



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di procedimenti di saldatura laser ed EBW per pannelli AFS

G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, P. Colucci, M.B. Alba

SVILUPPO DI PROCEDIMENTI DI SALDATURA LASER ED EBW PER PANNELLI AFS

G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, P. Colucci, M.B. Alba (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

Inquadramento programmatico.

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

Accordo di Programma MSE-ENEA: Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

Piano Triennale 2006-2008

Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009): da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

Attività: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Area di riferimento: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Tematica di ricerca: risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

Progetto 3.5: studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Obiettivo F: Sviluppo delle tecnologie di giunzione

SOMMARIO

Abstract	5
Caratteristiche del materiale.....	5
CAPITOLO 1	7
Sviluppo di procedimenti di saldatura laser e laser-TIG di pannelli Aluminum Foam Sandwich (AFS)	7
1.1 Saldatura Laser delle leghe di alluminio.....	8
1.2 SET Up e test di saldatura laser stand alone di leghe di alluminio	9
1.2.1 Saldatura Laser di AFS.....	14
1.3 SET Up per saldatura laser TIG di leghe di alluminio ed analisi DoE dei principali parametri di processo	14
1.3.1 Saldatura Laser TIG di AFS	25
1.4 SET Up per saldatura filo – laser - TIG di leghe di alluminio ed analisi DoE dei principali parametri di saldatura.	26
1.4.1 Saldatura Laser TIG di AFS	36
CAPITOLO 2	37
Sviluppo di procedimenti di saldatura EBW di pannelli Aluminum Foam Sandwich (AFS)	37
2.1 Saldatura EBW delle leghe di alluminio.....	38
2.2 SET Up e test di saldatura EBW	38
2.3 Analisi DoE dei principali parametri di saldatura EBW.....	40
2.4 Saldatura EBW di campioni di qualifica in AFS.....	47
2.4.1 Parametri di saldatura EBW di AFS ottimizzati	49

Abstract

Il presente lavoro è svolto nell'ambito delle attività previste nell' Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009 Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" obiettivo F.

In particolare, è riportato lo sviluppo, mediante Design of Experiments, di procedure di saldatura, con tecnologia laser e fascio elettronico, sia tra Aluminum Foam Sandwich (AFS) che tra questi ultimi ed estrusi in alluminio.

Questo report presenta lo sviluppo di procedimenti di saldatura per la giunzione di pannelli AFS per realizzare componenti di geometria complessa, minimizzando l'estensione e l'entità delle variazioni delle caratteristiche del materiale base. Le tecnologie di saldatura utilizzate sono quelle ad elevata densità di energia (HDE): Fascio Elettronico (EBW) e LASER (LBW). Dopo test preliminari con entrambe le tecniche è stata condotta una sperimentazione sistematica, pianificata con Design of Experiments (DOE), per la determinazione dell'intorno ottimale dei principali parametri di saldatura con Fascio Elettronico (velocità, potenza e focalizzazione). Le giunzioni ottenute con i parametri EBW ottimali costituiscono il *benchmark* per una analoga sperimentazione con LASER. Per quanto riguarda la geometria delle giunzioni sono state prese in considerazione diverse soluzioni, sia per il collegamento dei pannelli tra di loro, che con elementi strutturali esterni.

Per la qualifica del processo di saldatura testa a testa dei pannelli AFS è stata individuata, in funzione della normativa e della letteratura, la prova di flessione a quattro punti come test di riferimento per la comparazione fra differenti condizioni di saldatura e la validazione di codici di calcolo. Data la natura del materiale, questo tipo di prova permette di simulare nel modo migliore condizioni di carico di reale utilizzo in componenti strutturali.

Sono stati prodotti dei campioni di qualifica per test di flessione su 4 punti in modo da definire l'efficienza di giunzione.

Caratteristiche del materiale

I pannelli AFS vengono prodotti dalla POHLTEC METALFOAM e commercializzati in Italia tramite la ECKA Granules che è leader mondiale dei prodotti da metallurgia delle polveri. I pannelli acquistati tipo Pohltec AFS 30/1,7 hanno caratteristiche tipiche riportate nelle figure seguenti.



Pelli	<ul style="list-style-type: none">➤ Spessore nominale: 1,7 mm➤ Materiale : AA6082➤ Densità: 2.7 g/cc
Core	<ul style="list-style-type: none">➤ Spessore nominale: 26,6 mm➤ Materiale AlSi6Cu6➤ Densità : 0.51 g/cc
AFS	<ul style="list-style-type: none">➤ Spessore: 30 mm +/-0.5 mm➤ Densità : 0,76 g/cc➤ Densità superf : 22,87 Kg/mq

Figura 1: Foto Tipica dei pannelli AFS utilizzati e tabella delle caratteristiche principali

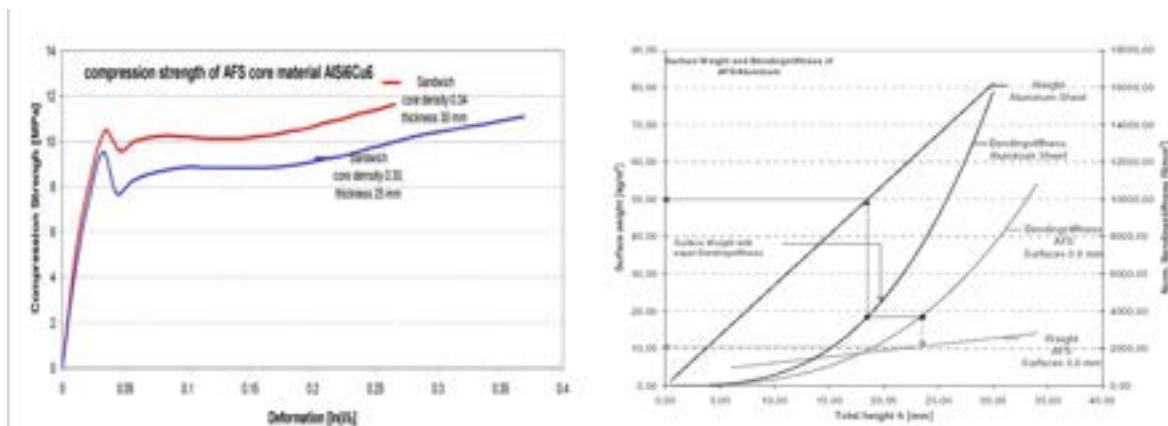


Figura 2: Caratteristiche a compressione tipiche e potenzialità in termini di rigidità flessionale rispetto a piastre piene di alluminio.

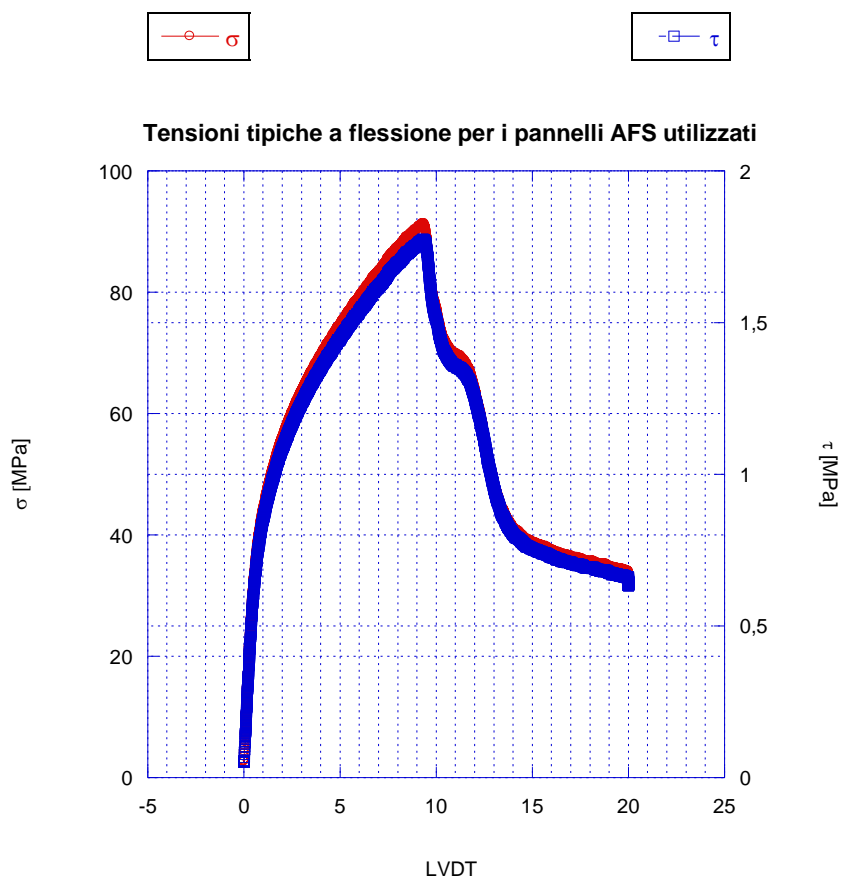


Figura 3: Caratteristiche a flessione dei pannelli AFS saldati.

CAPITOLO 1
Sviluppo di procedimenti di saldatura laser e laser-TIG di pannelli Aluminum
Foam Sandwich (AFS)

1.1 Saldatura Laser delle leghe di alluminio

La saldatura laser delle leghe di alluminio impone la necessità di utilizzare una sorgente laser di potenza adeguata per via della elevata riflettività di questo tipo di materiale. È noto che le sorgenti con lunghezza d'onda di 1,064 micron (Nd:YAG, Disco e Fibra) permettono un migliore accoppiamento laser-materia rispetto alle sorgenti con lunghezza d'onda 10,6 micron (CO₂). Inoltre, i laser a stato solido con lunghezza d'onda 1,064 micron (vicino infrarosso) permettono il trasporto del fascio laser in fibra con notevoli vantaggi in termini di industrializzazione del processo. Allo stesso tempo l'accoppiamento delle sorgenti laser con lunghezza d'onda di 1,064 micron con sorgenti di saldatura ad arco è facilitata dalla minore sensibilità alla schermatura plasmatica rispetto ai laser CO₂.

Le ragioni sopra riassunte hanno indirizzato lo sviluppo del procedimento di saldatura laser e laser ibrido, si limitati spessori degli AFS trattati, con la stazione di lavoro Nd:YAG del CR ENEA - TRISAIA. La tabella seguente riassume le principali caratteristiche della stazione di lavorazione che si avvale del laser Haas mod. HL2006D.

Caratteristiche sorgente e sistema di focalizzazione	
Lunghezza d'onda (λ)	1,064 μm
Massima potenza in uscita	2800 W
Potenza nominale	2000 W
Prodotto caratteristico del raggio [$(d_0 \cdot \theta)/4$]	30 mm·mrad
Diametro del nocciolo della fibra ottica (d_k)	600 μm
Lente di collimazione	200 mm
Lente di focalizzazione	150 mm
Diametro macchia focale	0,45 mm
Densità di potenza focale massima	$1,25 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$
Area di lavoro e velocità di movimentazione	
X = 1000 mm	$v_x = 15.000 \text{ mm/min}$
Y = 800 mm	$v_y = 15.000 \text{ mm/min}$
Z = 300 mm	$v_z = 15.000 \text{ mm/min}$
	$v_\alpha = 25.000 \text{ }^\circ/\text{min}$

Tabella 1: Dati di targa della stazione HL2006D

Come anticipato, nella saldatura laser delle leghe di alluminio bisogna tenere in opportuna considerazione l'elevata riflettività del materiale. Questo fenomeno è inoltre fortemente influenzato dalla composizione della lega. Mentre l'alluminio puro e la serie 5xxx permettono usualmente un innesco del processo di saldatura keyhole relativamente semplice, lo stesso non si può dire per le leghe della serie 6xxx. In particolare le leghe 6005 e 6060 introducono notevoli difficoltà all'innesco del processo di saldatura laser. Per queste ultime è necessario introdurre particolari accorgimenti che possono consistere: nell'impiego di processi ibridi che permettano un riscaldamento locale che migliora l'accoppiamento laser materia, l'impiego di materiali d'apporto a maggior assorbimento (leghe della serie 5xxx) o un'opportuna combinazione dei due metodi precedenti.

Il rapporto sintetizza le prove effettuate per valutare le problematiche di accoppiamento laser materia per le pelli dei pannelli AFS confrontando i risultati con quelli ottenibili con materiali di riferimento della serie 6xxx e 5xxx che vengono più comunemente utilizzati nella realizzazione dei vettori per il trasporto.

Allo stesso tempo sono mostrate le possibili soluzioni applicabili per la saldatura laser e laser arco di questo tipo di materiale.

1.2 SET Up e test di saldatura laser stand alone di leghe di alluminio

E' stata condotta una serie test per valutare la potenzialità della sorgente laser Nd:YAG ENEA nella saldatura degli AFS tra di loro e con componenti realizzati nelle principali leghe di alluminio strutturale (vedi AA5083, AA 6082, AA 6060 e AA 6005).

Nelle prove preliminari si sono utilizzati i seguenti materiali:

- Lamiera sp. 2 mm in AA6050 T6
- Lamiera sp. 3 mm in AA5083 H321
- AFS con pelli di spessore 2 mm in AA 6082

I test preliminari di rifusione (bead on plate, BoP) sono stati realizzati con i parametri riportati in tabella:

Potenza	Velocità	Gas	Focalizz.	Diametro ugello	Distanza ugello
2000 W	1000 mm/min	25 NI/min Argon	0 (in superficie)	8 mm	8 mm

Lo schema di saldatura e la foto dell'attrezzatura utilizzata sono mostrati nella figura seguente:

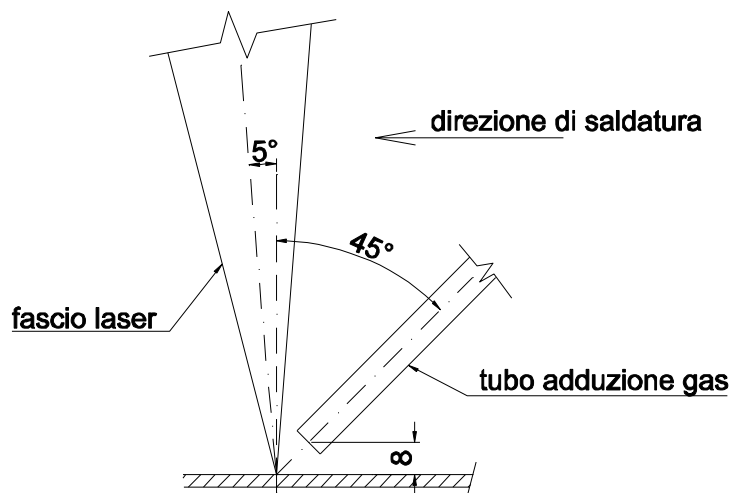


Figura 4: Foto e schema del Set Up di saldatura con solo laser di leghe di alluminio

Lo schema mostra come l'asse del fascio laser sia stato inclinato di 5° rispetto alla verticale mentre l'ugello di soppressione del plasma sia inclinato di circa 45° ed orientato nel senso di avanzamento della saldatura. L'incidenza del gas di soppressione del plasma è appena dietro al punto di interazione laser-materia.

Questa configurazione permette di proteggere le ottiche da eventuali retroriflessioni che possono verificarsi in caso di mancato innesco del processo di saldatura keyhole e garantisce allo stesso tempo un'adeguata azione di soppressione del plasma e la protezione del bagno di fusione.

Come atteso i risultati dipendono fortemente dal tipo di lega trattata.

Mentre la potenza di 2000 W risulta inefficace sulla lega AA6060 realizzando una semplice rifusione superficiale di pochi micron, gli stessi parametri sulla lega AA5083 portano alla piena penetrazione a tratti della lamiera da 3 mm.



Figura 5: Differenti effetti del laser su diverse leghe di alluminio

In particolare, la lega AA 6060 T6 mostra al dritto una rifusione lucida di larghezza confrontabile con il diametro dello spot focale, mentre sulla lega AA5083 H321 la larghezza al dritto è di circa 3,2 mm. Il mancato innesco del processo di saldatura key hole porta ad una quasi completa riflessione del fascio laser, è evidenziata dal riscaldamento della testa laser e che va quindi evitata. L'innesco del processo di saldatura laser sulla lega AA 5083 H321 è invece accompagnato da una notevole formazione di spruzzi che portano a un rapido danneggiamento del vetrino di protezione che impone l'utilizzo di lame d'aria. La **Figura 6** mostra il sistema adottato.



Figura 6: Set Up con lama d'aria (pressione 5 Bar); a DX il controllo dello stato de vetrino di protezione dopo 10 prove non mostra segni di spatter ad indicare una buon efficienza di protezione della lama d'aria.

Gli stessi parametri sulla pelle dell'AFS portano invece ad una condizione intermedia. Una prima parte di circa 8 mm evidenzia una zona di riflessione con una lieve rifusione superficiale. Dopo questo primo tratto, grazie all'incremento di temperatura della pelle e al conseguente maggiore assorbimento della radiazione laser, si ha l'innesco del processo keyhole con un allargamento continuo del bagno di fusione.

Sulla base del risultato ottenuto è stato predisposto un piano sperimentale da effettuare direttamente sulle pelli degli AFS in quanto non è possibile per la saldatura laser utilizzare un materiale surrogato: è infatti necessario tenere in considerazione gli effetti correlati di assorbimento della radiazione laser e della conduzione del calore, che per le leghe di alluminio non può essere trascurata e che dà origine a notevoli transitori.

L'accorgimento introdotto nel programma di saldatura consiste in una pausa di 800 ms dopo l'apertura dell'otturatore, che dovrebbe permettere un innalzamento della temperatura locale sufficiente a permettere l'innesco del processo di saldatura e a ridurre gli effetti transitori.

