



Ricerca di Sistema elettrico

Misure di efficienza energetica di processi laser in condizioni operative su leghe di acciaio e alluminio con analisi dei componenti e parametri critici

F. Cognini, G. Barbieri, M. Moncada, D. Mirabile Gattia,
G. Di Girolamo, G. De Santis, U. De Angelis

MISURE DI EFFICIENZA ENERGETICA DI PROCESSI LASER IN CONDIZIONI OPERATIVE SU LEGHE DI ACCIAIO E ALLUMINIO CON ANALISI DEI COMPONENTI E PARAMETRI CRITICI

F. Cognini, G. Barbieri, M. Moncada, D. Mirabile Gattia, G. Di Girolamo, G. De Santis, U. De Angelis (ENEA)

Hanno inoltre partecipato alle attività legate alla realizzazione dei test e campioni di metallografia, prove meccaniche, controlli non distruttivi e misure elettriche: R. Collepiccolo, V. Contini, L. Pilloni, A. Rinaldi, A. Tati

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: D3 "Processi e Macchinari Industriali"

Obiettivo: A. Etichettatura energetica per l'efficientamento di macchinari

A.2 Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 AGGIORNAMENTO NORMATIVO ED APPLICAZIONE A GENERATORI TIG.....	6
3 MISURE DI EFFICIENZA ENERGETICA SU SISTEMA DI SALDATURA LASER AGGIORNATO.....	10
3.1 COLLAUDO E INDIVIDUAZIONE DI ORIGINI DI PERDITA DI EFFICIENZA PER I SISTEMI LASER.....	11
3.2 IL FENOMENO DEL FOCUS SHIFTING CAUSE E POSSIBILI RIMEDI.....	16
4 CARATTERIZZAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DI SALDATURE LASER.....	21
4.1 ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI SVILUPPO DI PROCESSI DI SALDATURA LASER SU MATERIALI DI IMPIEGO COMUNE E VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZE ENERGETICA DI PROCESSO.....	23
4.1.1 <i>Fattore di efficienza per i campioni delle prove di rifusione laser</i>	27
4.1.2 <i>Saldatura Laser testa a testa</i>	28
4.2 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEL TRASFERIMENTO DI ENERGIA.....	30
4.2.1 <i>Rilievo della temperatura (A)</i>	31
4.2.2 <i>Modello della sorgente lineare (B)</i>	32
4.2.3 <i>Elaborazione da dati calorimetrici (C)</i>	33
4.3 APPLICAZIONE AI TEST DI SALDATURA.....	35
5 STUDIO E REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA TRASPORTABILE PER LA DIAGNOSI ENERGETICA DEI PROCESSI DI SALDATURA INDUSTRIALI.....	38
6 DRAFT DI TEST STANDARD PER ETICHETTA ENERGETICA DI SISTEMI INDUSTRIALI DI SALDATURA.....	44
7 CONCLUSIONI.....	48
APPENDICE A:.....	49
8 FOTO CAMPIONI SALDATI AL LASER.....	49
APPENDICE B:.....	53
9 CONTROLLO RADIOGRAFICO TRAMITE PANNELLO DIGITALE.....	53
9.1 APPARECCHIATURA ISOVOLT TITAN E SERIES.....	53
9.1.1 <i>Conclusioni radiografie</i>	61
APPENDICE C:.....	62
10 ANALISI MEDIANTE MICROSCOPIA OTTICA ED ELETTRONICA.....	62
10.1 SEZIONI MACROGRAFICHE AL MICROSCOPIO OTTICO.....	63
10.2 CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE DEI GIUNTI SALDATI.....	64
10.2.1 <i>Analisi EDS</i>	65
APPENDICE D:.....	67
11 METODI INNOVATIVI DI CARATTERIZZAZIONE DEI FASCI LASER.....	67
12 BIBLIOGRAFIA.....	72

Sommario

Il rapporto descrive le attività svolte nell'ambito dello studio relativo al Piano Annuale di Realizzazione 2016 Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"; Progetto D3 "Processi e Macchinari Industriali", Obiettivo A. Etichettatura energetica per l'efficientamento di macchinari attività A.2 Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale.

Le principali attività hanno riguardato la calibrazione e l'upgrading dei sistemi di prova. In particolare, il prodotti hardware di maggior rilievo prodotti nel corso del PAR 2016 sono stati:

- sistema trasportabile integrato per monitoraggio dei consumi energetici alla presa di generatori ed ausiliari e dei consumi energetici secondari (gas di processo) ed integrazione della diagnostica termografica dei generatori;
- implementazione del sistema di compensazione del *focus shifting* per il sistema di saldatura laser.

Sono stati effettuati dei test con i sistemi master di misura della tensione e corrente in parallelo al sistema sviluppato con scheda di acquisizione National Instruments (NI) e programma di acquisizione specifico per la valutazione dell'efficienza energetica dei generatori comprensivi di sistemi ausiliari. I test hanno dimostrato che il sistema con le relative sonde fornisce misure analoghe ai sistemi master certificati.

Il sistema di misura portatile è stato quindi ingegnerizzato per un utilizzo plug & play. Le specifiche sono state definite anche sulla base di visite in loco presso aziende interessate a partecipare nel corso della successiva annualità a campagne di misura dell'efficienza dei propri processi di saldatura industriale (es. Walter Tosto Chieti e gruppo FCA mediante Centro Ricerca Fiat e relativi laboratori di manufacturing, Torino). E' stato progettato un sistema di misura trasportabile che integra la scheda di acquisizione e registra tensione e corrente in 4 linee di alimentazione elettrica contemporaneamente. E' inoltre possibile la misura dei consumi di gas ausiliari (aria, argon ed elio) e l'acquisizione di segnali ulteriori: ad esempio, per impianti di saldatura laser, è previsto l'interfacciamento a misuratori di potenza laser di vario tipo (calorimetro o termopile).

Il sistema di misura sarà inserito a monte delle utenze elettriche e dell'ingresso dei fluidi negli impianti di saldatura; la trasmissione delle informazioni avverrà mediante moduli WiFi industriali consentendo all'operatore l'esecuzione delle misure in condizioni di sicurezza, nell'ambito delle verifiche previste nel terzo anno, in impianti industriali.

Sono state effettuate misure di efficienza energetica sulla sorgente laser potenziata nel corso del primo anno che hanno evidenziato le problematiche relative alle perdite ottiche sui sistemi di focalizzazione ed al conseguente fenomeno del *focus shifting* testando sistemi di diagnostica del fascio innovativi.

Le misure di efficienza Energetica sulla sorgente Laser hanno mostrato che mentre il rendimento elettrico della sorgente in sé corrisponde ai dati di targa dichiarati dal costruttore, il rendimento reale dell'impianto è fortemente influenzato dal livello di potenza utilizzato nel processo a causa dell'assorbimento di base del sistema di raffreddamento dell'apparato (Chiller).

1 Introduzione

Negli ultimi anni sono stati effettuati grossi sforzi per il miglioramento dell'efficienza energetica nel settore industriale, tuttavia questi sono stati molto spesso limitati all'edificio non intervenendo direttamente nell'aggiornamento e sostituzione dei processi di produzione.

L'analisi dei processi industriali, con particolare riguardo alla sostituzione di tecnologie e apparecchiature più efficienti, permetterebbe di introdurre notevoli vantaggi in termini di efficienza elettrica del tessuto produttivo industriale Nazionale. Uno dei processi più utilizzati nella fabbricazione, dalle piccole carpenterie metalliche al settore degli elettrodomestici, del navale, dell'automotive, fino alla costruzione dei grandi impianti civili ed industriali, è la saldatura. Come evidenziato nel corso del PAR 2015 la saldatura è realizzata principalmente sfruttando il fenomeno dell'arco elettrico in vari processi: tra i più comuni industrialmente troviamo la GMAW "Gas Metal Arc Welding" ovvero la saldatura a filo continuo; GTAW "Gas Tungsten Arc Welding" ovvero la saldatura ad elettrodo infusibile di tungsteno; la SAW "Submerged Arc Welding" ovvero la saldatura ad Arco Sommerso; e per le saldature in cantiere la SMAW "Shielding Metal Arc Welding" ovvero la comune saldatura ad elettrodo rivestito. Tutte queste tecniche sfruttano essenzialmente la fusione dei materiali per effetto Joule con distribuzione sferica dell'energia e conseguenti notevoli perdite di calore per conduzione. Come mostrato dai risultati del PAR 2015, in generale, pur dipendendo dal tipo di materiale e dalla geometria, i più moderni processi a energia concentrata, che inducono una distribuzione cilindrica e profonda dell'energia attraverso il materiale da fondere, promettono dei rendimenti energetici (e di conseguenza dei Fattori di Efficienza Energetica) molto più elevati.

Nel secondo anno le attività di ENEA sono state mirate alla valutazione dell'efficienza energetica di generatori TIG e LASER. In quest'ultimo caso è stata effettuata una serie di prove sperimentali su materiali di largo utilizzo: acciai al carbonio, acciai inossidabili e leghe di alluminio, con misura contestuale dei consumi energetici sia della sorgente che degli ausiliari.

Le attività sperimentali correlate hanno permesso di individuare tutte le utenze elettriche e non (gas di processo) che è necessario monitorare per una valutazione completa dell'efficienza energetica.

Per quanto riguarda i sistemi laser, l'attività sperimentale condotta nella fase di collaudo della sorgente laser (aggiornata nel corso della prima annualità) ha permesso di individuare la catena ottica come una delle possibili cause che possono ridurre l'efficienza energetica del processo.

La non perfetta pulizia delle ottiche porta infatti a perdite che possono raggiungere il 10% della potenza laser in uscita che si ripercuotono in un 30% di maggiore energia assorbita dalla rete.

La variazione indesiderata della focalizzazione (focus shifting) può essere amplificata in questi casi ed è per questo che la stazione di lavoro è stata dotata di sistema di compensazione del focus shift realizzando un asse Z motorizzato.

Un valido strumento per valutare lo stato di efficienza del sistema di focalizzazione è risultato essere il controllo termografico della testa di saldatura; ciò ha portato a integrare, nel sistema di monitoraggio dei consumi in saldatura, una termocamera che permette di controllare le varie sezioni dei generatori ed individuare gli elementi che subiscono un incremento di temperatura durante il processo e che quindi possono essere sede di perdita di efficienza energetica.

Al fine di identificare la tipologia di utenza del sistema di monitoraggio, sono stati visitati alcuni stabilimenti di Produzione quali la Walter Tosto di Chieti e il CRF di Orbassano (che riproduce impianti di produzione industriale degli stabilimenti FCA): entrambi si sono dimostrati interessati a partecipare nella successiva annualità a campagne di misura on site dei consumi energetici dei rispettivi impianti di produzione.

2 Aggiornamento Normativo ed applicazione a generatori TIG

A partire dallo stato dell'arte effettuato e riportato nel RdS/PAR2015/067 sono stati individuati aggiornamenti principalmente legati alla produzione di generatori ad arco e a riferimenti specifici sull'efficienza dei processi di saldatura Laser, in particolare:

- lo stato delle normative, degli studi e delle direttive governative sull'efficienza energetica nel settore dei processi di manifattura per saldatura;
- la valutazione dell'efficienza energetica dei differenti processi, con particolare riguardo a quelli presi in considerazione nell'ambito di questo PAR ovvero le tecnologie ad arco e Laser (LBW).

Nel febbraio del 2017 la IEC ha pubblicato l'aggiornamento della norma 60974-1, relativa ai requisiti per le saldatrici industriali ad arco [1]. Le principali novità rispetto all'edizione del 2012 riguardano:

- miglioramento delle caratteristiche di isolamento, mediante l'aggiornamento dello schema riportato nel paragrafo 6.1.1 (vedi Figura 1). La figura riporta una schematizzazione del sistema di etichettatura standard IEC 60974 con trasformatore e rettificatore;
- modifica delle informazioni contenute nella Tabella 3, riportata nel paragrafo 6.1.4, contenente le proprietà relative alla resistenza di isolamento per la cui verifica deve essere applicata una data tensione, a temperatura di laboratorio;
- descrizione dettagliata delle misure di efficienza energetica, riportate nell'allegato M;
- inclusione dei generatori per saldatura alimentati da batterie, i cui requisiti sono descritti nell'allegato O.

Nonostante queste integrazioni l'indicazione dei dati relativi all'efficienza energetica rimane tuttavia facoltativa.

Di seguito un'etichetta standard richiesta per la commercializzazione di generatori industriali di saldatura.

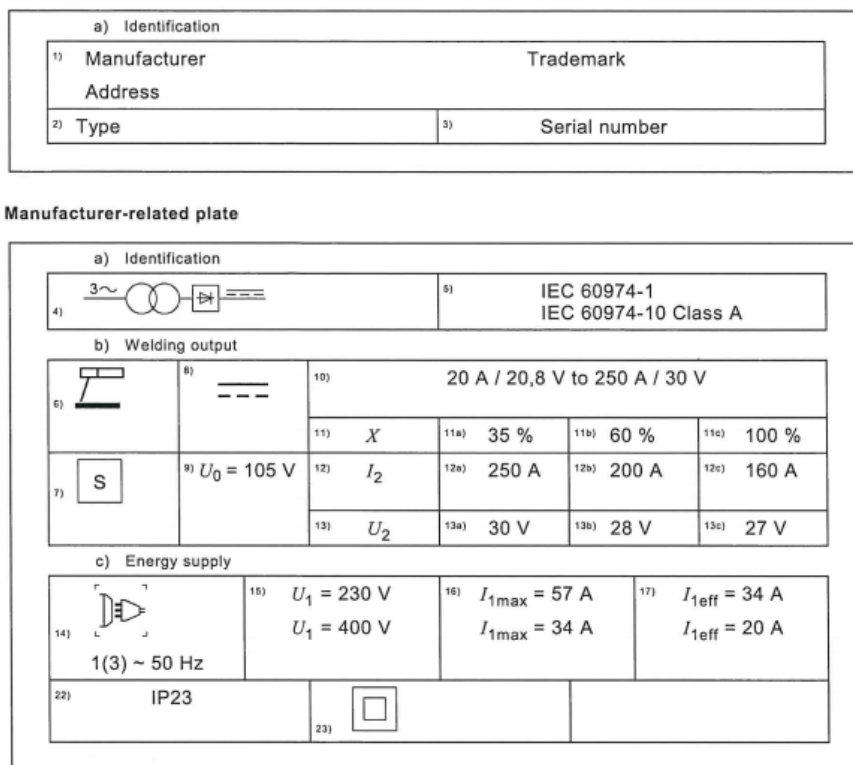


Figura 1– Schematizzazione del sistema di etichettatura standard IEC 60974 con trasformatore e rettificatore

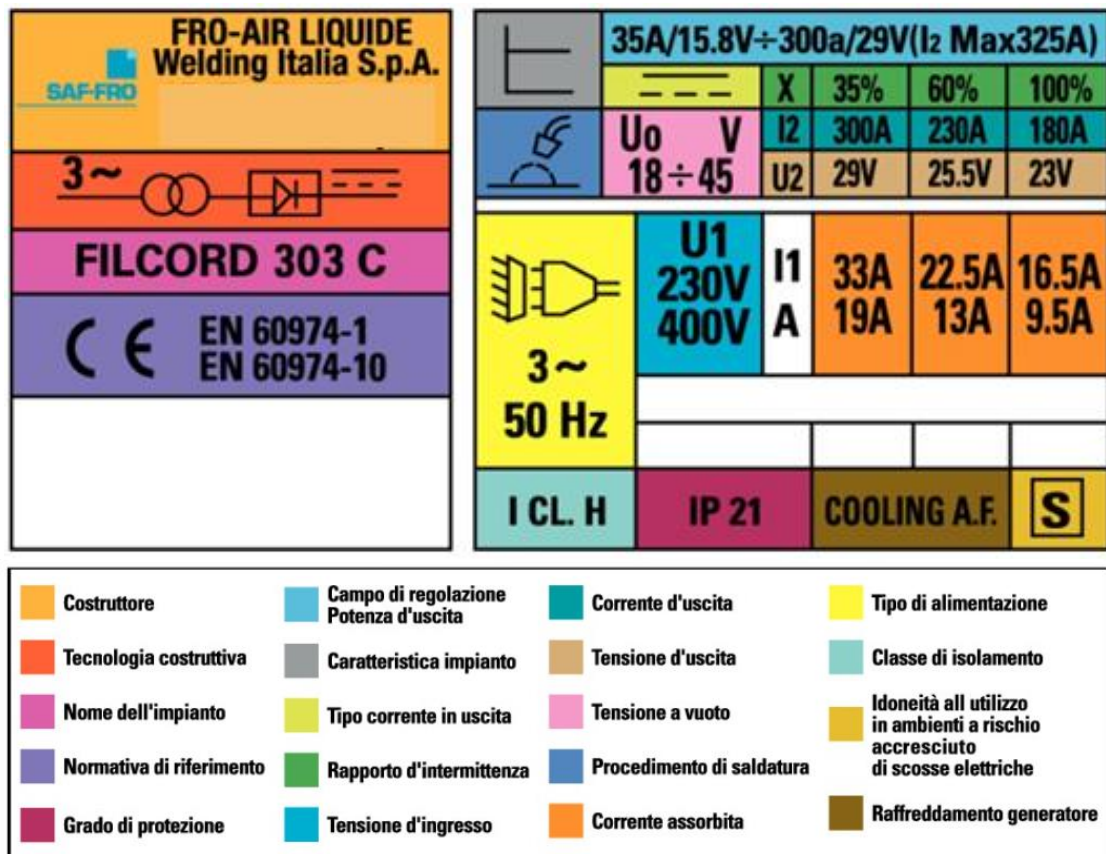


Figura 2– Guida pratica alla lettura delle etichette standard di generatori ad Arco (cortesia di SAF FRO)

L'applicazione dell'appendice M con informative inerenti l'efficienza energetica dei generatori per saldatura è ancora praticamente assente perché volontaria e non imposta da opportuni regolamenti.

Nella versione 2012 della IEC 60974-1 per l'efficienza è prevista la determinazione mediante l'espressione seguente, applicabile essenzialmente alla condizione di duty cycle 100%:

$$\text{Efficiency: } \eta = \frac{U_2 I_2}{P_1}$$

$$P = \sqrt{3} V_{eff} I_{eff} \cos\phi$$

Dove I_2 è la corrente fornita, P_1 il consumo di energia fornita e U_2 la tensione convenzionale di saldatura.

L'efficienza dipende dal carico in uscita, dalla tensione di rete e dalla modalità operativa. Secondo la stessa norma del 2012, le informazioni che devono essere fornite sono: consumo di energia a macchina ferma (idle state), consumo in condizioni di standby, consumo di energia fornita, efficienza calcolata in termini percentuali e calcolata in condizioni di saldatura convenzionali, in condizioni di equilibrio termico, in assenza di carico su unità di potenza ausiliarie, a metà percorso del ciclo di carico per cicli di servizio inferiori al 100%.

Su alcune apparecchiature di recente acquisizione di ENEA (post 2012), nei manuali sono riportati i dati relativi all'efficienza energetica del generatore. Per la Prestotig 350 AC/DC, ad esempio, il dato riportato (vedi Figura 3) è di un rendimento dell'80% (senza decimali come indicato dalla norma). Applicando la

formula indicata con i dati dichiarati di targa abbiamo che, per il processo MMA, il dato di potenza per duty cycle 100% è di 8.680 W (280 A; 31V) e la potenza nominale assorbita dalla rete al 100% è di 11,2 kVA, mentre per il processo TIG i relativi dati corrispondono a 6.720 W (280 A; 24 V) e 8,2 kVA rispettivamente. Ne consegue che il dato di efficienza energetica (calcolato secondo appendice M della CEI 60974-1) è pari rispettivamente a 78% (77,5%) e 82% (81,95%). Il rendimento indicato dell' 80%, complessivamente, è quindi la media dei due.

Sul generatore TIG/Plasma NERTAMATIC 450 sono stati effettuati rilievi reali di efficienza energetica, utilizzando il sistema sviluppato in collaborazione con l'Università di Roma Tor Vergata, in condizioni operative e duty cycle bassi (dal 22 al 37%).



SAF FRO		PRESTOTIG 350W AC/DC		W 000 282 991		Made in E.U.	
13A 11708 d Epuratore 95310		St. Digit. Aluminium France		IEC 60974-1-2,-10			
A company of Air Liquide Welding Group		UO 70V					
230V 0,12kW		pe max 350KPA		400V/16A 3		IImax=24A Iteff=18A	
S/N 211905992		IP23C		ISOL.C.L.B		COOLING F	

PRIMARIO		
	MMA	TIG
Alimentazione primaria 3~	400V (+/- 10%)	
Fattore di potenza	0.9	
Rendimento	80%	
Frequenza	50Hz / 60Hz	
Potenza assorbita (100%)	11,2 KVA	8,2 KVA
Potenza assorbita (max.)	15,7 KVA	11,7KVA
Cavo di alimentazione primario 5 m	4 x 2,5 mm ²	
SECONDARIO		
	MMA	TIG
Tensione a vuoto	70 V DC	
Gamma di regolazione	10A/20V - 350A/ 34V	3A/10V - 350A/24V (DC) 10A/10V-350A/24V (AC)
Fusibile temporizzato	20A	
Fattore di marcia 100% (ciclo 10 min)	280A / 31V	280A / 24V
Fattore di marcia 100% (ciclo 10 min)	350A / 34V	350A / 21V
Cavo di massa 3 m con presa	50 mm ²	
Classe di protezione	IP 23 C	
Classe di isolamento	H	
Norme	EN 60974-1 / EN 60974-10	
Ventilazione	Termodisinseribile	Termodesembragabile
Dimensioni (L..I.h)	690-260-870 mm	
Peso	74 Kg	
Pressione max. del liquido di raffreddamento	350 KPa	
Potenza del raffreddatore	1300W	

Figura 3– Dati tecnici saldatrice SAF FRO PRESTOTIG 350 AC/DC (TIG /MMA)



ALWF 8, Place Le Châtelier BP 80289 80723 Pont Saint-Maxence Cedex A company of Air Liquide Welding Group		Fabriqué en France	
TYPE: NERTAMATIC 450 NON-EQUIPPED		W000315023	
295736-333		EN 60974-1/-10	
15A/1C, 6V - 450A/28V			
X (40°C)		100%	
U ₀ (V)	I ₂	450A	
U _s (V)	U _r (V)	28V	
U ₁ (V)	I ₁ max (A)	I ₁ eff (A)	
230V	64.9	64.9	
400V	32.2	32.2	
415V	31	31	
440V	29.8	29.8	
50/60Hz			
IP23S		914 4729 C	
CTR 21		EMB	

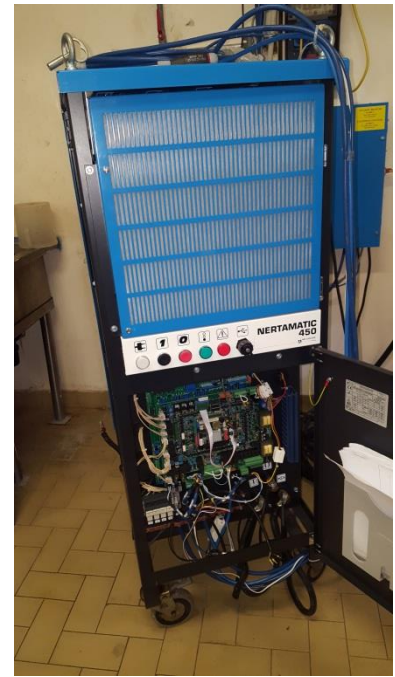


Figura 4– Dati tecnici generatore TIG / Plasma SAF FRO NERTAMATIC 450

In particolare, dai dati di targa, il generatore Nertamatic 450 indica una potenza al secondario al 100 % di duty cycle, pari a 12.600 W (450A; 28V) con una potenza nominale assorbita di 22 kVA. Questo corrisponde ad un'efficienza del generatore del 57%. Tale dato, inferiore rispetto al più piccolo generatore PrestoTIG, dipende dal fatto che il primo generatore è di tipo Inverter, il secondo di tipo Chopper.

I dati sono validati anche dalle misure reali effettuate in condizioni operative che indicano come per questo tipo di generatore il rendimento si riduce ulteriormente se si utilizzano livelli di duty cycle bassi (vedi RdS/PAR2016/096).

L'argomento, portato all'attenzione di vari produttori di apparecchiature per saldatura e anche di customer presenti alle Giornate Nazionali della Saldatura¹, risulta di grande interesse. Da un lato i produttori che considerando come aspetto di competitività dei loro prodotti l'efficienza energetica, si rendono disponibili anche a verifiche di terza parte, dall'altro gli utenti (aziende come Walter Tosto, Belleli e in generale tutti i presenti a questo evento) che hanno core business correlato e di conseguenza costi variabili legati al consumo elettrico delle loro apparecchiature di produzione che sono principalmente apparecchiature di saldatura.

Interessanti i sistemi prodotti dalla SELCO che promuove sistemi per la riduzione degli effetti indesiderati sulla rete e ha brevettato circuiti per la correzione del fattore di potenza, consentendo un'elevatissima efficienza (PF=1) nell'assorbimento di corrente dalla rete, in accordo con la normativa EN61000-0-12. L'aggiornamento del software di monitoraggio sviluppato in quest'anno permette di quantificare anche le armoniche e lo sfasamento indotto dai generatori analizzati.

¹ GNS9, Genova, 30-31 Maggio 2017

3 Misure di efficienza energetica su sistema di saldatura laser aggiornato

Come descritto nel report RdS/PAR2015/067, la saldatura laser è particolarmente adatta a saldare componenti in larga serie (es. strutture leggere del settore dei trasporti, parti meccaniche di precisione, recipienti alimentari etc..) garantendo riproducibilità ed elevata velocità di processo. La saldatura laser riduce le distorsioni e consente di ottenere elevate profondità di saldatura, riducendo il consumo di materiale e la necessità di successive lavorazioni di finitura. La saldatura Key hole, il cui schema è mostrato nella figura seguente, sfrutta l'elevata densità di potenza generata nel punto focale che produce un'istantanea vaporizzazione del metallo.

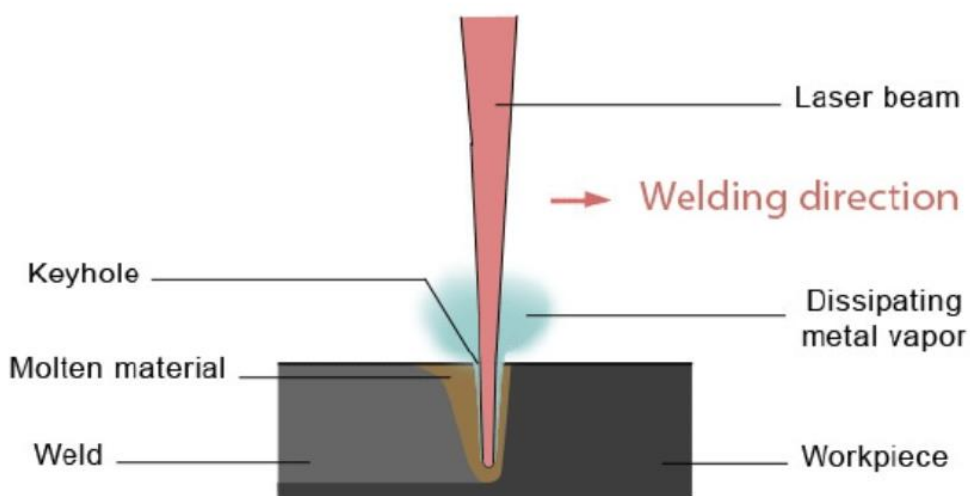


Figura 5– Schematizzazione del processo di saldatura laser.

L'efficienza della saldatura laser va misurata come funzione di variabili di processo ed esistono numerosi articoli in letteratura che tuttavia riportano l'efficienza riferita al trasferimento nell'ultimo tratto ovvero dalla "torcia al pezzo".

Unocic e DuPont, nel 2004 hanno proposto una formulazione dell'efficienza di trasferimento di energia mediante il laser secondo la seguente relazione [2]:

$$\eta_a = E_a / P_L \cdot t$$

dove E_a è l'energia totale assorbita dal pezzo, P_L è la potenza di output del laser (W) e t è il tempo corrispondente. Non tutta l'energia fornita dal laser viene assorbita dal pezzo nel corso della saldatura. Le cause sono diverse ma, in generale, il fattore determinante è l'elevata riflettività dei metalli.

A sua volta, l'efficienza di fusione descrive l'ammontare di energia utilizzata per creare il bagno fuso, partendo dall'energia inviata e assorbita dal pezzo:

$$\eta_m = \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot v_w (C(T_m - T_0) + L)}{P_L}$$

(ρ : densità materiale, b : larghezza zona fusa, d : profondità, v_w : velocità di avanzamento, C : calore specifico, T_0 , T_m : temperatura iniziale e di fusione, L : calore latente, P_L : potenza laser)

Numerosi fattori possono influenzare l'efficienza del processo, fra cui:

- parametri di processo: potenza del laser, diametro del fascio, velocità di saldatura, posizione del punto focale.

