



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

**CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA**

**CARATTERIZZAZIONE DI SALDATURE
LASER SU LEGHE DI ALLUMINIO
DISSIMILI (5754 E 43500-T5) IN
CONFIGURAZIONE DI
SOVRAPPOSIZIONE**

Tesi di laurea in ingegneria meccanica

Relatore

Prof.ssa Erica Liverani

Presentata da

Lorenzo Curzi

Sessione febbraio 2026

Anno Accademico 2024/2025



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

**CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA**

CARATTERIZZAZIONE DI SALDATURE LASER SU LEGHE DI ALLUMINIO DISSIMILI (5754 E 43500-T5) IN CONFIGURAZIONE DI SOVRAPPOSIZIONE

Tesi di laurea in ingegneria meccanica

Relatore

Prof.ssa Erica Liverani

Presentata da

Lorenzo Curzi

Sessione febbraio 2026

Anno Accademico 2024/2025

Introduzione

Negli ultimi anni l'industria automotive sta puntando in modo sempre più deciso su materiali leggeri per ridurre i pesi e migliorare l'efficienza dei componenti. In questo contesto trovano spazio le leghe di alluminio, sempre più diffuse grazie al buon equilibrio tra resistenza, peso e facilità di lavorazione.

Allo stesso tempo la produzione additiva si sta diffondendo rapidamente poiché consente di ottenere geometrie molto complesse, che con le lavorazioni tradizionali richiederebbero più passaggi o risulterebbero irrealizzabili.

Nonostante siano già presenti diversi studi sulla fattibilità della saldatura di leghe di alluminio dissimilari vi sono ancora aspetti poco chiari quando entra in gioco il materiale prodotto tramite Additive Manufacturing. La maggior parte dei lavori mostra la fattibilità di questi giunti, ma mette anche in evidenza problemi ricorrenti come la formazione di porosità, la variabilità del materiale AM e la forte dipendenza dai parametri di processo.

Un altro limite sta nella mancanza di studi che confrontino in maniera diretta diverse modalità di saldatura laser. In particolare, il confronto tra la saldatura lineare classica e la modalità Wobble è poco approfondito: non vi è ancora un'analisi chiara di come le due tecniche influenzino la geometria del cordone, la microstruttura e i difetti. Ed è proprio questo l'argomento che viene sviluppato da questo elaborato.

L'obiettivo di questa tesi è dunque analizzare come si comportano due diverse modalità di saldatura laser, quella lineare e quella Wobble, quando vengono utilizzate per unire una lamiera in lega 5754 con una lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing in lega 43500-T5.

Per raggiungere questo risultato si è partiti dall'analisi dei provini forniti, iniziando dalla geometria dei cordoni tramite microscopia ottica, per poi proseguire con l'osservazione microstrutturale e con le prove di durezza. Infine, è stata valutata la porosità interna per capire come i parametri e la tecnica di saldatura influenzino la formazione dei difetti.

L'insieme di queste analisi permette di confrontare in modo completo le due tecniche e capire quale risulti più stabile nelle condizioni studiate.

La tesi è suddivisa in quattro capitoli. Il primo introduce il contesto del lavoro e riassume i principali studi presenti in letteratura riguardo alla saldatura di leghe di alluminio dissimilari e ai limiti legati ai materiali prodotti tramite Additive Manufacturing.

Il secondo capitolo descrive in modo dettagliato i materiali impiegati, le tecniche di saldatura e le metodologie utilizzate per le analisi sperimentali.

Il terzo capitolo raccoglie i risultati ottenuti dalle prove, presentando l'andamento della geometria dei cordoni, le osservazioni microstrutturali, le misure di durezza e la valutazione delle porosità, con la relativa discussione.

Infine, il quarto capitolo riporta le conclusioni del lavoro e le considerazioni finali.

Indice

1. Stato dell'arte	2
1.1 Leghe di alluminio prodotte tramite Additive Manufacturing: utilizzo e limiti.....	2
1.2 Fattibilità delle saldature laser tra leghe di alluminio dissimili.....	2
1.3 Effetto della configurazione di posizionamento sulla saldatura di giunti dissimili.....	3
1.4 Limiti della letteratura	4
2. Materiali e Metodi	5
2.1 Materiali dei provini e tecnica di saldatura	5
2.2 Analisi Ottiche.....	7
2.3 Prove di Durezza	9
2.4 Attacco Chimico	10
3. Risultati e discussione	12
3.1 Saldatura lineare	12
3.2 Saldatura Wobble	17
3.3 Prove di Durezza	24
3.4 Difetti di Porosità.....	28
3.5 Sintesi dei risultati	31
4. Conclusioni.....	34
5. Bibliografia.....	36

1. Stato dell'arte

1.1 Leghe di alluminio prodotte tramite Additive Manufacturing: utilizzo e limiti

Negli ultimi anni sono stati studiati nuovi utilizzi delle leghe di alluminio con l'obiettivo di soddisfare le richieste di alleggerimento di peso imposte dalle normative europee nel settore automotive. In particolare, la ricerca si è concentrata sui contenitori delle batterie dei veicoli elettrici, componenti che devono garantire leggerezza senza compromettere resistenza e affidabilità.

Per rispondere a questi obiettivi si è fatto ricorso a leghe come l'AlSi10Mg utilizzate nei processi di Additive Manufacturing per realizzare geometrie complesse, ad esempio con canali di raffreddamento integrati nei moduli batteria, mantenendo al tempo stesso il minimo peso possibile. Questa soluzione si è dimostrata innovativa e funzionale, ma porta con sé alcuni limiti difficili da superare: i componenti prodotti in AM risultano poco ripetibili su larga scala e sono vincolati nelle dimensioni massime realizzabili dalla macchina di stampa.

Per superare questi limiti si è pensato di unire i componenti realizzati tramite Additive Manufacturing con parti prodotte con tecnologie convenzionali, come la laminazione. Su questo tema sono già stati condotti studi per valutare la fattibilità della saldatura tra materiali diversi, con risultati promettenti. Altri lavori si sono invece concentrati sull'individuazione della configurazione più adatta per il posizionamento dei due componenti, al fine di migliorare la qualità del giunto.

1.2 Fattibilità delle saldature laser tra leghe di alluminio dissimili

Gli studi sulla fattibilità di queste saldature sono di grande interesse perché permettono di sfruttare i vantaggi dell'Additive Manufacturing riducendone al tempo stesso i principali limiti. Un lavoro significativo in questo ambito è quello presentato in [1] dove è stata analizzata la saldatura tra una lamiera 6082-T6 ottenuta per laminazione tradizionale e una lamiera A357 realizzata tramite LPBF (Laser-based Powder Bed Fusion).

I risultati della ricerca hanno confermato che la saldatura è tecnicamente realizzabile e che le proprietà del giunto dipendono in modo significativo dalle condizioni iniziali del materiale A357. La lamiera tradizionale ha mostrato i valori più alti di resistenza, ma con l'applicazione di trattamenti post-processo come il Direct Aging (DA) o il trattamento T6 il materiale AM ha raggiunto prestazioni più vicine a quelle del laminato convenzionale.

Lo studio ha inoltre analizzato i difetti di porosità, essi devono essere ridotti al minimo poiché compromettono direttamente le proprietà meccaniche del giunto. È stato osservato che un aumento della velocità di saldatura comporta una diminuzione della porosità e della dimensione media dei difetti. È emerso anche che questi difetti tendono a concentrarsi principalmente al centro del cordone e, in particolare, in prossimità della lamiera LPBF.

In conclusione, lo studio mostra come la saldatura laser tra leghe additive e tradizionali sia possibile, ma le prestazioni del giunto dipendono fortemente dallo stato del materiale AM. In particolare, le lamiere in condizione *as built* presentano proprietà meccaniche spesso insufficienti per l'impiego previsto, mentre i trattamenti post-stampa permettono di migliorarne sensibilmente il comportamento. Altri studi si sono invece concentrati sull'influenza del posizionamento relativo delle due lamiere, tema che sarà discusso nel paragrafo seguente.

1.3 Effetto della configurazione di posizionamento sulla saldatura di giunti dissimili

Altri studi hanno analizzato in modo specifico come il posizionamento delle due lamiere in configurazione overlap influenzi la qualità della saldatura. In questo contesto, il lavoro [2] ha preso in esame una lamiera convenzionale in alluminio AA1050 e una lamiera realizzata in lega AlSi10Mg tramite Additive Manufacturing.

L'obiettivo era comprendere se disporre il materiale additivo sopra o sotto nella saldatura dei giunti potesse modificare la microstruttura, il livello di porosità e, di conseguenza, le proprietà meccaniche finali.

I risultati hanno evidenziato differenze significative a seconda del posizionamento del materiale AM durante la saldatura. In particolare, con l'AM posto al di sopra si osservano:

- una buona penetrazione del cordone, con un bagno fuso più ampio;
- una microstruttura più raffinata, caratterizzata da grani equiassici e colonnari sottili;
- un'elevata porosità con difetti distribuiti soprattutto nella zona centrale del giunto;
- proprietà meccaniche leggermente superiori rispetto alla configurazione opposta, ma comunque inferiori a quelle del materiale tradizionale di base.

Al contrario, con il materiale AM posizionato al di sotto si riscontra:

- un cordone più regolare ma con minore penetrazione;
- una microstruttura più uniforme, seppur meno raffinata;
- una riduzione significativa della porosità;
- una resistenza leggermente inferiore, ma compensata dal fatto che le porosità critiche risultano molto più limitate.

Grazie a questo studio è possibile comprendere come il posizionamento della lamiera AM rappresenti un fattore critico nella qualità del giunto saldato.

I risultati portano a concludere che la configurazione con la lamiera AM posta inferiormente costituisce la scelta più affidabile: pur comportando una lieve riduzione delle proprietà meccaniche, essa garantisce una significativa diminuzione della porosità portando a un recupero delle proprietà meccaniche perse a causa del posizionamento e a una maggiore affidabilità della struttura.

1.4 Limiti della letteratura

Come evidenziato dagli studi precedenti, il difetto più critico della saldatura laser è rappresentato dalla porosità che si forma nel cordone, con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche del giunto che porta alla necessità di successivi trattamenti sulla lamiera stampata.

Da ciò emerge una mancanza nella ricerca scientifica: un'analisi mirata alla possibilità di raggiungere le proprietà meccaniche target senza dover ricorrere a trattamenti aggiuntivi sulla lega colata. Inoltre, la letteratura mette in luce l'assenza di studi specifici dedicati alla saldatura in configurazione *overlap* tra leghe di alluminio tradizionali e leghe AM come l'AlSi10Mg.

In conclusione, lo stato dell'arte mette in evidenza alcune importanti mancanze, che costituiscono il punto di partenza del lavoro qui presentato e nel quale la ricerca si inserisce.

2. Materiali e Metodi

2.1 Materiali dei provini e tecnica di saldatura

Nello svolgimento di questo lavoro sono state impiegate due leghe di alluminio:

- Lega 5754, ottenuta tramite processi di laminazione tradizionali, spessore 1,5 mm.
- Lega 43500-T5 (Silafont AlSi10MgMn), realizzata mediante Additive Manufacturing e successivamente sottoposta a trattamento termico di invecchiamento artificiale (T5), spessore > 5 mm.

Le due leghe sono state saldate in configurazione di sovrapposizione (overlap), con spessori prefissati come riportato in Figura 2.1.1.

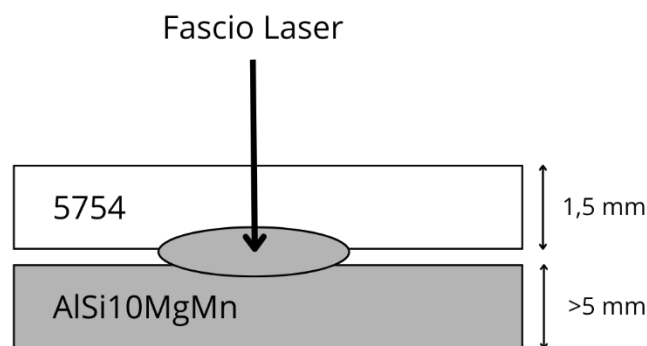


Figura 2.1.1: Configurazione Saldatura Overlap

Questa saldatura è stata poi realizzata tramite l'utilizzo di un laser multimodo le cui principali caratteristiche sono riportate in tabella 2.1.1.

Lunghezza d'onda [nm]	1070
BPP [mm.mrad]	2
Potenza max [kW]	3
Diametro fibra di trasporto [μm]	50
Diametro spot con focale 163 mm [μm]	68

Tabella 2.1.1: Proprietà laser multimodo

Inoltre, si sono studiate due tipologie di saldature effettuate con la tecnologia multimodo: Lineare e Wobble.

La *saldatura lineare* rappresenta la modalità più semplice e tradizionale del processo: il fascio laser si muove lungo una traiettoria rettilinea mantenendo costante la posizione del punto focale e i principali parametri di processo.

La saldatura con wobbling, a differenza di quella lineare, prevede un movimento oscillatorio del fascio, generalmente di forma circolare o ellittica, che permette di ampliare il diametro effettivo del

fascio e migliorare la distribuzione dell'energia nel bagno fuso. Questa tecnica consente di ridurre la formazione di porosità e di ottenere un cordone più uniforme.

Queste due tecniche sono messe a confronto all'interno della Figura 2.1.2.

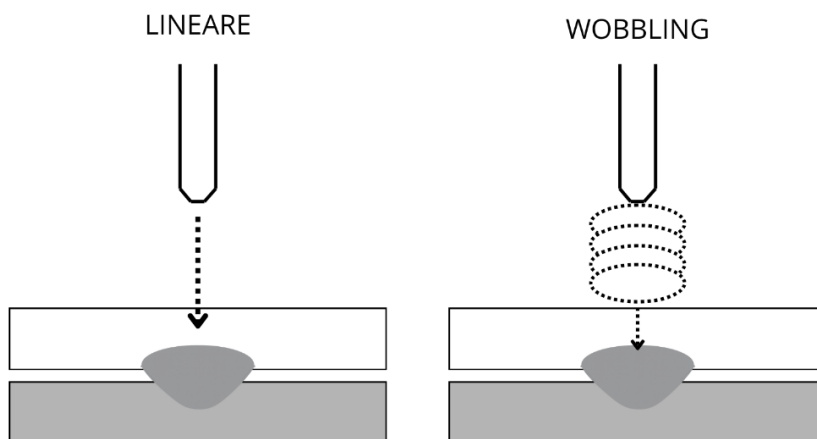


Figura 2.1.2: Differenze tra saldatura lineare e Wobble

Con ognuna delle due tipologie di saldatura sono state eseguite differenti prove in cui si andavano a variare i parametri di processo. Di seguito sono riportati prima i parametri per le prove lineare poi quelli per le prove wobbling.