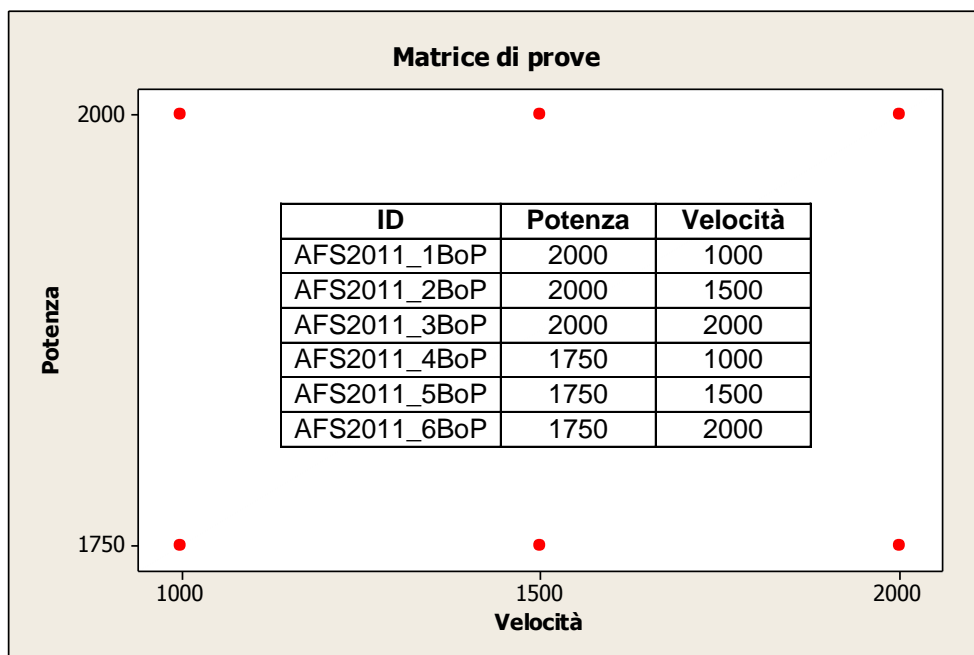


Figura 7: Matrice di prove di penetrazione su pelli di AFS

Le prove riassunte nello schema precedente hanno messo in evidenza come la potenza nominale massima applicabile della sorgente sia in realtà anche la potenza di soglia per la saldatura delle pelli degli AFS. Infatti, riducendo la potenza a 1750 W non si ha innescamento del keyhole, né a 1500 né a 1000 mm/min, mentre a 2000W si ottiene l'innescamento per tutte e tre le velocità considerate.

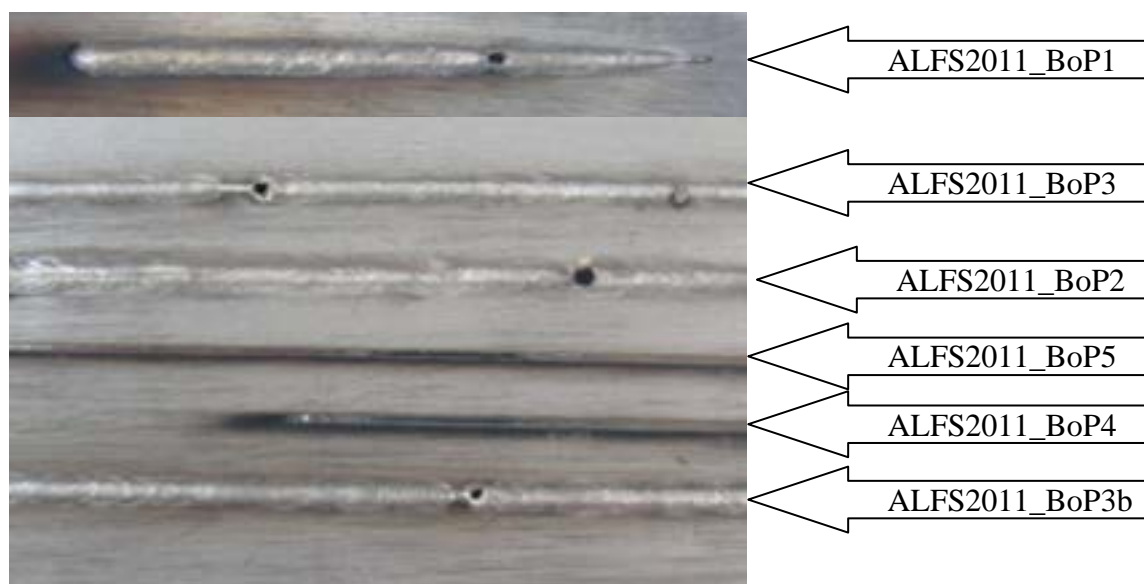


Figura 8: Aspetto al dritto delle prove di rifusione effettuate

Dall'analisi visiva delle prove effettuate si osserva come a potenza 2000 W si riesca ad ottenere un processo di saldatura Keyhole anche a di 2000 mm /min. In tutti i casi però si osserva una certa instabilità del processo, con la formazione di un foro nella pelle. Per la

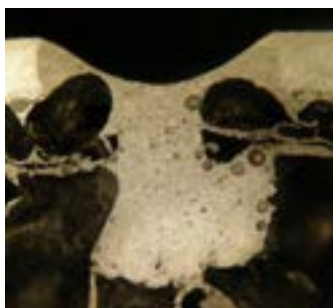
maggiore delle velocità, dopo il foro, con conseguente "perdita" del fascio laser all'interno della schiuma, è più evidente la presenza di un breve tratto di saldatura per conduzione per poi riottenere la formazione del keyhole.

La formazione di fori è molto probabilmente dovuta ad assottigliamenti locali delle pelli. La conseguente dispersione del fascio laser all'interno del pannello genera un transitorio locale con una momentanea riduzione della temperatura sulla lamiera e quindi minore dell'assorbimento della radiazione laser, che viene ripristinato subito dopo. Maggiore è la velocità di processo, più lungo è il trattino successivo, in regime di conduzione: ecco perché le prove AFS2011_BoP3 e 3b, identiche fra di loro e con velocità di 2000 mm/min, mostrano un tratto più lungo rispetto alla AFS2011_BoP1 e 2 dove è quasi impercettibile. L'effetto del continuo riscaldamento del pezzo e della conduzione del calore nelle pelli in alluminio è maggiormente evidente nelle prove a minore velocità, AFS2011_BoP1 e 2, come evidenziato dal continuo allargamento del bagno di fusione che degenera in suscettibilità alla cricatura a caldo.

La prova ASF2011_BoP6 non è stata condotta per evitare inutili rischi di riflessione già evidenziati dalle prove AFS2011_BoP4 e 5.

La potenza di 2000 W si mostra tuttavia eccessiva per la velocità di 1000 mm/min portando al un collasso del bagno di fusione. Allo stesso tempo la AFS2011_BoP2 mostra una sezione macrografica accettabile nella prima parte del cordone, che tuttavia successivamente degenera con il collasso del bagno di fusione accompagnato da una cricatura longitudinale. I test effettuati a 2000 mm/min (AFS2011_BoP3 e 3b) hanno mostrato cordoni sufficientemente stretti ed omogenei con una certa suscettibilità alla formazione di incisioni marginali.

La tabella seguente mostra il riepilogo macrografico delle prove effettuate.



ASF2011_BoP1



ASF2011_BoP2



ASF2011_BoP3



ASF2011_BoP3b

Tabella 2: riepilogo macrografico delle prove di saldatura BoP solo laser effettuate sulla pelle AFS.

1.2.1 Saldatura Laser di AFS

Alla luce delle prove di rifusione sono stati realizzati dei test di saldatura di testa su pannelli AFS di dimensione ridotta a 100 mm x 50 mm. I campioni sono stati preventivamente spazzolati con spazzola in acciaio inossidabile e sgrassati con alcool. I parametri di saldatura utilizzati sono: 2000 W e 2000 mm/min, con gas di processo Argon 4.8, portata 10 NI/min indirizzato mediante l'ugello di una torcia TIG.

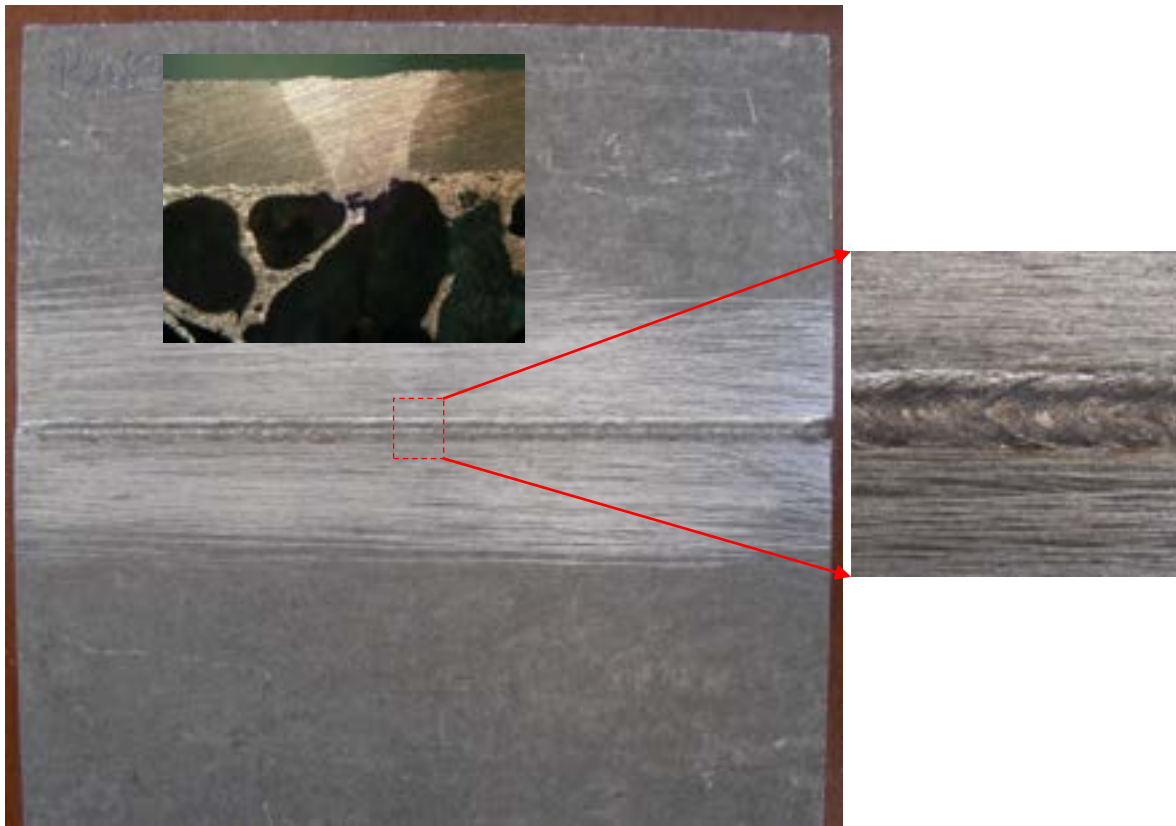


Figura 9: Aspetto al dritto del campione AFS saldato di testa BAFS_L1 e sezione macrografica.

1.3 SET Up per saldatura laser TIG di leghe di alluminio ed analisi DoE dei principali parametri di processo

Come evidenziato nei test di saldatura laser stand-alone, l'elevata riflettività delle leghe di alluminio impone l'impiego di elevate potenze laser. Inoltre, uno dei problemi nella saldatura laser è la presenza del tenace strato di allumina superficiale che deve essere rimosso prima della saldatura. Anche per le leghe di alluminio che meglio assorbono la radiazione laser (5xxx) l'instabilità del key hole porta ad un aspetto superficiale del cordone di saldatura "tormentato" ed alla formazione di porosità.

La possibile soluzione è l'applicazione della saldatura laser-arco, nella quale le due tecniche lavorino sinergicamente per colmare l'una le limitazioni dell'altra ed ottenere un processo ad

elevata produttività e buona qualità. Il sistema può essere completato con l'applicazione di un sistema di adduzione del materiale d'apporto.

La figura seguente mostra lo schema di saldatura applicato ed il sistema utilizzato per le prove.

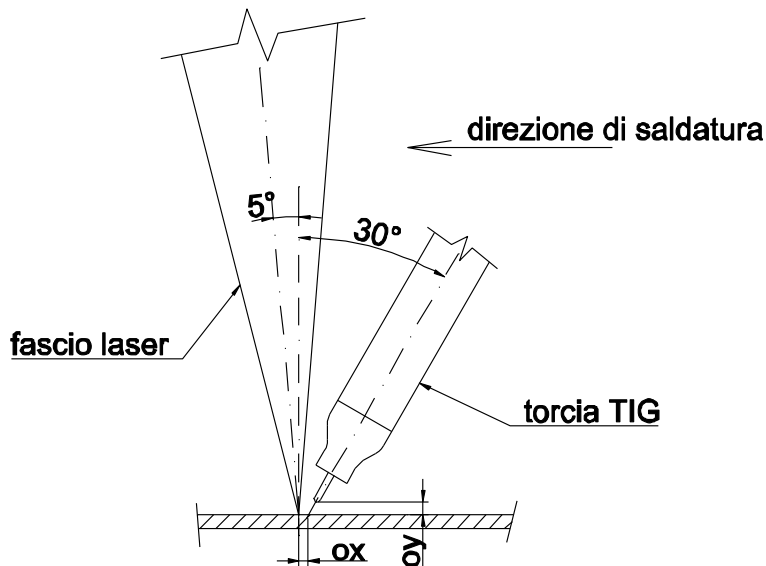


Figura 10: Schema di saldatura Laser TIG.

Un primo set di prove è stato realizzato con il solo TIG, su una lamiera di alluminio, per verificare entro quali limiti sia garantita la stabilità del processo di saldatura alle velocità inusuali che sono richieste dalla tecnica laser.

In particolare, si sono fatti variare: velocità di saldatura (tre livelli), distanza elettrodo pezzo (2 livelli) e corrente di saldatura (2 livelli).

La saldatrice utilizzata è una TELWIN Superior TIG 362 con corrente massima di 350 A. Nella tabella seguente sono riportati i principali parametri impostati sulla saldatrice:


	<ul style="list-style-type: none">• Saldatura in CA onda quadra;• Frequenza 100 Hz• Ripartizione onda 50 %• Rampa discesa 200 ms• Corrente di Base 7°• Elettrodo 3,2 mm WTh
---	--

Tabella 3: Riepilogo principali parametri fissi della saldatura TIG.

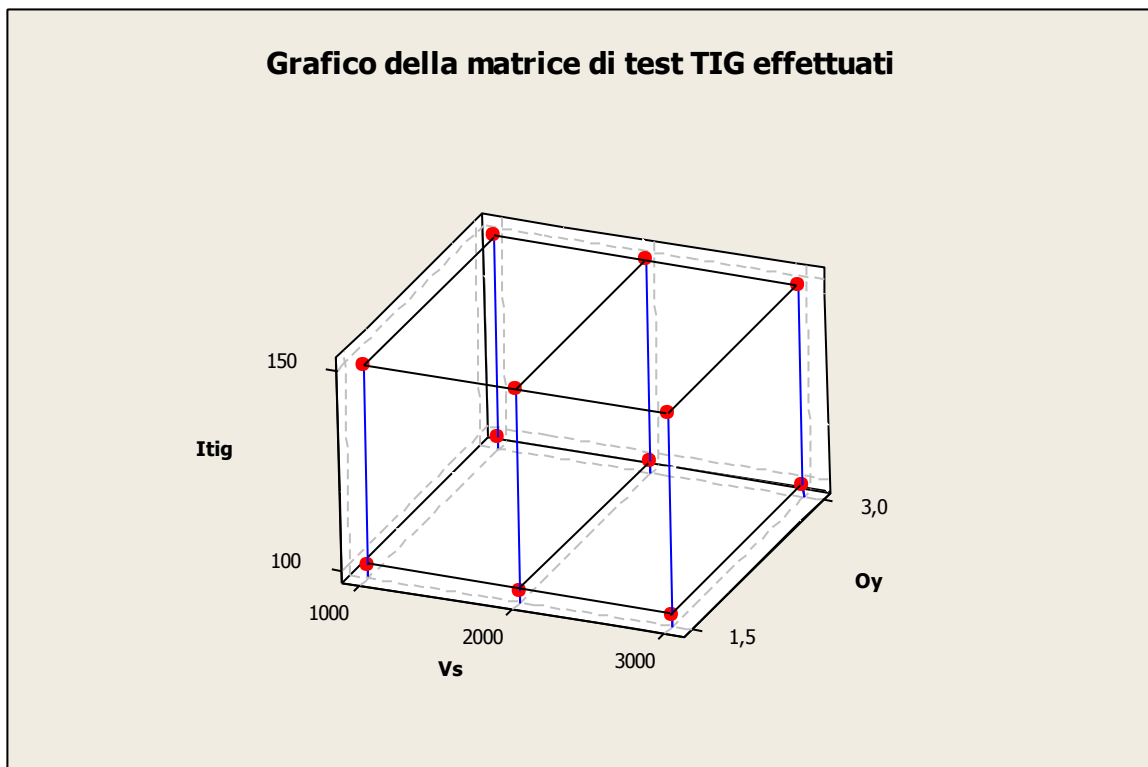


Figura 11: Piano sperimentale a 3 fattori per verificare i limiti di stabilità della saldatura TIG automatica su leghe di alluminio.

ID	Vs	ITig	Oy	Vista al Dritto
TIG1	1000	100	1,5	
TIG10	1000	100	3,0	
TIG6	1000	150	1,5	
TIG7	1000	150	3,0	







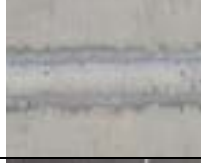

TIG2	2000	100	1,5	
TIG11	2000	100	3,0	
TIG5	2000	150	1,5	
TIG8	2000	150	3,0	
TIG3	3000	100	1,5	
TIG12	3000	100	3,0	
TIG4	3000	150	1,5	
TIG9	3000	150	3,0	
ID	Vs	ITig	Oy	Vista al Dritto

Tabella 4: Riepilogo prove BoP TIG con relativo aspetto superficiale al dritto.

