



Ricerca di Sistema elettrico

Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale

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

TECNICHE DI EFFICIENTAMENTO DEI PROCESSI DI SALDATURA INDUSTRIALE

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

Con il contributo di: L. Piloni e E. Serra per analisi microstrutturale, A. Tatì (termografia, esami RX e NDT in generale), R. Collepicollo (Preparativa campioni), G. Di Girolamo, V. Contini (Analisi dei dati).

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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. Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Indice

| | |
|---|----|
| SOMMARIO..... | 4 |
| 1 INTRODUZIONE..... | 5 |
| 2 ATTIVITÀ PRESSO WALTER TOSTO SPA..... | 6 |
| 2.1 TIG AUTOMATICO..... | 7 |
| 2.1.1 <i>Rilievi di temperatura con termocoppie</i> | 15 |
| 2.1.2 <i>Termografia</i> | 17 |
| 2.2 MIG MANUALE..... | 20 |
| 2.3 MISURA TIG MANUALE E OPPORTUNITÀ DI AGGIORNAMENTO DEL QUADRO MOBILE..... | 24 |
| 2.4 CONCLUSIONI SULLE ATTIVITÀ PRESSO WALTER TOSTO SPA..... | 25 |
| 3 UNISALERNO, ATTIVITÀ RELATIVE ALLA CARATTERIZZAZIONE DI SORGENTI E PROCESSI DI SALDATURA LASER INDUSTRIALI..... | 26 |
| 3.1.1 <i>Misure termografiche</i> | 30 |
| 3.1.2 <i>Laser TRUMPF TruDisk</i> | 30 |
| 3.1.3 <i>Laser IPG YLS-10000 KW con movimentazione TLW 2.1</i> | 33 |
| 3.2 CONCLUSIONI SU ATTIVITÀ LASER..... | 35 |
| 4 CARATTERIZZAZIONE SALDATURA TIG PRESSO ENEA - CASACCIA..... | 36 |
| 4.1 MATERIALI..... | 36 |
| 4.1.1 <i>AISI316 (X 5 CrNiMo 17-12-2)</i> | 36 |
| 4.1.2 <i>15-15 Ti (EN 1515CrNiMoTiB)</i> | 37 |
| 4.1.3 <i>AA5083</i> | 37 |
| 4.2 PROVE DI SALDATURA..... | 37 |
| 4.2.1 <i>Test con acquisizione dati consumo del generatore</i> | 38 |
| 4.2.1.1 Acciaio Inossidabile spessore 4 mm AISI 316..... | 38 |
| 4.2.1.2 Alluminio AA 50 83 spessore 3 mm..... | 40 |
| 4.2.1.3 Acciaio Inossidabile 15-15 Ti spessore 3 mm..... | 41 |
| 4.2.2 <i>Rendimento del generatore d'arco</i> | 45 |
| 4.2.3 <i>Test di verifica prestazioni</i> | 45 |
| 4.3 ELABORAZIONE DEI DATI RACCOLTI..... | 53 |
| 4.4 CONCLUSIONI E INDICAZIONI PER LA DEFINIZIONE DELLO STANDARD DI QUALIFICA ENERGETICA..... | 56 |
| 5 FRICTION STIR WELDING..... | 57 |
| 5.1 MATERIALI..... | 57 |
| 5.2 PROVE DI SALDATURA..... | 58 |
| 5.2.1 <i>RGM Metalworks</i> | 58 |
| 5.2.2 <i>Dip. Meccanica, UniGenova</i> | 59 |
| 5.3 ANALISI TERMOGRAFICHE..... | 60 |
| 5.4 ELABORAZIONE DATI E CONCLUSIONI SULLA FSW..... | 61 |
| 6 CONCLUSIONI..... | 63 |
| 7 BIBLIOGRAFIA..... | 65 |
| APPENDICI..... | 66 |

Sommario

Nelle precedenti annualità si sono definite linee guida per la valutazione standard dell'efficienza energetica in saldatura mediante uno specifico parametro (FEE, fattore di efficienza energetica) e si è realizzato, avvalendosi di collaborazioni esterne, un dispositivo mobile per la caratterizzazione degli input/ output di macchinari di saldatura di vario tipo (arco, laser, electron beam, attrito, resistenza).

Nell'annualità di progetto sono state innanzitutto svolte attività di raccolta e analisi dati. E' stata condotta un'indagine su soggetti industriali e di ricerca potenzialmente interessati a partecipare, mettendo a disposizione impianti (e personale) per il tempo sufficiente a raccogliere dati significativi sull'efficienza dei processi di saldatura impiegati, in condizioni operative reali.

In caso di positivo accordo si è proceduto a raccogliere tutti i dettagli d'impianto necessari a rendere l'intervento di misura meno intrusivo possibile, minimizzando i fermi macchina e gli eventuali interventi di cablaggio e collegamento.

Le campagne di misura hanno interessato installazioni significative per dimensioni e livello di know how specialistico:

- Walter Tosto spa (Chieti): saldatura TIG e MIG di elevati spessori per l'industria chimica, petrolifera e nucleare;
- RGM spa Metlworks (AL): saldatura friction stir di leghe di alluminio nel campo dell'elettronica di potenza;
- Univ. di Salerno e consorzio CALEF: impianti di ricerca e sviluppo con laser di ultima generazione di alta potenza;
- Univ. di Genova: ricerca e sviluppo sulla friction stir welding.

Le misure elettriche di assorbimento e potenza utile di saldatura ad arco sono state integrate da

- rilievo dei flussi di gas di processo e aria compressa;
- analisi termografiche, sia sui macchinari che sulle parti in corso di saldatura;
- misura puntuale con termocoppie per la verifica degli apporti termici;
- misura calorimetrica della potenza laser utile e caratterizzazione ottica dei fasci laser.

Le attività si sono svolte come programmato e hanno prodotto una mole consistente di dati utili a validare i protocolli di prova. L'uso sul campo ha anche suggerito l'opportunità di miglioramenti e modifiche al SW/HW del dispositivo mobile di misura che sono state realizzate con la collaborazione del co-beneficiario, Univ. Roma TorVergata. Particolarmente utile si è dimostrato il modulo di collegamento Wifi che permette all'operatore di controllare la misura e acquisire dati remotamente con vantaggi facilmente intuibili in ambito industriale.

L'analisi dei dati ha confermato che, seppure semplificato, l'approccio scelto di valutare l'efficienza come rapporto tra la sezione resistente creata e l'energia spesa, permette una valutazione sintetica delle prestazioni d'impianto ed è utile per il confronto tra tecniche diverse. Inoltre il fattore di efficienza può servire a controllare nel tempo l'evoluzione del livello di efficienza di un dato impianto di saldatura evidenziando l'insorgere di anomalie.

Per le tecniche di saldatura indagate sono stati quindi definiti metodi standard di valutazione dell'efficienza insieme a linee guida per utilizzare i dati ricavati ai fini del miglioramento dell'efficienza mediante la scelta di opportuni parametri di processo.

1 Introduzione

Nelle precedenti annualità del progetto sono state analizzate le motivazioni che suggeriscono di approfondire il tema dell'efficienza energetica della saldatura in ambito industriale. Senza necessità di riprendere estesamente le considerazioni fatte si ricorda che:

- dati dell'industria USA per l'anno 2000 indicano [1] un costo energetico della saldatura pari all'1,5% del totale ovvero 1,1 miliardi di \$ sul totale di 75. Considerando i singoli settori produttivi l'incidenza è diversa e passa dal 5% nell'industria dell'auto, al 9% dell'i. leggera fino al 20% circa dei settori delle costruzioni e della manifattura pesante. Considerando anche tutti gli altri costi (materiali, manodopera ecc.) la stessa fonte stima un'incidenza simile della saldatura, 31 miliardi di \$ cioè l'1,4% del totale dei costi di produzione dello stesso anno;
- i costi energetici della saldatura sono pressoché totalmente legati ai consumi elettrici e quindi hanno un impatto sull'infrastruttura energetica locale e nazionale;
- studi più recenti focalizzati sulla situazione dell'unione europea [2] calcolano un potenziale risparmio, da misure pro efficienza nel settore della saldatura, variabile, a seconda degli scenari, tra 5,3 e 9,9 PJ/anno.

Le attrezzature in dotazione al laboratorio SSPT-PROMAS-MATPRO nel C.R. Casaccia sono rappresentative di una parte consistente delle applicazioni industriali, sono disponibili:

- Fascio elettronico;
- TIG automatico e manuale;
- Plasma;
- Laser.

La strumentazione presente ha permesso di effettuare, fin dalle prime annualità, sessioni di prova per la messa a punto dei processi e dei sistemi di acquisizioni dati riversando poi l'esperienza fatta in successive campagne di misura "sul campo". Per altre tecniche è stato previsto e sfruttato il collegamento con diversi soggetti esterni, sia industriali che di ricerca.

La collaborazione avviata con i co-beneficiari (Univ. Roma Tor Vergata e Univ. di Genova) ha permesso di mettere a fuoco numerosi aspetti relativi alla specifica esperienza, nelle tecniche di misura elettrica e analisi dei dati e, rispettivamente, nei processi innovativi di giunzione ad alta efficacia/efficienza (*friction stir welding*). Individuate le tecniche di saldatura da analizzare ed effettuati test preliminari con strumentazione prototipale, è stato progettato e realizzato uno strumento trasportabile (quadro mobile, Figura 1) che consente di valutare i bilanci energetici delle principali tecniche di saldatura. Il quadro contiene sensori di corrente e tensione per il monitoraggio di 3 linee trifase (400 V) e una monofase (230 V), corrente massima 125 A e per il rilievo della tensione e corrente d'arco. Sono anche disponibili ingressi supplementari per segnali in tensione e corrente e tre flussimetri di massa per argon, elio e aria rispettivamente. L'acquisizione è realizzata mediante sistema NI cDAQ con interfaccia wifi per la visualizzazione e archiviazione dati su PC.



Figura 1: al centro quadro mobile realizzato in collaborazione con Univ. TorVergata; a sin e a destra rispettivamente le sezioni di ingresso e uscita dei collegamenti di potenza

Il presente report descrive le attività svolte con la strumentazione realizzata sia internamente a ENEA presso il C.R. Enea Casaccia e al co-beneficiario Università di Genova, sia presso alcune aziende ed Università che hanno risposto positivamente all'invito ed al questionario appositamente sviluppato per la raccolta dati (modulo ricognizione - Appendice 1).

Le aziende che sono state selezionate per le misure in sito sono state le seguenti:

- Walter Tosto spa, Chieti;
- Università di Salerno e Consorzio CALEF;
- RGM Metalworks, Lerma (AL).

2 Attività presso Walter Tosto Spa

Walter Tosto SpA è un'azienda italiana, attiva nella produzione di componenti industriali nei mercati Oil & Gas, Petrolchimico, Nucleare, Food and Pharma. Fondata nel 1960, progetta e produce apparecchi critici: Reattori Hydrocracking e Hydrotreater, HP Pressure Vessels, Separatori, Colonne, HP Scambiatori di calore (Breech-Lock type), Coke drums, Waste heat boiler, praticamente senza limite di peso e dimensione.

Il sito visitato per le attività sull'efficienza in saldatura è stato quello di Chieti scalo: esso è il principale sito produttivo della ditta e ospita 6 degli 8 stabilimenti. Per il settore in cui opera, con le alte capacità produttive in atto, l'azienda fa un uso sicuramente intensivo della saldatura e impiega praticamente tutte le tecniche ad arco in numerose postazioni e su spessori elevati.

Sono stati presi accordi con la ditta per effettuare attività di monitoraggio energetico su diversi impianti di saldatura operanti in produzione:

- TIG automatico, generatore Fronius mod. TransTig 4000 associato a robot antropomorfo;
- TIG manuale, generatore Miller mod. Syncrowave 350 LX;
- MIG manuale, gen. Esab mod. Warrior 400i CC/CV.

È stata impiegata la seguente strumentazione di misura:

- Quadro mobile di misura energia (Figura 1);
- Registratori di rete trifase Fluke 1730 e Fluke 1738;
- Registratore per termocoppie Picotech TC-08 usb;
- Termocamere Flir E8 e Flir S60.

2.1 Tig automatico

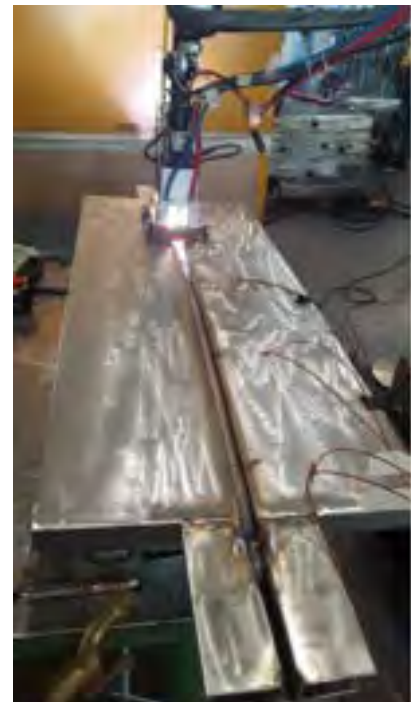
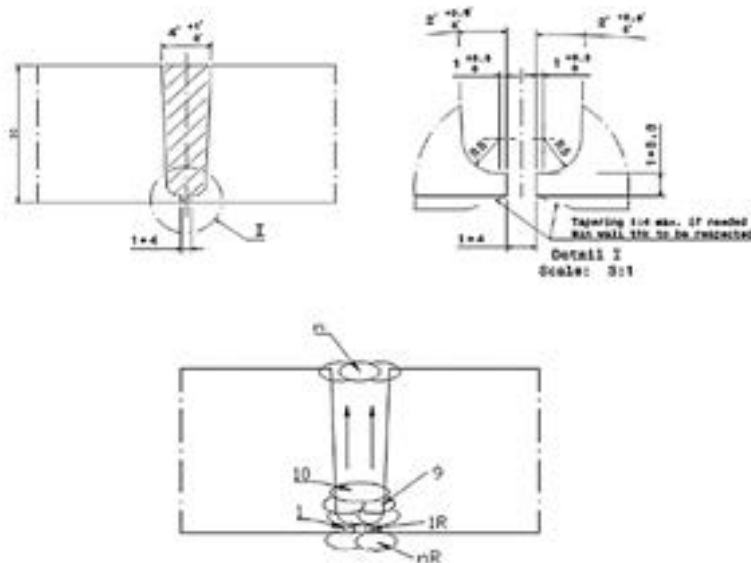


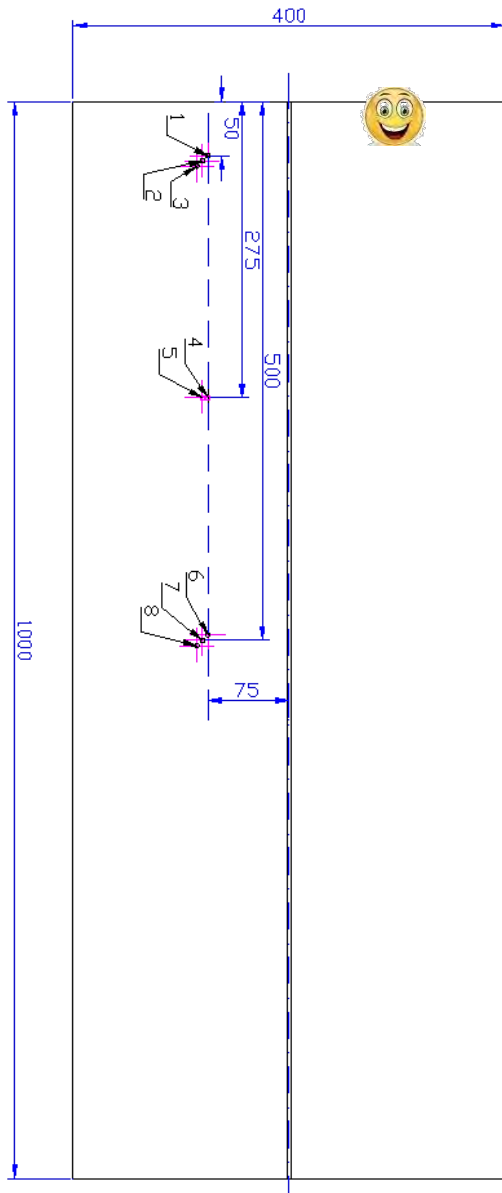
Figura 2: Schematizzazione del giunto TIG NG (sin) ed esempio di passata in corso di esecuzione

Il test ha riguardato principalmente l'esecuzione di saldature TIG *narrow gap*. Lo schema del giunto è mostrato nella Figura 2. Lo spessore totale è 30 mm e richiede un numero variabile di passate di cui le prime 9 eseguite con tecnica TIG manuale e materiale di apporto, anch'esso AISI316L, in forma di bacchetta di diametro 2 mm.

La tecnica *narrow gap* ha di per sé caratteristiche favorevoli di efficienza in quanto, come è evidente dallo schema, il materiale di apporto richiesto (e quindi l'energia per fonderlo) è ridotto al minimo compatibilmente con l'accessibilità della torcia. Inoltre, come in questo caso, si devono impiegare attrezzature speciali come torce rastremate o particolari dispositivi per l'adduzione del materiale d'apporto e il controllo dell'arco. Naturalmente i benefici del ridotto apporto termico si manifestano anche dal punto di vista strutturale e metallurgico (riduzione delle distorsioni e dell'estensione delle zone termicamente alterate).

I parametri di lavoro sono: corrente continua, elettrodo negativo, corrente e tensione rispettivamente 50÷120 A e 9÷15 V, velocità minima 40 mm/min, apporto termico massimo 1,62 kJ/mm. Le successive passate di riempimento sono eseguite con tecnica automatica servendosi di dispositivi ausiliari sviluppati dalla WT Spa. Il materiale d'apporto è dato da 2 fili in 316L in parallelo e l'arco è fatto oscillare magneticamente per assicurare il regolare riempimento del cianfrino. I parametri sono: corrente pulsata, elettrodo negativo, velocità 48÷80 mm/min, apporto termico massimo 3,19 kJ/mm.

Il campione di dimensione complessiva 1000x400x30 mm è stato strumentato con 8 termocoppie tipo K saldate sulla faccia superiore della lamiera secondo la disposizione di Figura 3. Il rilievo della temperatura durante la saldatura può consentire di ricostruire l'apporto termico reale facendo alcune ipotesi sulle condizioni al contorno e il regime di scambio termico in atto. Il campo termico complessivo è stato rilevato mediante termo camere previa taratura del coefficiente di emissività mediante confronto con la lettura delle termocoppie.



| N. | X | Y |
|----|-----|----|
| 1 | 50 | 75 |
| 2 | 55 | 80 |
| 3 | 60 | 85 |
| 4 | 275 | 75 |
| 5 | 275 | 80 |
| 6 | 495 | 75 |
| 7 | 500 | 80 |
| 8 | 505 | 85 |

Figura 3: disposizione termocoppie. X e Y (mm) distanze dal lato sinistro e dalla mezzeria.

Il monitoraggio energetico è stato operato facendo passare l'alimentazione trifase del generatore Fronius TransTig 4000 e del robot nel quadro mobile. Per validare le misure (di assorbimento) sono stati collegati in parallelo anche i registratori di rete. La tensione d'arco è stata misurata collegando direttamente il cavo torcia e il ritorno alla scheda NI 9225 mentre la corrente è stata letta da un sensore a effetto Hall con uscita in tensione, acquisita dalla scheda NI 9205.



(b)



(a)



(c)

Figura 4: (a) Interfaccia SW misura su PC; (b) collegamento uscite del generatore (corrente e tensione d'arco vedi frecce arancio e verde, valori medi rilevati dal display macchina); (c) collegamenti di potenza al sistema di monitoraggio portatile

| Layer | Bead | Monitored Bead | Welding Process | GAS | | | Electrode [Φmm] | Current | | Voltage [V] | Speed [mm/min] | POWER EVALUATED [W] | REAL WELD POWER [W] | Δ [W] | Hi [Kj/mm] |
|-------|------|----------------|-----------------|-----------|---------|----------|--------------------|----------|-------|----------------|-------------------|------------------------|------------------------|----------|---------------|
| | | | | Shielding | Backing | Backward | | H [A] | AV[A] | | | | | | |
| TW | TW | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 70 | 13.2 | 40 | 924 | | | 1.39 | |
| 1 | 1 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 68 | 11 | 45 | 748 | NA | | 1.00 | |
| 2 | 2 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 80 | 11.6 | 60 | 928 | NA | | 0.93 | |
| 2 | 3 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 80 | 11.6 | 60 | 928 | NA | | 0.93 | |
| 3 | 4 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 12.1 | 65 | 1452 | NA | | 1.34 | |
| 3 | 5 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 12.1 | 65 | 1452 | NA | | 1.34 | |
| 4 | 6 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 13.4 | 65 | 1608 | NA | | 1.48 | |
| 4 | 7 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 13.4 | 65 | 1608 | NA | | 1.48 | |
| 5 | 8 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 13.2 | 75 | 1584 | NA | | 1.27 | |
| 5 | 9 | | TIG MANUAL | 10 | 15 | | 2.4 | 120 | 13.2 | 75 | 1584 | NA | | 1.27 | |
| 6 | 10 | | Semi Automatic | 14 | 4 | 4 | 4 | 210 | 173 | 14 | 50 | 2422 | NA | | 2.91 |
| 7 | 11 | | Semi Automatic | 14 | 4 | 4 | 4 | 230 | 189 | 13.5 | 50 | 2551.5 | NA | | 3.06 |
| 8 | 12 | | Semi Automatic | 14 | 4 | 4 | 4 | 250 | 205 | 13.5 | 50 | 2767.5 | NA | | 3.32 |
| 9 | 13 | 4 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 250 | 205 | 13.5 | 50 | 2767.5 | 2848 | -80.5 | 3.32 |
| 10 | 14 | 5 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 250 | 205 | 13.5 | 50 | 2767.5 | 2903 | -135.5 | 3.32 |
| 11 | 15 | 6 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 250 | 205 | 13.8 | 50 | 2829 | 3023 | -194 | 3.39 |
| 12 | 16 | 7 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 250 | 205 | 13.6 | 50 | 2788 | 2898 | -110 | 3.35 |
| 13 | 17 | 8 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 200 | 165 | 13.5 | 50 | 2227.5 | 2291 | -63.5 | 2.67 |
| 14 | 18 | 9 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 200 | 165 | 13.5 | 50 | 2227.5 | 2316 | -88.5 | 2.67 |
| 15 | 19 | 10 | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.5 | 60 | 2011.5 | 2034 | -22.5 | 2.01 |
| 15 | 20 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.4 | 60 | 1996.6 | NA | | 2.00 |
| 16 | 21 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.4 | 60 | 1996.6 | NA | | 2.00 |
| 16 | 22 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.4 | 60 | 1996.6 | NA | | 2.00 |
| 17 | 23 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.4 | 60 | 1996.6 | NA | | 2.00 |
| 17 | 24 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.2 | 60 | 1966.8 | NA | | 1.97 |
| 18 | 25 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.2 | 60 | 1966.8 | NA | | 1.97 |
| 18 | 26 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.2 | 60 | 1966.8 | NA | | 1.97 |
| 18 | 27 | | Semi Automatic | 14 | 0 | 4 | 4 | 180 | 149 | 13.2 | 60 | 1966.8 | NA | | 1.97 |

Tabella 1: parametri di processo TIG narrow gap

I parametri di processo utilizzati sono riassunti nella Tabella 1. La distinzione tra strato (layer) e cordone (bead) si deve al fatto che le passate non sempre riempiono tutta la sezione quindi, a una data altezza dal fondo, ne possono servire due affiancate. I cordoni da TW (talloni) a 12 sono eseguiti con torcia e materiale d’apporto a mano, i restanti con il manipolatore e lo svolgi-filo. Le passate monitorate sono numerate da 4 a 10 rispetto al gruppo complessivo delle saldature automatiche.

Le forme d’onda tipiche registrate dal sistema di misura sono visibili, per due passate, nella Figura 7 e Figura 8.

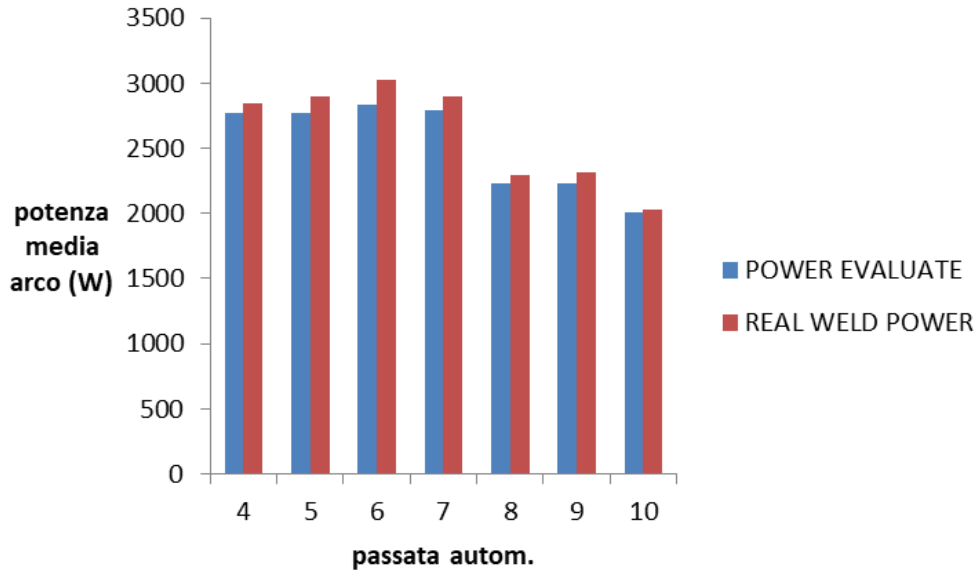


Figura 5: potenza arco stimata e misurata con il dispositivo di misura

La stima (*power evaluate*) della potenza dell'arco è effettuata in base ai valori medi letti al display del generatore (Figura 4). La misura (*real weld power*) dà valori leggermente superiori (Figura 5). Questa discrepanza può essere dovuta all'uso dei valori medi di corrente e tensione: infatti, se tali grandezze oscillano tra base e picco con un'onda quadra e un duty cycle (d) costante, si ha $I_{med} = I_p d + (1-d) I_b$ e $V_{med} = V_p d + (1-d) V_b$.

La potenza media effettiva è $P_m = I_p V_p d + (1-d) I_b V_b$.

Ponendo $I_p = (1+a) I_b$ e $V_p = (1+a) V_b$ si ha una differenza $P_m - I_{med} V_{med} = a b d (1-d) V_b I_b$.

Utilizzando valori RMS (R) la differenza si riduce.