TEST	P [W]	V (MM/S)	FLUENZA [J/CM2]
1	2000	150	2,50E+03
2	2000	200	1,87E+03
3	2000	250	1,50E+03
4	2500	150	3,12E+03 (2)
5	2500	200	2,34E+03
6	2500	250	1,87E+03
7	2500	300	1,56E+03
8	2500	350	1,34E+03
9	1500	50	5,62E+03 (1)
10	1500	100	2,81E+03 (3)
11	1500	150	1,87E+03

Tabella 2.1.2: Parametri di processo saldatura lineare (le parti evidenziate indicano test che non sono stati svolti)

TEST	P [W]	V (MM/S)	F [HZ]
12	1500	50	150
13	1500	100	150
14	1500	150	150
15	1500	150	300
16	1500	100	150
17	1500	100	300
18	2000	100	300

19	1500	150	300
20	2000	150	300
21	1750	100	150
22	2000	100	150
23	2250	100	150
24	2500	100	150
25	2000	100	150
26	1500	100	200
27	1750	100	200
28	2000	100	200
29	2250	100	200
30	2500	100	200
31	1500	75	150

Tabella 2.1.3: Parametri di processo saldatura con Wobble (le parti evidenziate indicano test che non sono stati svolti)

Le combinazioni di parametri selezionate hanno consentito di eseguire un ampio numero di prove sperimentali, finalizzate alla valutazione della qualità del giunto in diverse condizioni di processo.

2.2 Analisi Ottiche

Per prima cosa, i provini sono stati ripuliti e successivamente fotografati tramite macroscopio al fine di osservare le saldature prima delle successive lavorazioni. Di seguito sono riportati alcuni esempi delle immagini acquisite.

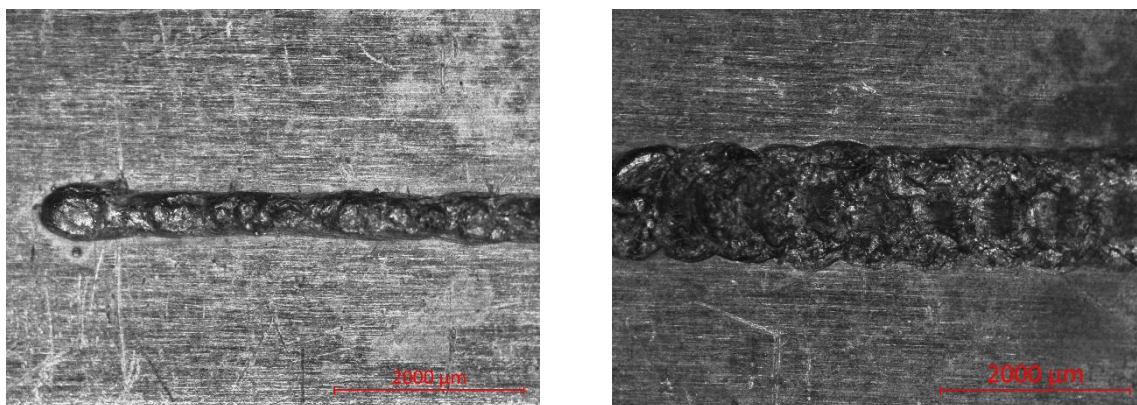


Figura 2.2.1: Esempi di immagini macroscopiche: a sinistra saldatura lineare, a destra saldatura con tecnica wobbling

A seguito di questa fase, i provini sono stati inseriti in una macchina resinatrice per poter essere inglobati all'interno della resina così da renderli più facilmente lavorabili. Successivamente si è proceduto con la lucidatura mediante l'utilizzo di carte abrasive a grana progressivamente più fine.

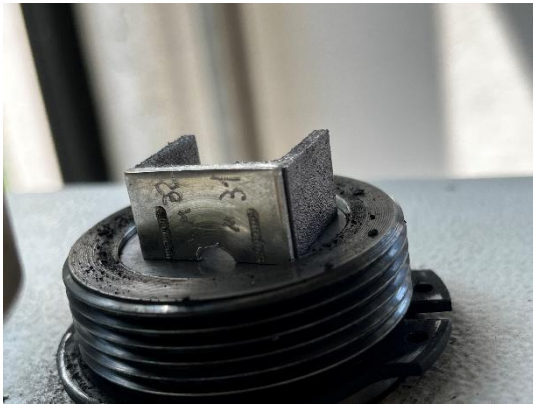


Figura 2.2.2: A sinistra un provino inserito all'interno della macchina resinatrice, a destra due esempi di provini dopo la fase di lucidatura

Per ottenere una superficie perfettamente liscia e adatta all'osservazione al microscopio è stato infine impiegato un panno con sospensione di allumina, il quale consente di ottenere una lucidatura completa del campione in alluminio.

Una volta completate tutte le fasi di lucidatura si è passati all'utilizzo del microscopio ottico. Impiegando una lente con ingrandimento 5X sono state eseguite le seguenti misurazioni su ciascun cordone di saldatura analizzato:

- Larghezza interfaccia
- Larghezza superficie
- Profondità
- Gap
- Rimescolamento lamiera

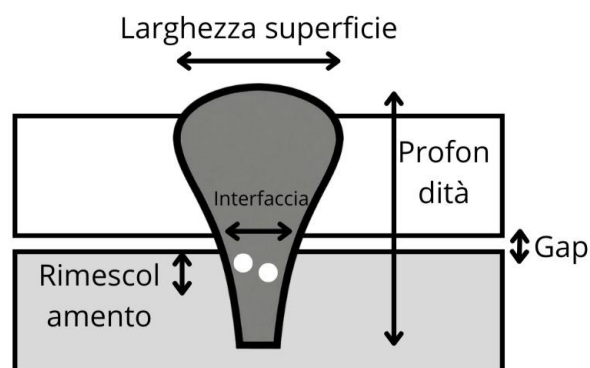


Figura 2.2.3: Schema delle misure del cordone di saldatura

Le analisi ottiche hanno permesso di eseguire una prima valutazione dei cordoni di saldatura, consentendo inoltre di individuare eventuali difetti da porosità e di selezionare i provini più idonei per le successive prove di durezza.

2.3 Prove di Durezza

Le prove successive sono state eseguite utilizzando una macchina per la determinazione della durezza Micro-Vickers, con particolare attenzione all'individuazione delle diverse zone caratteristiche del giunto di saldatura nella sezione trasversale:

- Materiale di base (MB): rappresenta la durezza tipica della lamiera non interessata dal processo di saldatura
- Zona fusa (ZF): corrisponde al cordone di saldatura, dove il materiale ha subito completa fusione e successiva solidificazione
- Zona termicamente alterata (ZTA): area adiacente al cordone che, pur non essendo fusa, ha subito modifiche microstrutturali dovute all'apporto termico, con conseguente variazione delle proprietà meccaniche rispetto al materiale base

Sono state inoltre eseguite prove di durezza lungo la sezione longitudinale del cordone, al fine di individuare l'andamento della durezza nel passaggio dalle lamiere al cordone di saldatura:

- Lamiera superiore: rappresenta la durezza tipica della lamiera superiore all'interno del cordone di saldatura
- Lamiera inferiore: rappresenta la durezza tipica della lamiera inferiore all'interno del cordone di saldatura

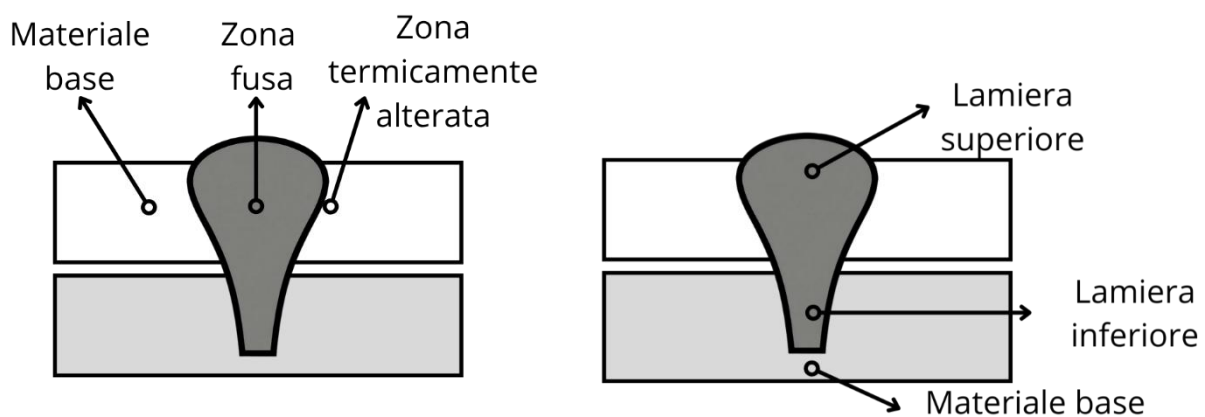


Figura 2.3.1: Schema esplicativo delle prove di durezza eseguite: a sinistra le misurazioni lungo la sezione trasversale del cordone, mentre a destra quelle lungo la sezione longitudinale

Per individuare con chiarezza le diverse zone del giunto sono state eseguite una serie di indentazioni sui cordoni selezionati, distanziate tra loro di un passo predefinito e costante. Anche il carico applicato è stato mantenuto invariato per tutta la prova, così da garantire risultati confrontabili tra cordoni e provini.

Di seguito sono presentati due schemi riepilogativi dei parametri impiegati nelle indentazioni.

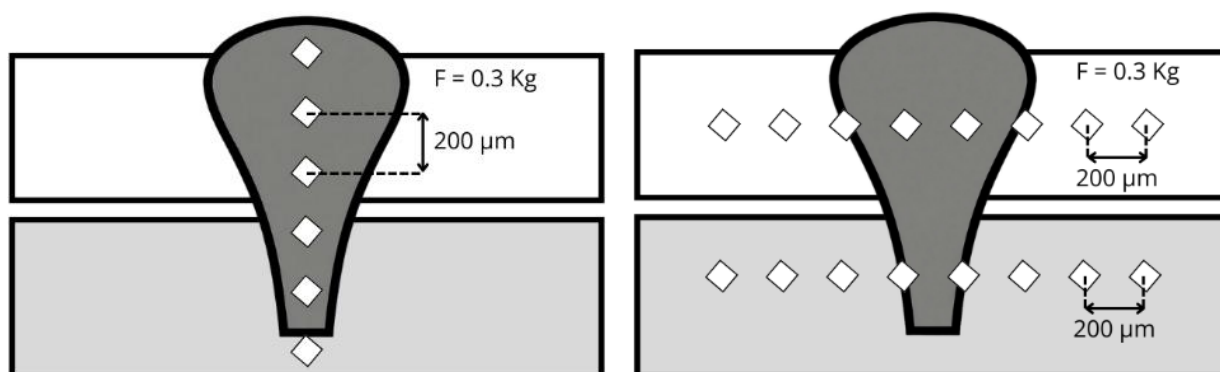


Figura 2.3.2: Schema delle indentazioni eseguite nelle prove di durezza: a sinistra la disposizione longitudinale, a destra quella trasversale, entrambe con passo di 200 µm e carico applicato pari a 0,3 kg.

Questa modalità di prova ha permesso di identificare in modo chiaro le zone elencate in precedenza; l'attacco chimico, che verrà presentato di seguito, ha inoltre consentito di osservarle anche dal punto di vista microstrutturale, affiancando alla misura numerica una conferma visiva.

2.4 Attacco Chimico

A seguito delle prove di durezza si è passati a un'ulteriore analisi finalizzata all'identificazione delle tre zone principali presenti in sezione trasversale del cordone di saldatura. Per tale scopo si è ricorso alla tecnica dell'attacco chimico, una metodologia che consente di evidenziare le differenze microstrutturali tra le varie aree del giunto.

Il principio del metodo si basa sulla reazione tra la superficie in alluminio e una specifica soluzione elettrolitica attivata mediante l'applicazione di una corrente controllata generata da uno strumento dedicato, con parametri opportunamente impostati in funzione della lega di alluminio oggetto di analisi.

Lega	Serie 5754	AlSi10MgMn
Tensione	50 V	5 min
Tempo	35 V	45 sec

Tabella 2.4.1: Parametri utilizzati per attacco chimico

I parametri adottati per la lega della serie 5000 derivano da quelli utilizzati per la lega della serie 6000, pertanto potrebbe rendersi necessaria una successiva ottimizzazione al fine di individuare le condizioni più appropriate per il materiale in esame.

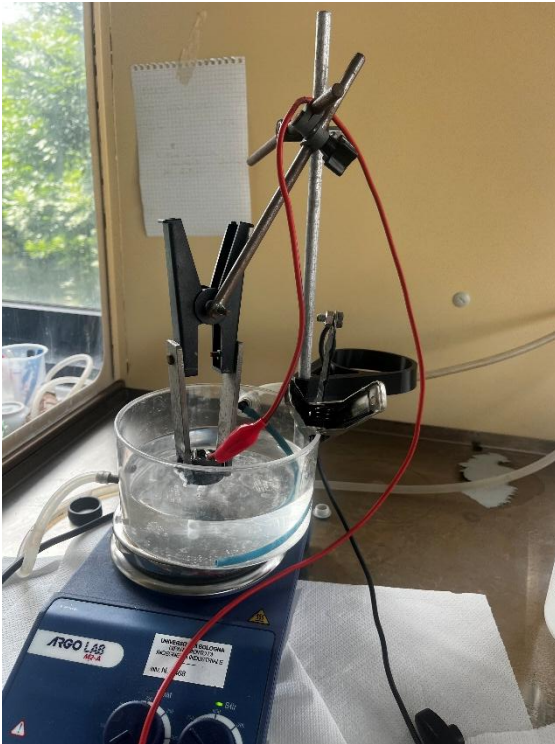


Figura 2.4.1: Impostazione sperimentale per l'attacco chimico dei provini di alluminio

Questa procedura è stata eseguita su diversi campioni sperimentali, concentrandosi di volta in volta su un singolo materiale.