Dall'analisi dell'aspetto superficiale si è potuto osservare come la distanza $Oy=1,5$ mm consente in tutte le condizioni una maggiore stabilità e una minore larghezza del bagno fuso. La corrente di saldatura maggiore permette una maggiore larghezza del bagno di fusione e garantisce il mantenimento di una certa stabilità anche alla velocità massima (3 m/min).

Con una distanza Oy di 3 mm e la corrente di 100 A l'effetto TIG si limita ad una rimozione dello strato di allumina, già per la velocità di 2 m/min (T11 e T12).

Da queste prove è evidente che un'eccessiva distanza elettrodo - pezzo porta ad una instabilità, con rischio di spegnimento dell'arco, e disperde la potenza d'arco che si limita a rimuovere lo strato di allumina, con scarso assorbimento di energia nel materiale.

Le velocità maggiori, in funzione della frequenza impostata, portano ad una maggiore distanza delle creste del cordone e quindi ad un minor effetto di "dressing" del cordone.

La **Figura 12** mostra gli effetti medi principali e l'interazione dei parametri di saldatura sulla larghezza del bagno di fusione.

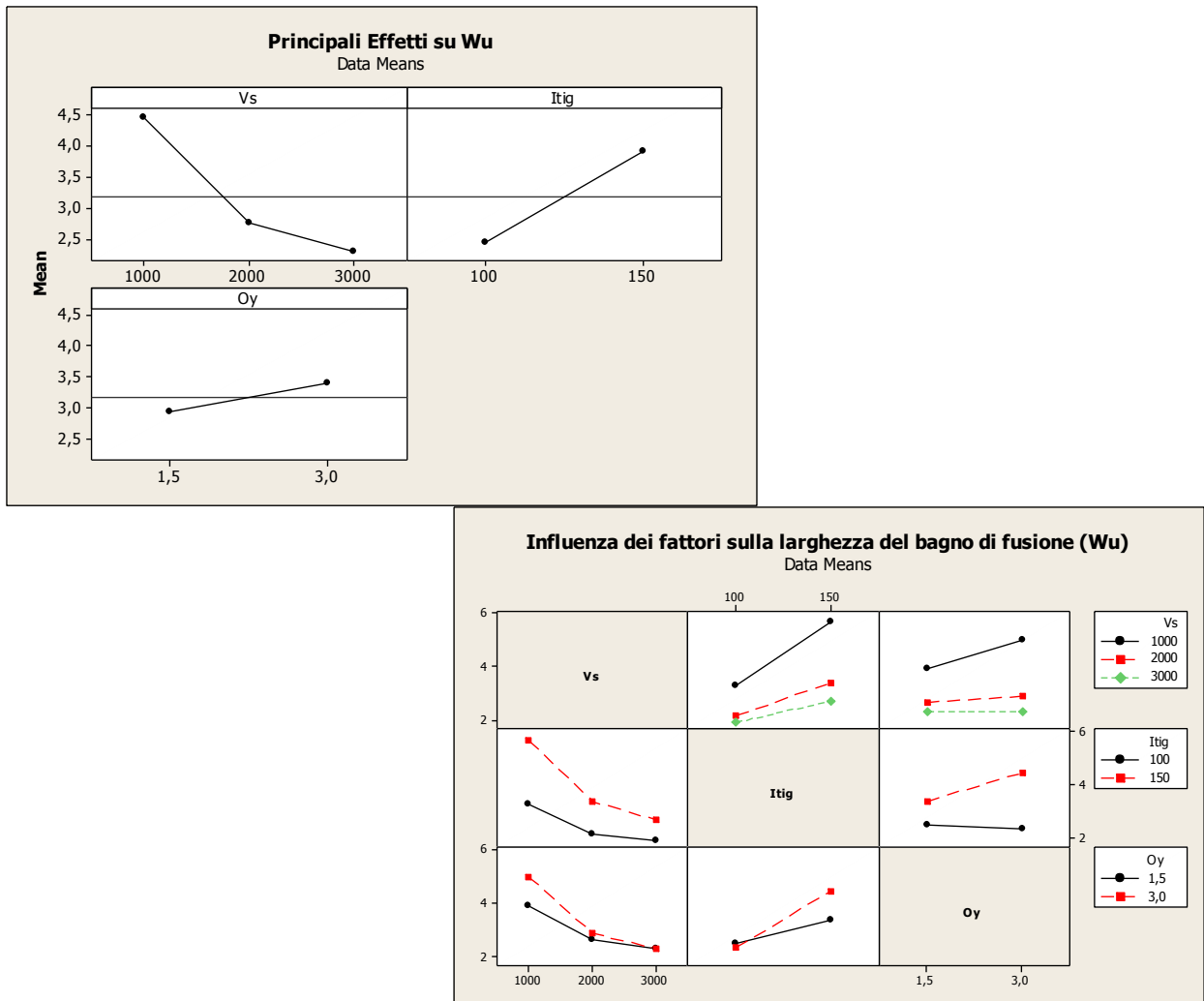


Figura 12: Grafici riepilogativi dei principali effetti dei fattori velocità di saldatura (Vs), corrente TIG (ITig) e distanza elettrodo pezzo (Oy) sulla larghezza del cordone.

Per le successive prove laser-TIG si è deciso di impostare la distanza Oy a 2 mm come miglior compromesso fra stabilità dell'arco e semplicità di accoppiamento con il laser.

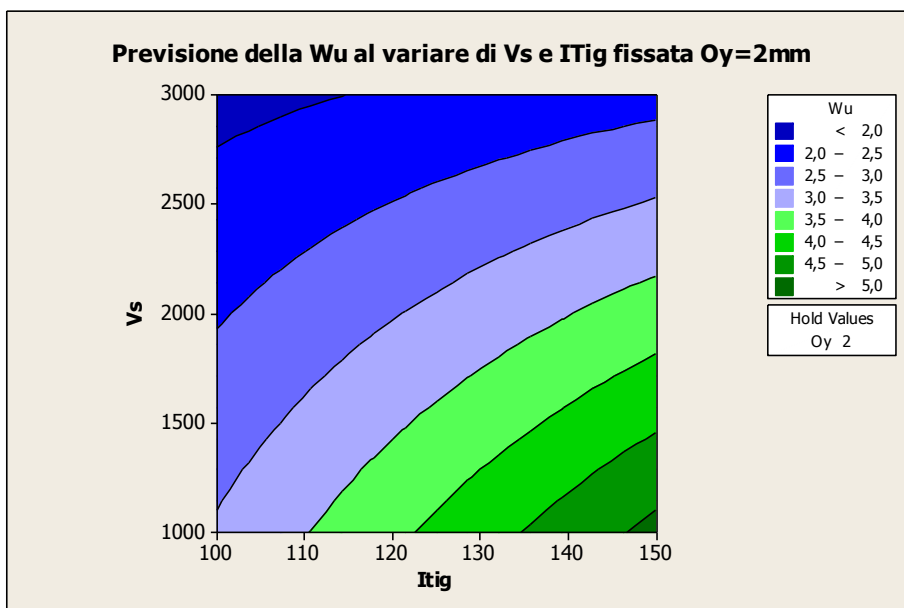


Figura 13: Risultati attesi per la saldatura solo TIG per $O_y=2$ mm.

Il piano sperimentale realizzato per lo studio dell'interazione del laser con il TIG è sintetizzato dalla **Figura 14**. In particolare, fissata la distanza O_y sono stati definiti 3 fattori: la Potenza laser (PL), la corrente TIG (ITig) e la velocità (Vs); i primi due su due livelli mentre la velocità di saldatura in analogia alla prove precedenti è stata mantenuta su 3 livelli.

Il materiale utilizzato per questo studio preliminare è un profilato in lega AA6060 con spessore 3mm.

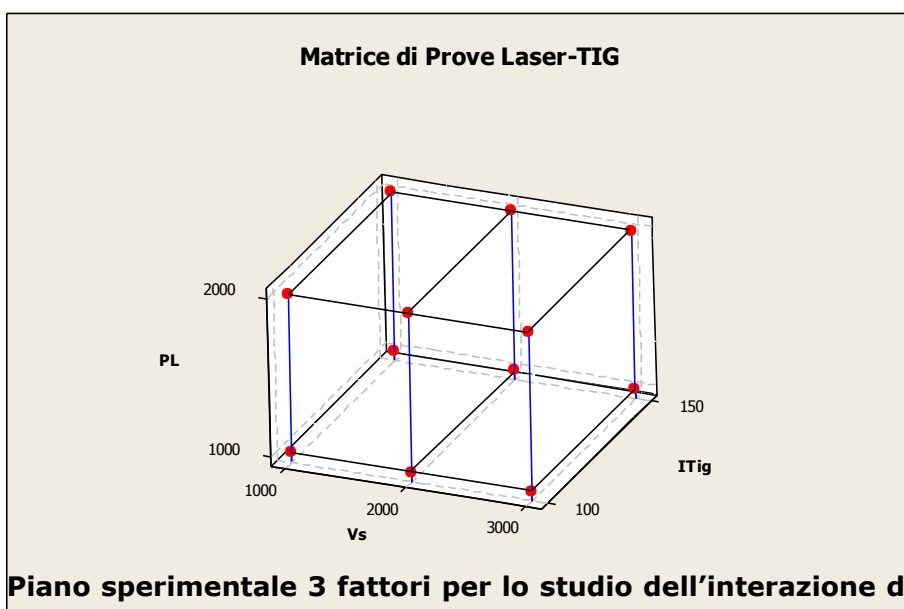
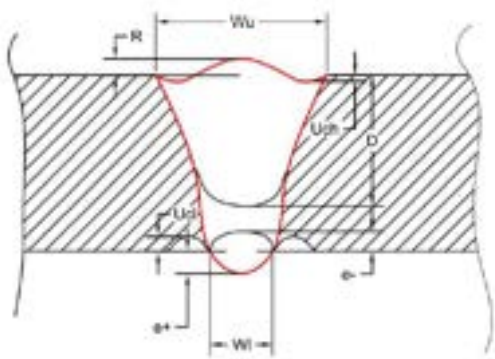


Figura 14: Piano sperimentale 3 fattori per lo studio dell'interazione del laser con il TIG su leghe di alluminio.

I parametri di risposta rappresentativi della forma e quindi della qualità del cordone di saldatura sono molteplici, i principali sono sintetizzati dalla seguente figura.



Wu: larghezza al dritto
WI larghezza a rovescio
R: sovrametallo
D: profondità di penetrazione
Ucl: incisioni alla radice
Uch ; incisioni al dritto
e+: eccesso di penetrazione
e-: concavità alla radice

Figura 15: Schema rappresentativo dei principali fattori di risposta analizzabili.

La tabella seguente sintetizza le prove effettuate e mostra le relative macrografie.

ID	PL	ITig	Vs	Macro
LTIG1	1000	150	2000	
LTIG2	1000	150	3000	
LTIG11	1000	150	1000	
LTIG5	1000	100	2000	
LTIG6	1000	100	3000	








LTIG12	1000	100	1000	
LTIG3	2000	150	2000	
LTIG4	2000	150	3000	
LTIG9	2000	150	1000	
LTIG7	2000	100	2000	
LTIG8	2000	100	3000	
LTIG10	2000	100	1000	
ID	PL	ITig	Vs	Macro

Tabella 5: Riepilogo prove BoP Laser-TIG (LTIG) con relative sezioni micrografiche.

In questa prima fase i parametri di risposta analizzati sono stati essenzialmente la larghezza del cordone al dritto (W_u) e la profondità di penetrazione. I grafici successivi riassumono come i parametri di processo influenzano la forma del cordone.

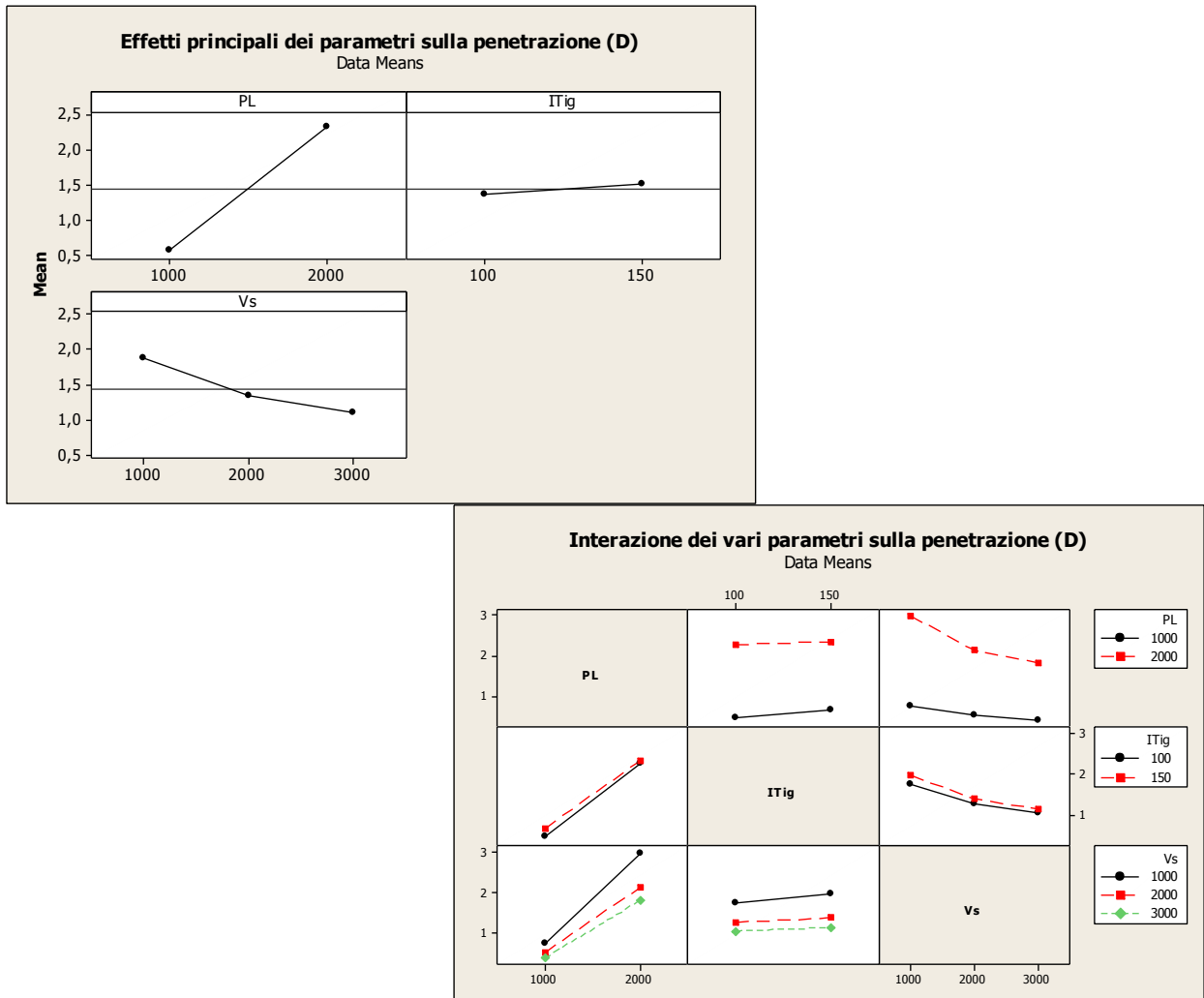


Figura 16: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo sulla penetrazione.

In particolare si osserva che è la potenza laser ad influire maggiormente sulla penetrazione, seguita dalla velocità di saldatura, mentre l'effetto della corrente TIG è assai modesto. Allo stesso tempo il grafico di interazione dei parametri evidenzia come la penetrazione sia garantita essenzialmente dalla massima potenza laser mentre a 1000W non si hanno effetti di penetrazione Key-hole a nessun livello di velocità e di potenza d'arco (ITig).

La figura seguente mostra l'andamento della penetrazione al variare dei parametri, fissate alcune condizioni.

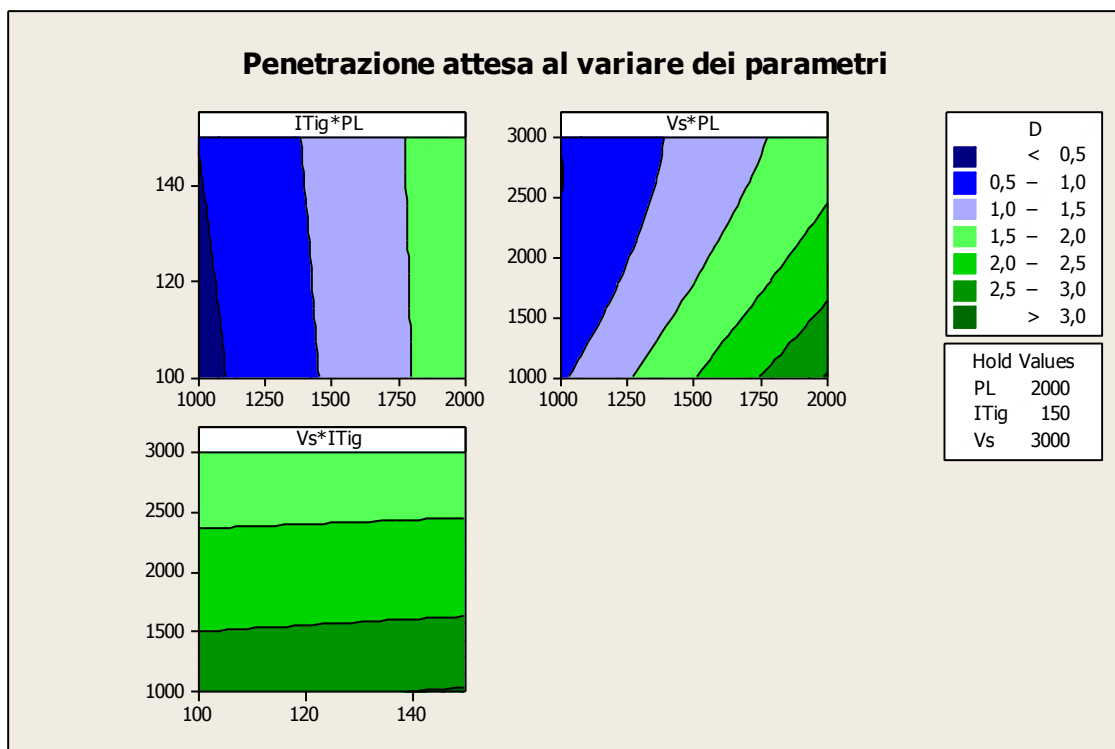


Figura 17: Andamento della penetrazione al variare di PL, ITIG e Vs

L'obiettivo finale di saldare le pelli degli AFS che hanno uno spessore di 2 mm permette di identificare le aree di maggior interesse dove concentrare le successive prove di saldatura. In particolare, fissata la Vs a 3000 mm/min, la potenza laser deve essere mantenuta a valori massimi.

