



Ricerca di Sistema elettrico

Sperimentazione delle linee guida per l'applicazione del marchio ECOWELDESIGN, raccolta dati e validazione per processi FSW

Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolino, Marco Pizzorni



SPERIMENTAZIONE DELLE LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DEL MARCHIO ECOWELDESIGN, RACCOLTA DATI E VALIDAZIONE PER PROCESSI FSW

Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolino, Marco Pizzorni
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell'Università di Genova

Ottobre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: Processi e macchinari industriali

Obiettivo: D. Impiego tecnologie elettriche nei processi industriali

D.1 Efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "«Sperimentazione delle linee guida per l'applicazione del marchio ECOWELDESIGN, raccolta dati e validazione per processi FSW» R

Responsabile scientifico ENEA: Ing. M. Moncada

Responsabile scientifico dell'Università di Genova: Prof.ssa Ing. Carla Gambaro



Indice

1	INTRODUZIONE	4
2	ATTIVITÀ SPERIMENTALE	4
3	RILEVAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI.....	11
4	RILEVAZIONE DELLA TEMPERATURA.....	13
5	VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI GIUNTI FSW.....	17
6	STANDARD DI PROVA.....	18
7	CONCLUSIONI.....	18
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	18
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	20

1 Introduzione

Scopo del presente studio è raccogliere dati relativi al consumo energetico di macchine per saldatura FSW inserite in processi industriali. Per fare ciò è stata utilizzata la strumentazione messa a punto negli anni precedenti e da altri partner del progetto, presso alcune aziende che utilizzano la FSW nell'ambito dei loro processi industriali. Sono stati rilevati i dati in differenti condizioni di funzionamento della macchina, durante l'esecuzione di saldature tra parti in lega di alluminio della serie AA6XXX. I dati rilevati sperimentalmente sono stati analizzati, così come si è effettuata l'analisi delle saldature realizzate, in modo da stabilire la quantità di energia utilizzata nelle diverse condizioni operative. Con i dati energetici e termici, è stato valutato il fattore di efficienza, come prestabilito nelle precedenti fasi della ricerca.

Al termine delle attività, è stato definito uno standard di prova utile a definire le condizioni in cui devono essere eseguite le saldature (velocità di rotazione e velocità di avanzamento dell'utensile, tipo di utensile, materiali, ecc.) per la determinazione del fattore di efficienza.

2 Attività sperimentale

La macchina presso l'azienda sulla quale sono state effettuate le misurazioni energetiche è una fresatrice universale adattata per la saldatura FSW.

In figura 1 è riportata l'immagine della macchina utilizzata dall'azienda per produrre pezzi saldati. Si nota la presenza di due motori elettrici che governano, rispettivamente, la rotazione del mandrino e la movimentazione della tavola portapezzo.