L'attacco ottimizzato per la lega della serie 5000 fornisce risultati soddisfacenti su quest'ultima ma tende a provocare un quasi completo oscuramento della lega Additive, e viceversa l'attacco adatto alla lega Additive non permette di ottenere un contrasto adeguato sulla lega 5000.

Infine, si è proceduto con l'osservazione al microscopio ottico, utilizzando ingrandimenti compresi tra 5X e 20X, per analizzare in dettaglio la microstruttura e i grani presenti all'interno del cordone di saldatura.

3. Risultati e discussione

3.1 Saldatura lineare

In questa sezione vengono analizzati i risultati ottenuti dalla saldatura lineare tradizionale mettendoli in correlazione con i parametri di saldatura impiegati. In seguito, verrà analizzata la microstruttura del cordone lineare sulla base dei risultati ottenuti dall'attacco chimico eseguito sui provini selezionati.

Test	Larghezza interfaccia [μm]	Larghezza superficie [μm]	Profondità [μm]	Gap [μm]	Rimescolamento lamiera [μm]
1	641	434	1377	88	212
2	446	512	Penetrazione completa	95	646
3	650	583	Penetrazione completa	106	271
4	700	710	Penetrazione completa	127	Trascurabile
5	568	427	Penetrazione completa	93	450
6	407	308	1485	137	130
7	690	718	Penetrazione completa	135	582
8	553	543	Penetrazione completa	47	764
9	736	674	1139	153	291
10	812	915	1181	115	819

Tabella 3.1.1: Misure geometriche ottenute sulle saldature lineari

Dall'analisi delle misure geometriche riportate in Tabella 3.1.1 emerge una chiara correlazione tra i parametri di processo, presentati in Tabella 2.1.2, e le dimensioni del cordone.

L'aumento della potenza comporta una penetrazione più profonda del cordone, fino a numerosi casi di completa fusione tra le lamiera (Penetrazione completa), evidenziando un maggiore apporto termico nel bagno fuso.

Allo stesso modo, un aumento della velocità di saldatura comporta una minore quantità di calore localizzato nel bagno fuso, poiché la sorgente laser si sposta più rapidamente lungo il giunto. Ciò riduce la larghezza e la profondità del cordone, pur consentendo in alcune condizioni di mantenere la completa penetrazione grazie alla stabilità del processo.

Considerando la fluenza come parametro combinato tra potenza e velocità si osserva che i valori intermedi rappresentano la condizione ottimale per ottenere un cordone regolare e una penetrazione completa, mentre valori troppo alti o troppo bassi portano a un apporto termico non uniforme.

Il grado di rimescolamento tra le lamiere non mostra un andamento univoco rispetto ai parametri di processo suggerendo che il fenomeno sia influenzato non solo dall'apporto termico ma anche da variabili locali, come la stabilità del bagno fuso e il contatto tra le superfici.

Per una lettura più immediata delle tendenze, i parametri principali sono stati anche rappresentati tramite grafici di dispersione, così da mettere in evidenza le relazioni tra potenza, velocità e geometria del cordone.

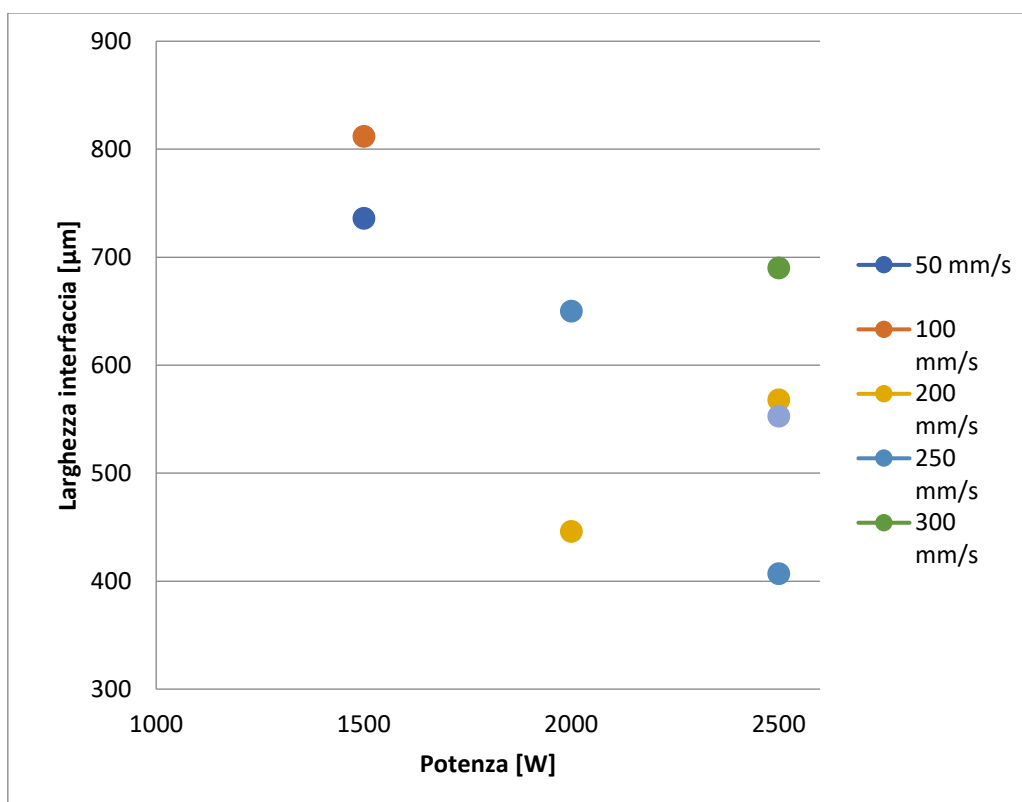


Figura 3.1.1: Relazione tra potenza e larghezza dell'interfaccia nei cordoni lineari. La larghezza tende a ridursi con l'aumento della potenza, mostrando però una dispersione evidente dovuta alle diverse velocità di avanzamento

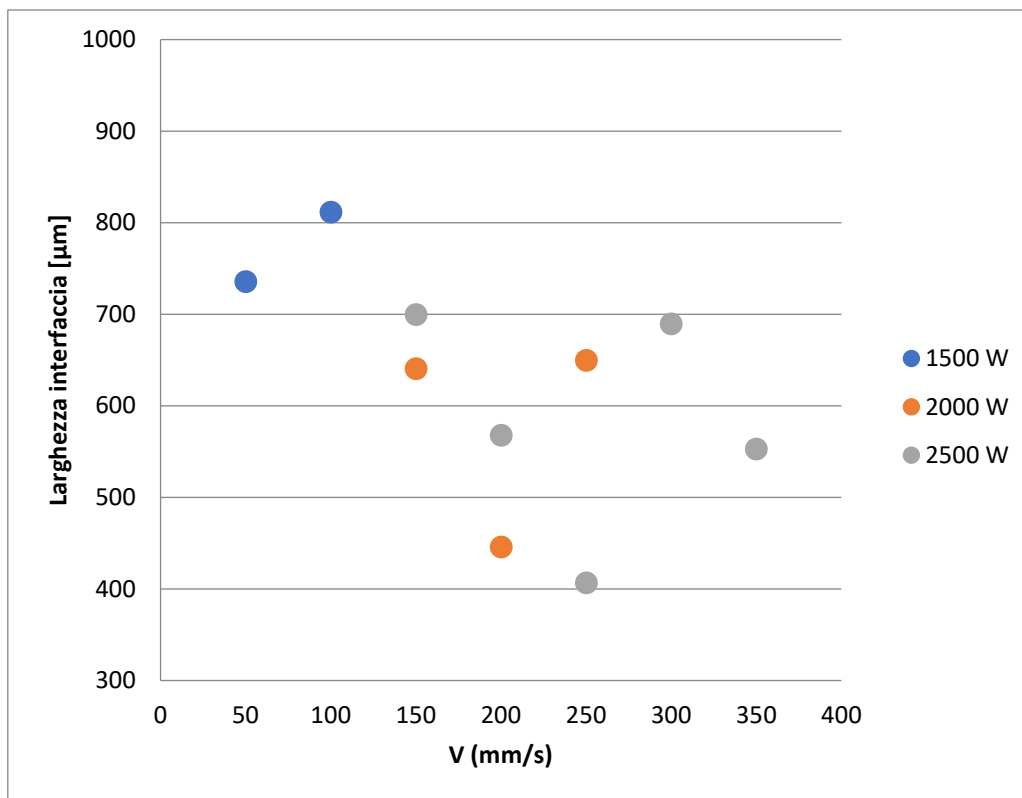


Figura 3.1.2: Relazione tra velocità di avanzamento e larghezza dell'interfaccia nei cordoni lineari. All'aumentare della velocità la larghezza tende a ridursi, con una dispersione significativa che riflette la sensibilità del processo alle condizioni locali del bagno fuso

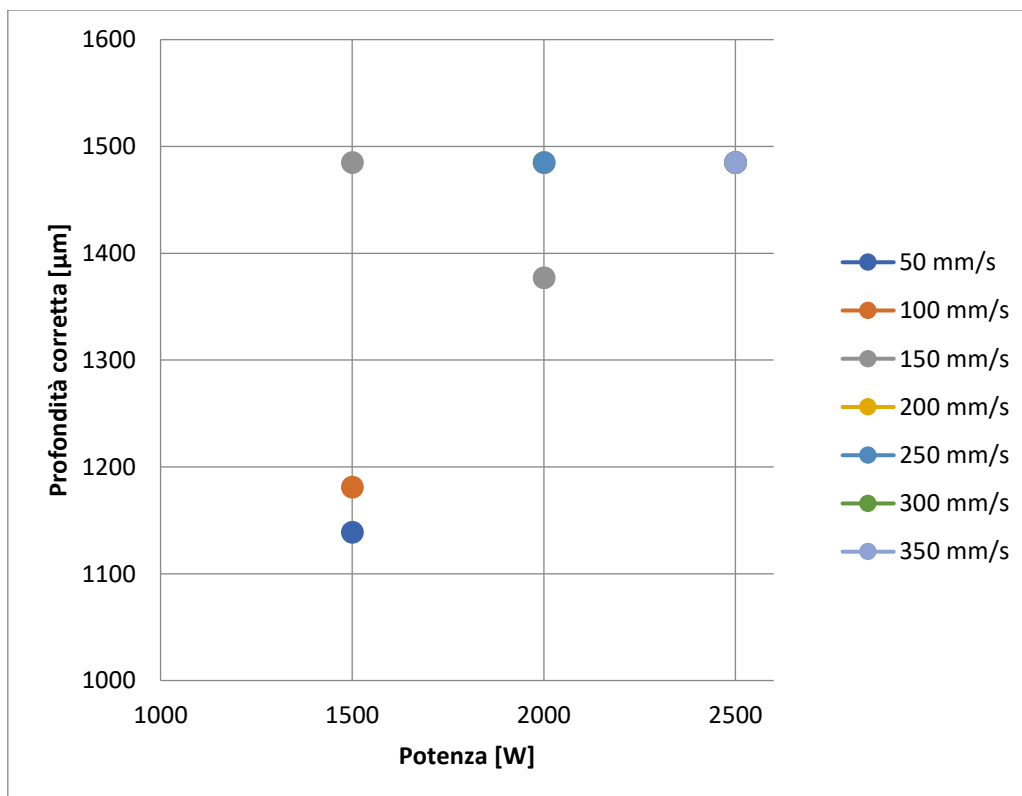


Figura 3.1.3: Relazione tra potenza e profondità di penetrazione nei cordoni lineari. A 2500 W la penetrazione risulta sempre completa, mentre a 1500 W compaiono valori inferiori che evidenziano l'effetto della minore energia fornita al bagno fuso

Grazie alle misure ottenute è stato possibile individuare i cordoni più idonei sui quali eseguire le prove di durezza. Per la tipologia lineare sono stati selezionati i cordoni 3 e 9, i cui risultati verranno presentati nei paragrafi successivi.

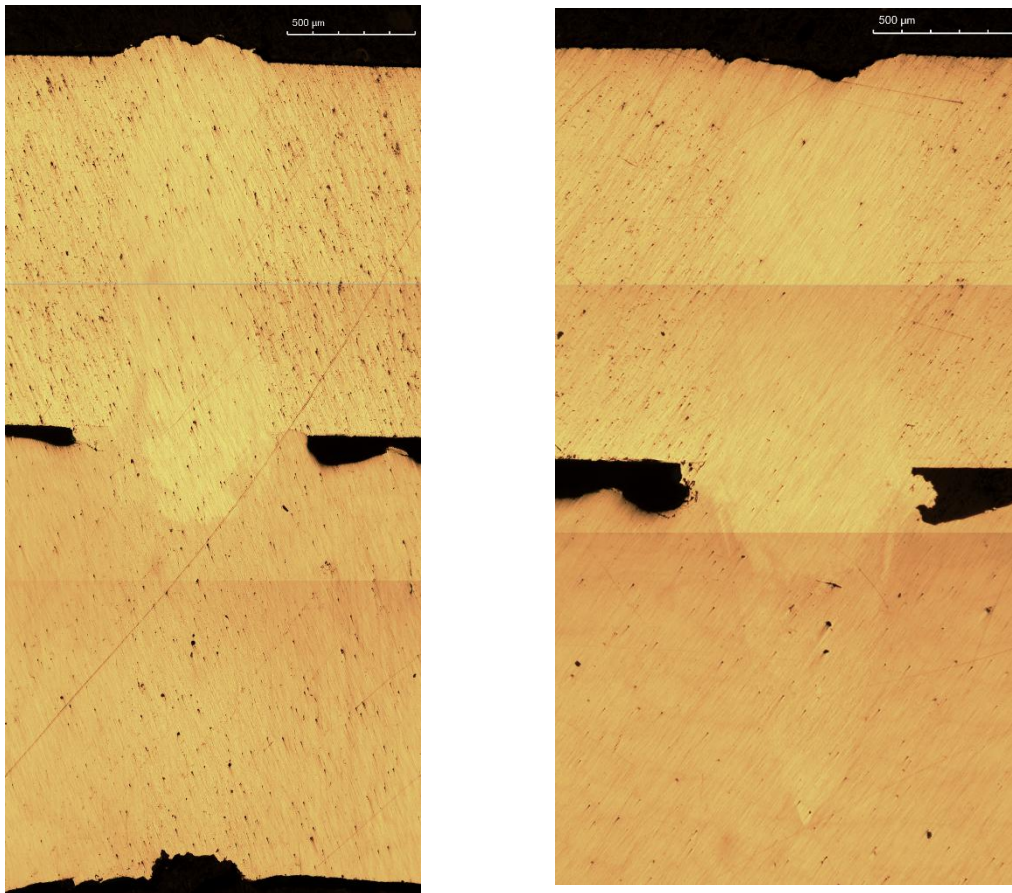


Figura 3.1.4: Confronto tra cordoni ottenuti con parametri di saldatura differenti: a sinistra il cordone 3, realizzato con potenza e velocità elevate; a destra il cordone 9, caratterizzato da potenza e velocità inferiori

A seguito dell'analisi geometrica dei cordoni è stata eseguita un'osservazione al microscopio ottico sui provini selezionati per la saldatura lineare. Lo scopo di questa analisi è quello di esaminare la struttura del giunto e identificare le diverse zone che si formano in seguito al processo di saldatura.