La stessa analisi è stata effettuata per studiare la variazione della larghezza del cordone di saldatura al dritto. Dai grafici di **Figura 18** si osserva come in questo caso si riduce la dipendenza dalla potenza laser, mentre aumenta l'influenza sia della velocità, ma soprattutto come atteso, quella della corrente TIG (aumento della pendenza della linea del grafico).

L'incremento maggiore si ottiene alle basse velocità e ad elevate potenze, come dimostrato anche dall'osservazione delle macrografie LTIG9 ed LTIG10: sia a 100 A che a 150 A di corrente TIG si verifica un completo collasso del cordone di saldatura la cui larghezza risulta superiore allo spessore da saldare.

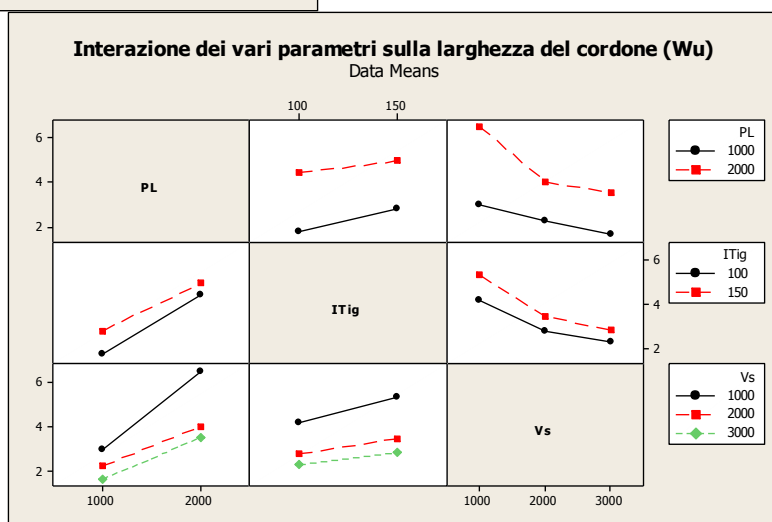
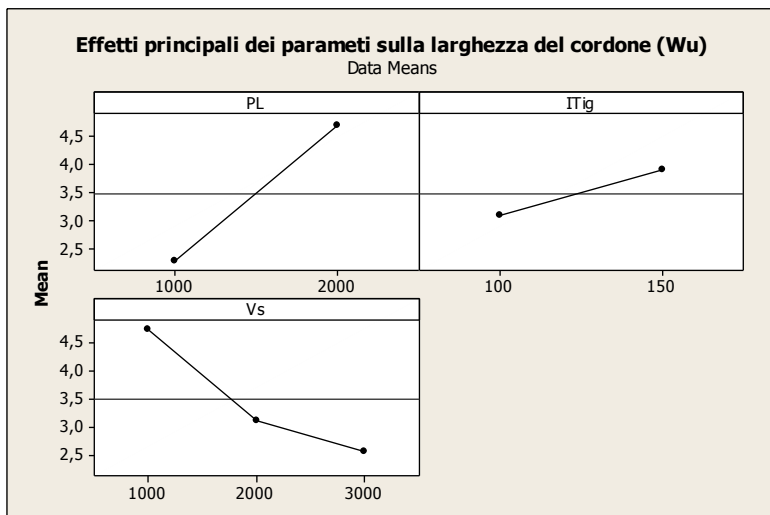


Figura 18: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo sulla larghezza del cordone al dritto.

In ultima analisi, fissati gli intervalli di *desiderabilità* per la profondità di penetrazione e per la larghezza del cordone di saldatura, è possibile estrapolare le finestre entro cui ricercare i parametri ottimali. In particolare, la **Figura 19** mostra che, fissata la penetrazione tra 1,8 e 2,1 mm e la larghezza del bagno di fusione tra 3,5 e 5 mm, è necessario utilizzare una potenza fra i 1800 e i 2000 W, mentre la corrente TIG, ha molta poca influenza.

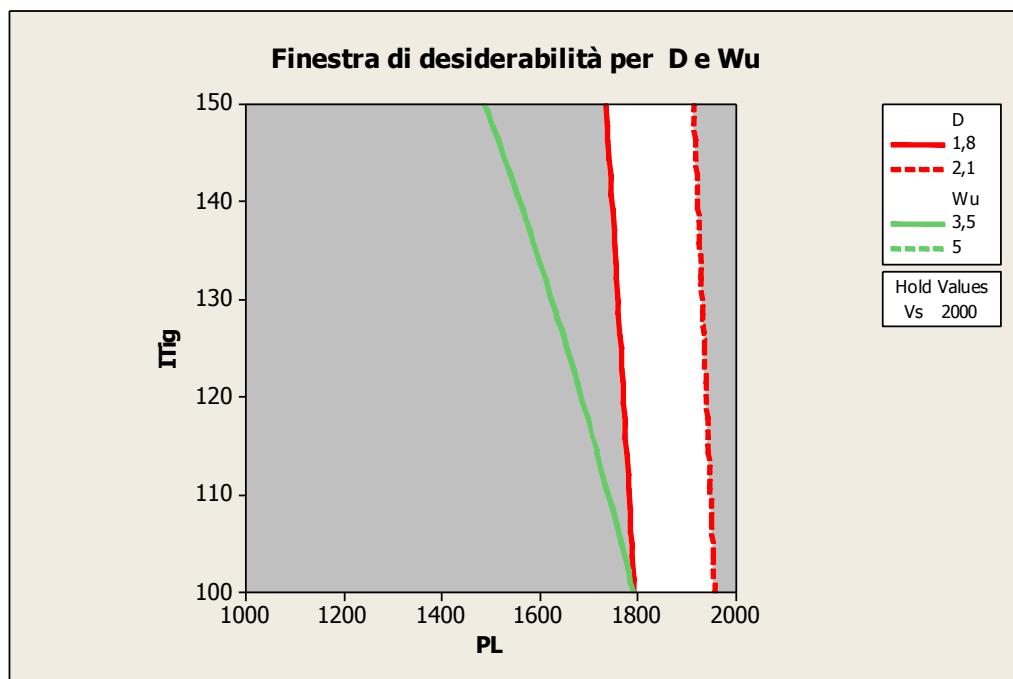


Figura 19: Finestra di desiderabilità fissata la velocità di saldatura a 2 m/min.

1.3.1 Saldatura Laser TIG di AFS

Sulla base dei risultati ottenuti nei test di rifusione sono stati identificati due possibili parametri di saldatura per le pelli dei pannelli AFS. Le prove preliminari sono state condotte su campioni di dimensioni ridotte con una lunghezza di saldatura di 100 mm e una larghezza di circa 50 mm.

La Tabella 5 sintetizza i principali parametri di saldatura utilizzati. Dall'analisi visiva preliminare è risultato che la velocità di saldatura di 2 m/min è troppo bassa, in quanto il bagno di fusione tende a collassare. L'incremento di velocità a 3 m/min invece permette di ottenere degli ottimi risultati a livello visivo.

Con gli stessi parametri BAFS_LT2 è stato realizzato un campione di qualifica (**Figura 20**) di dimensioni 100 mm x 400 mm per l'effettuazione di prove di flessione su 4 punti.

Il campione evidenzia una lieve concavità al centro della saldatura molto probabilmente dovuta a un leggero *gap* o a smussatura dei pezzi uniti. Questa problematica può trovare rimedio con l'impiego di una pur minima quantità di materiale d'apporto (filo). Ciò ha portato ad effettuare una campagna di prove, per lo sviluppo di un procedimento di saldatura laser Tig - Filo.





ID	PL	ITig	Vs	Portata gas	Aspetto al dritto e macro	
BAFS_LT1	2000	100	2000	10 NI/min		
BAFS_LT2	2000	100	3000	10 NI/min		

Tabella 6: Test di saldatura di AFS mediante Laser TIG

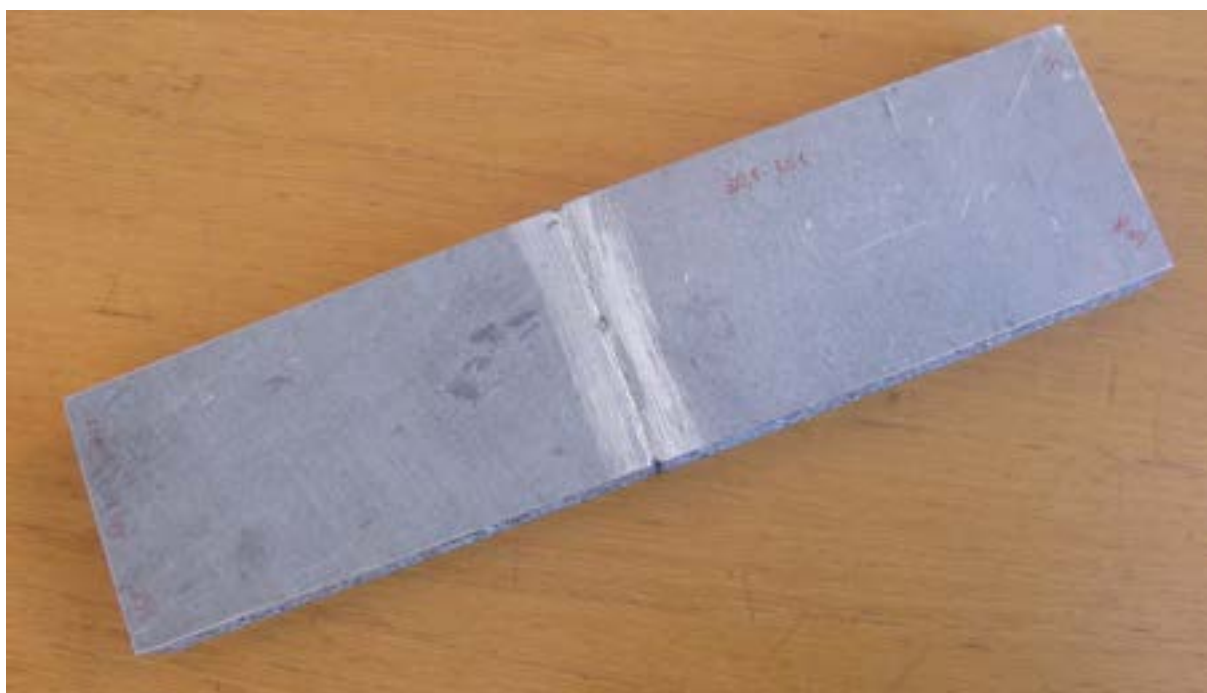


Figura 20: Campione di qualifica saldato laser- TIG 100 x 400 BAFS_LT

1.4 SET Up per saldatura filo – laser - TIG di leghe di alluminio ed analisi DoE dei principali parametri di saldatura.

Ai vantaggi estetici e di produttività, realizzati con l'utilizzo sinergico di laser e TIGm è conveniente (ed in alcuni casi obbligatorio) combinare quelli derivanti dall'aggiunta di materiale d'apporto; se è vero che in qualche caso il suo utilizzo obbliga a limitare la velocità di processo, dall'altra permette di introdurre 4 vantaggi:

- Effetti di stabilizzazione del Key-hole;
- Effetti metallurgici sulla ZF e quindi della suscettibilità alla cricatura;
- Effetti di forma, controllo del sovrametallo e compensazione dei difetti geometrici (incisioni, avvallamenti mancanza di materiale alla radice);
- Migliorata abilità di *gap bridging*.

In particolare, nella saldatura delle leghe di alluminio, ed ancor più nel nostro caso (piccoli spessori), l'introduzione della tecnica ibrida, con filo d'apporto, promette di introdurre notevoli vantaggi in termini di stabilizzazione del processo (ad esempio eliminando le forature dovute a variazioni locali di spessore della lamiera) e in termini di riduzione dei difetti di forma.

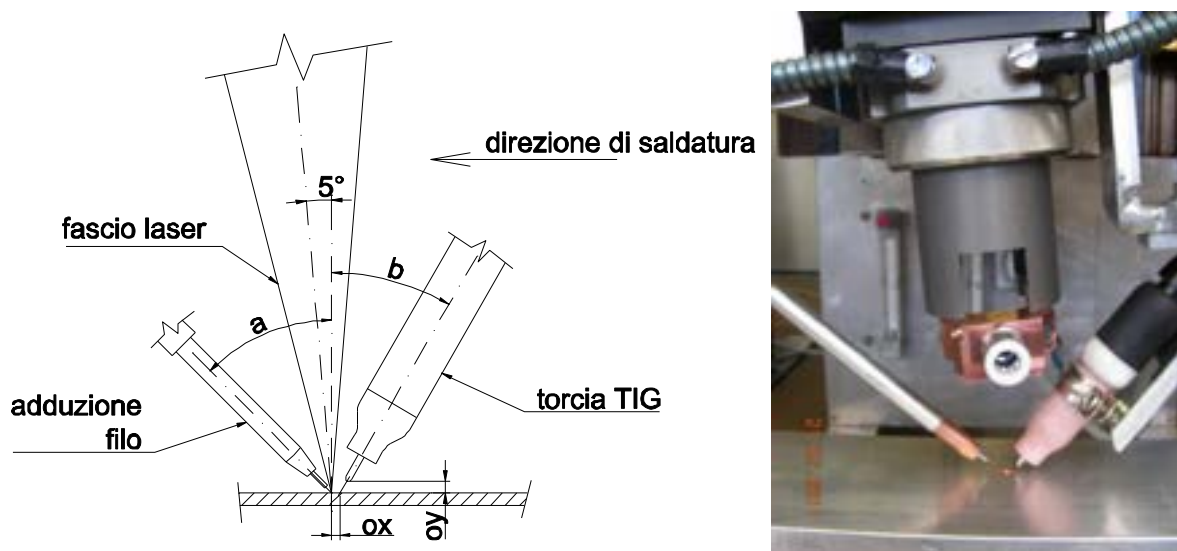


Figura 21: Schema di saldatura Filo - Laser - TIG.

Le prove preliminari sono state effettuate per identificare i parametri geometrici ed il range di stabilità del processo, su un profilato di AA6060 con spessore 3 mm.

Il piano sperimentale DoE prevede 3 fattori:

- Velocità di Saldatura (V_s)
- Corrente TIG (I_{Tig})
- Velocità del filo d'apporto (V_w)

Inizialmente era stato previsto un quarto fattore, relativo alla potenza laser, tuttavia, alcune prove effettuate a 1600 W, hanno evidenziato come una potenza inferiore a 2000W su questo tipo di lega non permetta di innescare alcun effetto sinergico Laser - TIG.

O_x è stato fissato pari a 0 puntando virtualmente l'elettrodo di tungsteno in corrispondenza del punto di interazione laser materia. La Distanza O_y è stata invece impostata, come per le prove Laser TIG, a 2 mm.

Sulla base delle prove Laser Tig e considerando che l'introduzione del filo comunque assorbe parte dell'energia disponibile al processo, i livelli di velocità prescelti sono stati 2 e 1,5 m/min. Infatti, la velocità di 1 m/min era risultata troppo bassa, con collasso del bagno fuso ed allo stesso tempo la velocità di 3 m/min non permetteva di superare 1,5 mm di penetrazione.

Sono state lasciate invariate le correnti TIG, che avevano comunque evidenziato una buona stabilità del processo ed una larghezza ottimale all'interno del range di velocità di processo considerato. La figura seguente riassume il piano sperimentale di prove effettuato.

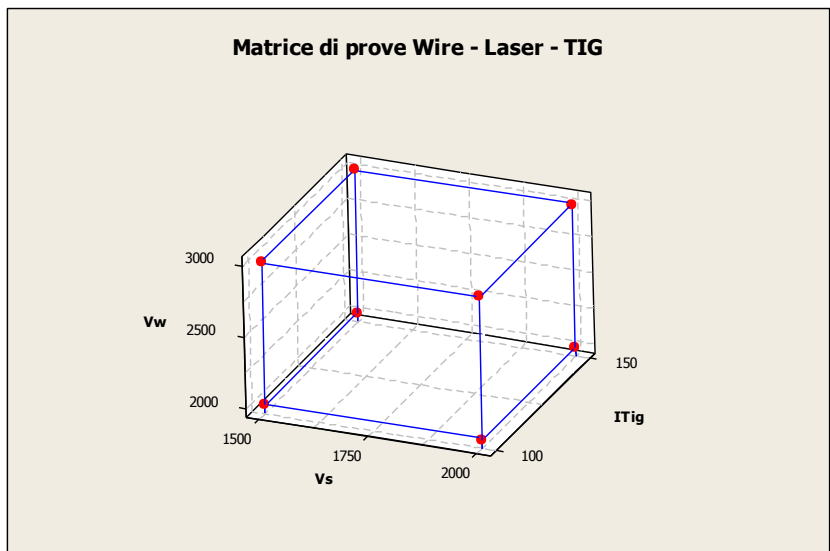





Figura 22: Piano sperimentale 3 fattori due livelli per lo studio dell'interazione fra velocità di processo, quantità di filo e potenza d'arco su leghe di alluminio AA6060.