- proprietà fisiche del materiale: riflettività corrispondente alla lunghezza d'onda del fascio laser, diffusività termica, tensione superficiale, contenuto di elementi volatili, rugosità superficiale.
- condizioni ambientali: aria, pressione atmosferica, tipo di gas di protezione, portata e composizione del gas di protezione, vapore del metallo indotto dal laser.

Da un punto di vista diverso, l'efficienza del processo può essere valutata come l'abilità del laser nel produrre un keyhole profondo nel corso della saldatura per realizzare la giunzione desiderata tra i lembi delle parti da unire

$$\eta_w = v_w * d / P_L$$

in cui v_w è la velocità di fusione (m/s), d è la profondità di penetrazione della saldatura (m), P_L è la potenza del laser (W o J/s). Questo parametro ha unità di misura m^2/J e indica quindi l'estensione della giunzione creata da un apporto di energia unitario.

Il bilancio energetico durante la saldatura, riferito alle potenze in gioco, è dato da:

$$P_L = P_a + P_d$$

$$P_d = P_p + P_R + P_c + P_b + P_T,$$

dove P_L è la potenza incidente del laser, P_a la potenza assorbita che contribuisce alla profondità di penetrazione e alla fusione laterale del materiale, P_d la potenza laser dissipata per conduzione, convezione e irraggiamento, P_p la variazione di potenza dovuta all'interazione col materiale per effetto della nube plasma e del vapore, P_R la potenza laser riflessa, P_b la potenza laser utilizzata per vaporizzare il materiale e ionizzare il vapore, P_T rappresenta le perdite.

3.1 Collaudo e individuazione di origini di perdita di efficienza per i sistemi laser

Per valutare l'efficienza energetica dei sistemi laser sono state effettuate delle misurazioni con le apparecchiature acquisite nel corso del PAR 2015 sulla stazione laser presente presso il Laboratorio Laser del CR ENEA Casaccia. Le misure sono state effettuate su sorgente YLS 4000 per la quale, a seguito di upgrading da 2,3 kW a 4,2 kW, erano disponibili i dati di calibrazione in fabbrica. Allo stesso tempo, utilizzando il sistema Power Monitor/Focus Monitor della Primes, acquistato nel corso della prima annualità, sono stati effettuati test di funzionamento con contemporanea misura dei consumi energetici della sorgente Laser e del Chiller a valle della catena ottica e quindi della testa di focalizzazione. La figura seguente riporta le fasi di accoppiamento fra fibra ottica e sistema di focalizzazione per le successive prove di verifica della potenza e della qualità del fascio.

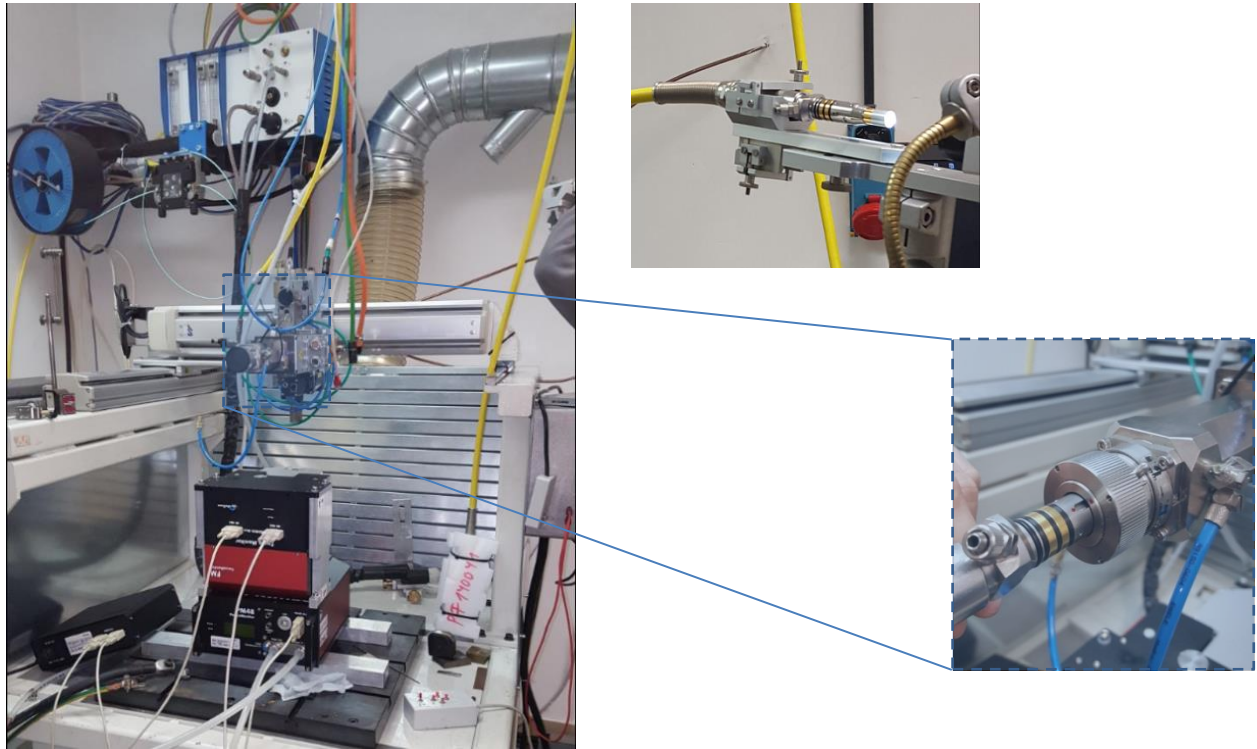


Figura 6– Allestimento postazione per misura di efficienza di sorgenti laser; Verifica e pulizia fibra di trasporto del fascio ed accoppiamento con il sistema di focalizzazione

Durante la fase di collaudo, in particolare con il sistema di monitoraggio della potenza, rispetto ai dati di collaudo di fabbrica è stata evidenziata una misura di potenza laser mediamente inferiore. Dopo un funzionamento prolungato in condizioni di corpo nero (fascio interamente assorbito dal calorimetro Primes PM48), si è riscontrato un anomalo riscaldamento di parti della testa di saldatura, che in condizioni di funzionamento ottimale dovrebbe trasmettere il 99,9% dell'energia laser. La differenza tra potenza impostata e misurata ha portato a valutare perdite nella catena ottica di circa il 10%. La situazione è sintetizzata nel report di collaudo: alla richiesta del 100% di potenza (Tabella 1) invece dei 4190 W attesi sono stati rilevati 3804 W (Figura 7).

a) **Power Measurement / Misura di potenza**

<input type="checkbox"/> Feeding fiber	<input checked="" type="checkbox"/> Process fiber	HLC-8	PF1400041	100-20		
		Type:	S/N:	Diameter-length:		
Channel Canale:		1				
Water flow laser (l/min) Flusso nel laser (l/min):	20.6	Water flow fiber connector (l/min) Flusso nel connettore (l/min):	1.10			
U Cntrl (100% Current):	3181	<input type="checkbox"/> BR [XP4] (mV):	0%	100%		
		<input type="checkbox"/> PD2 (mV):				
$I_{LN} / \%$	I_{PS1} / A	P_{ind} / kW	P_{meas} / W	$P_{_} / _W$	$T_{Laser} / ^\circ C$	FFBD / mV
10	6,9/2,1	0,11	110		22,9	11/12
20	13,0/12,4	0,65	593		23,4	72/73
30	19,4/18,6	1,10	1004		23,4	124/125
40	26,0/25,1	1,56	1420		23,9	176/177
50	32,9/32,0	2,01	1828		22,0	227/228
60	39,9/38,7	2,46	2237		23,3	277/278
70	47,1/45,8	2,91	2646		24,4	325/328
80	54,4/53,1	3,34	3035		25,6	371/374
90	62,1/60,7	3,76	3405		24,9	416/419
100	70,0/68,6	4,19	3805		23,4	493/515

b) **Beam quality measurement / Misura di qualità**

Enlargement factor M Magnificazione M:	2,5				
$I_{LN} / \%$	P / kW	BPP ($1/e^2$) / mm ² mrad	$\Delta BPP / \pm$ mm ² mrad	$R_{Beam} / \mu m$	Z_{rel} / mm
28,2	1000	3.2		113	66,798
50,6	2000	3.3		123	65,324
73,3	3000	3.9		140	64,232

Tabella 1: Verbale di collaudo in fabbrica delle sorgente YLS 4000 IPG

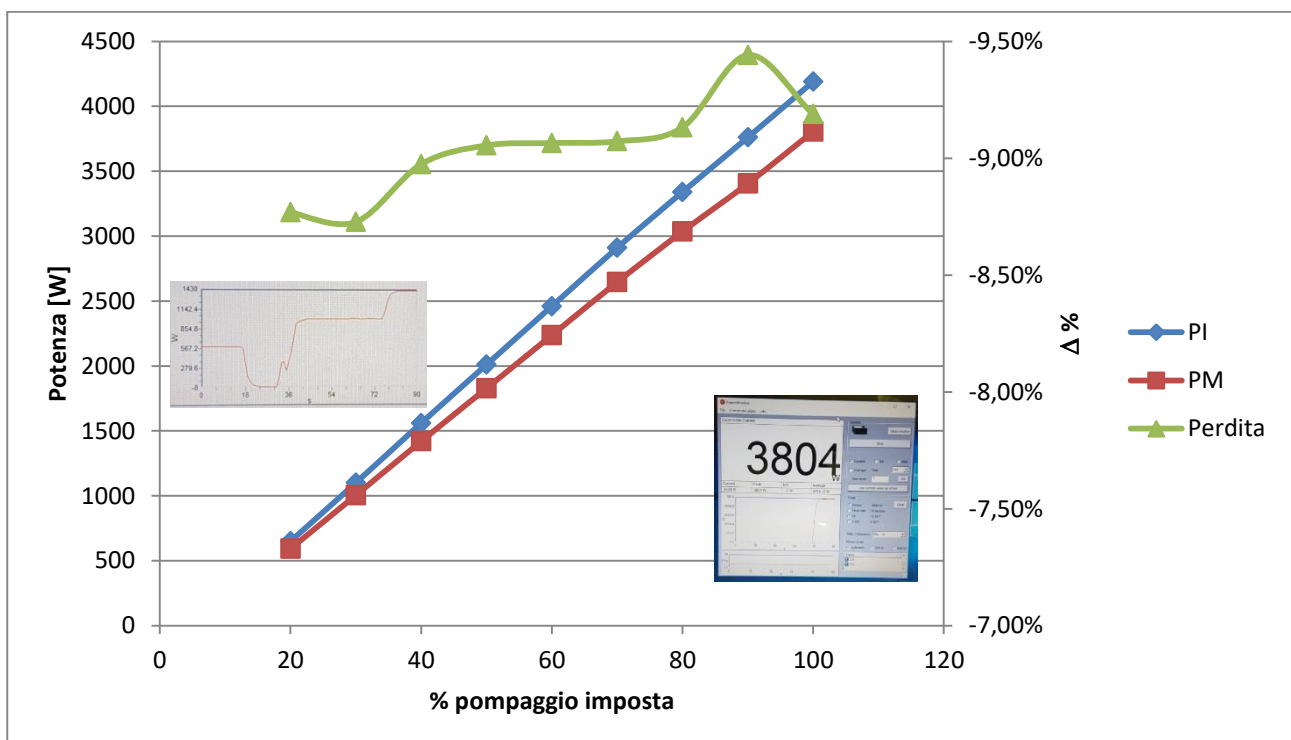


Figura 7– Grafico di riepilogo delle prove di potenza con sistema PRIMES

Le misure effettuate hanno mostrato che oltre a un effetto di perdita di potenza e quindi di efficienza, che può essere valutato in circa il 9 %, un fattore non direttamente evidente ma molto importante è la variazione della distanza di focalizzazione ottimale.

Questo secondo fenomeno è stato valutato con il completo rilievo della caustica del fascio focalizzato che consente la valutazione della qualità del fascio il tutto a differenti livelli di potenza laser. La Figura 8 riporta due delle caustiche prese in considerazione per la valutazione della variazione di fuoco.

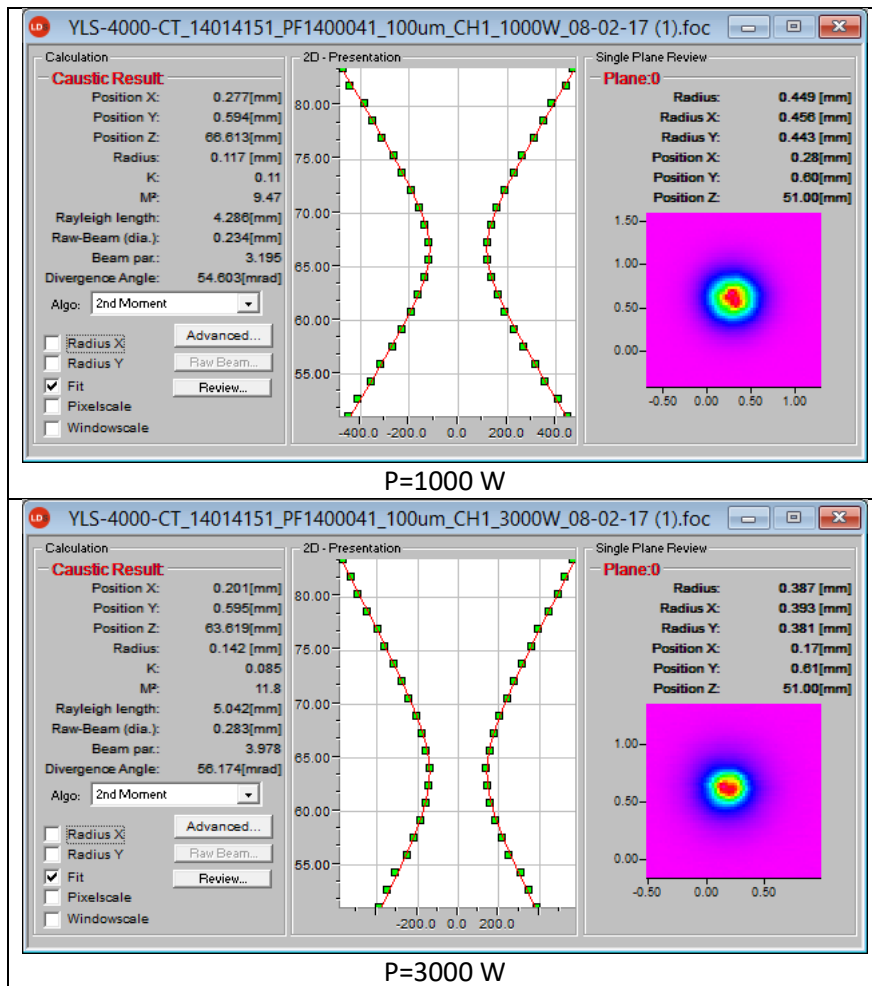


Figura 8: Caustica bidimensionale di focalizzazione a diversi livelli di potenza

I moderni sistemi di focalizzazione, in condizioni ottimali e quindi di trasmissione completa del fascio laser indicano una “distanza di tiro” ovvero una distanza teorica di migliore focalizzazione relativamente a un punto fisso della geometria della testa. Per il sistema analizzato, ad esempio, tale distanza risulta 205 mm dal blocco di focalizzazione principale.

Tuttavia, nel caso di un sistema di focalizzazione non efficiente (che può essere generato da uno o più componenti ottici danneggiati o sporchi) si verifica una variazione della reale distanza di tiro inducendo effetti negativi sia sull’efficacia di giunzione sia sull’efficienza.

La Figura 9 evidenzia l’effetto della potenza sulla qualità del fascio: il prodotto caratteristico BPP aumenta e si registra una variazione del piano focale di 1,5 mm al kW. Il fenomeno più grave è comunque la perdita di potenza.

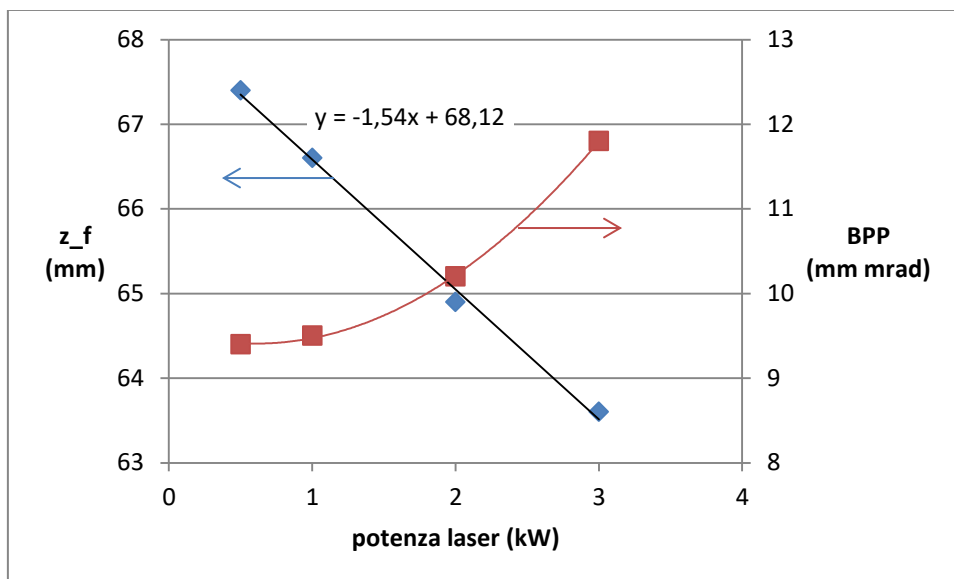


Figura 9– Grafico dell’effetto di *focus shifting* indotto da un sistema di focalizzazione non efficiente.

La situazione anomala, evidenziata anche da un riscaldamento di parti della testa di focalizzazione più evidente ai livelli di potenza elevati, è stata discussa con il fornitore del laser e delle ottiche. L’analisi della testa di focalizzazione, effettuata in camera bianca presso i laboratori specializzati del fornitore ha portato alla completa verifica di tutte le ottiche componenti la testa che è schematizzata nella Figura 10.

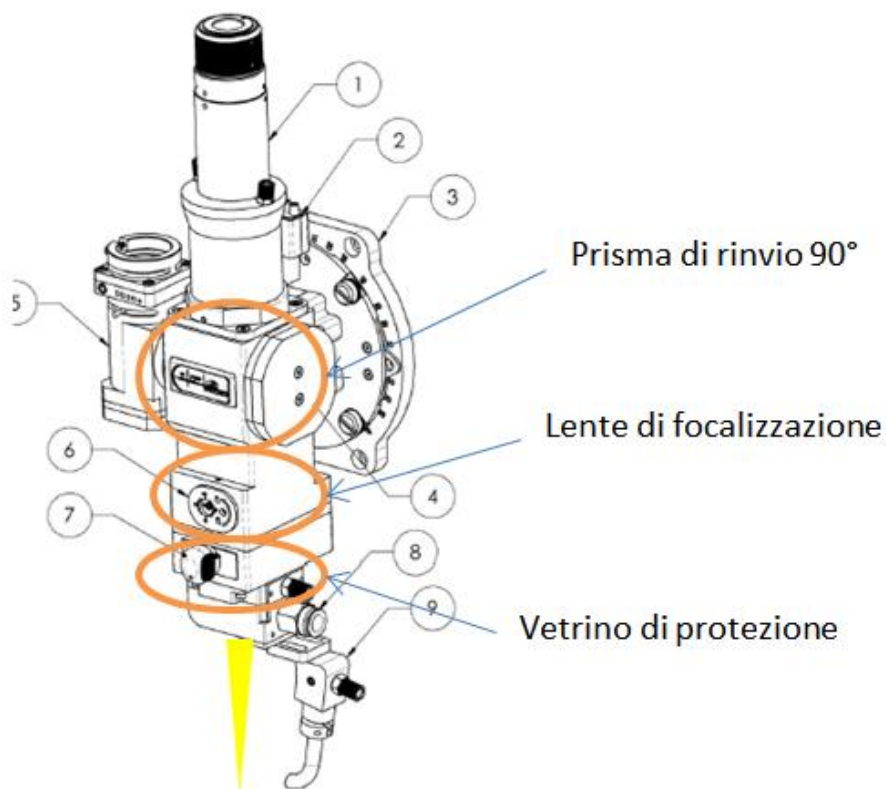


Figura 10– Schematizzazione dei principali componenti ottici del sistema di focalizzazione per saldatura IPG utilizzato.

L’ispezione ha evidenziato contaminazione del prisma di rinvio ed è stato quindi sostituito tutto il gruppo ottico inferiore.

Da sottolineare come ottiche non perfettamente pulite, oltre a causare un assorbimento maggiore del normale, fanno sì che una parte della radiazione incidente sia diffusa all'indietro nel percorso ottico e torni indietro verso il generatore laser stesso. Considerato che i moderni sistemi, per evitare possibili danneggiamenti, monitorano costantemente la radiazione retroriflessa durante il funzionamento, questo stesso sistema potrebbe essere utilizzato per il monitoraggio dello stato delle ottiche prima che intervengano Interlock di sicurezza.

Una volta sostituite le ottiche la perdita si è sostanzialmente annullata. Nello specifico, una valutazione termografica della testa di saldatura durante il funzionamento è stata effettuata, dimostrando che in condizioni di ottiche ottimali l'incremento di temperatura è estremamente limitato e collocato essenzialmente a livello del collimatore. In precedenza invece la testa di saldatura, durante le fasi di misura della potenza, si portava a temperature superiori a 40°C in corrispondenza delle ottiche con le conseguenze già descritte (focus shifting e perdite di potenza e qualità del fascio laser).

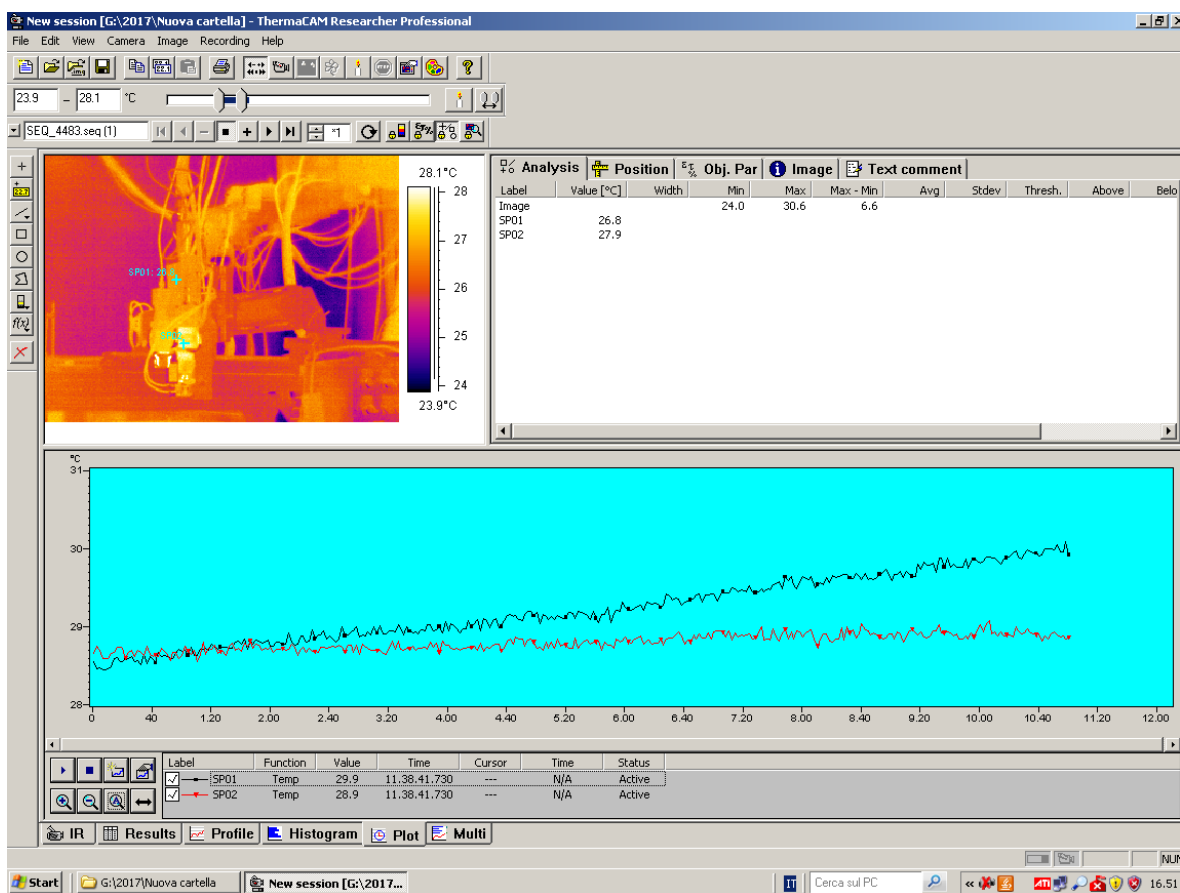


Figura 11: Verifica termografica dello stato di efficienza delle ottiche durante le operazioni di misura della potenza laser

3.2 Il fenomeno del focus shifting cause e possibili rimedi

Il fenomeno del focus shifting, cioè la variazione della distanza focale durante la lavorazione, è noto e in parte tollerato (cfr. precedente report di collaudo).

L'introduzione di sorgenti laser in fibra ad alta brillantezza cioè, in pratica, con bassa divergenza del fascio a parità di diametro di focalizzazione, ha reso possibile l'uso di lenti di diametro contenuto. Nel sistema in uso in Enea Casaccia la taglia delle ottiche è 30 mm nominali. Lo stress termico su tali componenti è elevato soprattutto nella regione centrale; questo determina sia una variazione dell'indice di rifrazione del materiale che una variazione di curvatura. L'effetto complessivo è appunto una deriva della posizione del

fuoco che è funzione della potenza e del tempo. L'elemento critico, più sensibile a tale fenomeno è il vetrino di protezione, ultimo componente prima del punto di processo, che facilmente è contaminato da polveri formate dalla condensazione dei vapori metallici emessi verso l'alto durante la saldatura e da spruzzi di materiale fuso.

Si rende quindi necessario un controllo delle condizioni di pulizia che può essere a intervalli regolari o continuo, con sistemi di monitoraggio automatici.

Il sistema implementabile sulla testa di focalizzazione in uso prevede la lettura con fotodiodi della radiazione laser diffusa dal vetrino. In condizioni nominali il segnale è basso e dovuto al materiale stesso e ai coating antiriflesso; man mano che la contaminazione procede si rileva un incremento del segnale che causa il blocco della lavorazione.

L'effetto del focus shifting è quello di avere una macchia focale di dimensione diversa da quella nominale. Se il processo è stato ottimizzato per saldare, ad esempio, in condizioni di massima focalizzazione, lo spostamento del fuoco equivale allo spostamento z lungo la caustica con conseguente variazione del diametro della macchia focale "d" secondo la seguente equazione [3]:

$$d = d_0 \sqrt{1 + z^2 / z_R^2}$$

Rispetto al diametro teorico "d₀" l'aumento di "d" determina una diminuzione dell'intensità energetica che su alcuni materiali, specialmente le leghe di alluminio, può essere particolarmente dannosa. In pratica si produce una variazione del regime di saldatura che passa da "keyhole" a "conduzione" con duplice effetto:

- riduzione drastica della profondità di passata
- aumento delle retro riflessioni.

La variazione indesiderata del fuoco (focus shifting) dovuta a riscaldamento e incurvamento del vetrino di protezione e/o delle ottiche interne, è tuttavia possibile anche per cause non dipendenti dalla pulizia delle ottiche come ad esempio per retro riflessioni. Al fine di studiare questi effetti e l'influenza della focalizzazione sull'efficienza di saldatura è stato implementato un asse motorizzato interpolato (Figura 12) sul sistema di saldatura prototipale.

L'asse costituisce la "z" del posizionatore xy già presente nel laboratorio, inizialmente dotato di una slitta a comando manuale per predisporre la torcia di saldatura alla distanza voluta, prima della lavorazione. L'attuatore installato è:

- marca IAI mod. SXM
- corsa 300 mm
- carico utile 14 kg
- velocità max 240 mm/s, accelerazione nominale $\geq 0,15$ g.

Il controller esistente (IAI mod. XSEL) è stato aggiornato con l'aggiunta di una scheda per due assi di movimento ed è stato potenziato l'I/O digitale che attualmente può gestire 48 ingressi e 48 uscite.

Il sistema consente sia di eseguire lavorazioni con spostamento programmato della testa di saldatura, sia di adeguare automaticamente la distanza della testa dal pezzo, al fine di ottimizzare il trasferimento di energia (laser o arco), compensare effetti di focus shifting noti e simulare l'effetto di condizioni errate di processo in termini di focalizzazione.