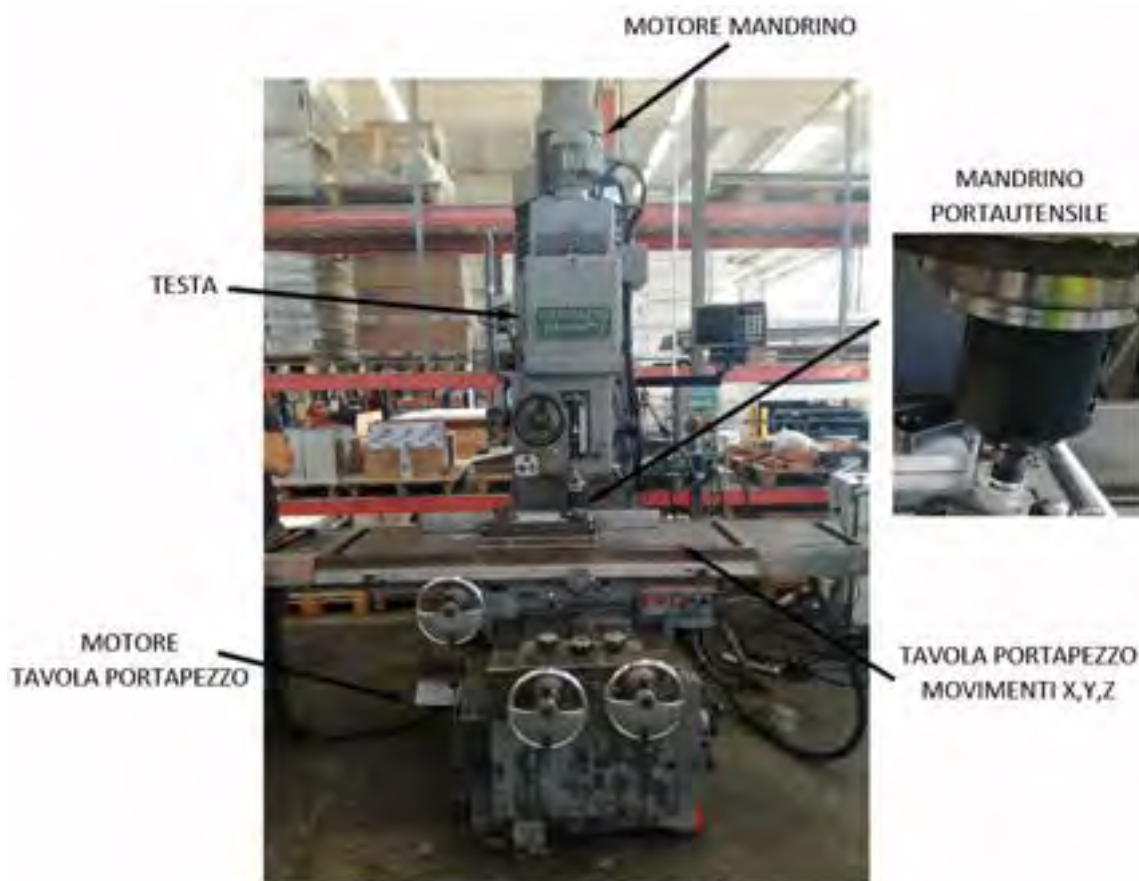


Fig. 1 Fresatrice universale trasformata in saldatrice FSW

Fra tutti i parametri di saldatura che hanno permesso di realizzare giunti qualificati durante l'attività di ricerca svoltasi il primo anno, sono stati adottati i seguenti:

Velocità di rotazione utensile = 720 giri/min;

Velocità di avanzamento utensile = 260 mm/min.

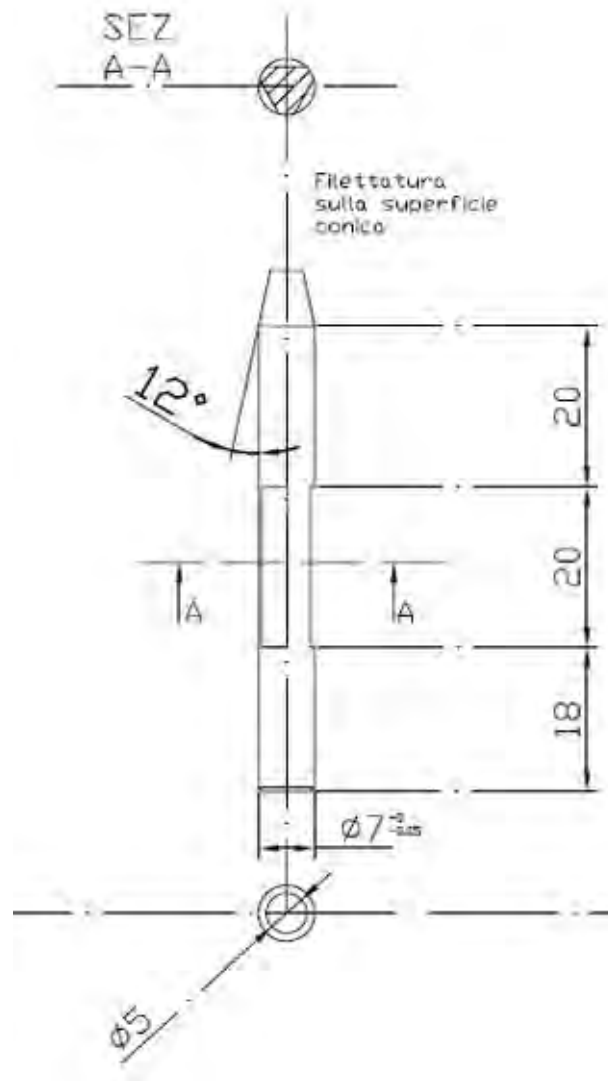


Fig. 3 Punta dell'utensile

Come visibile, la forma della punta è conica ed è presente una filettatura. Durante l'esecuzione delle saldature, è stato adottato un senso di rotazione dell'utensile discorde rispetto al senso dell'elica della filettatura (moto a "svitare"), per migliorare l'efficacia di rimescolamento del materiale.