Attraverso l'attacco chimico è stato possibile mettere in evidenza la zona fusa, la zona termicamente alterata e il materiale di base, così da valutare in modo qualitativo l'estensione di ciascuna e la continuità tra le due lamiere.

Le immagini riportate di seguito mostrano la microstruttura rilevata.

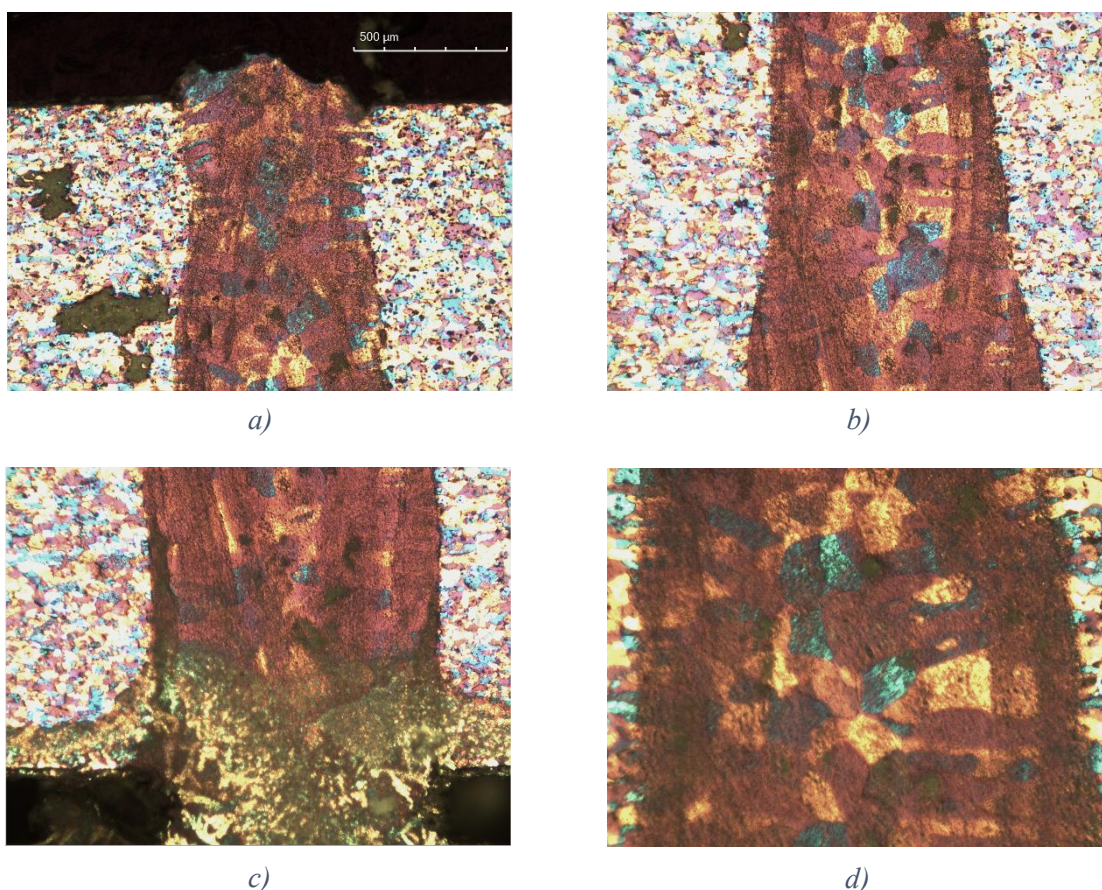


Figura 3.1.5: Analisi microstrutturale del cordone 6 (saldatura lineare): (a) la parte superiore del cordone con la zona fusa visibile nella lamiera superiore, (b) la regione centrale della lamiera superiore, (c) la parte inferiore della stessa lamiera in prossimità della zona termicamente alterata, e (d) il dettaglio ingrandito della zona fusa centrale (20X)

Dalle immagini riportate in Figura 3.1.5 si può osservare la parte superiore della lamiera saldata, dove è visibile la zona interessata dal passaggio del fascio laser.

La zona fusa risulta ben definita e con un apporto termico sufficiente a garantire una buona continuità del materiale. Nella parte centrale si nota un rimescolamento più marcato, indice di una solidificazione regolare e di un bagno di fusione stabile durante il processo.

Scendendo verso il fondo della lamiera, la zona fusa tende a ridursi fino a scomparire: in quest'area non si ha più fusione del materiale di base, ma solo un riscaldamento localizzato che definisce la zona termicamente alterata.

L'immagine con ingrandimento 20X mostra in modo più chiaro la parte centrale del cordone, dove la solidificazione appare uniforme e priva di difetti evidenti.

In conclusione, la saldatura lineare ha mostrato un buon livello di stabilità del processo e una corretta formazione del cordone.

Le misure geometriche hanno evidenziato come la penetrazione e le dimensioni del bagno fuso siano fortemente influenzate dall'apporto termico, in particolare dalla combinazione tra potenza e velocità di avanzamento.

Le osservazioni microstrutturali hanno confermato la presenza di una zona fusa continua e ben definita, seguita da una zona termicamente alterata che si estende in modo graduale all'interno della lamiera superiore, senza discontinuità evidenti.

Nel complesso, la saldatura lineare risulta efficace e rappresenta una buona base di confronto per la successiva analisi dei giunti realizzati con la tecnica Wobble.

3.2 Saldatura Wobble

In questa sezione vengono analizzati i risultati ottenuti dalle prove di saldatura realizzate con la tecnica Wobble, mettendo in relazione i parametri di processo con le caratteristiche geometriche e microstrutturali del cordone.

L'obiettivo è valutare come l'oscillazione del fascio laser influenzi la stabilità del bagno fuso e la qualità complessiva del giunto, confrontando i risultati con quelli ottenuti nella saldatura lineare.

Successivamente vengono discusse le osservazioni microstrutturali eseguite tramite attacco chimico, con l'intento di identificare le principali zone del giunto e valutarne la continuità metallurgica.

Test	Larghezza interfaccia [μm]	Larghezza superficie [μm]	Profondità [μm]	Gap [μm]	Rimescolamento lamiere [μm]
12	1392	1795	1485	43	233
13	1110	1017	1202	104	522
14	986	721	549	112	211
15	938	997	615	119	297
16	1291	1343	778	95	477
17	1244	1143	380	85	380
18	1072	1384	1030	121	787
21	1405	1449	1338	70	429
22	1315	1291	978	41	487
23	1438	1407	998	113	645

Test	Larghezza interfaccia [μm]	Larghezza superficie [μm]	Profondità [μm]	Gap [μm]	Rimescolamento lamiera [μm]
24	1660	1418	Penetrazione completa	222	866
25	1562	1473	789	136	129
26	1280	1388	694	78	105
27	1555	1489	715	73	383
28	1623	1383	1041	197	590
29	1651	1376	997	135	503
30	1814	1485	1335	170	1072
31	1186	1306	643	85	407
32	1407	1546	483	70	325

Tabella 3.2.1: Misure geometriche ottenute sulle saldature Wobble

Dall'analisi delle misure geometriche riportate in Tabella 3.2.1 emerge una relazione tra i parametri di processo, presentati in Tabella 2.1.3, e le dimensioni del cordone ottenute con la tecnica Wobble.

L'oscillazione del fascio laser influisce in modo evidente sulla distribuzione del calore e, di conseguenza, sulla forma complessiva del giunto.

All'aumentare della potenza non si osserva sempre un incremento diretto della profondità di penetrazione. L'oscillazione del fascio tende a redistribuire parte dell'energia lateralmente lungo il cordone, ampliando l'area riscaldata ma riducendo l'intensità termica concentrata nel punto focale.

Di conseguenza, l'effetto dell'aumento di potenza risulta meno marcato rispetto alla saldatura lineare portando a un cordone generalmente più largo e regolare, ma con variazioni di profondità meno prevedibili, influenzate principalmente dalla combinazione tra velocità e frequenza di oscillazione.

L'incremento della velocità di avanzamento comporta una riduzione sia della larghezza superficiale sia della profondità del cordone, poiché il tempo di interazione tra il fascio e il materiale diminuisce.

Tuttavia, rispetto ai cordoni lineari, quelli realizzati con la tecnica Wobble mostrano una maggiore stabilità del processo: la penetrazione, pur riducendosi, rimane più costante tra le diverse condizioni di prova grazie a una distribuzione termica più uniforme lungo il giunto.

L'effetto combinato tra potenza, velocità e frequenza di oscillazione sembra favorire una maggiore stabilità del bagno fuso e una distribuzione più regolare del materiale all'interno del cordone. Questo

comportamento suggerisce una solidificazione più controllata rispetto ai campioni ottenuti con la saldatura lineare, sebbene l'effettiva omogeneità dovrà essere verificata tramite analisi microstrutturale.

In generale, la tecnica Wobble permette di ottenere cordoni più larghi e una transizione più estesa tra le due lamiere, ma introduce una variabilità maggiore rispetto alla saldatura lineare. L'oscillazione del fascio rende il processo più sensibile ai parametri impostati e alle condizioni locali del bagno fuso, con differenze più marcate tra un cordone e l'altro.

Per rendere più immediata la lettura di queste differenze, i principali parametri di processo sono stati rappresentati anche tramite grafici di dispersione, così da evidenziare le relazioni tra potenza, velocità e geometria del cordone.

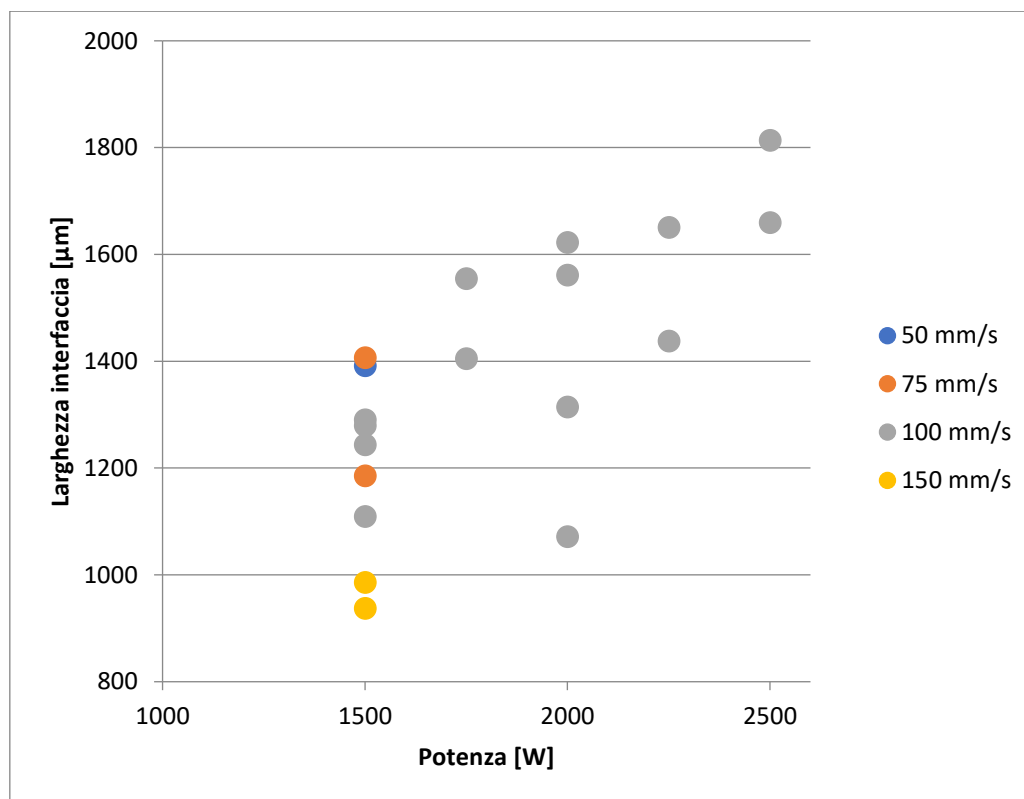


Figura 3.2.1: Relazione tra potenza e larghezza dell'interfaccia nei cordoni Wobble. Il grafico mostra una tendenza crescente della larghezza dell'interfaccia con la potenza, insieme a una variabilità più marcata tipica di questa modalità di saldatura

