o all'accumulo di idrogeno disciolto nel metallo, che può causare fragilità indotta (hydrogen embrittlement). Nelle saldature tradizionali, come la saldatura ad arco, le cricche a caldo sono più frequenti a causa dei cicli termici meno controllati.

Le incisioni marginali, note anche come sottosquadri, sono difetti geometrici che si manifestano lungo i bordi del giunto saldato, dove il materiale base adiacente alla zona fusa (ZF) presenta una riduzione localizzata di spessore. Questi difetti derivano spesso da un'eccessiva fusione del metallo base o da una scorretta impostazione dei parametri di saldatura, come un angolo improprio della torcia o un apporto energetico troppo elevato. Le incisioni marginali compromettono la resistenza meccanica del giunto, creando concentrazioni di tensione che possono favorire l'innesco di cricche, specialmente sotto sollecitazioni a fatica.

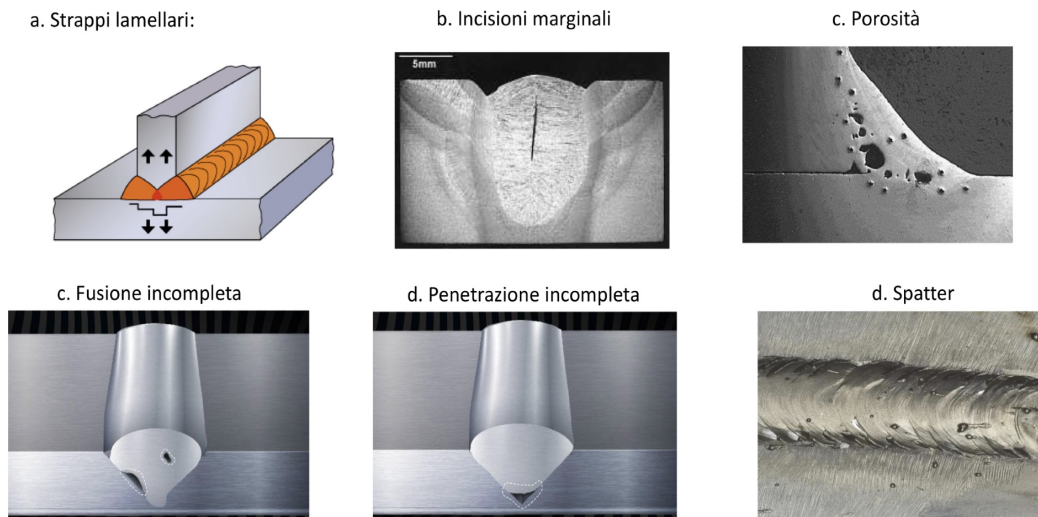


Figura 2.7: Sono illustrati alcuni dei difetti precedentemente descritti, come cricche, porosità e incisioni marginali, evidenziando il loro impatto sull'integrità del giunto saldato.

Immagine estratta da: [3]

Dopo aver analizzato le tecniche di saldatura tradizionale, come la saldatura ossiacetilenica e ad arco elettrico, che presentano le limitazioni sopra elencate, emerge la necessità di approcci innovativi. La saldatura laser, una tecnologia avanzata basata sull'uso di un fascio di luce coerente ad alta densità di potenza, si pone come soluzione ideale per superare tali svantaggi. Grazie alla sua capacità di concentrare l'energia in un'area ristretta (fino a $10^6 - 10^9 \text{ W/mm}^2$). Per fare un confronto la saldatura ossiacetilenica, ad esempio, opera con una densità di potenza tipica dell'ordine di $10^2 - 10^3 \text{ W/mm}^2$ limitata dalla diffusione termica della fiamma, mentre la saldatura ad arco elettrico raggiunge al massimo $10^3 - 10^4 \text{ W/mm}^2$, influenzata dalla dispersione dell'arco. La tecnologia laser consente un riscaldamento e un raffreddamento rapidi, riducendo la zona termicamente alterata (ZTA) e le tensioni residue, e si adatta efficacemente alla saldatura automatica o robotizzata di strutture di alta qualità. La versatilità della saldatura laser, applicabile a materiali diversi quali acciai, titanio, leghe di nichel e alluminio, la rende una scelta strategica nell'industria moderna, come illustrato dagli studi recenti e dalle applicazioni pratiche descritte nella letteratura tecnica.

Per valutare gli aspetti energetici della saldatura laser dobbiamo considerare la seguente equazione:

$$\frac{Pi}{h \cdot b \cdot v} = \text{costante}$$

dove Pi è la potenza del fascio incidente, h e b sono rispettivamente la profondità e la larghezza del cordone ottenuto, mentre v è la velocità di avanzamento. Occorre considerare che nella saldatura laser i meccanismi coinvolti sono molto complessi di conseguenza le equazioni che modellano questo processo sono decisamente più articolate, tuttavia la precedente è comunque utile per fornirci un'indicazione di massima.

La saldatura laser si articola principalmente in due modalità operative: la saldatura per profonda penetrazione (keyhole mode) e la saldatura per conduzione (melt-in mode), sebbene quest'ultima non costituisca l'oggetto principale di questa tesi. La modalità per conduzione, con densità inferiori ($< 10^3 \text{ W/mm}^2$), si limita a una fusione superficiale per diffusione termica. Risulta quindi simile alle tecniche di saldatura tradizionali, il fascio laser riscalda il materiale fino a fusione, una volta generata la pozza di metallo fuso il fascio laser si muoverà relativamente al pezzo trasportando la pozza di materiale fuso. In questa modalità il laser può essere comparato con una fonte di calore puntiforme.

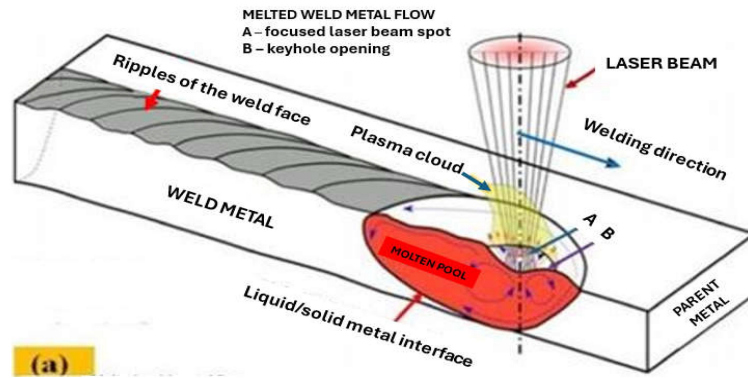


Figura 2.8: Disegno schematico del funzionamento della saldatura per conduzione.
Immagine estratta da: [1]

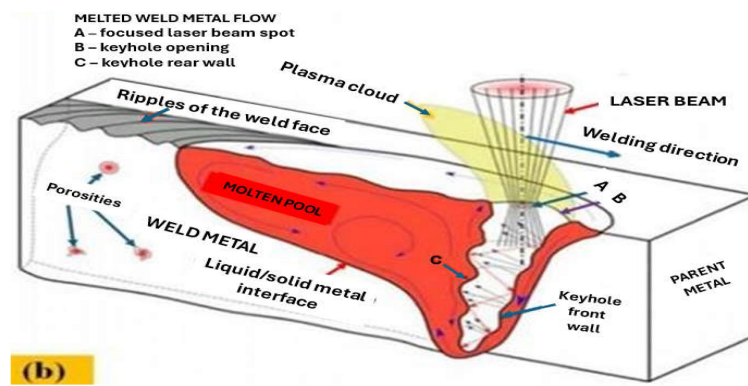


Figura 2.9: Disegno schematico del funzionamento della saldatura per Keyhole.
Immagine estratta da: [1]

La modalità per profonda penetrazione, caratterizzata da densità di potenza elevate ($> 10^4 \text{ W/mm}^2$). Tale potenza ci garantisce che il materiale venga vaporizzato; la vaporizzazione del metallo genera un canale di vapore di dimensioni micrometriche che consente penetrazioni profonde. Il meccanismo alla base della formazione del keyhole nella saldatura laser si fonda sull'immediata vaporizzazione del materiale esposto al fascio, che, a causa dell'espansione rapida dei vapori, si allontana rapidamente dalla zona irradiata, permettendo al fascio di penetrare più in profondità. Inizialmente, la vaporizzazione dello strato superficiale consente al laser di raggiungere direttamente il materiale sottostante, innescando un ulteriore processo di evaporazione. Questo ciclo iterativo porta alla creazione quasi istantanea di un canale stretto e profondo, noto come keyhole. All'interno di questo canale, il vapore metallico assorbe l'energia del fascio laser, riscaldandosi fino a ionizzarsi e trasformarsi in plasma. Il keyhole presenta un diametro dell'ordine dei decimi di millimetro, mentre la sua lunghezza corrisponde allo spessore del materiale da saldare, tipicamente nell'ordine dei millimetri. Durante il movimento relativo tra il fascio e il pezzo, si stabilisce un equilibrio dinamico: il materiale, avvicinandosi alla zona irradiata, subisce riscaldamento, fusione e vaporizzazione, generando una pressione elevata all'interno del canale di plasma che ne impedisce il collasso sotto la pressione del materiale fuso sulle pareti. Una parte del plasma fuoriesce dal keyhole, allontanandosi dalla zona di lavoro, mentre il materiale alle spalle del canale si solidifica

rapidamente, formando il cordone di saldatura. La presenza del canale di plasma gioca un ruolo cruciale nell'aumentare la penetrazione della saldatura: il fascio laser viene assorbito dal plasma all'interno del canale, che a sua volta trasferisce il calore alle pareti circostanti. Diversamente dalla saldatura per conduzione, dove il calore agisce prevalentemente in superficie, in questo caso l'assorbimento avviene in profondità, determinando un cordone di saldatura particolarmente profondo e stretto. Questa caratteristica, come verrà esaminato più avanti, contribuisce significativamente alla qualità elevata del giunto saldato.

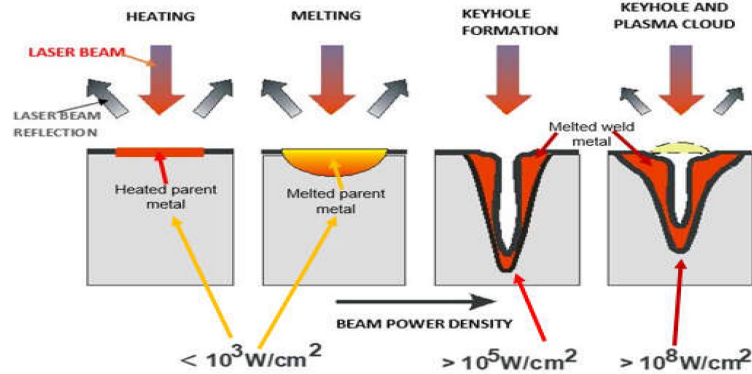


Figura 2.10: Visualizzazione grafica della pozza al variare della potenza del fascio laser.

Immagine estratta da: [1]

Grazie all'impiego del laser, è possibile saldare una vasta varietà di geometrie (2.11). Tra queste, è opportuno sottolineare la saldatura per trasparenza, tecnica adottata per il presente lavoro di tesi. Questa modalità, difficilmente realizzabile con altre tecnologie, permette di unire due pezzi sovrapposti, anche quando uno di essi non è direttamente raggiungibile. Tale approccio risulta particolarmente vantaggioso in ambito industriale, ad esempio nella saldatura di coperchi, poiché consente di assemblare i componenti preliminarmente e saldarli in un secondo momento, ottimizzando così il processo produttivo e riducendone i tempi.

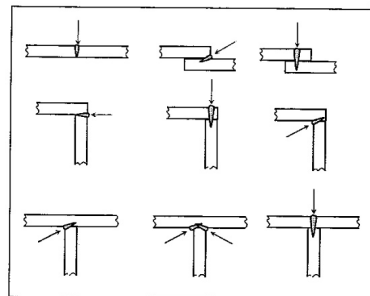


Figura 2.11: Geometrie saldabili con la tecnologia laser, in alto e in basso a destra si possono notare le saldature per trasparenza.

Immagine estratta da: [2]

Le sorgenti laser rappresentano un elemento fondamentale nel processo di saldatura, influenzando significativamente sulla qualità, l'efficienza e l'adattabilità a diverse applicazioni industriali. Tra le tecnologie storiche, si annoverano le sorgenti a CO₂, che operavano a una lunghezza d'onda di 10.6 μm e erano apprezzate per la loro elevata potenza, rendendole adatte alla saldatura di materiali metallici spessi grazie alla distribuzione uniforme dell'energia su ampie superfici. Allo stesso modo, i laser Nd:YAG (YAG, dall'inglese Yttrium Aluminum Garnet) drogato con ioni di neodimio (Nd), con una lunghezza d'onda di 1.06 μm , si distinguevano per la loro precisione e alta efficienza energetica, ideali per lavorazioni dettagliate su metalli e leghe, oltre che per l'integrazione in sistemi robotizzati. I diodi laser, un tempo considerati per la loro compattezza e versatilità, trovavano applicazione in processi a bassa potenza o in combinazione con altre sorgenti. Tuttavia, al giorno d'oggi tali tecnologie sono state ampiamente superate. Sostituite da sorgenti nel vicino infrarosso (circa 1.07 μm), prevalentemente a fibra, che offrono maggiore efficienza, stabilità e adattabilità. Queste differenze riguardano non solo le proprietà ottiche, ma anche la gestione del calore e l'interazione con i materiali, incidendo su profondità di penetrazione e dimensione della zona termicamente alterata. Nel contesto di questo lavoro di tesi, è stata scelta una sorgente laser Corona Nlight, un sistema moderno a stato solido basato su fibra ottica, caratterizzato da un'elevata densità di potenza e un'eccezionale stabilità termica, in linea con le tecnologie di ultima generazione.