La tabella seguente riporta le prove con le relative sezioni macrografiche per le quali sono stati analizzati essenzialmente i principali parametri di risposta relativi alla forma del cordone (D, Wu , WI, R ed e).

ID	Vs	ITig	Vw	PL	Macro
WLT1	2000	150	2000	2000	
WLT3	2000	150	3000	2000	
WLT2	2000	100	2000	2000	







WLT4	2000	100	3000	2000	
WLT7	1500	150	2000	2000	
WLT5	1500	150	3000	2000	
WLT8	1500	100	2000	2000	
WLT6	1500	100	3000	2000	
WLT9	1500	150	2000	1600*	
WLT10	1500	100	2000	1600*	NA
ID	Vs	ITig	Vw	PL	Macro

Tabella 7: Test di saldatura Wire Laser TIG

L'analisi DOE è stata effettuata sui vari parametri geometrici della sezione macrografica con riferimento allo schema di Figura 15, anche se solo per le prove WLT7 e WLT5 è possibile rilevare tutti i dati.

L'effetto di maggior interesse è la penetrazione del bagno di fusione. La **Figura 23** mostra che, per quanto riguarda gli effetti principali, la penetrazione come atteso aumenta con

l'incremento della Corrente TIG e diminuisce con l'incremento della velocità di processo. Molto limitata è l'influenza della quantità di filo d'apporto che per di più (sui dati medi) è in controtendenza con quanto atteso, dal momento che si riscontra un lieve incremento di penetrazione aumentando la quantità di filo mentre era da attendersi una riduzione poiché la fusione del filo assorbe una parte di energia.

Infatti, dall'analisi più approfondita del grafico di interazione dei parametri si osserva che, per correnti ITig di 100 A, l'aumento della quantità di filo induce effettivamente una riduzione della penetrazione, mentre, per correnti ITIG di 150 A, si ha l'opposto: ciò indica che la corrente TIG più alta induce una maggiore capacità di fusione del filo ma crea anche un effetto sinergico di penetrazione laser, il cui aumento è più che proporzionale all'incremento di energia richiesta per la fusione del filo.

Questo effetto opposto del parametro Vw si osserva anche al variare della velocità di processo, ovvero, per VS = 1500 mm/min, all'aumentare della quantità di filo in media si ha una riduzione della capacità di penetrazione, mentre con Vs = 2000 mm/min l'effetto è che un aumento della quantità di filo induce un aumento della penetrazione.

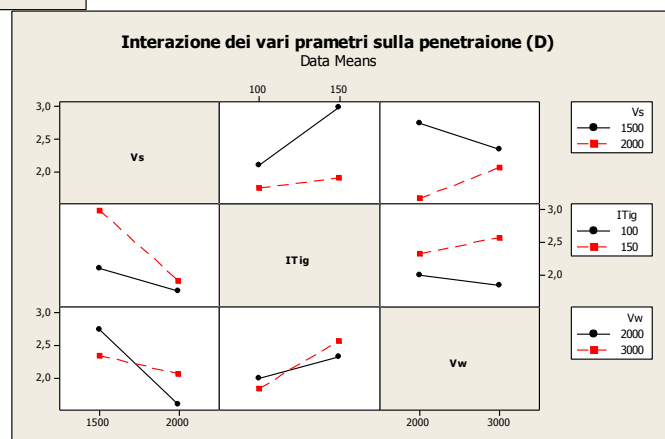
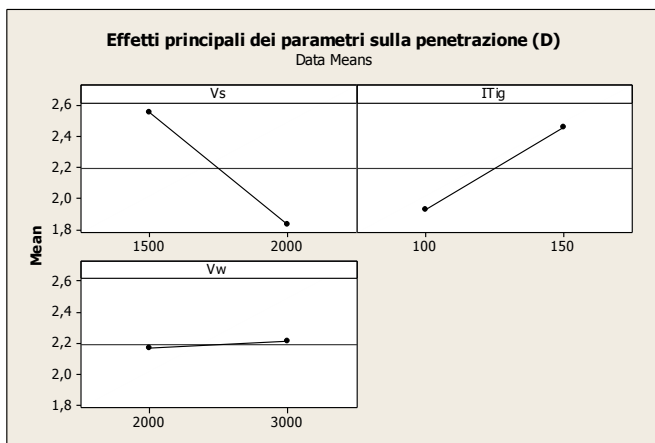


Figura 23: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo filo-laser-TIG sulla penetrazione.

Questi fenomeni possono essere spiegati ipotizzando due differenti azioni del filo, oltre al solo bilancio energetico inizialmente ipotizzato:

- 1- Azione meccanica di maggiore spinta penetrante del filo, che è inserito esattamente nel centro del bagno di fusione;
- 2- Azione "ottica" e metallurgica del filo che è una lega AA5183, con un assorbimento assai più elevato della radiazione laser rispetto al materiale Base AA6060.

Molto più prevedibili sono risultate le analisi dell'effetto dei parametri sulla larghezza del bagno di fusione. Come mostrano i grafici di **Figura 24** la larghezza aumenta al diminuire della velocità e con l'aumento della corrente TIG, mentre è praticamente inesistente l'influenza della quantità di filo, ad indicare che nel range di velocità e potenze utilizzate il filo trova sempre sufficiente energia per sciogliersi completamente.

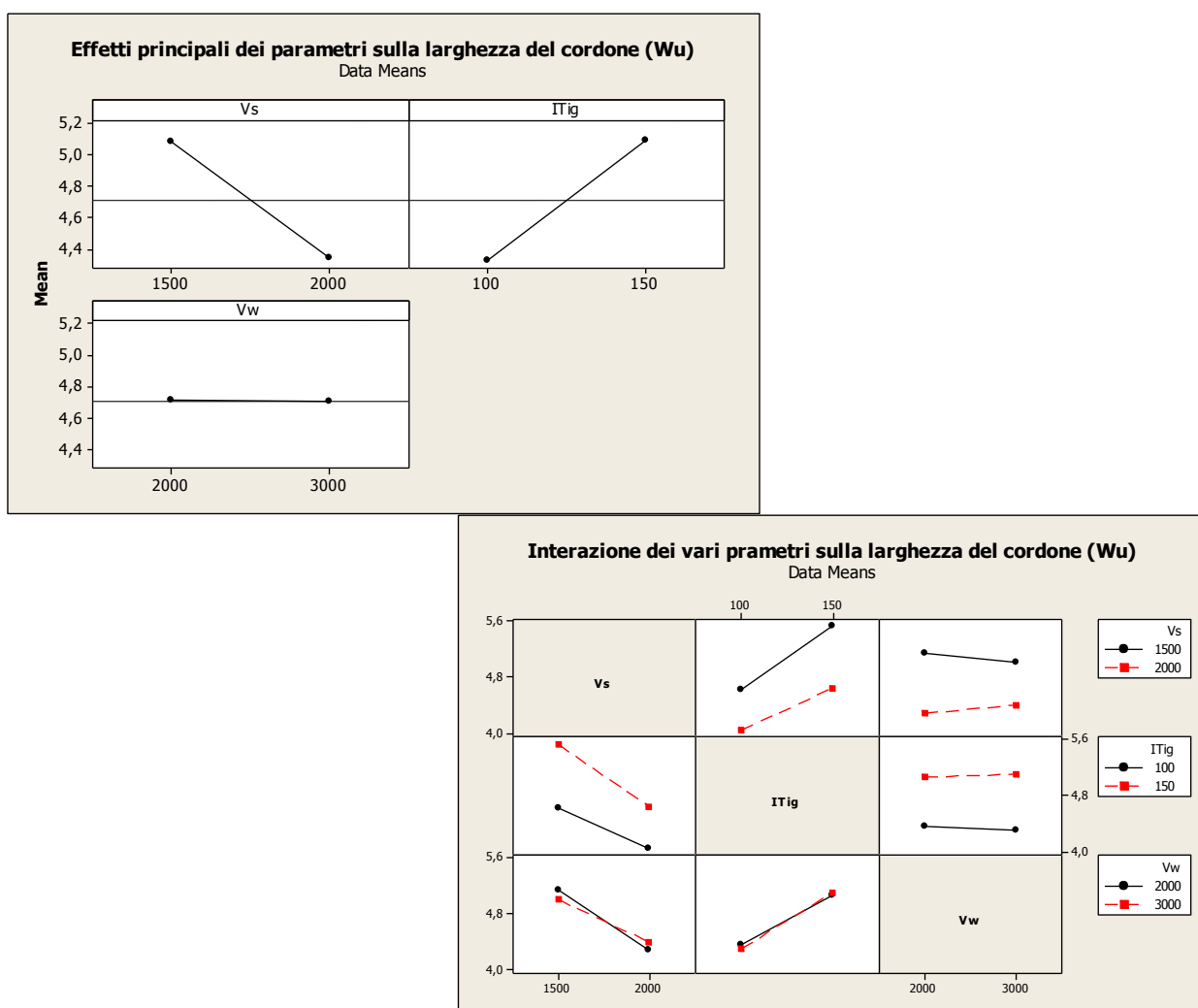


Figura 24: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo filo-laser-TIG sulla Larghezza del bagno di fusione.

La lieve riduzione della larghezza indotta dalle maggiori quantità di filo è coerente con l'effetto di assorbimento di energia, in particolare della componente TIG, che porta ad una lieve riduzione della larghezza del bagno fuso al dritto.

Gli effetti sul sovrametallo, molto spesso espressamente richiesto anche in termini contrattuali, nell'esecuzione di manufatti (ma altrettanto spesso inutile e dannoso in termini di

resistenza a fatica) sono stati in parte in linea con quanto atteso. I risultati dell'analisi DoE sono sintetizzati nei grafici della figura seguente.

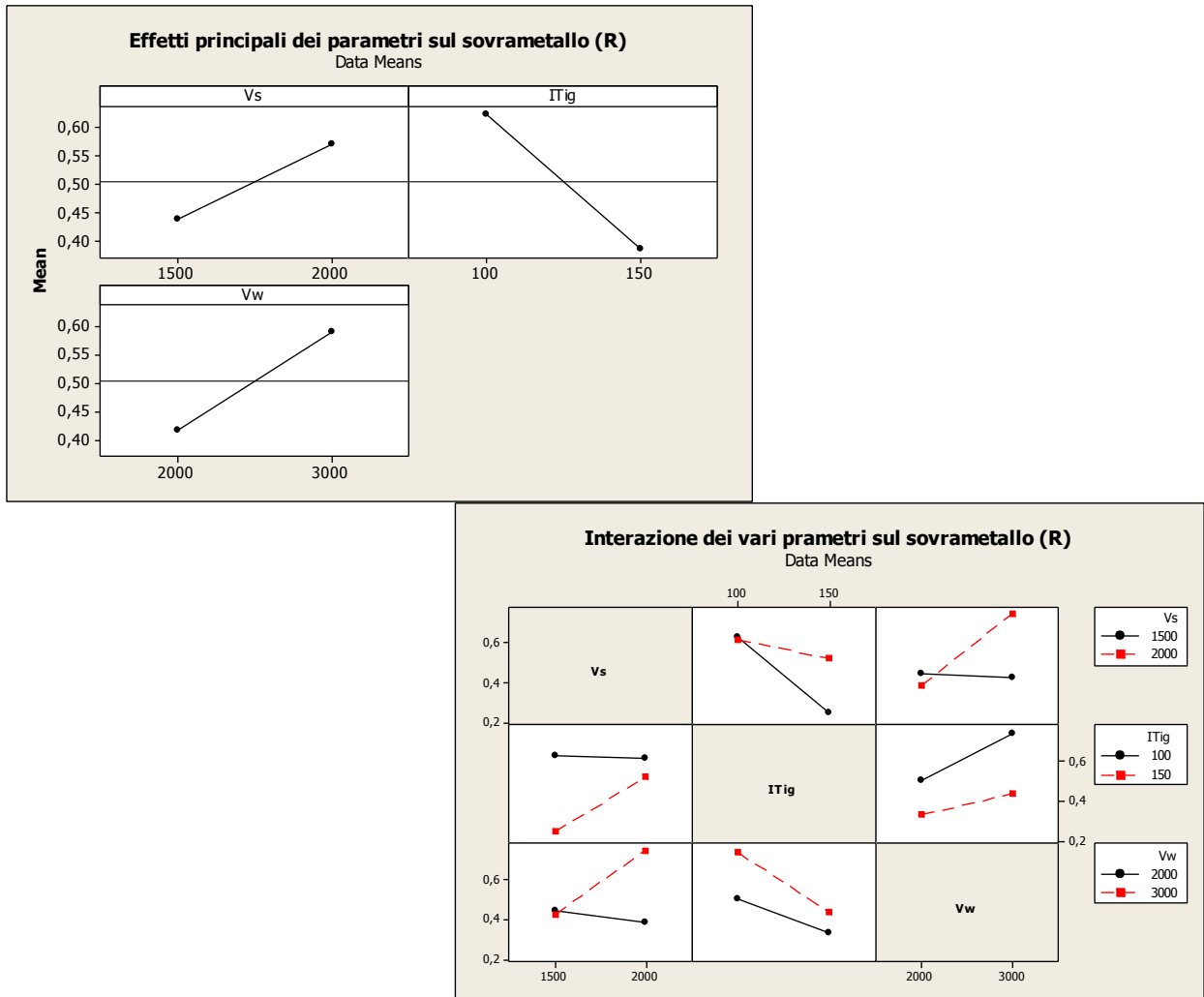


Figura 25: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo filo-laser-TIG sul sovrametallo.

Il sovrametallo, aumenta con l'aumentare della quantità di filo e con la riduzione della corrente TIG (cordone più stretto e quindi più alto) tuttavia l'effetto della velocità del processo (Vs) è del tutto opposto a quanto atteso. Infatti, con la riduzione della velocità di processo a parità di quantità di filo d'apporto, il volume di filo depositato per mm di saldato è certamente maggiore. Questo dato in controtendenza è tuttavia giustificato dal fatto che, mentre a velocità di 2 m/min non si è mai raggiunta la penetrazione, con il conseguente deposito del filo d'apporto tutto concentrato al dritto e quindi in sovrametallo, alla velocità di 1,5 m/min e 150 A si è ottenuta una piena penetrazione, con sovrametallo praticamente inesistente, compensato da un eccesso di penetrazione considerevole.

Se infatti si analizza il grafico relativo alle interazioni dei parametri si osserva che la pendenza delle linee di tendenza è opposta nei grafici Vs-Vw.

Per completezza, anche se ottenute con un numero di dati limitato, di seguito sono riportate le analisi riferite anche all'eccesso di penetrazione (e+) ed alla larghezza del cordone alla radice (WI).

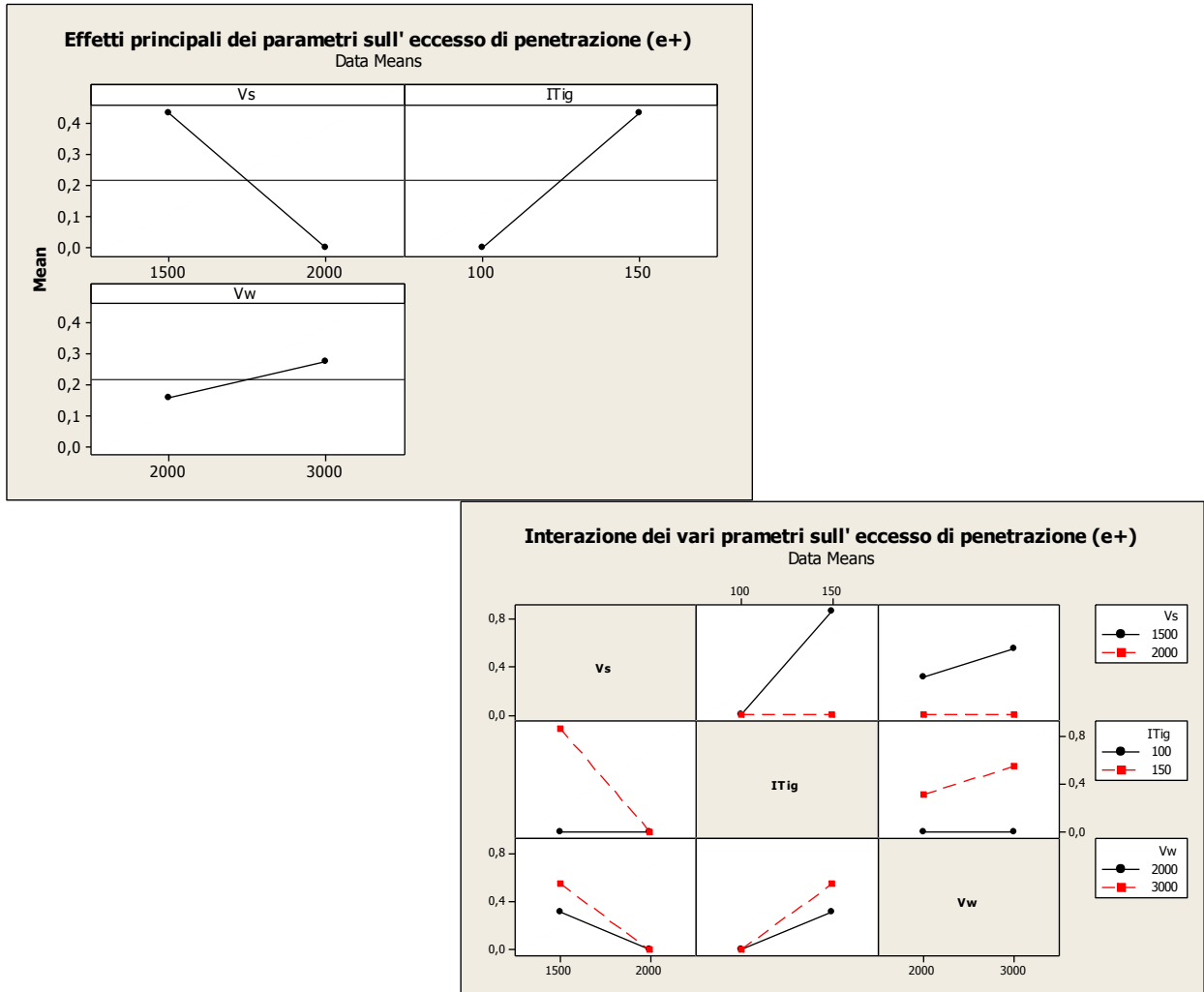


Figura 26: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo filo-laser-TIG sull'eccesso di penetrazione.