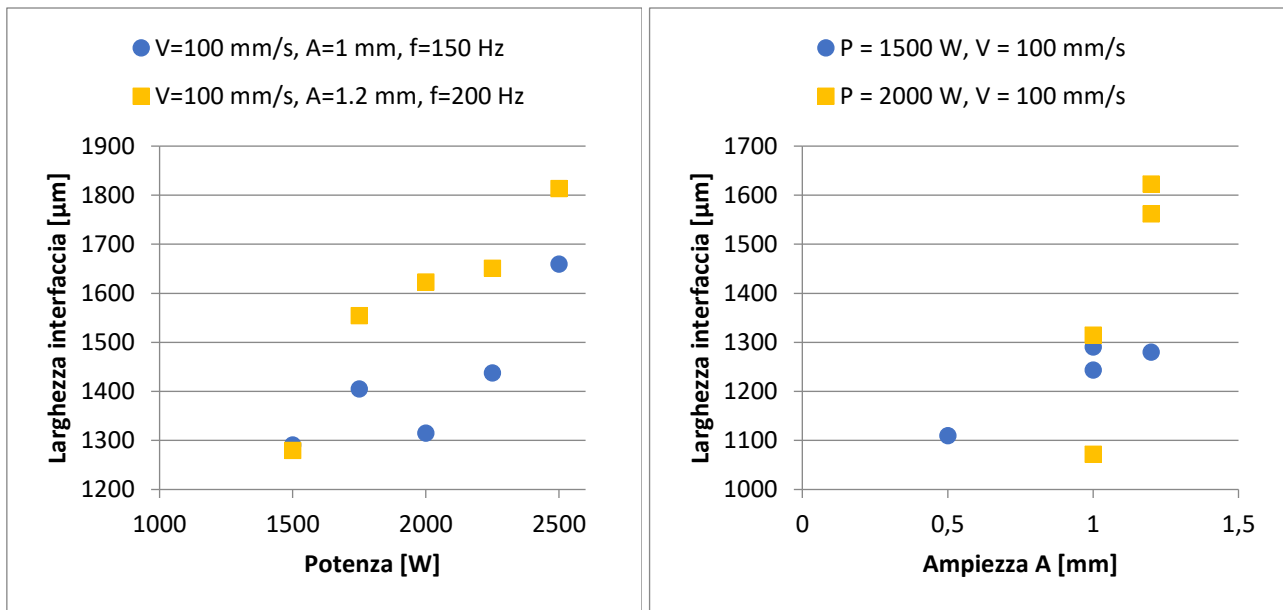


Figura 3.2.2: Relazione tra potenza, ampiezza e larghezza dell'interfaccia nei cordoni Wobble. Il grafico di sinistra mostra l'evoluzione della larghezza al variare della potenza per due configurazioni del processo, mentre quello di destra evidenzia l'effetto dell'ampiezza A mantenendo costanti velocità e potenza

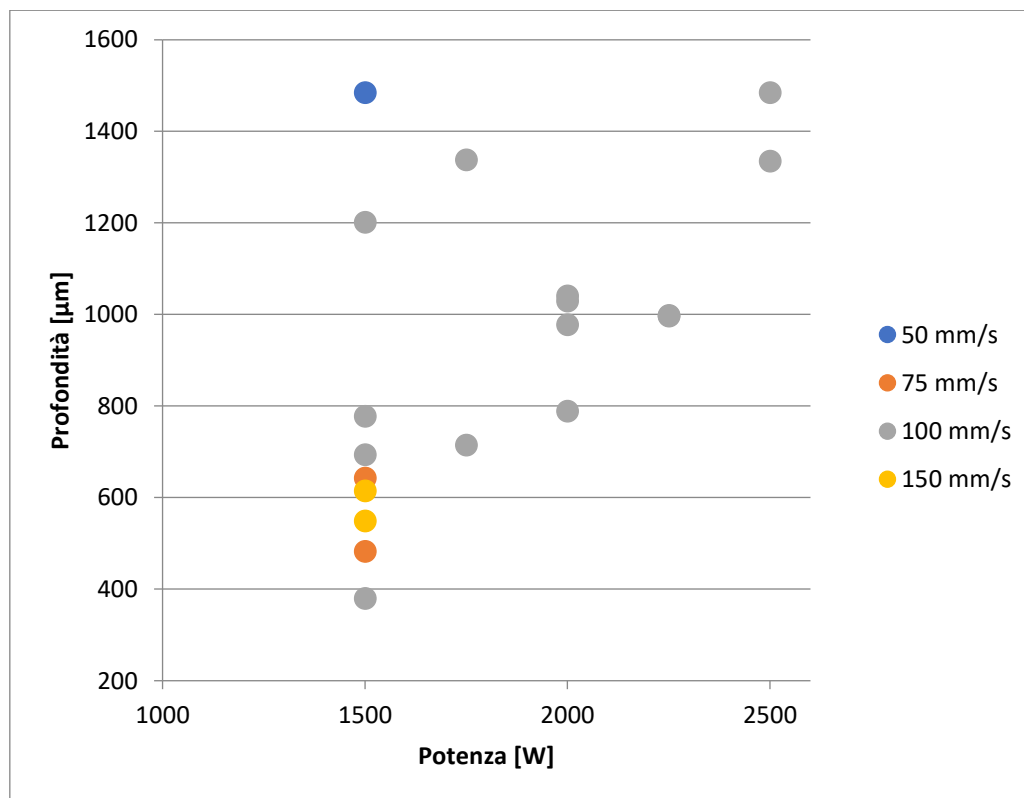


Figura 3.2.3: Relazione tra potenza e profondità di penetrazione nei cordoni Wobble. La profondità mostra una forte dispersione e non segue una correlazione univoca con la potenza, a causa della redistribuzione dell'energia introdotta dall'oscillazione del fascio

Grazie alle misure ottenute sono stati individuati i cordoni più idonei per le prove di durezza. Per la tipologia Wobble sono stati selezionati i cordoni 15, 25, 29 e 31, in quanto caratterizzati da una minore presenza di porosità.

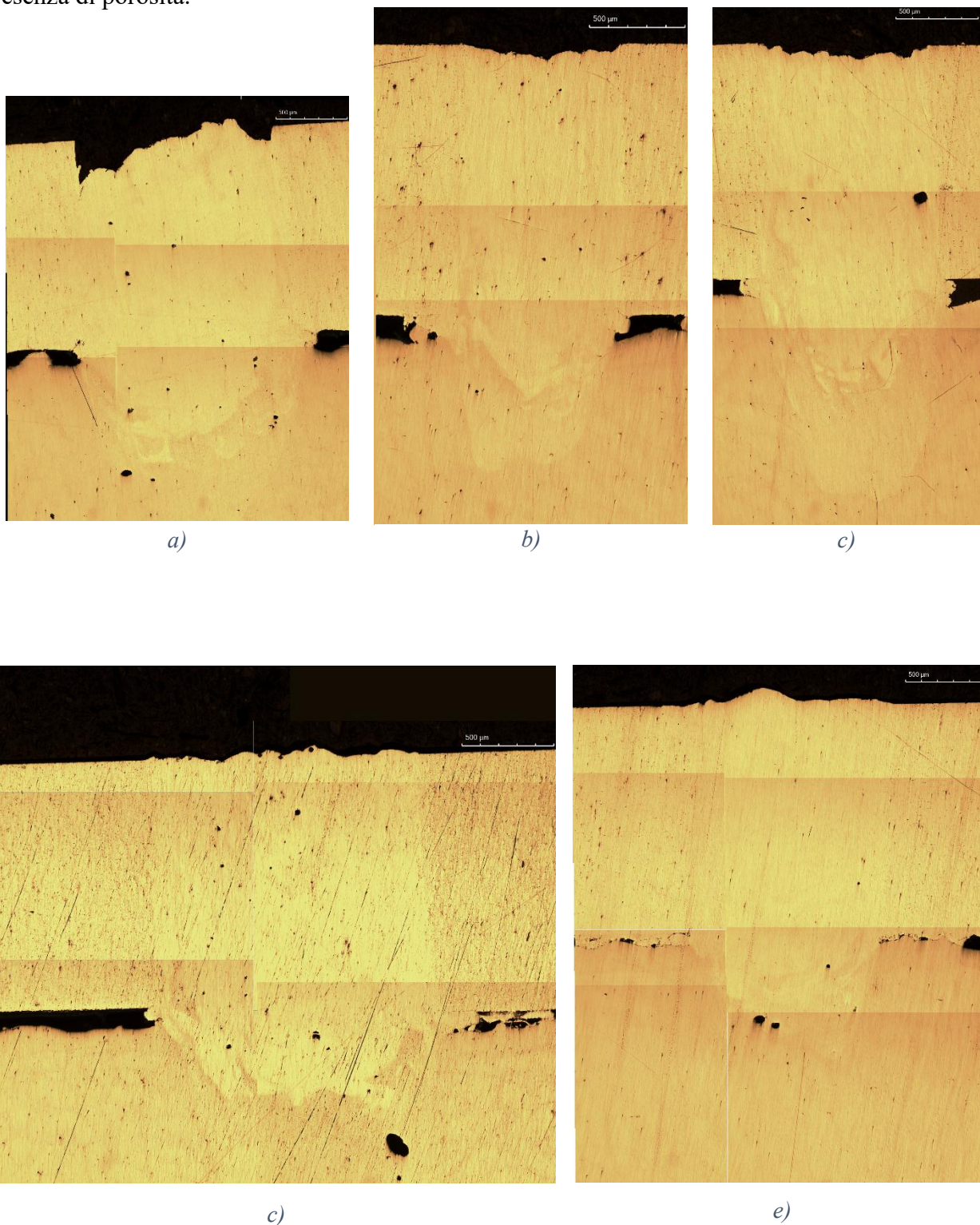
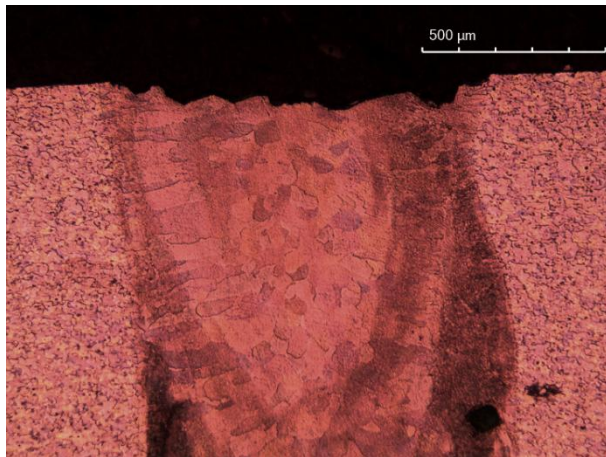


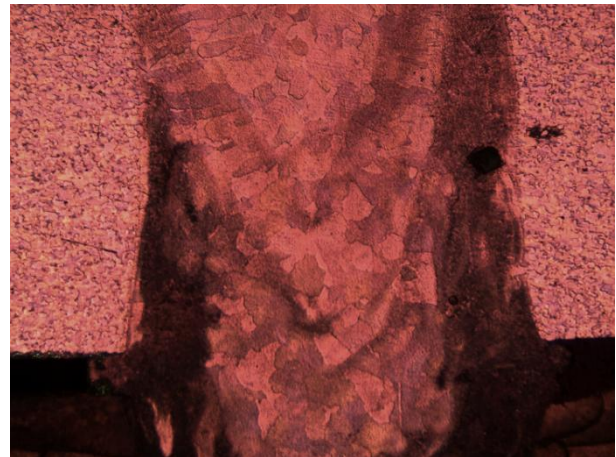
Figura 3.2.4: Confronto tra cordoni ottenuti con la tecnica Wobble: (a) cordone 13, non impiegato per le prove di durezza ma utile a confronto; (b) cordone 15; (c) cordone 29; (d) cordone 25; (e) cordone 31

Dopo la caratterizzazione geometrica dei cordoni si è passati all'osservazione delle sezioni lucidate mediante microscopio ottico, con l'obiettivo di analizzare la microstruttura dei giunti realizzati con la tecnica Wobble.

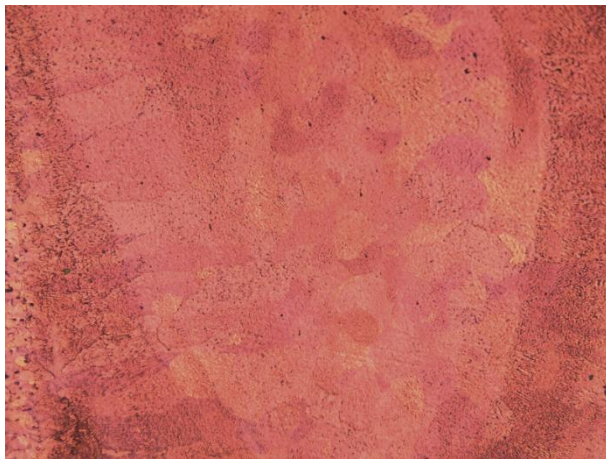
L'attacco chimico ha permesso di distinguere in modo chiaro le diverse zone metallurgiche evidenziando l'effetto della distribuzione termica sul comportamento del materiale. Le immagini riportate di seguito mostrano le principali caratteristiche microstrutturali osservate nei cordoni selezionati.



a)



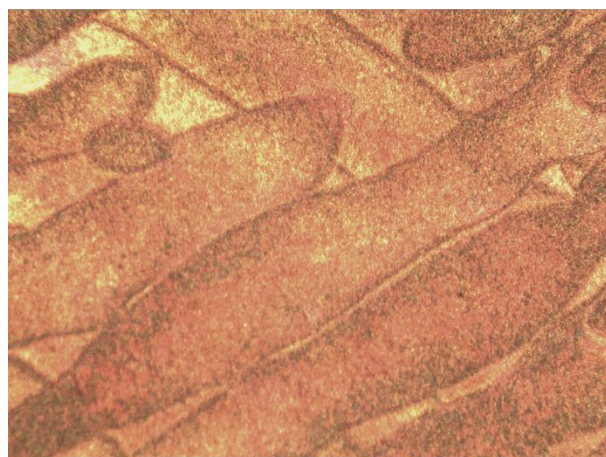
b)



c)



d)



e)

Figura 3.2.5: Immagini di attacco chimico del cordone 13 ottenuto con tecnica Wobble: (a) parte superiore della prima lamiera, (b) parte inferiore della prima lamiera, (c) transizione tra zona fusa (ZF) e zona termicamente alterata (ZTA), (d) dettaglio della struttura dendritica, (e) evidenza dei layer del materiale prodotto tramite stampa additiva

Dalle immagini ottenute mediante attacco chimico del cordone 13 si possono distinguere chiaramente le principali zone metallurgiche generate dal processo di saldatura. Nella parte superiore della lamiera si osserva la zona fusa (ZF), caratterizzata da un'evidente transizione verso la zona termicamente alterata (ZTA). Quest'area presenta un graduale cambiamento nell'aspetto della microstruttura, probabilmente legato al diverso apporto termico tra zona fusa e materiale non interessato dal processo.