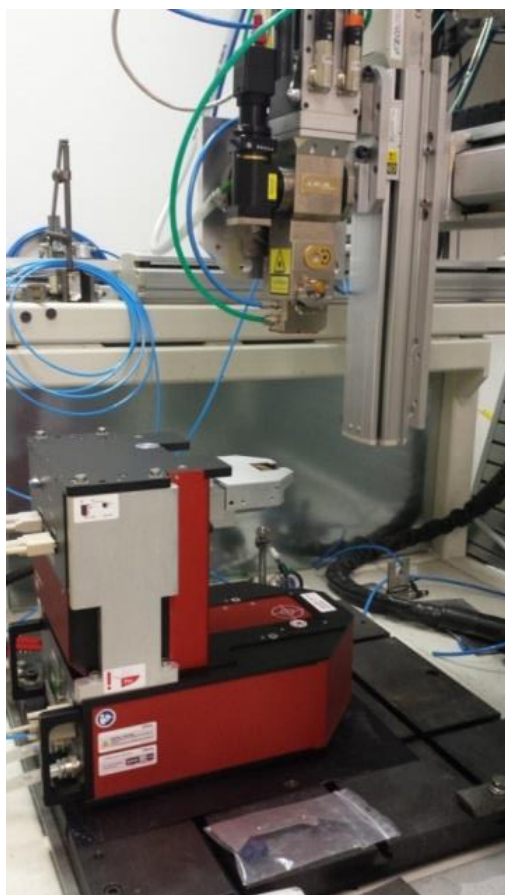


Figura 12: Set UP misure efficienza laser (SX); Sistema di variazione fuoco asse Z (DX)

L'esperienza maturata indica inoltre nel monitoraggio della temperatura delle ottiche e quindi della testa di saldatura un valido strumento per evidenziare anomalie del sistema di focalizzazione. Infatti, il sistema di protezione e monitoraggio del grado di pulizia del solo vetrino non si è rivelato sufficiente. Il monitoraggio termico della catena ottica è utile sia a mantenere l'efficienza del processo sia a salvaguardare l'apparecchiatura. E' stata quindi individuata una termo camera portatile (Flir mod. E8) per il monitoraggio termografico di eventuali riscaldamenti dei componenti ottici della testa di focalizzazione. Le principali caratteristiche della termo camera acquistata sono riportate nella tabella seguente.

Imaging e dati ottici	
Risoluzione IR	320 × 240 pixel
Sensibilità termica/NETD	< 0,06°C (0,11°F) /< 60 mK
Campo visivo (FOV)	45° × 34°
Distanza minima di messa a fuoco	0,5 m (1,6 piedi)
Risoluzione spaziale (IFOV)	2,6 mrad
Numero di diaframma	1,5
Frequenza immagini	9 Hz
Messa a fuoco	Senza messa a fuoco
Dati del rilevatore	
Tipo di rilevatore	FPA (Focal Plane Array), microbolometro non raffreddato
Intervallo spettrale	7,5 – 13 μm
Presentazione dell'immagine	
Display	LCD a colori da 3,0" 320 × 240
Regolazione immagine	Automatica/Manuale

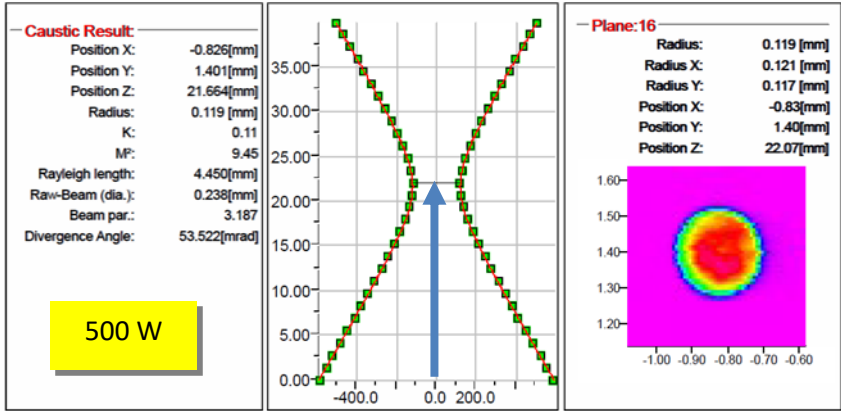
Tabella 2: caratteristiche principali della termocamera FLIR E8

Ulteriori test sulla testa di focalizzazione ripristinata sono stati effettuati prima della campagna sperimentale per lo studio dell'efficienza energetica per processi di saldatura laser. Nella Figura 13 sono riportate a titolo di esempio le caustiche realizzate a 500 W ed a 2000 W compreso un esempio di diagnostica termografica della testa nel tempo e di grafico di tendenza di variazione del fuoco in funzione della potenza.

Purtroppo è evidente che anche in condizioni ottimali il sistema di focalizzazione studiato mostra una certa suscettibilità alla variazione al focus shifting di circa 1mm/kW. Questo fenomeno, noto ormai in letteratura [4] [5], indica due considerazioni dal punto di vista dell'efficienza ed efficacia di giunzione con i moderni laser a elevata brillantezza:

- A- Sono preferibili sistemi di focalizzazione con lenti di diametro maggiore;
- B- Sono auspicabili sistemi di compensazione del focus shifting

In appendice D sono riportate informazioni ulteriori sulla diagnostica di fasci laser di alta potenza e i risultati di misure realizzate con una diversa strumentazione.



**Termocamera
FLIR E8**

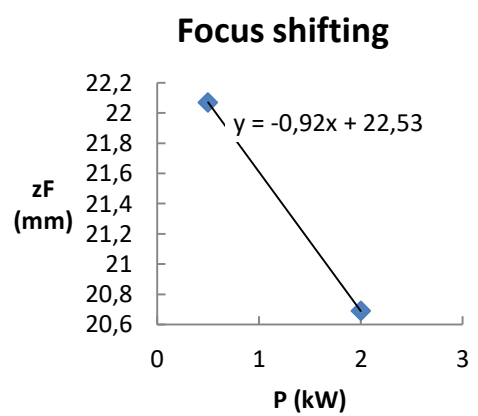
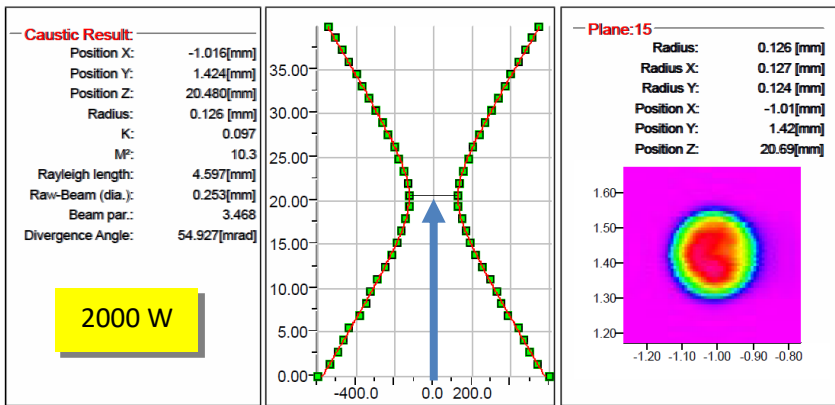


Figura 13: Esempio di diagnostica laser (SX); monitoraggio mediante Termocamera (DX)

4 Caratterizzazione dell'efficienza energetica di saldature laser

E' stata programmata ed eseguita una serie di prove volte a caratterizzare dal punto di vista energetico alcune saldature laser su materiali metallici diversi. Nel corso della precedente annualità del progetto era stato definito l'indicatore "fattore di efficienza energetica" (FEE) dato dal rapporto tra

$$\frac{\text{sezione resistente "efficace"}}{\text{energia utilizzata}}$$

in un determinato procedimento di saldatura. Nel caso più semplice di saldatura autogena su giunti testa-testa a singola passata, ipotizzando in prima approssimazione di non avere decadimento delle proprietà meccaniche del materiale, si ottiene

$$FEE = \frac{L s}{P t} = E_{WP} \frac{v_s s}{P_L}$$

(L: lunghezza giunto, s: spessore, P: potenza assorbita, t: durata della saldatura, E_{WP} : efficienza della sorgente laser, v_s : velocità di saldatura, P_L : potenza laser impiegata).

Qualora la saldatura determinasse una diminuzione delle prestazioni del materiale ciò potrebbe essere considerato inserendo uno spessore equivalente s_e : per fare ciò si deve scegliere la caratteristica meccanica di riferimento. Per la generica sollecitazione ammissibile:

$$s_e \sigma_{am} = s \sigma_{ams}$$

$$s_e = s \frac{\sigma_{ams}}{\sigma_{am}} = s e$$

(σ_{am} : tensione ammissibile materiale base, σ_{ams} : idem nel materiale saldato, e: efficienza di saldatura), da cui

$$FEE = E_{WP} e \frac{v_s s}{P_L}$$

Il laser utilizzato è del tipo in fibra all'itterbio e ha architettura modulare. Il fascio di alta potenza è ottenuto dalla somma dei contributi di alcune unità uguali, ciascuna contenente una fibra attiva e un certo numero di diodi laser per il pompaggio ottico della stessa. La corrente ai diodi è fornita da alimentatori in bassa tensione. L'efficienza di un modulo, cioè il rapporto tra l'energia fornita all'alimentatore dei diodi di pompaggio e l'energia del fascio laser in uscita (*Wall-Plug Efficiency*), è definita come prodotto di 3 fattori:

$$WPE = P_o/P_i = \eta_{EE} \times \eta_{EP} \times \eta_{PP}$$

- η_{EE} : rendimento della conversione "elettrone-elettrone" nell'alimentatore (80% circa)
- η_{EP} : rendimento "elettrone-fotone" nei diodi ($\approx 50\%$)
- η_{PP} : rendimento "fotone-fotone" nella cavità ($\approx 70\%$)

Ne deriva un rendimento globale, dell'ordine del 30%. Per confronto, nei laser al CO_2 il rendimento è del 10% circa. Ulteriori vantaggi derivano dall'assenza di parti in movimento e dall'elevata affidabilità dei componenti elettronici. Uno svantaggio è dato invece dalla ridottissima sezione trasversale della cavità che è quindi sensibile al danneggiamento dovuto a eventuali riflessioni all'indietro dal materiale in lavorazione. L'energia in eccesso deve essere dissipata; per i laser di più bassa potenza è sufficiente la convezione forzata in aria, per gli altri invece si deve predisporre un circuito di raffreddamento ad acqua a perdere o preferibilmente con macchine frigorifere (chiller).

La sorgente laser è stata caratterizzata dal punto di vista dell'assorbimento energetico misurando contemporaneamente:

- potenza laser utile con sensore calorimetrico Primes Power Monitor PM48 (cfr. Figura 14)
- assorbimento elettrico mediante analizzatore di rete Fluke 1730

I risultati sono riportati nel grafico di Figura 15. L'assorbimento a potenza zero, cioè in condizione di attesa, è dovuto agli ausiliari interni cioè, in ordine decrescente

- unità di condizionamento e deumidificazione interna della parte ottica del laser
- computer, che gestisce anche la comunicazione con l'interfaccia utente e il posizionatore cnc
- alimentatori a bassa tensione del quadro elettrico (per relè, interfacce analogiche e sensori)

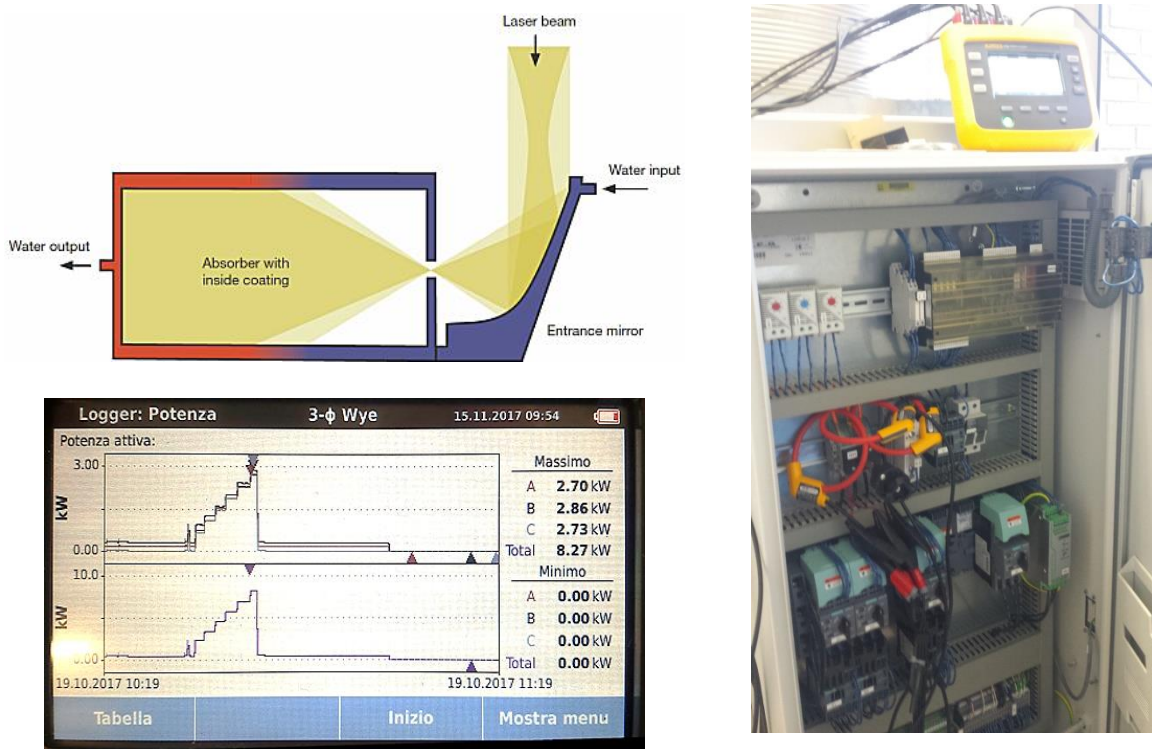


Figura 14: misura calorimetrica della potenza laser (strumento PM48); misura assorbimento elettrico con sistema master FLUKE 1730

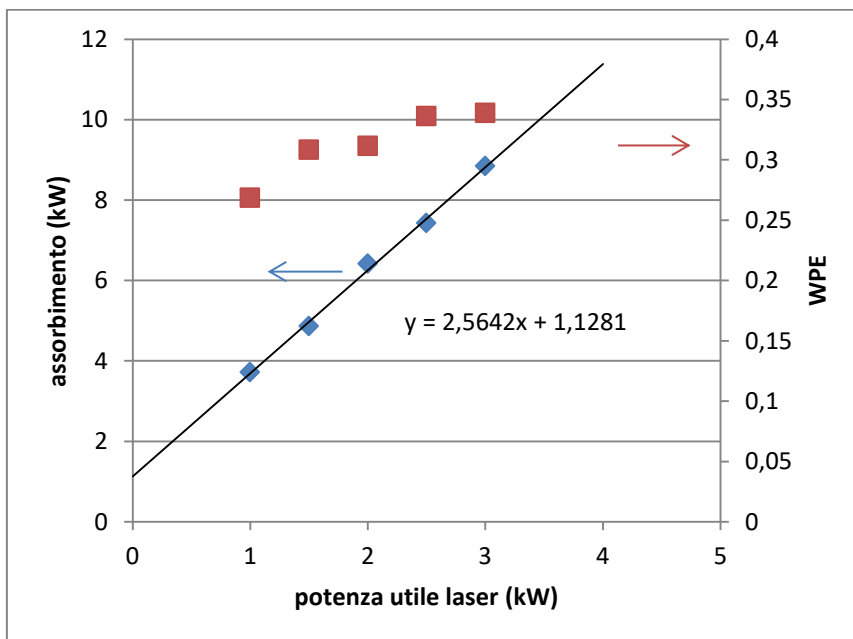


Figura 15: assorbimento elettrico ed efficienza laser a diversi livelli di potenza

Il chiller al servizio del laser è del tipo acqua-aria ed elabora la portata di 20 litri al minuto circa di acqua con una capacità frigorifera di 5,5 kW. Dalla Figura 15 si rileva che la massima potenza da dissipare è intorno a 7 kW, almeno per funzionamento continuo a piena potenza del laser, per cui il chiller sarebbe in questo caso sottodimensionato. L'assorbimento elettrico varia tra 3,9 e 5,1 kW circa con una media di 4,4 kW durante lo stand-by. Oltre al compressore devono infatti essere alimentate la pompa di trasferimento dell'acqua e la soffiante dell'aria. Il consumo, nell'utilizzo di laboratorio, è piuttosto costante nel tempo in quanto, non essendo in un contesto industriale - con automazione di processo - l'esercizio del laser si caratterizza per un "duty-cycle" piuttosto basso (rapporto tra durata di emissione e stand-by) per cui l'incidenza del chiller sui consumi è quella del suo assorbimento medio².

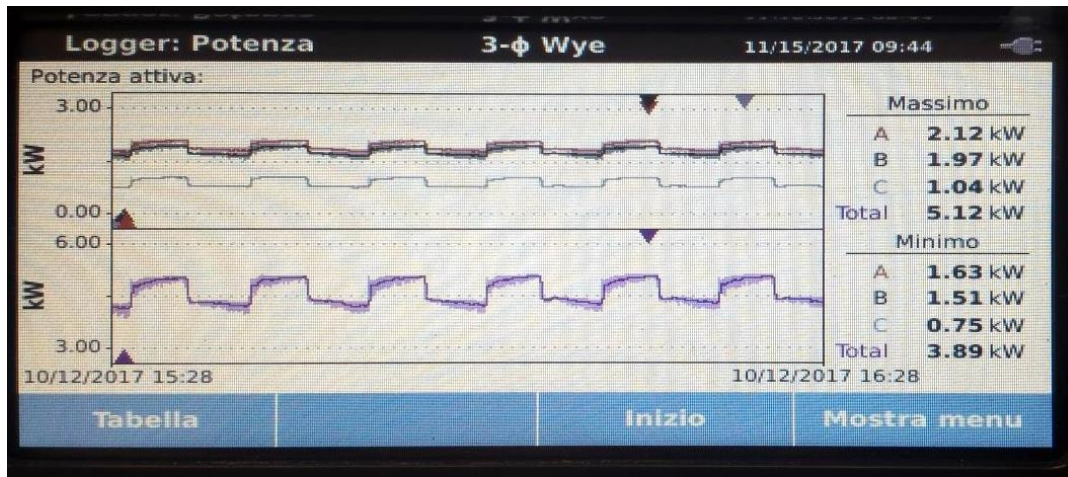


Figura 16: assorbimento del chiller in condizioni di riferimento, laser in funzione

4.1 Attività sperimentale di sviluppo di processi di saldatura Laser su materiali di impiego comune e valutazione dell'efficienze energetica di processo

Tale attività ha lo scopo di definire condizioni operative realistiche scegliendo materiali e parametri di processo rappresentativi delle applicazioni del laser in saldatura per poi valutarne l'efficienza energetica.

Il lavoro di sperimentazione svolto si può scomporre in diverse fasi temporali. In un primo stadio è stata eseguita una serie di prove su campioni di diversi materiali e spessori, andando a indagare in maniera più o meno approfondita vari aspetti del problema. Questa fase è stata necessaria per conoscere qualitativamente il tipo di reazione presentata dal materiale al variare dei parametri di saldatura. E' stato possibile in questo modo stabilire l'influenza delle variabili di processo, variabili che sono divenute di conseguenza argomento di studio per la fase successiva di sperimentazione.

In questa seconda fase, dopo ogni prova di saldatura, il giunto è stato singolarmente analizzato, esaminandone la superficie e la sezione trasversale per ottenere un quadro completo sulle modifiche che la variazione aveva introdotto nella saldatura. Così agendo, si sono potute avanzare ipotesi sui meccanismi che influenzano i risultati e sulla sinergia tra i diversi parametri.

Una volta ottenuti risultati soddisfacenti, si è proceduto all'analisi metallografica di tutti i campioni ottenendo un'ampia documentazione corredata da micrografie e macrografie. I campioni più interessanti sono stati dettagliatamente esaminati sia al microscopio ottico sia a quello elettronico a scansione allo scopo di ottenere informazioni microstrutturali.

Moltissime variabili sono in grado di influenzare la riuscita di una saldatura Laser, in particolare se eseguita con un materiale "sensibile" come l'alluminio e le sue leghe (serie 6000).

² Diverso sarebbe lo scenario in un contesto produttivo, per cui le successive misure sul campo dovrebbero dare dati più realistici.

Già durante le prime prove, è stato comunque evidente che la difficoltà principale non consisteva nello scoprire quali fossero i parametri che più influenzano la buona riuscita della saldatura, bensì capire come questi parametri interagiscano tra di loro, le ragioni di tale sinergia e il modo di controllarli.

Allo scopo di affrontare lo studio sull'efficientamento della saldatura Laser, sono stati utilizzati 4 materiali largamente utilizzati in ambito industriale

- lastre di Acciaio Inox di spessore 4 mm (AISI 316)
- lastre di acciaio al carbonio spesse 5 mm (S460 NL)
- lastre di alluminio della serie 1000 spesse 6 mm (AA1070)
- lastre di lega di alluminio della serie 6060 spesse 6 mm (AA6060)

le variabili che sono state prese in considerazione nel processo di saldatura laser sono state:

- la velocità di saldatura "V"
- la potenza Laser "P"
- la posizione del fuoco "F" (con la rispettiva altezza "Z_f" della testa Laser rispetto al campione, vedi Figura 17)
- la quantità di Argon (gas di protezione del bagno di fusione) utilizzata sul Dritto (D) e sul rovescio (R) del cordone di saldatura.
- utilizzo del Wobbling (che permette la rotazione del fascio laser), definendo il diametro "d" del cerchio e la frequenza "F" di rotazione del Laser.

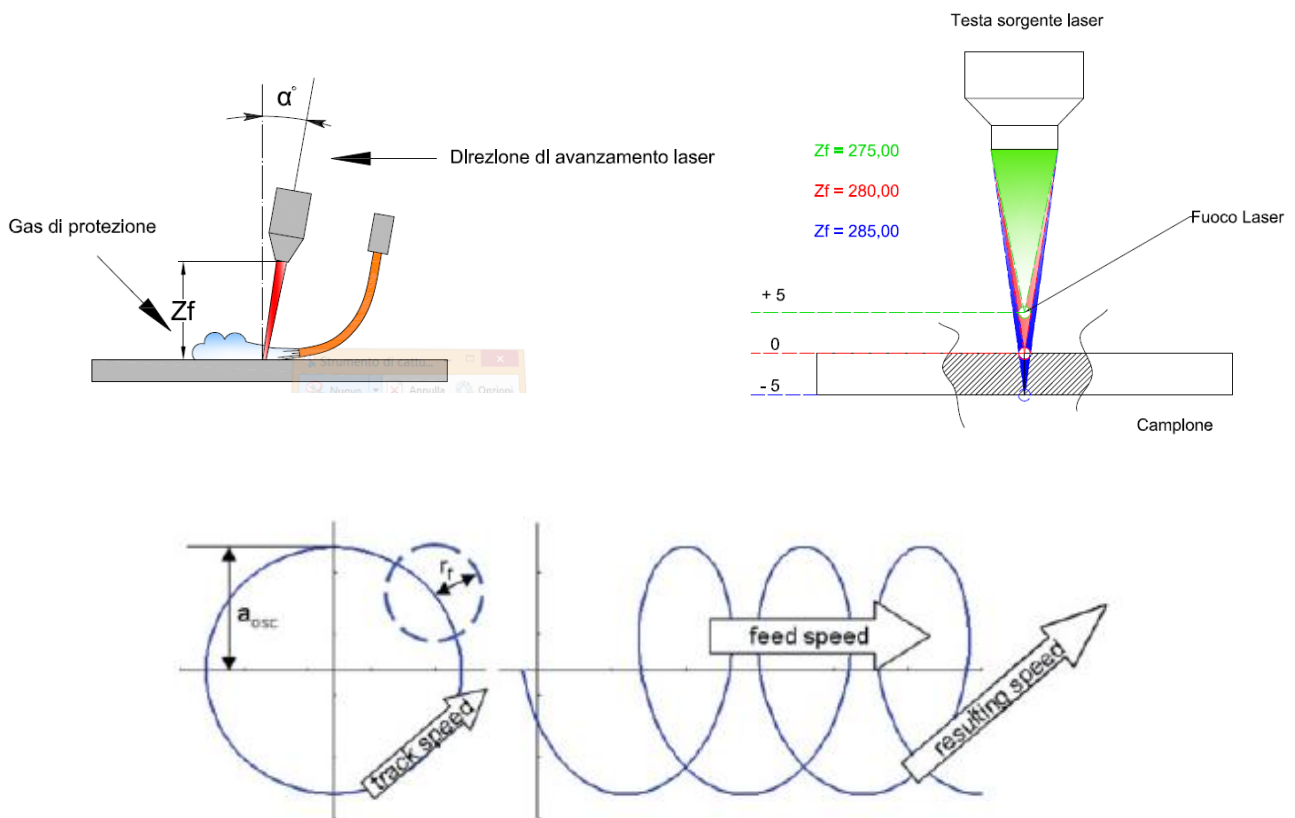


Figura 17: set-up di saldatura (sopra, a sin.) e definizione della posizione del fuoco rispetto al pezzo (des.), principio di azione del wobbling (sotto) [6]

Una volta raggiunte le condizioni ottimali sono stati realizzati dei simulacri di giunti saldati ed in queste condizioni sono stati misurati i reali consumi energetici.

Dopo aver scelto, sulla base di un'attenta analisi della forma del cordone, i parametri di saldatura ottimali per le diverse lamiere, sono stati realizzati i giunti testa a testa per ogni tipologia di materiale e spessore.

Le tabelle seguenti riportano i parametri delle prove effettuate. Alcune di queste fanno uso volutamente di parametri non ottimali per verificare come condizioni errate (anche in condizioni accettabili per la qualità di giunzione) possano influenzare l'efficienza (Es. fuori fuoco o ottiche sporche).

Tabella 3: Campioni di Acciaio Inox Saldati Laser

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
I1*	17	3000	Sulla sup. (194,2)	10	10	no	
I2*	25	3000	Sulla sup. (194,2)	15	15	no	
I3*	25	3000	1,3 mm otto la sup. (195,53)	15	15	no	
I4*	25	2000	1,3 mm otto la sup. (195,53)	15	15	no	
I5*	17	2000	1,3 mm otto la sup. (195,53)	15	15	no	
I6**	25	3000	Sulla sup. (189,7)	30	10	no	
I7**	25	3000	Sulla sup. (189,7)	30	10	no	

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema)

**= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 4: Campioni Di Acciaio al Carbonio saldati Laser

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
A1*	17	3000	Sulla sup. (193,2)	20	10	no	
A2*	17	4000	1,7 mm sotto la sup. (194,9)	20	10	no	
A3*	25	4000	1,7 mm sotto la sup. (194,9)	20	10	no	
A4*	25	4000	1,7 mm sotto la sup. (194,9)	20	10	no	
A5**	25	4000	1,3 mm otto la sup. (195,53)	20	10	0,38	200

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema)

**= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 5: Campioni di Alluminio serie 1000 saldati Laser

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
AL1**	17	3000	Sulla Sup. (192,2)	20	10	no	
AL2**	17	3000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
AL3**	12	3000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
AL4**	12	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
AL5**	25	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
AL6**	21	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
AL7**	17	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema)

**= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 6: Campioni di lega di Alluminio della serie 6060 saldati Laser

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
S1**	17	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S2**	21	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S3**	25	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S4**	21	3000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S5**	17	3000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S6**	17	3500	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	
S7**	21	3500	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema)

**= testa Laser non inclinata (vedi schema)

4.1.1 Fattore di efficienza per i campioni delle prove di rifusione laser

Per i campioni in cui si è realizzata la completa penetrazione è stato calcolato il fattore di efficienza:

$$FEE = \frac{v s}{P_{tot}}$$

Per il laser si è utilizzato il valore di consumo (in kW) dato dalla correlazione (Figura 15):

$$2,56 \times P_L + 1,1$$

L'assorbimento del chiller è considerato costante, pari a 5,1 kW (Figura 16). I risultati sono riassunti nella tabella e nel grafico seguente.