Le sorgenti laser a fibra ottica, come quella utilizzata in questo studio, operano basandosi su un sistema in cui la luce laser viene generata da diodi di pompaggio che eccitano un mezzo attivo, tipicamente una fibra di quarzo drogata con elementi come itterbio (Yb) o erbio (Er), con una lunghezza d'onda nel vicino infrarosso (in questo caso 1.071 μm). La fibra, rivestita da un cladding ottico, che è un rivestimento di materiale con indice di rifrazione leggermente inferiore che circonda il core, questo guida e amplifica la luce attraverso riflessioni interne totali, garantendo un'elevata efficienza di conversione energetica e una distribuzione del fascio altamente direzionale. Questo design permette una trasmissione dell'energia senza perdite significative attraverso cavi flessibili, facilitando l'integrazione in sistemi robotizzati o teste di saldatura, mentre la stabilità termica e la densità di potenza elevata (fino a 5150 kW per questo laser) rendono tali sorgenti ideali per applicazioni di saldatura di precisione su metalli, come quelli analizzati in questa tesi.

I parametri di processo nella saldatura laser giocano un ruolo cruciale nel determinare la qualità del giunto, la profondità di penetrazione, la larghezza della zona termicamente alterata (ZTA) e l'efficienza complessiva del processo, sia in modalità melt-in che keyhole. Tra questi, la velocità di saldatura rappresenta un fattore primario, influenzando direttamente il tempo di esposizione del materiale al fascio laser e, di conseguenza, il trasferimento di calore; una velocità elevata, tipicamente compresa tra 1 e 10 m/min a seconda del materiale e della potenza, riduce l'input termico, minimizzando deformazioni e ZTA stretta, ma rischia di causare porosità o mancanza di fusione se non bilanciata con la potenza del laser, velocità eccessive

portano a giunti instabili; al contrario, velocità più basse favoriscono una penetrazione profonda ma aumentano il rischio di evaporazione eccessiva e tensioni residue, richiedendo un'ottimizzazione basata sul tipo di giunto e sul materiale.

Passando all'irradianza, o densità di potenza del fascio laser, questo parametro definisce il regime di saldatura: valori inferiori a circa 10^3 W/mm^2 promuovono la modalità melt-in per fusione superficiale attraverso conduzione termica, ideali per spessori sottili e materiali reattivi, mentre irradianze superiori a 10^4 W/mm^2 attivano la modalità keyhole con evaporazione e formazione di un canale di plasma, consentendo penetrazioni fino a 20 mm o più in acciai e leghe, ma con soglie critiche che variano per materiale, ad esempio, $1.5 \times 10^3 \text{ W/mm}^2$ per acciai al carbonio e $1.5 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ per alluminio, influenzando l'assorbimento dell'energia, che sale al 90% oltre tali limiti, e determinando la forma del cordone, con rischi di instabilità se l'irradianza è mal calibrata.

L'altezza del fuoco, ovvero la posizione del focus del fascio rispetto alla superficie del giunto, è un altro elemento chiave che altera la distribuzione dell'energia: un focus sopra la superficie (positivo) favorisce una diffusione più ampia per saldature superficiali, riducendo il rischio di perforazioni indesiderate, mentre un focus sotto la superficie (negativo) concentra l'energia in profondità per una migliore penetrazione in modalità keyhole, con la lunghezza di Rayleigh che definisce la profondità di campo e influenza la stabilità del processo; regolazioni precise, spesso nell'ordine di millimetri, sono essenziali per evitare difetti come undercut o spatter, e i sistemi ottici moderni permettono forme del focus variabili (circolare, rettangolare o ellittico) per adattarsi a geometrie complesse. Riguardo al tipo e alla portata del gas di protezione, questi parametri assicurano la schermatura del bagno di fusione da contaminazioni atmosferiche, con gas inerti come argon o elio preferiti per materiali reattivi come titanio e alluminio, dove una portata troppo bassa (inferiore a 10-15 l/min) può causare ossidazione e porosità, mentre portate eccessive (oltre 30 l/min) potrebbero raffreddare eccessivamente il giunto, alterando la microstruttura; in processi ibridi laser-GMA, il gas attivo come CO_2 o miscele argon- CO_2 influenza la stabilità dell'arco e la qualità del cordone, con ottimizzazioni che bilanciano protezione e penetrazione per ridurre difetti come inclusioni gassose. Infine, il materiale d'apporto, utilizzato principalmente in saldature ibride o con filler, modula la composizione chimica del giunto per migliorare proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione; la scelta di fili con composizione simile al materiale base, come in acciai inossidabili o leghe di nichel, e la regolazione della velocità di avanzamento del filler (tipicamente 1-5 m/min) influenzano la diluizione e la forma del cordone, riducendo rischi di cricche in materiali dissimili.

2.2 Sorgente Corona e Parametri

La sorgente laser Corona™ nLIGHT rappresenta una tecnologia all'avanguardia nel campo della saldatura laser, sviluppata da nLIGHT come un sistema a fibra ottica a stato solido che integra innovazioni come la tecnologia Corona™ per la regolazione rapida e programmabile della qualità del fascio, consentendo di adattare dimensioni, forma e divergenza del fascio direttamente dall'uscita della fibra senza l'uso di ottiche esterne complesse, garantendo così affidabilità, efficienza energetica superiore al 40% e una potenza scalabile da 3 kW fino a 15 kW, nel caso di questo studio una potenza massima di 5150 W, ideale per applicazioni industriali ad alta produttività come il taglio e la saldatura di metalli riflettenti (alluminio, rame, titanio) o spessori variabili. Questa sorgente, con lunghezza d'onda tipica intorno a $1.064\ \mu\text{m}$, offre una protezione integrata contro la riflessione retroattiva hardware-based, prevenendo danni durante la lavorazione di materiali ad alta riflettività, con tempi di switching inferiori a 30 ms per ottimizzazioni in tempo reale, riducendo tempi di setup e costi operativi rispetto a sorgenti tradizionali come CO₂ o Nd:YAG. Nel contesto di questo lavoro di tesi, la Corona Nlight è stata impiegata per la saldatura per trasparenza su componenti sovrapposti in alluminio, con condizioni operative ottimizzate a potenze di 1-5 kW, velocità di saldatura tra 100-175 mm/s, con l'obiettivo di raggiungere una larghezza di interfaccia tra 1,5-2 mm; è stata utilizzato un range ampio di parametri con l'ottica di trovare la combinazione migliore per saldare gli spessori in esame, l'obiettivo era di simulare l'assemblaggio di coperchi con un grande gap tra le 2 lamiere, migliorando la resistenza meccanica e la produttività del processo. La geometria del fascio della Corona™ nLIGHT, regolabile in tempo reale tramite design all-fiber, si distingue per la versatilità: dal spot piccolo e ad alta intensità (diametro $100\ \mu\text{m}$ per fusione precisa) al profilo ad anello (diametro 200-350 μm per distribuzione uniforme su aree estese), con divergenza controllata dalla lunghezza di Rayleigh (tipicamente 1-5 mm) per mantenere focalizzazione stabile su distanze operative, evitando spatter o undercut; questa adattabilità, conferma l'efficacia della sorgente per applicazioni di classe EXC3-4 in ambienti robotizzati.

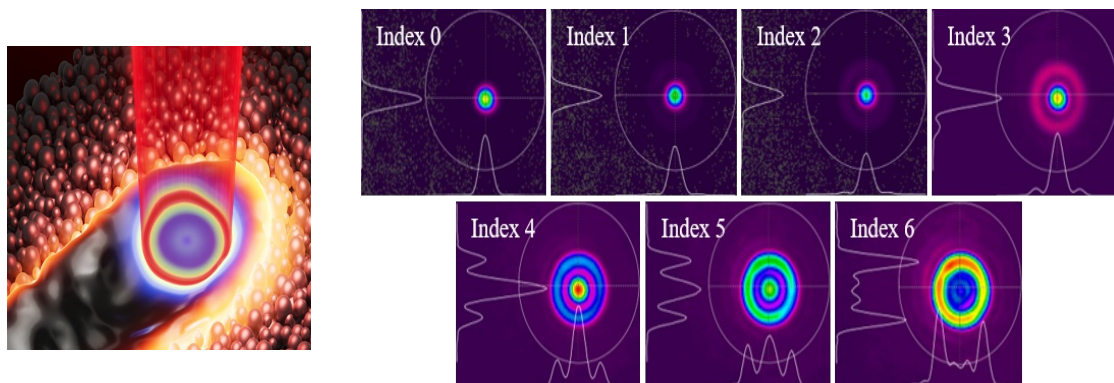


Figura 2.12: Rappresentazione grafica di una saldatura laser e i 7 indici al variare della curva di potenza. Immagini estratta da: [6]

Nel contesto della saldatura laser, la potenza per unità di superficie di un laser è denominata densità di potenza o irradianza e viene misurata in $[\text{W}/\text{cm}^2]$ o $[\text{W}/\text{mm}^2]$, rappresentando un parametro fondamentale per comprendere l'interazione tra il fascio laser e il materiale. La formula generale per calcolarla è:

$$\text{Irradianza} = \frac{P}{A}$$

dove P indica la potenza totale del laser (in Watt) e A rappresenta l'area del fascio sulla superficie target (in mm^2), tipicamente determinata dalla geometria del fascio, come un cerchio di raggio r (con $A = \pi r^2$).

Per fare considerazioni più complesse, è essenziale tenere presente che l'irradianza di un fascio laser non è uniforme, ma segue un profilo gaussiano, descritto dalla formula:

$$I(r) = I_0 e^{-2r^2/w^2}$$

dove I_0 è l'irradianza massima al centro, r è la distanza radiale dal centro e w è il raggio del fascio a $1/e^2$ dell'intensità massima, riflettendo la distribuzione concentrata tipica dei laser in modalità single-mode.

Per i profili ad anello, invece, la distribuzione si modifica, e una formula generale può essere rappresentata come:

$$I(r) = I_0 \left(1 - e^{-r^2/w^2}\right) e^{-(r-r_0)^2/(2\sigma^2)}$$

dove r_0 è il raggio dell'anello esterno e σ ne controlla la larghezza, adattandosi a configurazioni multimodali come quelle ottenibili con sorgenti come la CoronaTM nLight. I valori di irradianza sono particolarmente utili per differenziare i regimi di saldatura, distinguendo tra modalità melt-in, basata sulla conduzione termica, e modalità keyhole, caratterizzata dall'evaporazione e dalla formazione di un canale di plasma. In base ai parametri di processo selezionati, quali potenza, velocità e dimensioni del fascio, è possibile ottenere diverse combinazioni tra questi due regimi, oltre a generare gradienti di potenza variabili che influenzano la profondità di penetrazione e la larghezza della zona termicamente alterata (ZTA). Specificamente, valori di irradianza inferiori a $10^3 \text{ W}/\text{mm}^2$ favoriscono la conduzione termica, mentre valori superiori a $10^4 \text{ W}/\text{mm}^2$ attivano il regime keyhole, consentendo penetrazioni profonde fino a 20 mm o più, come discusso nei capitoli precedenti, con soglie che dipendono anche dal materiale e dalle condizioni ottiche del processo.

Queste distribuzioni di potenza possono essere rappresentate tridimensionalmente per esempio usando Python (2.13). La distribuzione della potenza nei fasci laser, come quella gaussiana o ad anello, deriva dalla natura fisica del processo di amplificazione ottica e dalla propagazione della luce all'interno del mezzo attivo. Nei laser a stato solido, come quelli a fibra ottica come il CoronaTM nLIGHT, la potenza si concentra in una distribuzione gaussiana a causa della modalità fondamentale TEM_{00} , dove gli ioni eccitati emettono fotoni che interferiscono costruttivamente al centro del fascio, decrescendo esponenzialmente verso l'esterno per la diffrazione naturale della luce; questa configurazione massimizza l'intensità nel punto focale, ottimizzando la penetrazione in modalità keyhole. Le distribuzioni ad anello, invece, emergono

da configurazioni multimodali o da manipolazioni ottiche (es. tramite fibre apposite), dove l'energia viene redistribuita per creare zone di intensità periferica, utile per fusioni uniformi su spessori maggiori; tali profili sono il risultato di modalità superiori TEM che interferiscono, alterando la simmetria gaussiana e adattandosi a geometrie complesse, riflettendo l'interazione tra il design della cavità laser e le proprietà del mezzo di propagazione.