Nella zona fusa si distinguono chiaramente le strutture dendritiche tipiche dell'alluminio solidificato. Le dendriti appaiono fini e uniformi, indicando una solidificazione rapida e regolare del materiale. Nella lamiera di base realizzata tramite stampa additiva sono inoltre visibili i layer di deposizione, riconoscibili come linee più scure e regolari che evidenziano la natura stratificata del materiale.

Nel complesso, l'attacco chimico ha evidenziato una buona continuità metallurgica tra le due lamiere e una zona fusa ben definita. La microstruttura osservata risulta coerente con una saldatura a bassa potenza, caratterizzata da un apporto termico ridotto che ha generato una zona fusa di dimensioni contenute ma con solidificazione uniforme e priva di discontinuità evidenti.

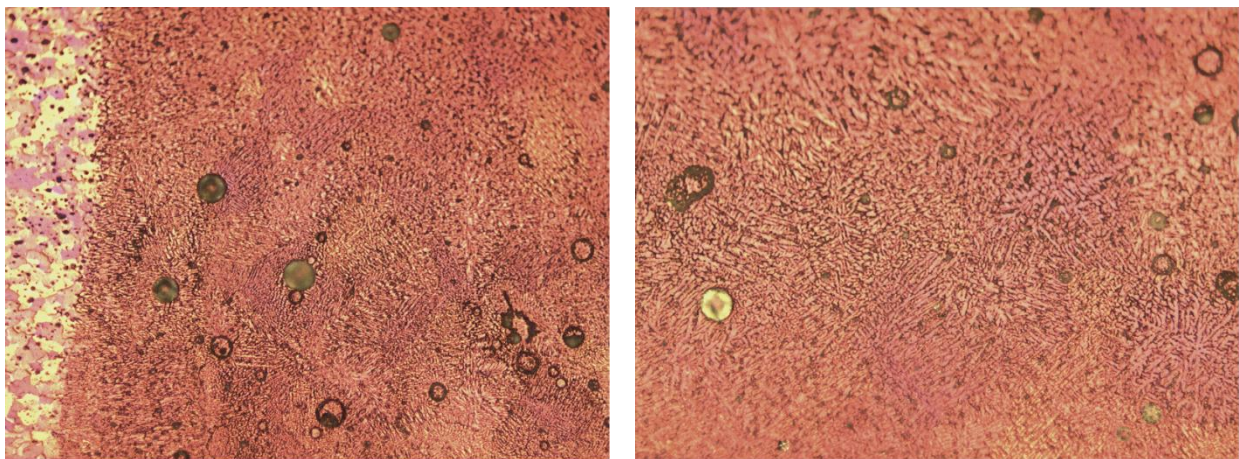


Figura 3.2.6: Dettagli di attacco chimico del cordone 30. A sinistra è visibile la transizione tra zona fusa (ZF) e zona termicamente alterata (ZTA), mentre a destra è mostrato un dettaglio della struttura dendritica all'interno della zona fusa

Le osservazioni sul cordone 30 mostrano gli stessi elementi principali individuati nel cordone 13, ma con differenze più marcate dovute al maggiore apporto termico. Nella prima immagine la separazione tra zona fusa (ZF) e zona termicamente alterata (ZTA) non è netta, ma si riconosce comunque un cambiamento graduale nella microstruttura che indica la transizione tra le due aree.

Rispetto al cordone 13, ottenuto con una potenza inferiore, il cordone 30 presenta una zona fusa più estesa, coerente con le condizioni di processo: l'aumento di potenza ha generato una fusione più profonda e un raffreddamento leggermente più lento, favorendo dendriti più sviluppate e una microstruttura più uniforme all'interno della ZF.

Nel complesso, la saldatura realizzata con la tecnica Wobble ha mostrato una maggiore stabilità e una distribuzione termica più uniforme rispetto alla saldatura lineare. Le misure geometriche e le osservazioni microstrutturali hanno evidenziato cordoni più regolari, una zona fusa più controllata e una transizione graduale verso la zona termicamente alterata.

Pur non garantendo un incremento significativo della penetrazione, la tecnica Wobble consente di ottenere giunti più omogenei e ripetibili, riducendo la sensibilità del processo alle variazioni dei parametri di potenza e velocità.

3.3 Prove di Durezza

Le prove di durezza sono state utilizzate per individuare e caratterizzare le diverse zone del giunto, valutando come la saldatura abbia modificato il materiale sia lungo la direzione del cordone sia in sezione trasversale. L'obiettivo è identificare le variazioni tra materiale di base, zona termicamente alterata e zona fusa, così da avere un riscontro meccanico delle osservazioni microstrutturali dei capitoli precedenti.

Le misure sono state eseguite solo sui cordoni che presentavano il minor livello di porosità, selezionati dalle analisi ottiche, in maniera tale da evitare che eventuali difetti influenzassero i valori ottenuti e da garantire una lettura più affidabile del comportamento reale del giunto.

Prima di analizzare i cordoni saldati è stata misurata la durezza dei due materiali di base utilizzati per realizzare il giunto, così da avere un riferimento chiaro con cui confrontare le variazioni osservate nelle zone influenzate dal processo di saldatura. Le misure mostrano valori medi pari a circa 62 HV per la lamiera 5754 e 125 HV per la lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing in lega 43500-T5.

Lega	Serie 5754	AlSi10MgMn
Durezza	62 HV	125 HV

Tabella 3.3.1: Valori medi di durezza dei due materiali di base utilizzati per il giunto

Questa differenza è coerente con le caratteristiche dei materiali: la lega 5754 non prevede trattamenti di indurimento, mentre la lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing è fornita in stato T5 quindi sottoposta ad un trattamento che ne incrementa la durezza. Questi valori verranno quindi utilizzati come base di confronto per interpretare correttamente l'andamento delle misure nelle zone MB, ZTA e ZF dei cordoni saldati.

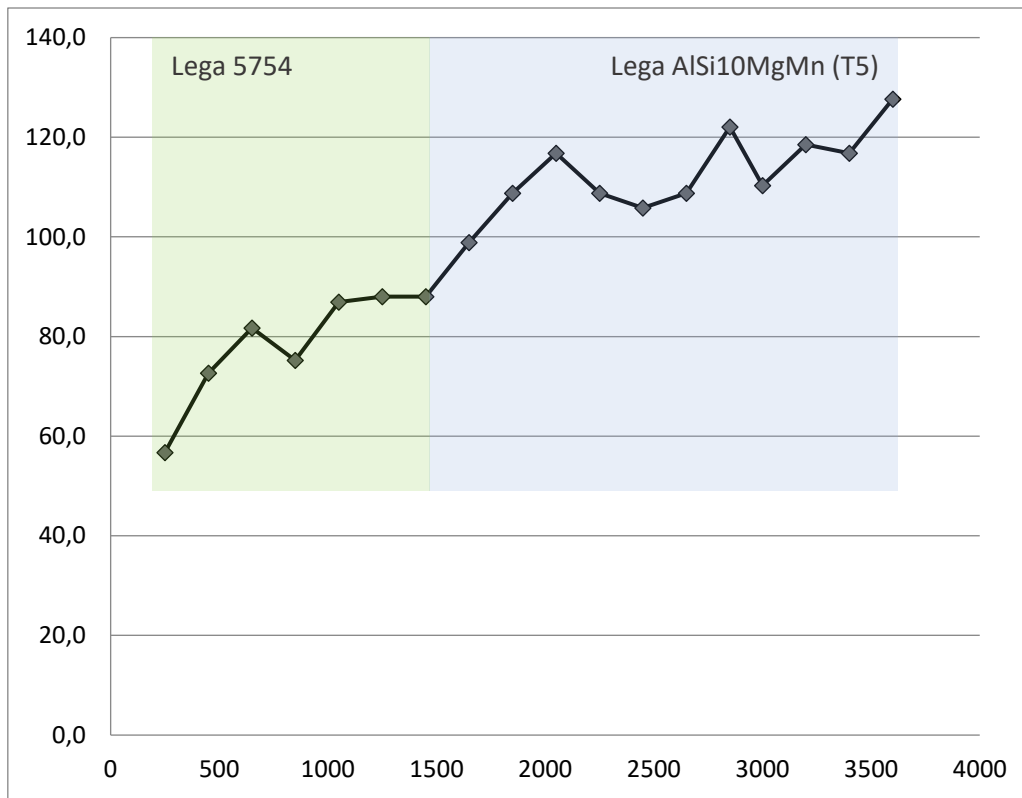


Figura 3.3.1: Andamento longitudinale della durezza per il cordone 2 ottenuto tramite saldatura lineare

In Figura 3.3.1 è riportato l'andamento della durezza lungo la direzione di saldatura per uno dei cordoni realizzati con configurazione lineare (cordone n. 2). Si osserva un incremento dei valori procedendo dalla lamiera superiore verso quella inferiore, comportamento coerente con la natura dei due materiali: la lega 5754 mostra valori più bassi, mentre la durezza aumenta avvicinandosi alla lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing, caratterizzata da una microstruttura più fine e da uno stato T5. L'andamento risulta regolare e privo di variazioni anomale, segno di un apporto termico uniforme e dell'assenza di discontinuità significative lungo il cordone.

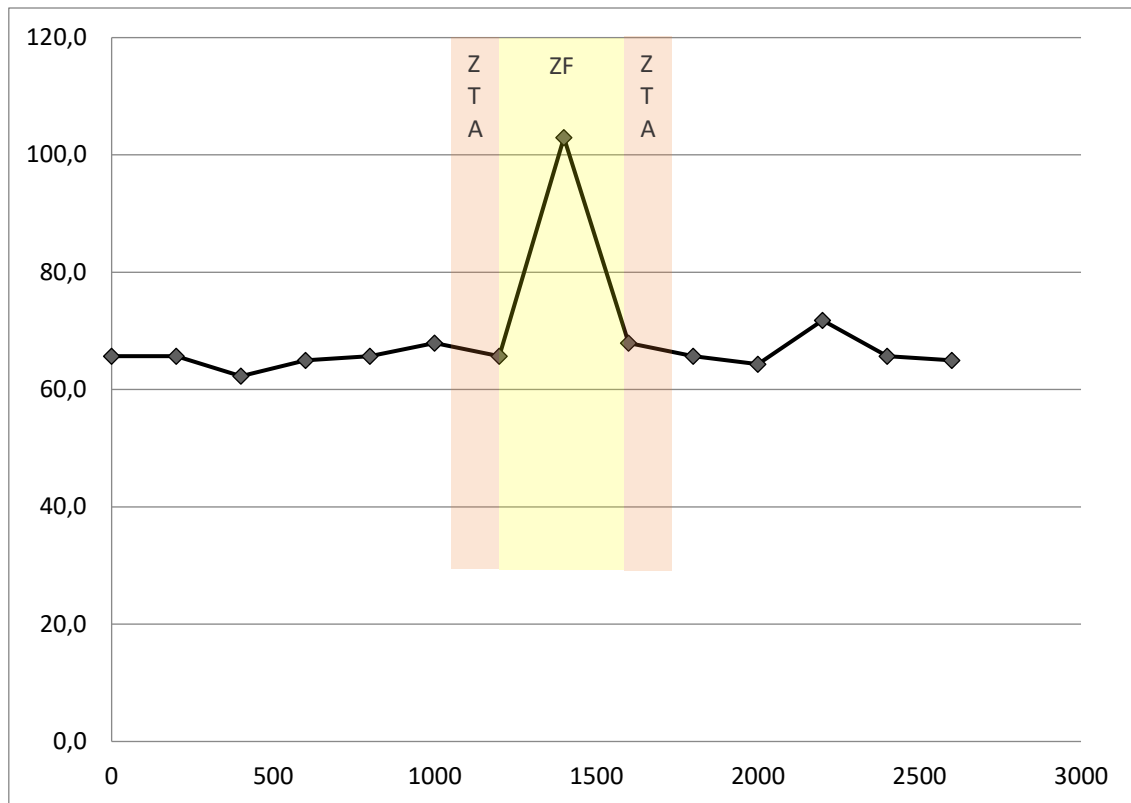


Figura 3.3.2: Andamento della durezza in sezione trasversale sulla lamiera superiore per il cordone 9 ottenuto tramite saldatura lineare

In Figura 3.3.2 è riportato l'andamento della durezza in sezione trasversale del cordone 9 misurato sulla lamiera superiore. Il materiale di base mostra valori pressoché costanti, segno che l'apporto termico ha influenzato solo una porzione molto limitata della lamiera 5754. La zona termicamente alterata è infatti poco estesa e si riconosce solo da un lieve incremento dei valori prima del picco principale.

Il massimo di durezza corrisponde alla zona fusa, dove il rimescolamento con il materiale AM e la solidificazione rapida generano valori più elevati. Superata la ZF, i valori tornano rapidamente a quelli del materiale di base, indicando che entrambe le zone influenzate dal calore (ZTA e ZF) risultano ridotte e ben localizzate.

Per la saldatura lineare le misure trasversali sulla lamiera inferiore non sono riportate poiché i valori risultano troppo dispersi per identificare in modo chiaro le zone del giunto.