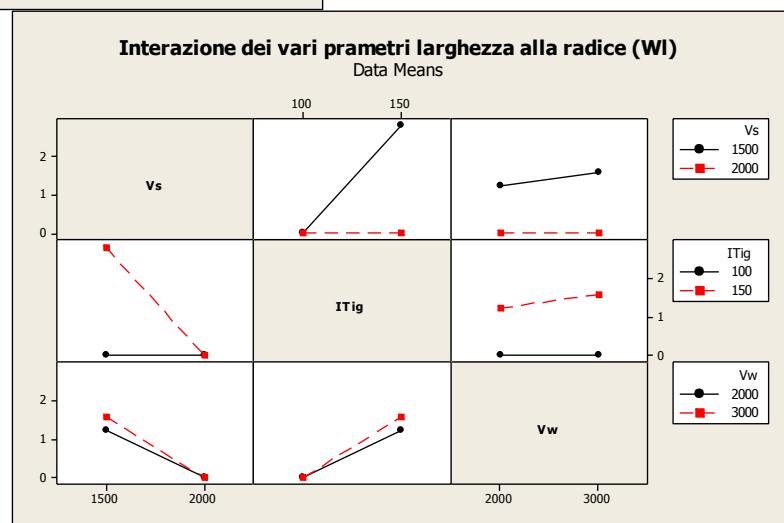
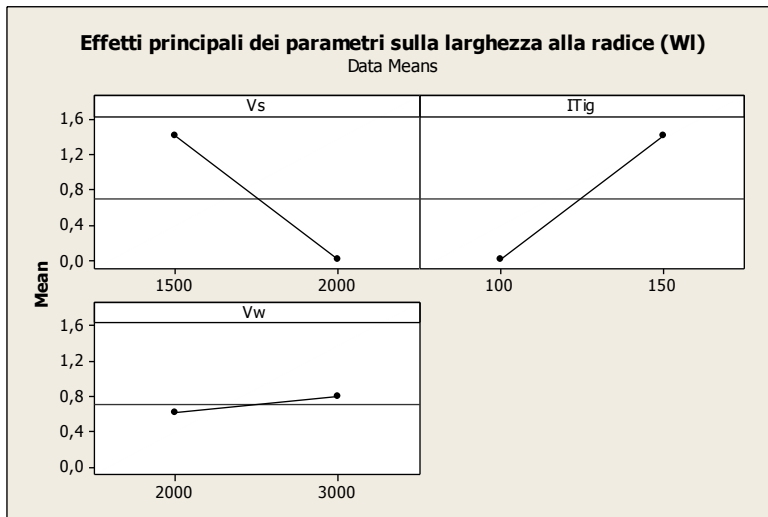


Figura 27: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo filo-laser-TIG sulla larghezza del cordone alla radice.

Ipotizzando che il cordone di saldatura delle pelli, con una profondità di penetrazione di 2 mm, abbia caratteristiche geometriche che rientrano nei limiti di accettabilità della normativa (UNI EN ISO 13919-2 Giunti saldati a fascio elettronico e laser - Guida dei livelli di qualità delle imperfezioni Parte 2: Alluminio e sue leghe livello C medio) avremo:

- $D=2$ mm;
- $e+\leq 0,6$ mm;
- $R\leq 0,8$ mm.

Considerato che l'eccesso di penetrazione può rientrare in $e+$ e che per saldature laser di testa è in generale sufficiente una minore energia, rispetto alle prove BoP, possiamo impostare i seguenti limiti per la determinazione di una finestra di parametri di primo tentativo da utilizzare per le prove di ottimizzazione su campioni reali di AFS.

D	$e+$	R
1.8- 2.2	≤ 0.4	$\leq 0,6$

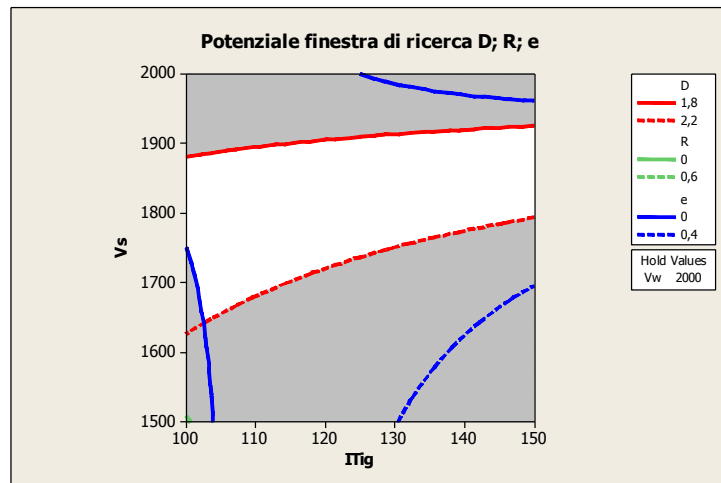


Figura 28: Potenziale finestra di ricerca all'interno del range di parametri già investigato.

Alla luce dei risultati ottenuti con la metodologia Laser Tig sui campioni AFS che hanno dimostrato la saldabilità con $V_s=3000$ mm/min, sono state estrapolate anche finestre al di fuori del range di prove effettuate.

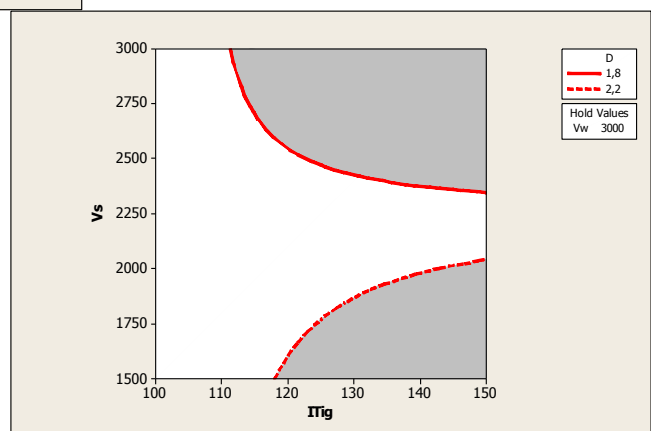
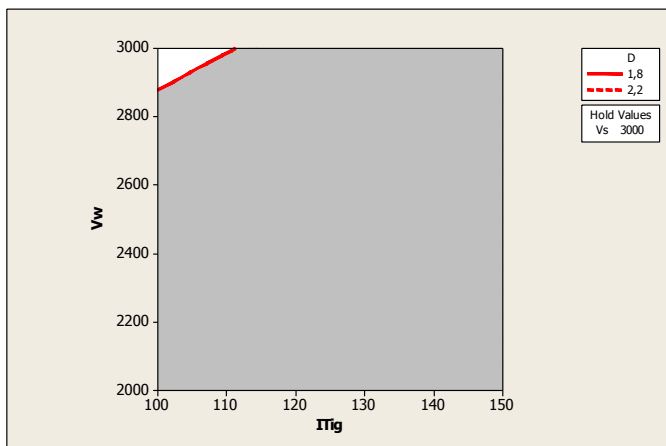


Figura 29: Potenziali finestre di ricerca all'esterno del range di parametri già investigato.

1.4.1 Saldatura Laser TIG di AFS

Integrando i dati dell'analisi DoE sui test WLT e delle prove reali su AFS BAFS_LT è stato deciso di fissare i seguenti parametri di saldatura:



ID	Vw	ITig	Vs	Portata gas	Aspetto al dritto e Macro
BAFS_WLT1	3000	150	3000	10 NI/min	
BAFS_WLT2	3000	100	3000	10 NI/min	
BAFS_WLT3*	4000	150	3000	10NI/min	* Gap Variabile da 0.3 a 0.5 mm

Tabella 8: Test di saldatura di AFS mediante filo Laser TIG

Le saldature effettuate con uguali Velocità di saldatura e del filo, con lembi perfettamente fresati ed allineati, hanno dato un risultato visivamente accettabile, sia con 150 A sia con 100 A. In quest'ultimo caso il cordone è leggermente più stretto.

Un'ulteriore prova è stata effettuata con un gap fra i lembi variabile da 0,3 a 0,5 mm. In questo caso è stata aumentata la velocità del filo per riempire il Gap corrispondente a 0,6 e 1 mmq: la quantità di filo depositato è cresciuta da 1,13 mmc/mm a 1,5 mmc/mm.

Dall'analisi delle sezioni macrografiche è evidente che la saldatura BAFS_WLT3 ha una forma del cordone accettabile, sia con gap 0,3 sia con gap 0,5. In particolare, all'aumentare del gap si ha un maggiore "gocciolamento" del materiale al rovescio. Resta da studiare ulteriormente il problema della riduzione delle porosità, tipico della saldatura laser di leghe di alluminio, che è tuttavia da ritenersi ancora più accentuato dalla inevitabile presenza di componenti residui schiumati alla radice che, pur in piccola parte, vengono portati nel bagno di fusione.



Figura 30: BAFS_WLT3: Dx parte iniziale con Gap 0.3mm; Sx parte finale con Gap 0.5mm.

CAPITOLO 2

**Sviluppo di procedimenti di saldatura EBW di pannelli Aluminum Foam Sandwich
(AFS)**

2.1 Saldatura EBW delle leghe di alluminio

I processi di saldatura inducono irrimediabilmente deformazioni nei componenti saldati a causa dei fenomeni di riscalamento della zona fusa (ZF) e del materiale limitrofo. Il livello di deformazione è direttamente correlato alle proprietà fisiche del materiale ed all'apporto termico. Quest'ultimo è inversamente proporzionale alla densità di energia che la sorgente termica è in grado di erogare (concentrazione di energia).

Per grandi manufatti è l'abilità del saldatore, associata ad una corretta progettazione del giunto (preparazioni ad X, Narrow Gap etc.), che permette di mitigare e/o compensare le deformazioni indotte durante i processi di saldatura con tecnologie tradizionali (GMAW, SMAW e GTAW).

Su elementi speciali come possono essere considerati i pannelli AFS, solamente il ricorso a tecnologie di saldatura speciali permette di realizzare manufatti entro limiti desiderati di deformazione con enormi vantaggi in termini di rifusione dei tempi e costi per raddrizzamento, stuccatura e verniciatura. Le tecnologie ad alta concentrazione di energia permettono di realizzare profondità di saldatura elevate con basso apporto termico e ridotta ampiezza della ZF. I principali procedimenti di saldatura ad energia concentrata, detti anche key-hole, sono di seguito riportati in ordine di densità di potenza erogabile: Electron Beam Welding, Laser beam Welding e Plasma Arc Welding. Usualmente questo tipo di tecnologie vengono utilizzate per la produzione di grandi serie dove il procedimento, opportunamente calibrato, permette di realizzare il prodotto finito senza la necessità di ulteriori lavorazioni. L'applicazione di questa tecnologia alla saldatura di pannelli AFS e di questi con estrusi di alluminio per il collegamento a main frame primari di grandi vettori leggeri per il trasporto collettivo come possono essere, Treni, Bus, Navi sono legati alla elevata qualità di giunzione realizzabile sulle leghe di alluminio che permettono di definire un benchmark di riferimento per le altre tecnologie di saldatura per fusione.

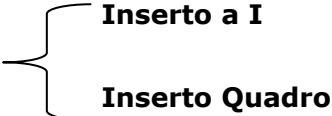
2.2 SET Up e test di saldatura EBW

L'obiettivo finale è la definizione dei parametri di saldatura ottimali per giunzioni di testa, senza e con inserti, di pannelli ASF con pelli di spessore 2 mm. La saldatura con tecniche tradizionali usualmente prevede l'esecuzione di fillet joint interessanti solo parzialmente lo spessore delle pelli. Tuttavia, se da un lato l'impiego di tecniche con materiale d'apporto permette di realizzare comunque giunzioni continue con sezione resistente desiderata ed eventualmente superiore allo spessore stesso delle pelli, dall'altra realizza punti di intensificazione delle tensioni il cui comportamento a fatica sarà certamente pregiudicato.

Lo studio mira quindi a realizzare una giunzione continua di testa che permetta una più diretta distribuzione delle linee di forza e riduca il fattore di intensificazione delle tensioni. L'impiego di inserti che garantiscono il contemporaneo collegamento trasversale fra le pelli nella zona di saldatura permette la trasmissione degli sforzi di taglio fra le due pelli nella zona in cui la schiuma è interrotta. Considerato il costo di pannelli AFS per i primi piani sperimentali BoP sono state utilizzate lamiere in AA6060 spessore 2mm.

In prima analisi sono state esaminate le caratteristiche principali del cordone tralasciando i difetti che potranno essere più correttamente analizzati nelle reali configurazioni di saldatura.

I tipi di giunzione realizzati sono:

- BUTT Joint Pelle – Pelle senza sostegno;
- BUTT Joint Pelle- inserto- Pelle : 

L'impianto utilizzato per l'esecuzione delle saldature è situato nel centro ricerche ENEA – Casaccia di Roma ed è costituito dai seguenti componenti:

- Un cannone ad elettroni (Techmeta), modello CT4 con potenza massima di 50 kW e tensione massima d'accelerazione di 80 kV. Il funzionamento è in triodo a riscaldamento indiretto e condizioni di funzionamento sotto vuoto 10^{-5} - 10^{-6} mbar. Il cannone è posizionato su un sistema di movimentazione che consente una traslazione (sull'asse Y) di 450 mm con velocità regolabili da 0.1 a 4 m/min.
- Una camera di saldatura di 1.3 m³ (dimensioni interne: lunghezza 1300 mm; larghezza 1000 mm; altezza 1000 mm) contenente il sistema di posizionamento e traslazione (sull'asse X) dei pezzi da saldare. La corsa utile della tavola porta-pezzi è 580 mm, con la possibilità di regolare la velocità da 0.1 a 4 m/min. Il vuoto nella camera durante la saldatura è di 10^{-3} - 10^{-4} mbar ed il gruppo di pompaggio permette il suo raggiungimento in circa 3 minuti.
- Due bobine di focalizzazione del fascio alimentate e comandate elettronicamente da un generatore a c.c. regolabile da "0" a "5 A".
- Quattro bobine che consentono di deflettere la traiettoria del fascio nelle direzioni "X" e "Y" singole o combinate, con una frequenza massima di 2000 Hz e forme d'onda differenti che permettono di muovere il fascio in modo circolare, quadrangolare etc.
- Sistema CNC che controlla oltre ai parametri di saldatura la movimentazione degli assi X, Y e α (mandrino rotante).
- Sistema di acquisizione dati che permette di registrare i principali parametri di processo.

In figura 1 è mostrato lo schema dell'impianto di saldatura.

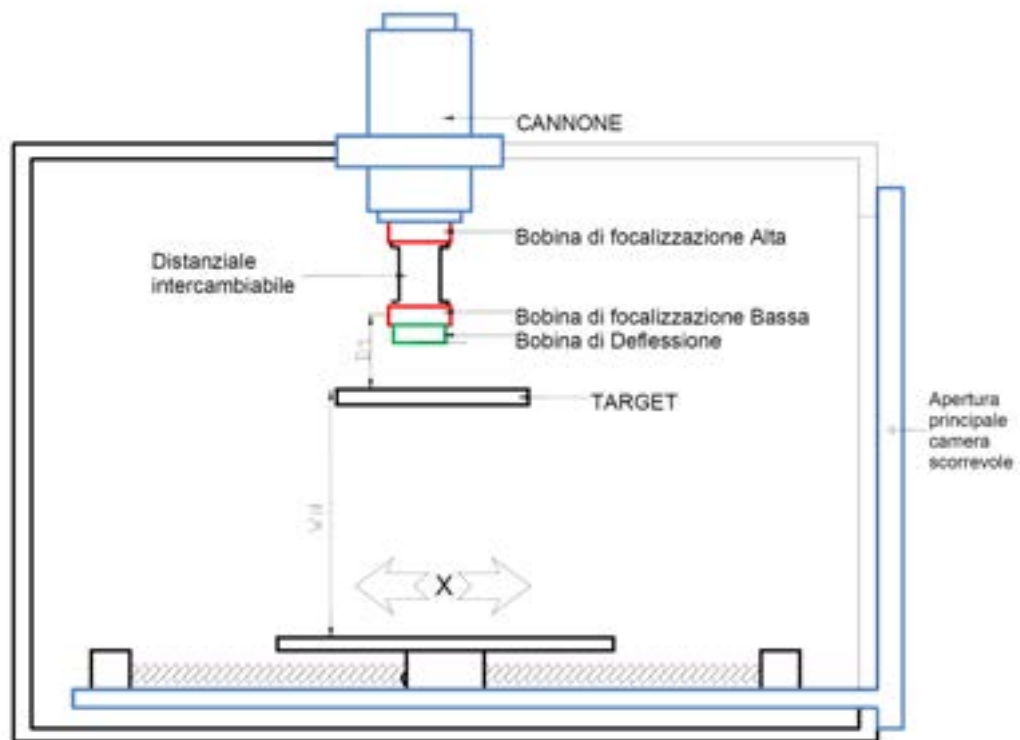


Figura 31: Schema del set-up interno all'impianto fascio elettronico adottato.