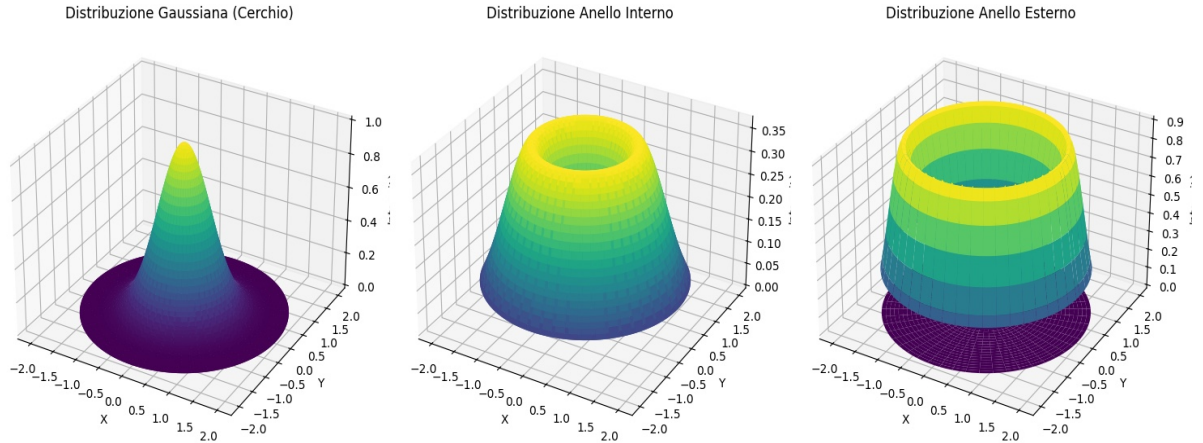


Figura 2.13: Da sinistra a destra, questa figura mostra tre distribuzioni tridimensionali della potenza del fascio laser: a sinistra una tipica distribuzione gaussiana, caratterizzata da un picco centrale simmetrico; al centro una configurazione multi-modale con il massimo di intensità disposto a forma di anello interno, derivante da modalità TEM superiori; a destra una distribuzione con il picco di potenza spostato verso un anello esterno, ottenuta attraverso una regolazione ottica avanzata. Tali profili riflettono l'adattabilità delle sorgenti laser, come la Corona Nlight, nella saldatura di geometrie complesse.

Nel contesto di un laser di questa tipologia, capace di suddividere la potenza in diverse aree del fascio, come nel caso della sorgente Corona™ nLight, risulta poco significativo calcolare una distribuzione di potenza standard uniforme. Piuttosto, è più opportuno effettuare considerazioni specifiche sulle irradianze associate ai diversi indici o configurazioni del fascio, valutando separatamente l'irradianza di ciascuna regione (ad esempio, il cerchio centrale e l'anello esterno) in funzione della potenza allocata e dell'area corrispondente, al fine di ottimizzare l'analisi del processo di saldatura.

3

Materiali, strumenti e procedure

In questo capitolo procederò con un'analisi dettagliata dei materiali, delle strumentazioni e delle procedure adottate durante la fase sperimentale di questa tesi, con l'obiettivo di fornire una base solida per comprendere i risultati ottenuti e le implicazioni pratiche del lavoro svolto. L'approccio sperimentale rappresenta un elemento centrale della ricerca condotta, poiché consente di validare teoricamente le tecniche di saldatura laser attraverso un percorso pratico che integra osservazioni dirette e misurazioni quantitative, offrendo così un contributo originale al campo della lavorazione dei materiali avanzati. Nei sottocapitoli successivi, esplorerò in maniera approfondita ciascun aspetto, includendo descrizioni tecniche, metodologie operative e analisi dei dati raccolti, al fine di garantire una trattazione completa e strutturata che supporti le conclusioni finali della tesi. I materiali selezionati per questa fase includono l'alluminio della serie 5754, noto per la sua resistenza alla corrosione e la lavorabilità, e la lega AlSi10MgMn stampata in 3D, apprezzata per le sue proprietà meccaniche e la versatilità in applicazioni additive. L'esperimento si è focalizzato sulla simulazione della saldatura laser per trasparenza di due parti di lamiera, progettata per replicare le condizioni di unione di un coperchio realizzato con il primo materiale laminato, caratterizzato da un significativo gap tra le lamiere; tale scelta è stata motivata dall'intento di individuare la combinazione ottimale dei parametri di saldatura, con l'obiettivo ultimo di ottimizzare il processo produttivo, riducendo difetti e migliorando l'efficienza industriale. Per la preparazione dei provini, sono stati realizzati 40 campioni, ciascuno saldato con parametri differenti, successivamente tagliati mediante elettroerosione (EDM), incapsulati in resina epossidica per la stabilizzazione, lucidati con cura per evidenziare le caratteristiche dei giunti e analizzati attraverso osservazioni microscopiche; a questi si sono aggiunti test di durezza volti a valutare la resistenza meccanica e l'integrità strutturale dei saldati, fornendo dati cruciali per l'ottimizzazione del processo.

3.1 Materiali dei provini

La lega di alluminio 5754, appartenente alla serie 5000 e caratterizzata dalla presenza di magnesio come principale elemento di lega (circa 2,6-3,6%), è ampiamente utilizzata nella forma laminata per le sue eccellenti proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione. Questa lega offre una buona resistenza alla trazione, tipicamente

compresa tra 190 e 240 MPa, e una notevole duttilità, con un allungamento che può superare il 15%, rendendola ideale per lavorazioni a freddo e deformazioni plastiche. Il processo di laminazione, che prevede il passaggio del metallo tra rulli a temperature controllate (spesso a caldo per ridurre la resistenza e a freddo per migliorare la finitura superficiale), conferisce alla lega una struttura cristallina uniforme e una superficie liscia, ottimizzando le sue prestazioni in ambienti aggressivi come quelli marini o industriali. Tra le applicazioni industriali spiccano la costruzione di serbatoi per carburante, pannelli per veicoli leggeri e strutture navali, dove la combinazione di leggerezza, resistenza e saldatura facile (inclusa la saldatura laser per trasparenza) ne fa una scelta strategica per ridurre i pesi senza compromettere la sicurezza strutturale.

La lega AlSi10MgMn, ottimizzata per la produzione additiva tramite stampa 3D, rappresenta un'evoluzione significativa nel campo dei materiali metallici, grazie alla sua composizione che include alluminio (circa 85-90%), silicio (10%), magnesio (0,3-0,6%) e manganese, progettata per migliorare le proprietà meccaniche e la lavorabilità con tecnologie come la fusione a letto di polvere (LPBF - Laser Powder Bed Fusion). Il processo di stampa 3D di questa lega prevede la deposizione selettiva di polvere metallica in strati sottili, solitamente di 20-50 μm , che vengono fusi localmente tramite un fascio laser ad alta energia, con potenze regolabili tra 2 e 5 kW e velocità di scansione variabili; il laser fonde la polvere strato per strato, solidificandola rapidamente e generando una microstruttura fine e omogenea, spesso con una densità superiore al 99%, anche se richiede parametri ottimali per minimizzare porosità e cricche.

Le applicazioni di questa lega stampata in 3D spaziano dalla produzione di componenti aerospaziali leggeri, come supporti e staffe, a parti automobilistiche ad alte prestazioni, fino a prototipi personalizzati in ambito biomedicale, sfruttando la possibilità di realizzare geometrie complesse impossibili con la laminazione tradizionale; tali innovazioni aprono nuove possibilità, come la creazione di strutture a reticolo o canali interni per il raffreddamento, che migliorano l'efficienza termica e meccanica. Lo stato dell'arte di questa tecnologia rivoluzionaria evidenzia un rapido sviluppo, trainato da miglioramenti nei laser e da software avanzati per la simulazione del processo, anche se sfide come la standardizzazione e i costi rimangono aperte. Dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, la lega AlSi10MgMn stampata in 3D presenta una resistenza a trazione tipica di 300-350 MPa, un limite di snervamento di circa 200-250 MPa e un allungamento del 5-7%, valori che possono variare in base ai parametri di stampa e al trattamento termico post-processo (es. T6), offrendo un compromesso tra robustezza e leggerezza. Un punto critico che riguarda le leghe stampate con tecnologie additive manufacturing ad oggi è la vita a fatica, un aspetto tuttora in fase di studio e che rappresenta una sfida significativa per l'adozione su larga scala di questi materiali in applicazioni strutturali. La vita a fatica, intesa come la capacità di resistere a cicli ripetuti di carico senza incrinarsi o fallire, è influenzata da difetti intrinseci del processo, come porosità, cricche residue e anisotropia della microstruttura, che possono variare in base ai parametri di stampa e al trattamento termico post-processo.

3.2 Saldatura dei provini

I provini utilizzati nell'esperimento erano costituiti da due componenti: quelli inferiori, realizzati mediante additive manufacturing in AlSi10MgMn a forma di L rovesciata, ai quali è stata sovrapposta una lamiera in alluminio 5754 laminata. Le saldature per trasparenza sono state eseguite utilizzando la sorgente Corona™ nLight, configurata con 40 diverse combinazioni di parametri di processo, con particolare attenzione agli indici della sorgente, alla potenza e alla velocità, al fine di ottimizzare le caratteristiche del giunto e valutare l'efficacia del processo in presenza di geometrie complesse. La sorgente utilizzata ha una lunghezza d'onda di 1071 nm, una potenza massima di 5150 kW, diametro del core di circa 90 μm , ring 1 di 200 μm e ring 2 di 350 μm .

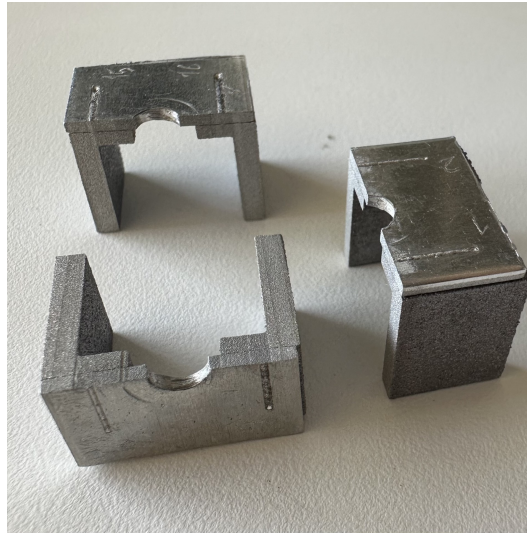


Figura 3.1: Provini pronti per il processo di inglobamento.

Come discusso nel capitolo precedente, l'impiego di una sorgente laser avanzata come la Corona™ nLight, progettata per suddividere la potenza del fascio in diverse aree distinte (core, ring 1 e ring 2), rende poco significativa la determinazione di una densità di potenza complessiva uniforme, dato l'approccio multimodale del sistema. Al contrario, si rivela più efficace condurre un'analisi dettagliata delle irradianze singole associate a ciascun indice di configurazione, valutandone l'influenza sulle proprietà del processo di saldatura, incluse le relative combinazioni che emergono dalle diverse distribuzioni di energia.

Per valutare l'irradianza complessiva nelle prove di saldatura in modalità keyhole, è stata calcolata la somma delle irradianze di tre componenti del fascio, ciascuna caratterizzata da una frazione di potenza f_i e un'area A_i (cm^2). La formula utilizzata è:

$$I_{\text{totale}} = P \sum_{i=1}^3 \frac{f_i}{A_i}$$

dove P è la potenza totale (W), e f_i rappresenta la percentuale di potenza assegnata alla i -esima componente (es. $f_1 = 0,98$, $f_2 = 0,01$, $f_3 = 0,01$).

Ad esempio, per il Test 1 con $P = 2000W$, e aree $A_1 = 0,0000636cm^2$, $A_2 = 0,000236cm^2$, $A_3 = 0,000424cm^2$.

L'irradianza totale risulta $I_{totale} = 2000 \cdot \left(\frac{0,98}{0,0000636} + \frac{0,01}{0,000236} + \frac{0,01}{0,000424} \right) \approx 30\,949\,525.64W\,cm^{-2}$, coerente con i dati sperimentali. Per facilitare la lettura utilizzerò $[kW/cm^2]$ come unità di misura.

In figura 3.2 si possono vedere alcuni degli indici che sono stati utilizzati per questo studio, estratti dal datasheet del laser. Di seguito è presentata una tabella riepilogativa dei parametri utilizzati per ciascuna prova di saldatura. Successivamente, vengono illustrate una serie di considerazioni relative a specifici indici, evidenziando l'influenza sulle saldature, incluse le relative combinazioni che emergono dalle diverse distribuzioni di energia.