Camp.	mat.	sp. (mm)	V (mm/s)	P_ut (kW)	P_L (kW)	P_ch (kW)	P_tot (kW)	FEE (mm ² /kJ)
I1		4	17	3	8.8	5.1	13.9	4.9
I2		4	25	3	8.8	5.1	13.9	7.2
I3		4	25	3	8.8	5.1	13.9	7.2
I4	AISI316	4	25	2	6.2	5.1	11.3	8.8
I5		4	17	2	6.2	5.1	11.3	6.0
I6		4	25	3	8.8	5.1	13.9	7.2
I7		4	25	3	8.8	5.1	13.9	7.2
A1		5	17	3	8.8	5.1	13.9	6.1
A2		5	17	4	11.3	5.1	16.4	5.2
A3	S460 NL	5	25	4	11.3	5.1	16.4	7.6
A4		5	25	4	11.3	5.1	16.4	7.6
A5		5	25	4	11.3	5.1	16.4	7.6
AL1		6	17	3	8.8	5.1	13.9	7.3
AL2		6	17	3	8.8	5.1	13.9	7.3
AL3		6	12	3	8.8	5.1	13.9	5.2
AL4	AA1xxx	6	12	4	11.3	5.1	16.4	4.4
AL5		6	25	4	11.3	5.1	16.4	9.1
AL6		6	21	4	11.3	5.1	16.4	7.7
AL7		6	17	4	11.3	5.1	16.4	6.2
S1		6	17	4	11.3	5.1	16.4	6.2
S2		6	21	4	11.3	5.1	16.4	7.7
S3	AA6060	6	25	4	11.3	5.1	16.4	9.1
S6		6	17	3.5	10.1	5.1	15.2	6.7
S7		6	21	3.5	10.1	5.1	15.2	8.3

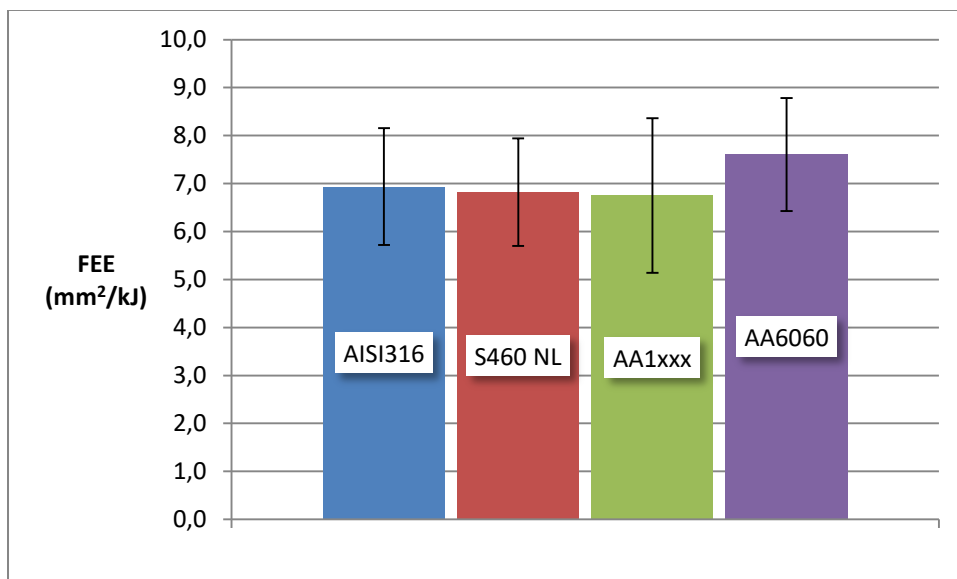


Figura 18: confronto efficienze complessive di rifusioni laser su materiali diversi

La media generale dei valori è $7,0 \pm 1,3 \text{ mm}^2/\text{kJ}$. I diversi gruppi di materiali non si discostano eccessivamente da questo valore che può essere considerato in media rappresentativo della configurazione di saldatura utilizzata. Un certo grado di correlazione (positiva) con la velocità si evidenzia nel grafico di Figura 19.

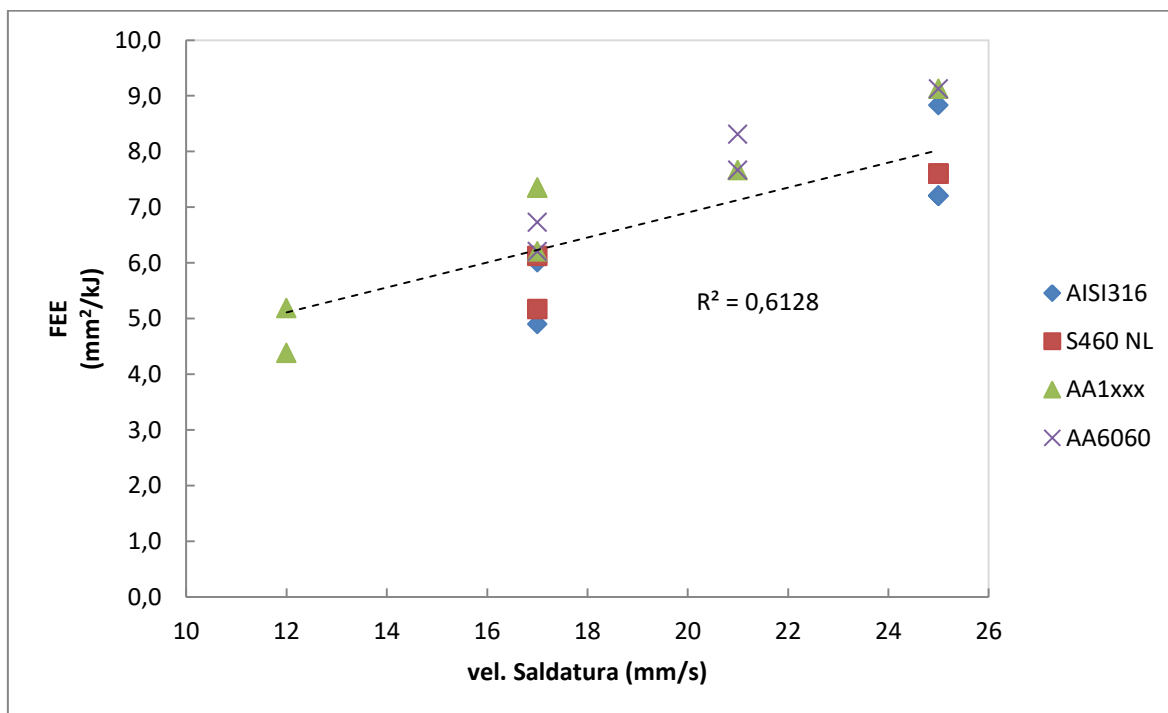


Figura 19: correlazione del FEE con la velocità di saldatura

4.1.2 Saldatura Laser testa a testa

Dopo aver scelto, sulla base di un attenta analisi della forma del cordone, i parametri di saldatura ottimali per le diverse lamiere, sono stati realizzati i giunti testa a testa per ogni tipologia di materiale e spessore su una lunghezza di 400 mm ca. cad.

Tabella 7: Campioni Saldati Testa a Testa di Lamiera di Acciaio al carbonio

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
TA1**	17	3000	Sulla sup. (193,2)	30	10	no	
TA3**	25	4000	1,7 mm sotto la sup. (194,9)	30	10	no	
TA5**	25	4000	1,3 mm sotto la sup. (195,53)	30	10	0,38	200

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema); **= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Per vedere gli effetti della variazione del fuoco sul cordone della saldatura e sull'efficienza di giunzione, sono state effettuate delle prove a fuoco variabile.

Tabella 8: Campione di Acciaio al Carbonio saldato con fuoco Variabile

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
TA5F**	25	4000	1,3 mm sotto la sup. (195,53)	30	10	0,38	200

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema); **= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 9: Campioni saldati Testa a Testa di Acciaio Inox

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
TI1*	17	3000	Sulla sup. (194,2)	10	10	no	
TI2*	25	3000	Sulla sup. (194,2)	15	15	no	
TI6**	25	3000	Sulla sup. (189,7)	30	10	no	

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema); **= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 10: Campione di Acciaio Inox saldato con fuoco Variabile

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
TA2F**	25	4000	1,3 mm sotto la sup. (195,53)	30	10	0,38	200

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema); **= testa Laser non inclinata (vedi schema)

Tabella 11: Campioni saldati Testa a Testa di lega di alluminio serie 6060

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling		commenti
						d [mm]	F [Hz]	
TS1*	17	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no		
TS3* ⁱ	25	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no		Sfonda solo all'inizio, vetrino sporco
TS3*	25	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no		Vetrino pulito, sfonda come S3*

*= testa Laser inclinata di 10° (vedi schema)

**= testa Laser non inclinata (vedi schema)

*ⁱ=campione saldato con testa inclinata ma con vetrino sporco

Tabella 12: Campioni saldati Testa a Testa di Alluminio serie 1000

N° Campione	V [mm/s]	P [W]	f (Z _f)	Argon Sop. [Nlt/min]	Argon Sot. [Nlt/min]	Wobbling	
						d [mm]	F [Hz]
TAL7**	17	4000	2 mm sotto la sup. (194,2)	20	10	no	

I campioni sono analizzati mediante sezioni metallografiche; è stata misurata l'estensione della zona fusa e quest'ultima è stata correlata con i parametri di saldatura. Nella sezione seguente sono mostrati alcuni dei risultati ottenuti insieme al fattore di efficienza energetica FEE e ai coefficienti η_t (efficienza di trasferimento energia) e η_m (rapporto di fusione) che caratterizzano l'accoppiamento della radiazione laser con il materiale e le perdite di calore per conduzione: tali grandezze sono utili al tecnologo per valutare l'adeguatezza dei parametri e del set-up della macchina e identificare possibili errori e/o anomalie di processo che peggiorano l'efficienza energetica complessiva. In appendice A le foto dei campioni testa-testa realizzati.

In appendice B il report di controllo radiografico dei giunti testa-testa. Sono stati scelti i campioni T12 (materiale AISI316), TS3 (AA6060), TAL7 (AA1050), TA5 (S460 NL). Le immagini sono invertite quindi le mancanze di materiale si evidenziano con macchie chiare. Dalle immagini si rileva che i campioni in lega di alluminio mostrano una diffusa e grave presenza di porosità (fenomeno noto nella pratica e ampiamente discusso in letteratura [7]): nonostante dal punto di vista delle valutazioni termiche ed energetiche del processo ciò non abbia rilevanza, ovviamente, a seconda dell'applicazione è probabile che il livello di qualità del giunto non sia accettabile. La causa principale della formazione dei pori è il collasso periodico del capillare di saldatura che è soggetto ai movimenti vorticosi della circostante pozza fusa. Ciò fa sì che nella regione inferiore della stessa si producano delle bolle di vapore metallico e gas che, se la velocità di saldatura e la viscosità del metallo fuso sono elevate, non hanno il tempo di risalire (per galleggiamento) in superficie e sono intrappolate durante la solidificazione. In questa sede non si è ritenuto necessario procedere a un affinamento dei parametri per ridurre l'incidenza del difetto. Il miglioramento può comunque essere perseguito agendo in varie direzioni:

- controllo dello stato superficiale delle lamiere (decapaggio, pulizia)
- ottimizzazione del flusso di gas di protezione: tipo (Ar, He, azoto, miscela), portata al dritto e al rovescio, direzione
- modulazione della potenza: sovrapponendo impulsi all'emissione continua
- orbita del punto focale (wobbling): il sistema permette di far ruotare il fascio focalizzato con diametro e frequenza massima rispettivamente 2,9 mm e 300 Hz

4.2 Valutazione dell'efficienza del trasferimento di energia

La valutazione dell'efficienza del trasferimento di energia (η_t) è di particolare interesse nella saldatura laser in quanto, a causa dell'elevata riflettività delle leghe metalliche, se i parametri di processo non sono adeguati e/o la strumentazione non opera in condizioni ottimali, possono verificarsi intense retro-riflessioni. Le conseguenze negative sono diverse:

- Rischio di danneggiamento di componenti interni alla testa di focalizzazione o al laser stesso: ciò è in particolare importante per le sorgenti in fibra il cui mezzo attivo ha dimensione trasversale esigua ed è pertanto più suscettibile al danno termico
- Rischio di danneggiamento di altri componenti (cavi, tubazioni, strutture circostanti, compresi i contenitori di sicurezza dell'area di lavoro)
- Decadimento dell'efficienza energetica complessiva.

Dal punto di vista gestionale è facile intuire come condizioni errate di saldatura siano da evitare: le sorgenti laser hanno un costo elevato che, per ragioni tecniche e commerciali è all'incirca proporzionale alla potenza utile nominale. Nella ricerca dei parametri di saldatura in contesti produttivi (attività che può essere piuttosto dispendiosa in termini di tempo) si setta la potenza a valori prossimi al massimo [8] e si lavora principalmente su velocità e focalizzazione. Alla perdita in capitale si aggiunge quella per il maggiore consumo energetico. Una volta definiti i parametri ottimali di processo la saldatura sarà caratterizzata anche da un determinato valore di η_t : variazioni non volute delle condizioni operative (ad esempio per deterioramento delle ottiche) si ripercuotono sull'efficienza che è quindi un indicatore sensibile dello stato del processo.

Esistono diversi metodi per valutare η_t che si basano sia su modelli della diffusione del calore che su raccolte di dati sperimentali. Ne vengono di seguito esposti tre: rilievo della temperatura, modello della sorgente lineare ed elaborazione da dati calorimetrici.

4.2.1 Rilievo della temperatura (A)

Misurando in tempo reale la temperatura raggiunta a distanza nota dalla saldatura si può risalire all'energia assorbita dal pezzo [9]. Ad esempio, secondo [10] [11] la massima temperatura (T_p) a distanza y dalla zona fusa, in condizioni di diffusione del calore bidimensionale, quali si verificano nella saldatura laser keyhole su lamiere sottili, è data da

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} v y s \rho c}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

(T_0 temp. Iniziale, T_m temp. di fusione, Q potenza della sorgente di calore distribuita nello spessore s , il picco non è influenzato dalla conducibilità termica)

Il grafico seguente mostra ad esempio l'andamento della temperatura misurato con termocoppie saldate in superficie, durante la saldatura laser di lamiere in AISI316, sp. 2 mm, rispettivamente a 2 e 3 mm dalla zona fusa. Da ciascuna curva è possibile estrarre una T_p e ricavare un valore di Q (per calcolare la media). Il rapporto Q/P_L dà l'efficienza η_t richiesta.

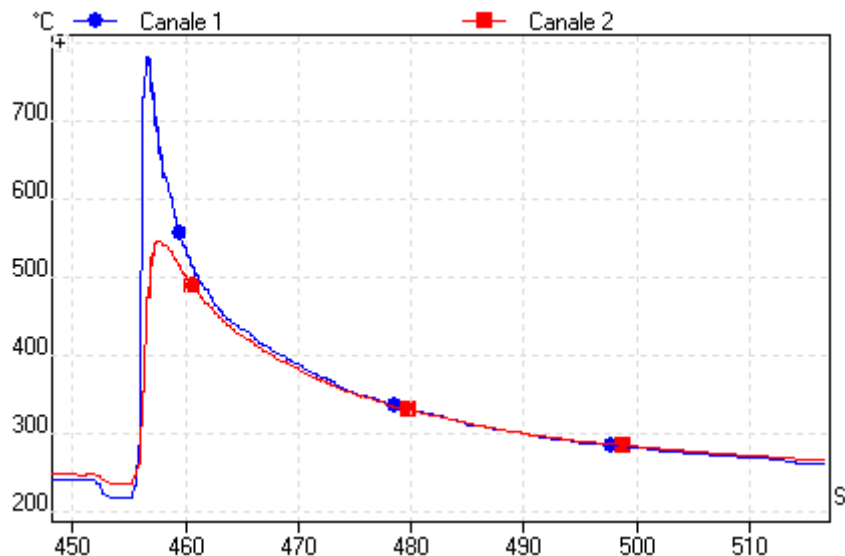


Figura 20: Grafico del rilievo della temperatura su lamiere di AISI 316 sp= 2mm . Canale 1 d= 2mm fa ZF; Canale 2 d= 3 mm dalla zona fusa

Nell'applicazione del metodo si incontrano alcune difficoltà:

- Incertezza nei parametri del materiale
- Il modello trascura le perdite di calore per convezione, irraggiamento e conduzione verso le parti adiacenti

- La larghezza della zona fusa non è costante nello spessore, specialmente negli acciai inox e viene trascurato l'effetto della dimensione finita del campione.

4.2.2 Modello della sorgente lineare (B)

Il modello presentato in [12] è relativo allo scambio termico bidimensionale [13] quale si verifica in lamiere sottili e/o condizioni di saldatura profonda keyhole (laser, fascio elettronico, keyhole plasma). I risultati sono condensati nelle variabili X e Y, rispettivamente potenza e larghezza adimensionali.

$$X = P_0 / h s$$

$$Y = v b / \alpha$$

(P_0 potenza utile assorbita, h spessore, $s = \int_{T_0}^{T_m} \lambda(T) dT = (T_m - T_0) \bar{\lambda}$, v velocità, b larghezza trasversale zona fusa, $\alpha = \lambda / c_p$ diffusività termica)

Eseguita la saldatura si effettuano una o più sezioni trasversali del cordone, per determinarne la larghezza media b (=area trasv. Zona fusa / h) da cui si ricava Y . La seguente relazione è risolta in ur (u velocità adimensionale = $v/2\alpha$, r raggio dell'isoterma di fusione)

$$Y = 4 ur \sqrt{1 - K_0^2(ur) / K_0'^2(ur)}$$

Iterando $ur = Y/4 \sqrt{1 - K_0^2(ur) / K_1^2(ur)}$

(K_0 funzione modificata di Bessel, K_0' derivata prima = $-K_1$)

E' quindi possibile calcolare X

$$X = \frac{2\pi}{K_0(ur)} \exp\left(ur \frac{K_0(ur)}{K_0'(ur)}\right)$$

da cui

$$P_0 = X h (T_m - T_0) \bar{\lambda}$$

che permette di valutare $\eta_t = P_0 / P_L$ (ETE, energy transfer efficiency). E' possibile una valutazione puramente grafica tracciando una famiglia di curve a diversa efficienza

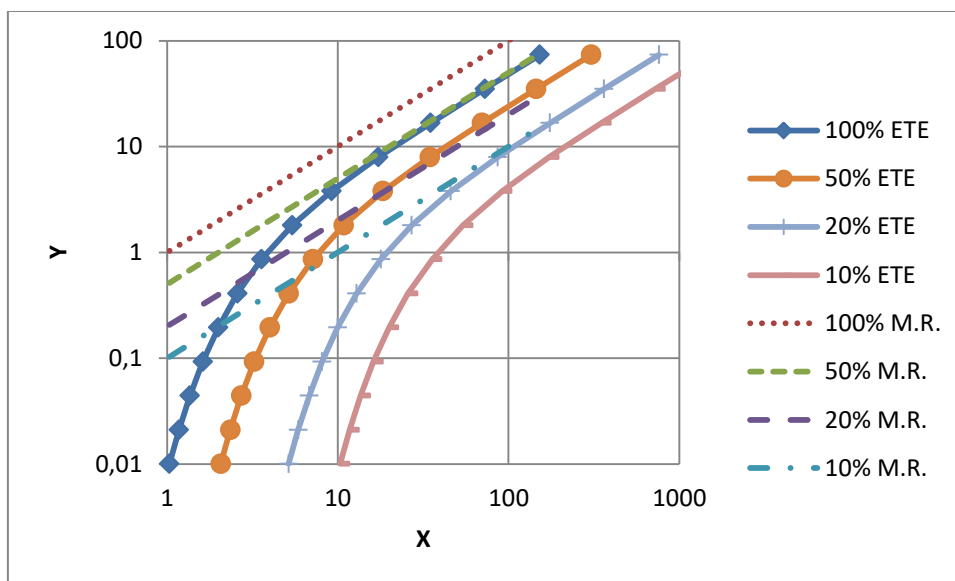


Figura 21: correlazione tra variabili normalizzate (potenza e larghezza del cordone) nel modello della sorgente di calore lineare [12]

Il quoziente Y/X è il melting ratio (M.R., rendimento di fusione), rapporto tra l'energia strettamente necessaria alla fusione e quella assorbita dal materiale.

$$\eta_m = \frac{\frac{v b}{\alpha}}{\frac{P_0}{h s}} = \frac{v b h c \rho (T_m - T_0)}{P_0}$$

Il melting ratio tende, al crescere della velocità ($ur \gg 1$) al limite $\sqrt{2/\pi e} \cong 0,48$ che, nelle ipotesi semplificative del modello, rappresenta il limite fisico del processo.

4.2.3 Elaborazione da dati calorimetrici (C)

L'analisi esposta in [14] [15] si basa sulla misura diretta dell'energia depositata nel materiale durante la saldatura laser eseguita su un certo numero di materiali, con vari parametri e condizioni diverse di focalizzazione del fascio. La gamma dei materiali comprende inox 304, acciaio al carbonio, alluminio 6061 e stagno. Il campione, a temperatura iniziale uniforme T_0 , è posto in un calorimetro che viene richiuso subito dopo l'esecuzione della saldatura. Il calore asportato per riportare il pezzo a T_0 è una stima affidabile dell'energia assorbita durante il processo.

I dati sono elaborati mediante analisi dimensionale introducendo le variabili

$$Ry = \frac{q_i v}{\alpha^2 \delta h}$$

$$Ch = \frac{v^2 A}{\alpha^2}$$

(q_i potenza netta assorbita, v velocità, α diffusività termica alla temperatura del liquidus T_L , δh entalpia di fusione = $\int_{T_0}^{T_L} c_p(T) dT + \Delta h_l$ -somma di calore sensibile e latente-, A area della sezione trasversale fusa).

La correlazione tra le due variabili è ben definita come mostra il grafico seguente.

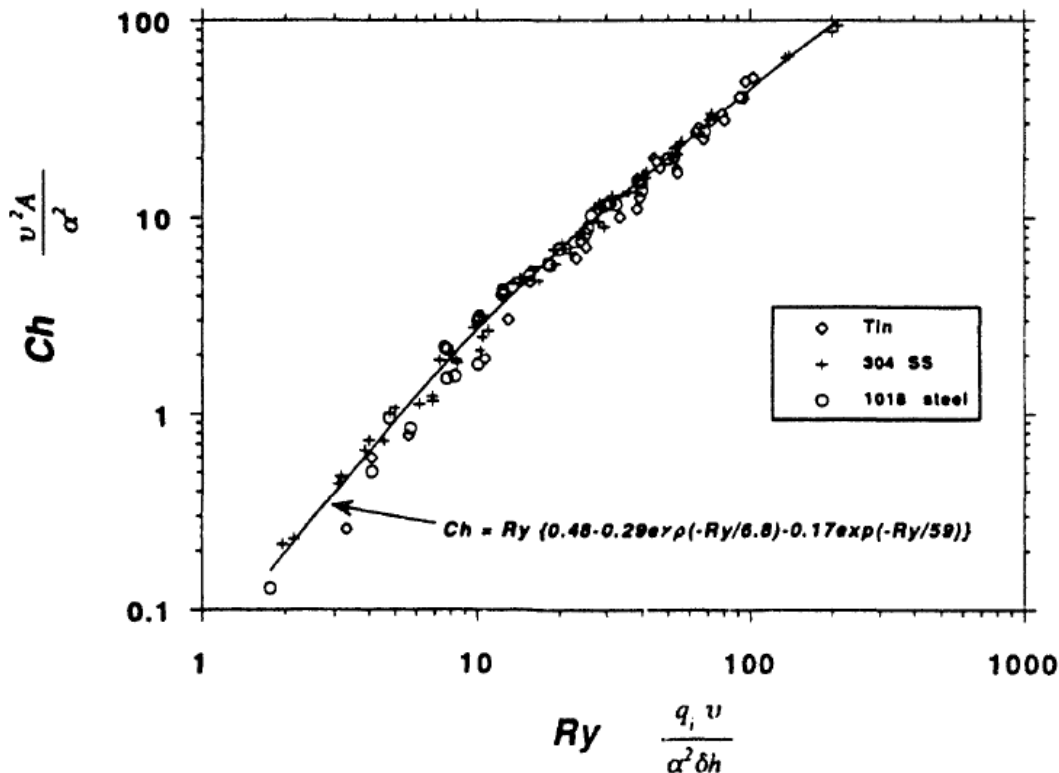


Figura 22: correlazione tra parametri di processo e dati sperimentali (energia assorbita e materiale fuso) [15] [14]

La correlazione

$$Ch = Ry \left(0,48 - 0,29 e^{-Ry/6,8} - 0,17 e^{-Ry/59} \right)$$

è valida anche per saldature a incompleta penetrazione allentando parzialmente il vincolo fin qui vigente di scambio termico puramente 2D. Lo spessore del materiale non figura tra i dati. L'autore della ricerca evidenzia l'analogia con i noti fenomeni di scambio termico nei fluidi che giustificherebbe l'utilizzo di parametri termo-fisici allo stato liquido. D'altra parte è noto che la zona fusa è sede di rapidi movimenti di rimescolamento del metallo liquido che incidono sulla trasmissione del calore. A parte qualche difficoltà di reperimento del dato della diffusività del metallo liquido, il modello è di semplice applicazione. Per eseguire la stima a posteriori dell'efficienza η_t si deve misurare l'area della sezione trasversale del cordone e calcolare $Ch=v^2A/\alpha^2$. Dal grafico o dalla correlazione si ricava il corrispondente valore di Ry. Il rapporto

$$\frac{Ch}{Ry} = \frac{\frac{v^2 A}{\alpha^2}}{\frac{q_i v}{\alpha^2 \delta h}} = \frac{v A \delta h}{q_i}$$

è il rendimento di fusione η_m e tende asintoticamente a 0,48 al crescere di v (come nel modello della sorgente lineare)

4.3 Applicazione ai test di saldatura

La metodologia (C) è stata applicata ad una selezione dei campioni realizzati. La tabella e i grafici riassumono i risultati ottenuti.

camp.	Materiale	V (mm/s)	A (mm ²)	P (W)	Alfa (mm ² /s)	Dh (J/mm ³)	Ch	Ry	Qi (W)	eta_t	eta_m
S1	AA6060	17	25.9	4000	31.7	2.86	7.4	21.3	3608	0.90	0.35
S3	AA6060	25	20.1	4000	31.7	2.86	12.5	32.9	3779	0.94	0.38
A1	S460 NL	17	4.3	3000	5.86	8.3	36.2	82.6	1385	0.46	0.44
A3	S460 NL	25	4	4000	5.86	8.3	72.8	155.6	1774	0.44	0.47
A5	S460 NL	25	4.9	4000	5.86	8.3	89.2	188.5	2149	0.54	0.47
I1	AISI316	17	6.2	3000	5.7	8.7	55.1	120.4	2002	0.67	0.46
I2	AISI316	25	4.1	3000	5.7	8.7	78.9	167.8	1897	0.63	0.47
I6	AISI316	25	4.9	3000	5.7	8.7	94.3	198.8	2248	0.75	0.47

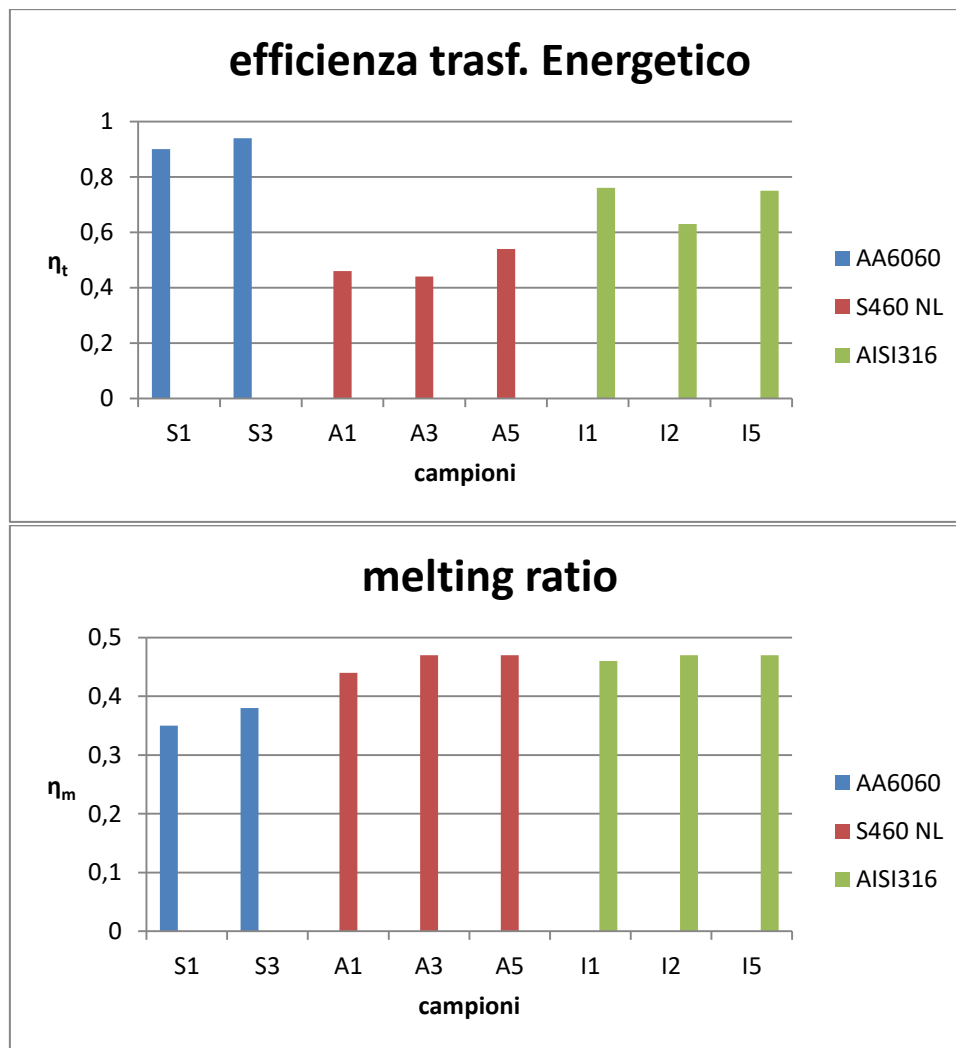


Figura 23: grafici relativi all'efficienza di trasferimento energetico e rapporto di fusione per i differenti materiali trattati

Il melting ratio è abbastanza uniforme, prossimo al valore limite del 48%, tipico della saldatura ad elevata velocità (tranne per i campioni S, in alluminio, che sono stati saldati a velocità relativamente ridotta).