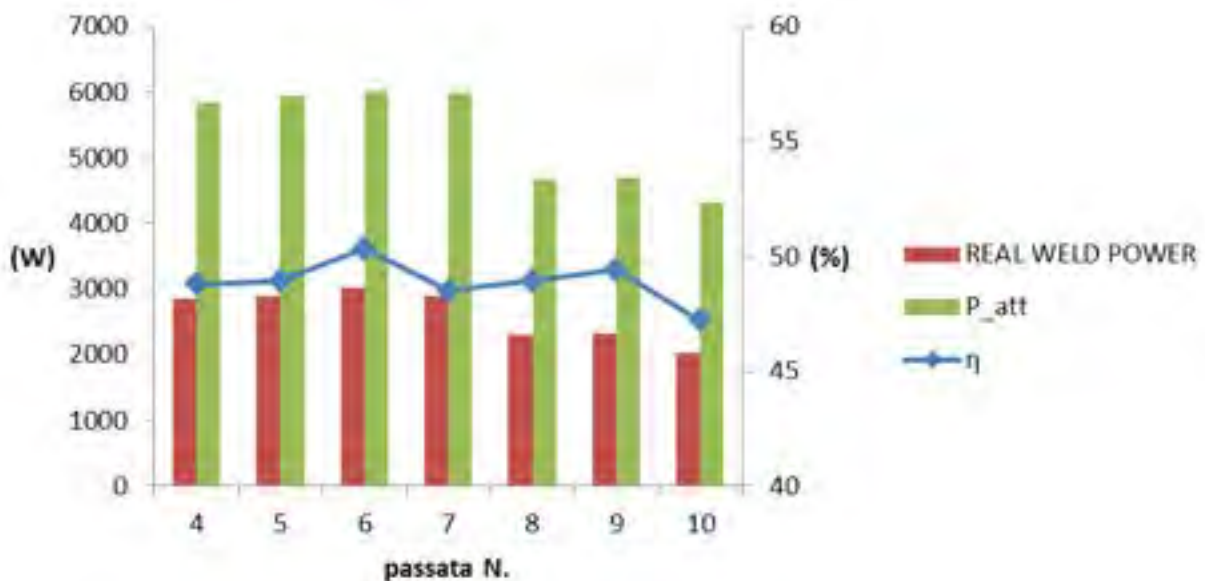


Figura 6: rendimento del generatore Fronius

La Figura 6 riassume il bilancio energetico della macchina. Il rendimento è in media $\eta = 48,9 \pm 0,9$.

Passata. 6

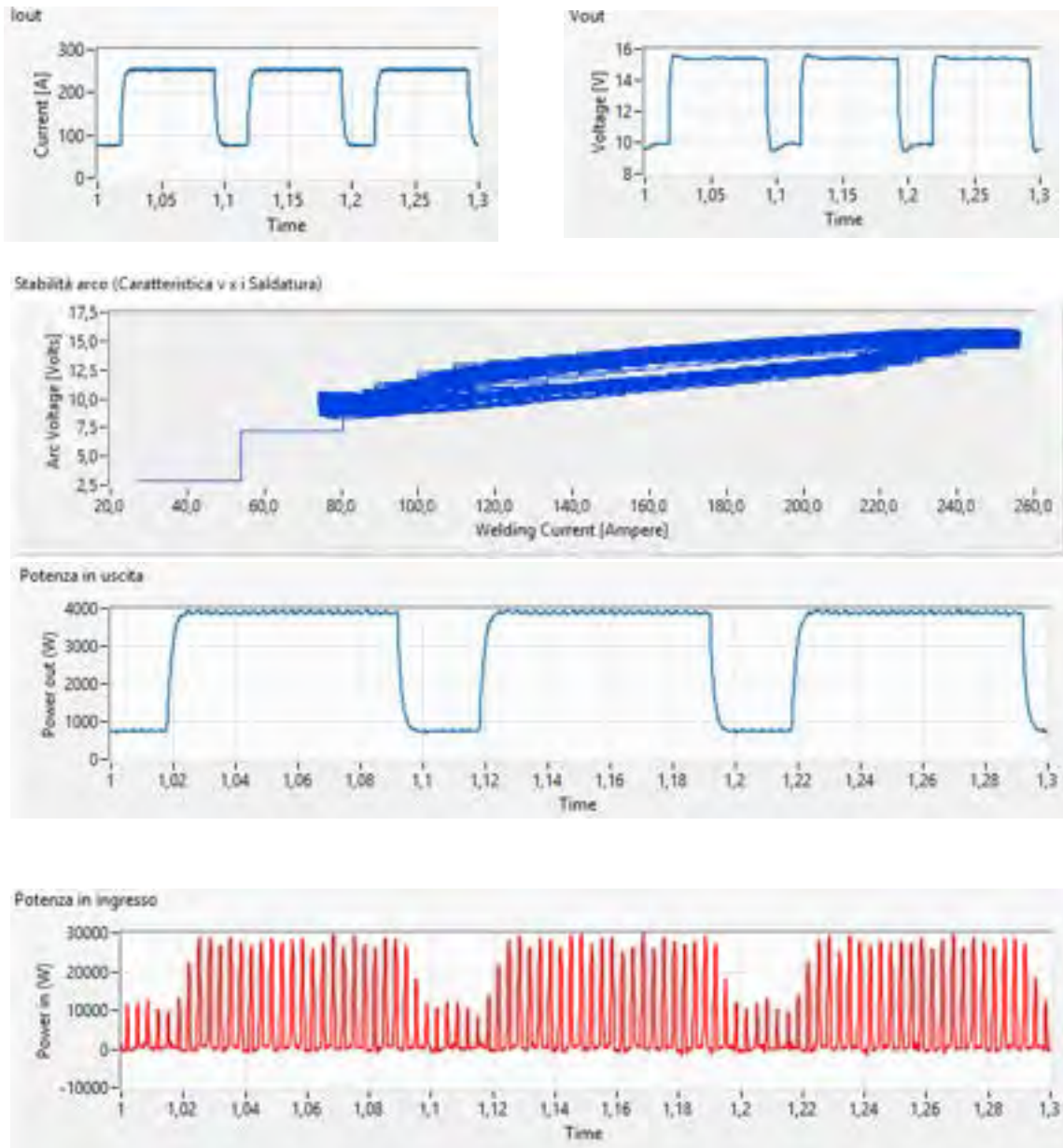


Figura 7: TIG NG, forme d'onda registrate durante la passata N. 6

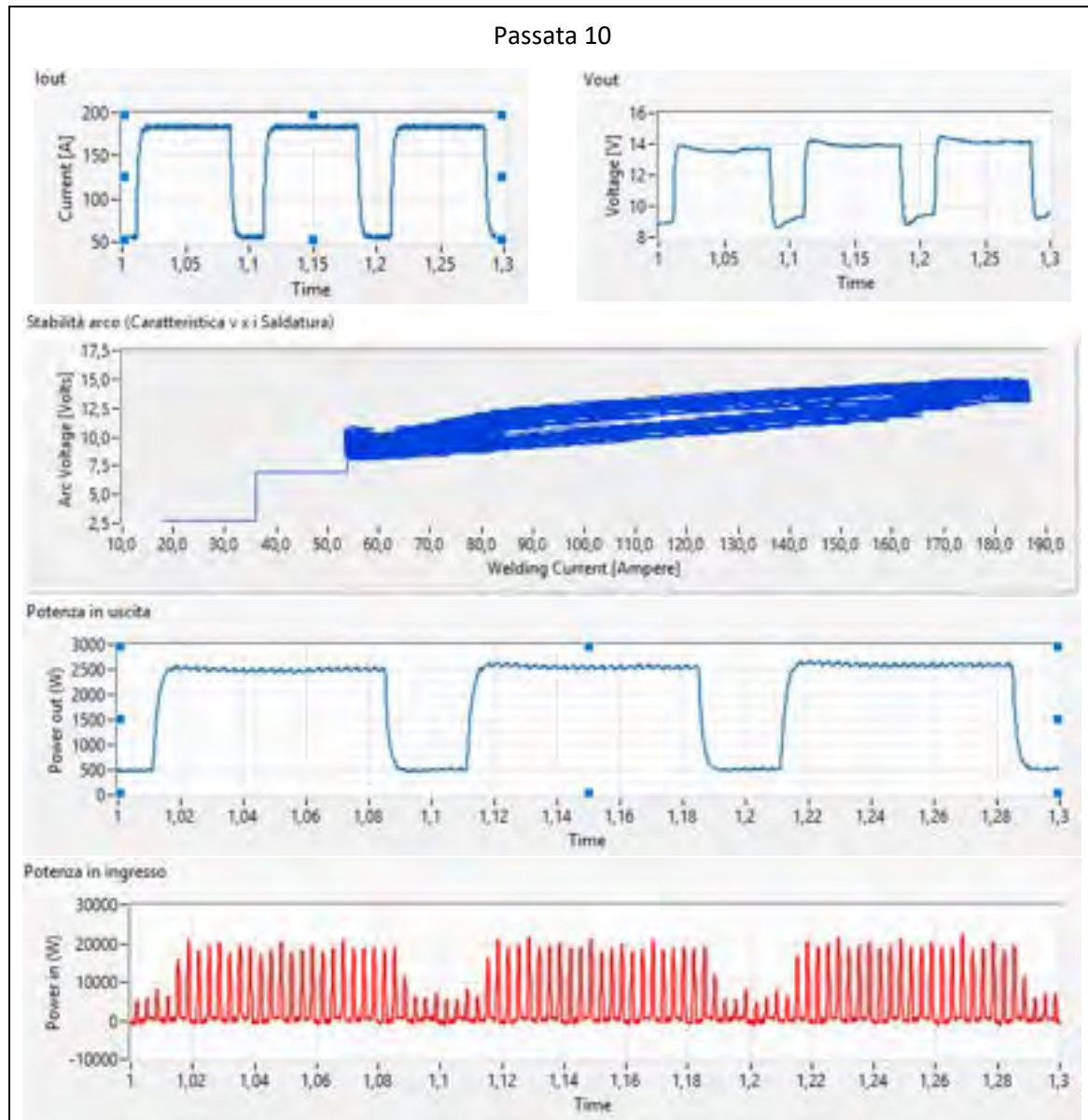


Figura 8 TIG NG, forme d'onda registrate durante la passata N. 10

Se confrontiamo il risultato reale dell'efficienza del generatore con quanto estrapolabile dai dati di targa del generatore, ci rendiamo conto di come delle misure dirette in condizioni reali di saldatura possono rilevare scostamenti significativi di rendimento. Nella Figura 9 è riportato un estratto del manuale della saldatrice FRONIUS TransTig 4000 con i relativi dati di targa. Dai dati di targa è possibile estrapolare la massima corrente e tensione di arco, rispettivamente 310 A e 26 V per la saldatura in modalità TIG in condizioni di corrente continua e "duty cycle" 100% continuo.

Nelle stesse condizioni la casa madre riporta la potenza assorbita dalla rete (11,8 kVA). Il rapporto fra la potenza di saldatura e quella assorbita dalla rete fornisce il rendimento medio che è pari a circa il 63%, ben 14 punti percentuali superiori a quanto rilevato.

La differenza è da attribuirsi alle maggiori perdite indotte dalla pulsazione della corrente d'arco che, come evidenziato dai reali rilevamenti, oscilla fra 80 e 260 A con un bilanciamento del 70%.

Questo fa intuire come per quanto la pulsazione dell'arco possa portare a vantaggi qualitativi della saldatura in termini di puro rendimento elettrico del generatore induce una riduzione dello stesso rispetto alla modalità di corrente continua.

| TT 4000 Job | |
|--|--|
| Mains voltage | 3 x 400 V |
| Mains voltage tolerance | ± 15 % |
| Mains frequency | 50/60 Hz |
| Mains fuse protection (slow-blow) | 35 A |
| Mains connection ¹⁾ | Restrictions possible |
| Primary continuous power (100% d.c. ²⁾) | 11.8 kVA |
| Cos phi | 0,99 |
| Welding current range | |
| TIG | 3 - 400 A |
| Electrode | 10 - 400 A |
| Welding current at | |
| 10 min/40 °C (104 °F) 40% d.c. ²⁾ | - |
| 10 min/40 °C (104 °F) 45% d.c. ²⁾ | 400 A |
| 10 min/40 °C (104 °F) 60% d.c. ²⁾ | 365 A |
| 10 min/40 °C (104 °F) 100% d.c. ²⁾ | 310 A |
| Open circuit voltage | 86 V |
| Working voltage | |
| TIG | 10.1 - 26.0 V |
| Electrode | 20.4 - 36.0 V |
| Striking voltage (U _p) | 9.5 kV |
| The arc striking voltage is suitable for manual operation. | |
| Degree of protection | IP 23 |
| Type of cooling | AF |
| Insulation class | F |
| EMC emission class (in accordance with EN/IEC 60974-10) | A |
| Dimensions L x W x H (with handle) | 625 / 290 / 475 mm 24.6 / 11.4 / 18.7 in. |
| Weight | 39.8 kg 87.7 lb. |
| Mark of conformity | S. CE |

Efficienza del generatore valutabile come rapporto fra energia disponibile al secondario in condizioni di saldatura duty cycle 100%

100% d.c : 310 A
Working Voltage : 26 V

Welding Power: 310 X 26 = 8,060 KVA

La potenza continua assorbita al primario è pari in queste condizioni, come dato di fabbrica, a 11.8 KVA

Il rendimento elettrico calcolato è di circa:
 $\eta = 68\%$.

Figura 9 Valutazione del rendimento teorico del generatore a partire dai dati di targa

Passando alla valutazione dell'efficienza del processo di saldatura nel suo complesso mediante il Fattore di Efficienza Energetica (FEE) definito nel corso dei precedenti PAR, la valutazione del fattore di efficienza per le saldatura multi passata è sintetizzato nella seguente espressione:

$$FEE = \frac{\text{area}}{\text{energia}} = \frac{s L}{\sum_{i=1}^N P_i \frac{L}{v_i}} = \frac{s}{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{v_i}} = \frac{s}{\sum_{i=1}^N q_i}$$

Dove s è lo spessore totale (30 mm) e q_i l'apporto termico della singola passata (Figura 10)

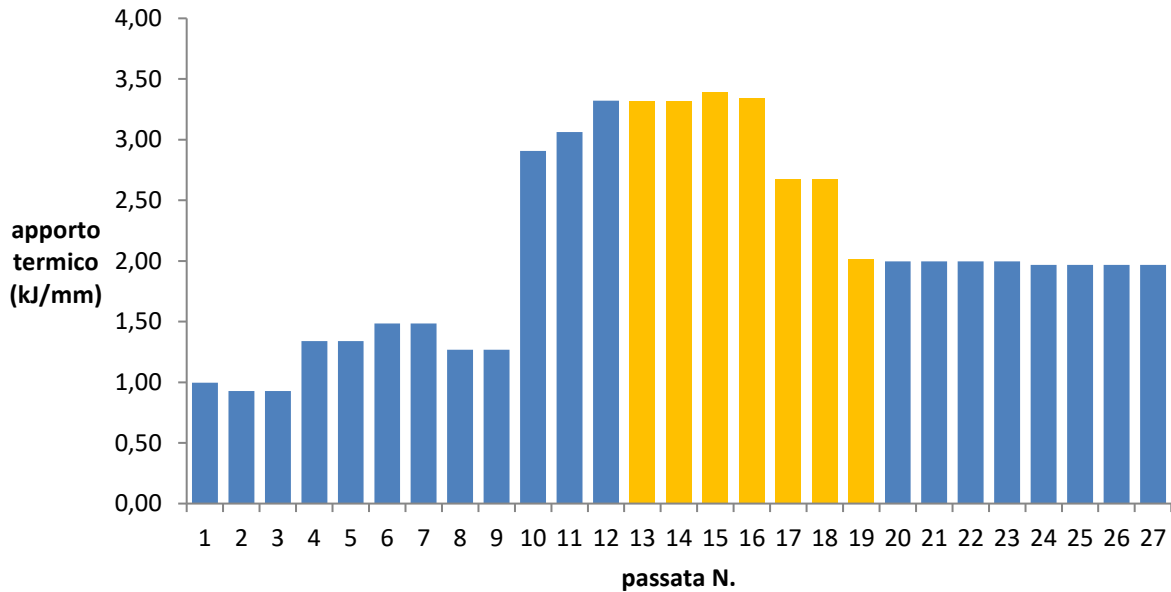


Figura 10: apporto termico nelle diverse passate; in giallo quelle con acquisizione dati

Nel caso presente la somma degli apporti termici è 56,92 kJ/mm e

$$FEE = 0,53 \text{ mm}^2/\text{kJ}$$

che è senz'altro piuttosto basso se confrontato con quanto ottenibile nelle saldature single pass con tecniche varie, compreso il TIG. Per avere una verifica indiretta del significato fisico del valore ottenuto si consideri che il volume di materiale aggiunto è dato dalla sezione trasversale (Figura 2) per la lunghezza (1 m) ed è circa pari a 275 cm³. La massa è 2200 g.

Se l'entalpia del fuso è

$$H_f = 1100 \text{ J/g (cfr. pag 53)}$$

l'energia applicata strettamente necessaria è 2420 kJ.

L'energia applicata (ipotizzando [3] un rendimento dell'arco η_t dell'80 %) invece è data da:

$$\eta_{generatore} \frac{A}{FEE} \eta_t = 0,489 \frac{30 \times 1000}{0,53} 0,8 = 22100 \text{ kJ}$$

quindi globalmente si avrebbe un rapporto di fusione o *melting ratio* $\eta_m = 11 \%$ circa che è compatibile con i valori limite teorici, rispettivamente 37 % e 48 %, cui ci si avvicina con velocità di passata elevate.

2.1.1 Rilievi di temperatura con termocoppie

Al fine di una completa comprensione del processo e della valutazione dell'energia che nei processi multi pass di grossi spessori viene "persa" sia per fenomeni naturali ineludibili (conduzione, convezione ed irraggiamento) sia per motivi tecnici (necessità di rispettare condizioni termologiche del materiale per garantire l'efficacia della giunzione, vedi temperatura di Interpass), la temperatura del saggio di qualifica è stata monitorata per una serie di passate successive. La temperatura è stata monitorata da 8 termocoppie tipo K saldate con scarica capacitiva sulla parte superiore della lamiera, come mostrato nella Figura 3.

A titolo di esempio nella Figura 11 sono visibili gli andamenti registrati nella 4° passata strumentata. A causa dell'ingombro della testa di saldatura, non è stato possibile avvicinarsi maggiormente alla mezzeria del pezzo pertanto le temperature sono piuttosto basse rispetto alla temperatura di fusione del materiale, allo stesso tempo, la distanza è tale da permettere di considerare in atto uno scambio termico 2D cioè gradienti trascurabili nello spessore [4].

In questo caso la temperatura massima a distanza r dalla linea di saldatura ha un andamento secondo la seguente equazione [5]:

$$T_p = T_0 + \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{1/2} \frac{Q/v}{2 s \rho c r}$$

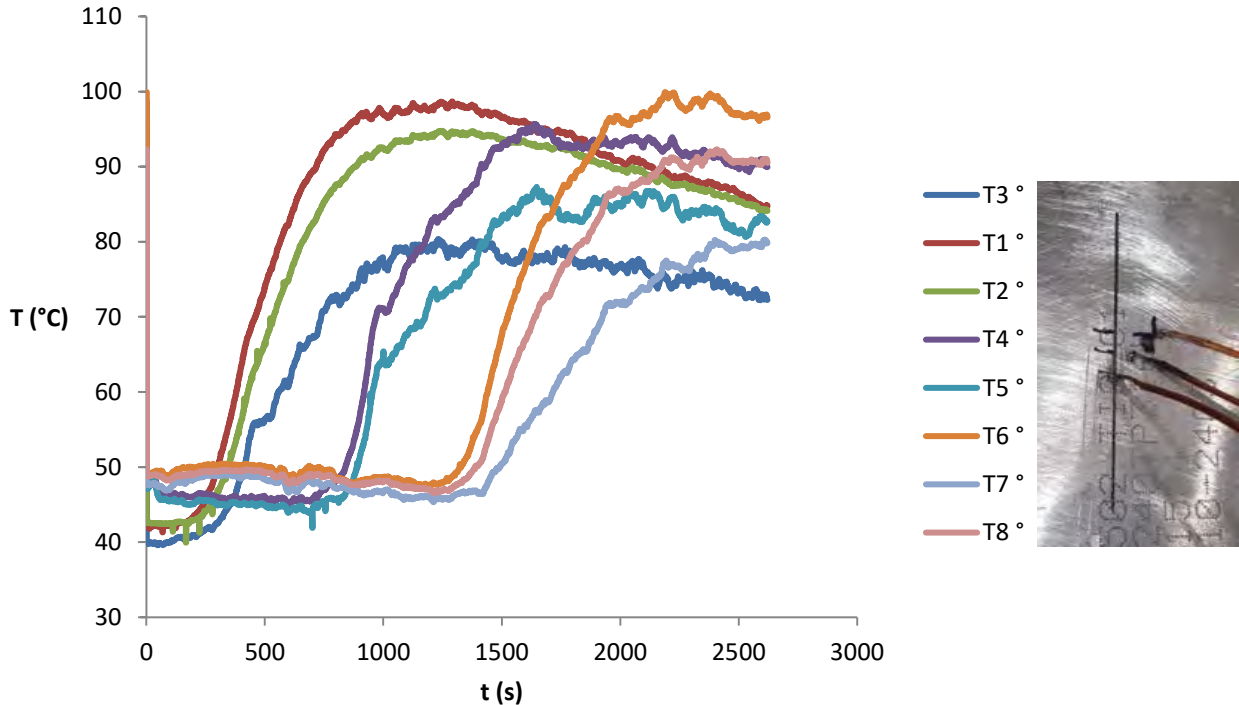


Figura 11: profili di temperatura nella passata n. 4

In Figura 12 il grafico di T_p in funzione di $1/r$, per la passata n. 4; la retta di compenso ha pendenza $m=3626$ (mm °C). L'intercetta è stata forzata al valore iniziale medio della temperatura misurata (45,6 °C) il che peggiora notevolmente il *fit* rispetto alla libera interpolazione ma assicura il significato fisico dell'elaborazione (a distanza infinita la temperatura resta quella iniziale).

Sostituendo $s=30$ mm, $\rho=8$ g/cm³, $c=0,5$ J/g si ottiene $m=2,0$ Q/v e quindi l'apporto termico risulterebbe essere 1,8 kJ/mm circa. Il valore riportato nella Tabella 1 è 3,32 kJ/mm. Ipotizzando un'efficienza d'arco dell'80 % si arriva a 2,7 kJ/mm, valore dello stesso ordine di grandezza di quello calcolato ma comunque piuttosto lontano. In ogni caso nella misurazione sono presenti diversi fattori di disturbo che possono influire sul risultato. Una configurazione più affidabile si otterrebbe posizionando le termocoppie all'interno di fori sottili trasversali, al prezzo però di una certa complicazione operativa.

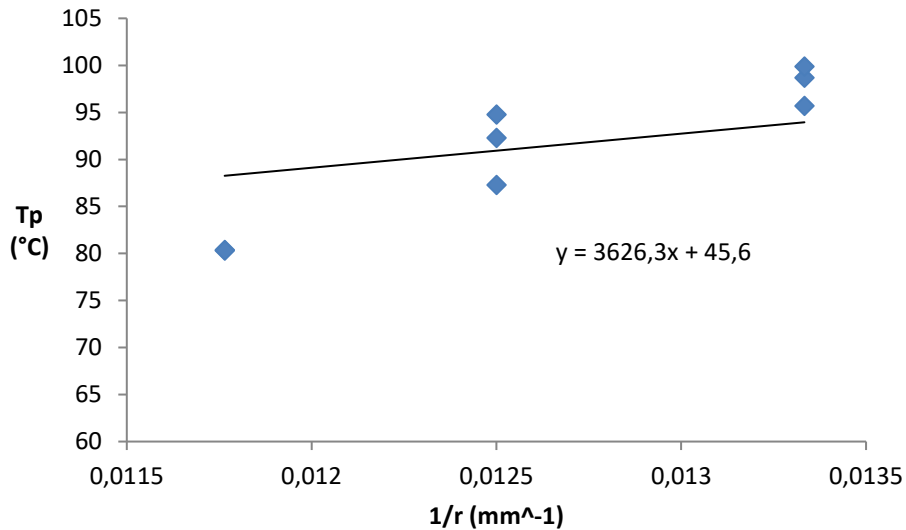


Figura 12: Temperatura di picco Termocoppie 1-8, passata 4

2.1.2 Termografia

Le misure termografiche sono state effettuate con un duplice intento; da un lato avere un quadro continuo dell'andamento delle temperature sul saggio di qualifica (sempre al fine di quantificare l'energia dispersa durante il processo) dall'altra, ove possibile, il monitoraggio del riscaldamento dei generatori per individuare i componenti ove avvengono i maggiori aumenti di temperatura e quindi le perdite.

Alcuni rilievi termografici in campo effettuati con la termocamera Flir S60 posizionata in modo stabile frontalmente al saggio di qualifica sono riportati di seguito.