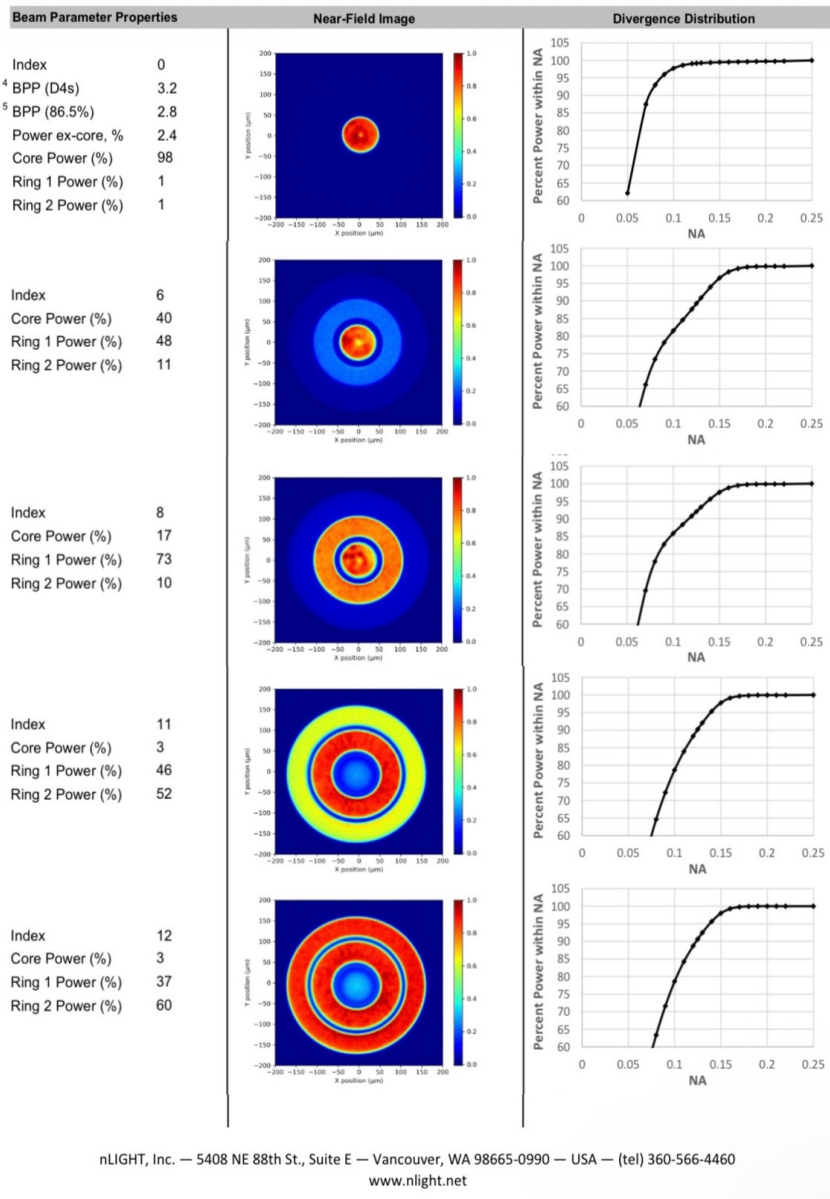


Figura 3.2: Alcuni indici del laser Corona nLIGHT. Immagine estratta da: [13]

Tabella 3.1: Tabella riassuntiva delle prove di saldatura con i relativi parametri utilizzati per ciascun test, in ordine di indice.

Test	P [W]	I [kW/cm ²]	V [mm/s]	Indice
1	2000	30 941	175	0
2	1500	23 206	175	0
3	2500	38 677	175	0
4	3000	46 412	175	0
5	1500	179 537	175	3
6	2000	23 937	175	3
7	2500	29 921	175	3
8	3000	35 905	175	3
9	1500	12 876	175	6
10	2000	17 168	175	6
11	2500	21 460	175	6
12	3000	25 752	175	6
13	2000	12 012	175	8
14	2500	15 016	175	8
15	3000	18 019	175	8
16	3500	21 022	175	8
23	4000	24 025	175	8
24	4500	27 028	175	8
25	3500	21 022	150	8
26	3500	21 022	120	8
27	3000	18 019	120	8
28	3000	18 019	100	8
17	2500	9 125	175	11
18	3000	10 950	175	11
19	3500	12 775	175	11
20	4000	14 600	175	11
21	2500	9 125	100	11
22	3000	10 950	100	11
29	3500	12 775	100	11
30	4000	14 600	100	11
31	4000	14 600	150	11
32	4000	13 826	175	12
33	4500	15 555	175	12
34	3500	12 098	150	12
35	4000	13 826	150	12
36	3500	12 098	100	12
37	4000	13 826	100	12
38	4000	10 626	150	13
39	4500	11 954	150	13
40	5000	13 283	150	13
41	4000	10 626	100	13
42	4500	11 954	100	13

- **Indice 0:** Caratterizzato da una distribuzione di potenza prevalentemente concentrata nel core (98%), con contributi marginali nei ring 1 e 2 (1% ciascuno). Questa configurazione garantisce un'elevata profondità di penetrazione, a scapito di una larghezza di interfaccia più limitata, consentendo l'uso di potenze medio-basse (1500–3000 W). Ciò permette un risparmio energetico durante il processo di saldatura, mantenendo un'efficacia ottimale nella formazione del giunto.
- **Indice 6:** La potenza è distribuita principalmente tra il core e il ring 1. Per evitare penetrazioni insufficienti, è necessario incrementare la potenza rispetto all'Indice 0. La larghezza all'interfaccia risulta leggermente superiore, ma non significativamente diversa rispetto alla configurazione precedente.
- **Indice 8:** La distribuzione di potenza si concentra prevalentemente sul ring 1. Con una potenza adeguata (>3000 W), si ottengono larghezze all'interfaccia di circa 1.5 mm. Da questo indice in poi, è vantaggioso ridurre la velocità del processo per consentire una maggiore permanenza del fascio sul giunto, migliorando la qualità della saldatura.
- **Indice 11:** Con questa configurazione, la distribuzione di potenza si sposta prevalentemente sui due ring esterni, favorendo una larghezza di interfaccia significativa accompagnata da una buona penetrazione. Tuttavia, è necessario limitare la velocità (<150 mm/s), poiché velocità superiori a 175 mm/s hanno evidenziato un elevato numero di saldature non riuscite, indicando una scarsa efficacia per la saldatura in modalità keyhole. In alternativa si può usare una potenza maggiore di 4000 W.
- **Indice 12:** In questa configurazione, la potenza si concentra principalmente sul ring 2, seguito dal ring 1. L'area maggiore degli anelli richiede un significativo incremento della potenza per ottimizzare il processo, con un conseguente aumento del consumo energetico. Anche in questo caso, è opportuno mantenere velocità di saldatura basse per garantire una fusione adeguata del materiale.

Questi risultati evidenziano come la distribuzione della potenza influenzi la penetrazione e la stabilità del cordone, con gli indici 0, 6 e 8 che offrono le configurazioni più efficaci per quanto riguarda velocità e risparmio energetico, mentre gli indici 11 e 12, pur esplorando alternative con enfasi sugli anelli e ottenendo risultati interessanti, presentano limitazioni pratiche, presentando un maggior numero di porosità, necessitando di una velocità di esecuzione minore e di potenze elevate.

3.3 Preparazione dei campioni

I campioni sono stati analizzati dal lato superiore del cordone di saldatura, documentando le caratteristiche superficiali mediante fotografie ad alta risoluzione con uno stereomicroscopio Stemi 305 Zeiss, un sistema ottico avanzato che offre una risoluzione fino a 100x e un campo visivo regolabile, permettendo di valutare con precisione la morfologia del cordone di saldatura, per una prima valutazione visiva. Uno stereomicroscopio opera basandosi su un sistema ottico binoculare che sfrutta due percorsi di luce separati per ciascun oculare, creando la percezione di immagine tridimensionale grazie alla parallasse. Questo dispositivo permette di osservare bene la profondità e i dettagli principali dei campioni. La luce è fornita da una lampada ad anello posta sopra al campione.



Figura 3.3: Stereomicroscopio e cordone visto attraverso lo stereomicroscopio. Immagine estratta da: [7]

Successivamente, i campioni sono stati inglobati nella resina fenolica nera utilizzando il macchinario IPA 30 Remet, un sistema automatizzato progettato per garantire un ciclo di inglobamento uniforme e privo di bolle d'aria, essenziale per preservare l'integrità strutturale dei provini durante l'analisi. Il processo di inglobamento con resina fenolica, nota per la sua elevata resistenza termica e meccanica (fino a 150-170°C) e per la capacità di polimerizzare rapidamente sotto pressione e calore (tipicamente a 160°C per 6-8 minuti), il ciclo di inglobamento completo richiede circa 15-20 minuti, comprendendo anche riscaldamento e raffreddamento. Questo consente di stabilizzare i campioni, facilitando la successiva lucidatura e l'osservazione microscopica; la resina, di colore nero, offre inoltre un eccellente contrasto visivo con il metallo, migliorando la visibilità dei dettagli del cordone.



Figura 3.4: Inglobatrice IPA 30 Remet. Immagine estratta da: [8]

Una volta inglobati nella resina, i campioni sono pronti per la lucidatura della sezione trasversale, una fase cruciale che rende la superficie adatta all'analisi al microscopio. La lucidatura è stata eseguita utilizzando il macchinario LS1 Remet, un sistema di levigatura e lucidatura metallografica che garantisce precisione e ripetibilità; il processo è iniziato con una carta vetrata a grana 400, specifica per l'alluminio, per rimuovere irregolarità grossolane, proseguendo con una progressione graduale della granulometria fino a raggiungere la 2000, rimuovendo graffi superficiali. Successivamente, si è passati a un panno per lucidatura, utilizzato con una sospensione di allumina in soluzione acquosa a granulometria di $2\ \mu\text{m}$, che consente di ottenere una finitura a specchio eliminando i micrograffi residui; un provino si considera lucidato correttamente quando la superficie appare priva di graffi profondi e riflette la luce come uno specchio, condizione indispensabile per l'osservazione dettagliata al microscopio.



Figura 3.5: Provini in fase avanzata di lucidazione e un provino appena inglobato, non lucidato.



Figura 3.6: Lucidatrice LS1. Immagine estratta da: [9]

3.4 Analisi al microscopio e classificazione

L'analisi al microscopio ottico è stata eseguita con un Nikon Optiphot 100S, un microscopio metallografico di alta qualità prodotto da Nikon. Equipaggiato con un sistema di zoom continuo fino a 50x, illuminatore integrato da 100 W. Per la mia analisi, ho utilizzato principalmente l'ingrandimento 5x, che fornisce una visione d'insieme ottimale del cordone senza sacrificare i dettagli superficiali. Questo setup, con la possibilità di montare fotocamere digitali o proiezioni, ha facilitato una valutazione e misurazione accurata dei provini in AlSi10MgMn e alluminio 5754, supportando l'integrazione con software per l'elaborazione dell'immagine e l'archiviazione dei dati.



Figura 3.7: Microscopio Nikon Optiphot 100S. Immagine estratta da: [10]

L'analisi al microscopio era atta ad individuare le saldature migliori, in ottica di individuare i parametri di processo ottimali per questi materiali e spessori. Le caratteristiche che sono state prese in considerazione sono: le misure di interfaccia, profondità di penetrazione e larghezza del cordone; la classificazione delle porosità, in quantità e dimensione; altri difetti di saldatura come cricche o mancanza di

penetrazione.

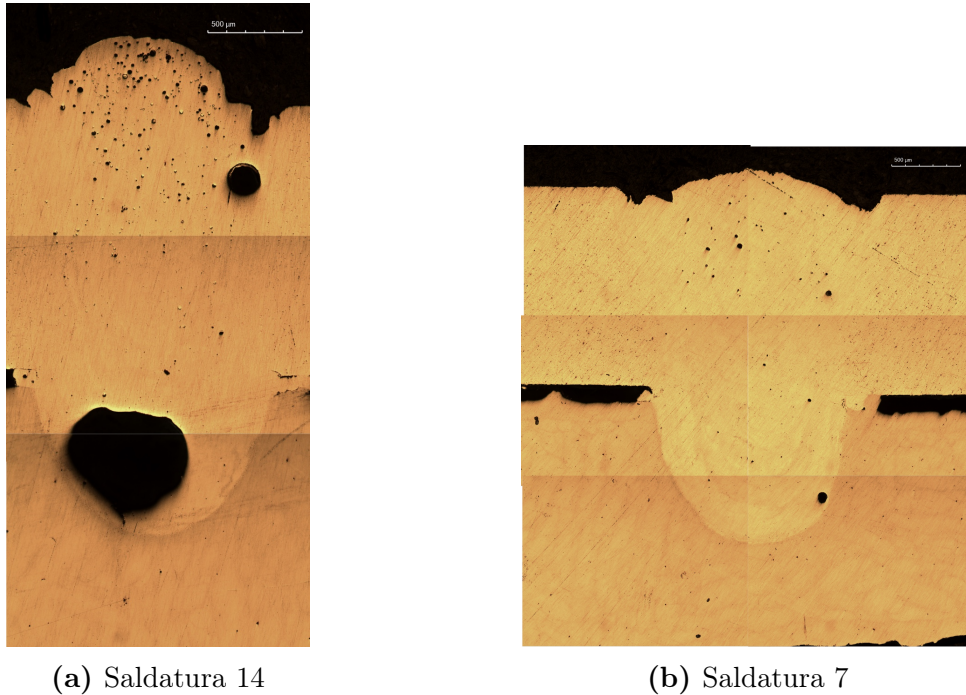


Figura 3.8: Provino scartato e provino valido.

In oltre con questo strumento sono state eseguite le misure delle impronte delle prove di durezza micro-Vickers. Queste misure delle diagonali delle impronte sono fondamentali per calcolare la durezza del materiale con la seguente formula:

$$HV = \frac{1,8544 \cdot P}{d^2}$$

dove: HV è appunto la durezza Vickers senza unità di misura esplicita, P è il carico applicato in kgf, e il numero 1,8544 è una costante geometrica derivante dall'angolo del penetratore Vickers (136° tra le facce opposte).

Poi le misure di durezza di ogni saldatura, sono state riportate su Excel per la fase di analisi dei risultati.