L'efficienza di trasferimento mostra invece interessanti differenze: l'alluminio sembra avere assorbito la maggior parte della potenza laser, a dispetto della concezione diffusa secondo cui tale metallo è difficoltoso da saldare al laser per la sua alta riflettività. I campioni in acciaio invece sono stati probabilmente saldati con un surplus di potenza cioè una parte cospicua della radiazione laser, in eccesso, ha attraversato lo spessore perdendosi. In tale senso si può dire che le condizioni di lavoro per la lega AA6060 sono state più efficienti dal punto di vista energetico in quanto non si desume un eccesso di energia come per le due leghe ferrose.

Si può verificare l'influenza di altri parametri (oltre a velocità e potenza) sull'assorbimento del fascio. Ad esempio A5 ha v e P uguali ad A3 ma il suo η_t è maggiore del 20% circa: ciò è dovuto all'oscillazione circolare del fascio (wobbling) che aumenta la dimensione della zona di processo. Un aumento simile si verifica da I2 a I6, in questo caso da correlare con l'incidenza del fascio laser che in I2 avviene con angolo di 10° rispetto alla normale mentre in I6 è perpendicolare.

Applicando invece il metodo di analisi (B) (della sorgente termica lineare) si ottengono i dati della tabella seguente

camp.	α (mm ² /2)	λ (W/mm°C)	ρ (g/mm ³)	C (J/g°C)	S (mm)	V (mm/s)	PL (W)	A (mm ²)	b=A/s	Tm (°C)	T0 (°C)	Y	X	P (W)	η_t	MR
S1	86.61	0.21	2.70E-03	0.898	6	17	4000	25.9	4.32	655	20	0.85	3.5	2837	0.71	0.24
S3	86.61	0.21	2.70E-03	0.898	6	25	4000	20.1	3.35	655	20	0.97	3.8	3033	0.76	0.26
A1	4.96	0.024	7.80E-03	0.62	5	17	3000	4.35	0.87	1530	20	2.98	7.6	1385	0.46	0.39
A3	4.96	0.024	7.80E-03	0.62	5	25	4000	4.02	0.80	1530	20	4.05	9.7	1755	0.44	0.42
A5	4.96	0.024	7.80E-03	0.62	5	25	4000	4.89	0.98	1530	20	4.93	11.4	2060	0.52	0.43
I1	4.32	0.02	8.06E-03	0.575	4	17	3000	6.2	1.55	1385	20	6.11	13.7	1492	0.50	0.45
I2	4.32	0.02	8.06E-03	0.575	4	25	3000	4.06	1.02	1385	20	5.88	13.2	1444	0.48	0.44
I6	4.32	0.02	8.06E-03	0.575	4	25	3000	4.9	1.23	1385	20	7.10	15.6	1705	0.57	0.45

Il confronto tra i due modelli per quanto riguarda l'efficienza di trasferimento energetica è rappresentato nel grafico di Figura 24.

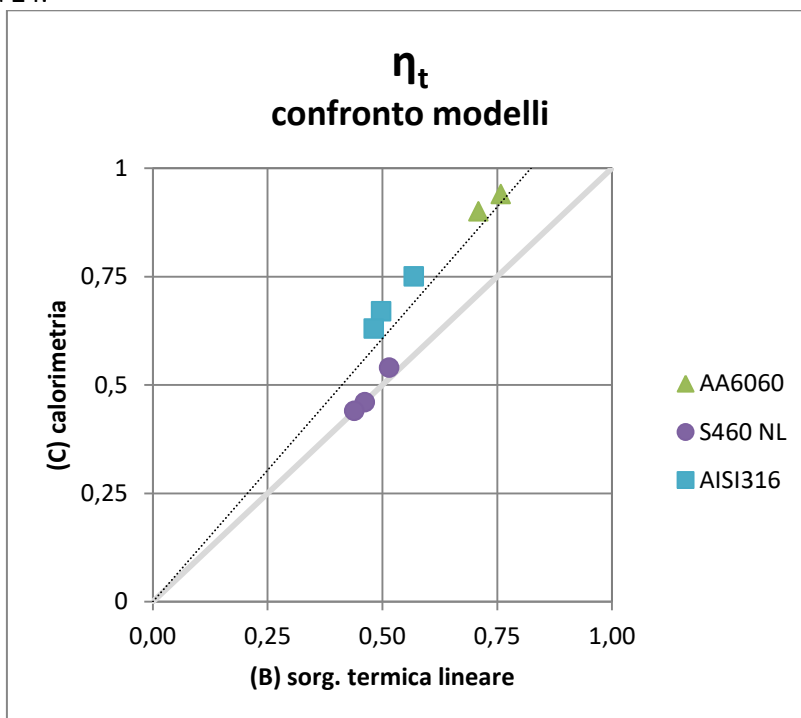
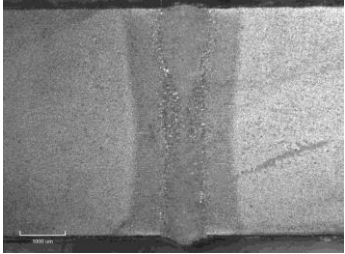
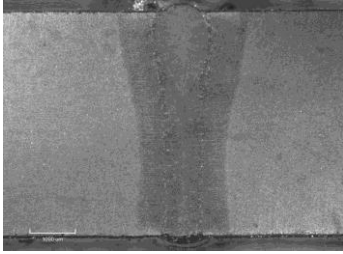
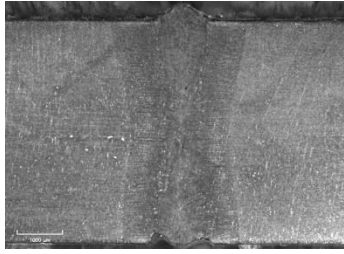


Figura 24: Confronto fra modello calorimetrico e sorgente termica lineare

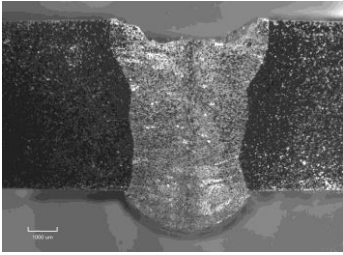
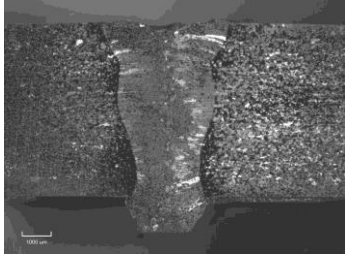
La concordanza è discreta, maggiore per l'acciaio S460. Tali valutazioni dipendono molto dai valori delle proprietà dei materiali impiegati. È comunque interessante verificare la rispondenza di entrambi i modelli la cui utilità è di dare indicazioni tendenziali, per verificare se le condizioni di processo si mantengono sotto controllo.

Di seguito sono mostrate le sezioni metallografiche dei campioni analizzati. I fattori di efficienza energetica globale FEE sono calcolati sulla base dei rilievi di assorbimento elettrico di laser e chiller già presentati in precedenza. [12]

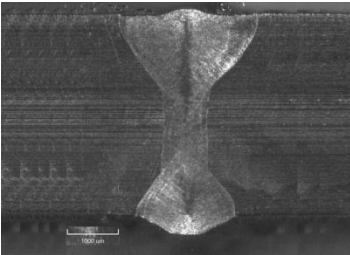
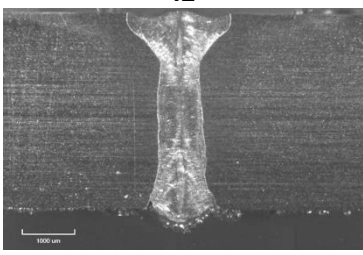
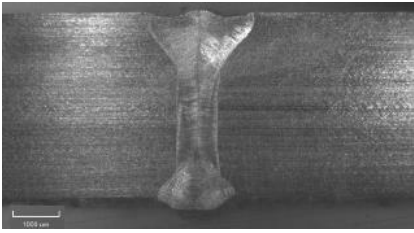
Acciaio S460 NL

<p>A1</p>  <p>FEE = 6,1, $\eta_t = 0,47$, $\eta_m = 0,44$</p>	<p>A3</p>  <p>FEE = 7,6, $\eta_t = 0,45$, $\eta_m = 0,47$</p>	<p>A5 (wob.: Ø 0,38 mm, 200 Hz)</p>  <p>FEE = 7,6, $\eta_t = 0,54$, $\eta_m = 0,47$</p>
---	---	---

Alluminio 6060

<p>S1</p>  <p>FEE = 6,2, $\eta_t = 0,90$, $\eta_m = 0,35$</p>	<p>S3</p>  <p>FEE = 9,1, $\eta_t = 0,95$, $\eta_m = 0,38$</p>
---	--

Acciaio AISI316

<p>I1</p>  <p>FEE = 4,9, $\eta_t = 0,66$, $\eta_m = 0,46$</p>	<p>I2</p>  <p>FEE = 7,2, $\eta_t = 0,63$, $\eta_m = 0,47$</p>
<p>I6</p>  <p>FEE = 7,2, $\eta_t = 0,75$, $\eta_m = 0,47$</p>	

5 Studio e realizzazione di un sistema trasportabile per la diagnosi energetica dei processi di saldatura industriali

Le specifiche del sistema sono state elaborate da Enea in collaborazione con l'Università di Tor Vergata (vedi RdS/PAR2016/096) e sulla base di indagini e sopralluoghi presso importanti installazioni di saldatura (per es. Walter Tosto spa, Chieti e CRF, Orbassano). Di seguito (Figure/Figura 25-Figura 27) alcune delle foto effettuate sugli impianti industriali visitati che hanno contribuito alla definizione delle specifiche per il sistema trasportabile di misura.



Figura 25: Sistema Robotizzato di saldatura GTAW della Walter Tosto modello Fronius alimentato su presa 380 V 63 A



Figura 26: Sistema Robotizzato di saldatura SAW della Walter Tosto modello SAF Starmatic 1003 DC alimentato su presa 380 V 125 A

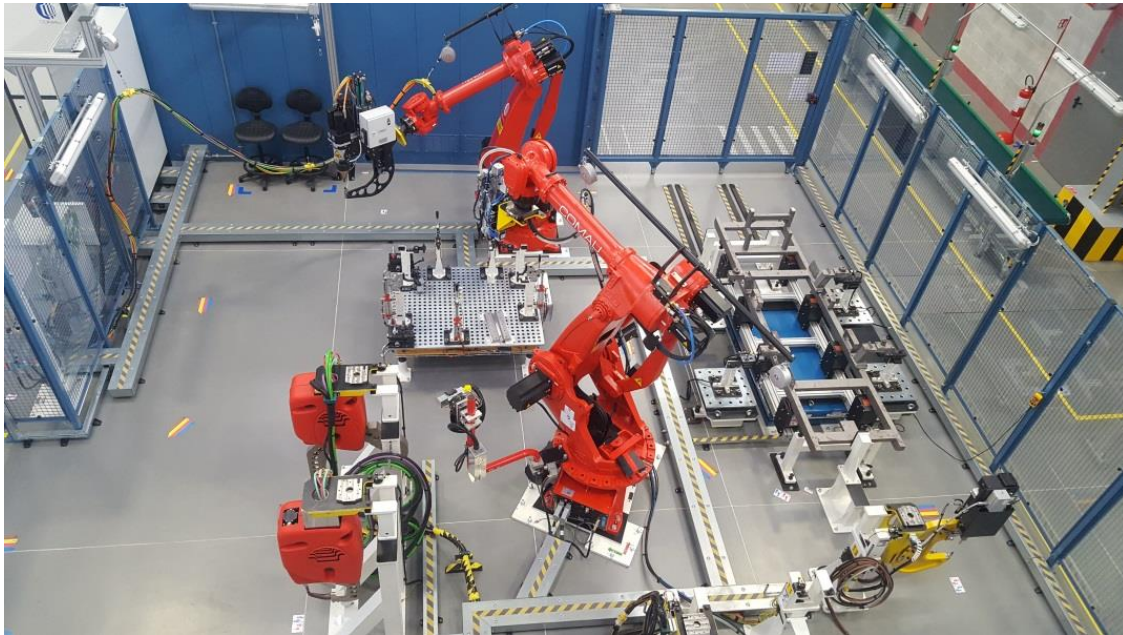


Figura 27: Sistemi robotizzati di saldatura che simulano i sistemi in produzione degli stabilimenti FCA: processi di saldatura “Cold Metal Arc Welding” (particolare processo GMAW); laser (Fibra/Diodo); resistenza RSW e Spot Friction Stir Welding SFSW.

Il quadro trasportabile permette la misura “sul campo” di tensione, corrente, potenza e qualità dell’alimentazione in 3 linee trifase e una monofase (corrente max 125 A) contemporaneamente. Tre sensori di portata in massa permettono la registrazione dei flussi dei gas ausiliari argon ed elio e dell’aria compressa di servizio.

Sono inoltre presenti gli ingressi per la misura della corrente e della tensione di saldatura ad arco e ingressi per segnali prodotti da misuratori di potenza laser, come il calorimetro Primes PM48 acquistato nel corso del PaR 2015.

E’ stata predisposta la connessione a carichi di varia entità, per avere la massima flessibilità operativa e sicurezza, mediante adattatori (spine e prese) con un concetto plug & play da applicare sul campo. Il sistema in sintesi permette di misurare e monitorare nel tempo le seguenti grandezze:

- assorbimento elettrico di quattro linee (tre trifase 400 V e una monofase 230 V);
- tensione e corrente erogata da un generatore per saldatura ad arco (corrente max 450 A, tensione 10-20 V ca.)
- potenza utile di una sorgente laser misurata da un calorimetro esterno (segnale analogico 0-10 V)
- consumo di argon, elio e aria compressa necessari all’esecuzione delle saldature.

Il sistema si avvale di strumentazione di precisione, disposta secondo un layout ad hoc (Figura 30). I dati sono trattati dal sistema National Instruments cDAQ, con software appositamente sviluppato dal gruppo di lavoro dell’Università di Tor vergata. E’ anche possibile l’integrazione degli analizzatori Fluke 1738 e 1730 già acquisiti, per verifica incrociata delle misure e ampliamento dei canali in ingresso.

Le figure seguenti mostrano il “conceptual design” del quadro elettrico trasportabile.

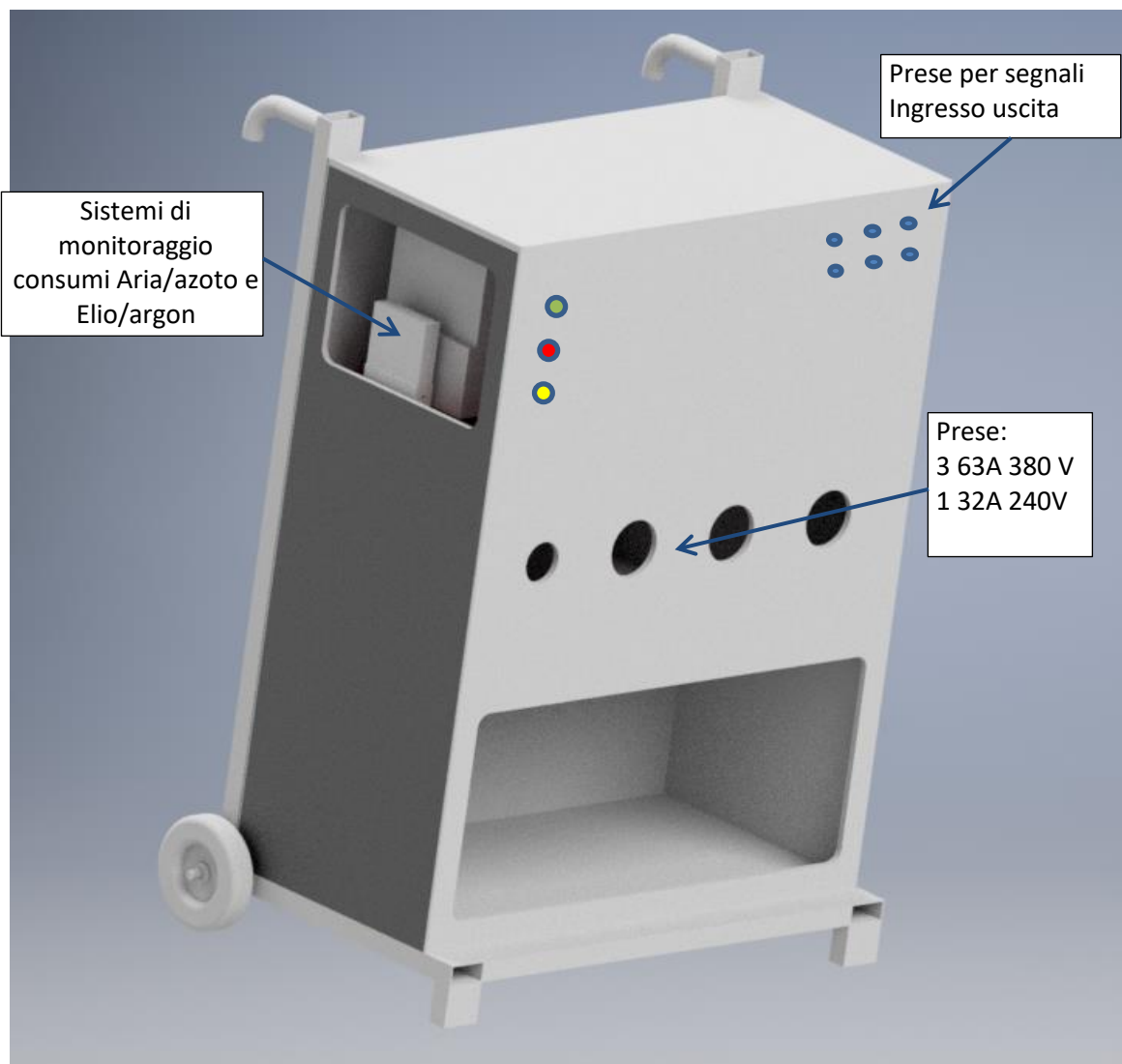


Figura 28: Conceptual Design del sistema

Un modulo WiFi industriale (Access point Moxa AWK-3121) consente la gestione remota e il trasferimento dei dati: il quadro può quindi essere collocato in ambienti in cui la presenza dell'operatore presenta problematiche di sicurezza (come tutte le installazioni di saldatura, sia ad arco che laser) per presenza di radiazione ottica coerente e non, fumi, rumore ecc.

Inoltre, il sistema diventa assolutamente non invasivo per i customer contattati che hanno già mostrato disponibilità ad aderire alla campagna di misure su sistemi industriali in produzione.

Il sistema potrà essere installato a bordo macchina in officina mentre tutti i segnali potranno essere monitorati a distanza senza intralciare le normali attività di produzione. Sarà sufficiente a inizio turno effettuare in generale semplici collegamenti, interponendo il sistema trasportabile con le opportune prolunghie a monte dei generatori e dei sistemi ausiliari ad essi associati. Questo sarà sufficiente per rilevare i dati per il calcolo del FEE dello specifico processo di produzione.

Per una valutazione energetica approfondita del sistema di produzione sarà necessario collegare anche misuratori sulla torcia di saldatura e/o testa laser mediante gli appositi rilevatori compresa un'analisi termografica dei generatori.



Figura 29: schede acquisizione segnali e modulo WiFi industriale

Il sistema così configurato ha caratteristiche che non sono presenti in strumenti con funzioni (parzialmente) simili, presenti sul mercato e presenta un'alta flessibilità di configurazione ed elaborazione delle misure. I dispositivi di misura elettrica (sensori di tensione e corrente Hall) scelti da Università Tor Vergata, sono stati provati, nella medesima configurazione finale, in prove allestite con un set-up preliminare, da laboratorio. Le misure sono state positivamente confrontate con quelle ottenute con gli strumenti Fluke 173x, di ENEA, dotati di sonde amperometriche a bobina di Rogowski, di semplice impiego in quanto non necessitano di scollegare i conduttori delle singole fasi. Per i dettagli si veda lo specifico report [16]. Il confronto è possibile anche nella configurazione definitiva (Figura 31) che è dotata di apposite prese di test su tutte le linee di alimentazione.

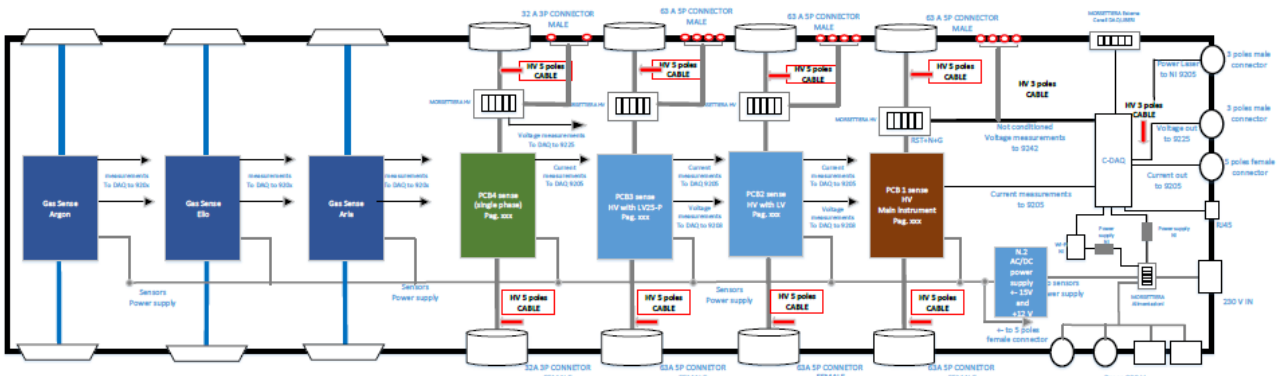
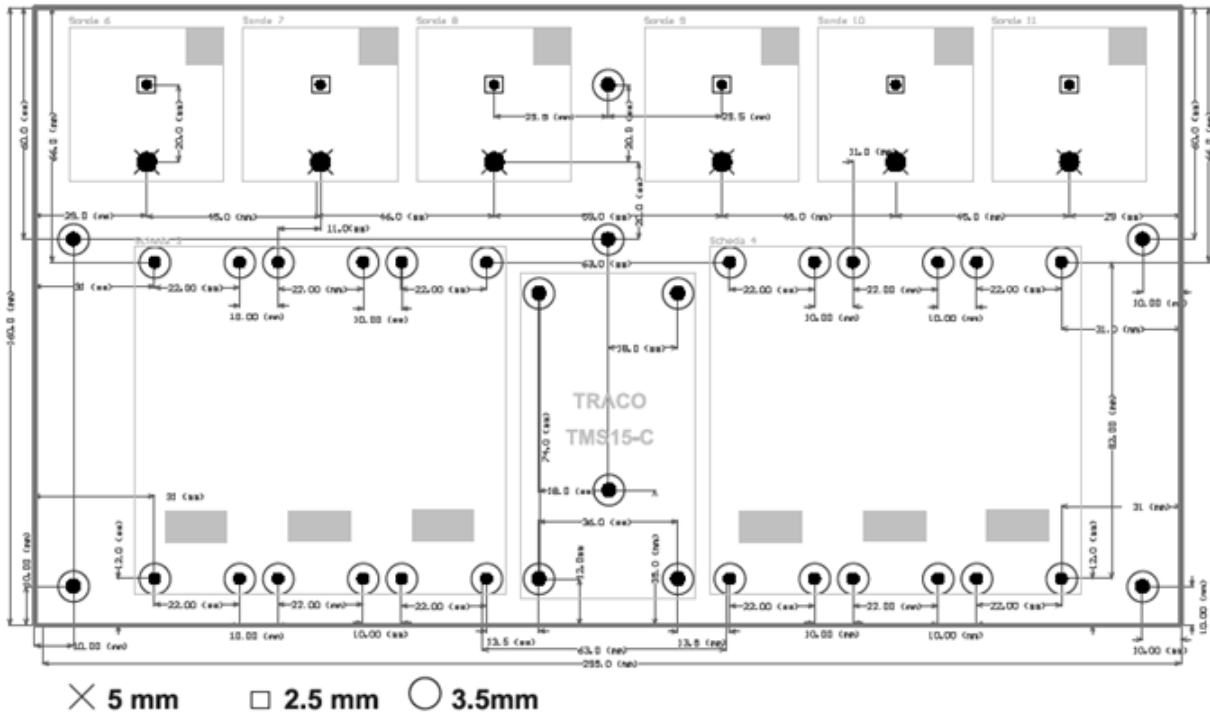


Figura 30: In alto studio (ENEA) di un quadro trasportabile per misure energetiche, in basso scheda prototipo per sensori di corrente e tensione e schema generale del dispositivo.

Per la connessione ai sistemi industriali in campo una serie di cavi ingresso uscita sono stati predisposti:

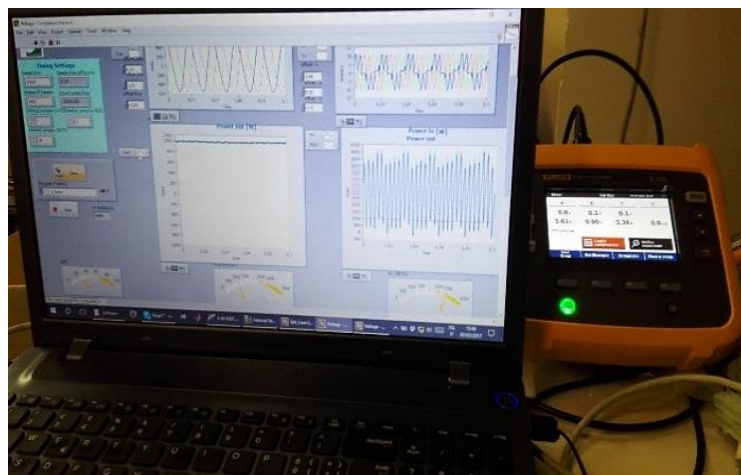
- Per alimentazione quadro
 - N.2 prolunghe 400 V, 63 A, 3 fasi + neutro + terra, con spina 5 poli 63 A, presa 5 poli 63
 - N.2 prolunghe 400 V, 32 A, 3 fasi + neutro + terra, con spina 5 poli 32 A, presa 5 poli 63 A
 - N.2 prolunghe 400 V, 16 A, 3 fasi + neutro + terra, con spina 5 poli 16 A, presa 5 poli 63 A
 - N.1 prolunga 230 V, 32 A, fase + neutro + terra, con spina 3 poli 32 A, presa 3 poli 32 A
 - N.1 prolunga 230 V, 16 A, fase + neutro + terra, con spina 3 poli 16 A, presa 3 poli 32 A
- Per alimentazione macchine a valle del quadro
 - N.2 prolunghe 400 V, 63 A, 3 fasi + terra, con spina 5 poli 63 A, presa 5 poli 63 A
 - N.2 prolunghe 400 V, 32 A, 3 fasi + neutro + terra, con spina 5 poli 63 A, presa 5 poli 32 A
 - N.2 prolunghe 400 V, 16 A, 3 fasi + neutro + terra, con spina 5 poli 63 A, presa 5 poli 16 A
 - N.1 prolunga 230 V, 16 A, fase + neutro + terra, con spina 3 poli 32 A, presa 3 poli 32 A
 - N.1 prolunga 230 V, 16 A, fase + neutro + terra, con spina 3 poli 32 A, presa 3 poli 16 A



Sezione ingresso con prese di test e interfaccia segnali



Sezione di uscita, alle 4 utenze



Confronto con strumento Fluke 173x, su singola utenza

Figura 31: aspetto finale del quadro di misura ed esempio di sessione di validazione incrociata



Figura 32: Cavi di connessione (SX), Sistemi di misura di flusso per Ar, He, Aria/N2 (DX)

6 Draft di test standard per Etichetta energetica di sistemi industriali di saldatura

L'obiettivo finale del lavoro è la definizione di condizioni standard di prova per la valutazione dell'efficienza energetica non solo dei generatori ma del complessivo processo di fabbricazione industriale di saldatura.