FLIR E8



FLIR S60

Figura 13: Set UP termo camere per acquisizione termografica durante il processo di saldatura semiautomatico TIG presso l'Azienda Walter Tosto

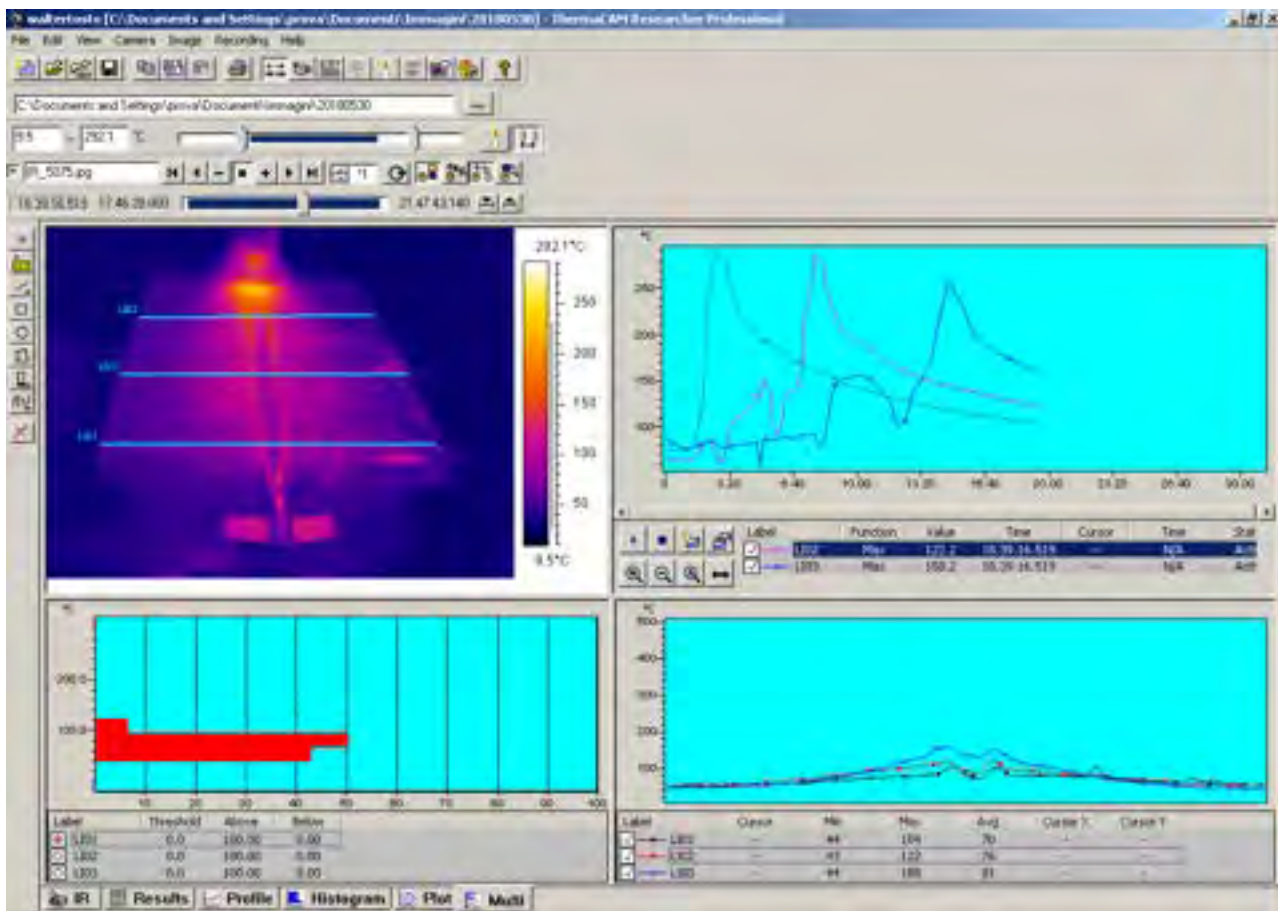


Figura 14: termografia passata TIG n. 7

I rilievi termografici mostrano che una volta impostata l'emissività del materiale ed eliminati potenziali riflessi, i campi termici sono perfettamente realistici e si possono condurre elaborazioni impossibili con altri metodi che danno invece solo una stima puntuale, per quanto precisa. Il software professionale in dotazione consente di estrarre andamenti nel tempo sia in singoli punti che su traverse variamente disposte.

Nella Figura 14 è mostrato un esempio del campo di temperature al termine della passata n. 7 mentre il rilievo completo è riportato in appendice. In particolare il Software permette di visionare:

- Termogramma con le tre linee di profilo termico (L01, L02, L03) corrispondenti alla posizione delle termocoppie
- Profilo di temperatura in funzione del tempo dello spostamento della testa saldante (20 min)
- Istogramma delle temperature lungo una delle linee
- Profilo termico lungo le tre linee nella direzione trasversale al movimento della testa saldante

Per associare i punti immagine a posizioni precise del campione è necessario operare la calibrazione geometrica della tele camera. In alcuni casi, come nell'esempio di Figura 15, possono essere sufficienti costruzioni semplificate.

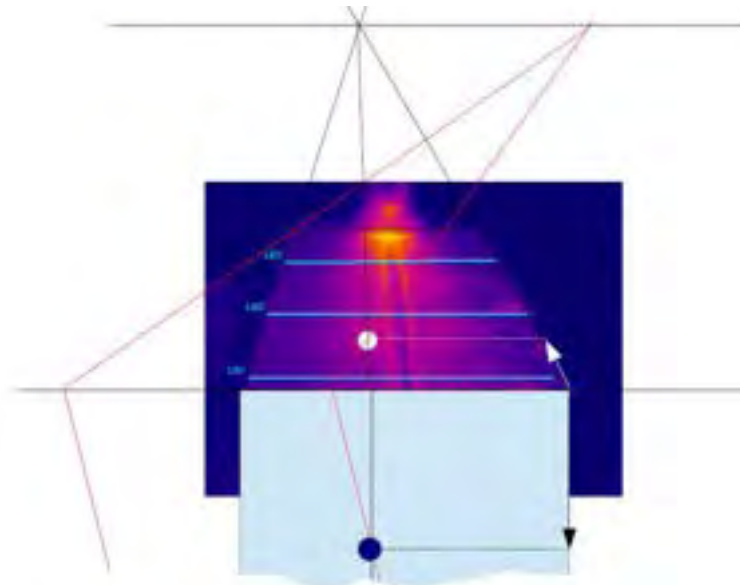
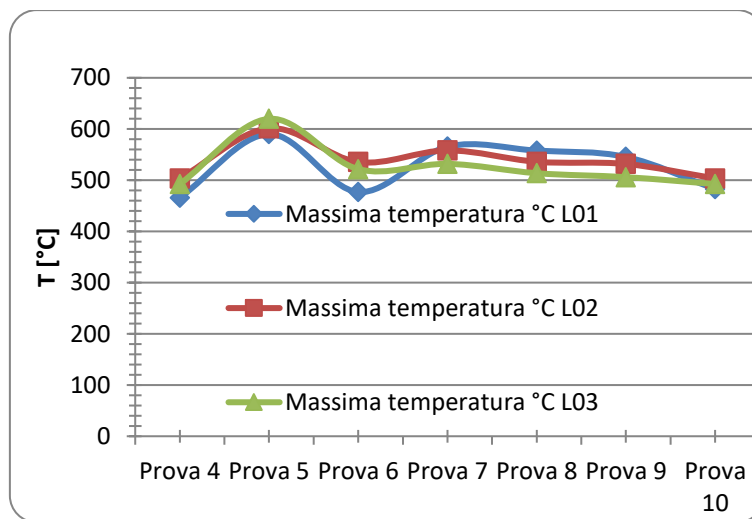


Figura 15: restituzione prospettica

La termografia è stata utilizzata per il monitoraggio della temperatura della lamiera durante la saldatura. E' stata utilizzata la funzione di ripresa Time-lapse con un fotogramma ogni 10 sec. Questa funzione di ripresa permette di monitorare l'intera piastra riducendo le dimensioni del file di misura rispetto ad un video di 20 minuti.

La serie dei fotogrammi di ogni passata di saldatura viene analizzata con il software **ThermaCAM Research Professional** che permette di inserire punti, linee o aree di misura sui termogrammi estraendo i dati termici sia del singolo sia da tutta la serie.



| | Massima temperatura °C L01 | Massima temperatura °C L02 | Massima temperatura °C L03 |
|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Prova 4 | 465.961 | 503.477 | 492.606 |
| Prova 5 | 590.084 | 601.276 | 619.901 |
| Prova 6 | 476.930 | 535.484 | 521.581 |
| Prova 7 | 565.508 | 558.244 | 531.957 |
| Prova 8 | 557.757 | 535.993 | 513.693 |
| Prova 9 | 545.419 | 531.700 | 505.986 |
| Prova 10 | 482.692 | 503.477 | 492.606 |

Figura 16: monitoraggio della temperatura massima lungo le tre linee di misura termografiche

2.2 MIG Manuale

Prove di caratterizzazione energetica sono state effettuate sul generatore Esab mod. Warrior 400i. I parametri sono riportati nella successiva tabella. Il generatore è stato testato in modalità MIG anche se è un moderno generatore multi caratteristica (MIG/TIG/MMA).



| Velocità filo [m/min] | Corrente Letta [I] | Tensione Impostata [V] |
|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 3 | 105 | 20.00 |
| 5 | 180 | 20.00 |
| 8 | 210 | 20.00 |
| 10 | 200 | 15.50 |
| 10 | 260 | 28.00 |
| 8 | 230 | 28.00 |
| 5 | 180 | 28.00 |
| 3 | 120 | 28.00 |
| 1.5 | 70 | 20.00 |

Materiale d'apporto: filo AISI316 diam. 1,2 mm

Figura 17: gen. MIG Esab Warrior 400i e parametri di prova

Com'è noto la modalità di azione del MIG è completamente diversa dal TIG: l'arco scocca dal filo stesso e la regolazione non è relativa alla corrente ma alla tensione (e alla velocità filo). La corrente segue un andamento complesso che corrisponde alla diversa distanza filo pezzo che può anche annullarsi periodicamente (regime short arc). Le curve V-I sono quindi molto differenti da quelle registrate nel TIG, con dinamiche rapide che richiedono tutta la prontezza del sistema di acquisizione dati, per essere correttamente valutate. Le prove sono servite a caratterizzare il rendimento del generatore depositando alcuni cordoni in condizioni controllate ma senza produrre un giunto vero e proprio.

Di seguito sono riportate alcune forme d'onda relative al test con $v_{\text{filo}}=10$ m/min e $V=28$ V.

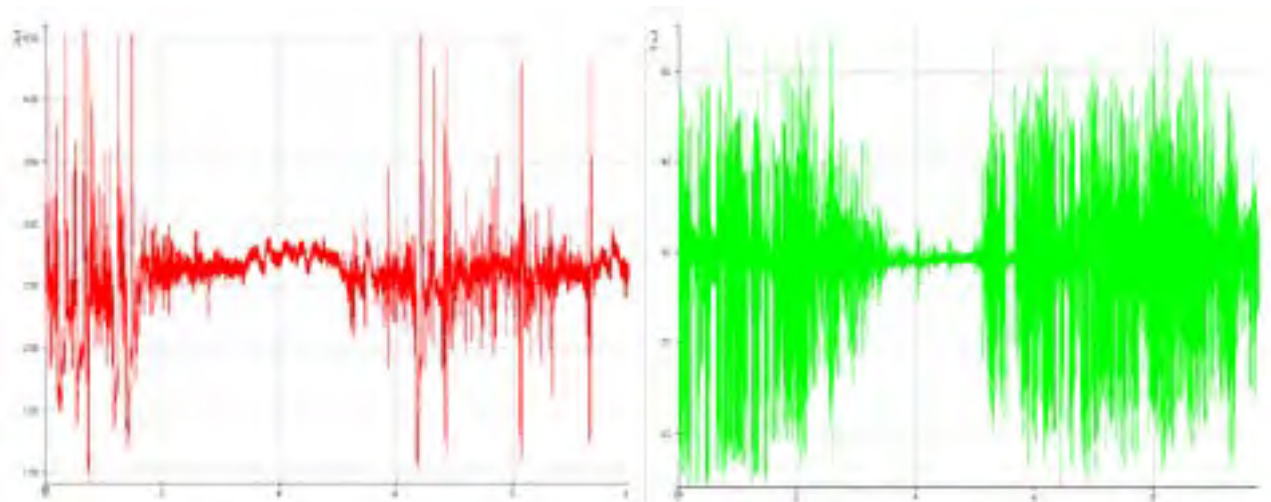


Figura 18: forme d'onda di corrente (sin) e tensione, test a potenza elevata

La corrente si attesta intorno al valore 260 A mentre la tensione ha sensibili oscillazioni di andamento apparentemente caotico.

La potenza in uscita cioè dell'arco ha invece la forma di Figura 19, con un valore medio intorno a 8 kW. Il prodotto dei valori medi di tensione e corrente d'arco è $28 \times 260 = 7,3$ kW, in accordo. Per quanto riguarda l'assorbimento esso è mostrato in Figura 20. Risulta difficile la stima della media che comunque non è distante dai 15 kW. Si avrebbe quindi un rendimento del generatore del 53 %. Il software di misura elabora le potenze medie dell'arco e assorbita che sono rispettivamente 7679 W e 14570 W, con un rendimento del 52,7 %.

Il secondo test presentato, a potenza ridotta, ha un'impostazione molto diversa: $v_{\text{filo}} = 1,5$ m/min e $V = 20$ V. L'arco ha un andamento più regolare con periodici picchi dovuto al contatto del filo col pezzo che determina l'istantaneo incremento di corrente, la fusione del filo e l'interruzione dell'arco che poi riprende con un picco di tensione (Figura 21).

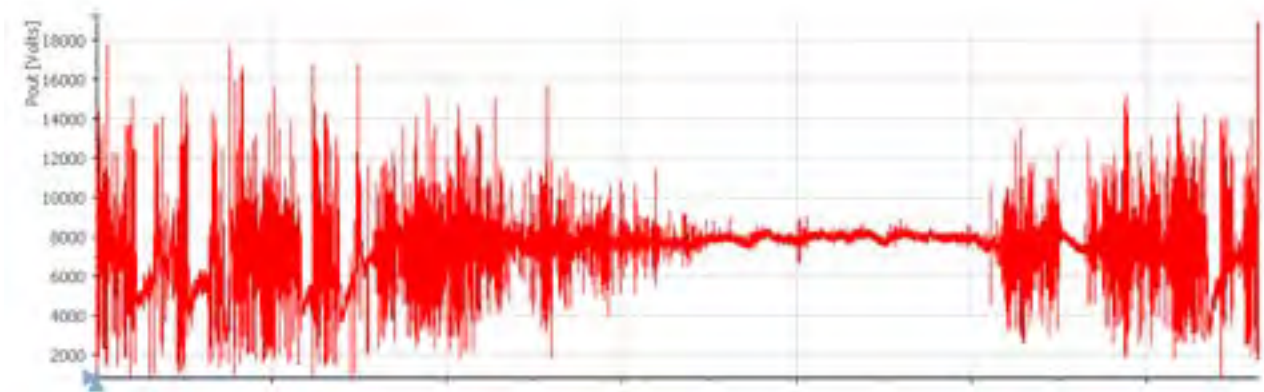


Figura 19: potenza in uscita (arco MIG), test a potenza elevata

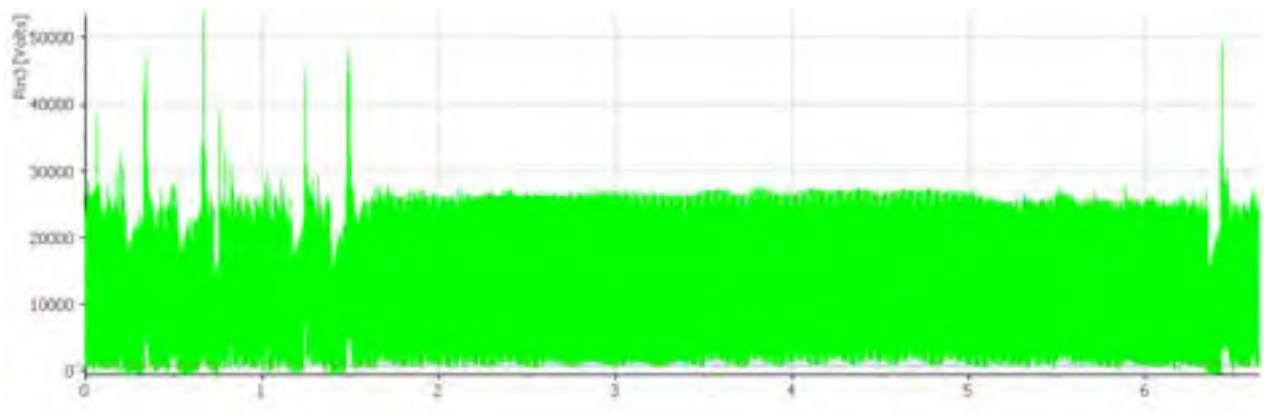


Figura 20: andamento della potenza assorbita, test a potenza elevata.

La potenza assorbita (Figura 22) risente anch'essa del regime di funzionamento ipotizzato.

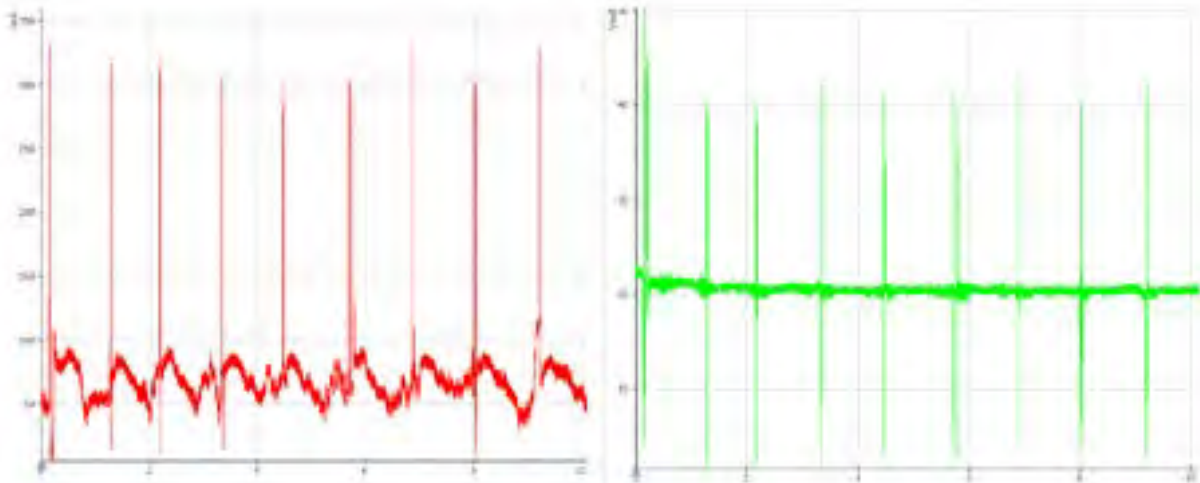


Figura 21: forme d’onda dell’arco MIG a potenza ridotta, corrente (sin) e tensione

Il bilancio energetico è il seguente: potenza media in uscita 1405 W, assorbimento medio 2885 W. Il rendimento scende leggermente dal 52,7 % precedente al 48,7 %.

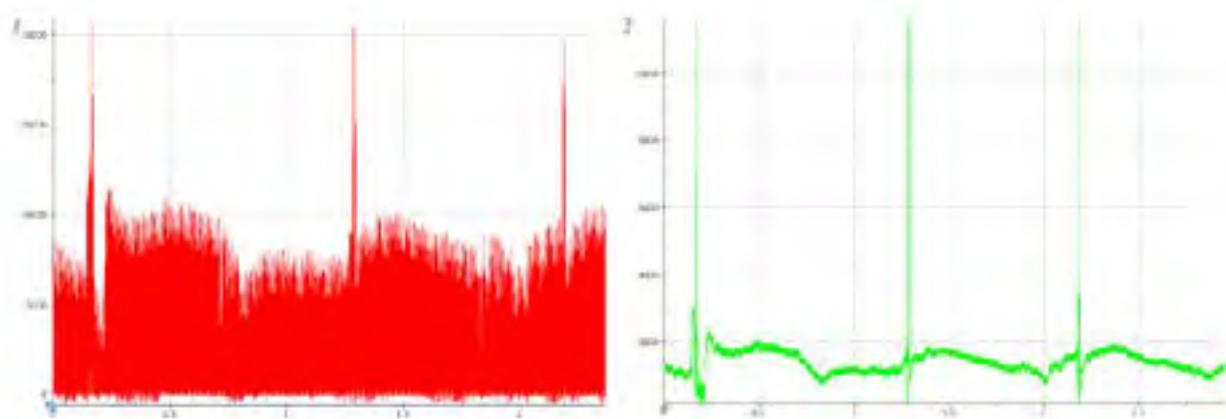


Figura 22: test MIG a potenza ridotta, assorbimento

Quindi i rendimenti elettrici medio del generatore vanno da 52,7 a 48,7 % da condizioni medie di utilizzo a condizioni di basso utilizzo che corrispondono alle modalità di utilizzo “spray arc” e “short arc”, entrambe utilizzare rispettivamente per le fasi di riempimento e di imbastitura mediante tecnologia di saldatura MIG.

Come anticipato il generatore ESAB è un moderno generatore multi caratteristica che permette una grande flessibilità per l’utente potendo effettuare con lo stesso generatore sia saldatura a filo (MIG/MAG) sia saldatura ad elettrodo infusibile (TIG) che saldatura ad elettrodo (MMA - Manual Metal Arc).

Tuttavia, analizzando i dati di targa (Figura 23) si osserva come in generale il dato dichiarato che corrisponde a quello calcolato riporta un rendimento ben più alto rispetto a quanto rilevato.

In questo caso le differenze sono dell’ordine del 35% inferiori.

Le prove termografiche sull’apparecchiatura. Se pur schermata dal guscio hanno mostrato come la stessa durante in funzionamento abbia portato la temperatura da quella iniziale di circa 19 °C a temperature di guscio mediamente superiori ai 32°C dopo un tempo di impiego relativamente limitato (circa 20 minuti).

| Warrior 400i CC/CV | |
|---|---------------------------------------|
| Tensione di rete | 380-415 V $\pm 10\%$, 3~ 50/60 Hz |
| Alimentazione di rete S_{scmin} | 6,4 MVA |
| Alimentazione di rete Z_{max} | 0,025 Ω |
| Corrente primaria I_{max} | |
| MIG/MAG | 28 A |
| TIG | 23 A |
| MMA | 28 A |
| Potenza in assenza di carico in modalità risparmio energetico 6,5 min. dopo la saldatura | 30 W |
| Intervallo di regolazione | |
| MIG/MAG | 16 A /15 V - 400 A /34 V |
| TIG | 5 A /10 V - 400 A /26 V |
| MMA | 16 A /20 V - 400 A /36 V |
| Carico ammesso con MIG/MAG | |
| Tempo caldo di saldatura 60% | 400 A / 34 V |
| Tempo caldo di saldatura 100% | 300 A / 29 V |
| Carico ammissibile in TIG | |
| Tempo caldo di saldatura 60% | 400 A / 26 V |
| Tempo caldo di saldatura 100% | 300 A / 22 V |
| Carico ammissibile in MMA | |
| Tempo caldo di saldatura 60% | 400 A / 36 V |
| Tempo caldo di saldatura 100% | 300 A / 32 V |
| Fattore di potenza alla corrente massima | 0,91 |
| Efficienza alla corrente massima | 88% |
| Tipo di elettrodo | Basico Rutilico Cellulosico |
| Tensione a circuito aperto senza la funzione VRD | 78 V CC |
| Potenza apparente alla corrente massima | 18,0 kVA |
| Potenza attiva alla corrente massima | 16,4 kW |

Efficienza del generatore valutabile come rapporto fra energia disponibile al secondario in condizioni di saldatura duty cycle 100%

100% d.c : 300 A
Working Voltage : 29 V

Welding Power: 300 X 29 = 8,700 kW

La potenza continua assorbita al primario in queste condizioni non fornita, come dato di fabbrica, a ma potremmo stimarla al 60% della massima circa 9.84 kW

Il rendimento elettrico calcolato è di circa:
 $\eta = 88\%$.

Va fatto osservare come i dati di targa portano ad un rendimento dell' 88% alla massima corrente.

Questo viene calcolato per il processo migliore nelle condizioni di Duty cycle di massima corrente

MMA DC 60%
I= 400 A; V= 36 V
Pw=14,4 kW

In condizioni di massima corrente è dichiarato un Pa=16,4 kW
 $\eta = 87,8\%$.

Figura 23: Valutazione del rendimento teorico del generatore a partire dai dati di targa

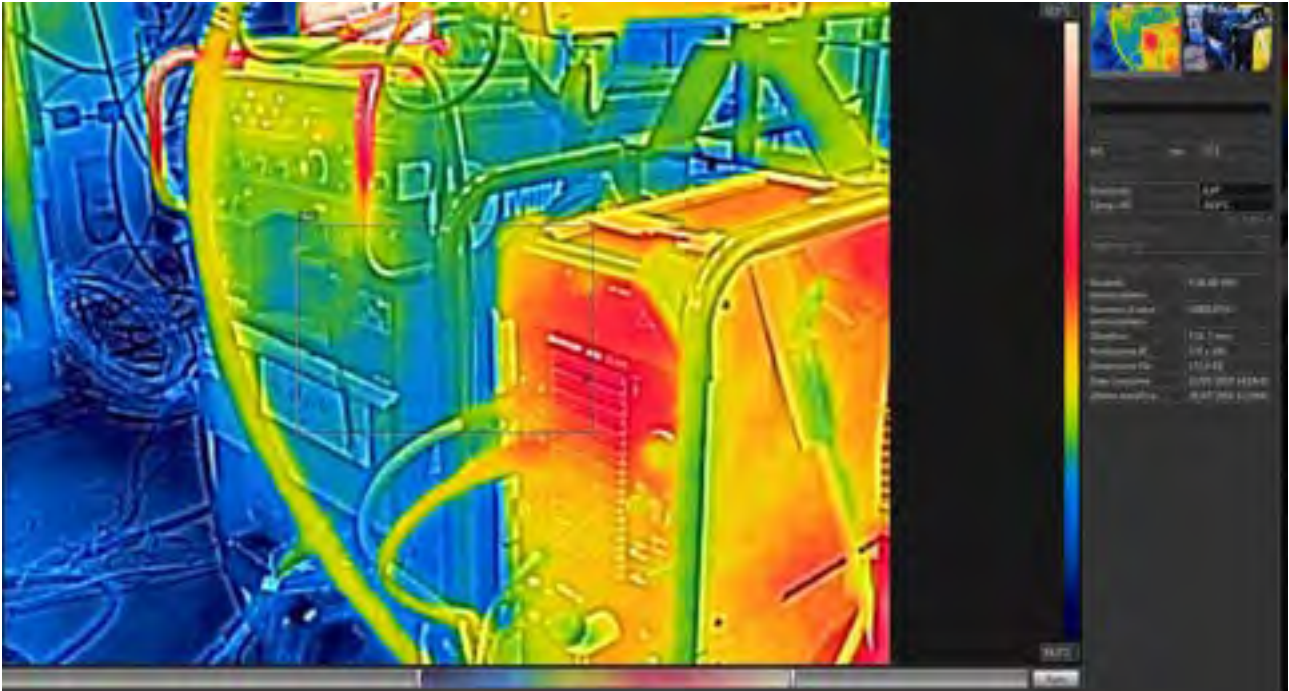


Figura 24: termografia della saldatrice ESAB Warrior 4000i

2.3 Misura TIG manuale e opportunità di aggiornamento del quadro mobile

Al fine di effettuare una comparazione con generatori di epoca diversa, è stato chiesto di utilizzare un generatore TIG di vecchia generazione.