3.5 Prove di durezza

Le prove di durezza rappresentano una delle metodologie di caratterizzazione più importanti per i metalli, poiché consentono di determinare la durezza superficiale di un materiale, espressa in apposite unità di misura (HB, HV, HRC), piuttosto che con unità fisiche standard (come Pa o N/mm²), poiché derivano da rapporti adimensionali. Esistono varie unità di misura poiché le prove avvengono con l'impiego di penetratori di diverse forme e dimensioni sottoposti a forze variabili. Nel corso del tempo, sono state sviluppate numerose tecniche di prova, le cui scale di durezza sono state successivamente confrontate e correlate per garantire risultati comparabili tra loro. Tra queste, la prova Brinell si distingue per l'utilizzo di un penetratore sferico

in acciaio, rendendola particolarmente indicata per materiali duttili e deformabili, dove la sfera lascia un'impronta misurabile senza causare fratture. La prova Vickers, invece, adotta un penetratore piramidale a base quadrata in diamante sintetico, la cui elevata durezza consente di testare un'ampia gamma di materiali metallici, dai più morbidi ai più resistenti, offrendo una maggiore precisione nella misurazione. Infine, la prova Rockwell si caratterizza per la versatilità, grazie all'impiego di diversi tipi di penetratori, prevalentemente in diamante e acciaio, che permettono di adattare la metodologia a una varietà di materiali e condizioni sperimentali, rendendola una scelta flessibile in ambito industriale e di ricerca.

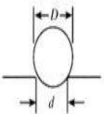
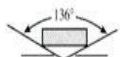
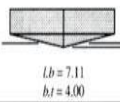
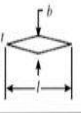
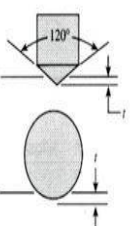
Test	Forma del penetratore		Carico	Penetratore	Formula per il calcolo della durezza
	Vista laterale	Vista dall'alto			
Brinell			P	Sfera da 10mm di acciaio o carburo di tungsteno	$BH-N = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers			P	Piramide di diamante	$VH-N = \frac{1.72P}{d^2}$
Microdurezza Knoop			P	Piramide di diamante	$KH-N = \frac{14.2P}{b^2}$
Rockwell			60 kg 150 kg 100 kg 100 kg 60 kg 150 kg 100 kg	Cono di diamante Sfera di acciaio di diametro 1/16 in Sfera di acciaio di diametro 1/8 in	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ $R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ $R_E =$ 100 - 500r 130 - 500r

Figura 3.9: Schema riassuntivo delle principali prove di durezza. Immagine estratta da: [11]

La prova di durezza micro-Vickers è una variante della prova tradizionale, ottimizzata per l'analisi di materiali su scale ridotte o per regioni specifiche, come i cordoni di saldatura o le zone termicamente alterate. La forma del penetratore è la stessa ma di dimensioni ridotte. Anche i carichi sono ridotti, generalmente sono compresi tra 10 g e 1 kg (0.098 N a 9.8 N). Questa tecnica è particolarmente indicata per metalli con proprietà eterogenee o strati sottili, offrendo una risoluzione elevata e una misurazione precisa della durezza locale, espressa in HV (Hardness Vickers). La micro-Vickers si distingue per la sua capacità di fornire dati affidabili su campioni preparati con lucidatura accurata, come quelli inglobati in resina, ed è ampiamente utilizzata in combinazione con osservazioni microscopiche per correlare la microstruttura con le proprietà meccaniche.

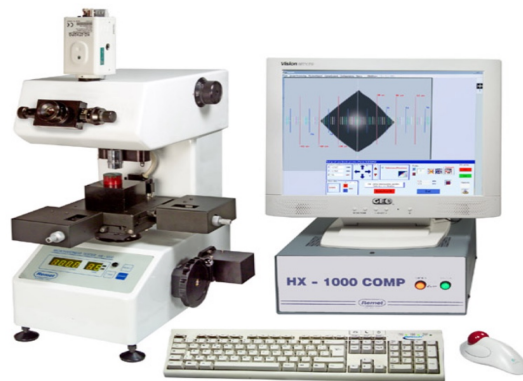
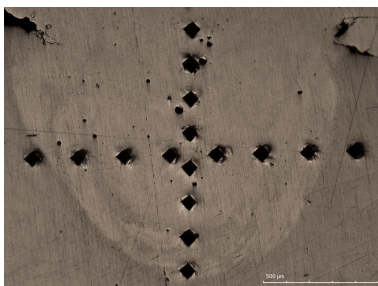
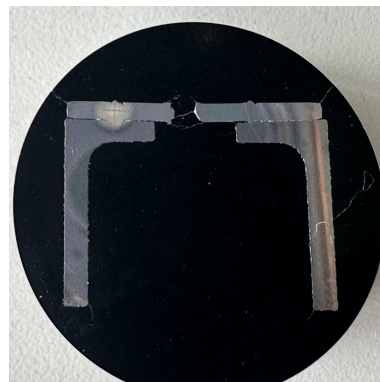


Figura 3.10: Microdurometro Vickers HX-1000 Remet. Immagine estratta da: [12]

Questa analisi è stata eseguita con un durometro micro-Vickers HX-1000 Remet, le prove sono state eseguite con un carico di 200 g. La macchina è equipaggiata con un microscopio integrato, con risoluzione fino a 100x per facilitare la visualizzazione delle impronte. Le impronte sono state eseguite ad una distanza di $150\ \mu\text{m}$, lungo la profondità della saldatura in modo da ottenere una serie di durezze sopra e sotto l'interfaccia e nella zona non fusa sotto al cordone. Successivamente sono state eseguite prove di durezza trasversalmente, lungo le due lamiere, in modo da ottenere le durezze del materiale base, della ZTA e della zona fusa.



(a) Saldatura 14



(b) Saldatura 7

Figura 3.11: Indentature viste al microscopio e non.

4

Analisi dei risultati

In questo capitolo andrò ad esporre i risultati ottenuti dalle analisi e dalle prove di caratterizzazione eseguite. Come spiegato nei capitoli precedenti, le analisi svolte sui campioni di saldatura sono state principalmente due: analisi al microscopio per la rilevazione di difetti di saldatura come cricche o porosità, e le prove di durezza svolte lungo la saldatura e trasversalmente in entrambi i materiali, al fine di verificare le variazioni di durezza nelle zone saldate e termicamente alterate.

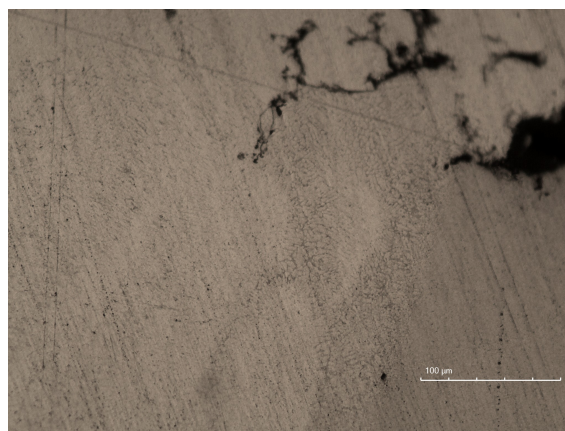
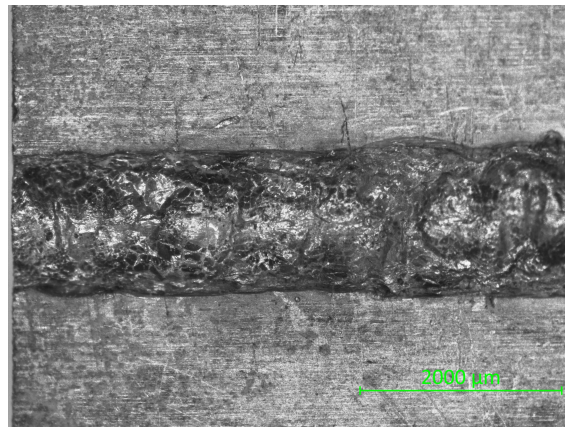
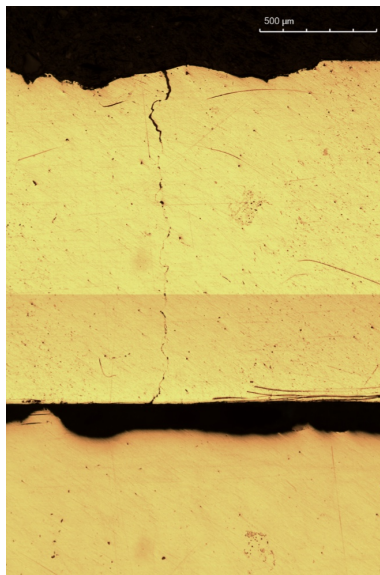


Figura 4.1: Cordone di saldatura dall'alto e ingrandimento 50X di una ZTA

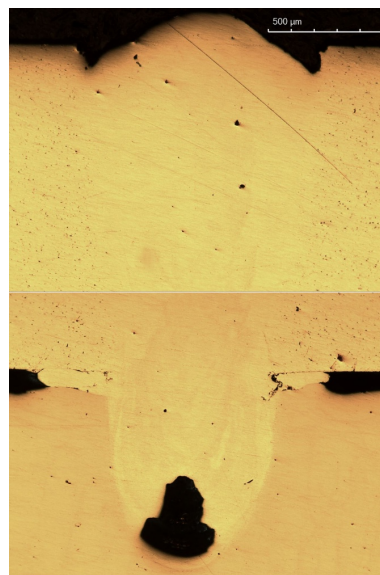
4.1 Foto e commenti

Lo scopo dell'analisi al microscopio è quello di determinare la qualità della saldatura, in particolare individuare la presenza di difetti, per poi correlare il numero di difetti con gli indici del laser utilizzati per eseguire le saldature. Le porosità sono state classificate come grandi, medie e piccole; è stata valutata la loro quantità e la posizione. Nel corso dello studio ho notato che la presenza di porosità dipende anche dalla posizione del taglio: provini apparentemente molto porosi, una volta lucidati (quindi asportando un piccolo strato di materiale), risultavano perfettamente privi di difetti.

L'analisi al microscopio è cominciata individuando le saldature che presentavano troppi difetti. Tra i principali difetti riscontrati figurano le cricche, spesso causate da tensioni residue o rapidi gradienti termici durante il raffreddamento, le porosità, dovute a gas intrappolati o impurità nel materiale, e in alcuni casi mancanza di penetrazione.



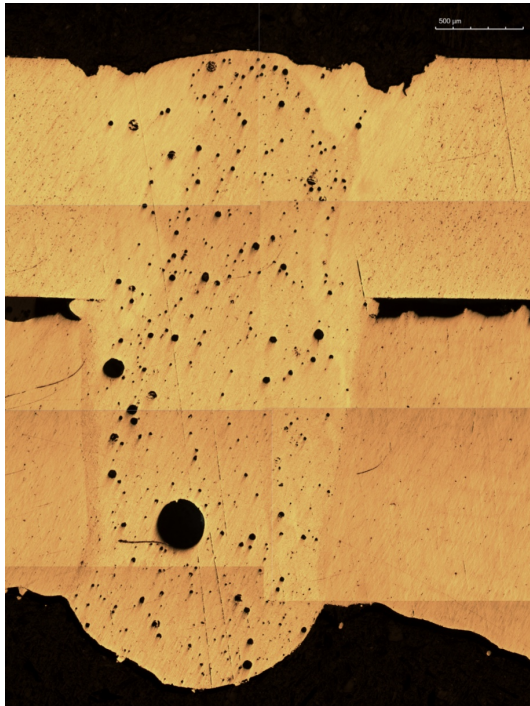
(a) Saldatura 14



(b) Saldatura 7

Figura 4.2: Esempi di difetti individuati nelle saldature.

In queste immagini [4.2](#) si possono vedere alcuni difetti tipici delle saldature. In particolare, nella saldatura 14 è evidente una cricca lungo la saldatura; inoltre non c'è stata penetrazione. Nella saldatura 7, invece, è presente una grossa porosità nel fondo della saldatura. È possibile osservare che una parte del materiale fuso si è infiltrata nel gap, sebbene tale infiltrazione probabilmente non contribuisca significativamente alla resistenza meccanica del giunto. Questo fenomeno si verifica con notevole frequenza nei provini analizzati.



(a) Saldatura 30



(b) Saldatura 3

Figura 4.3: Saldatura 30 scartata a causa dell'elevato numero di difetti e saldatura 3 considerata valida per proseguire i test.

Nelle immagini [4.3](#) è possibile confrontare una saldatura scartata ed una saldatura che può proseguire con le analisi. In particolare la saldatura 30 presenta moltissime porosità e una penetrazione eccessiva; come si può vedere, la saldatura trapassa completamente la lamiera inferiore. La saldatura 3, al contrario, presenta poche piccole porosità e ha una buona penetrazione. Inoltre, si può notare la differenza di dimensione delle due saldature, la saldatura 30 ha una larghezza di interfaccia di 1,654 mm contro i soli 0,839 mm della 3, circa il doppio.

La fase centrale di questa analisi, successiva alla catalogazione di ogni saldatura in base ai difetti riscontrati, ha riguardato la misurazione dettagliata dei cordoni di saldatura, un passaggio cruciale per valutare la qualità e l'efficacia del processo. In particolare, le misure fondamentali prese in considerazione includono: la profondità raggiunta dal cordone nei materiali, che indica il grado di penetrazione; la larghezza del sormonto; la larghezza del cordone all'interfaccia, che permette di valutare l'estensione della zona di transizione; e la misura del gap, essenziale per comprendere l'influenza dello spazio iniziale tra i componenti sul risultato finale.

Successivamente illustrerò i grafici dei risultati ottenuti dalle rilevazioni fatte sui campioni. I parametri di processo sono i medesimi riportati nella tabella [3.1](#), presentata nel capitolo precedente. Nei grafici, l'indice di configurazione è indicato sull'asse delle ascisse, consentendo di visualizzare l'andamento dei diversi parametri in funzione di tale indice.