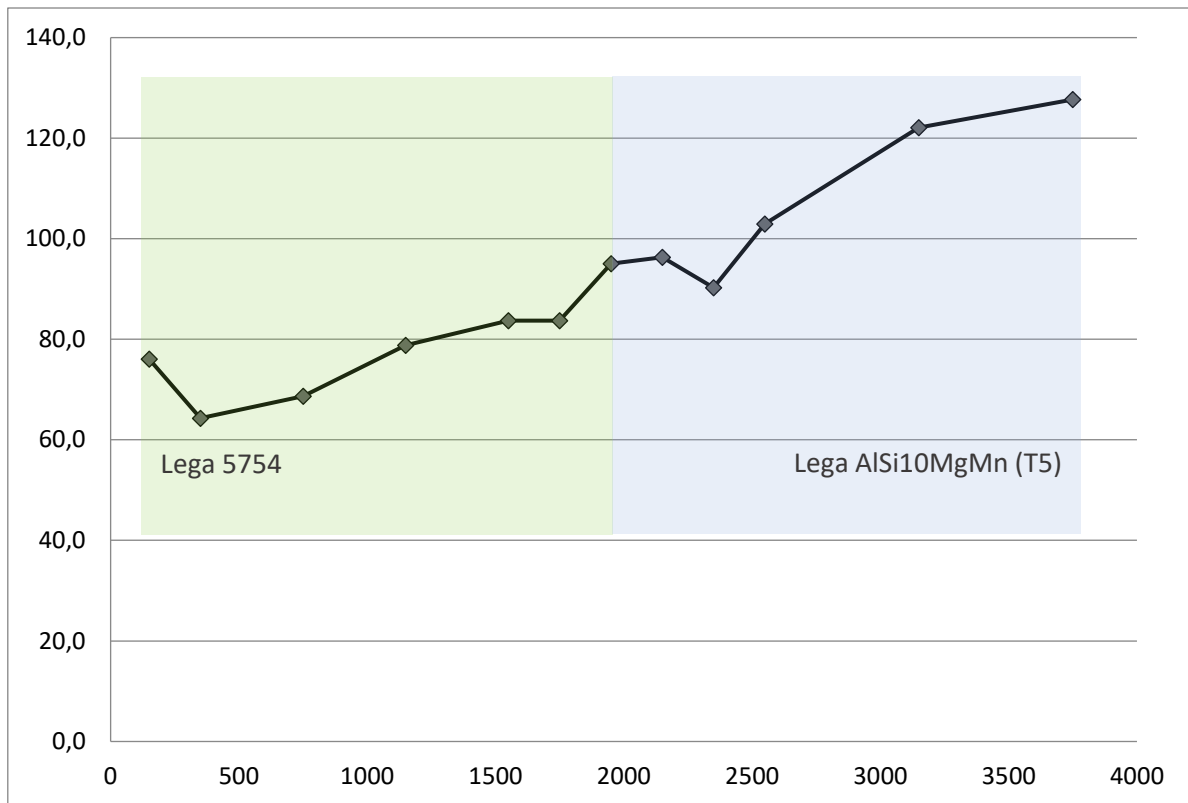


Figura 3.3.3: Andamento longitudinale della durezza per il cordone 31 ottenuto tramite saldatura Wobble

In Figura 3.3.3 è riportato l'andamento longitudinale della durezza per uno dei cordoni realizzati tramite saldatura Wobble. Il comportamento è simile a quello osservato per la saldatura lineare: i valori risultano più bassi nella porzione corrispondente alla lamiera 5754 e aumentano progressivamente avvicinandosi alla lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing, che presenta una durezza naturalmente più elevata.

L'andamento rimane regolare fino a raggiungere la zona non fusa della lamiera AM, dove le ultime due misure si stabilizzano su valori tipici del materiale base, confermando la coerenza del profilo e l'assenza di discontinuità significative lungo il giunto.

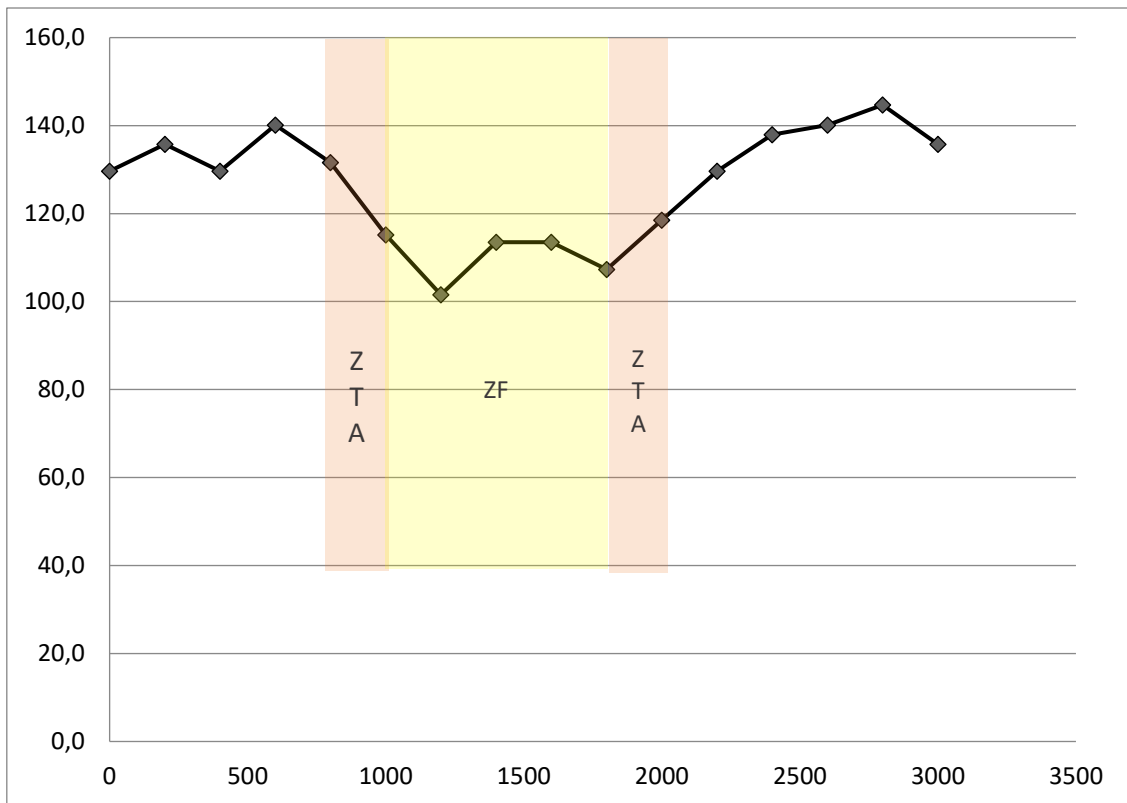


Figura 3.3.4: Andamento della durezza in sezione trasversale sulla lamiera additive per il cordone 31 ottenuto tramite saldatura Wobble

In Figura 3.3.4 è riportato l'andamento della durezza in sezione trasversale sulla lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing. Il materiale di base presenta valori elevati e relativamente costanti, tipici della lega 43500-T5. Avvicinandosi alla zona influenzata dal calore si osserva una riduzione della durezza, che raggiunge i valori minimi in corrispondenza della zona fusa.

Tale diminuzione è coerente con la perdita dell'indurimento legato alla microstruttura fine del materiale AM, che risente in modo marcato dell'apporto termico. Superata la zona fusa, i valori tornano progressivamente a quelli del materiale base, indicando che l'effetto della saldatura è localizzato e che la ZTA è relativamente contenuta.

Le misure trasversali eseguite sulla lamiera superiore in lega 5754 non sono state riportate poiché, nel caso della saldatura Wobble, l'andamento risulta troppo irregolare per distinguere in modo affidabile le diverse zone del giunto. I valori ottenuti non offrono un contributo significativo all'analisi e non sarebbero rappresentativi del comportamento reale della lamiera in questa configurazione.

3.4 Difetti di Porosità

In questa sezione vengono analizzati i difetti da porosità osservati nei cordoni prodotti con saldatura lineare e con tecnica Wobble. Dopo le analisi geometriche e microstrutturali dei paragrafi precedenti,

l'attenzione si concentra ora sui difetti interni, così da valutare in che modo le due tecniche ne influenzino la formazione.

L'obiettivo è confrontare il comportamento dei due processi, evidenziando differenze nella quantità e nella distribuzione delle porosità e identificando eventuali limiti associati a ciascuna tecnica. I risultati sperimentali vengono infine messi in relazione con quanto riportato in letteratura, dove la porosità è indicata come il principale difetto delle saldature laser che coinvolgono leghe additive e tradizionali.

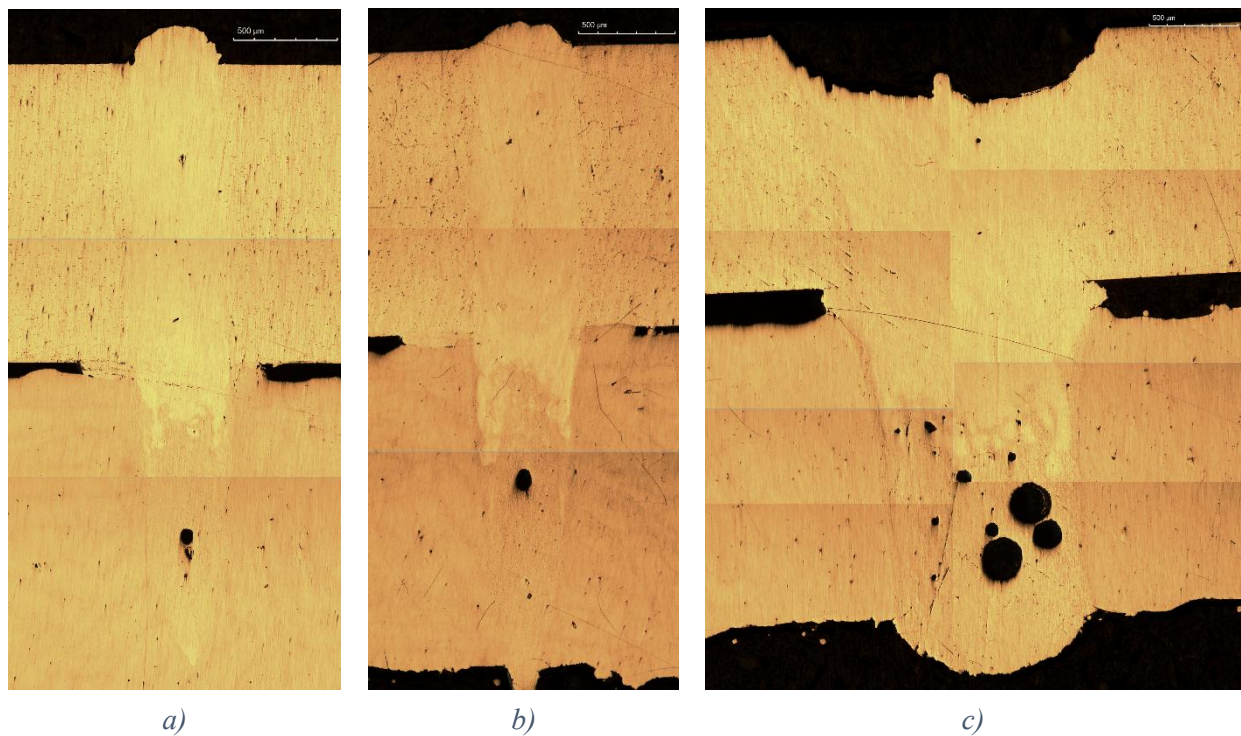


Figura 3.4.1: a) Sezione del cordone 1 ottenuto con saldatura lineare; b) sezione del cordone 8, rappresentativa del comportamento tipico e regolare dei cordoni lineari; c) sezione del cordone 11, caratterizzato da una porosità anomala e non rappresentativa del processo

Nei cordoni ottenuti con saldatura lineare la presenza di porosità risulta generalmente molto ridotta. Le sezioni analizzate mostrano un profilo del cordone uniforme, con una zona fusa di dimensioni contenute ma regolare, coerente con l'apporto termico limitato tipico di questa tecnica.

I difetti individuati sono pochi e per lo più localizzati nella lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing, dove compaiono pori isolati di dimensioni contenute che non compromettono la continuità del giunto. Nel complesso, la saldatura lineare ha dimostrato un buon livello di stabilità e una tendenza a generare cordoni poco porosi.

L'unica eccezione rilevante è rappresentata dal cordone 11, nel quale è stata osservata una porosità anomala sia per quantità sia per dimensioni. Questo comportamento risulta completamente incoerente rispetto agli altri campioni lineari e non giustificabile sulla base dei parametri di processo adottati. Per questo motivo il cordone 11 è stato considerato non rappresentativo del processo lineare ed è stato escluso dalle analisi comparative.

Si passa ora all'analisi dei cordoni realizzati con la tecnica Wobble, che mostrano un comportamento differente sia in termini di stabilità del cordone sia nella formazione delle porosità.