Figura 25 mostra le foto, i dati di targa e l'elenco delle prove effettuate rilevate dai display di macchina.



| Corrente [I] | Tensione letta [I] | P Media calcolata [W] |
|--------------|--------------------|-----------------------|
| 80 | 10,50 | 840,00 |
| 120 | 12,50 | 1500,00 |
| 160 | 14,30 | 2288,00 |
| 200 | 15,50 | 3100,00 |
| 240 | 19,00 | 4560,00 |

Figura 25: Generatore Miller Syncrowave 350 LX

Non è stato possibile purtroppo acquisire i dati attraverso il Box di misura che ha subito un'avaria con la rottura di una delle schede di acquisizione dati. Infatti, il dispositivo NI 9225, collegato ai morsetti della torcia per misurarne la tensione, è stato interessato da una sovratensione impulsiva di elevata intensità, che l'ha danneggiato.

La causa del guasto non è determinabile con sicurezza in quanto potrebbe trattarsi sia di un malfunzionamento del generatore, che dell'effetto dell'innesco d'arco con impulso ad alta tensione/frequenza, che nelle precedenti misure sul generatore Fronius non era presente.

I modi principali per stabilire un arco sono due:

- in un caso l'elettrodo è messo a contatto col materiale impostando una ridotta ddp e poi separato. Nel momento del distacco si crea un campo elettrico sufficientemente intenso in grado di rompere il dielettrico e innescare l'arco. Questo sistema è preferito nelle applicazioni manuali ma, se eseguito senza le necessarie accortezze, può causare contaminazione del pezzo da frammenti di tungsteno e la rapida usura dell'elettrodo stesso.
- Nel TIG automatico si può mantenere l'elettrodo a distanza dal pezzo e iniettare nel circuito una ddp aggiuntiva ad alta tensione e frequenza (kV, MHz) ma a bassa energia che ionizza il gas davanti all'elettrodo e permette l'avvio dell'arco di lavoro.

Questa seconda modalità è preferita nelle applicazioni automatiche ma ha lo svantaggio di generare forti disturbi elettro-magnetici che possono interferire col normale funzionamento di diverse apparecchiature elettroniche circostanti, se non adeguatamente protette. Nell'applicazione TIG con il robot la Walter Tosto ha sviluppato speciali procedure e dispositivi per innescare l'arco con il contatto momentaneo dell'elettrodo ottimizzando la procedura in modo da garantire la qualità del giunto e un numero consistente di partenze senza usura dell'elettrodo.

Al fine di ottenere una maggiore protezione del sistema di misura da eventi della medesima natura, è stata progettata e realizzata una modifica del circuito d'interfaccia alla tensione d'arco utilizzando un trasduttore di tensione (LEM LV25) associato a una scheda diversa (National Instruments NI-9205). Oltre alla maggiore robustezza del sistema di misura tale soluzione ha il vantaggio di rendere disponibili ulteriori canali di ingresso per monitorare più di un processo alla volta e di semplificare la gestione software dell'acquisizione dati eliminando alcune difficoltà di sincronizzazione tra schede di tipo diverso [6].

2.4 Conclusioni sulle attività presso Walter Tosto spa

Le attività hanno permesso un collaudo completo del quadro mobile per misure di efficienza che è stato utilizzato con impianti e tecniche di saldatura diversi, fornendo risultati consistenti, via via validati mediante confronto con strumentazione standard e/o con il cospicuo know how dell'impresa ospitante. Le sessioni di misura hanno generato una mole notevole di dati che il SW predisposto del partner di ricerca, Univ. Roma TorVergata, ha gestito in modo efficiente. La sessione principale di misura ha comportato l'acquisizione continua (al tasso di campionamento di 10 kHz) di ciascuna passata di saldatura della durata minima di 20 minuti per un totale di 2h e 20 min di dati, senza considerare le pause tra una passata e l'altra. La gestione di quantità considerevoli di dati (dell'ordine del Gigabyte) ha suggerito modifiche del SW per agevolare l'accesso e l'interpretazione dei dati.

3 UniSalerno, attività relative alla caratterizzazione di sorgenti e processi di saldatura laser industriali

Nell'università degli studi di Salerno sono presenti due installazioni di saldatura Laser, gestite dal Dipartimento di Ingegneria Industriale. Ai primi contatti e alla conseguente manifestazione di interesse a partecipare alle attività sull'efficienza in saldatura, è seguita un'attenta analisi preliminare delle caratteristiche degli impianti in quanto si voleva affiancare alla caratterizzazione energetica, quella ottica, come effettuato nelle precedenti annualità in Enea-Casaccia sul laser IPG-4000.

I due impianti sono così configurati:

| Impianto | Laser | tipo | Potenza max (kW) | accessori |
|----------|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| "Teseo" | Trumpf TruDisk 4002 | Nd:YAG a disco | 4 | Robot antropomorfo |
| "Elios" | IPG YLS-10000 | Fibra all'itterbio | 10 | Posizionatore 5 assi |

In entrambi i casi alle sorgenti laser sono associati chiller di adeguata capacità per dissipare il calore generato internamente. Entrambe le macchine sono a stato solido, con pompaggio a diodi e lunghezza d'onda di emissione di 1 μm ca.; si tratta di macchinari di concezione attuale che si caratterizzano per rendimenti sensibilmente maggiori rispetto ai laser allo stato solido della "generazione" precedente che avevano in generale efficienze minori al 10%. La diagnosi dei consumi elettrici è stata effettuata inserendo il quadro mobile (Figura 26, Figura 27, dx) nelle linee di alimentazione di laser e chiller.



Figura 26: UniSalerno, impianto Teseo, (SX) robot, testa di focalizzazione e diagnostica laser (Primes FM/PM), (DX) sorgente e quadro mobile Enea.

La saldatura avviene focalizzando sul pezzo il fascio: ciò si ottiene mediante lenti o specchi, componenti di precisione che vengono a trovarsi a breve distanza dalla zona di processo che è spesso sede di intensa

produzione di vapori e/o proiezione di particelle di metallo fuso. Per la protezione dei componenti ottici di focalizzazione è richiesto un flusso piuttosto intenso di aria compressa, filtrata, che è stato misurato con il flussimetro di massa contenuto nel quadro. L'impianto Elios inoltre utilizza l'aria per bilanciare il peso della traversa mobile (asse "z") del posizionatore quindi nel consumo entra anche questa aliquota fissa.



Figura 27: UniSalerno, imp. Elios (SX), collegamenti per misura assorbim. Laser e chiller e flusso aria (DX).

Per la valutazione della potenza utile dei laser è stato impiegato il calorimetro Primes Power Monitor che consente la misura fino a 8 kW. Lo strumento è associato al dispositivo Focus Monitor che effettua il campionamento del fascio focalizzato, a diverse distanze, per ricostruirne la caustica fornendo informazioni complete sulla qualità del laser e delle ottiche. La diagnosi è limitata dalla soglia di danneggiamento della sonda e pertanto la potenza applicata è stata minore della massima ma comunque significativa. Le prove di potenza sono consistite in rampe a gradini a livelli crescenti. I risultati, in termini di rendimento di due laser sono riassunti nelle due figure seguenti.

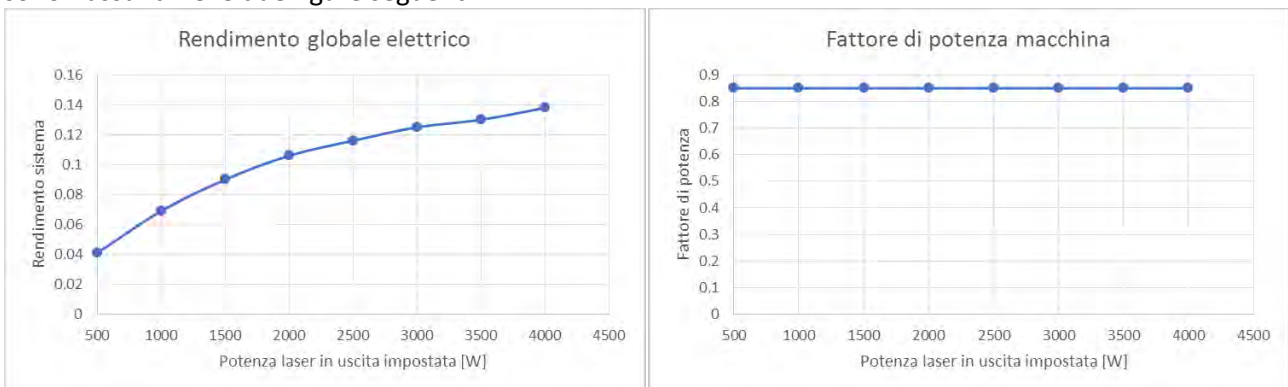


Figura 28: caratterizzazione consumi laser a disco da 4 kW

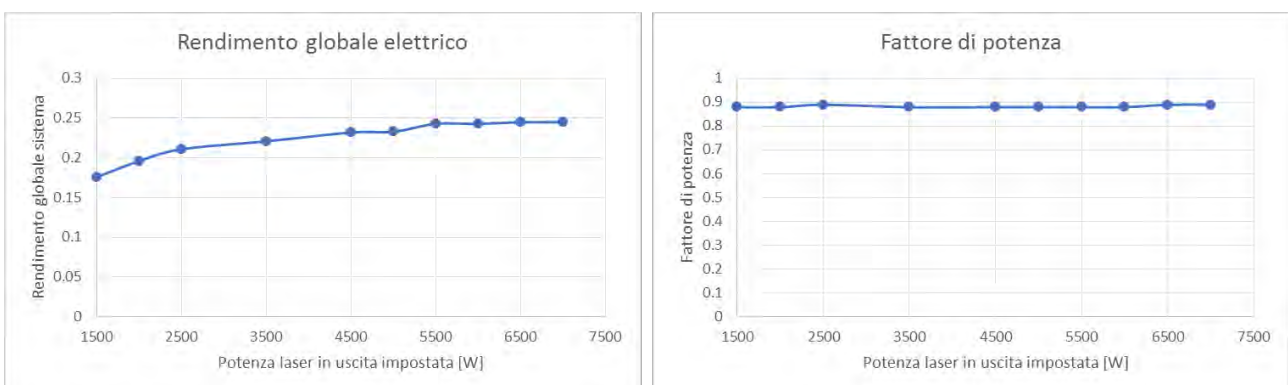


Figura 29: consumi laser in fibra da 10 kW

Come atteso il rendimento del laser in fibra si attesta su valori più alti (circa doppi) e abbastanza costanti. La caratterizzazione ottica con Focus Monitor ha permesso di verificare la corrispondenza con i dati nominali di divergenza e qualità del fascio. È stato anche valutato il fenomeno del *focus shift* che può causare un cambiamento delle condizioni di lavoro durante la saldatura e un peggioramento dell'accoppiamento dell'energia con il pezzo. L'impianto in fibra denuncia un focus shift di circa 0,4 mm per kW, maggiore del disk laser (0,1 mm/kW).

Tale fenomeno è generalmente da imputarsi a componenti ottici che durante la saldatura tendono a riscaldarsi, per di più in modo non uniforme ad esempio a causa di contaminazione superficiale dovuta a fumi e vapori di processo.

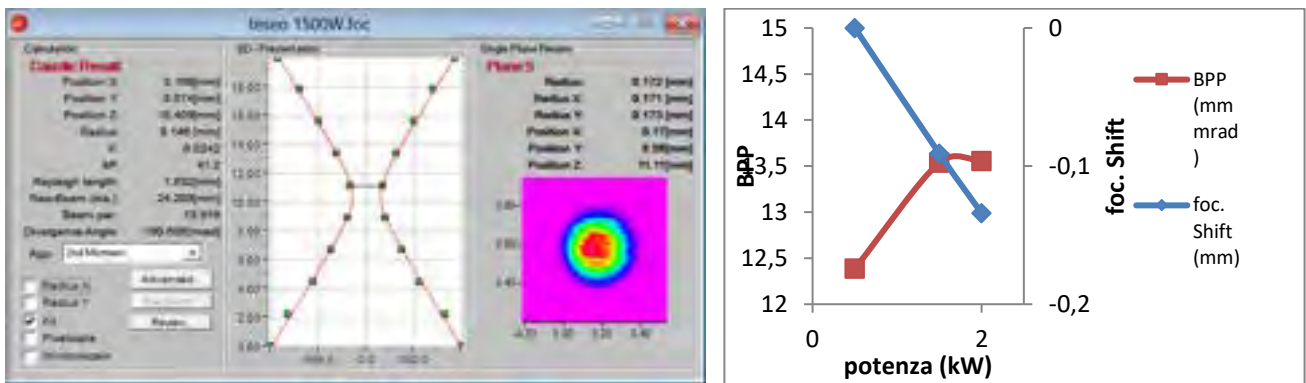


Figura 30: diagnosi fascio laser sorgente a disco da 4 kW (imp. Tesco)

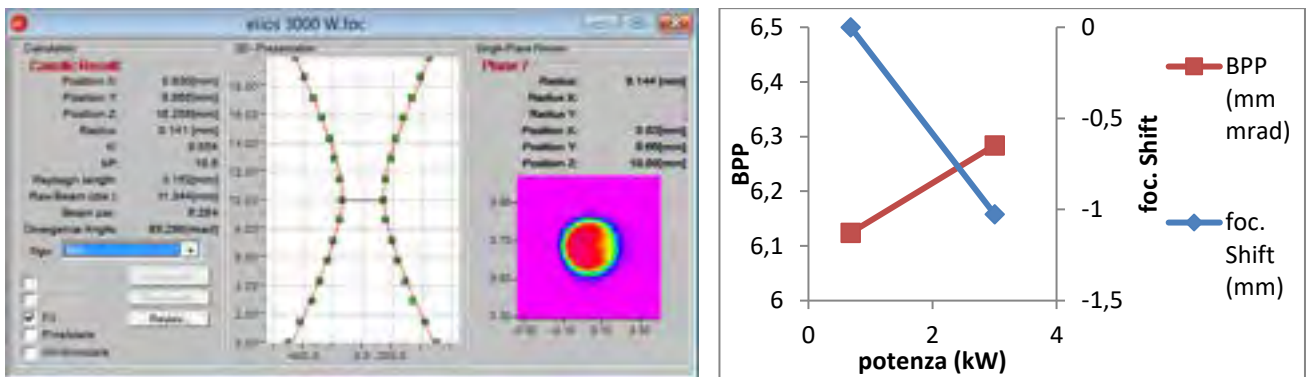


Figura 31: diagnosi laser in fibra da 10 kW (Elios)

Per quanto riguarda i chiller le loro caratteristiche di consumo mostrano un'alternanza più o meno rapida (a seconda della prestazione richiesta, al variare della potenza laser) tra due livelli: quello basso dovuto alla sola pompa di circolazione dell'acqua di raffreddamento, l'altro a compressore e ventilatore. Se ne ha un esempio nella figura seguente relativa alla rampa di misura di potenza del laser da 10 kW. In alto a sinistra la potenza utile (calorimetro), a destra l'assorbimento elettrico del laser, in basso quello del chiller: il fattore di utilizzo cresce all'aumentare della potenza laser richiesta.

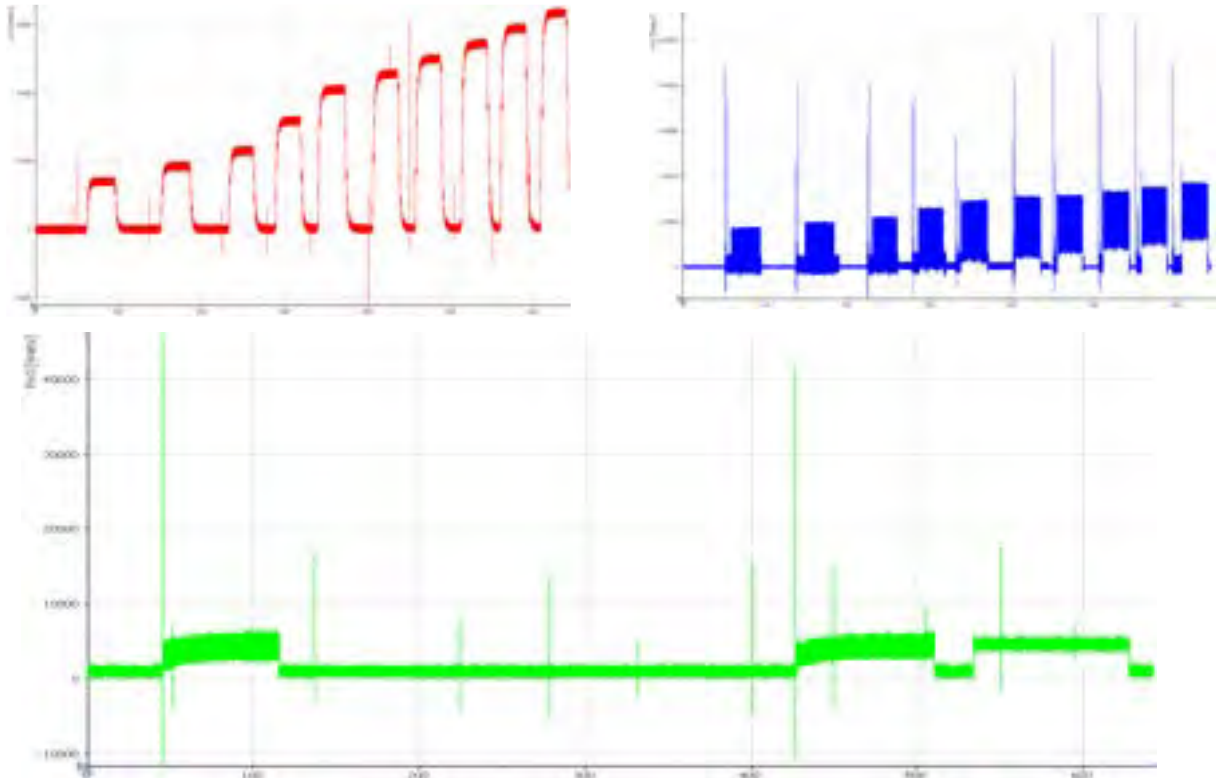


Figura 32: rampa di potenza YLS-10000. Potenza utile (alto, dx), assorbita di laser (sx) e dal chiller (basso)

Sono quindi state effettuate prove di saldatura su lamiera di acciaio da costruzione di spessore 4 mm. La tabella seguente confronta i parametri tipici utilizzati.

| Impianto | S (mm) | V (mm/s) | P_L (kW) | P_{aL} (kW) | P_{aCh} (kW) | P_{aTot} (kW) ¹ | FEE (mm ² /kJ) |
|------------------|--------|----------|------------|---------------|----------------|------------------------------|---------------------------|
| Teseo(disk l.) | 4 | 17 | 3 | 24 | 8 | 32 | 2,13 |
| Elios (fiber l.) | 4 | 25 | 3 | 13,3 | 4,4 | 17,7 | 5.65 |

Come prevedibile il laser a disco è penalizzato nel confronto dal rendimento più basso che comporta anche un impegno maggiore del chiller.

Il FEE del laser Elios è in accordo con quanto rilevato nella precedente annualità nel laboratorio di Enea-Casaccia con laser YLS-4000: su materiali e condizioni di lavoro variabili si è rilevato un FEE medio intorno a 7 mm²/kJ.

Infine, per riguarda i gas di processo, si è misurata la portata di aria, il cui consumo ha importanti ricadute nella gestione economica ed energetica d'impianto (Figura 33).

Ai fini del contenimento del consumo d'aria e in generale di gas possono applicarsi diverse "buone pratiche" che includono la corretta manutenzione d'impianto, la riduzione al minimo dei percorsi tra valvola e punto di utilizzo, scelta della corretta pressione di alimentazione, controllo della portata. Si nota ad esempio che in Elios la portata ha un andamento decrescente mentre in Teseo è più regolare.

¹ Stima di assorbimento medio basato su C.O.P.=3.

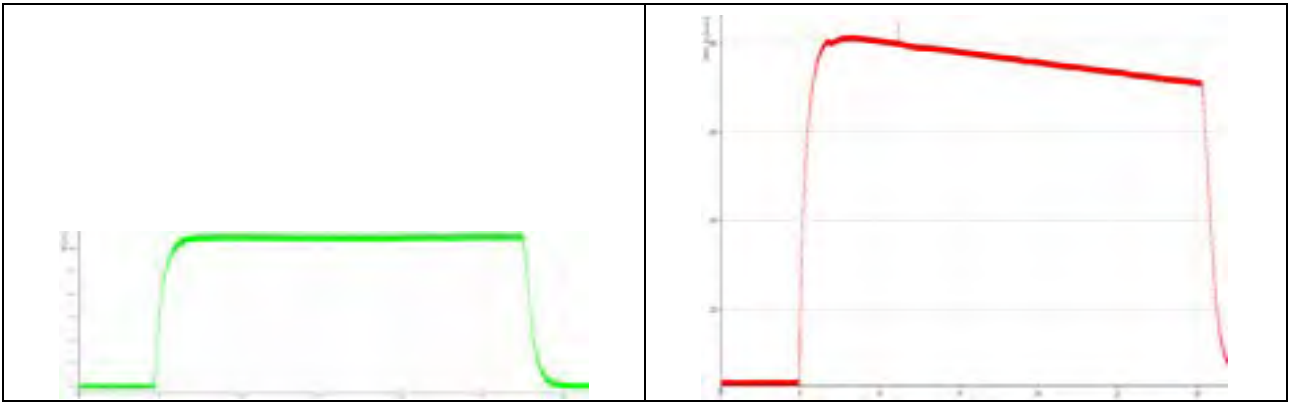


Figura 33: portata aria compressa in saldatura. sx imp. Teseo (32 l/min), dx Elios (max 80 l/min)

3.1.1 Misure termografiche

Le prove termografiche sono state eseguite prima e dopo l'uso del sistema che è composto da diversi armadi elettrici e parti meccaniche. Durante le saldature non è stato possibile riprendere le immagini o i filmati direttamente perché la luce laser e gli schizzi della fusione avrebbero compromesso gli obiettivi della macchina termografica.

3.1.2 Laser TRUMPF TruDisk



Figura 34: Armadi elettrici del laser TRUDISK



Figura 35: Monitoraggio degli armadi elettrici di potenza del laser TRUMPF prima dell'emissione

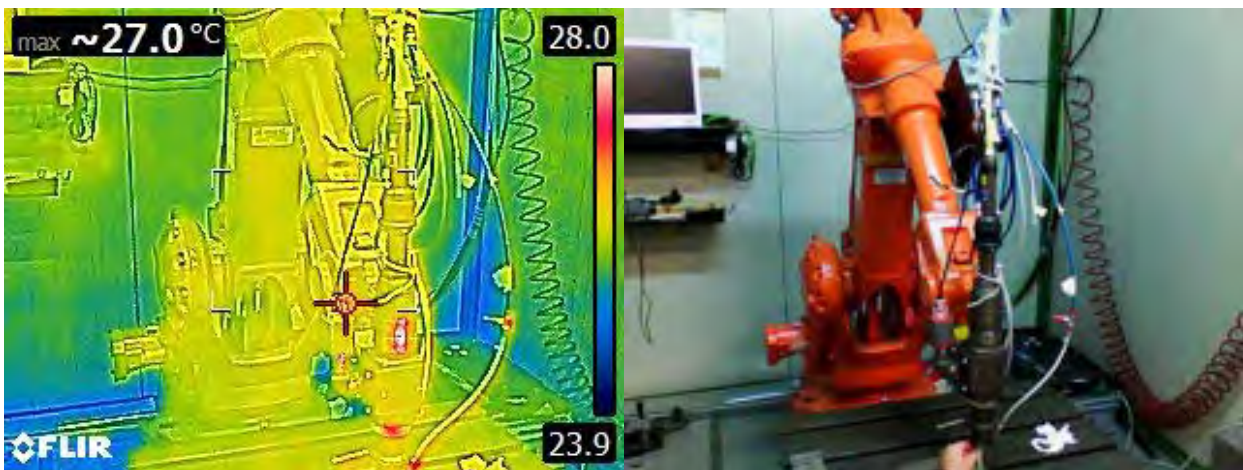


Figura 36: Monitoraggio degli armadi elettrici di potenza del laser TRUMPF prima dell'emissione

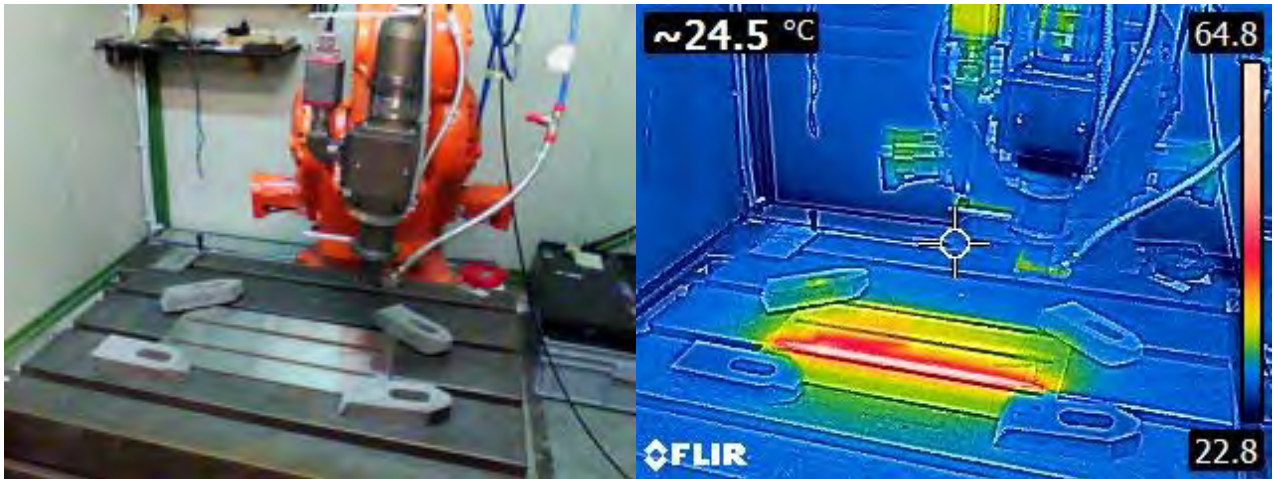


Figura 37: Monitoraggio subito dopo un test di saldatura

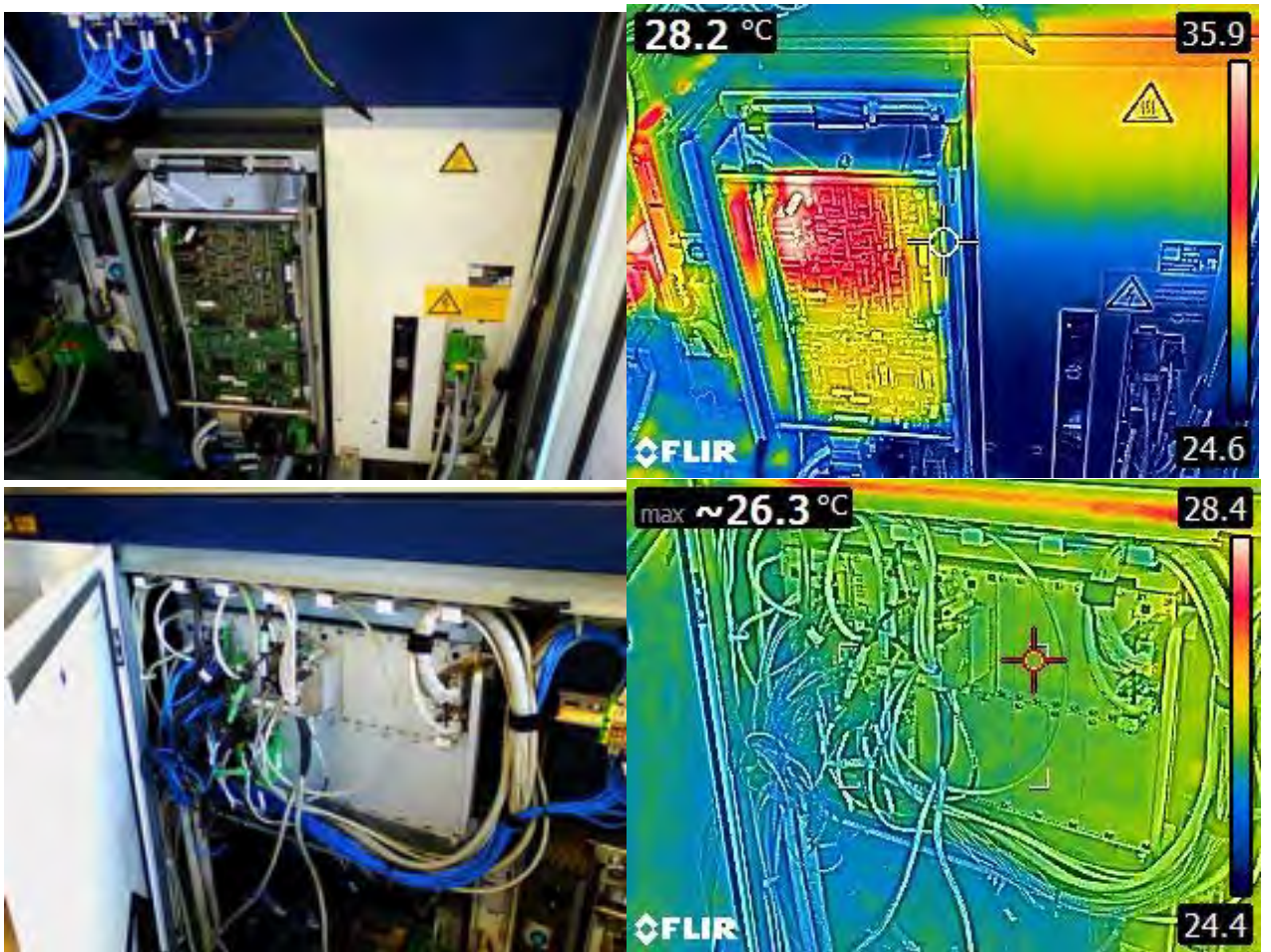


Figura 38: Monitoraggio degli armadi elettrici di potenza del laser TRUMPF dopo l'emissione

| | Temp Prima | Temp Dopo | Differenza |
|-------------------------------------|------------|-----------|------------|
| Armadio Laser | 27,9 | 35,9 | 8 |
| Movimentazione braccio antropomorfo | 29,4 | 33,8 | 4,4 |
| Chiller Esterno | 24,8 | 38,8 | 14 |
| Testa Laser | 29,1 | 31,5 | 2,4 |

Tabella 2: Confronto delle temperature prima e dopo la saldatura laser

3.1.3 Laser IPG YLS-10000 KW con movimentazione TLW 2.1

Anche su questo sistema sono state effettuati rilievi termografici sui principali armadi di potenza sia del sistema di movimentazione sia del generatore laser. Di seguito alcuni esempi di rilevamenti.