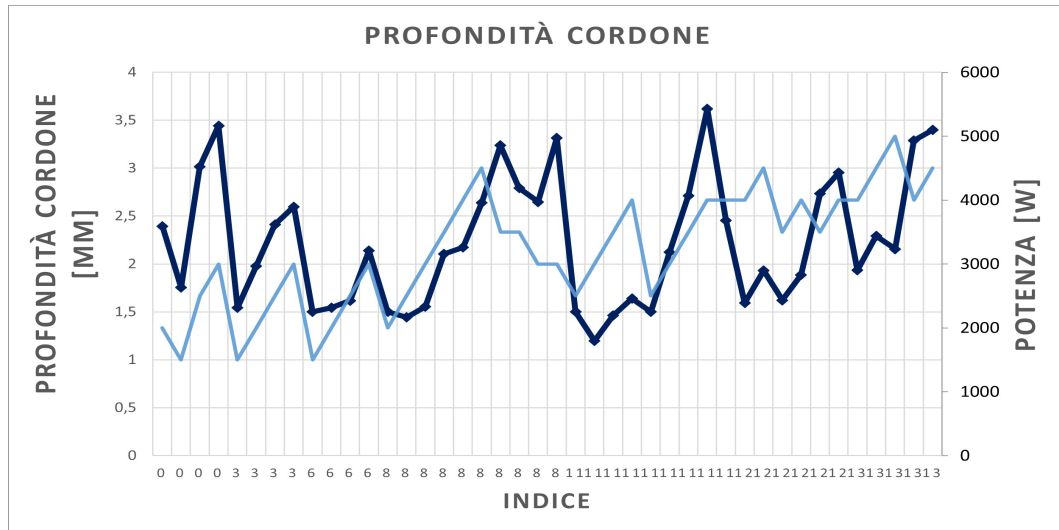


Figura 4.4: Grafico dell'andamento della profondità del cordone e della potenza.

La profondità di penetrazione 4.4 è stata misurata dal sormonto fino al fondo del cordone. La linea blu rappresenta la profondità di penetrazione, la linea azzurra traccia la potenza. Lo spessore della lamiera in AA5754 è mediamente 1.55 mm, lo spessore del componente in AlSi10MgMn è mediamente di 2 mm, per un totale di circa 3,55 mm. Nei provini in cui riscontriamo una profondità minore di 1,5 mm la penetrazione non è considerata sufficiente da generare un collegamento fisso tra i componenti. All'opposto, nei casi in cui la misura supera i 3,5 mm la penetrazione risulta eccessiva, trapassando entrambe le lamiere.

Come evidenziato dal grafico, questa misura cresce leggermente al crescere della potenza e dell'indice. Probabilmente, l'utilizzo di indici più alti comporta un'area maggiore e quindi una irradianza più bassa; questo mitiga l'effetto di potenze elevate, che altrimenti provocherebbero profondità di penetrazione troppo elevate.

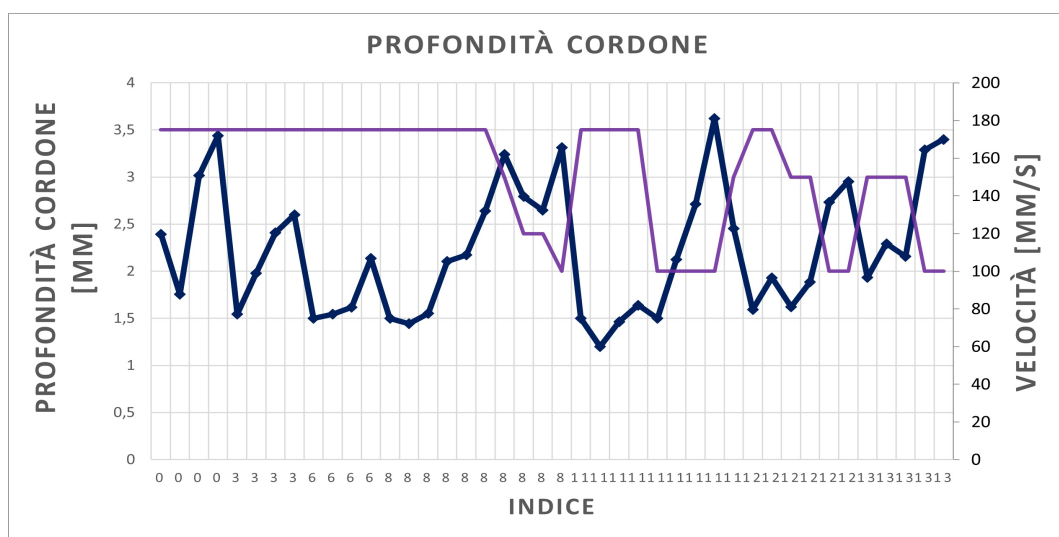


Figura 4.5: Grafico dell'andamento della profondità del cordone e della velocità di esecuzione.

In questo grafico [4.5](#), invece, è evidente come sia necessario limitare la velocità di saldatura (linea viola) a indici più alti per evitare profondità insufficienti a garantire una giunzione stabile. La profondità di penetrazione, infatti, riveste un ruolo fondamentale per assicurare la stabilità strutturale e la resistenza meccanica del giunto.

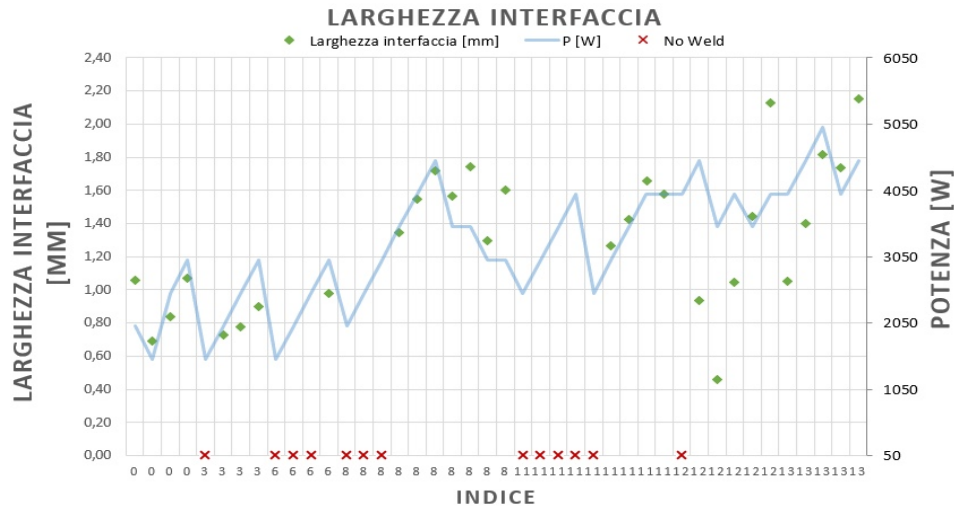


Figura 4.6: Grafico dell'andamento della larghezza del cordone all'interfaccia e della potenza.

La larghezza del cordone all'interfaccia (punti verdi) rappresenta una delle caratteristiche chiave per assicurare la qualità di un giunto saldato, poiché influisce direttamente sulla continuità e sull'integrità della zona di transizione tra i materiali. È stato determinato che, per le prove condotte in questo studio, una larghezza all'interfaccia superiore a 1,2-1,5 mm risulta ottimale, un intervallo selezionato per garantire una fusione adeguata e una distribuzione uniforme delle tensioni meccaniche. Questa misura è particolarmente importante perché consente di valutare se il cordone offre una resistenza meccanica sufficiente a rendere il giunto stabile e resistente a carichi esterni, riducendo il rischio di delaminazione o fratture nella zona di interfaccia.

Come si può osservare dal grafico [4.6](#), questa misura tende ad aumentare all'aumentare della potenza applicata e dell'indice, evidenziando una chiara dipendenza dai parametri di saldatura. Questa misura dipende fortemente dalla potenza e dall'indice usato, a causa dell'area maggiore coinvolta nel processo di saldatura. Nei punti in cui il grafico riporta un valore pari a zero, si evidenzia l'assenza di penetrazione nei corrispondenti provini. Come illustrato in precedenza, la causa principale di questo problema risiede in una velocità di saldatura eccessiva, che impedisce la completa fusione del materiale, compromettendo la formazione del giunto.

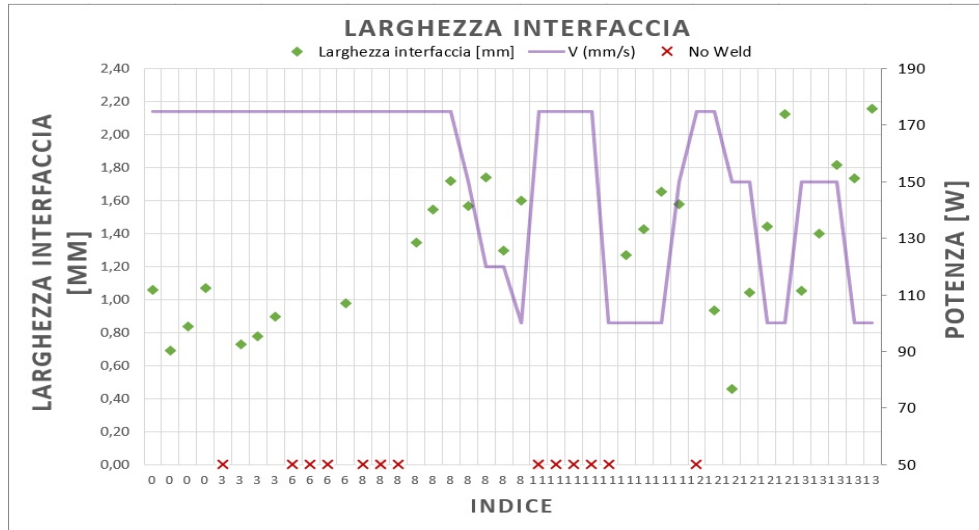


Figura 4.7: Grafico dell'andamento della larghezza del cordone all'interfaccia e della velocità.

Anche in questo grafico [4.7](#) si può notare come a velocità (linea viola) più elevate ci sia maggiore rischio di eseguire saldature poco stabili, in cui il laser non riesce a penetrare correttamente entrambe le lamiere. Infatti, ad elevate velocità corrispondono basse larghezze all'interfaccia.

La larghezza del sormonto (punti arancio) [4.8](#), sebbene non costituisca un parametro di fondamentale importanza per la qualità del giunto, ha evidenziato in questo studio una dipendenza marcata dalla potenza applicata e dall'indice di configurazione, risultando la caratteristica con la dipendenza più pronunciata tra quelle esaminate. Inoltre, grazie alla tecnologia impiegata, l'altezza del sormonto si mantiene minima rispetto a tecniche tradizionali come la saldatura MMA o altre metodologie, garantendo un profilo più uniforme e esteticamente accettabile nel punto di saldatura. Nei punti del grafico in cui risultano assenti i dati, si indica l'assenza di penetrazione, classificando il provino come difettoso, di conseguenza non è stata eseguita la misura della larghezza all'interfaccia e del sormonto.

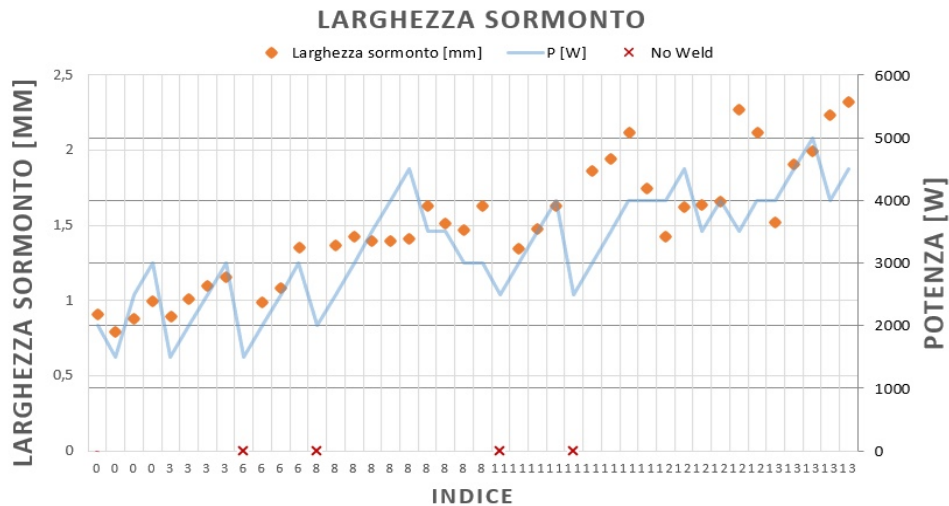


Figura 4.8: Grafico dell'andamento della larghezza di interfaccia con linea di tendenza.

Come anticipato nei capitoli precedenti, il gap (distanza tra la lamiera superiore e quella inferiore), proprio per trovare i parametri di saldatura migliori in queste condizioni. La possibilità di saldare per trasparenza due componenti caratterizzati da un ampio gap tra loro consente di ottimizzare significativamente il processo produttivo, eliminando la necessità di effettuare lavorazioni intermedie.

Misurato su oltre 40 provini il gap medio è di 0,112 mm. Nel grafico [4.9](#) si può notare la presenza di dati mancanti, dovuta al fatto che in alcuni provini la penetrazione insufficiente ha comportato l'assenza del componente inferiore, rendendo tali saldature anch'esse classificate come difettose.