Le condizioni di prova standard per la misura dell'efficienza energetica possono prendere come riferimento la norma EN ISO 15614 (diverse parti) per lo sviluppo dei processi di saldatura di varia natura:

EN ISO 15614 -1:2017

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys

La norma si applica ai seguenti processi di saldatura ad arco e a gas, in conformità alla UNI EN ISO 4063:

- saldatura manuale ad arco con elettrodo rivestito (111);
- saldatura con filo elettrodo animato autoprotetto (114);
- saldatura ad arco sommerso (12);
- saldatura ad arco in gas protettivo con filo elettrodo fusibile (13);
- saldatura ad elettrodo infusibile sotto protezione di gas inerte (14);
- saldatura al plasma (15);
- saldatura ossiacetilena (311). (Esclusa);

EN ISO 15614-2:2005

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 2: Arc welding of aluminium and its alloys (ISO 15614-2:2005)

EN ISO 15614-11:2002

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 11: Electron and laser beam welding (ISO 15614-11:2002)

EN ISO 15614-14:2013

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 14: Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys (ISO 15614-14:2013)

Le norme della famiglia ISO 15614 coprono in pratica tutti i materiali e tutti i processi di saldatura per fusione.

Sulla base delle attività sperimentali effettuate nel corso del PAR 2016, per la valutazione dell'efficienza energetica del generatore e del processo verrà utilizzata, per le prove di qualifica energetica, una piastra saldata di testa, con dimensioni conformi alla ISO 15614, di lunghezza non inferiore a 400 mm, su cui è possibile effettuare una qualifica completa anche della procedura di saldatura (Figura 33).

I test per la valutazione del FFE potranno essere effettuati su piastre con relativa WPS da 2-5 mm di spessore, per i processi "single pass" e da 12-15 mm per i processi "multi pass".

Tuttavia, per la qualifica energetica di processi, potrà essere utilizzata una procedura che validi l'efficacia del processo con prove ridotte: esame visivo, esami NDT volumetrici e superficiali con livello di accettazione conforme alle ISO 13919 level C, analisi macrografiche e di indentazione (Figura 34) per la valutazione delle proprietà meccaniche. In tal modo si può rendere rapida e poco onerosa la validazione preliminare di parametri di processo e l'eventuale confronto fra più parametri riservando la qualificazione completa solo per le condizioni di saldatura che garantiscano la migliore efficienza energetica di processo.

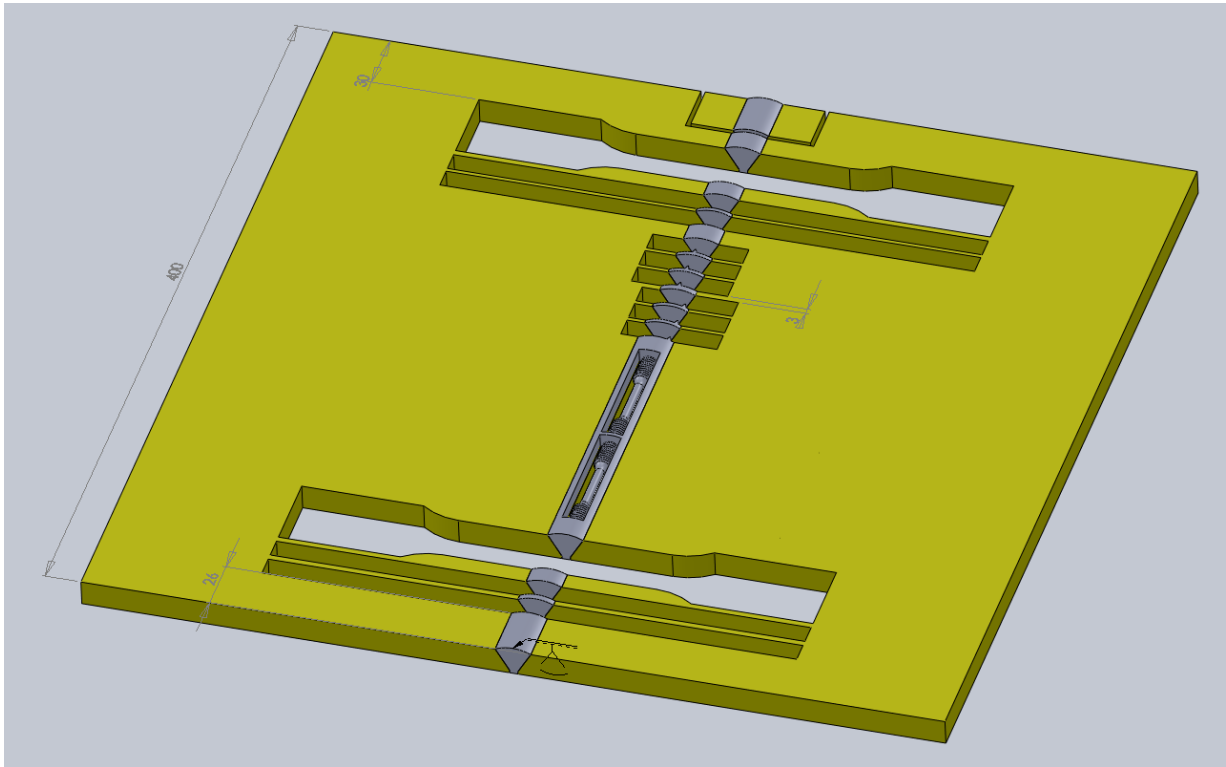


Figura 33: Schema completo per qualifica di procedimento di saldatura secondo Standard ISO 15614.

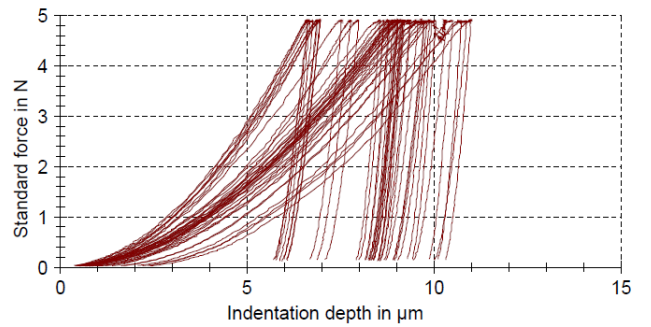
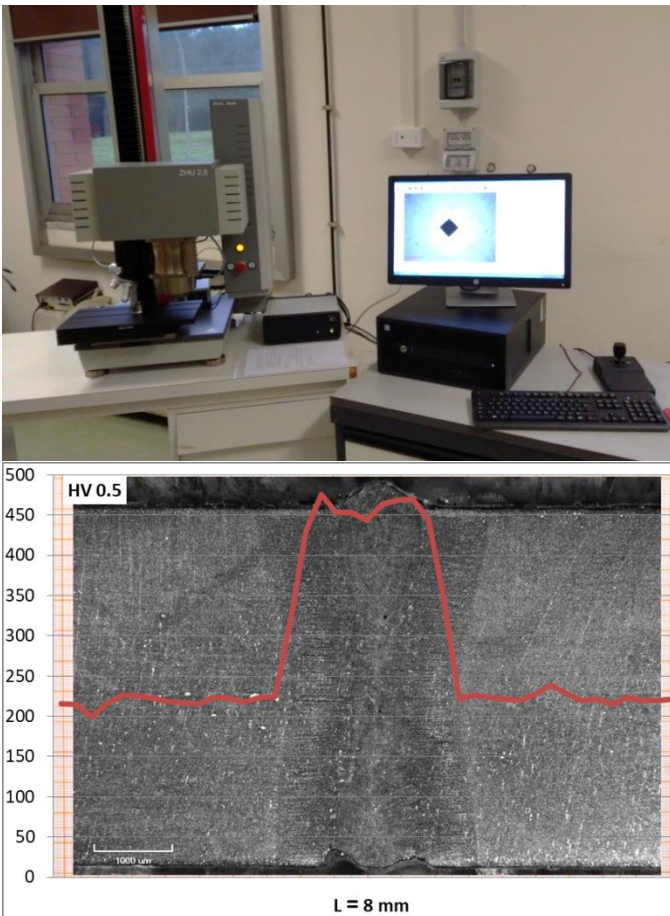


Figura 34: Analisi preliminare microstrutturale e micromeccanica per valutazione efficacia di giunzione.

Per quanto riguarda i generatori la normativa di riferimento per la marcatura di quelli ad arco è la EN 60974, tuttavia non esiste ancora una classe di etichettatura come avviene ad esempio nel caso dei motori elettrici.

Ciò è dovuto al fatto che i vari generatori di saldatura hanno caratteristiche differenti in funzione del processo.

L’obiettivo è arrivare ad avere un’etichettatura (parallela a quella obbligatoria) simile a quella degli elettrodomestici consumer.

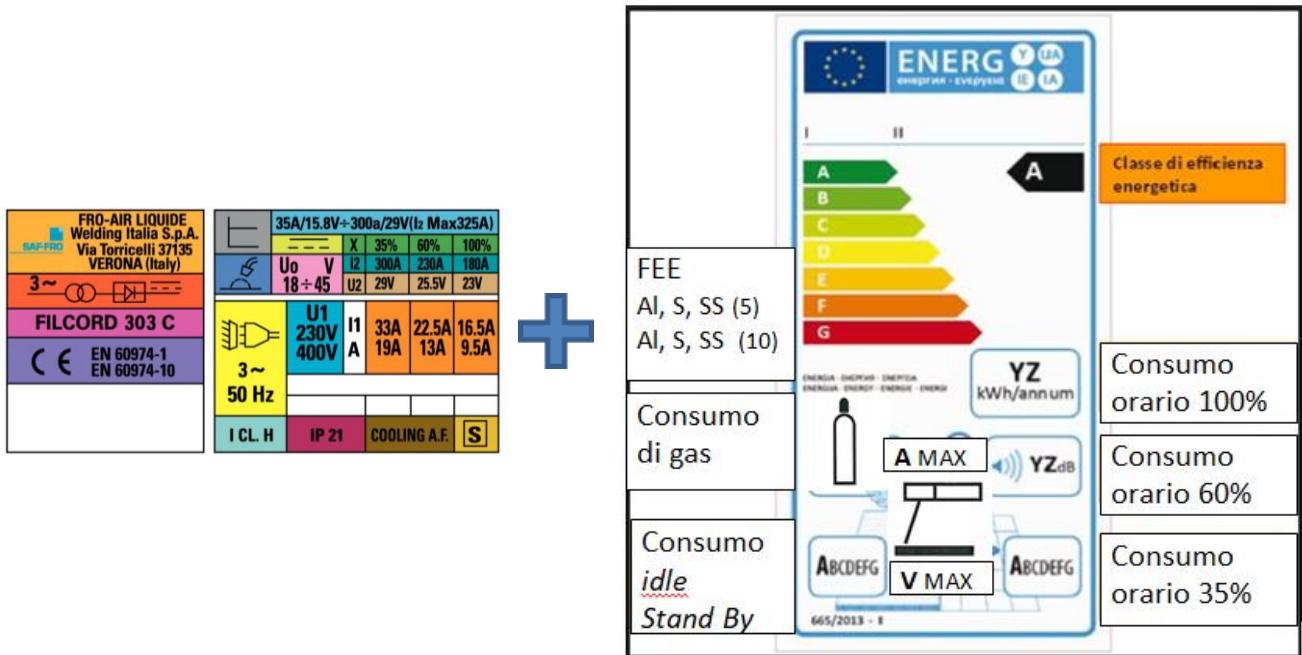


Figura 35: Etichettatura apparecchiature di saldatura ad arco obbligatoria e proposta di etichettatura efficienza energetica per generatori








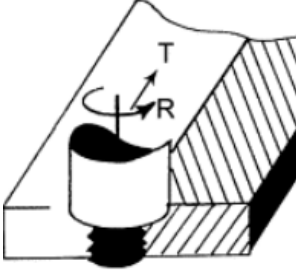
Si propone di inserire al centro il simbolo della specifica tecnica di saldatura (come da iconografie previste dalla IEC 60974) a cui aggiungere delle iconografie specifiche per i processi Laser e FSW (Tabella 13)

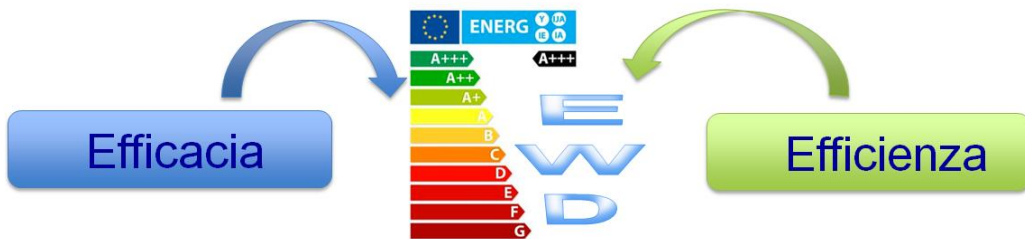
Nell’etichetta energetica non saranno riportati termini iconografici specifici della tecnologia della macchina (inverter, trasformatore, chopper etc...) che sono sempre richiesti nell’etichettatura obbligatoria, ma saranno inseriti dati relativi all’efficienza energetica di trasformazione dell’energia a differenti livelli per una comparazione immediata fra differenti modelli aventi Amperaggio e voltaggio simili.

Allo stesso tempo un’etichettatura comparativa fra tecnologie differenti riporterà il consumo di energia ed il FEE per giunzioni tipo di leghe di Al, Acciaio da costruzione (S) ed acciai inossidabile (SS), su spessori tipo 5 e 10 mm.

L’acquisizione di dati nell’ambito della terza annualità su differenti tipi di impianti industriali permetterà di definire i livelli di FEE per una correlazione alla classe energetica di processo da A a G, definendo un’etichetta di “EcoWelDesign” per prodotti e processi di saldatura.

Tabella 13: Sistema iconografico per indicare il tipo di processo nell'etichetta energetica

 <p>SMAW/MMA</p>	 <p>GAS</p>
 <p>GTAW/TIG</p>	 <p>PAW</p>
 <p>SAW</p>	 <p>GMAW/MIG-MAG</p>
 <p>LASER</p>	 <p>FSW</p>



7 Conclusioni

Nel secondo anno (PAR 2016) le attività hanno riguardato la calibrazione e l'upgrading dei sistemi di prova. In particolare, i prodotti hardware di maggior rilievo nel corso del PAR 2016 sono stati:

- Sistema trasportabile integrato per monitoraggio dei consumi energetici alla presa di generatori ed ausiliari e dei consumi energetici secondari (gas di processo) ed integrazione della diagnostica termografica dei generatori;
- Implementazione del sistema di compensazione del *focus shifting* per il sistema di saldatura laser.

Sono stati effettuati test con i sistemi master di misura di tensione e corrente in parallelo al sistema sviluppato con scheda National Instruments e programma di acquisizione specifico per la valutazione dell'efficienza energetica dei generatori comprensivi di sistemi ausiliari. I test hanno dimostrato che il sistema con le relative sonde fornisce misure analoghe ai sistemi master certificati.

Il sistema di misure portatili è stato quindi ingegnerizzato per un utilizzo plug & play. In particolare, è stato progettato un sistema integrato di misura trasportabile che integra la scheda di acquisizione su 4 linee di misurazione elettrica, ma che integra anche i flussimetri per i consumi di Aria e gas di assistenza (argon ed elio) ed acquisisce e registra il segnale del calorimetro per la misura della potenza laser. Inoltre sono stati acquisiti i moduli di trasmissione WiFi in modo che il sistema trasportabile possa essere impiegato nel terzo anno per verifiche su impianti industriali a distanza.

Sono state effettuate misure di efficienza energetica sulla sorgente laser potenziata nel corso del primo anno che hanno evidenziato le problematiche relative alle perdite ottiche sui sistemi di focalizzazione e al conseguente fenomeno del focus shifting testando sistemi di diagnostica del fascio innovativi.

La riduzione del focus shifting può essere conseguita da un lato utilizzando ottiche di diametro maggiore in modo che esse siano meno soggette a deformazioni indotte dall'aumento di calore localizzato;

Mantenendo un costante monitoraggio della pulizia del percorso ottico sia monitorando il segnale di back reflection sia con sistemi di controllo della temperatura in corrispondenza di ottiche critiche.

Considerato che comunque non è possibile un'eliminazione completa del fenomeno, sistemi di compensazione e verifiche ad intervalli prestabiliti della qualità del fascio e della potenza erogata a valle del sistema di focalizzazione sono validi strumenti per il mantenimento dell'efficienza e dell'efficacia di saldatura.

Le misure di efficienza Energetica sulla sorgente Laser hanno mostrato che seppure il rendimento elettrico della sorgente corrisponde ai dati di targa dichiarati dal costruttore, il rendimento reale dell'impianto è fortemente influenzato dal livello di potenza utilizzato nel processo a causa dell'assorbimento di base del sistema di raffreddamento dell'apparato (Chiller).

I contatti con aziende e centri di ricerca per individuare sistemi sui quali applicare il protocollo definito per la valutazione del Fattore di Efficienza Energetica dei Processi sono stati avviati già a partire dalla seconda annualità, grazie alla partecipazione al principale Convegno Nazionale sulle tecnologie di saldatura che si è tenuto nel mese di maggio a Genova dove è stato presentato il progetto di ECOWELDLABELING sia nella sessione inerente "Tecnologia della saldatura e dei processi di giunzione" rivolto alle industrie manifatturiere del settore saldatura, sia presso le aziende produttrici di apparecchiature di saldatura presenti nell'area commerciale.

Sia i produttori di macchinari per saldatura che gli utilizzatori si sono dimostrati estremamente interessati alla tematica e si sono resi disponibili a partecipare alle campagne di misura per la validazione della metodologia che è prevista appunto nella terza annualità.

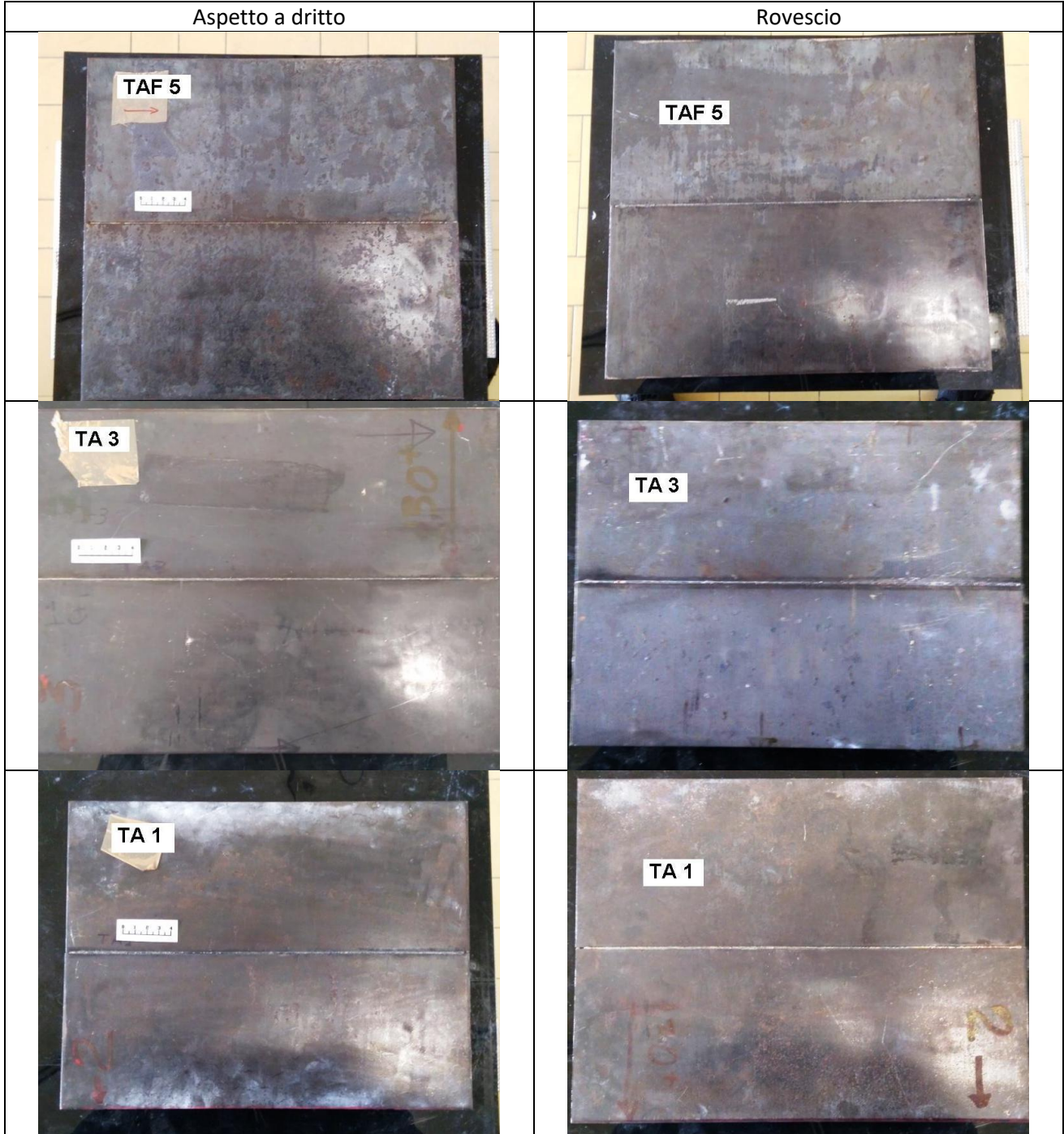
Alcune visite per verificare la fattibilità delle misure "on site" sono state effettuate presso utilizzatori interessati tra cui CRF e Walter Tosto.

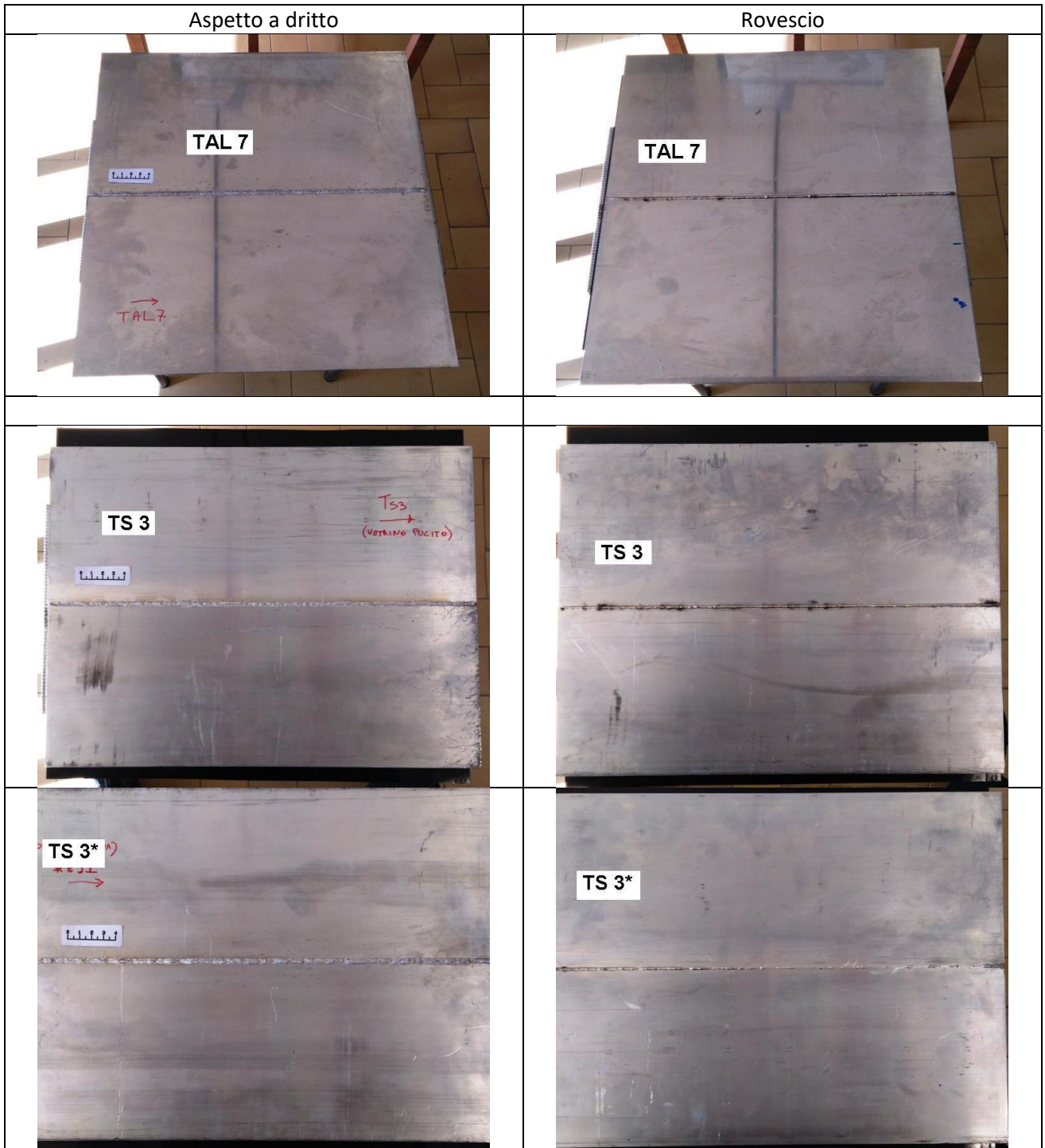
Sulla base del draft standard per l'etichettatura energetica dei generatori e dei processi di saldatura definito nel corso della seconda annualità, saranno quindi individuate aziende produttrici e aziende utilizzatrici di differenti tipologie di processi di saldatura per effettuare test, raccogliere dati per validare la metodologia di rilascio del marchio ECOWELDING di prodotto e di processo.

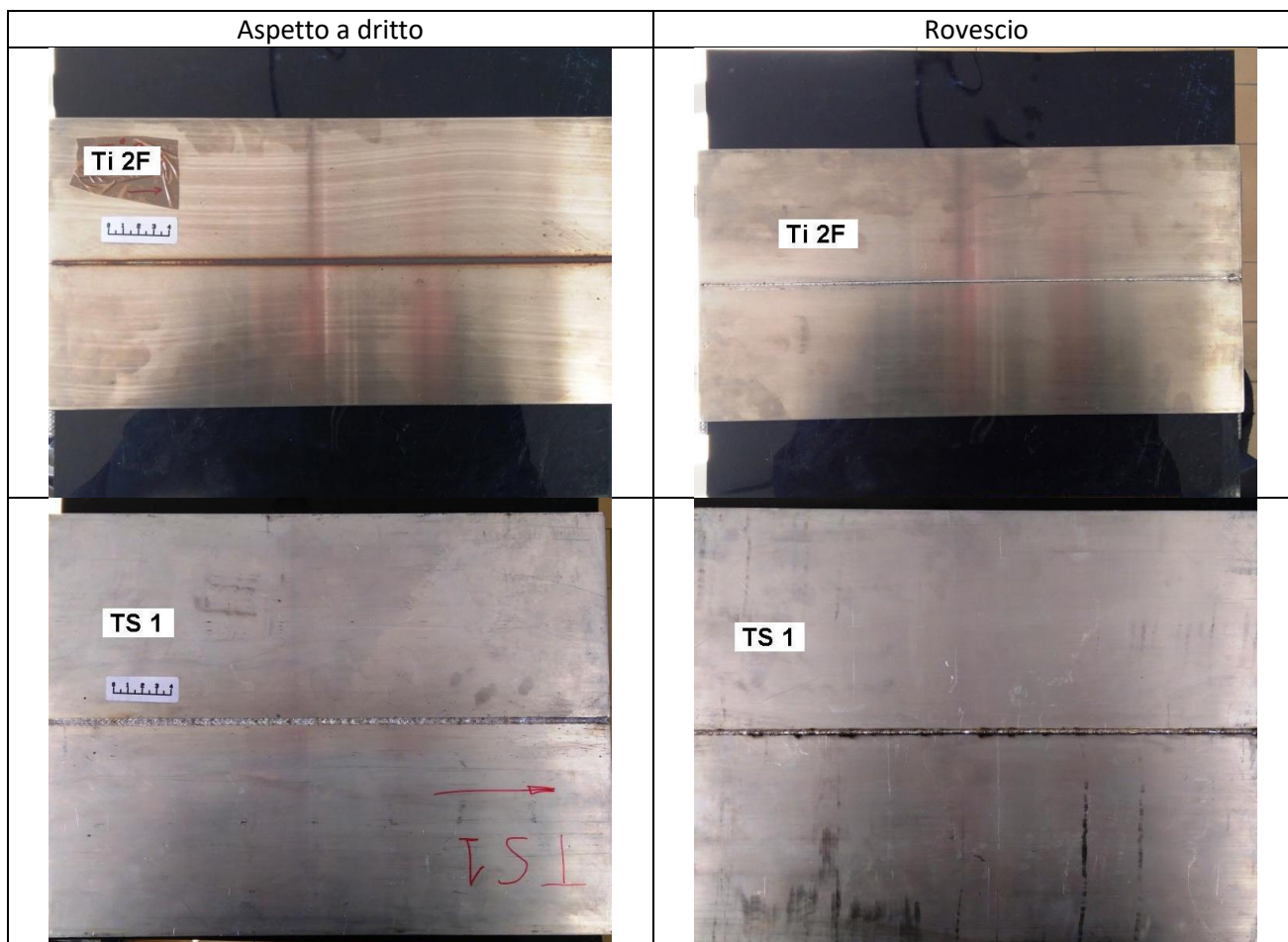
Appendice A:

8 Foto campioni saldati al laser

Tutte le saldature si sviluppano per 400 mm.