Il giunto realizzato adottando i parametri sopraelencati e utilizzato per la qualifica del processo e la valutazione del fattore di efficienza energetica del processo è riportato in figura 4.



Fig. 4 Giunto saldato

Si noti che il giunto è stato realizzato utilizzando dei talloni di ingresso ed uscita dell'utensile, in modo da evitare la presenza di difetti nella saldatura.

Per valutare la qualità del procedimento di saldatura FSW, si deve fare riferimento alla normativa internazionale UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 “Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura” e quindi eseguire i controlli non distruttivi e le prove meccaniche riportate in tabella 1.

Tab 1 Elenco dei controlli e delle prove da eseguire sui giunti da qualifica

Tipo di controllo o prova	Estensione dell'esame
Controllo visivo	100%
Prova di trazione trasversale	almeno 2 campioni
Prova di piega trasversale	almeno 2 campioni al rovescio almeno 2 campioni al dritto
Analisi macrografica	1 campione

Sul giunto prodotto, è stato effettuato l'esame visivo, in modo da verificare la presenza di macro difetti affioranti in superficie od al rovescio (mancanza di penetrazione), e un esame radiografico, in modo da individuare l'eventuale presenza di difetti interni non rilevabili con esame visivo, quali tunnel od inclusioni. Il controllo visivo ed il controllo radiografico non hanno evidenziato difetti. In figura 5 è riportata la radiografia della parte centrale del giunto, zona da cui sono stati prelevati i campioni per le prove meccaniche e metallografiche.

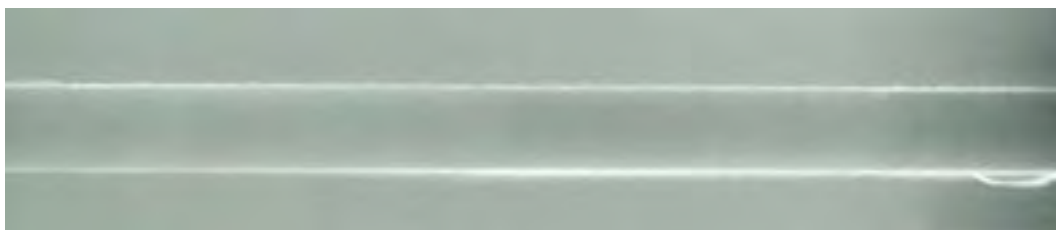


Fig. 5 Radiografia giunto saldato

Per eseguire le prove di trazione e di piega, il giunto è stato tagliato come visibile in figura 6. Sono stati quindi ottenuti sei provini destinati alle prove di trazione (T1÷T6) e sei da utilizzarsi per le prove di piega: tre al dritto (P1÷P3) e tre al rovescio (P4÷P6).