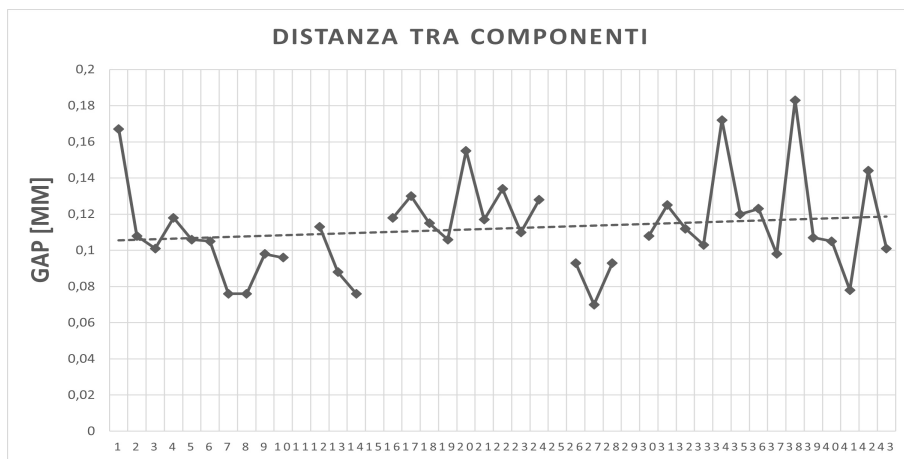


Figura 4.9: Grafico dell'andamento del Gap nei provini.

4.2 Grafici durezza

I grafici delle durezza risultanti dalle rilevazioni sperimentali evidenziano alcuni pattern interessanti. Inizio con l'esposizione del grafico relativo alle durezza dei materiali base, per i quali sono state effettuate 7 indentature ognuna su campioni diversi.

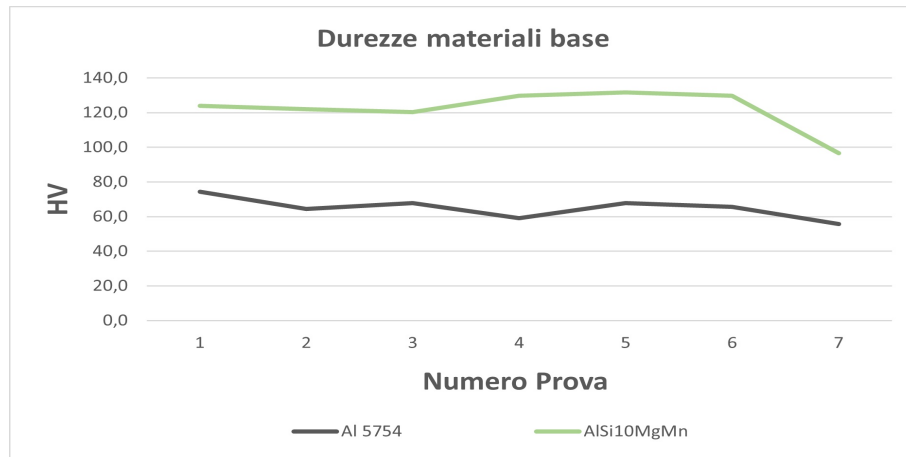


Figura 4.10: Grafico delle durezza dei materiali che costituiscono i provini, alluminio 5754 e AlSi10MgMn.

Come si può notare dalle immagini, la durezza della lega di alluminio 5754 è inferiore rispetto alla lega AlSi10MgMn ottenuta tramite additive manufacturing. Questi risultati sono in linea con la letteratura, infatti ci si aspettano valori in un range tra 60 e 75 per la 5754 e tra 90 e 125 per la lega AlSi10MgMn. Conoscere questi dati mi permette di osservare come varia la durezza dei campioni dopo il processo di saldatura.

I campioni che hanno riscontrato meno difetti, quindi quelli considerati migliori e validi per eseguire i test di durezza (3,4,12,16,26,29,31,35,36,38), corrispondono ai campioni saldati con gli indici esaminati nel capitolo precedente. I test sono stati condotti su dieci provini, ciascuno caratterizzato da misure differenti, al fine di valutare la variabilità delle saldature. Successivamente, i risultati sono stati elaborati e sottoposti a un calcolo dei valori medi, garantendo così una base statistica affidabile. L'obiettivo di questa caratterizzazione è stato quello di determinare le proprietà medie delle saldature, permettendo di prevedere con ragionevole accuratezza le prestazioni tipiche quando eseguite con le stesse modalità.

Come discusso nei capitoli precedenti sulla teoria delle saldature, è noto che nella zona fusa e nella zona termicamente alterata si verificano alterazioni della microstruttura del materiale, con conseguenti variazioni nelle proprietà meccaniche locali. Dopo aver determinato la durezza di base dei due materiali utilizzati nelle prove, si ottiene un riferimento iniziale per confrontare i risultati delle durezza nelle aree saldate. Le misurazioni sono state effettuate con una distanza di 150 μm tra le indentazioni, applicando una forza di 200 g, e condotte lungo tre direzioni: la profondità della saldatura, trasversalmente lungo le due lamiere.

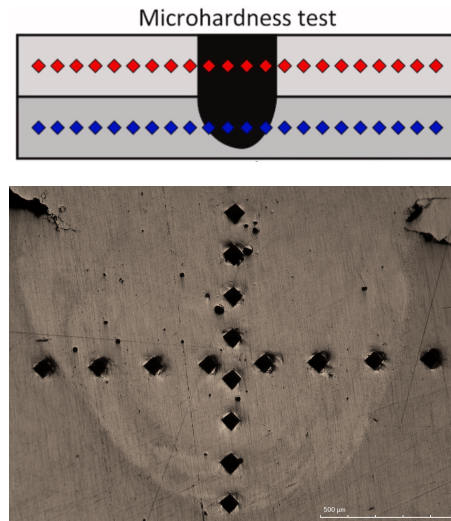


Figura 4.11: Direzioni in cui sono state eseguite le indentature, il disegno indica le direzioni trasversali, la foto mostra la parte inferiore in una saldatura indentata. Disegno estratto da: [4]

Partendo dalla profondità, questa è stata suddivisa in tre distinte zone: sopra al gap, sotto al gap e zona non fusa (ZNF), situata al di sotto del cordone. Quest'ultima misurazione è stata effettuata esclusivamente nei casi in cui era possibile, poiché in alcuni campioni la zona fusa si estendeva molto vicino al bordo, impedendo di eseguire l'indentazione in modo accurato.

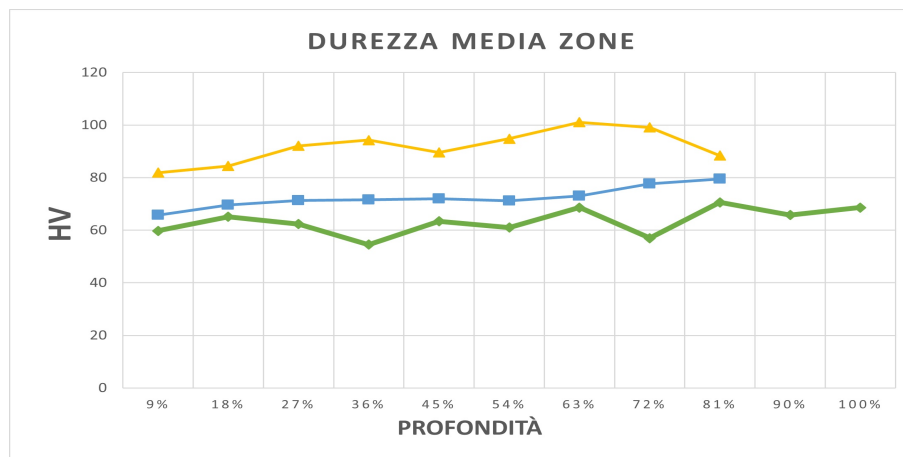


Figura 4.12: Grafico delle durezze medie nelle tre zone della saldatura.

Nel grafico [4.12] si può osservare l'andamento della durezza lungo la profondità delle tre zone. Nel dettaglio, la linea verde corrisponde alla porzione di saldatura sopra al gap, quindi quella maggiormente composta da AA5754, la linea blu corrisponde alla parte di materiale inferiore al gap, composta quindi da una percentuale maggiore di AlSi10MgMn, sebbene il processo di saldatura keyhole comporti una significativa contaminazione del materiale inferiore da parte di quello superiore. La linea gialla, infine, indica la zona non fusa (ZNF), dove teoricamente dovrebbe essere presente solo AlSi10MgMn; tuttavia, questa area risulta termicamente alterata dal

processo di saldatura, manifestando una durezza inferiore rispetto al valore di base del materiale.

Inoltre ho creato anche un grafico della totalità dell'andamento della durezza lungo la saldatura. Anche in questo caso evidenziando le tre zone con i colori verde, blu, arancio. Si può notare nella figura 4.13 come i valori di durezza salgano man mano che si scende in profondità nella saldatura, incontrando percentuali maggiori di AlSi10MgMn.

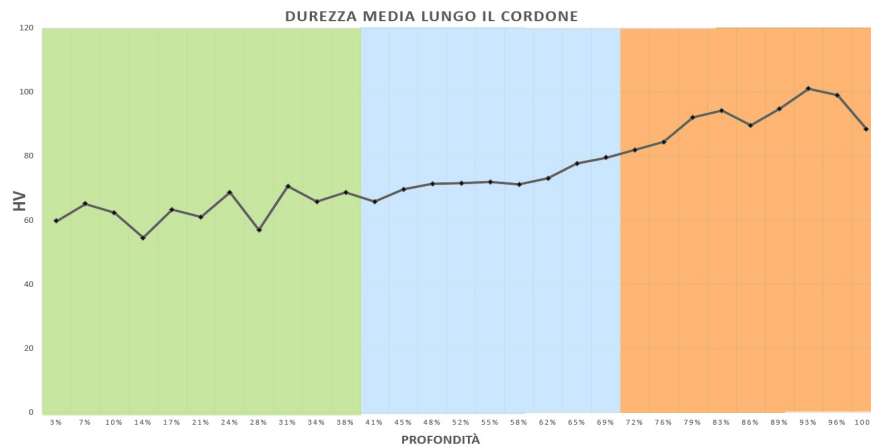


Figura 4.13: Grafico dell'andamento della durezza media lungo la saldatura.

Proseguendo in figura 4.14 si può osservare l'andamento della durezza trasversalmente nella lamiera superiore. Mentre nella figura 4.15 si osserva il grafico relativo alla lamiera inferiore. Nella parte gialla dei grafici si indica la zona fusa del materiale, nella zona color arancione le zone termicamente alterate, mentre agli estremi è presente il materiale base.

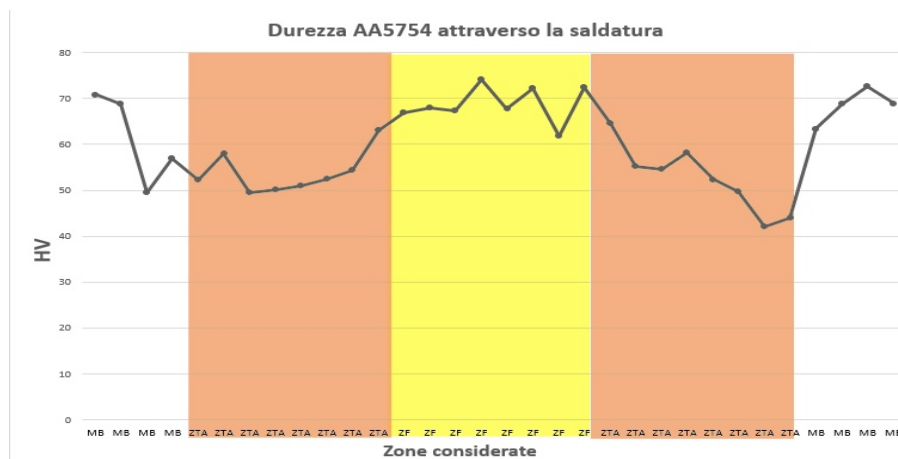


Figura 4.14: Grafico dell'andamento della durezza media lungo la lamiera di AA5754.

Si evidenzia il fatto che nella zona fusa (ZF) di questa parte di saldatura l'alluminio 5754 ha avuto una ricristallizzazione quasi completa presentando valori di durezza simili al materiale base 60-70 HV, allontanandosi da questa zona centrale,

osserviamo un calo drastico della durezza che raggiunge un minimo di 42 HV, per poi ritornare rapidamente a valori normali una volta fuori dalla ZTA.

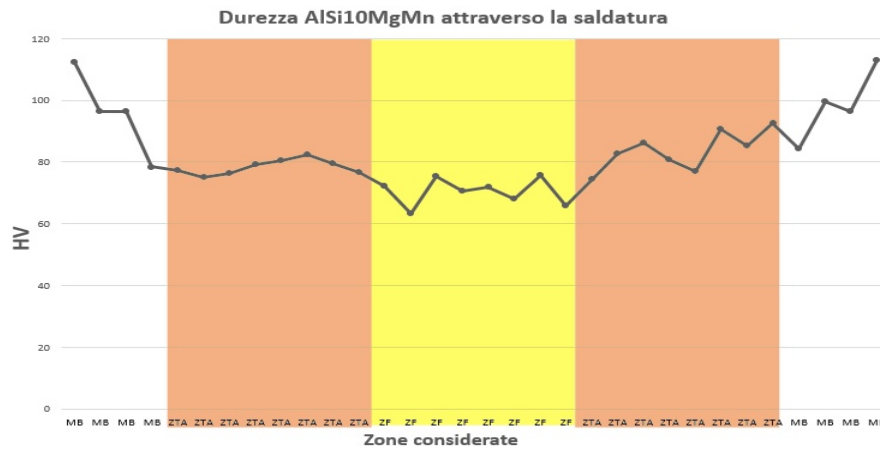


Figura 4.15: Grafico dell'andamento della durezza media lungo la lamiera di Al-Si10MgMn.