Appendice B:

9 Controllo Radiografico tramite pannello Digitale

Radiografia digitale: La radiografia digitale permette la visione interna dell'oggetto in modo non invasivo. I raggi X, una radiazione elettromagnetica più energetica della luce visibile, attraversano gli oggetti evidenziando le non uniformità macrostrutturali e i difetti presenti all'interno del volume.

Nella lastra saldata è possibile evidenziare difetti interni come porosità e inclusioni.

Il sistema consta di una sorgente radiografica di tensione 160 kV e corrente 10 mA, di un rivelatore digitale della radiazione e un manipolatore porta campione, il tutto è contenuto in un bunker di protezione fino ad un massimo di 200 kV. Il rivelatore digitale converte la radiazione X, che attraversa il campione, in segnali elettrici. In tempo reale essi vengono inviati al computer per visualizzare l'immagine radiografica in toni di grigio.

Le gradazioni di grigio rappresentano l'assorbimento dei raggi proporzionale alla densità del campione attraversato. In nero gli oggetti più densi, inclusioni, in bianco le porosità.

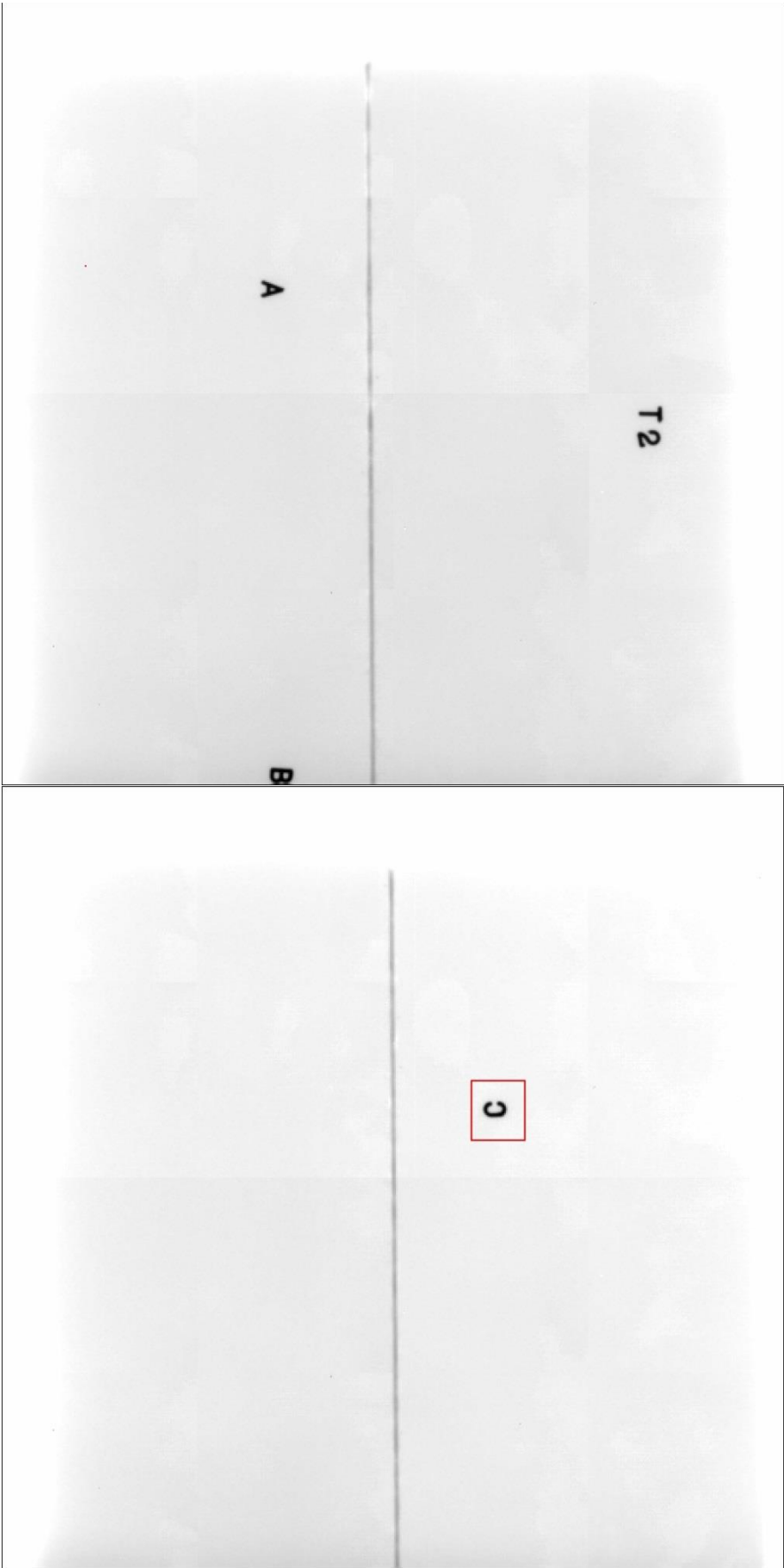
La paletta dei toni di grigio dell'immagine radiografica è stata espansa tra il minimo e il massimo valore del pixel all'interno del rettangolo rosso.

9.1 Apparecchiatura ISOVOLT Titan E Series

La macchina a raggi X 160 o 225 kV serie ISOVOLT Titan E utilizzata, offre miglioramenti significativi in termini di facilità di funzionamento, controllabilità e di logica di bordo per consentire una maggiore produttività e affidabilità operativa. La macchina trova crescente applicazione nel soddisfare i requisiti di integrazione automatica per soluzioni CT dove la stabilità a lungo termine dei raggi X è necessaria, oltre ad essere utilizzata come macchina stand-alone di raggi X per radiografia a raggi X convenzionale e digitale.

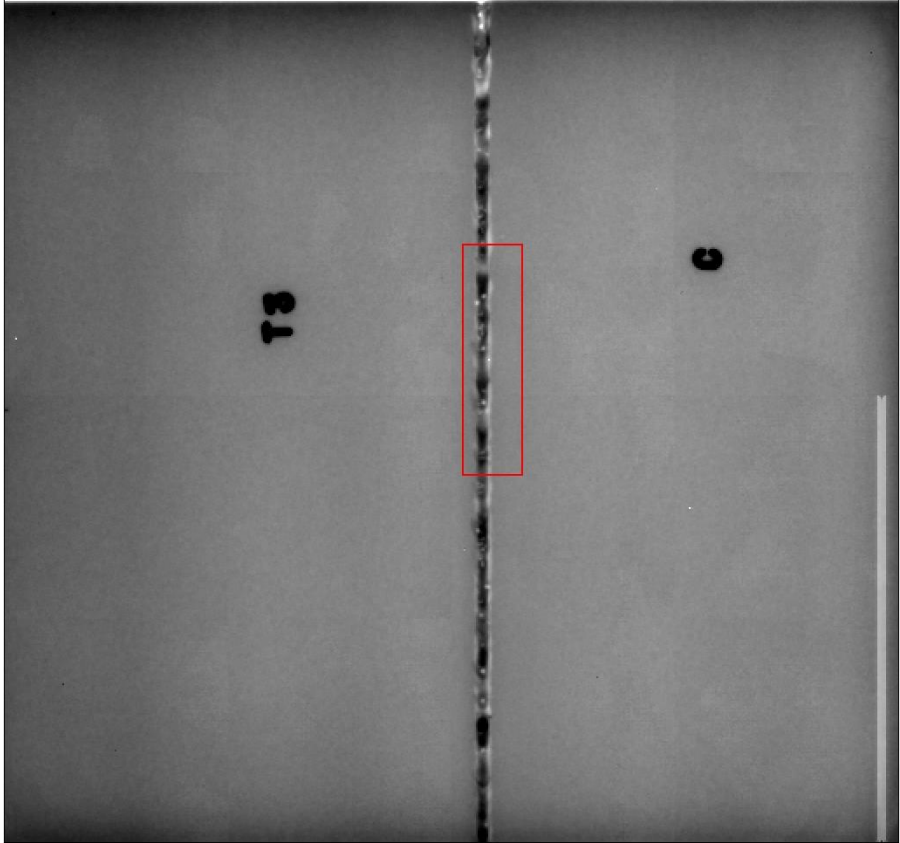
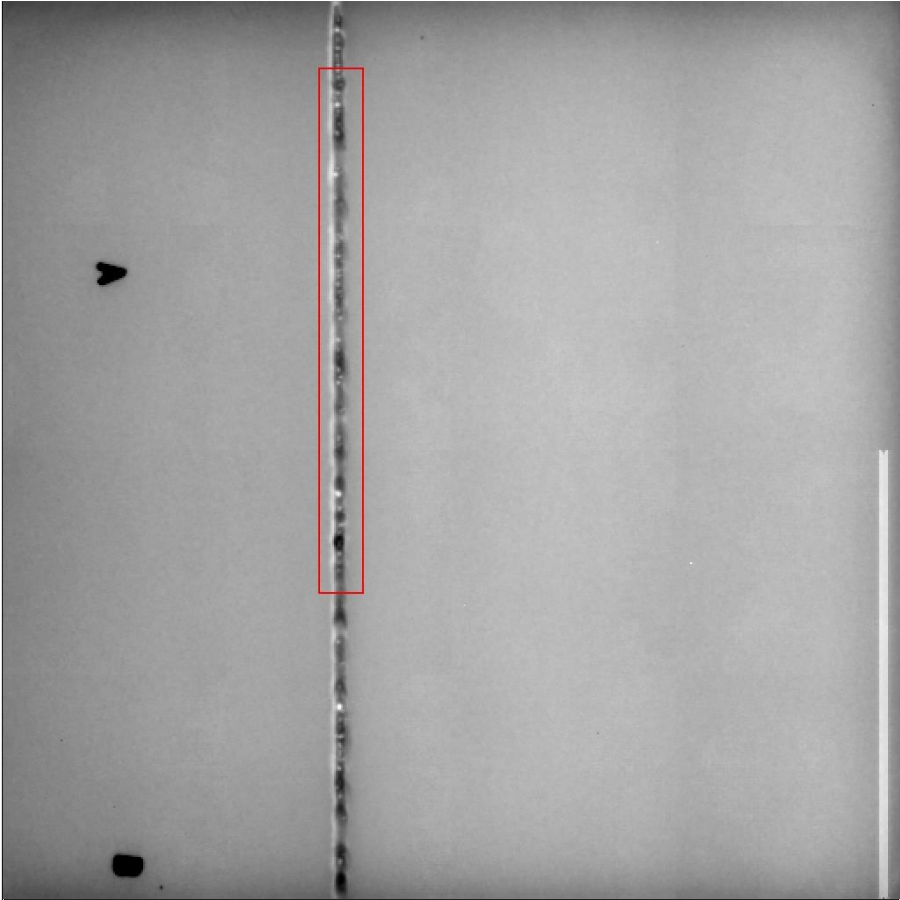
Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Pixel 512 x 512	Modello	PerkinElmer
KV	130	mA	1.1
Campione	TI2	Materiale	Inox
Spessore mm	4	Distanza sorgente cm	95
Media immagine	4344		



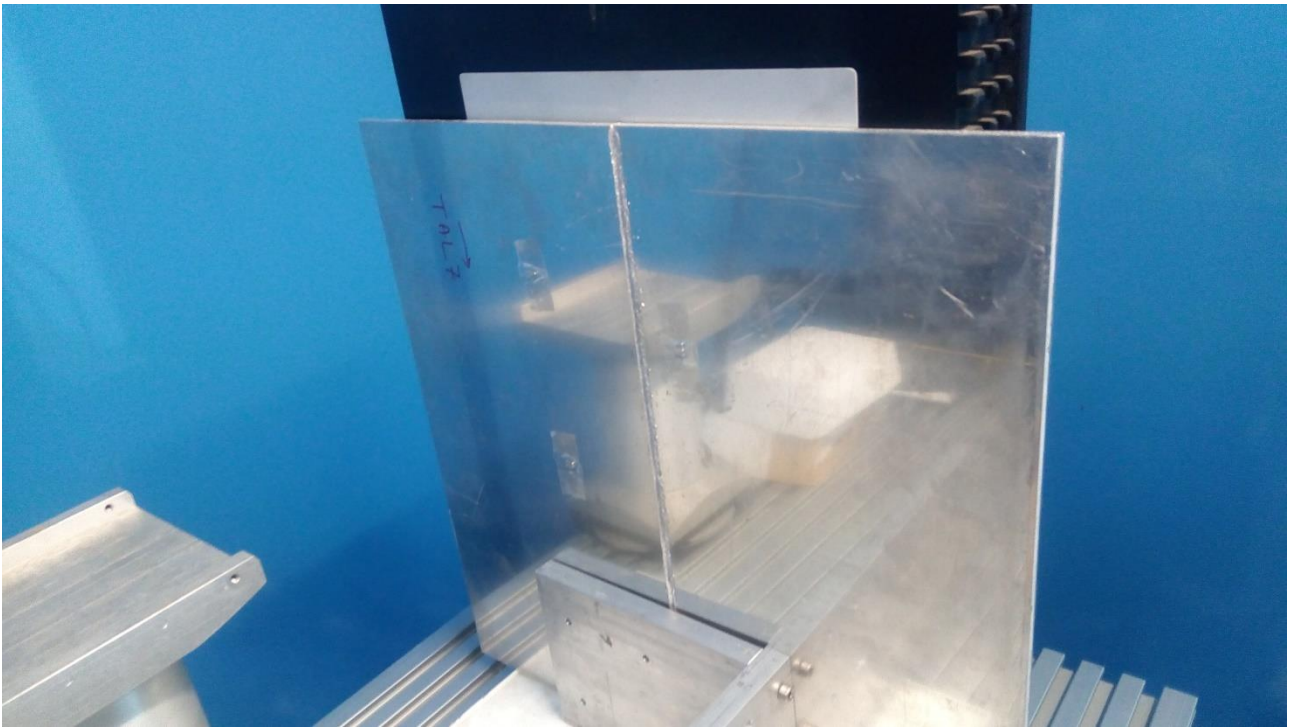


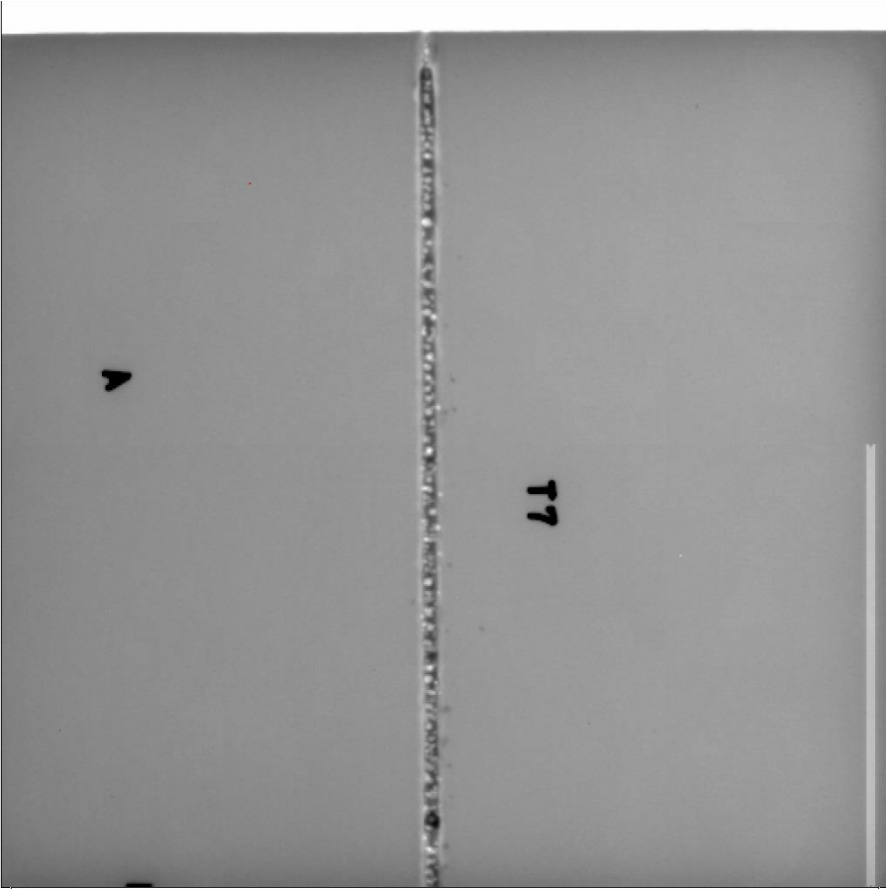
Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Pixel 512 x 512	Modello	PerkinElmer
KV	90	mA	1.1
Campione	TS3	Materiale	6060
Spessore mm	6	Distanza sorgente cm	95
Media immagine	12718		





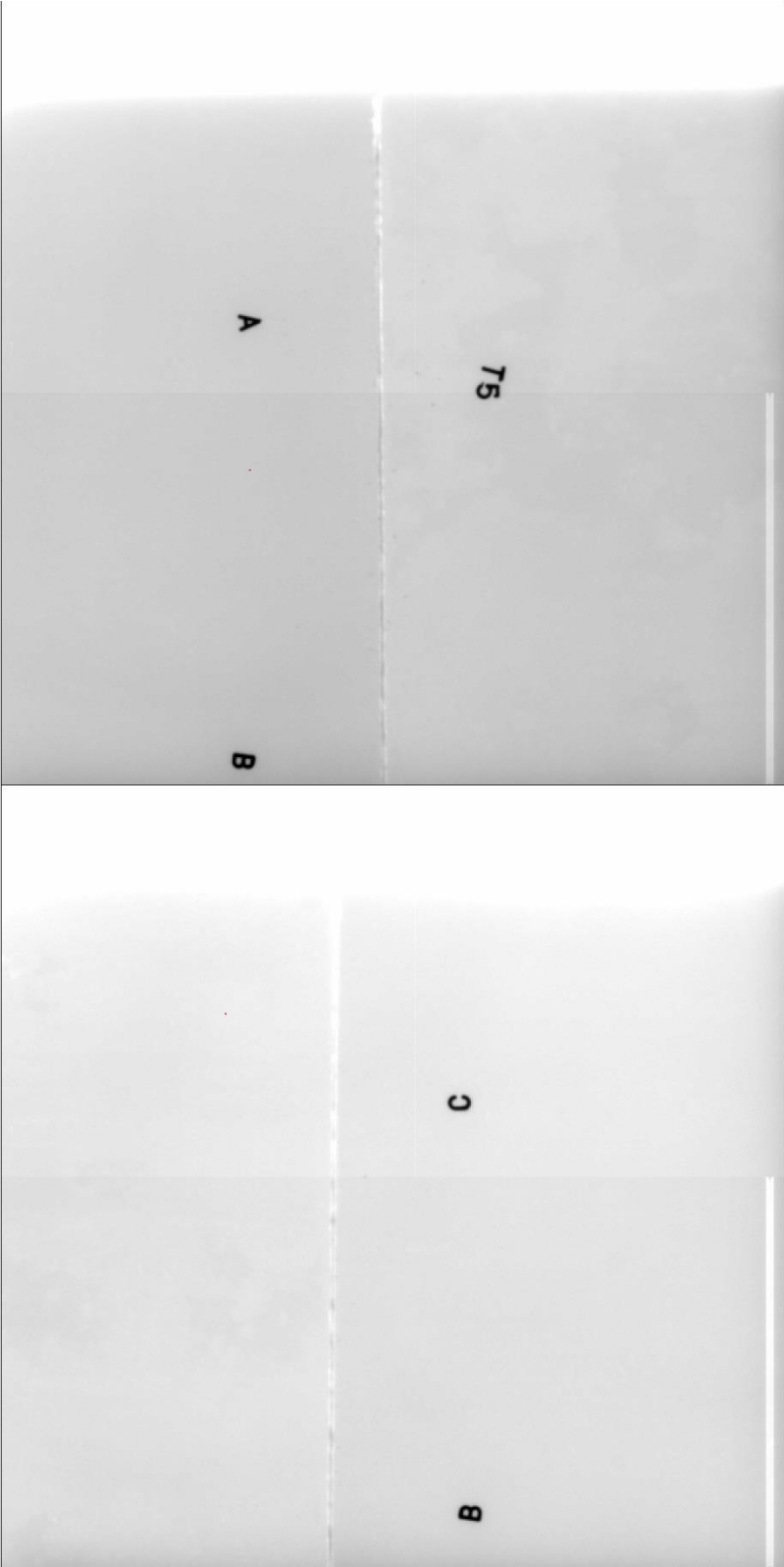
Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Pixel 512 x 512	Modello	PerkinElmer
KV	84	mA	1.1
Campione	TAI7	Materiale	1050
Spessore mm	6	Distanza sorgente cm	95
Media immagine	10274		





Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3.00
Detector	Pixel 512 x 512	Modello	PerkinElmer
KV	150	mA	2
Campione	TA5	Materiale	S460
Spessore mm	5	Distanza sorgente cm	95
Media immagine	10035		





9.1.1 Conclusioni radiografie

Campione	Accettabile
TI2	Si
TS3	No (porosità)
TAL7	No (porosità)
TA5	Si

Appendice C:

10 Analisi mediante microscopia ottica ed elettronica

Dopo le analisi radiografiche, per ricavare le grandezze di interesse in termine di dimensione della zona fusa (ZF) e zona termicamente alterata (ZTA) e per valutare il rispetto dei requisiti di qualità delle norme di riferimento ISO 13919-1 e 2 level C, i campioni sono stati sottoposti ad analisi macrografica al microscopio ottico e ad analisi metallurgica mediante SEM.

Per l'osservazione, dalle piastre saldate sono stati ricavati campioni per la preparativa metallografica sezionando la porzione centrale di circa 30 mm di larghezza parallela al cordone di saldatura mediante trancia/sega. Dalla striscia ricavata, recante al centro il cordone saldato, sono state prelevate alcune sezioni mediante taglio (trasversalmente al cordone di saldatura) con dischi al carburo di silicio su troncatrice veloce lubrificata.

La preparazione, di tipo metallografico, prevede l'inglobamento del campione a caldo in materiale termoplastico acrilico, trasparente e non conduttivo. Ai fini di un corretto inglobamento (posizione del campione etc.) vengono utilizzati dei supporti, clip, di acciaio o materiale plastico e delle forme che possono essere di diversi materiali. Successivamente i campioni, con l'ausilio di lappatrici specifiche, vengono rettificati mediante delle carte abrasive a base di carburo di silicio di granulometria decrescente. Il campione viene quindi lucidato utilizzando dei panni sui quali sono applicate delle sospensioni diamantate, con dimensioni dell'abrasivo fino a 0.25 μm . In alcuni casi sono stati utilizzati dischi diamantati che permettono di arrivare rapidamente a un livello di finitura superficiale elevato. Il sistema a dischi magnetici, acquisito in questo PAR, permette di velocizzare la procedura di preparazione dei campioni permettendo una rapida sostituzione di carte e panni senza rischio di contaminazione dei panni di lucidatura nel caso in cui debbano trattarsi materiali diversi (come nel caso presente in cui sono stati preparati 3 differenti materiali: leghe di alluminio AA1050, AA6060, acciaio al carbonio manganese S460 NL e acciaio inossidabile AISi 316). Dopo aver lucidato i campioni si utilizzano sospensioni di silice colloidale per la finitura finale.

Al termine della lucidatura i campioni sono stati sottoposti ad attacco metallografico in apposite soluzioni chimiche differenti in funzione del materiale e osservati al microscopio ottico con l'obiettivo di misurare l'area fusa e la dimensione della ZTA.

Per le osservazioni al microscopio elettronico SEM (Scanning Electronic Microscope), dopo aver lavato in alcool isopropilico e asciugato il campione questo viene posizionato su un portacampioni di alluminio (stub) mediante un biadesivo conduttivo (carbon tape). Il campione, così supportato, dopo aver messo in contatto la superficie da osservare con lo stub per evitare fenomeni di distorsione dell'immagine dovuti all'accumulo di cariche elettriche del fascio primario, può essere osservato al SEM. Il contatto con lo stub è stato ottenuto mediante argento colloidale.

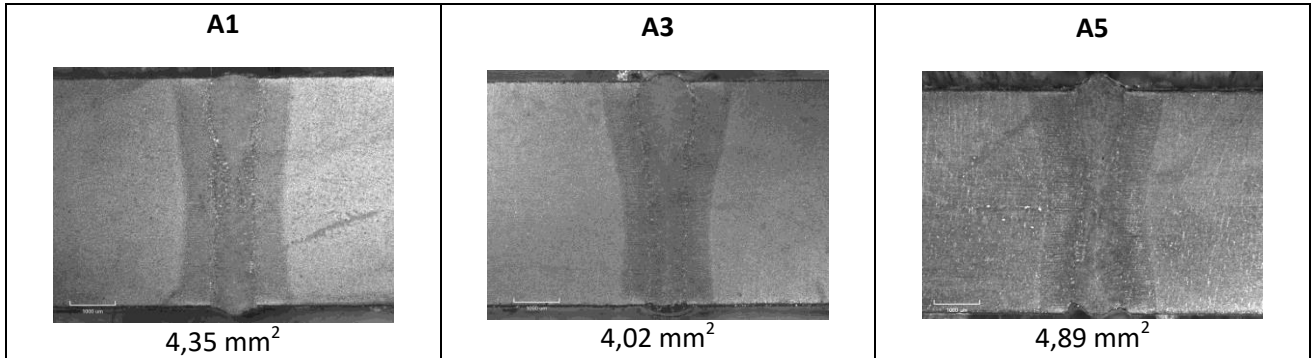
Tutti questi passaggi hanno richiesto l'utilizzo di materiale di consumo acquisito presso le aziende Nikon Instrument e Assing che sono rispettivamente rivenditori ufficiali dei prodotti Buehler e AGAR.

Di seguito sono riportate le osservazioni effettuate:

10.1 Sezioni macrografiche al microscopio ottico

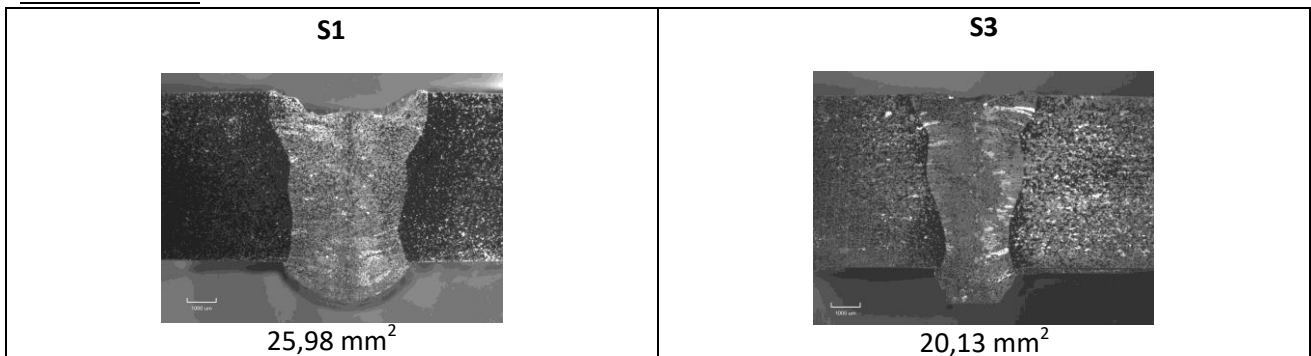
Sotto ogni immagine è riportata l'area della sezione trasversale del cordone di saldatura con l'indicazione dell'area fusa.