2.3 Analisi DoE dei principali parametri di saldatura EBW

Come anticipato considerato l'elevato costo dei pannelli AFS , in analogia a quanto fatto nello sviluppo dei processi di saldatura laser e laser arco, le prove preliminari sull'influenza dei parametri di saldatura sono state effettuate con più economiche prove "Bead on Plate" (BoP) ovvero di rifusione su materiale surrogato quali le lamiere della più comune lega AA6060.

I principali parametri di saldatura investigati sono stati:

- Focalizzazione (f),
- deflessione (d),
- corrente di saldatura (I_s)
- velocità di saldatura (V_s)

Sono stati realizzati due distinti piani sperimentali a velocità differenti V_1 e V_2 sulla base dell'esperienza. La figura seguente sintetizza i due piani sperimentali realizzati.

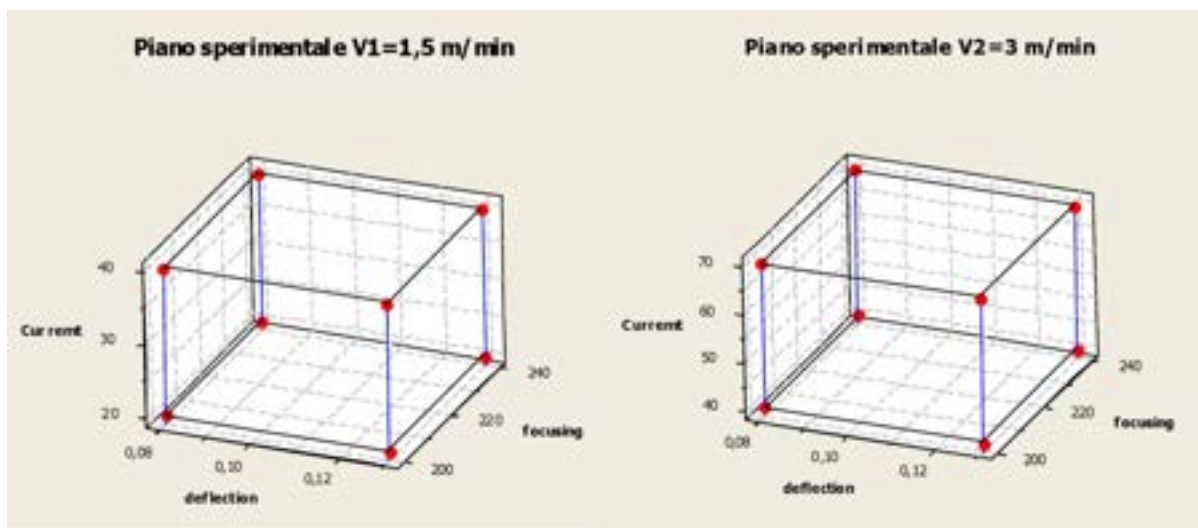


Figura 32: Piani sperimentali tre fattori due livelli realizzati a due differenti velocità di saldatura.

I test sono stati condotti effettuando due repliche per ciascun esperimento. Alla velocità $V1= 1500$ mm/min non si sono evidenziate particolari problematiche mentre alla velocità $V2= 3000$ mm/min in alcuni casi si è osservato il fenomeno della cricatura a caldo per cui i dati inseriti per l'elaborazione sono stati mediati. Le tabelle seguenti riportano i principali parametri geometrici di risposta analizzati per i due piani sperimentali.

L'analisi DoE del primo piano sperimentale indica una maggior influenza di focalizzazione e deflessione sulla penetrazione (**Figura 33** e **Figura 34**) rispetto alla deflessione che ha un andamento inatteso in quanto in media induce un aumento di penetrazione con l'aumento della stessa ovvero con una riduzione della densità di energia in quanto il valore più ampio della deflessione distribuisce il fascio su una maggiore superficie.

Per il piano sperimentale a velocità $V2$ l'analisi DoE sulla penetrazione non permette di ottenere linee di tendenza indicative in quanto in tutte le prove si raggiunge la piena penetrazione ovvero $D=2$ mm.

ID	Current	focusing	deflection	Deph [D]	Wu	WI
X1	20	200	0.08	1.05	2.58	0
X2	40	200	0.08	2	1.5	1.2
X3	20	240	0.08	1.9	2.78	0
X4	40	240	0.08	2	3.03	2.03
X5	20	200	0.13	1.32	2.66	0
X6	40	200	0.13	2	2	1.12
X7	20	240	0.13	1.96	2.42	0
X8	40	240	0.13	2	2.43	1.67
X9	20	200	0.08	1.43	2.51	0
X10	40	200	0.08	2	1.54	1.22
X11	20	240	0.08	1.63	2.32	0
X12	40	240	0.08	2	3	2
X13	20	200	0.13	1.45	2.56	0
X14	40	200	0.13	2	2.15	1.3
X15	20	240	0.13	1.98	2.5	0
X16	40	240	0.13	2	2.12	1.4

Tabella 9: test BoP effettuati a V1= 1500 mm/min

ID	Current	focusing	deflection	Deph [D]	Wu	WI
k1	40	200	0.08	2	1.87	1.5
k2	70	200	0.08	2	1,9	1.44
k3	40	240	0.08	2	2	1.25
k4	70	240	0.08	2	2,17	1.53
k5	40	200	0.13	2	1,99	1.01
k6	70	200	0.13	2	1,80	1.12
k7	40	240	0.13	2	2,32	1.89
k8	70	240	0.13	tagliata		
k9	70	200	0.08	2	2	1.5
k10	40	200	0.08	2	1.97	1.31
k11	70	240	0.08	2	2.4	2.1
k12	40	240	0.08	2	2.05	1.22
k13	70	200	0.13	2	1.96	1.1
k14	40	200	0.13	2	1.97	1.31
k15	70	240	0.13	tagliata		
k16	40	240	0.13	2	2.3	1.8

Tabella 10: test BoP effettuati a V2= 3000 mm/min

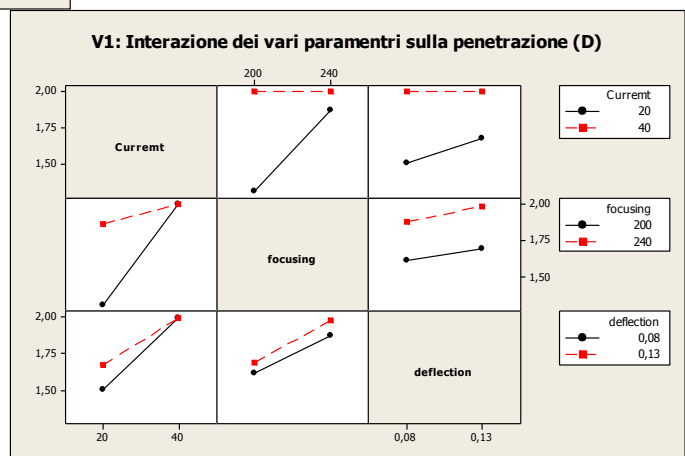
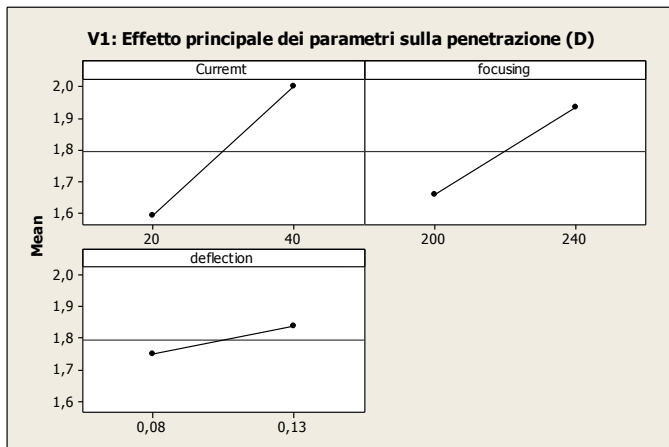


Figura 33: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo EBW a V1 sulla penetrazione.

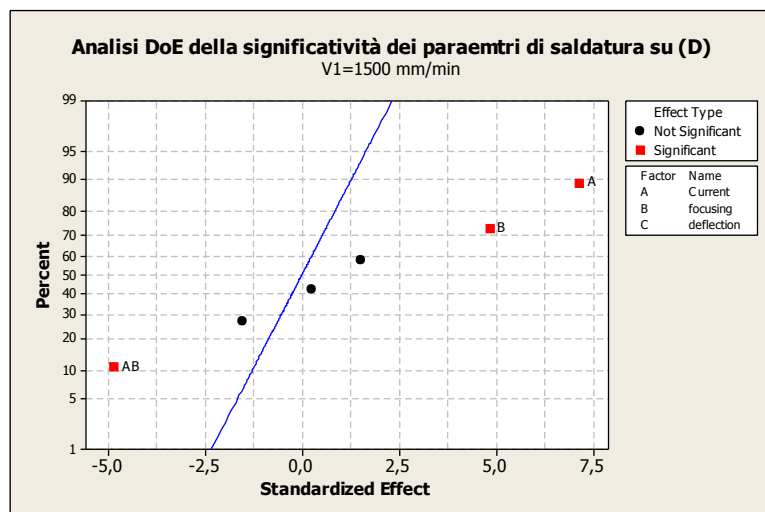


Figura 34: analisi del piano fattoriale ed individuazione dei fattori maggiormente influenzanti il processo e delle loro interazioni.

Le figure successive riportano l'analisi DoE su Wu e WI. A velocità V1 = 1,5 m/min e con livelli bassi di corrente, per quanto riguarda Wu è evidente un incremento della larghezza del

bagno fuso con l'incremento del parametro di focalizzazione e con la riduzione della corrente di saldatura. Questo può essere giustificato in quanto il valore basso della corrente riduce l'effetto penetrante del fascio con la conseguenza di distribuire in superficie l'energia e quindi allargare il bagno di fusione al dritto a scapito della penetrazione. Come per la penetrazione anche in questo caso gli effetti medi della deflessione sono più limitati rispetto agli altri due parametri e sempre inattesi. In questo caso tuttavia, analizzando il grafico di interazione dei parametri è possibile osservare come il valore massimo di larghezza di ottenga per la deflessione minima ma focalizzazione peggiore entrambi parametri agiscono sulla densità di energia di fascio sul pezzo.

A velocità $V_2 = 3$ m/min e livelli di corrente più elevati si osserva come le linee di tendenza siano più in linea con quanto atteso ovvero all'aumentare della corrente della deflessione e della defocalizzazione si ha un incremento in W_u . In questo caso la corrente ha una minore influenza rispetto al caso precedente.

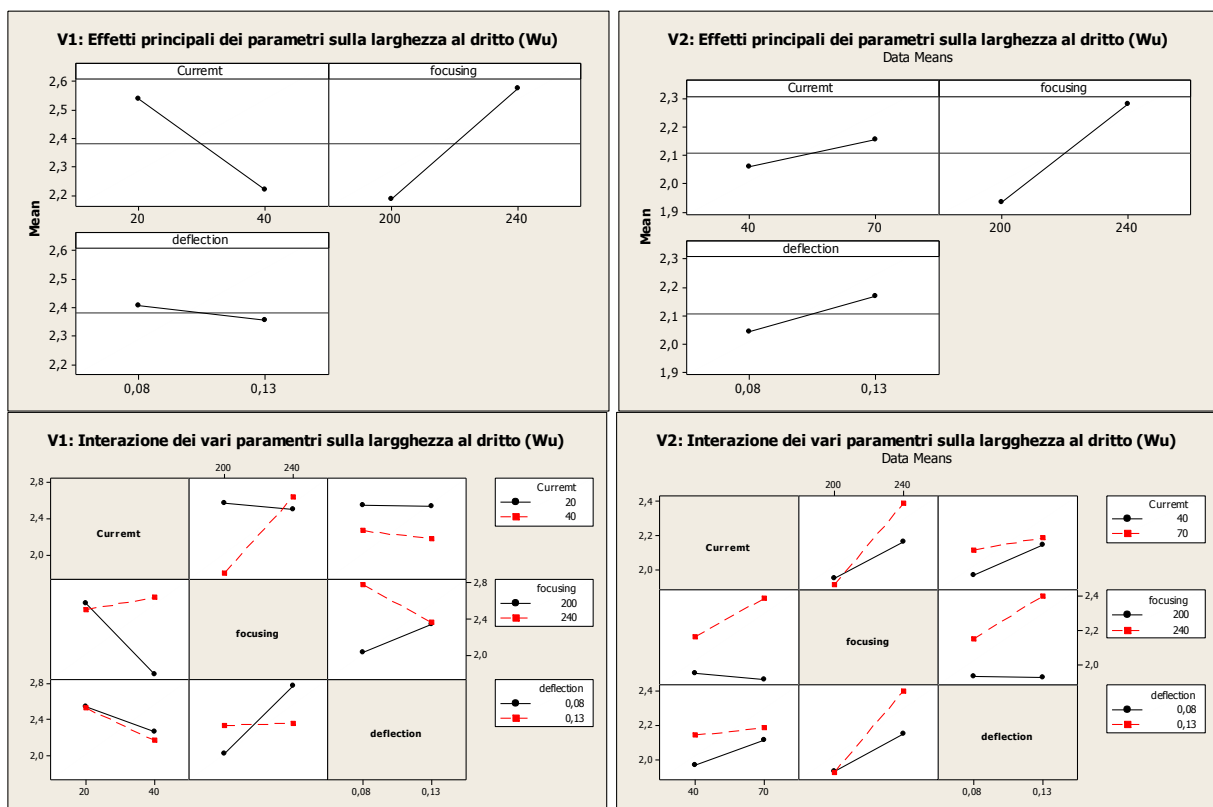


Figura 35: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo EBW a V1e V2 sulla larghezza del cordone al dritto (W_u).

Le prove sono effettuate praticamente a due livelli di apporti termici omologhi costanti in quanto, al raddoppio della velocità corrisponde un raddoppio della corrente. Tuttavia, mentre agli elevati valori di corrente l'innesco del processo Key-Hole riduce notevolmente le perdite per conduzione, tipiche delle leghe ad elevato coefficiente di scambio termico (alluminio, rame), ai livelli di corrente minore le perdite per conduzione iniziano a giocare un ruolo non

trascurabile. Va inoltre considerato che il parametro di focalizzazione non è del tutto indipendente dal flusso di elettroni ovvero dalla corrente di saldatura.

Per quanto riguarda la larghezza a rovescio, per V1 le linee di tendenza media riportate nel grafico degli effetti principali mostrano una influenza maggiore della corrente di saldatura, con una pendenza opposta rispetto a quanto visto per Wu. Infatti, in questo caso è ovvio attendersi che all'aumentare della corrente e quindi della penetrazione si verifichi di conseguenza un incremento della larghezza del cordone BoP alla radice. A questi livelli di corrente l'influenza della defocalizzazione è limitata mentre aumenta notevolmente per la velocità V2 a maggiori potenze.

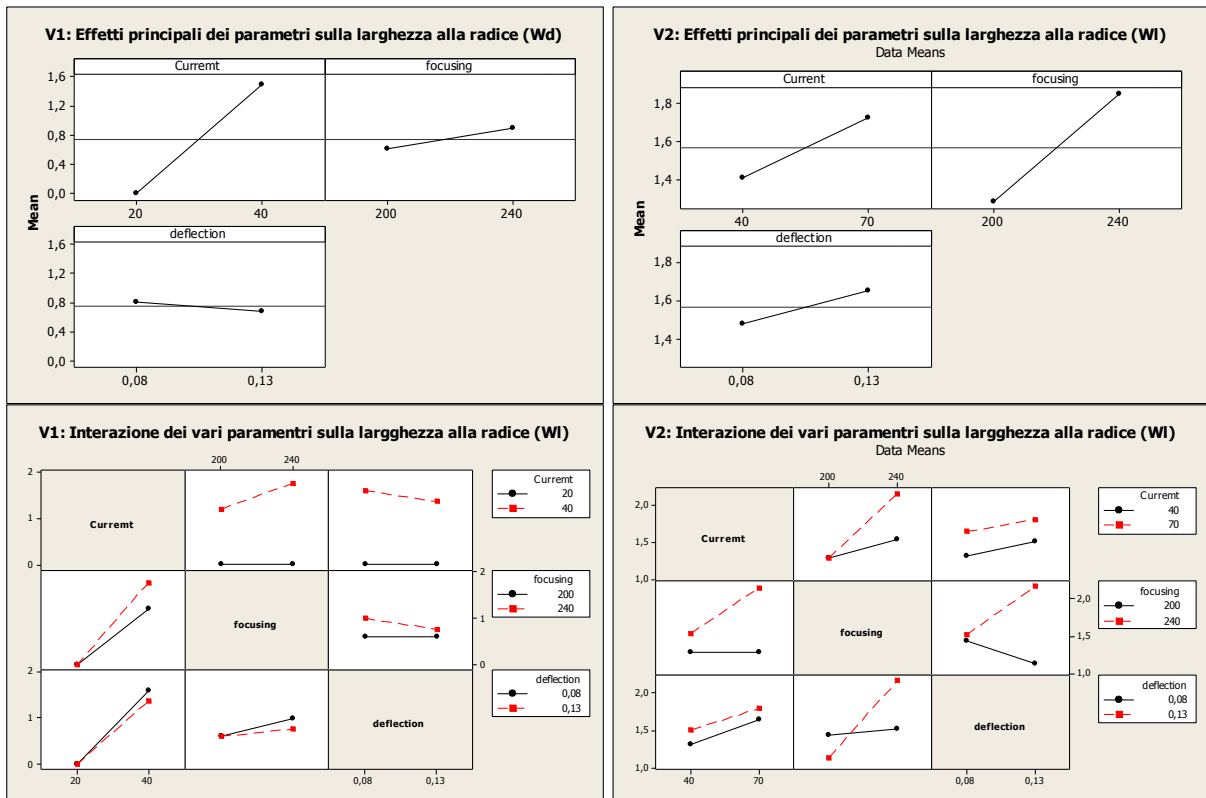


Figura 36: Grafici di riepilogo dei principali effetti e dell'interazione dei parametri di processo EBW a V1 e V2 sulla larghezza del cordone alla radice (WI).