Nel secondo caso, invece, si osserva un comportamento diverso, i valori minimi di durezza 63-66 HV vengono raggiunti nella zona fusa (ZF) del materiale, evidenziando il fatto che la saldatura keyhole comporta un rimescolamento di materiale fuso, questo porta ad avere circa la durezza base dell'alluminio 5754, allontanandosi dal centro i valori salgono lungo la ZTA variando tra 77 e 95 HV, per poi tornare ai valori del materiale base, in questo caso in modo più graduale.

Queste ZTA molto estese, fino a 1 mm dalla fine della zona fusa potrebbero essere dovuti a ricristallizzazioni parziali del materiale che raggiungendo i 300-400°C non fonde ma varia la sua microstruttura. Questo effetto che si presenta quando usiamo indici diversi da 0 ci porta ad ottenere delle diminuzioni di durezza di 10 HV nel caso dell'AA5754 e di 40 HV nel caso della lega ottenuta con AM.

5

Discussioni

In questo capitolo procederò a esaminare in dettaglio i risultati derivanti dalle prove sperimentali, analizzandoli in base ai diversi indici e ai parametri di processo adottati, al fine di identificare e valutare le configurazioni ottimali per l'esecuzione delle saldature. Tale analisi consentirà di trarre conclusioni mirate sull'efficacia dei parametri, evidenziando quelli che offrono le migliori prestazioni in termini di qualità dei giunti saldati.

Per questa sezione dell'analisi, ho eseguito calcoli di irradianza di natura più approssimativa rispetto a quelli dettagliati nei capitoli precedenti, al fine di semplificare il processo di valutazione. In generale, i valori di irradianza sono stati determinati utilizzando una formula semplificata:

$$\text{Irradianza} = \frac{P}{A}$$

e variano da 9125 kW/cm² nei casi in cui si usa una bassa potenza con indici elevati, che comportano una elevata superficie; fino a circa 46412 kW/cm² nei casi in cui è stata utilizzata una potenza elevata con indice 0 che comprende soltanto l'area del core.

Partendo dai difetti, in particolare dal più grave, ho notato che il maggior numero di saldature con penetrazione insufficiente si ha con l'indice 11, nonostante ciò con irradianze superiori a circa 12000 kW/cm² e con velocità basse, si riescono ad ottenere saldature ottimali. Per quanto riguarda le sovraperpenetrazioni, queste sono state riscontrate esclusivamente in due casi, specificamente con potenze superiori a 4000 W e una velocità ridotta di 100 mm/s. Tale fenomeno è probabilmente attribuibile a un tempo di esposizione eccessivo del laser su un'area limitata, che provoca un surriscaldamento prolungato e un'eccessiva penetrazione del materiale, consentendo alla pozza di fondere di solidificarsi troppo lentamente. Nei provini in cui non c'è penetrazione il gap non risulta essere eccessivamente grande, di conseguenza è probabile che la mancanza di penetrazione sia dovuta solo ai parametri di processo: velocità troppo elevata (175 mm/s) che causa uno spostamento troppo rapido della pozza di materiale fuso, e irradianza troppo bassa (< 13000 kW/cm²).

La presenza di difetti si rileva come una costante nella stragrande maggioranza dei provini analizzati, e alcune ricerche scientifiche suggeriscono che tali imperfezioni possano derivare dalla peculiare struttura della lamiera in AlSi10MgMn, ottenuta

tramite additive manufacturing (AM), la quale presenta una microstruttura distinta rispetto alle tradizionali leghe di alluminio. Durante la fusione, questa lamiera rilascia ossidi intrappolati, contenenti anche idrogeno, che contribuisce alla formazione di numerose piccole porosità sparse. Inoltre, a differenza delle osservazioni tipiche, ho rilevato ripetutamente la presenza di grandi porosità, probabilmente dovute all'ingresso di gas dal gap verso la pozza di materiale fuso o all'aggregazione di bolle di idrogeno; queste ultime si manifestano più frequentemente a livello del gap o nel fondo della saldatura, sebbene tale fenomeno non sia stato documentato nelle ricerche scientifiche da me esaminate.

Sono state rilevate appena due cricche su oltre 40 saldature analizzate, entrambe localizzate nella parte centrale del cordone, un'osservazione che si discosta dalla tendenza comune, secondo cui tali difetti si manifestano tipicamente tra la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA), generalmente a causa di tensioni residue o tempi di raffreddamento rapidi.

Le dimensioni dei cordoni di saldatura sono evidentemente dipendenti dall'indice, la differenza di superficie colpita dal laser incide notevolmente sulle dimensioni finali del cordone. Con indici bassi come 0, 3 e 6 si ottengono dei cordoni molto profondi, in un range tra 1.6 mm ovvero il minimo per garantire la giunzione, fino a 3,45 mm con elevata potenza. Ma la larghezza all'interfaccia risulta sempre inferiore a 1,2 mm. A partire dall'indice 8, invece, la larghezza del cordone all'interfaccia risulta essere quasi sempre superiore al valore target di 1,2 - 1,5 mm. Questo fatto suggerisce che se l'obiettivo primario è ottenere larghezze all'interfaccia elevate, si deve partire da indici sopra l'8.

Riguardo alle prove di durezza, ho osservato che, utilizzando indici bassi, si ottiene una zona fusa relativamente ristretta e, in particolare, una zona termicamente alterata (ZTA) di dimensioni molto limitate. Nel caso specifico dell'AA5754, si nota la quasi totale assenza di zone a bassa durezza ai lati della saldatura nei provini trattati con un indice di 0. A partire dall'indice 6, invece, emerge una zona estesa circa 1 mm dal centro della saldatura, caratterizzata da una durezza media di 50 HV, valore inferiore rispetto a quello di base del materiale. Questo effetto è verosimilmente dovuto al processo di saldatura con indici elevati, che provoca un riscaldamento significativo anche nelle aree non direttamente coinvolte nella fusione, inducendo una ricristallizzazione parziale del materiale e, di conseguenza, una riduzione della durezza rispetto alle condizioni iniziali. Questo fenomeno trova riscontro in letteratura per questa lega di alluminio, dove la ricristallizzazione parziale ha inizio tipicamente a temperature comprese tra 300 e 400°C, senza raggiungere una completa trasformazione strutturale. Lo stesso fenomeno compare anche nella lega ottenuta tramite AM, con una differenza di durezza anche maggiore, i dati mostrano una durezza media di 80 HV nella ZTA differendo di circa 40 HV dal materiale base. È opportuno considerare che, in generale, materiali meno duri tendono ad essere anche più duttili, tale fattore potrebbe influire significativamente sulla resistenza meccanica del giunto, richiedendo un'attenta valutazione in fase di progettazione nel caso si voglia adottare questa tecnologia di saldatura.

Conclusioni

Il mio lavoro di tesi si allinea con gli studi scientifici precedenti, che hanno ampiamente dimostrato e valorizzato la saldabilità di leghe di alluminio dissimili mediante l'utilizzo di una sorgente laser.

Dalle analisi condotte, ho tratto alcune considerazioni specifiche che arricchiscono tali risultati. In particolare, l'impiego di indici bassi consente di ottenere una significativa penetrazione e una zona termicamente alterata (ZTA) estremamente ristretta, risultando in una saldatura caratterizzata da una durezza media elevata, ideale per applicazioni che richiedono resistenza meccanica localizzata. Tuttavia, qualora il processo in esame necessiti di una penetrazione elevata, compresa tra 3 e 4 mm, si rende indispensabile l'adozione di potenze elevate per garantire una fusione adeguata. D'altro canto, se l'obiettivo, come nel caso specifico di questo studio, è ottenere larghezze all'interfaccia superiori a 1,2-1,5 mm, risulta opportuno impiegare indici a partire dall'8, ottimizzando così la distribuzione del materiale fuso.

Inoltre, è fondamentale considerare che, a seconda dei materiali dei provini da saldare, una vasta area circostante la saldatura può raggiungere temperature comprese tra 300 e 400°C, un fattore che, in funzione delle proprietà termiche del materiale, potrebbe determinare l'estensione della ZTA o favorire la formazione di cricche, richiedendo un'attenta regolazione dei parametri per mitigare tali effetti.

Riguardo alle porosità, esse si rilevano come una costante nella maggior parte dei provini analizzati, portandomi a concludere che tali imperfezioni non dipendono primariamente dai parametri di processo, bensì dalla peculiare microstruttura della lamiera in AlSi10MgMn, tipica delle leghe ottenute tramite additive manufacturing. Tuttavia, è possibile effettuare un'analisi sulla tipologia e la distribuzione di tali difetti: con indici bassi si rilevano poche porosità, sia di piccole che di grandi dimensioni, mentre con indici elevati si osserva un incremento del numero di porosità, prevalentemente di dimensioni ridotte, con l'assenza di difetti singoli di grande entità. Questa differenza è probabilmente attribuibile alle temperature più elevate raggiunte dalla lamiera in AlSi10MgMn durante la saldatura con indici alti, che favoriscono un maggiore rilascio di ossidi, responsabili della formazione di tali imperfezioni.

Una velocità di saldatura elevata, che in questo studio ha raggiunto un massimo di 175 mm/s, quando associata a una potenza ridotta (o a un'irradianza bassa), determina una penetrazione insufficiente, portando alla formazione di un giunto saldato difettoso. In generale, ciò si verifica poiché il laser, muovendosi a una velocità

elevata rispetto ai componenti, non permane sufficientemente a lungo in un'area per assicurare la completa fusione dei due materiali.

In un contesto industriale, l'adozione di velocità di saldatura elevate può ottimizzare i tempi di processo, un aspetto cruciale in un settore dove l'efficienza produttiva è prioritaria e persino i decimi di secondo rivestono un'importanza significativa. Tuttavia, l'utilizzo di velocità elevate richiede necessariamente l'impiego di potenze superiori per garantire una fusione adeguata del materiale, con un conseguente aumento del consumo energetico. Pertanto, è fondamentale ottimizzare con precisione i parametri di processo, bilanciando potenza, velocità e indice in funzione delle specifiche esigenze di saldatura, al fine di coniugare produttività ed efficienza energetica.

Bibliografia

- [1] A. Klimpel, *Review and Analysis of Modern Laser Beam Welding Processes*, Materials 2024, 17, 4657. DOI: [10.3390/ma17184657](https://doi.org/10.3390/ma17184657).
- [2] E. Capello, *Le lavorazioni industriali mediante laser di potenza*, Libreria Clup, 2003.
- [3] Prof.ssa Erica Liverani, *Slide del corso di Tecnologia B AA 2022/2023*
- [4] T. Sun, C. Liu, P. Franciosa, N. Ferguson, G. Gibbons, D. Ceglarek, E. Mogire, P. Zhang, *Effect of placement configuration on the microstructure, porosity and mechanical performance of dissimilar remote laser welding of additive manufactured AlSi10Mg alloy and conventionally manufactured 1050 aluminium sheet*, Journal of Materials Research and Technology 27 (2023) 5639–5650. DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.11.077](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.077).
- [5] V. Dimatteo, E. Liverani, A. Ascari, A. Fortunato, *Weldability and mechanical properties of dissimilar laser welded aluminum alloys thin sheets produced by conventional rolling and Additive Manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology 302 (2022) 117512. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2022.117512](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117512).
- [6] S. Goehrke, “3X Faster 3D Printing: nLight Launches New AFX-2000 Beam-shaping Laser,” *3D Printing Industry*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/3x-faster-3d-printing-nlight-launches-new-afx-2000-beam-shaping-laser-234286/> [Accessed: 22-Sep-2025].
- [7] Stereomicroscopio Stemi 305 Zeiss,” *Stereomicroscopio Zeiss*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.micro-shop.zeiss.com/it/it/system/stemi+305-stemi+305-stereomicroscopi/10285/> [Accessed: 24-Sep-2025].
- [8] Remet IPA 30,” *Remet*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://remet.it/products/ipa-30> [Accessed: 24-Sep-2025].
- [9] Lucidatrice metallografica,” *Lucidatrice LS1*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://benetlab.com/lucidatrice/> [Accessed: 24-Sep-2025].
- [10] Microscopio Nikon,” *Microscopio Nikon*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <http://www.capraoptical.com/products/nikon/ObsoleteMicroscopes/optiphot100s.html> [Accessed: 24-Sep-2025].

- [11] Immagine Durezza,” *Sito schema durezza*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.ingenio-web.it/articoli/stima-della-resistenza-dell-acciaio-delle-barre-di-armatura-in-opera-mediante-prova-di-durezza-leeb/> [Accessed: 24-Sep-2025].
- [12] Micro Durometro,” *Foto Micro Durometro*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://m-s.it/prodotti/microdurometri-2/> [Accessed: 24-Sep-2025].
- [13] Laser Datasheet,” *Corona Fiber Laser Datasheet, Item Number: 1126155*, 11 Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.nlight.net/advanced-metal-processing> [Accessed: 24-Sep-2025].