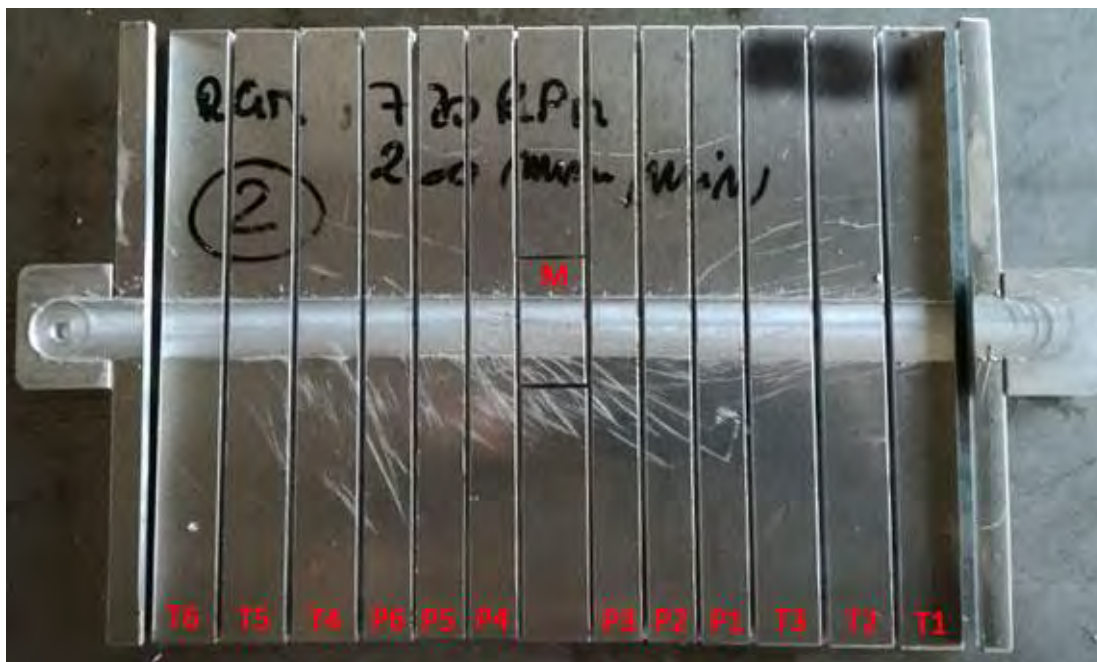


Fig. 6 Taglio dei campioni per prove distruttive

Le prove di trazione sono state effettuate utilizzando una macchina Instron 8802, attrezzata con una cella di carico in grado di misurare carichi fino a 50 kN.

I risultati delle prove sono riportati in tabella 2, in cui σ_{R-MB} è la resistenza a trazione del materiale base e σ_{R-FSW} è la resistenza a trazione del giunto saldato.

Tab. 2 Risultati delle prove di trazione

Numero Prova	σ_{R-MB} [MPa]	σ_{R-FSW} [MPa]	Efficienza meccanica del giunto $\sigma_{R-FSW} / \sigma_{R-MB}$
T1	340	206.6	60.7
T2		206,5	60.7
T3		207.1	60.9
T4		206.9	60.8
T5		207.2	60.9
T6		207.0	60,8
MEDIA			206.8

La norma UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 prescrive che la tensione di rottura del campione saldato sia maggiore della tensione di rottura del materiale base moltiplicata per un fattore di efficienza meccanica del giunto (f), che nel caso delle leghe d’alluminio trattabili termicamente allo stato T5 o T6 vale 0,6:

$$\sigma_{R-FSW} \geq \sigma_{R-MB} \cdot f$$

Nel caso in esame, risulta:

$$206,8 \geq 340 \cdot 0,6 = 204 \text{ MPa}$$

Quindi la condizione è verificata.

Per quanto riguarda le prove di piega, sono state eseguite pieghe da entrambi i lati della saldatura, in modo che entrambe le superfici del giunto fossero di volta in volta in trazione. Le prove di piega al dritto prevedono la trazione della superficie esposta all'azione dell'utensile, mentre durante le prove di piega al rovescio si ha la trazione della superficie opposta a quella su cui agisce l'utensile.

La prova di piega risulta superata se i campioni subiscono un angolo di piega di almeno 150° senza che si rilevi la presenza di cricche, qualsiasi sia la lega di alluminio utilizzata.

I rulli utilizzati devono essere dimensionati in funzione dello spessore del campione saldato, secondo la seguente formula:

$$d = \frac{100 \cdot t_s}{\Delta l} - t_s$$

dove:

d è il diametro massimo dei rulli utilizzabili;

t_s è lo spessore del campione saldato (nel caso in esame pari a 5 mm) ;

Δl è l'allungamento minimo percentuale del materiale base (nel caso in esame pari a 10 %).

Nel caso in esame, sono stati utilizzati rulli di diametro pari a 20 mm.

In figura 7 è riportato, a titolo di esempio, un campione dopo la piega al rovescio.



Fig. 7 Campione sottoposto a prova di piega al rovescio

I risultati delle prove di piega sono riassunti in tabella 3.

Tab. 3 Risultati delle prove di piega

N° prova	Lato dritto	N° prova	Lato rovescio
P1	Prova superata	P4	Prova superata
P2	Prova superata	P5	Prova superata
P3	Prova superata	P6	Prova superata

Infine, il giunto realizzato è stato analizzato mediante osservazione metallografica, per individuare la presenza di eventuali difetti (la cui accettabilità è definita, specificamente per le saldature FSW, dalla norma UNI EN ISO 25239-5: 2012 "Saldatura friction stir – alluminio – Requisiti di qualità e ispezione") e le dimensioni delle zone alterate termicamente. Il provino metallografico (M in figura 6) è stato ricavato perpendicolarmente alla direzione di saldatura, in modo da osservare le strutture presenti nelle varie zone

del giunto. Dopo il taglio, il provino è stato lucidato e attaccato con reagente di Keller in modo da procedere all'esame della struttura mediante microscopio ottico (Fig. 8).



Fig. 8 Campione metallografico

Come visibile, non sono stati riscontrati difetti.