Dato opposto per l'influenza della deflessione fra il piano sperimentale a V1 ed il piano sperimentale a V2. Anche in questo caso la giustificazione può essere ricercata nel differente peso dei fenomeni di trasmissione del calore.

Quanto osservato è sintetizzato anche dall'analisi DoE del piano fattoriale realizzato come mostrato dai grafici seguenti in cui vengono evidenziati i fattori che hanno maggiore influenza sul processo e la loro combinazione.

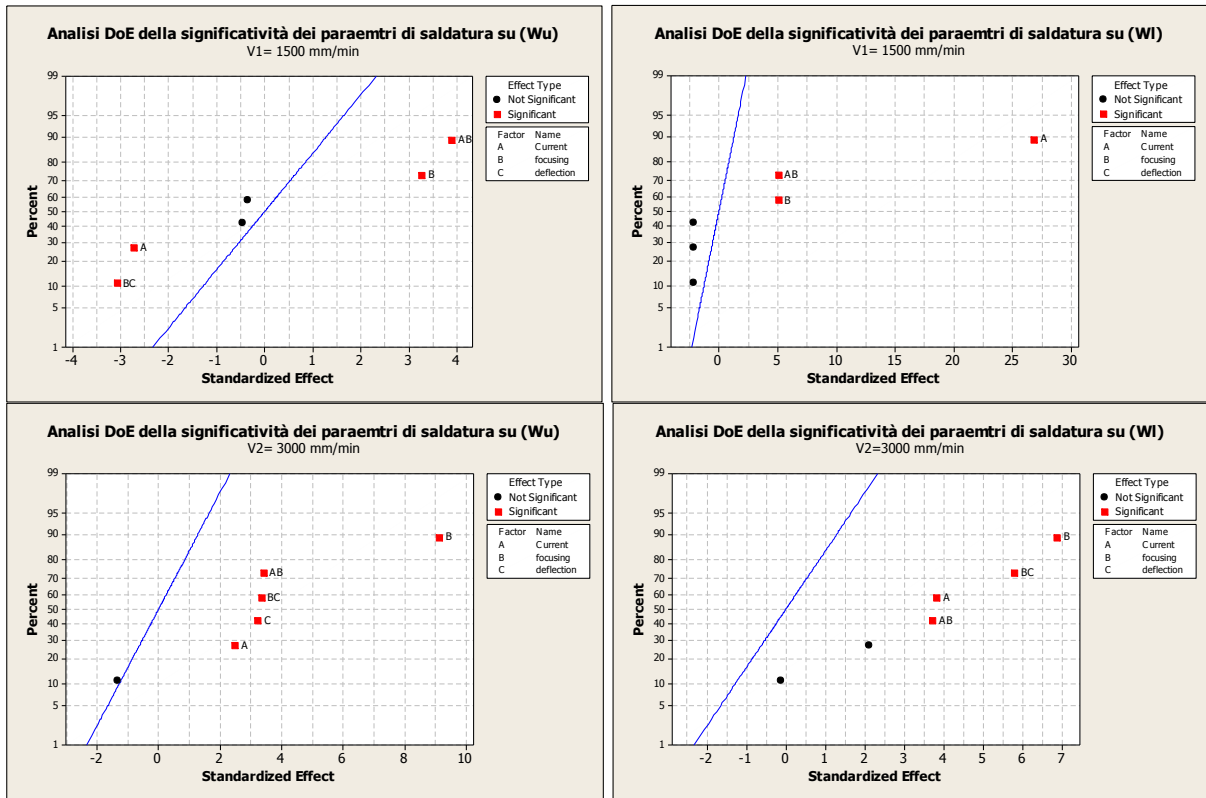


Figura 37: analisi dei piani fattoriali ed individuazione dei fattori che influenzano maggiormente la larghezza del cordone di saldatura.

In particolare i grafici di **Figura 37** mostrano che per il piano fattoriale a velocità maggiore ferma restando la bassa influenza della deflessione sono più numerose le interazioni fra i parametri.

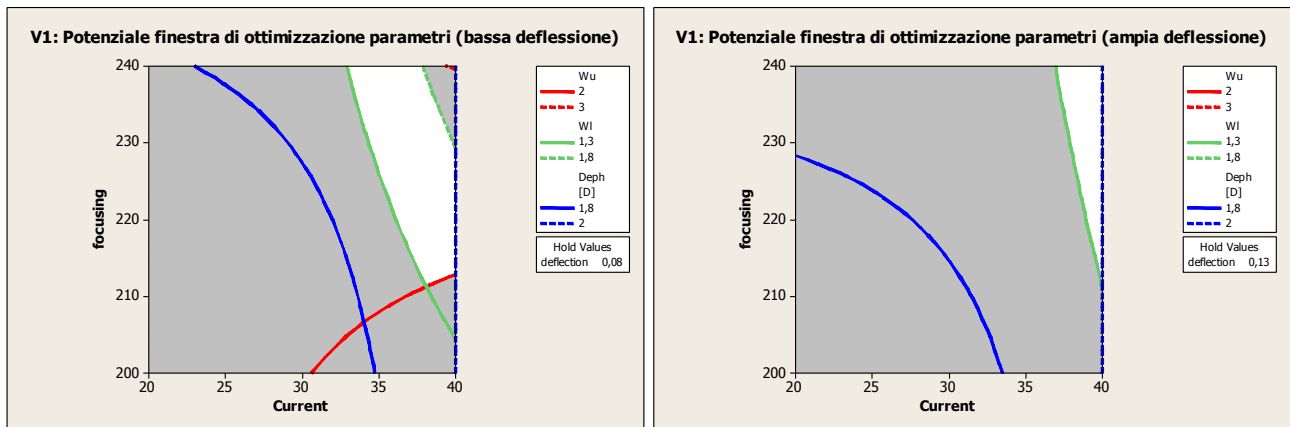


Figura 38: Potenziali finestre di ottimizzazione all'interno del range di parametri già investigato a velocità V1.

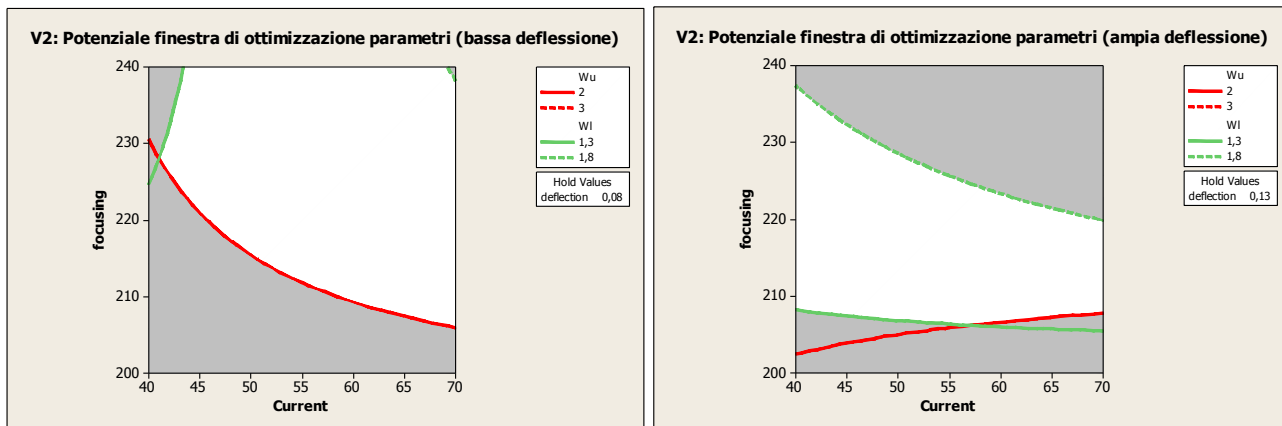


Figura 39: Potenziali finestre di ottimizzazione all'interno del range di parametri già investigato a velocità V2.

2.4 Saldatura EBW di campioni di qualifica in AFS

Sulla base delle finestre di ottimizzazione ricavate sono stati effettuati alcuni test su pannelli si AFS di dimensione ridotta a 100 mm x 50 mm.

La saldatura delle sole pelli in alluminio tuttavia ha evidenziato che la presenza del legame metallurgico al rovescio con residui di agente schiumante induce problematiche di saldatura relative alla stabilità del bagno di fusione. Inoltre, già in fase progettuale era stata considerata l'ipotesi di utilizzare elementi di transizione per il collegamento a main frame in struttura di alluminio e di elementi di congiunzione pelle-pelle nella saldatura di grosse porzioni in AFS che conferissero un legame strutturale fra pelle superiore e pelle inferiore egli AFS in corrispondenza della linea di saldatura.

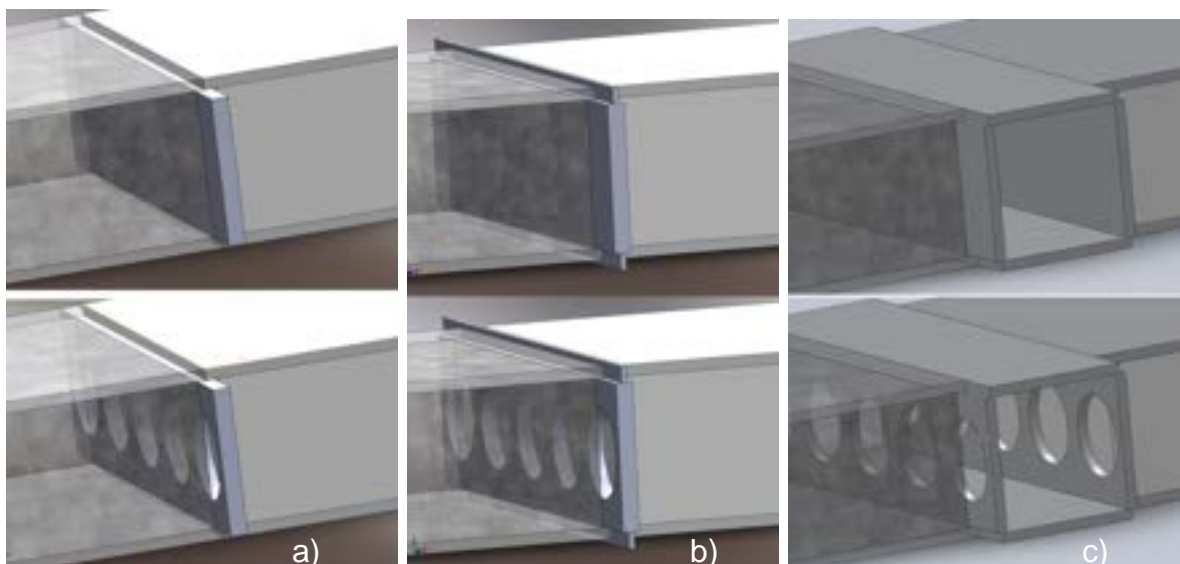


Figura 40: Potenziali forme degli inserti utilizzabili per migliorare le proprietà meccaniche della linea di saldatura

In **Figura 40** sono mostrati i principali tipi di inserti testati per la saldatura EBW di AFS.

Il primo (a) è un inserto interno (inserto a I) realizzato in lamiera di alluminio 5059 H321 di spessore 3 mm. Questo è stato testato sia nella variante di inserto pieno che di inserto alleggerito mediante fori. Il secondo (b) è un inserto a I con anima esterna di circa 0,6 - 0,8 mm di spessore che può avere un'altezza superiore allo spessore della pelle in modo da essere calibrato come sovrametallo e variazione metallurgica della composizione della ZF.

Il terzo inserto (c) è invece un inserto quadro in estruso di alluminio della serie AA6060 con spessore 2 mm che è stato utilizzato per la simulazione di collegamenti a main frame in alluminio.

Il tipo di inserto (b) tuttavia ha fatto emergere delle difficoltà relative all'assorbimento della maggior parte dell'energia da parte dell'inserto portando ad un ritiro delle pelli durante il processo di saldatura per cui dopo alcuni test è stato abbandonato.

Di seguito è riportata una tabella di test effettuati su pannelli AFS con parametri in linea di massima rientranti nelle finestre di ottimizzazione determinate dall'analisi DOE dei test di rifusione ad eccezione dei test 3 e 4 effettuati con inserto esterno per le quali si è cercato senza successo di individuare una maggior allargamento del bagno di fusione utilizzando maggiori correnti e maggiori deflessioni che come anticipato non hanno fornito risultati desiderati.

ID	corrente [mA]	tensione [kV]	deflessione		focaliz.	velocità [m/min] (pot.)	Tipo inserto
			(ds2)	(ds1)			
A1	35	45	0.08	0.12	200	3 (8.65)	NA
B1	35	45	0.08	0.12	200	3 (8.65)	NA
A2	35	45	0.13	0.20	200	3 (8.65)	NA
B2	38	45	0.13	0.20	200	3 (8.65)	NA
A3*	90	45	0.18	0.24	200	3 (8.65)	I2
B3*	90	45	0.18	0.24	200	3 (8.65)	I2
A4*	80	45	0.18	0.24	300	3 (8.65)	I2
B4*	80	45	0.18	0.24	300	3 (8.65)	I2
A5	45	45	0.08	0.12	200	3 (8.65)	I1
B5	50	45	0.08	0.12	200	3 (8.65)	I1
A6	40	45	0.08	0.12	240	1,5 (5.10)	I1
B6	30	45	0.08	0.12	240	1,5 (5.10)	I1
A7	45	45	0.12	0.20	200	3 (8.65)	I1
B7	40	45	0.12	0.20	200	3 (8.65)	I1
A8	30	45	0.12	0.20	240	1,5 (5.10)	I1
B8	30	45	0.12	0.20	240	1,5 (5.10)	I1

Tabella 11: Test di saldatura effettuati su pannelli AFS. * prove fuori piano ottimizzazione

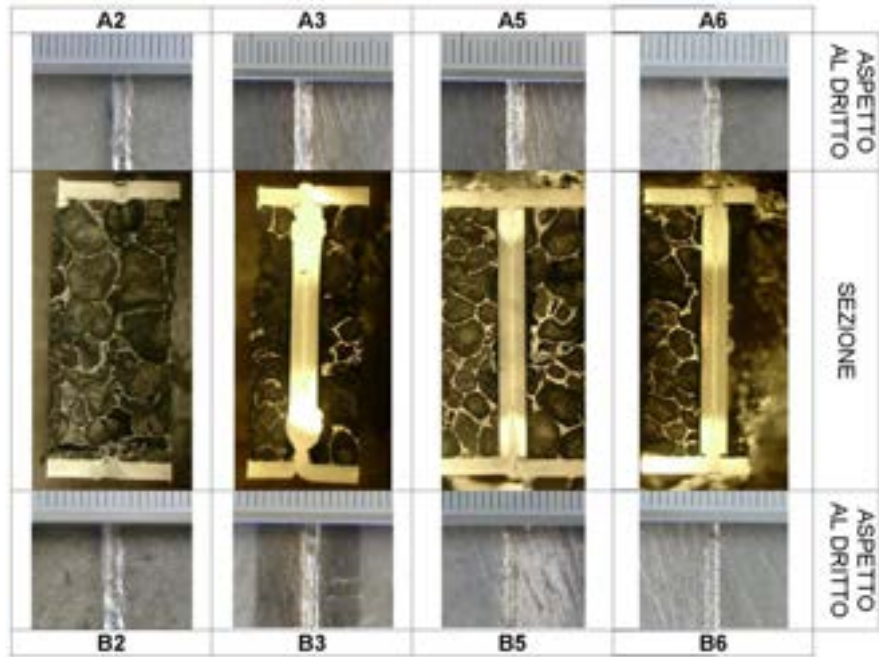


Figura 41: Principali risultati ottenuti nei test di saldatura EBW senza e con inserti ad I.

2.4.1 Parametri di saldatura EBW di AFS ottimizzati

I parametri definitivi per la saldatura degli AFS di testa sono di seguito sintetizzati:

ID	corrente [mA]	tensione [kV]	deflessione		focaliz.	velocità [m/min] (pot.)	Tipo inserto
			(ds2)	(ds1)			
BEBW AFS IHS	40	45	0.12	0.20	200	3 (8.65)	I1
BEBW AFS ILS	30	45	0.12	0.20	240	1,5 (5.10)	I1
BEBW AFS HS	35	45	0.12	0.20	200	3 (8.65)	NA
BEBW AFS LS	20	45	0.12	0.20	240	1,5 (5.10)	NA
BEBW AFS QLS	40	45	0.12	0.20	200	3 (8.65)	Q

Tabella 12: Parametri di saldatura ottimizzati per velocità V1 e V2

In particolare per entrambe le velocità è stato osservato che una deflessione intermedia permette di dare i migliori risultati mentre il parametro di focalizzazione è risultato migliore il livello alto (peggiore focalizzazione) per la bassa velocità ed il livello basso (migliore focalizzazione) per le elevate velocità. In assenza di inserti le correnti di saldatura impiegate sono state inferiori a quanto atteso dai piani sperimentali BoP ma ciò è in linea con quanto noto dall'esperienza ovvero che in caso di But joint l'energia necessaria all'innesco del Key-hole specialmente su spessori sottili è inferiore del 10-20 % rispetto a quanto rilevato dalle prove BoP.



Figura 42: Foto di alcuni campioni di qualifica 100x 400 x 30 mm per la realizzazione dei provini per test a flessione su 4 punti.