Figura 39: Monitoraggio degli armadi elettrici di potenza del Sistema di movimentazione TLW 2.1



Figura 40: Sistema Sorgente laser e Chiller

In particolare, le prove termografiche sulla testa di saldatura durante i test di monitoraggio della potenza laser hanno permesso di evidenziare un riscaldamento anomalo dovuto a un deflettore che non permetteva il passaggio completo del laser.

Quindi anche se il laser di puntamento era visibile, il fascio laser reale non passava nella sua interezza ma colpiva lateralmente il sistema “spingifilo” che portava ad un riscaldamento anomalo, se pur di pochi gradi, della testa che difficilmente sarebbe stato evidenziato in assenza di termocamera (vedi Figura 41).

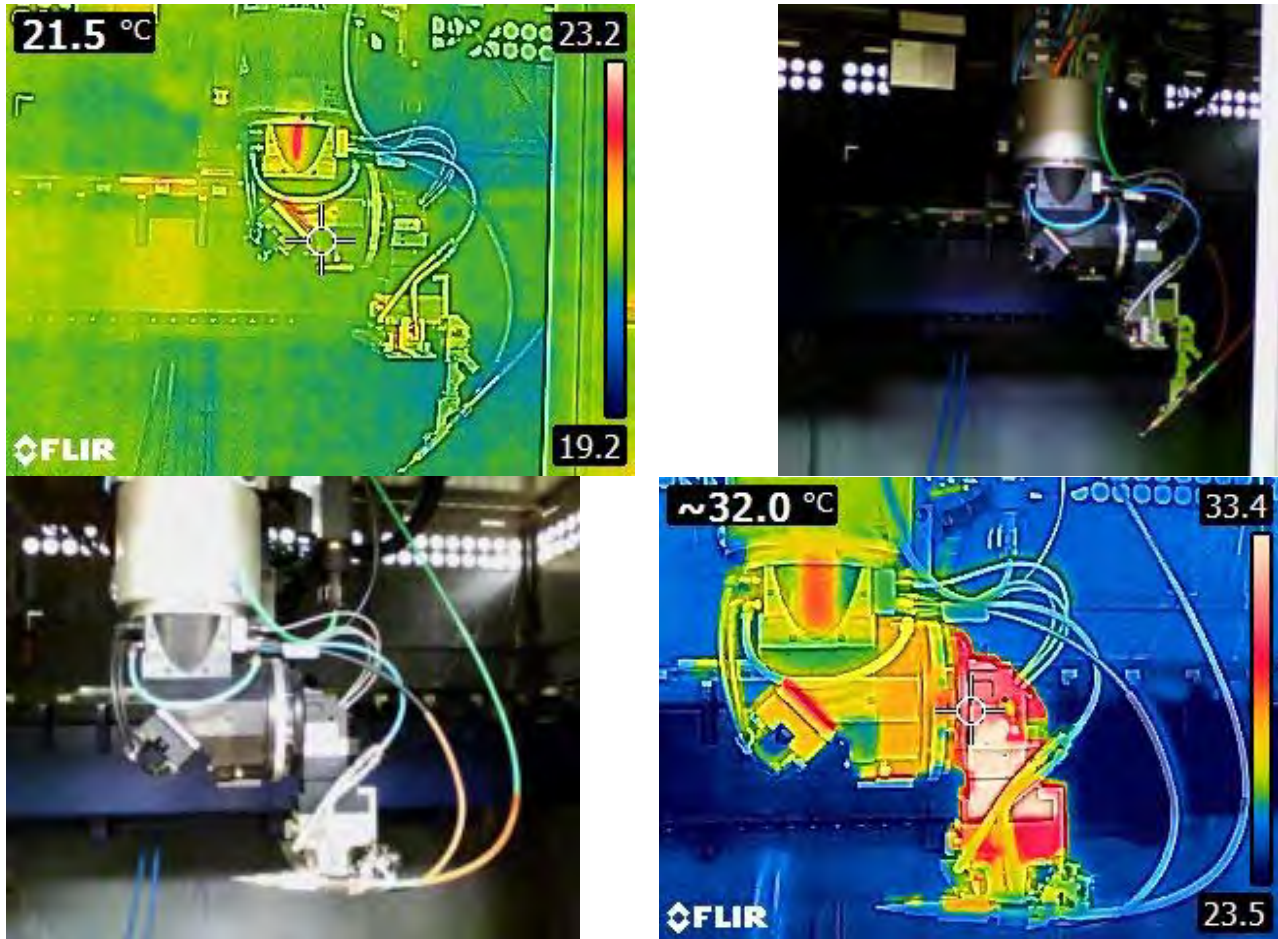


Figura 41: Analisi Termografica della testa di saldatura Laser prima e dopo diagnostica laser.

Anche in questo caso le misure sono state effettuate prima e dopo i test di caustica e di saldatura laser i risultati sono riassunti nella tabella seguente

| | T °C Prima | T °C Dopo Caratterizzazione | T °C dopo Saldatura lamiera | T °C Differenza prima e dopo |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Armadio Movimentazione | 25,1 | 47,4 | 50,0 | 24,9 |
| Armadio Laser | 23,9 | 36,2 | 34 | 10,1 |
| Chiller Interno | 23,8 | 38,3 | 36 | 12,2 |
| Testa Laser | 23,2 | 33,4 | 26,7 | 3,5 |

Tabella 3 Confronto delle temperature prima e dopo la saldatura laser

3.2 Conclusioni su attività laser

Le attività sui laser hanno comportato un impegno abbastanza sostenuto di apparecchiature e personale poiché si sono presi in considerazione tutti gli aspetti: consumo energetico di laser e chiller, consumo di gas di processo, misura di potenza e di qualità ottica. Molto importante, per attività sul campo, risulta essere la fase di acquisizione delle informazioni tecniche sul tipo di macchine, il loro allaccio e tutti i servizi necessari. Di punto di vista specifico dell'efficienza si conclude che:

- Pur avendo i laser allo stato solido sostituito quasi completamente i laser a gas (CO₂) in saldatura, permangono differenze notevoli di rendimento in ragione delle varie concezioni di macchina;
- Le sorgenti a brillantezza elevata (basso BPP) tendono anche ad avere i rendimenti migliori;
- I fluidi di processo (gas, aria) possono dare un contributo all'efficienza del processo;
- Sui fiber laser si confermano i valori di FEE trovati precedentemente (6,0÷7,0 mm²/kJ).

4 Caratterizzazione saldatura TIG presso Enea - Casaccia

Le prove miravano a caratterizzare la tecnica TIG automatica. L'impianto, in dotazione al laboratorio SSPT-PROMAS-MATPRO, si compone di:

- Generatore Air Liquide mod. Nertamatic 450 per TIG e plasma:
 - o Generatore di corrente del tipo chopper, a transistor;
 - o Corrente di saldatura: da 3 a 450 A / 100 %;
 - o Tensione a vuoto: 110 V;
 - o Circuito arco pilota: 7 - 25 A / 100 %;
 - o Alimentazione primaria: trifase 50-60 Hz 230 / 400 / 415 / 440 V, assorbimento max 32,2 A a 400 V.
- Posizionatore per saldatura a tre assi, corsa 550×550×300 mm;
- Ausiliari per distribuzione gas di assistenza (argon, elio, loro miscele).

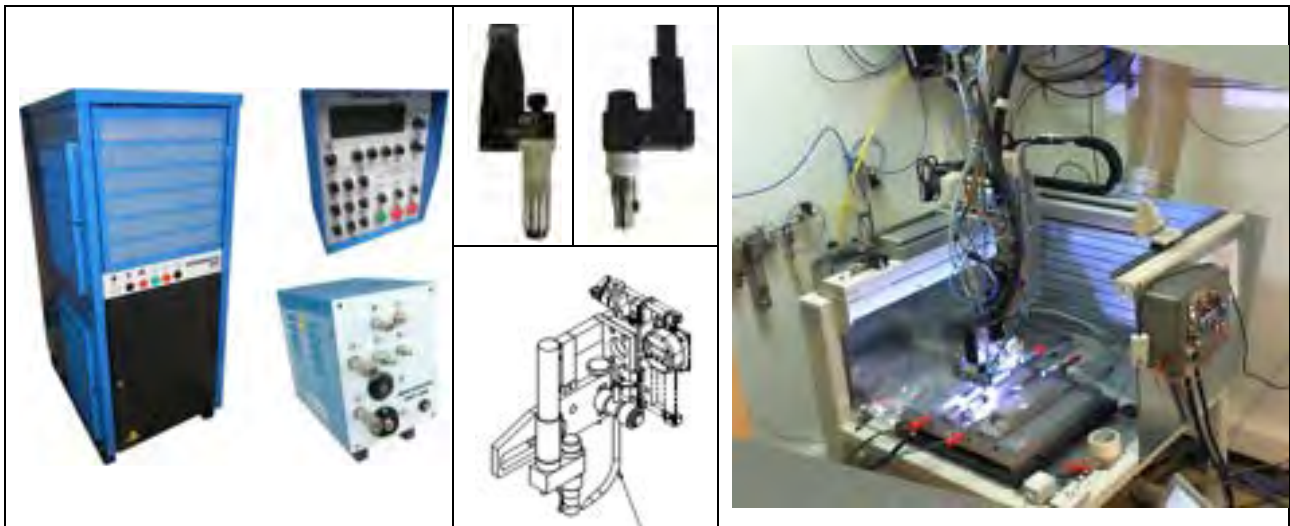


Figura 42: impianto TIG. Da Sin. Generatore, ausiliari, torce di saldatura, posizionatore

Il generatore è stato alimentato mediante il quadro di Figura 1.

4.1 Materiali

I campioni da saldare, lamiere di lunghezza massima 400 mm, spessori da 3 a 5 mm, sono stati posizionati sull'attrezzatura di bloccaggio di Figura 42. Sono stati scelti tre diversi materiali (di seguito elencati) caratterizzati da una buona saldabilità e quindi rappresentativi di applicazioni reali nel campo delle costruzioni meccaniche in generale.

4.1.1 AISI316 (X 5 CrNiMo 17-12-2)

Acciaio a struttura austenitica con ottime caratteristiche di resistenza alla corrosione anche in condizioni severe (ambiente marino). Buon comportamento a creep, adatto all'uso in temperatura. Biocompatibile. Caratteristiche meccaniche medie, a freddo manifesta sensibile incrudimento. Ottima saldabilità. La variante "L" ha lo 0,03 % di C ed è meno soggetto a corrosione intergranulare in prossimità delle saldature (dovuta a impoverimento in Cr per accrescimento di carburi a bordo grano).

Composizione indicativa (oltre Fe)

| C % ≤ | Mn % ≤ | P % ≤ | S % ≤ | Si % ≤ | Cr % | Ni % | Mo % | Altro % |
|-------|--------|-------|-------|--------|-----------|-------|-------|---------|
| 0,07 | 2 | 0,045 | 0,015 | 1 | 16,5÷18,5 | 10÷13 | 2÷2,5 | N≤0,11 |

4.1.2 15-15 Ti (EN 1515CrNiMoTiB)

Acciaio austenitico stabilizzato al Ti. Caratteristiche meccaniche tipiche della classe di acciai di appartenenza con, in aggiunta, migliorata resistenza alla corrosione intergranulare. La presenza del Ti richiede cura nella protezione della saldatura per evitare la formazione di nitruri e idruri con perdita delle caratteristiche a corrosione.

Composizione indicativa (oltre Fe)

| C % | Cr % | Ni % | Mn % | Mo % | Ti % | Nb+Ta | Si % | Altro % |
|-----------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,08÷0,10 | 14÷16 | 14÷16 | 1,0÷2,0 | 1,3÷1,7 | 0,3÷0,5 | ≤0,03 % | 0,7÷0,9 | N≤0,015 |

4.1.3 AA5083

Lega alluminio-magnesio, di impiego generale con eccellente resistenza all'ossidazione e alla corrosione; Caratteristiche meccaniche medie ma alta tenacità sia a temperatura ambiente che a basse temperature. Buona formabilità. Saldabile per fusione.

Composizione indicativa (% , oltre Al)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti+Zr |
|---------|---------|----------|-----------|---------|-----------|----------|----------|
| 0,4 max | 0,4 max | 0,10 max | 0,40÷1,00 | 4,0÷4,9 | 0,05÷0,25 | 0,25 max | 0,15 max |

4.2 Prove di saldatura

Le prove seguenti sono state condotte registrando con il sistema di misura portatile i valori istantanei delle tensioni e correnti di alimentazione del generatore e quelli della tensione e corrente dell'arco. Tutte le saldature riportate sono a piena penetrazione e di due tipologie:

- Rifusione, *bead-on-plate (BoP)*
- Testa a testa con lembi dritti e gap variabile da zero a 2 decimi di mm circa.

Non è stato fatto uso di materiale di apporto.

4.2.1 Test con acquisizione dati consumo del generatore

Di seguito sono riportate i test estensivi effettuati per il rilievo di corrente e tensione al primario ed al secondario (Arco) del generatore NERTAMATIC 450 del CR ENEA Casaccia su acciai inossidabili, come materiali candidati alla definizione dei test standard di valutazione dell'efficienza energetica del generatore e del processo (FEE)

4.2.1.1 Acciaio Inossidabile spessore 4 mm AISI 316

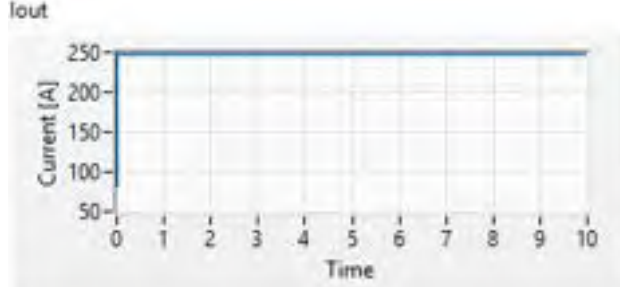
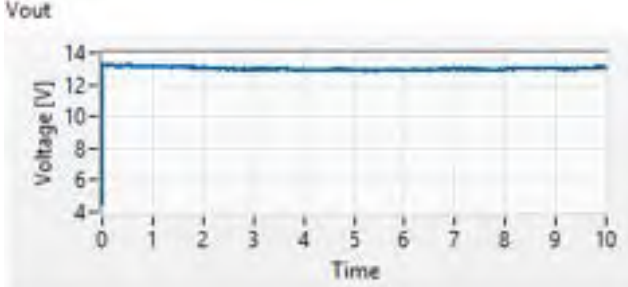
| | |
|---|--|
| <p>Prova: 7E TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: AISI316, spessore 4 mm Giunto: BOP (rifusione) Velocità avanzamento: 5 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 15 l/min</p> | <p>Corrente: 250 A Tensione media: 13 V File acquisizione dati: TIG3.1 Potenza utile media: 3220 W Potenza assorbita media: 7575 W Rendimento generatore: 42% Apporto termico: 0,64 kJ/mm FEE = 2,6 mm²/kJ</p> |
|  |  |

Figura 43: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

Sono state effettuate prove in pulsato per valutare la possibilità di ottenere una maggiore penetrazione. Di seguito il riepilogo:

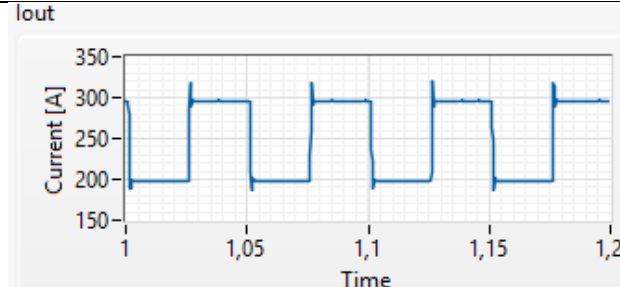
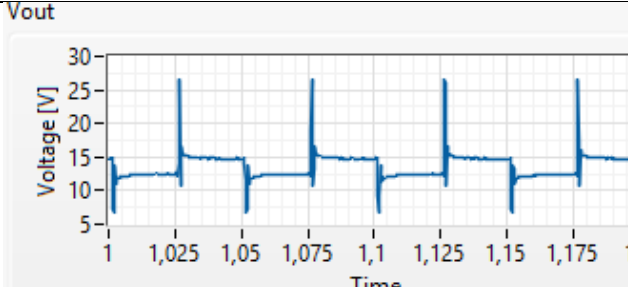
| | |
|---|--|
| <p>Prova: 8B TIG, corrente continua pulsata elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 3 mm Materiale: AISI316, spessore 4 mm Giunto: BOP (rifusione) Velocità avanzamento: 8 mm/s (480 mm/min) Gas: argon, 15 l/min</p> | <p>Corrente: 200÷300 A Frequenza: 20 Hz, D.C.: 50% Tensione media: 12,3÷15,1 V File acquisizione dati: TIG4.1 Potenza utile media: 3418 W Potenza assorbita media: 7888 W Rendimento generatore: 43% Apporto termico: 0,43 kJ/mm FEE = 4,1 mm²/kJ</p> |
|  |  |

Figura 44: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

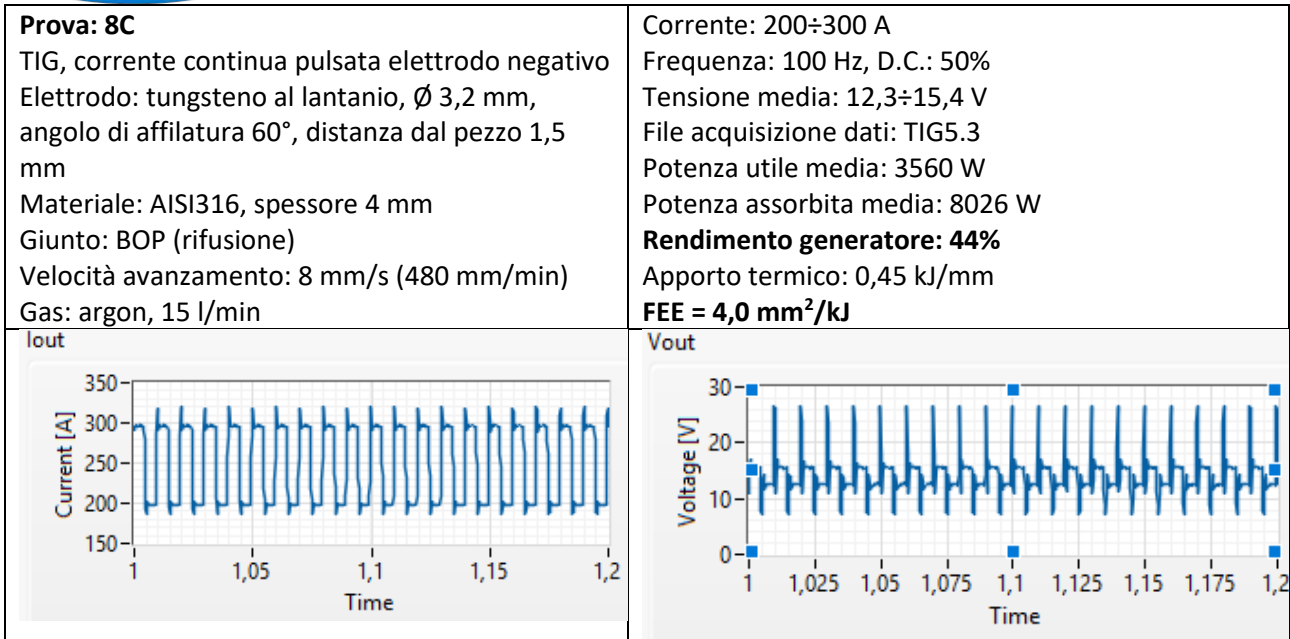


Figura 45: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

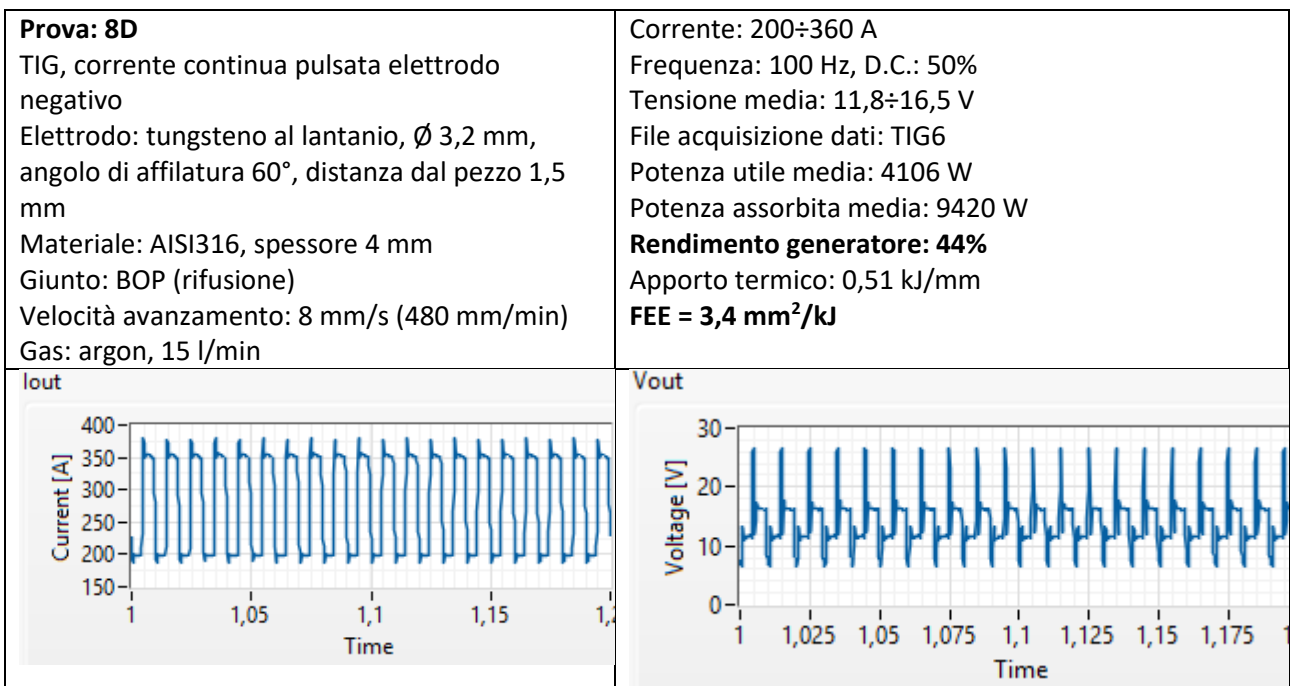


Figura 46: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio



| Campione | prof. di penetrazione (p) [mm] | aspect ratio (v) | Area (A) [mm ²] | Volume (V) [mm ³] |
|----------|-----------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 8B | 2,3 | 0,33 | 8,4 | 110 |
| 8C | 2,5 | 0,36 | 10,86 | 142,22 |
| 8D | 2,2 | 0,31 | 8,16 | 119,95 |

Figura 47: Sezione macrografica tipo e riepilogo dei dati di forma principali

La Figura 48: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio e sezione macroFigura 48 mostra come il pulsato tenda a restringere il bagno di fusione ma allo stesso tempo a generare incisioni marginali. Il rendimento del generatore si mantiene presso che costante (43-44%) mentre

il FEE tende a decrescere con l'incremento oltre certi limiti della corrente di picco in quanto il cordone tende ad allargarsi ed a ridurre la penetrazione che è invece l'elemento guida da ricercare per saldature efficienti.