Acciaio S460 NL



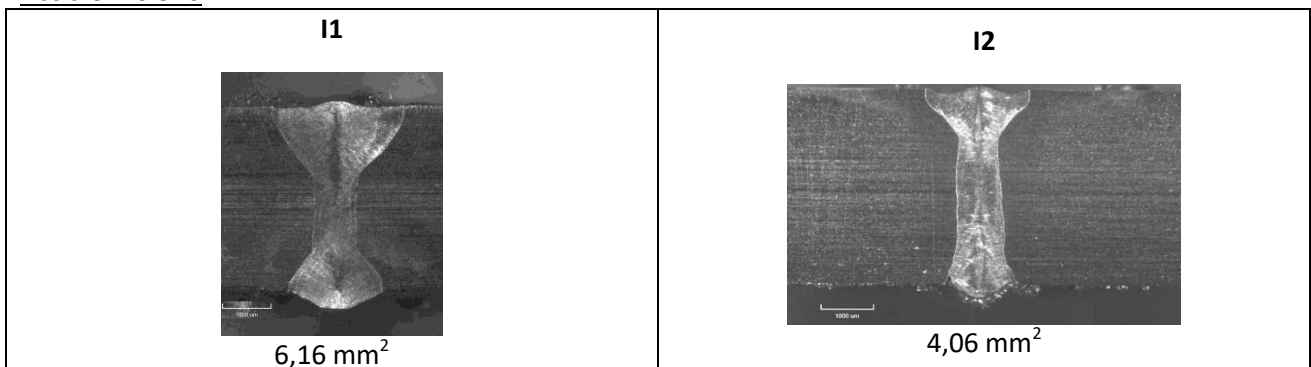
attacco: Nital 2%

Alluminio 6060



attacco: Keller

Acciaio AISI316

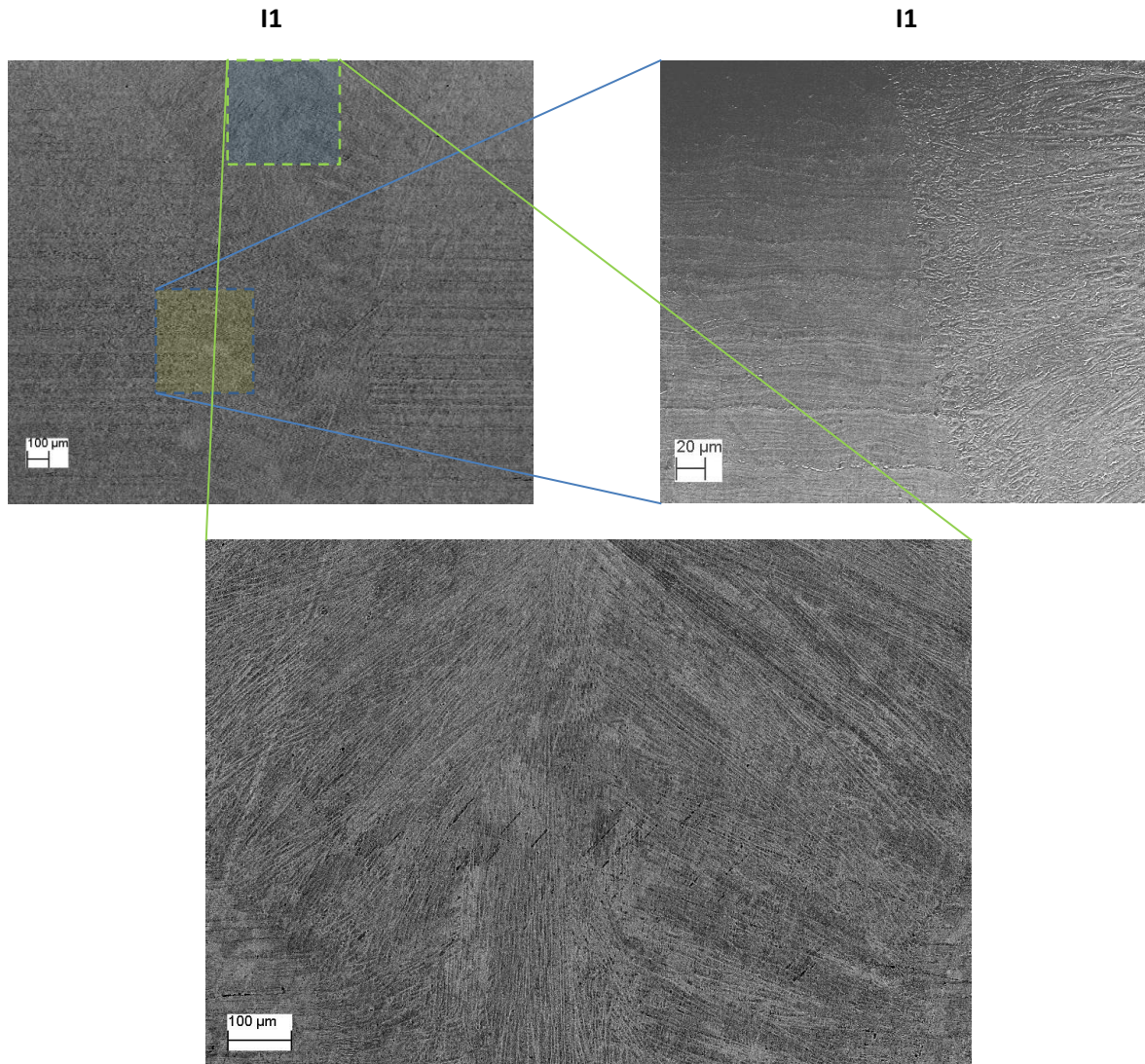


attacco: Vilella

10.2 Caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione dei giunti saldati

Nel seguito vengono riportate le immagini ottenute mediante microscopia elettronica a scansione di alcuni campioni.

Acciaio AISI316



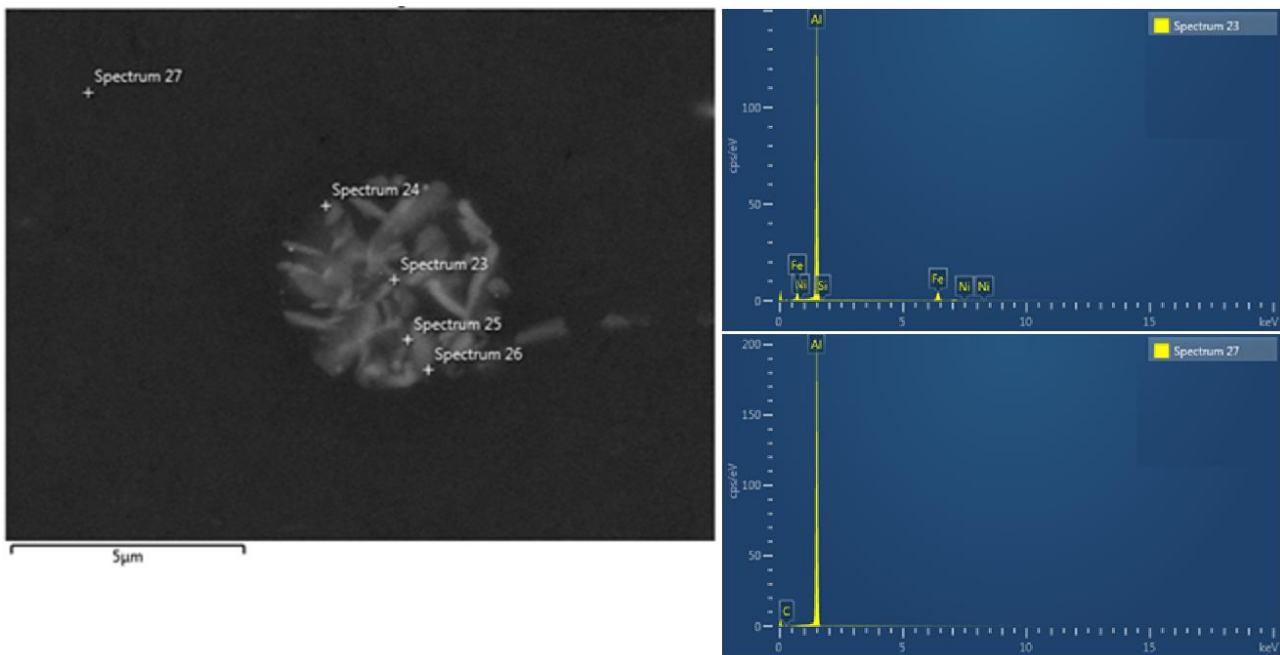
L'acciaio Inossidabile AISI 316L mostra una ZTA di dimensione estremamente limitata, da mettere in relazione con la minore conducibilità termica rispetto agli altri materiali analizzati. Questo, insieme al migliore accoppiamento laser materia, dà luogo a una maggior efficienza di processo.

10.2.1 Analisi EDS

Sui campioni preparati sono state effettuate alcune misure di analisi elementare, mediante Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) in SEM. Queste analisi permettono di confermare la composizione chimica dei campioni in esame e di studiare eventuali anomalie del processo.

Alluminio 1050

AL7

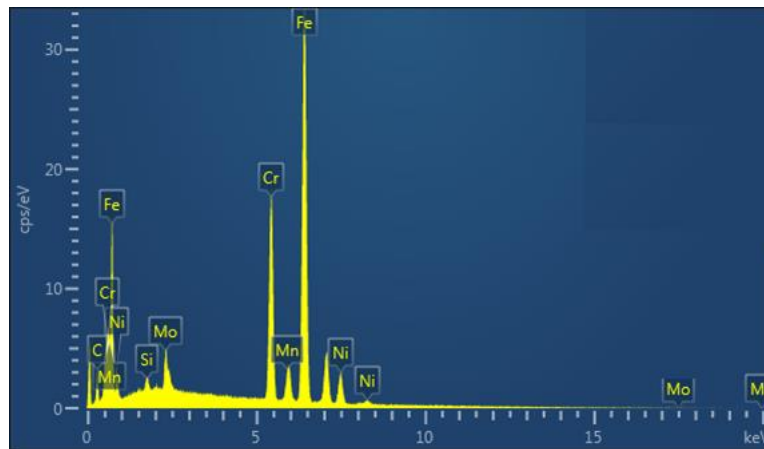


L'immagine sopra riportata mostra uno studio effettuato sul campione AL7 che ha evidenziato un livello di porosità anomalo: tale materiale infatti, essendo alluminio commercialmente puro, non avrebbe dovuto portare le problematiche evidenziate dalle analisi radiografiche e delle sezioni macrografiche.

Le analisi SEM EDS hanno confermato la composizione dichiarata nel certificato di fornitura e le impurità osservate contengono essenzialmente Fe. La causa delle porosità è quindi da ricercare in una non ottimale messa a punto dei parametri e alla suscettibilità che le leghe di alluminio hanno alla formazione delle porosità per instabilità del keyhole.

AISI 316

I1



Lo Spettro EDS del campione I1, AISI 316 conferma la presenza dei principali elementi di lega previsti dal certificato di fornitura (C% \leq 0,07, Mn% \leq 2, P% \leq 0,045, S% \leq 0,015, Si% \leq 1, Cr% 16.5-18.5, Ni% 10-13, Mo % 2-2.5, N% \leq 0,11).

Appendice D:

11 Metodi innovativi di caratterizzazione dei fasci laser

Alcuni metodi consolidati di diagnostica di fasci laser (Figura 36) si basano sul campionamento dell'energia incidente su sezioni trasversali degli stessi mediante:

- Scansione con *pinhole*: la sonda, recante una piccola apertura circolare, transita trasversalmente al fascio, più o meno focalizzato. L'energia che entra nel foro è convogliata su un sensore di opportuna sensibilità la cui lettura è correlata alla posizione istantanea del pinhole per ricostruire l'andamento spaziale dell'intensità. Gli strumenti operano generalmente senza necessità di attenuazione del fascio incidente anche se possono esserci dei limiti operativi.
- *knife edge*: una o più lame (con diversa inclinazione) oscurano una porzione variabile da 0% al 100% del fascio diretto al sensore. A seconda del numero e della disposizione delle lame, mediante elaborazione con tecniche di tomografia, è possibile ricostruire più o meno fedelmente la distribuzione trasversale di intensità. Può essere necessaria un'attenuazione del fascio per non danneggiare la lama e il sensore.
- Scansione con elementi riflettenti (*laser beam analyser*): è una tecnica non molto diffusa a livello industriale che prevede di far ruotare, nel piano perpendicolare al fascio, un cilindro sottile (in molibdeno). La radiazione riflessa diagonalmente è letta da due sensori. La geometria è tale da fornire due scansioni simultanee del fascio. Diversamente dalle prime due tecniche, permette il monitoraggio del fascio non focalizzato contemporaneamente alla lavorazione, perché accetta diametri più ampi e assorbe una percentuale minima dell'energia in ingresso.

I sistemi sopra indicati hanno in comune il fatto che l'elemento sensibile (sensore) è investito direttamente dalla radiazione laser, eventualmente riflessa e/o attenuata.

Recentemente, per i laser con $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, sono stati sviluppati e messi in commercio strumenti basati sullo scattering di Rayleigh: la misura è effettuata riprendendo con una normale telecamera, di lato, la radiazione diffusa nell'interazione del fascio laser con le molecole di ossigeno e azoto presenti nell'aria.

Per la misura è necessario che l'intensità superi la soglia dei 2 MW/cm^2 ma non esistono limiti superiori, al contrario (ad esempio) dei sistemi *pinhole* che non possono operare a intensità superiori a 10 MW/cm^2 circa.

La misura ha una minore risoluzione nella sezione trasversale ma, per contro, è possibile acquisire e monitorare nel tempo tutta la caustica di focalizzazione. Nelle applicazioni industriali ciò è particolarmente utile per verificare le prestazioni del sistema di focalizzazione, ad alta potenza, mettendo in atto una strategia di manutenzione preventiva che consenta di prevenire la perdita di qualità delle ottiche e quindi della saldatura, a causa ad esempio, dell'accumulo di materiale vario (polvere ecc.) su lenti e vetri.

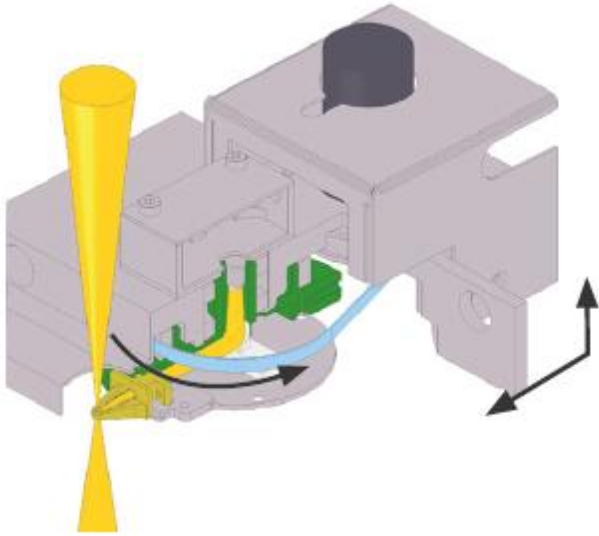
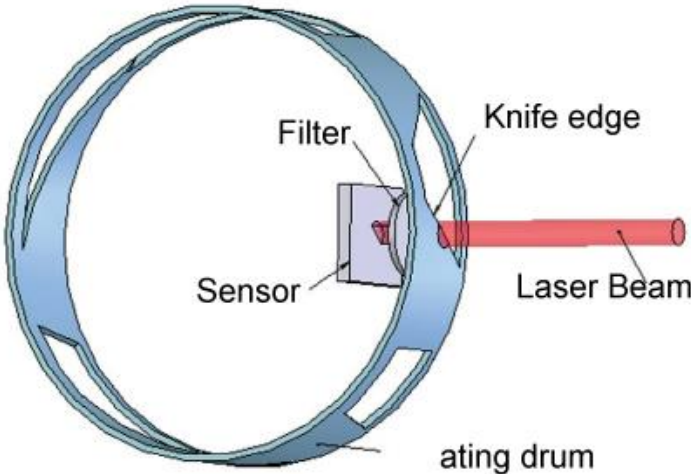
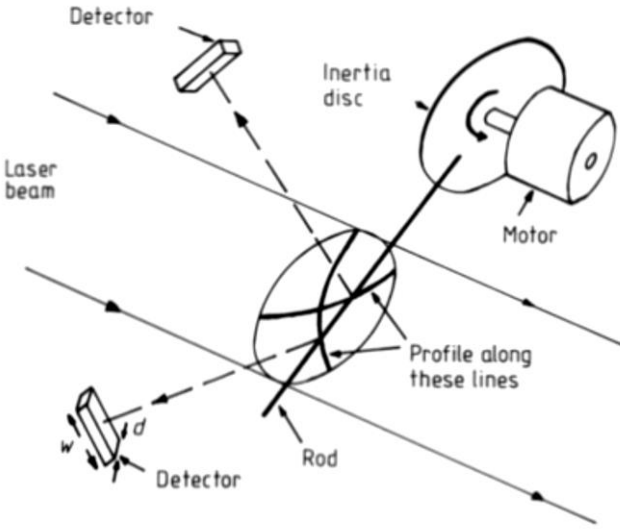
	<p>Scansione con sonda pinhole (PRIMES GmbH)</p>
 <p>Filter Knife edge Sensor Laser Beam Rotating drum</p>	<p>Tomografia knife edge (Duma Optronics Ltd)</p>
 <p>Detector Inertia disc Motor Laser beam Profile along these lines Rod Detector</p>	<p>Laser beam analyser [17]</p>

Figura 36: schema del funzionamento di alcuni strumenti per la caratterizzazione di fasci laser

Il sistema di misura Ophir-Spiricon BeamWatch (messo a disposizione da Ophir-Spiricon Europe GmbH) è stato provato con la sorgente IPG 4000 nella configurazione descritta nei paragrafi precedenti.

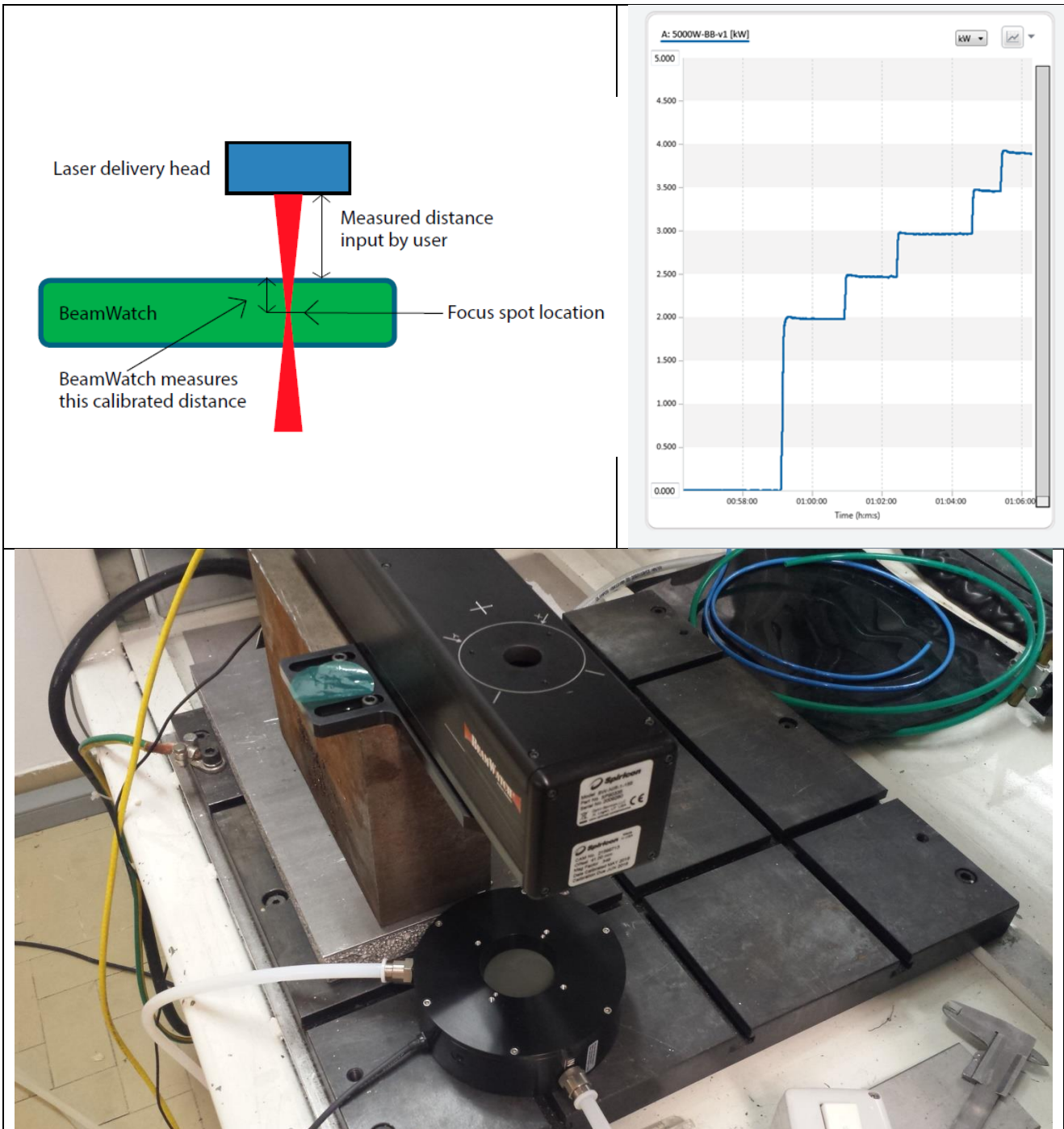


Figura 37: setup di misura. In alto sin. schema, a destra andamento potenza nella prova, in basso collocazione dello strumento nella macchina di saldatura. E' visibile il misuratore di potenza laser (termopila) raffreddato ad acqua che fa anche da assorbitore del fascio.

Il volume di misura deve essere flussato con aria filtrata per allontanare il pulviscolo che, specialmente in ambienti di lavoro industriale può essere presente in abbondanza e peggiorare la qualità della misura. Sono stati effettuati più rilievi, successivi, con diversi livelli di potenza del fascio focalizzato con lente $f=250$ mm: diametro minimo teorico $250 \mu\text{m}$, divergenza 50 mrad circa.

A titolo di esempio si consideri la prova eseguita con potenza variabile tra 2 e 4 kW: nella Figura 37 è visibile l'andamento della potenza registrato dal sensore a termopila. La potenza non subisce alcuna diminuzione nel passaggio attraverso lo strumento (se non appunto la perdita per scattering su cui si basa la misura stessa). Una schermata dell'interfaccia utente dello strumento è riportata nella Figura 38. I dati sono stati salvati durante l'esecuzione della prova e sono quindi disponibili per le successive analisi.

Si evidenziano, da destra:

- L'immagine laterale del fascio realizzata assegnando colori diversi, dal blu al bianco, a seconda dell'intensità della radiazione diffusa letta dalla camera; si nota una certa rumorosità dell'immagine dovuta alla presenza di pulviscolo nell'aria. Il fascio è inoltre leggermente inclinato. E' visibile in giallo il fascio ricostruito secondo il profilo teorico (fit con iperbole). La posizione effettiva della cintola (derivante dal fit) è indicata dalla freccia di colore verde.
- Il profilo di intensità nella sezione contrassegnata dalla linea tratteggiata (qui coincidente con la posizione presunta della cintola del fascio, contrassegnata dalla freccia rossa);
- Diverse statistiche scelte tra cui: diametro minimo 292 μm ca., divergenza 43 mrad, qualità del fascio $M^2=9,19$, focus shift -0,97 mm (il segno meno indica che la cintola del fascio reale si trova prima della posizione presunta rispetto alla direzione di propagazione)

I valori sono in linea con quanto atteso e verificato con la strumentazione PRIMES FM del laboratorio.

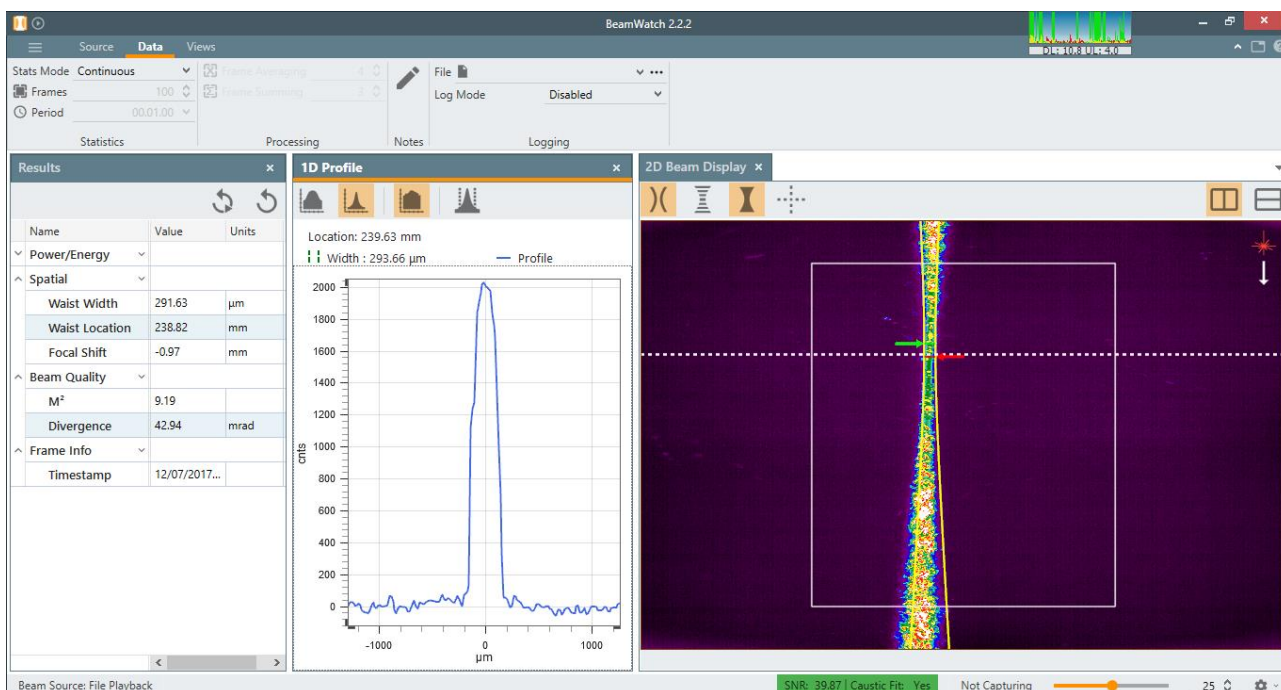


Figura 38: schermata dell'interfaccia di misura con i dati relativi a uno dei frame acquisiti durante la rampa di potenza



Figura 39: grafico di statistiche scelte del fascio

Si possono ottenere grafici di tutte le statistiche del fascio. In particolare, nella Figura 39 sono riportati i grafici di tre caratteristiche: focal shift, M^2 e diametro alla cintola.

Nonostante la presenza di vistose oscillazioni dei valori, gli andamenti generali sono abbastanza chiari in particolare si evidenzia lo spostamento medio del fuoco (deriva) e una sensibile perdita di qualità del fascio (valori di M^2 crescenti). Lo strumento BeamWatch ha quindi delle caratteristiche particolarmente interessanti per l'assenza di "contatto" con il fascio e la robustezza che ne deriva.

Dalle prove effettuate, concentrate in un tempo ridotto e pertanto con un setup migliorabile, si sono ricavate informazioni compatibili con quanto già rilevato con la strumentazione a disposizione del laboratorio.

12 Bibliografia

- [1] ANASTA, "RELAZIONE ANNUALE ANASTA- PARTE PUBBLICA," 26 Aprile 2016. [Online]. Available: <https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi-kqLDnM7PAhWE0RQKHdlbA3sQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.anasta.it%2FImagePub.aspx%3Fid%3D301475&usg=AFQjCNHUrCgzqccM627F9YCW6k7aXTNsA&sig2=WOBn37nRjLvHv-Zx3HrSbg>.
- [2] R. Unocic and J. Du Pont, "Process efficiency measurement in the laser engineered net shaping process," *Metall and Materi Trans B*, vol. 35, no. 1, pp. 143-152, 2004.
- [3] O. Svelto, *Principles of lasers*, Springer, 2010.
- [4] D. Reitemeyer, T. Seefeld and F. Vollerts, "Online Focus Shift Measurement in High Power Fiber Laser," *Physics Procedia*, no. 5, pp. 455-463, 2010.
- [5] A. Kratky, D. Schuocker and G. Liedl, "Processing with kW fibre lasers - Advantages and limits," in *XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*, Lisboa, 2009.
- [6] C. Thiel, R. Weber, J. Johannsen and T. Graf, "Stabilization of a laser welding process against focal shift effects," *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 210-215, 2013.
- [7] S. Katayama, *Handbook of laser welding technologies*, Elsevier, 2013.
- [8] Y. Miyazaki, T. Sakiyama and S. Kodama, "Welding techniques for tailored blanks," Nippon Steel, 2007.
- [9] R. Niles and C. Jackson, "Weld thermal efficiency of the GTAW process," *Welding Research Supplement*, pp. 25-32, 1975.
- [10] C. M. Adams, "Cooling rates and peak temperatures in fusion welding," *Weld. J.*, vol. 37, p. 210s, 1958.
- [11] S. Kou, *Welding metallurgy*, John Wiley & Sons, 2003.
- [12] D. T. Swift-Hook and A. E. Gick, "Penetration welding with lasers," *Weld. J.*, pp. 492-499, 1973.
- [13] M. N. Ozisik, *Heat conduction*, John Wiley & Sons, 1993.
- [14] P. W. Fuerschbach, "Measurement and prediction of energy transfer efficiency in laser beam welding," *Weld. J.*, no. 1, pp. 24-34, 1996.
- [15] P. W. Fuerschbach, "Applicazione di un modello di parametro adimensionale per la saldatura a fascio laser," Sandia National Laboratories, 1994.
- [16] R. Montanari, A. Varone, S. Bifaretti, V. Bonaiuto and S. Pipolo, "Misura degli assorbimenti elettrici e dell'efficienza energetica di macchine saldatrici TIG, plasma e laser: validazione, calibrazione e upgrade del sistema di monitoraggio," ENEA - Università Roma Tor Vergata, 2017.
- [17] G. Lim and W. Steen, "Instrument for instantaneous in situ analysis of the mode structure of a high-power laser beam," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 17, no. 11, 1984.