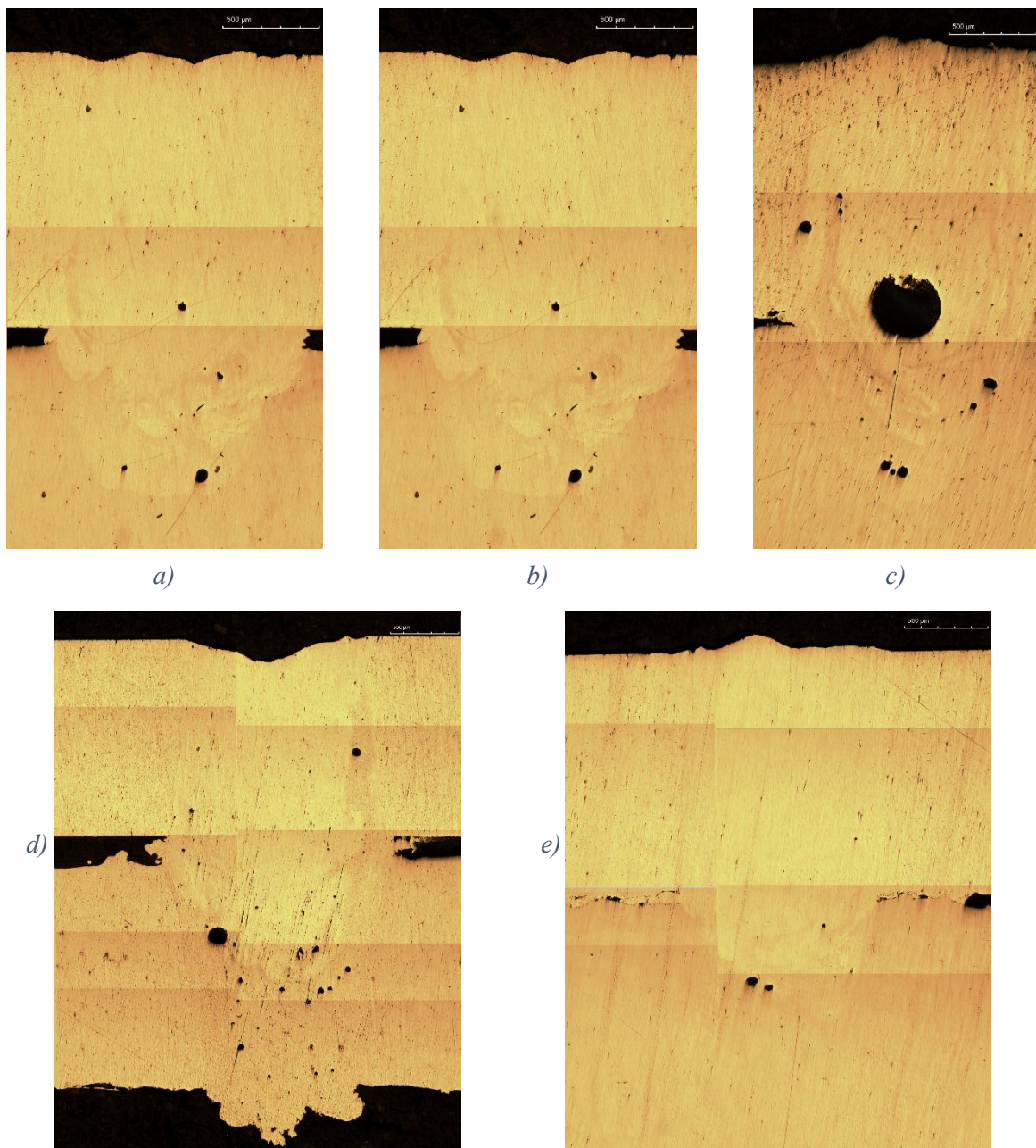


Figura 3.4.2: Sezioni dei cordoni Wobble: a) cordone 13 rappresentativo dell'aspetto tipico; b) cordone 16 con porosità moderata; c) cordone 22 con difetti di grandi dimensioni; d) cordone 24 caratterizzato da numerose porosità; e) cordone 31 con porosità minima e morfologia regolare

Nei cordoni realizzati con la tecnica Wobble la presenza di porosità risulta più marcata rispetto alla saldatura lineare. Nonostante la geometria del cordone sia generalmente più ampia e regolare, le sezioni analizzate mostrano una maggiore tendenza alla formazione di difetti interni. In diversi campioni, come i cordoni 13 e 16, la porosità appare limitata e distribuita in modo uniforme, con difetti isolati che non compromettono in maniera evidente la continuità del giunto. Questo comportamento rappresenta l'aspetto tipico del Wobble: un cordone stabile, con una zona fusa ampia, ma con la presenza occasionale di piccoli pori.

Tuttavia, altri cordoni evidenziano difetti decisamente più significativi. Il cordone 22 presenta un poro di grandi dimensioni in prossimità dell'interfaccia, mentre il cordone 24 mostra numerose porosità distribuite nella parte centrale del giunto. Questi esempi confermano che, nonostante la buona gestione dell'apporto termico, il processo Wobble può favorire l'intrappolamento di gas all'interno del bagno fuso, generando difetti localizzati ma rilevanti. Solo in pochi casi, come nei cordoni 31 e 32, la porosità risulta minima e il cordone assume una morfologia praticamente ideale.

Nel complesso, la tecnica Wobble offre una maggiore stabilità e un cordone più omogeneo, ma presenta una variabilità significativa nella formazione dei pori. Questo comportamento è coerente con quanto riportato in letteratura, dove la porosità viene indicata come uno dei principali limiti nelle saldature laser di leghe di alluminio, soprattutto in presenza di materiali prodotti tramite Additive Manufacturing.

Nel complesso, l'analisi dei difetti conferma quanto riportato in letteratura: i difetti interni rappresentano il principale limite delle saldature laser tra leghe di alluminio, in particolare quando è coinvolto materiale prodotto tramite Additive Manufacturing. I risultati ottenuti mostrano infatti che, indipendentemente dalla tecnica utilizzata, la porosità tende a concentrarsi nella zona centrale del cordone e nella porzione relativa alla lamiera AM, con un'intensità variabile in funzione della stabilità del bagno fuso.

La saldatura lineare si è dimostrata generalmente più pulita, mentre la tecnica Wobble, pur offrendo cordoni più ampi e regolari, presenta una maggiore variabilità nella formazione dei difetti. Questa divergenza mette in evidenza come la scelta della tecnica possa influenzare in modo significativo la qualità interna del giunto, sottolineando la necessità di un controllo accurato dei parametri di processo per limitare l'intrappolamento di gas durante la saldatura.

3.5 Sintesi dei risultati

In questa sezione vengono raccolti i principali risultati ottenuti dalle analisi sperimentali, così da avere un quadro chiaro del comportamento dei giunti realizzati tramite saldatura laser nelle diverse

condizioni studiate. I dati ricavati dalle varie prove vengono richiamati e confrontati con l'obiettivo di individuare la tecnica di saldatura che ha mostrato la maggiore stabilità tra tutte quelle testate.

Dal confronto delle misure ottiche emerge un comportamento nettamente diverso tra le due tecniche. I cordoni lineari risultano molto uniformi lungo tutta la saldatura: larghezze contenute, buona penetrazione e differenze minime tra i vari provini, segno di un processo stabile e poco sensibile ai cambiamenti dei parametri. La geometria rimane sempre stretta e regolare, con una forma che si ripete in modo costante.

Al contrario, i cordoni ottenuti con la tecnica Wobble sono più ampi e mostrano un aumento evidente della larghezza sia in superficie sia all'interfaccia, con una zona fusa più estesa e una distribuzione dell'energia molto più larga. Questo li rende immediatamente distinguibili dai cordoni lineari ma anche più variabili: tra un provino e l'altro si osservano differenze più marcate, soprattutto nella profondità e nella forma della zona fusa. In generale, la saldatura Wobble genera cordoni più larghi ma con una ripetibilità inferiore rispetto a quelli lineari.

Proseguendo con l'analisi microstrutturale, le differenze tra le due tecniche risultano altrettanto evidenti. Nei cordoni lineari la zona fusa è ben definita e il passaggio verso la zona termicamente alterata rimane riconoscibile e piuttosto netto anche alle potenze più elevate. La solidificazione risulta regolare e la microstruttura mantiene una buona continuità lungo il giunto, confermando la stabilità già osservata nelle analisi geometriche.

Nel caso della saldatura Wobble il comportamento è meno uniforme: alcuni cordoni presentano una zona fusa chiara e ben delimitata, mentre in altri la transizione verso la ZTA risulta meno netta. Questa differenza è legata alla distribuzione più ampia dell'energia dovuta all'oscillazione del fascio, che modifica la forma e la stabilità del bagno fuso da un provino all'altro. Nei campioni realizzati con potenze più alte la ZF tende ad allargarsi e a mostrare una solidificazione più graduale, con una definizione meno costante delle zone lungo il giunto. L'aumento dell'area interessata dall'apporto termico porta a una microstruttura più ampia ma anche più sensibile alle condizioni di processo. Nel complesso, rispetto alla saldatura lineare, la tecnica Wobble genera una zona fusa più estesa ma con una variabilità maggiore nella definizione delle zone metallurgiche.

Per le misure di durezza, il confronto tra le due tecniche mostra che la tendenza principale non è legata al tipo di saldatura ma soprattutto ai materiali di base. Lungo la direzione longitudinale, le curve ottenute dai cordoni lineari e Wobble hanno un andamento simile: i valori sono più bassi nella porzione relativa alla lamiera 5754 e aumentano gradualmente avvicinandosi alla lamiera AM, che presenta durezza più elevata grazie allo stato T5. In entrambe le tecniche il passaggio tra le due

lamiera è regolare e non mostra discontinuità evidenti, confermando un comportamento meccanico coerente con la microstruttura osservata.

Le differenze maggiori compaiono invece nelle misure trasversali, ma non dipendono dalle due tecniche analizzate. L'andamento tipico "a U" osservato nei grafici varia unicamente in base alla lamiera considerata: nella 5754 la durezza minima si trova nel materiale di base e aumenta verso la zona fusa, che presenta valori più alti; nella lamiera AM avviene l'opposto, poiché la perdita dell'indurimento legato allo stato T5 porta la zona fusa ad avere valori inferiori rispetto al materiale base. Questa differenza di comportamento è quindi legata alle caratteristiche iniziali dei materiali e non al processo utilizzato. Di conseguenza, le variazioni tra saldatura lineare e Wobble nelle misure trasversali risultano limitate e non alterano l'andamento complessivo delle curve.

Nel complesso, i profili di durezza mostrano che la differenza tra saldatura lineare e Wobble è minima. Le due tecniche danno curve praticamente simili e ciò che cambia davvero è il materiale: ogni lamiera mantiene il proprio comportamento tipico e le variazioni osservate dipendono soprattutto dalla sua durezza di partenza e da quanto si estende la zona influenzata dal calore.

Passando infine all'analisi delle porosità, la differenza tra le due tecniche risulta molto più marcata rispetto a quanto visto per le durezze. I cordoni lineari mostrano livelli di porosità generalmente bassi e una distribuzione dei difetti piuttosto limitata, con un comportamento stabile e ripetibile lungo tutti i provini analizzati.

Nel caso della saldatura Wobble, invece, la situazione è più complessa: alcuni cordoni presentano difetti contenuti, mentre altri mostrano porosità più numerose o di dimensioni maggiori, spesso localizzate nella zona centrale o in prossimità della lamiera AM. Questa variabilità rende la tecnica più sensibile alla stabilità del bagno fuso e alle condizioni di processo.

Nel complesso, la saldatura lineare risulta la più uniforme e ripetibile, anche se genera cordoni più stretti. Il Wobble permette cordoni più larghi ma mostra maggiore variabilità interna; tra i campioni analizzati i cordoni 31 e 32 sono quelli che presentano la configurazione più equilibrata e con meno porosità.

4. Conclusioni

Questo lavoro ha analizzato la saldatura laser in configurazione overlap tra una lamiera in lega 5754 e una lamiera prodotta tramite Additive Manufacturing in lega 43500-T5, confrontando la modalità lineare con quella Wobble.

L'obiettivo era comprendere come le due tecniche influenzassero la qualità del giunto, valutando in particolare la geometria, la microstruttura, le proprietà meccaniche locali e la formazione delle porosità.

Per farlo sono stati studiati i provini tramite microscopia ottica, osservazioni microstrutturali, prove di durezza e analisi dei difetti interni, così da ottenere un quadro completo del comportamento dei cordoni nelle diverse condizioni di saldatura.

Dal punto di vista geometrico le due tecniche hanno mostrato comportamenti molto diversi. La saldatura lineare genera cordoni stretti, uniformi e con una forma che si ripete in modo costante lungo tutti i provini.

La modalità Wobble, invece, produce cordoni più larghi e con una zona fusa più estesa, ma anche più sensibili ai parametri di processo: alcuni campioni risultano regolari, mentre altri presentano variazioni più evidenti nella forma e nella profondità del cordone.

Le misure di durezza hanno confermato che le differenze principali non dipendono dalla tecnica di saldatura, ma dalle caratteristiche dei materiali di base. Nella lamiera 5754 la durezza risulta minima nel materiale di base e raggiunge il suo massimo nella zona fusa, mentre nella lamiera AM accade il contrario, con una perdita dell'indurimento all'interno della zona fusa a causa dello stato T5.

Le due tecniche generano grafici con andature molto simili, sia longitudinali sia trasversali, confermando un comportamento coerente indipendentemente dalla modalità di saldatura utilizzata.

La porosità è invece l'aspetto che distingue maggiormente le due tecniche. I cordoni lineari presentano livelli di porosità bassi e una buona ripetibilità, con difetti limitati e distribuiti in modo prevedibile.

La tecnica Wobble mostra una variabilità maggiore: alcuni campioni risultano poco porosi, mentre altri presentano difetti più numerosi o più grandi, spesso concentrati nella zona centrale o in prossimità della lamiera AM. Tra i provini analizzati, i cordoni 31 e 32 rappresentano le configurazioni Wobble più stabili e con i migliori risultati, ma la tecnica rimane complessivamente più sensibile alle condizioni di processo rispetto alla saldatura lineare.

Nel complesso, il confronto ha mostrato che la saldatura lineare offre una maggiore stabilità e ripetibilità, con cordoni più uniformi e livelli di porosità contenuti. La modalità Wobble permette invece di ottenere cordoni più larghi e potenzialmente più efficienti dal punto di vista geometrico, ma richiede una maggiore attenzione nella scelta dei parametri, poiché tende a mostrare una variabilità più marcata, soprattutto nella formazione dei difetti interni.

I risultati ottenuti forniscono quindi un quadro chiaro del comportamento dei giunti misti AM–tradizionale e mettono in evidenza i limiti e le potenzialità delle due tecniche analizzate. Questi elementi rappresentano una base utile sia per l’ottimizzazione dei parametri di saldatura, sia per lo sviluppo di configurazioni più stabili nelle applicazioni future, in particolare nei settori in cui l’unione di componenti stampati in Additive Manufacturing e lamiere tradizionali è sempre più richiesta.

5. Bibliografia

- 1. Vincenzo Dimatteo, Erica Liverani, Alessandro Ascari, Alessandro Fortunato (2022).**
Weldability and mechanical properties of dissimilar laser welded aluminum alloys thin sheets produced by conventional rolling and Additive Manufacturing
- 2. Tianzhu Sun, Conghui Liu, Pasquale Franciosa, Nesta Ferguson, Gregory Gibbons, Dariusz Ceglarek, Evans Mogire, Peilei Zhang (2023).** 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