4.2.1.2 Alluminio AA 50 83 spessore 3 mm

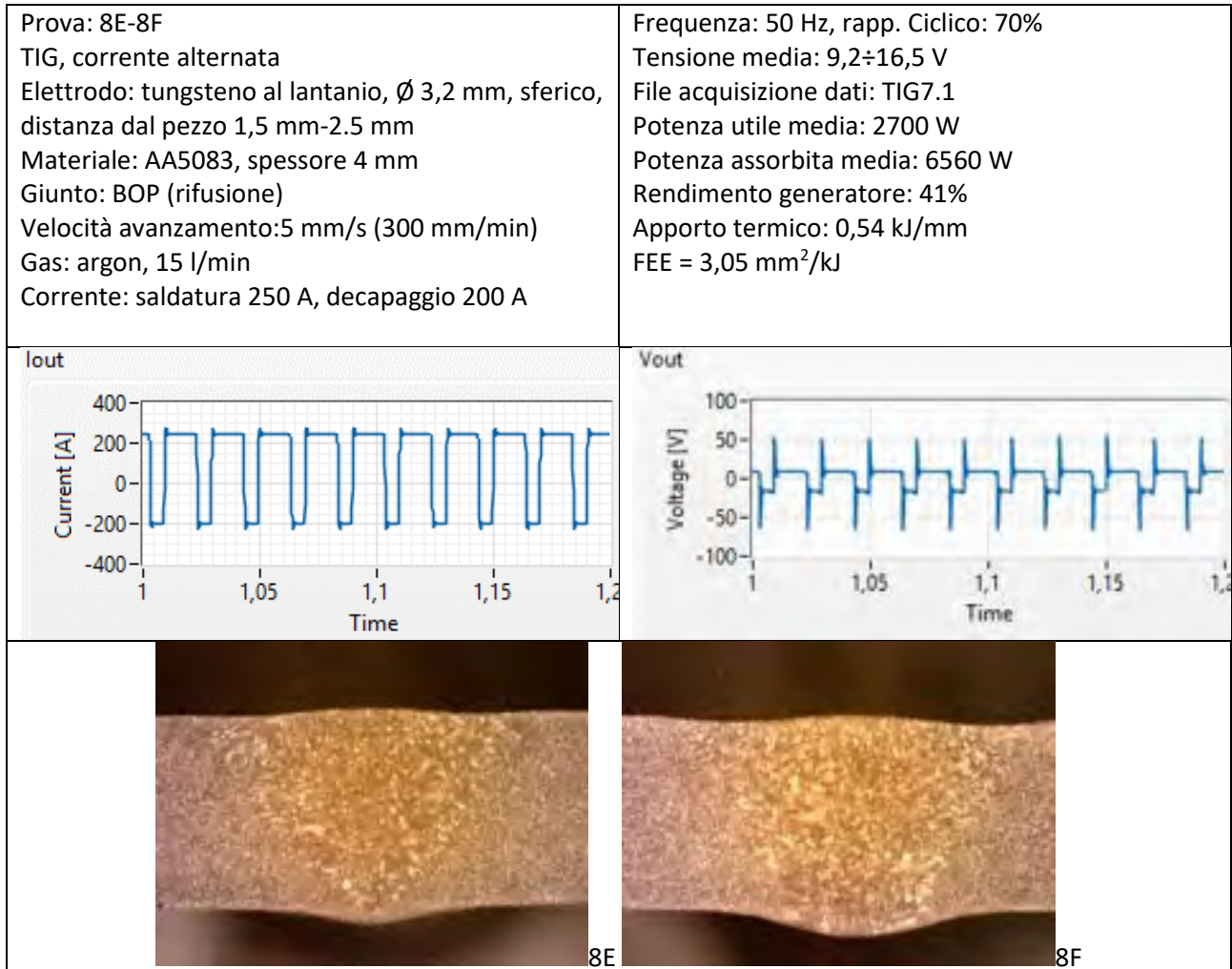


Figura 48: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio e sezione macro

4.2.1.3 Acciaio Inossidabile 15-15 Ti spessore 3 mm

Su questo acciaio sono stati utilizzati tutti gli accorgimenti tipici per ottenere una saldatura efficace in termini di protezione gassosa sia al dritto che al rovescio. Questi accorgimenti sono indispensabili per evitare l'ossidazione profonda ad elevata temperatura del Cromo che conferisce inossidabilità al materiale.

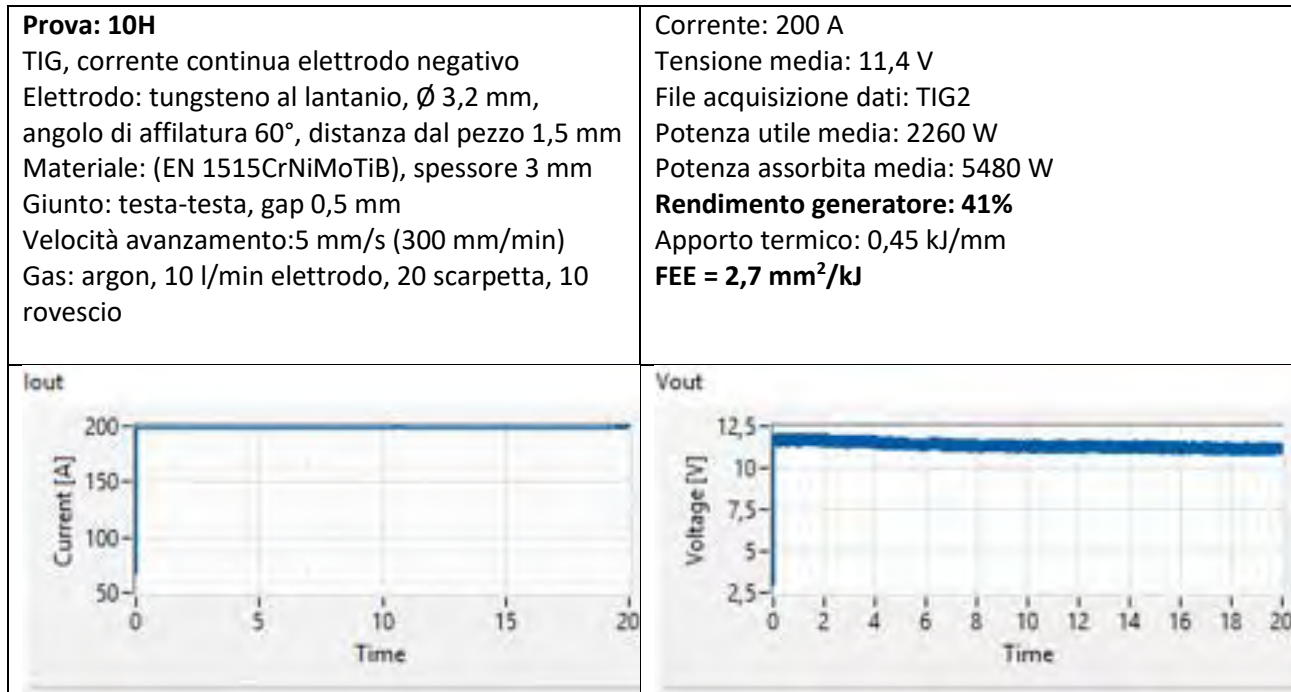


Figura 49: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

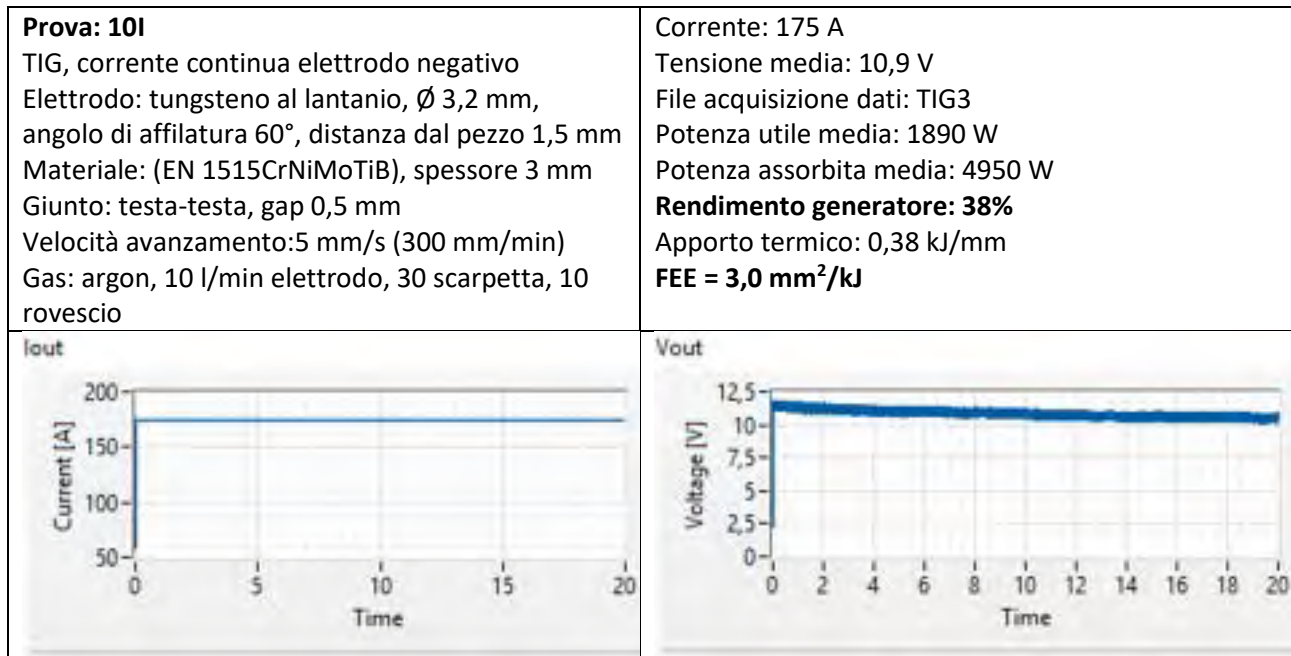


Figura 50: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

Può essere osservato dai grafici della tensione come essa diminuisca leggermente con l'avanzamento della saldatura. Questo è probabilmente dovuto alla riduzione del GaP iniziale di saldatura che porta ad un avvicinamento dell'elettrodo al pezzo con conseguente riduzione della tensione.

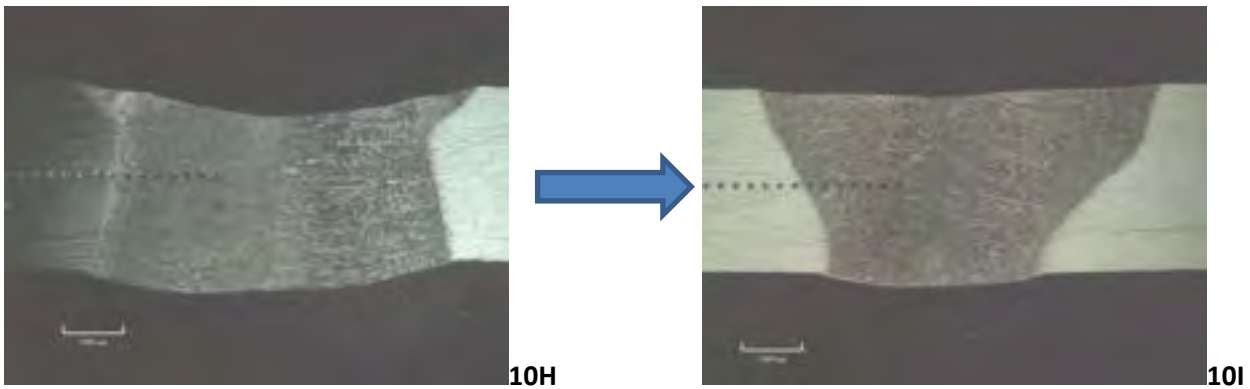


Figura 51: Sezioni Macrografiche dei campioni saldati con Argon

Le sezioni macrografiche danno un'evidenza del maggior FEE per il test che raggiunge la piena penetrazione con minore corrente. Per quanto l'impiego di un generatore da 450 A a valori di corrente inferiori al 50% della sua potenza massima induca inevitabilmente ad un rendimento elettrico inferiore (38% vs il 44% medio) il processo senza eccessi di energia realizza un cordone più stretto ed egualmente profondo sfruttando nel modo più efficiente l'energia.

Sulla base dei dati di partenza sono stati effettuati test con altri gas per valutare l'influenza dei gas di processo sull'efficienza dei processi di saldatura.

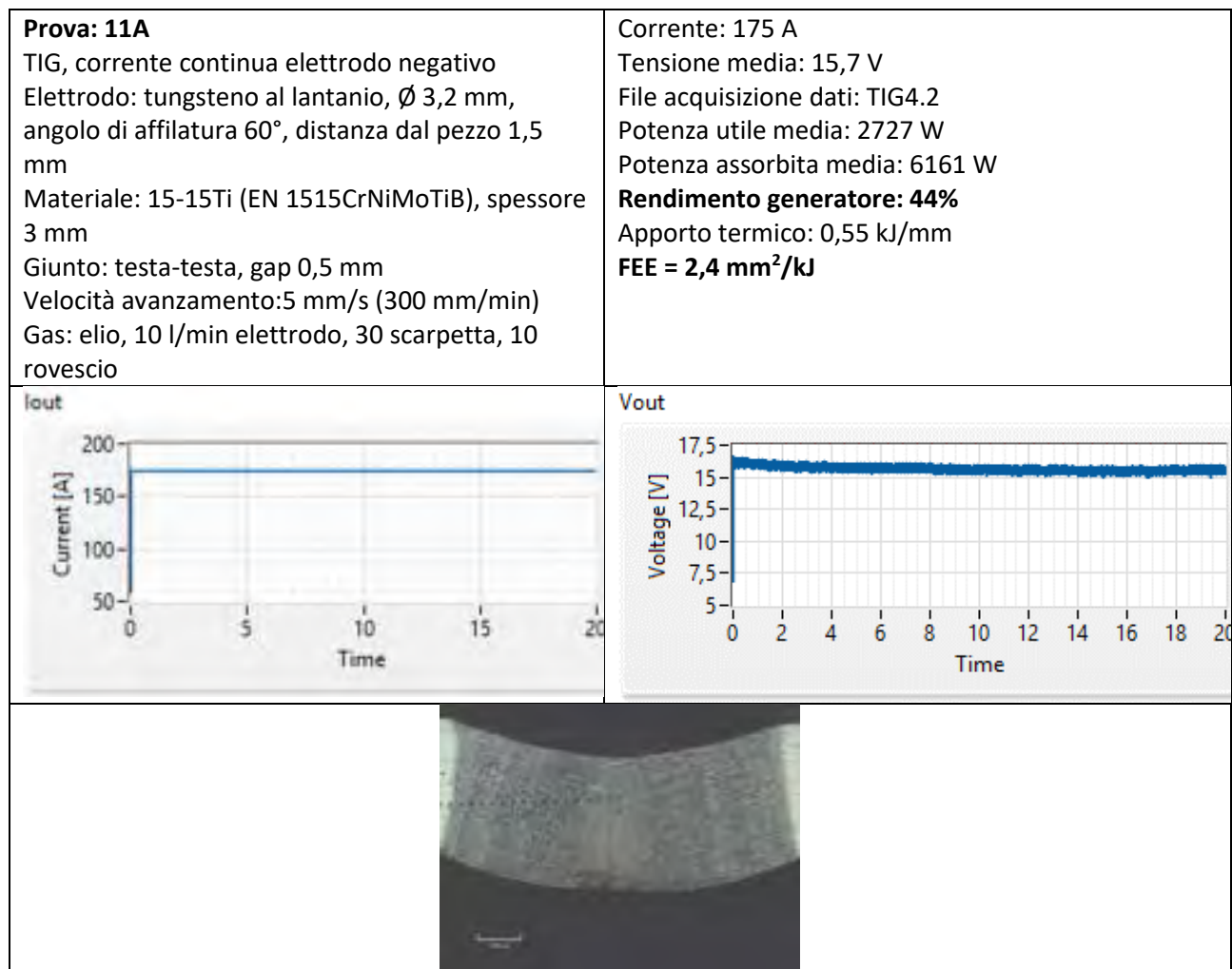


Figura 52: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

L'impiego di elio come gas di assistenza induce, a parità di altri parametri, una maggiore tensione d'arco. Questo è dovuto al minore potere ionizzante dell'elio rispetto all'argon ed alla corrispondente variazione della caratteristica esterna dell'arco che induce un maggior dielettrico ed un conseguente incremento di tensione al fine di garantire la stabilità dell'arco. Questo fattore è ben noto ed è sfruttato nelle saldature automatiche in quanto l'elio permette di realizzare una penetrazione più ampia sia in profondità che in larghezza e raggiungere maggiori produttività.

La macrografia di Figura 52 presenta infatti un cordone molto più largo rispetto a quanto realizzato con Argon; questo permette però di poter abbassare le correnti di saldatura per ottenere lo stesso livello di penetrazione (3 mm)

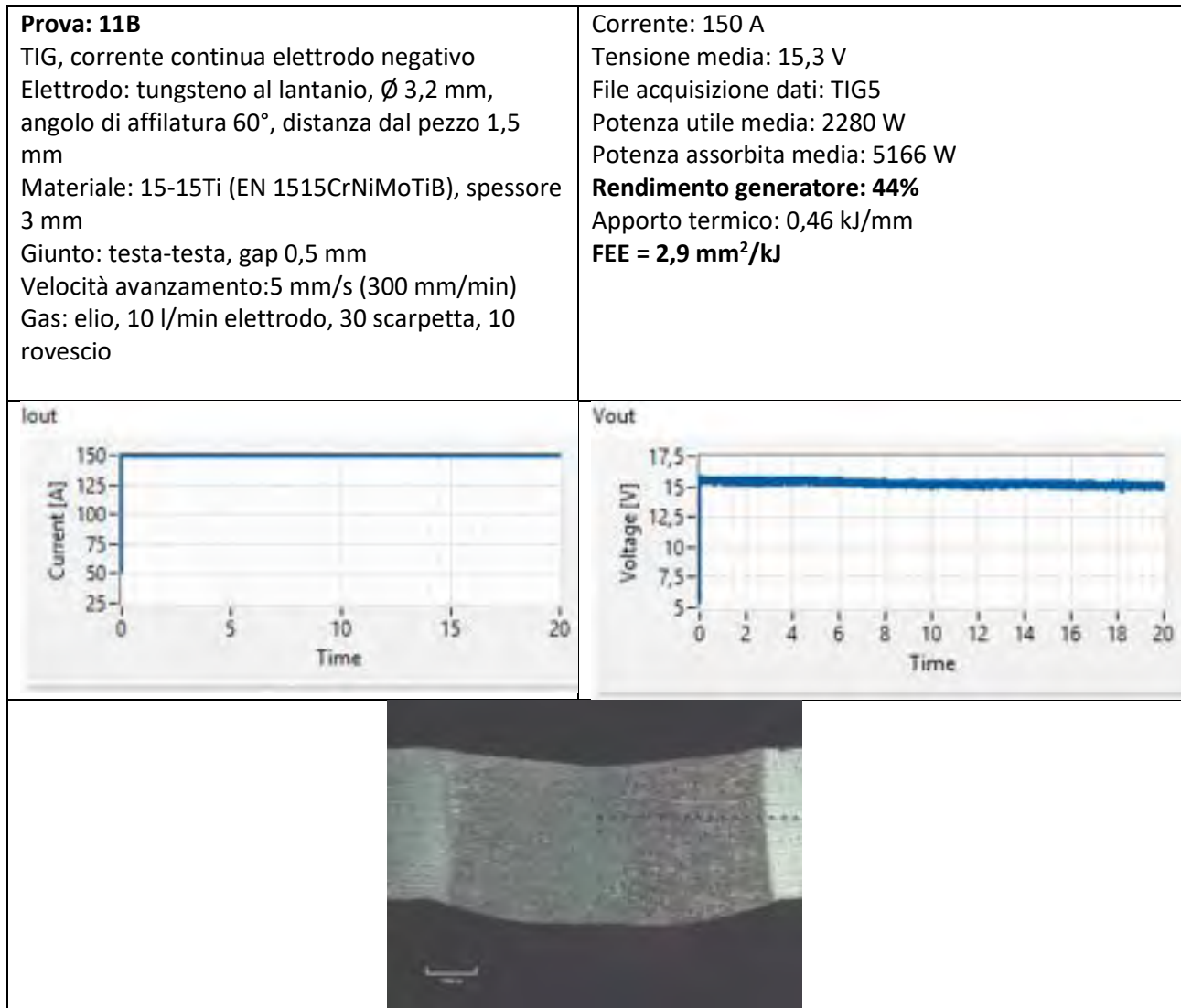


Figura 53: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

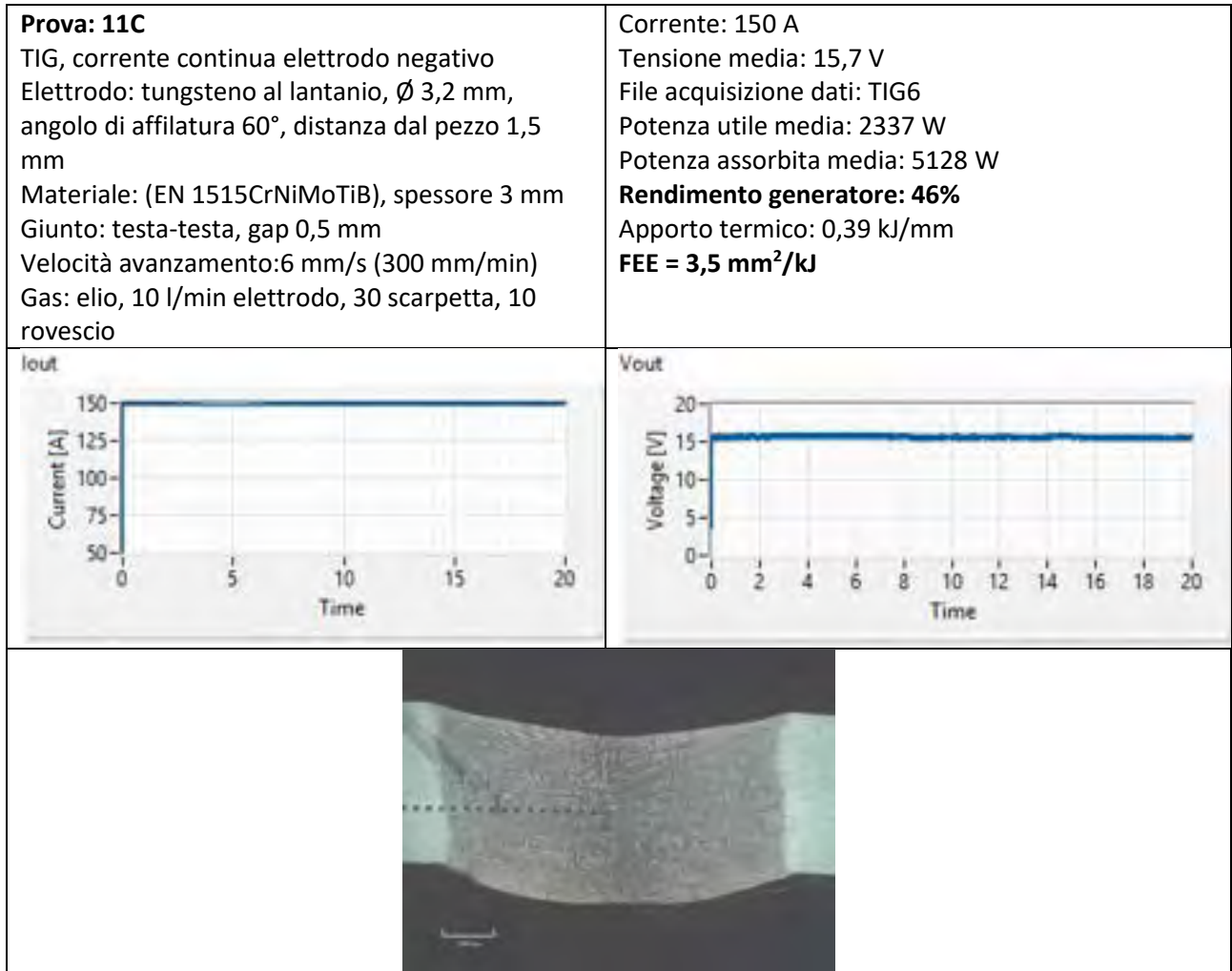


Figura 54: Acquisizione di corrente e tensione di saldatura con sistema di monitoraggio

Le prove successive effettuate a correnti inferiori e velocità crescenti evidenziano come il rendimento elettrico del generatore salga sopra la media ed il FEE con l'elio può raggiungere valori superiori del 15% rispetto all'impiego dell'argon.

4.2.2 Rendimento del generatore d'arco

Sulla base dei dati acquisiti nelle prove strumentate è possibile valutare il rendimento medio del generatore Nertamatic che risulta essere del 44% circa. Il grafico seguente riassume tali prove e mette in evidenza l'andamento piuttosto regolare del consumo alla rete rispetto alla potenza utile dell'arco.

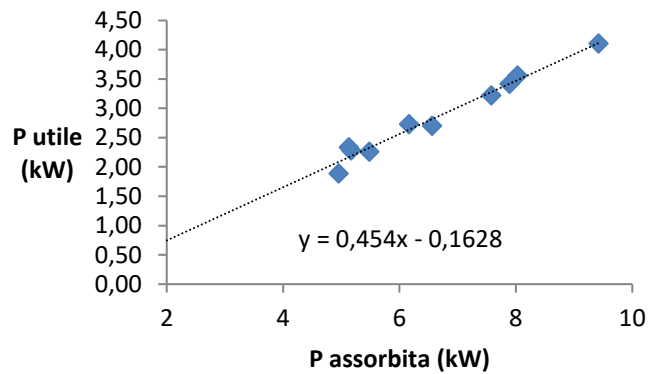


Figura 55: Correlazione fra potenza Utile e potenza assorbita dal generatore Nertamatic 450

4.2.3 Test di verifica prestazioni

Di seguito sono elencati ulteriori test di saldatura nei quali non è stato impiegato il dispositivo di misura. Tuttavia, è stato verificato con i test strumentati precedenti, che i dati letti a pannello macchina sono corrispondenti ed a meno di piccole variazioni esterne, in particolare in condizioni di saldatura in corrente continua forniscono dati simili alle curve durante i test monitorati. Ove possibile la tensione d'arco è stata rilevata dal pannello operatore del generatore. In questi casi si calcola una stima, seppure meno affidabile, della potenza utile e quindi dell'assorbimento dell'impianto utilizzando il valore medio di rendimento 44%.


| | |
|---|--|
| <p>Prova: 9F TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 1,0mm Velocità avanzamento: 5 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: 11,6 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 2320 W (stima) Potenza assorbita media: 5270 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,46 kJ/mm FEE = 2,8 mm²/kJ</p> |
|  | |

Figura 56: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|--|---|
| <p>Prova: 10B TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0,5 mm Velocità avanzamento: 5 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 57: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|---|---|
| <p>Prova: 10C TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 5 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: 11,9 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 2380 W (stima) Potenza assorbita media: 5410 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,48 kJ/mm FEE = 2,8 mm²/kJ</p> |
|  | |

Figura 58: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|--|--|
| <p>Prova: 10E TIG, corrente continua pulsata elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 10 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 100÷300 A Frequenza: 20 Hz, D.C.: 50% Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 59: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|--|--|
| <p>Prova: 10F TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0,2 mm Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: argon, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d</p> |
|  | |

Figura 60: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|---|---|
| <p>Prova: 10G TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0,2 mm Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio, 10 l/min elettrodo, 20 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 61: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|--|---|
| <p>Prova: 11D TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,5 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio, 20 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 150 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 62: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG

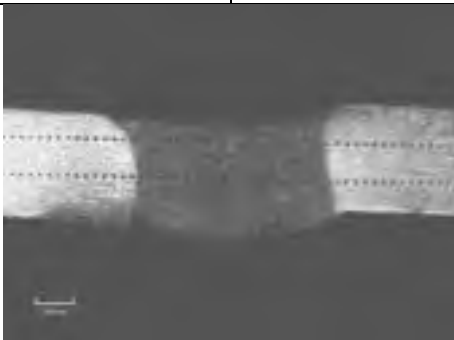
| | |
|--|--|
| <p>Prova: 11G TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio, 10 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 150 A Tensione media: 18 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 2700 W Potenza assorbita media: 6136 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,45 kJ/mm FEE = 2,9 mm²/kJ</p> |
|  | |

Figura 63: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|---|---|
| <p>Prova: 11E TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: AISI316, spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio, 20 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 150 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 64: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG


| | |
|---|---|
| <p>Prova: 11H TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio/argon(50%), 10 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 150 A Tensione media: 11,3 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 1700 W (stima) Potenza assorbita media: 3850 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,28 kJ/mm FEE = 4,7 mm²/kJ NB: Non in condizioni di EFFICACIA la piena penetrazione non avviene lungo tutta la saldatura</p> |
|  | |

Figura 65: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG

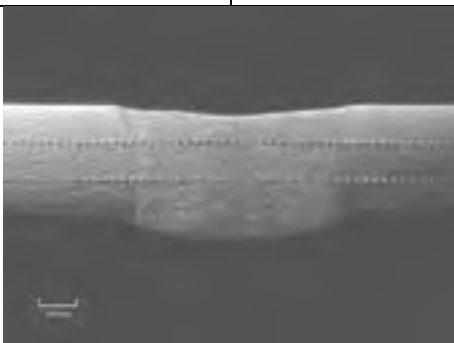
| | |
|---|---|
| <p>Prova: 11i TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: 15-15Ti (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio/argon(50%), 10 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 200 A Tensione media: 13 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 2600 W (stima) Potenza assorbita media: 5910 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,43 kJ/mm FEE = 3,05 mm²/kJ</p> |
|  | |

Figura 66: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG

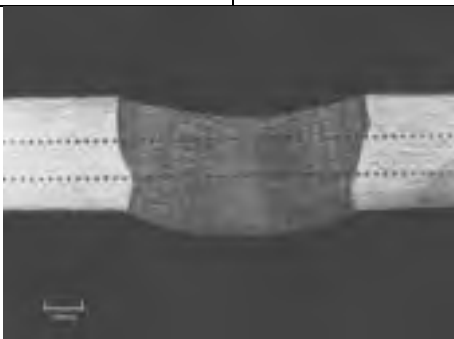
| | |
|--|--|
| <p>Prova: 12A TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio/argon(75%)/idrogeno(5%), 10 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 180 A Tensione media: 11 V File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: 1980 W (stima) Potenza assorbita media: 4500 W Rendimento generatore: 44% Apporto termico: 0,33 kJ/mm FEE = 4,0 mm²/kJ</p> |
|  | |

Figura 67: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG

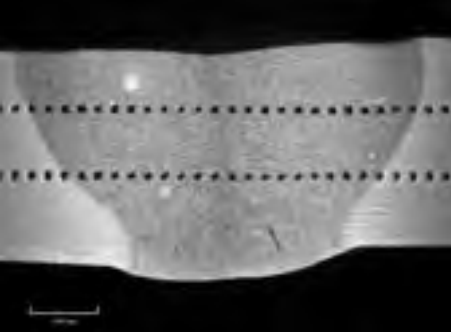
| | |
|---|---|
| <p>Prova: 12B TIG, corrente continua elettrodo negativo Elettrodo: tungsteno al lantano, Ø 3,2 mm, angolo di affilatura 60°, distanza dal pezzo 1,0 mm Materiale: (EN 1515CrNiMoTiB), spessore 3 mm Giunto: testa-testa, gap 0 Velocità avanzamento: 6 mm/s (300 mm/min) Gas: elio/argon(75%)/idrogeno(5%), 10 l/min elettrodo, 30 scarpetta, 10 rovescio</p> | <p>Corrente: 160 A Tensione media: n.d. File acquisizione dati: n.d. Potenza utile media: n.d. Potenza assorbita media: n.d. Rendimento generatore: 44% Apporto termico: n.d. FEE = n.d.</p> |
|  | |

Figura 68: Sintesi dei parametri di saldatura, parametri energetici e sezione macrografica efficace del giunto saldato TIG

4.3 Elaborazione dei dati raccolti

I valori di apporto termico e di efficienza (FEE) sono riassunti nel diagramma seguente.

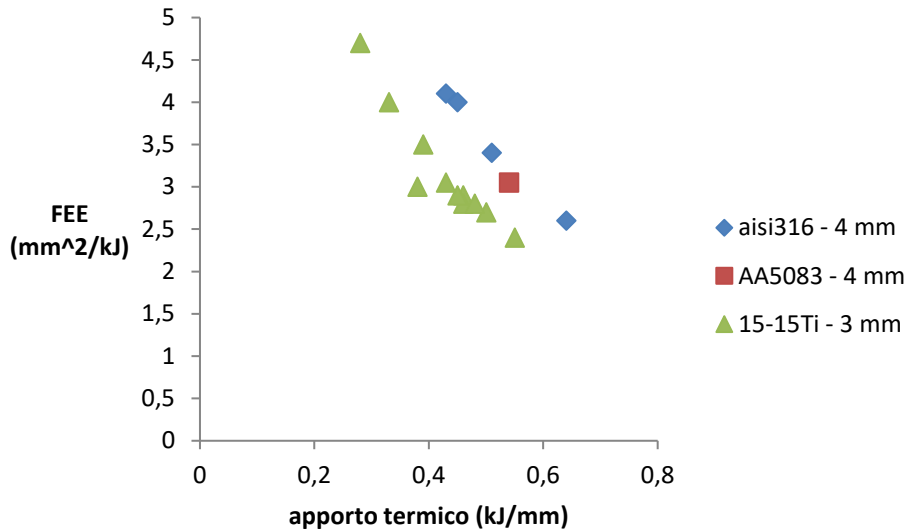
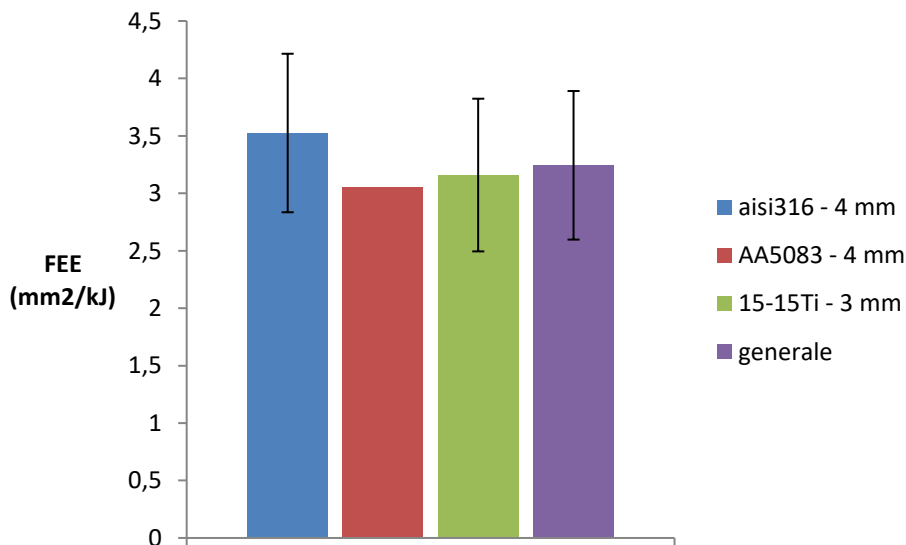


Figura 69: FEE in funzione dell'apporto termico per la saldatura TIG

La media del fattore di efficienza energetica FEE è $3,24 \pm 0,65 \text{ mm}^2/\text{kJ}$.



Le sezioni trasversali dei cordoni sono state misurate con particolare riguardo alle aree.

| Camp. | A _f (mm ²) | Camp. | A _f (mm ²) |
|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|
| 9F | 15,5 | 11C | 21,7 |
| 10B | 16,6 | 11D | 15,8 |
| 10C | 15,2 | 11E | 17,3 |
| 10E | 7,4 | 11G | 16,5 |
| 10F | 15,5 | 11H | 11,4 |
| 10G | 15,4 | 11i | 18,3 |
| 11A | 24,8 | 12A | 19,5 |
| 11B | 21,0 | 12B | 15,6 |

Figura 70: misura dell'area fusa

I grafici seguenti illustrano la dipendenza dalla corrente dell'area della zona fusa e di un parametro ottenuto moltiplicando tale area per la velocità di saldatura (volume fuso per unità di tempo). E' confermata la nozione comune secondo cui l'elio dà luogo a una maggiore fusione a parità di corrente applicata.

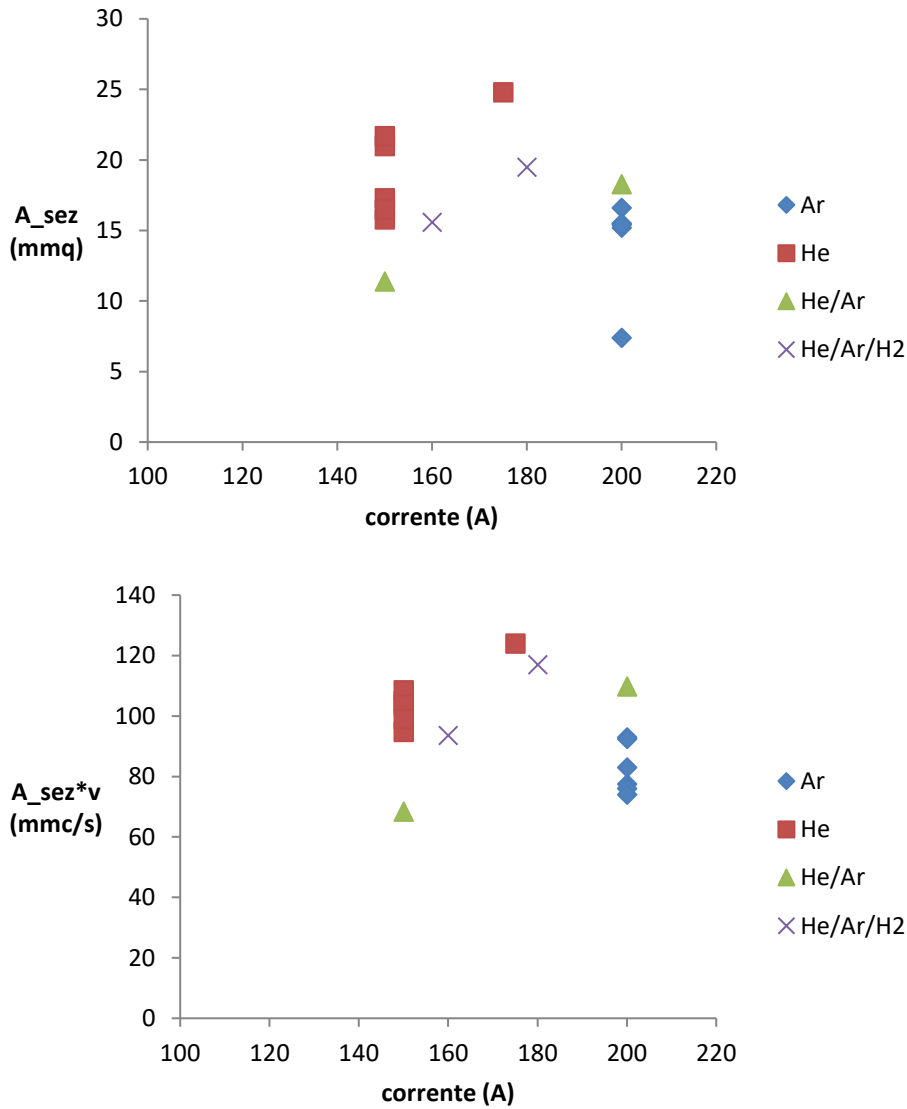


Figura 71: Area fusa e volume fuso rapportati alla corrente d'arco ed al tipo di gas

Per gli acciai austenitici utilizzati, prendendo come riferimento i dati termo-fisici dell'AISI 316 ([7], pag. 472) si può calcolare l'entalpia alla temperatura di fusione T_f , rispetto alla temperatura iniziale T_0 .

$$\text{Calore specifico: } C_p = 0,412 + 2 \cdot 10^{-4} T - 2 \cdot 10^{-8} T^2 \text{ (J/g)}$$

$$\text{Calore latente: } L = 260 \text{ J/g}$$

$$T_f = 1723 \text{ K, } T_0 = 300 \text{ K}$$

Risulta:

$$H_f = 1100 \text{ J/g}$$

Per una data velocità di avanzamento v la potenza necessaria a fondere il cordone di area trasversale A_t è

$$P_f = A_t v \rho H_f$$

Il rapporto tra P_f e la potenza utile dell'arco definisce il rapporto di fusione η_f . Nel grafico seguente se ne riassume l'andamento: la linea orizzontale indica il valore limite teorico 0,483 che risulta dall'analisi della

trasmissione del calore allo stato stazionario con una geometria piana (gradiente termico trascurabile nello spessore). Sono evidenziati i diversi gas di assistenza impiegati.

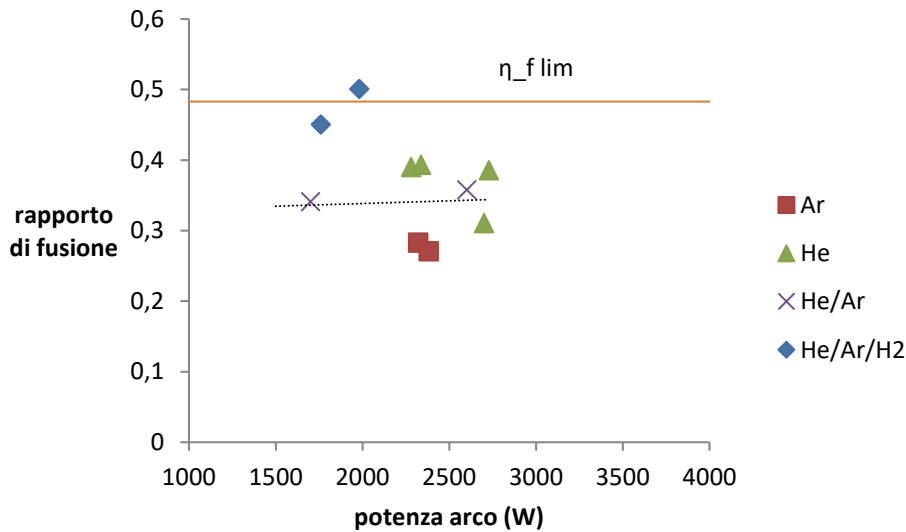


Figura 72: Rapporto di fusione vs Potenza arco

Con l'eccezione di un punto relativo alla miscela a tre gas in tutti i test il dato è accettabile. Anche in questo caso si conferma la maggiore prestazione in termini di area fusa in presenza di elio, sia da solo che in miscela. Per una verifica della consistenza delle valutazioni effettuate si può utilizzare la relazione seguente [8] ricavata mediante analisi dimensionale e rilievi con calorimetro degli scambi termico nella saldatura TIG e plasma

$$Ch = 0,44 Ry \exp(-3,6/Ry)$$

$$Ch = q_i v / \alpha^2 H_f \quad (q_i: \text{potenza utile}, \alpha: \text{diffusività termica a } T_L)$$

$$Ry = v^2 A_t / \alpha^2$$

I parametri Ch e Ry calcolati con i dati sperimentali, utilizzando $\alpha=5,7 \text{ mm}^2/\text{s}$, si dispongono rispetto alla curva di interpolazione come mostrato nel grafico seguente. L'accordo è sufficiente anche se vi sono alcune incertezze sia nella stima dei parametri termici di lavoro che nelle proprietà del materiale.

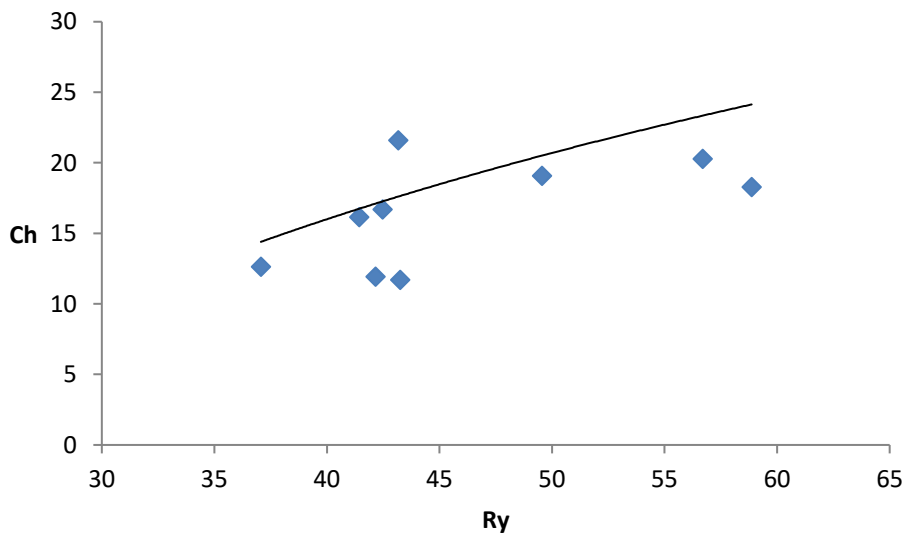


Figura 73: Rapporto di fusione vs Potenza arco

Un aspetto che non è stato indagato è infatti quello dell'efficienza dell'arco cioè del trasferimento al materiale della potenza utile sviluppata. In letteratura sono indicati valori generalmente alti, in media dell'80%, ma con una certa variabilità.

4.4 Conclusioni e indicazioni per la definizione dello standard di qualifica energetica

Dal punto di vista dell'attività complessiva si conclude che, con i materiali e i parametri utilizzati, nel laboratorio MATPRO è stato possibile simulare condizioni significative e realistiche di processo. Ai fini delle valutazioni energetiche nel procedimento TIG automatico si indicano quindi le seguenti condizioni standard:

- Materiale:
 - o Acciai inossidabili austenitici: AISI316 (X 5 CrNiMo 17-12-2), 15-15 Ti (EN 1515CrNiMoTiB) e altri equivalenti. Spessore 3 mm;
- Modo: corrente continua (eventualmente pulsata) elettrodo negativo per acciaio, corrente alternata per alluminio;
- Corrente: 200 ± 50 A;
- Velocità: $5 \div 10$ mm/s;
- Gas di processo e protezione: Elio o Argon (Elio garantisce piena penetrazione con GAPO; Argon più economico e largamente utilizzato)
- Elettrodo Th-La con diametro 3,2 mm
- Affilatura 120°
- Distanza Pezzo Elettrodo $< 1,5$ mm. .

In tali condizioni è stato ottenuto un fattore di efficienza energetica di saldatura

$$FEE = \frac{\text{sezione resistente}}{\text{energia spesa}} = \frac{v \times t}{P_{ass}}$$

Uguale a $3,24 \pm 0,65$ mm²/kJ che è quindi rappresentativo dell'impianto utilizzato e utile per il confronto con impianti diversi.

5 Friction stir welding

Per la tecnica FSW si è avuto supporto dal gruppo di ricerca coordinato dalla Professoressa Carla Gambaro della Scuola Politecnica dell'Università di Genova (co-beneficiario).

E' stato condotto il monitoraggio degli assorbimenti elettrici durante la saldatura utilizzando il sistema di misura trasportabile (Figura 1). Le prove sono state effettuate presso:

- Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Genova
- Azienda RGM Metalworks SpA di Ovada (AL)

Sulla base della specifica esperienza maturata e del lavoro svolto nelle precedenti annualità del progetto i ricercatori hanno operato la scelta del materiale e dei parametri di processo da impiegare nelle prove da svolgersi presso l'Università ed un sito industriale.

Entrambi gli impianti sono costituiti da una fresatrice universale adattata allo scopo: al mandrino è montato un utensile speciale (descritto in [9]) che, ruotando rapidamente, al contatto col materiale genera per attrito il calore necessario a portarlo allo stato pastoso realizzando la giunzione.



Figura 74: impianti FSW, RGM Metalworks (sx) e Dip. Ing. Meccanica Univ. Genova

Il consumo energetico della macchina è dovuto a due motori elettrici che azionano l'uno il mandrino, l'altro la tavola portapezzo che alimenta il processo con il materiale ancora da saldare.

Sono state eseguite 3 prove strumentate per impianto, con parametri simili, per valutare eventuali differenze di efficienza.

5.1 Materiali

Sono state saldate lamiere di spessore 5 mm in lega AA6082 T6.

La 6082 ha una buona resistenza meccanica e ottime caratteristiche a corrosione. Trova impiego in usi strutturali vari e nei trasporti. La lega ha favorevoli caratteristiche di lavorabilità ma nello stato T6 è meno agevole l'estrusione. Anche la saldabilità è buona ma con un decadimento della resistenza: ad esempio secondo EN 1999-1-1 nella zona termicamente alterata va considerato un limite elastico e un carico di rottura uguali rispettivamente alla metà e a 0,64 volte i corrispondenti valori del materiale tal quale. Pertanto la tecnica FSW che è ha un ridotto apporto termico rispetto all'arco è molto competitiva e ha infatti avuto un rapido sviluppo per questa classe di materiali.

Composizione indicativa (oltre Al)

| Cr % | Cu % | Fe % | Mg % | Mn % | Si % | Ti % | Zn % | Altro % |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 0,25 max | 0,1 max | 0,5 max | 0,6÷1,2 | 0,4÷1,0 | 0,7÷1,3 | 0,1 max | 0,2 max | 0,15 max |

5.2 Prove di saldatura

5.2.1 RGM Metalworks

La tabella riassume le prove effettuate.

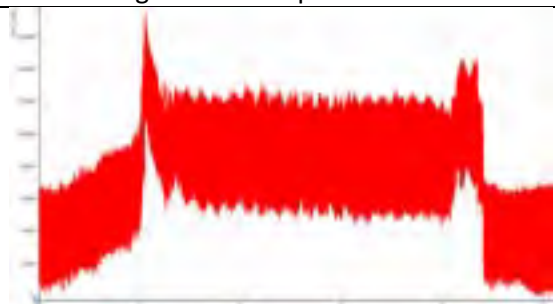
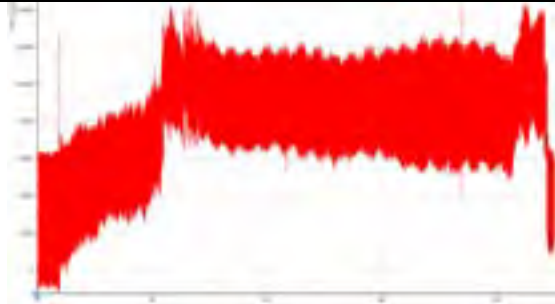
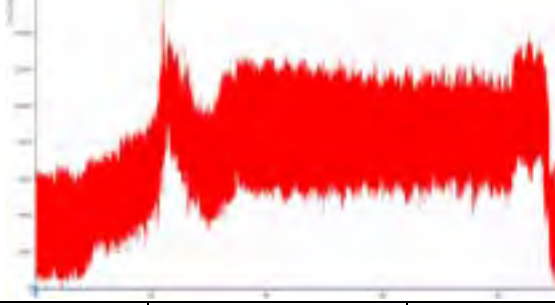
| # | Andamento registrato della potenza attiva istantanea | Parametri di lavoro | | |
|------------------------|--|---|------------------------|------------------------|
| 1 |  | <ul style="list-style-type: none"> - Materiale AA6082 T6, sp. 5 mm - Giunto testa-testa - Vel. Saldatura 260 mm/min - Vel. Rotaz. Mandrino= 720 rpm | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 1019 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 4505 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 1001 \text{ W}$</td> </tr> </table> | | $P_0 = 1019 \text{ W}$ | $P_1 = 4505 \text{ W}$ |
| $P_0 = 1019 \text{ W}$ | $P_1 = 4505 \text{ W}$ | | $P_2 = 1001 \text{ W}$ | |
| 2 |  | | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 1005 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 4487 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 1010 \text{ W}$</td> </tr> </table> | | $P_0 = 1005 \text{ W}$ | $P_1 = 4487 \text{ W}$ |
| $P_0 = 1005 \text{ W}$ | $P_1 = 4487 \text{ W}$ | | $P_2 = 1010 \text{ W}$ | |
| 3 |  | | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 1032 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 4510 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 1054 \text{ W}$</td> </tr> </table> | $P_0 = 1032 \text{ W}$ | $P_1 = 4510 \text{ W}$ | $P_2 = 1054 \text{ W}$ |
| $P_0 = 1032 \text{ W}$ | $P_1 = 4510 \text{ W}$ | $P_2 = 1054 \text{ W}$ | | |

Figura 75: potenza attiva durante la saldatura

I tre valori di potenza (media) P_0 , P_1 e P_2 si riferiscono rispettivamente alla rotazione a vuoto del mandrino prima della saldatura, alla saldatura vera e propria e alla rotazione post-saldatura. I transitori visibili sono dovuti a fasi specifiche della tecnica FSW. Per i dettagli si rimanda a [10], [9]. L'aspetto tipico dei cordoni

realizzati è visibile nella Figura 76. L'ottima finitura è tipica della tecnica in questione e trova conferma nel risultato della caratterizzazione portata a termine da UniGe (cfr. relativo report citato) dove risulta che i giunti sono pienamente conformi in termini morfologici e di resistenza meccanica.



Figura 76: aspetto tipico del giunto realizzato con tecnica FSW [9]

5.2.2 Dip. Meccanica, UniGenova

Analoga presentazione è mostrata nella tabella seguente relativa ai test presso l'univ. di Genova.


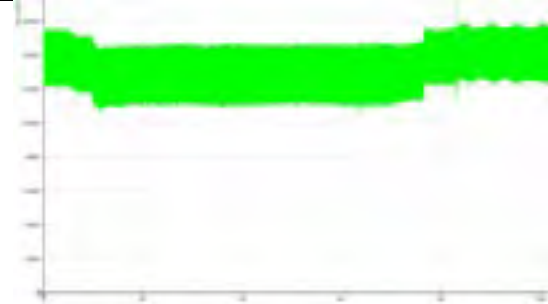

| # | Andamento registrato della potenza attiva istantanea | Parametri di lavoro | | |
|------------------------|---|---|-------------------------|-------------------------|
| 1 |  | <ul style="list-style-type: none"> - Materiale AA6082 T6, sp. 5 mm - Giunto testa-testa - Vel. Saldatura 260 mm/min - Vel. Rotaz. Mandrino= 630 rpm | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 9498 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 13101 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 9560 \text{ W}$</td> </tr> </table> | | $P_0 = 9498 \text{ W}$ | $P_1 = 13101 \text{ W}$ |
| $P_0 = 9498 \text{ W}$ | $P_1 = 13101 \text{ W}$ | | $P_2 = 9560 \text{ W}$ | |
| 2 |  | | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 9505 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 12987 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 9478 \text{ W}$</td> </tr> </table> | $P_0 = 9505 \text{ W}$ | $P_1 = 12987 \text{ W}$ | $P_2 = 9478 \text{ W}$ |
| $P_0 = 9505 \text{ W}$ | $P_1 = 12987 \text{ W}$ | $P_2 = 9478 \text{ W}$ | | |
| 3 |  | | | |
| | <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>$P_0 = 9516 \text{ W}$</td> <td>$P_1 = 13187 \text{ W}$</td> <td>$P_2 = 9564 \text{ W}$</td> </tr> </table> | $P_0 = 9516 \text{ W}$ | $P_1 = 13187 \text{ W}$ | $P_2 = 9564 \text{ W}$ |
| $P_0 = 9516 \text{ W}$ | $P_1 = 13187 \text{ W}$ | $P_2 = 9564 \text{ W}$ | | |

Figura 77: potenza attiva durante la saldatura

L'andamento della potenza attiva assorbita è sorprendente se non altro per confronto con quello di Figura 75. La elevata potenza a vuoto è dovuta a particolarità strutturali e del funzionamento della fresatrice utilizzata. Dal punto di vista qualitativo non si evidenziano differenze tra i giunti eseguiti con le due diverse macchine.

5.3 Analisi Termografiche

Le prove termografiche sono state effettuate durante il processo per il monitoraggio delle temperatura massima e la distribuzione della temperatura sulla piastra di alluminio. La ripresa è stata effettuata acquisendo un fotogramma ogni 10 sec. Il processo consiste in diverse fasi per ognuna è stato scelto il termogramma corrispondente. La temperatura dell'utensile si attesta intorno ai 530 e 580 °C mentre le lamiere una volta saldate sia attestano ad una temperatura di circa 200° e velocemente si raffreddano.

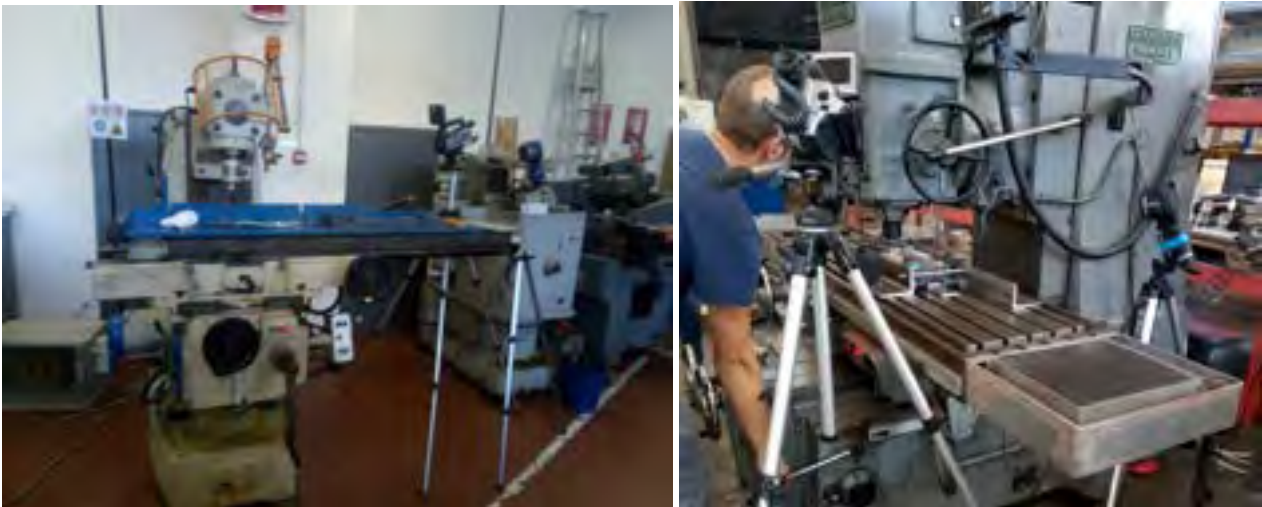


Figura 78: SET UP rilievi termografici (SX) UNIGE; (DX) RGM

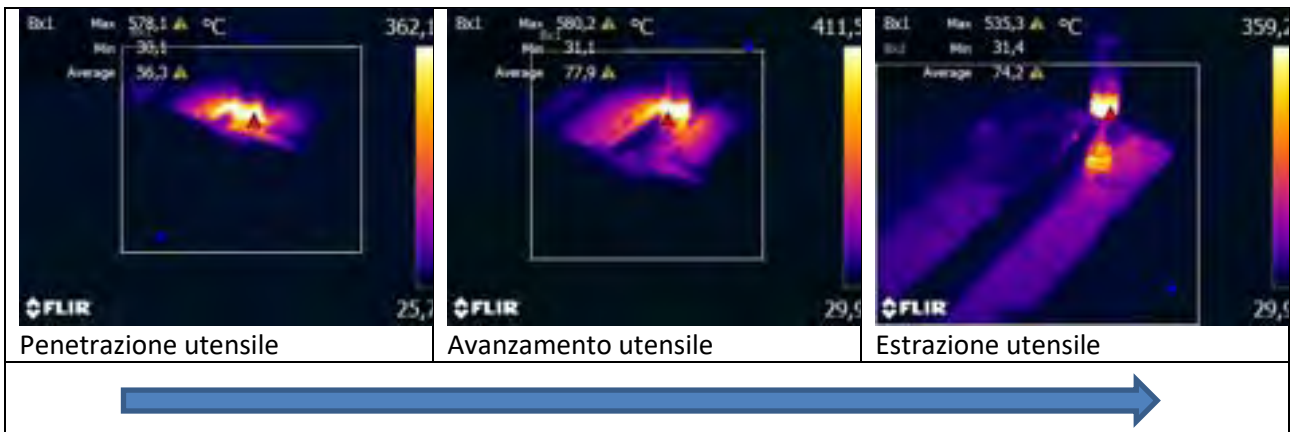


Figura 79: Analisi termografiche durante il processo di saldatura FSW (Acquisizione presso UNIGE)

| Friction Welding UNIGE | Range T °C | Temp Max °C |
|------------------------|------------|-------------|
| 1 | 0-600 | 530 |
| 2 | 0-600 | 530 |
| 3 | 0-600 | 580,2 |

Tabella 4: Rilievi termografici per i test di saldatura FSW effettuati presso UNIGE

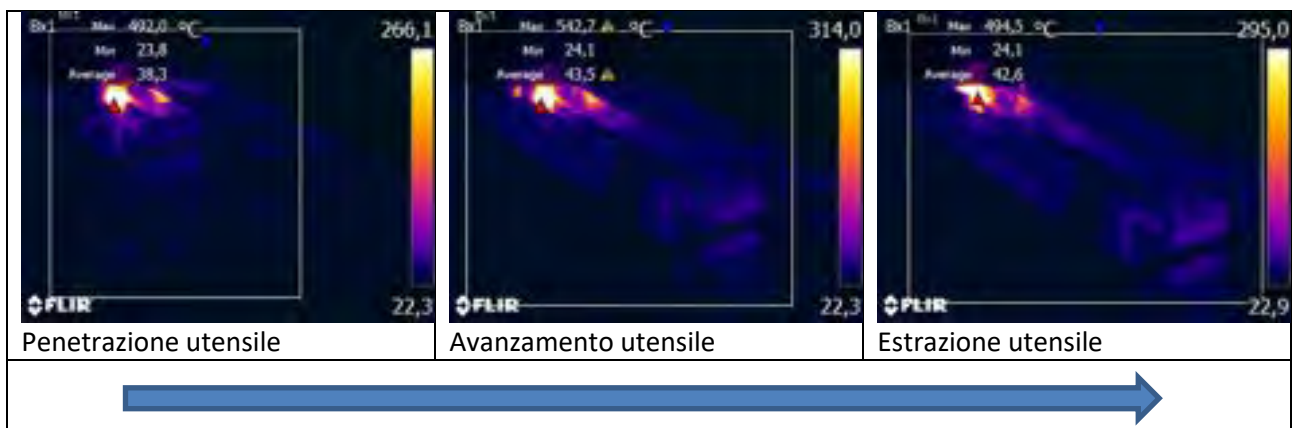


Figura 80: Analisi termografiche durante il processo di saldatura FSW (Acquisizione presso RGM)

| Friction Welding RGM | Range °C | Temp Max °C |
|----------------------|----------|-------------|
| 2 | 0-600 | 542 |
| 3 | 0-600 | 547,7 |

Tabella 5: Rilievi termografici per i test di saldatura FSW effettuati presso RGM

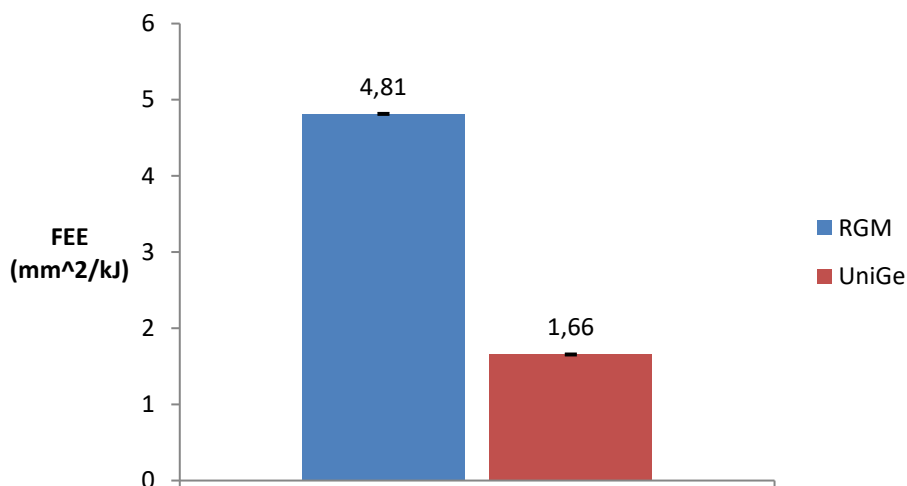
5.4 Elaborazione dati e conclusioni sulla FSW

Il fattore di efficienza ($FEE = v s/P$) è stato calcolato considerando solo la fase a regime e quindi tralasciando i transitori iniziale e finale il cui peso è abbastanza ridotto. Più delicato è il discorso relativamente alla potenza a vuoto della macchina che, in un caso (RGM) non è trascurabile (1 kW ca.) e nell'altro (Univ.) è decisamente alta (>9 kW). Quindi, in una valutazione, non della singola saldatura, ma del processo industriale nel complesso si dovrebbe tenere conto anche dei cicli di lavoro la cui tempistica influisce sul consumo globale.

Tabella riassuntiva dei test di saldatura

| N. Test | P_attiva (W) | Velocità di rotazione (rpm) | Impianto utilizzato |
|---------|--------------|-----------------------------|--|
| 1 | 13101 | 630 | Dip. di Ing. Mec. dell'Univ. di Genova |
| 2 | 12987 | 630 | |
| 3 | 13187 | 630 | |
| 1 | 4505 | 720 | Rambaudi Ram Mill (RGM Metalworks) |
| 2 | 4487 | 720 | |
| 3 | 4510 | 720 | |

Tabella 6: Tabella riassuntiva dei test di saldatura FSW effettuati con indicazione delle potenza attiva misurata in fase di saldatura.



Il diagramma mette a confronto i valori del FEE dei due impianti. La differenza è chiaramente dovuta al forte base di consumo della macchina in uso a UniGe. Fare la media dei due valori sarebbe quindi fuorviante. In conclusione lo standard di prova proposto dal gruppo di ricerca di UniGe ha permesso di valutare l'efficienza energetica con la strumentazione predisposta da Enea effettuando agevolmente test di saldatura su un materiale di ampio uso e con parametri di lavoro realistici. Si osserva come per questo tipo di tecnologia è estremamente importante l'efficienza dell'intero impianto che deve incontrare il giusto compromesso fra rigidità e quindi peso delle traverse mobili per una buona stabilità di processo e consumi energetici.

6 Conclusioni

Le attività condotte nella terza annualità di progetto hanno dimostrato la piena idoneità all'uso sul campo della strumentazione progettata e realizzata nelle annualità precedenti e dei metodi di indagine adottati.

E' stato quindi possibile raccogliere una mole cospicua di dati, in condizioni operative reali o simulate industriali che hanno permesso anche a valutare miglioramenti hardware e software del sistema di monitoraggio (Es realizzazione di ventilazione forzata per raffreddamento della componentistica, sostituzione di schede di acquisizione con altre più robuste e resistenti a sovratensioni estemporanee dovute ad esempio al mancato innesco d'arco).

Le misurazioni presso i soggetti esterni individuati sono state effettuate senza particolari difficoltà o interferenze, grazie alla non intrusività della strumentazione adoperata.

Nell'ultima fase è stato infatti anche implementato il modulo di controllo WIFI.

Le elaborazioni mostrano che il fattore FEE è uno strumento che, per quanto basato su ipotesi semplificate, consente una sintetica definizione del livello di efficienza raggiunto in un processo di saldatura con impianti diversi.

Nella valutazione dell'efficienza dei generatori ad Arco è stato evidenziato come rispetto ai dati di targa (ove presenti anche in termini di efficienza) la reale efficienza energetica nelle condizioni di normale utilizzo è abbondantemente al di sotto dei dati dichiarati con valori che difficilmente superano in normali condizioni operative il 60% contro dati dichiarati di oltre l'80%.

Per quanto riguarda la standardizzazione delle condizioni di prova, che potrebbe portare alla definizione di un sistema di etichettatura, nelle sezioni precedenti si è fatto il punto per quanto riguarda la saldatura TIG (pag. 56) e FSW (pag. 61).

Le tecnologie investigate durante il triennio e sulle quali è stata realizzata una Base dati ragguardevole sono:

- LASER
- FSW
- TIG

Più limitatamente

- MIG ed EBW.

Sono stati testati materiali ampiamenti diffusi nelle costruzioni (Leghe di alluminio serie 5xxx e 6xxx, acciai al carbonio ed acciai inossidabili).

Il *range* di spessori investigati va da 3 a 30 mm grazie ai test che è stato possibile effettuare presso aziende sensibili all'efficienza energetica dei processi di saldatura come la Walter Tosto.

Sulla base degli studi effettuati e della relativa elaborazione dei dati è possibile definire delle condizioni standard per la valutazione dell'efficienza energetica reale dei generatori e un parametro di comparazione fra tecnologie differenti. In linea generale, fissando uno spessore di 3 mm sugli acciai inossidabili, per le tecnologie industriali per fusione. Per la FSW lo spessore può essere fissato fra 3 e 5 mm di lega d' alluminio della serie 6xxxx.

Si sottolinea ancora una volta che i parametri standard sono scelti tra quelli che assicurano una giunzione (a singola passata) efficace cioè valida come morfologia e proprietà meccaniche del materiale: la tabella seguente li riassume.

| Processo | Materiale | Spessore (mm) | V (cm/min) | Hi (kJ/mm) |
|----------|-----------|---------------|------------|------------|
|----------|-----------|---------------|------------|------------|

| | | | | |
|----------------|--------------|---|---------|-------------------|
| TIG/MIG | Acciaio inox | 3 | 5 | 0,4÷0,6 |
| laser | Acciaio inox | 3 | 100÷150 | 0,16÷0,22 |
| FSW | AA6082 T6 | 5 | 260 | n.a. ² |

Il fattore FEE di ciascun generatore di saldatura misurato in condizioni standard (considerando anche eventuali ausiliari) potrà essere definito come “FEE_s di macchina” e impiegato come strumento di comparazione per la scelta del tipo e del modello di macchina di saldatura da acquistare /utilizzare.

Il FEE di processo globale, ad esempio in una giunzione multi-passata ad alto spessore, non è la cifra di qualità di una macchina o impianto ma potrà essere invece essere utilizzato come metro dell’ecodesign di giunzione cioè come strumento per individuare le “best practices” che possono portare ad un efficientamento dei processi industriali di produzione mediante saldatura.

In termini di tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale, attraverso il FEE globale, indispensabile da utilizzare nel settore dell’impiantistica/caldaieria dove gli spessori in gioco variano da 10 a 400 mm, permette di valutare in modo semplice le scelte in termini di:

- Tipo di processo (da prediligere processi che permettono maggiori rapporto di forma penetrazione/larghezza e maggiore deposizione). L’impiego di processi HDE permette di realizzare passate singole con penetrazioni fino a 5-10 mm e velocità nell’ordine di 100 cm/min. Anche nelle giunzioni di forti spessori >20 mm e < 50 mm sarebbe auspicabile l’introduzione di processi misti (Es. Imbastitura Laser con penetrazioni fino a 10 mm e riempimento Laser + Arco con soluzioni “Narrow Narrow Gap”. Per saldature di spessori >50 mm ad una prima imbastitura Laser Arco potrebbero seguire riempimenti TIG o SAW sempre con soluzioni Narrow Gap;
- Parametri di Processo (da prediligere i processi in cui il prodotto fra apporto termico e numero di passate sia minore);
- Geometria della giunzione (da prediligere Giunzioni Narrow Gap per minimizzare il numero di passate necessarie alla realizzazione della giunzione);
- Gas (ove possibile utilizzare gas che permettano una penetrazione esempio elio o miscele con gas reattivi);
- Materiali d’apporto, esistono alcuni materiali d’apporto quali ad esempio i Metal cored che con tecnologie MIG/MAG permettono di incrementare il rapporto di deposizione a parità di corrente d’arco.

² Per FSW il parametro appropriato è la velocità mandrino: 720 rpm con utensile standard [9]

7 Bibliografia

- [1] *Welding-Related Expenditures and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction and Mining Industries*, American Welding Society, 2000.
- [2] K. Schischke, N. F. Nissen e K.-D. Lang, «Welding Equipment under the energy-related product directive,» *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, n. 4, pp. 517-528, 2014.
- [3] S. Kou, *Welding metallurgy*, John Wiley & Sons, 2003.
- [4] O. R. Myhr e O. Grong, «Dimensionless maps for heat flow analyses in fusion welding,» *Acta Metall. Mater.*, vol. 38, n. 3, pp. 449-460, 1990.
- [5] J. C. Ion, K. E. Easterling e M. F. Ashby, *Acta Metall.*, vol. 32, n. 11, pp. 1949-1962, 1984.
- [6] L. Presutti, *Sviluppo di un sistema di acquisizione dedicato alla misura delle prestazioni energetiche di macchine saldatrici*, Tesi di laurea, rel.Prof. V. Bonaiuto, Univ. Roma Tor Vergata, 2018.
- [7] J. J. Valencia e P. N. Quested, «Vol. 15: Casting,» in *ASM Handbook*, ASM International, 2008.
- [8] P. Fuerschbach, «A dimensionless parameter model for arc welding processes,» Sandia Nat. Lab., 1994.
- [9] C. Gambaro, E. Lertora, C. Mandolino e M. Pizzorni, «Sperimentazione delle linee guida per l'applicazione del marchio ECOWELDESIGN, raccolta dati e validazione per processi FSW, Report RdS/PAR2017/068,» 2018.
- [10] C. Gambaro, E. Lertora, C. Mandolino e M. Pizzorni, «Applicazione del concetto di rendimento e valutazione del fattore di efficienza energetica di un impianto industriale per saldatura Friction Stir Welding, Report RdS/PAR2016/,» 2017.

Appendici:

Allegato A: Modulo raccolta dati – Analisi Energetica Impianti di Saldatura.

Sono state invitate varie aziende a partecipare alla campagna di misure su impianti di utilizzo industriale. In particolare con apposita lettera di invito sono state invitate:

| Nome Azienda | Restituzione Allegato A |
|-----------------------|--|
| Walter Tosto | Si: per impianto TIG automatico, SAW, Tig e MIG |
| Università di Salerno | Si: impianti di saldatura Ricerca ed Industriali (Consorzio Calef) con potenze di 4 e 10 kW |
| OMA Foligno | Si: impianto TIG |
| IIS - Genova | Vari tipi di impianto fra cui SAW |
| ESAB - Milano | FSW |
| RMG - Ovada | FSW |

Non è stato possibile effettuare tutte le campagne di prova in situ da un lato per tempistiche dall'altra a causa di difficoltà all'accesso al sito o motivi di riservatezza.

In particolare, nella discriminazione della scelta delle aziende è ricaduta sia in funzione della tipologia di impianti che erano disponibili a mettere in test sia dalla disponibilità a rendere pubblici i dati.

Di seguito il modello utilizzato per la raccolta dati.

Allegato A

Modulo raccolta dati - Analisi energetica impianti di saldatura -

Denom. impianto: _____
collocazione: _____

principali attività svolte: _____

Persona di riferimento: _____

telefono/email: _____

Tipo Sorgente/ generatore di saldatura:

ARCO

TIG MIG PLASMA altro: _____

LASER (NIR)

Nd:YAG DISCO FIBRA altro: _____

Friction Stir Welding RSW altro: _____

Descrizione Sintetica dei materiali trattati, spessori e prodotti realizzati:



AdP 2015-2017 - PaR 2017 – Mod. a.2
 Progetto: D3 "Processi e Macchinari Industriali"
 Obiettivo: A. Etichettatura energetica per l'efficiamento di macchinari
 A.2 Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale

Prestazioni nominali

ARCO

Tensione arco (V, min/max): _____

corrente (A, min/max): _____

modo

continuo pulsato alternato altro: _____

LASER

Potenza utile (W): _____

BPP (mm mrad) : _____ diam. Fibra (um): _____

lung. focale collimazione (mm): _____ focalizzaz. (mm): _____

Altezza libera sotto la testa di focalizzazione (mm, min/max): _____

distanza posizione focale dalla testa (mm): _____

Presenza laser puntatura Tipo _____

Altro: _____

Friction Stir Welding

Potenza mandrino (kW) : _____ veloc. rotazione (rpm): _____

veloc. di avanzamento (mm/min) : _____

Potenza sistema di movimentazione: _____

Altro: _____

Tipo di Connessione Alimentazione elettrica ed ausiliari:

SORGENTE/GENERATORE

Collegamento con presa: SI se SI Tipo: _____

NO Collegamento diretto a Quadro: descrizione (sez. cavi, capicorda, ecc.):

Accessibilità: _____

3 fasi+neutro 3 fasi fase+neutro altro: _____

tensione (V): _____

corrente nominale max (A): _____

Possibilità di permanere nelle prossimità della presa/quadro durante le normali lavorazioni ? SI NO

Descrizione Gas di assistenza per monitoraggio integrato consumi

tipo: _____ portata (Nlt./min): _____ pressione (bar): _____

tipo: _____ portata (Nlt./min): _____ pressione (bar): _____

NB: strumentaz. predisposta per ingresso/uscita con attacchi a innesto per tubi in polimero diam. 10 mm

Descrizione linea aria compressa se indispensabile per utilizzo dell'apparato di saldatura

portata (Nlt./min): _____ pressione (bar): _____

filtrata deumidificata (opz. Classe ISO 8573-1: _____)

NB: strumentaz. predisposta per ingresso/uscita con attacchi a innesto per tubi in polimero diam. 10 mm



AdP 2015-2017 - PaR 2017 – Mod. a.2
 Progetto: D3 "Processi e Macchinari Industriali"

Obiettivo: A. Etichettatura energetica per l'efficiamento di macchinari
 A.2 Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale

Per misura potenza laser (calorimetro), verifica disponibilità acqua di raffreddamento

| | | |
|--|--|--|
| <input type="checkbox"/> Circuito aperto | <input type="checkbox"/> chiller | <input type="checkbox"/> filtrata |
| <input type="checkbox"/> Portata 7÷10 lt/min | <input type="checkbox"/> temp. ingresso costante ±1 °C | <input type="checkbox"/> temp. In ≈ temp. ambiente |
| NB: ingresso/uscita strumentazione con attacchi a innesto per tubo in polimero diam. 12 mm | | |

Sistemi di manipolazione e Attrezzature ausiliarie

- Posizionatore/tavola di saldatura
- Robot antropomorfo
- Sistema di controllo (CNC o altro)
- Guida filo materiale di apporto
- Inseguitore di giunto
- Sistema di visione
- _____
- _____
- _____

Per ogni attrezzatura ausiliaria ad alimentazione elettrica separata e caratterizzata da un significativo assorbimento, si compili la scheda seguente:

Scheda attrezzatura ausiliaria

Denominazione: _____

Alimentazione elettrica

3 fasi+neutro 3 fasi fase+neutro altro: _____

tensione (V): _____ corrente nominale max (A): _____

cavo alimentazione, sez. conduttori (mm²): _____

modalità allaccio: presa (portata (A): _____ , num. poli: _____) diretto al quadro

tipo di terminazione dei conduttori (capicorda, ecc.): _____

distanza utenza-presenza (m): _____