All'interno di un giunto, si possono distinguere le quattro zone tipiche del processo FSW, identificate dalle lettere A-E in figura 9. In particolare, la zona D costituisce il Nugget del giunto ossia la zona dove si raggiunge la temperatura più elevata e, per effetto della ricristallizzazione dinamica, si ha una struttura a grano fine. La zona E è detta "braccio del flusso" ed è dovuta all'asimmetria del processo (si forma all'avancing side, ossia dove i vettori velocità di rotazione e velocità di avanzamento sono concordi). Le zone C, chiamate ZTMA – Zone Termo-Meccanicamente Alterate, sono quelle in cui i grani hanno subito l'azione diretta del calore generato per attrito dalla spalla dell'utensile e quella indiretta dovuta al rimescolamento esercitato dalla punta. Infine, le zone B (dette ZTA – Zone Termicamente Alterate) subiscono solo l'azione indiretta del calore che per conduzione fluisce dalle zone sopradescritte. Le lettere A identificano il materiale base, ossia quelle parti dei pezzi saldati che non hanno risentito di alcun effetto (né meccanico, né termico).



A: Materiale base B: ZTA C: ZTMA D: Nugget E: Braccio di flusso

Fig. 9 Zone caratteristiche di un giunto FSW

Mediante l'analisi metallografica, si è valutata l'estensione della zona interessata dal riscaldamento (zone B, C, D ed E) e quindi il volume di materiale che ha accumulato energia durante la saldatura. In figura 10 si riportano le misurazioni delle zone sopradescritte.



Fig. 10 Campione metallografico con misure del perimetro (P) e dell'area (A) delle zone che hanno subito alterazione termica

Sono state inoltre effettuate prove di microdurezza Vickers, con carico di 0,2 kgf. E' stata realizzata una linea di indentazioni, a metà dello spessore del giunto. I valori riscontrati nella zona centrale del cordone sono paragonabili a quelli rilevati nel materiale base. I valori più bassi sono stati invece riscontrati nelle zone termicamente alterate dei giunti. In queste zone è stato notato un calo di durezza del 15%, rispetto a quella del materiale base (Fig. 11).



Fig. 11 Mappa delle durezza rilevate sul giunto

3 Rilevazione dei consumi energetici

Lo schema di figura 12 evidenzia i punti di consumo energetico della macchina sopra illustrata.

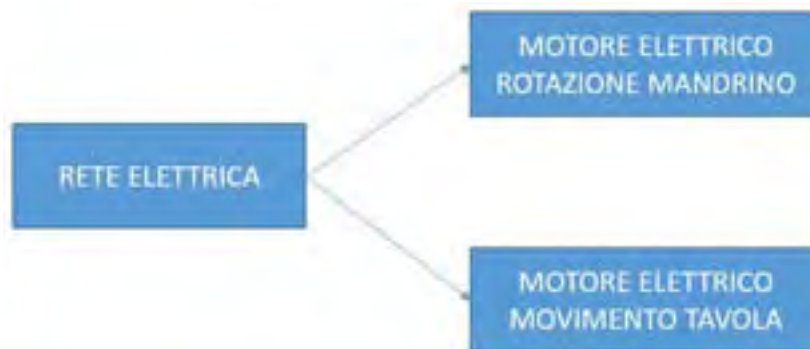


Fig. 12 Schema dei punti di consumo energetico

La valutazione dell'assorbimento elettrico è stata effettuata con l'attrezzatura messa a punto dal partner di progetto dell'Università di Roma – Tor Vergata. In figura 13 è visibile l'attrezzatura per la rilevazione dei consumi elettrici.



Fig. 13 Box con ingressi e uscite monitorate

Il sistema è dotato di una serie di cavi e prese che permette di collegarsi alla macchina saldatrice. I dati vengono raccolti tramite scheda di acquisizione National Instruments e registrati mediante computer portatile.

Durante la realizzazione della saldatura, sono stati monitorati gli assorbimenti dei motori illustrati nello schema di figura 12, in termini di potenza istantanea, e calcolate la potenza attiva e la potenza apparente (di prima armonica) durante la fase di consumo:

- a “vuoto” della macchina, precedente la saldatura;
- a regime della macchina, nel periodo di saldatura;
- a “vuoto” della macchina, immediatamente dopo la saldatura.

In figura 14 è riportato il grafico della potenza istantanea assorbita durante la realizzazione del giunto descritto nel capitolo precedente.

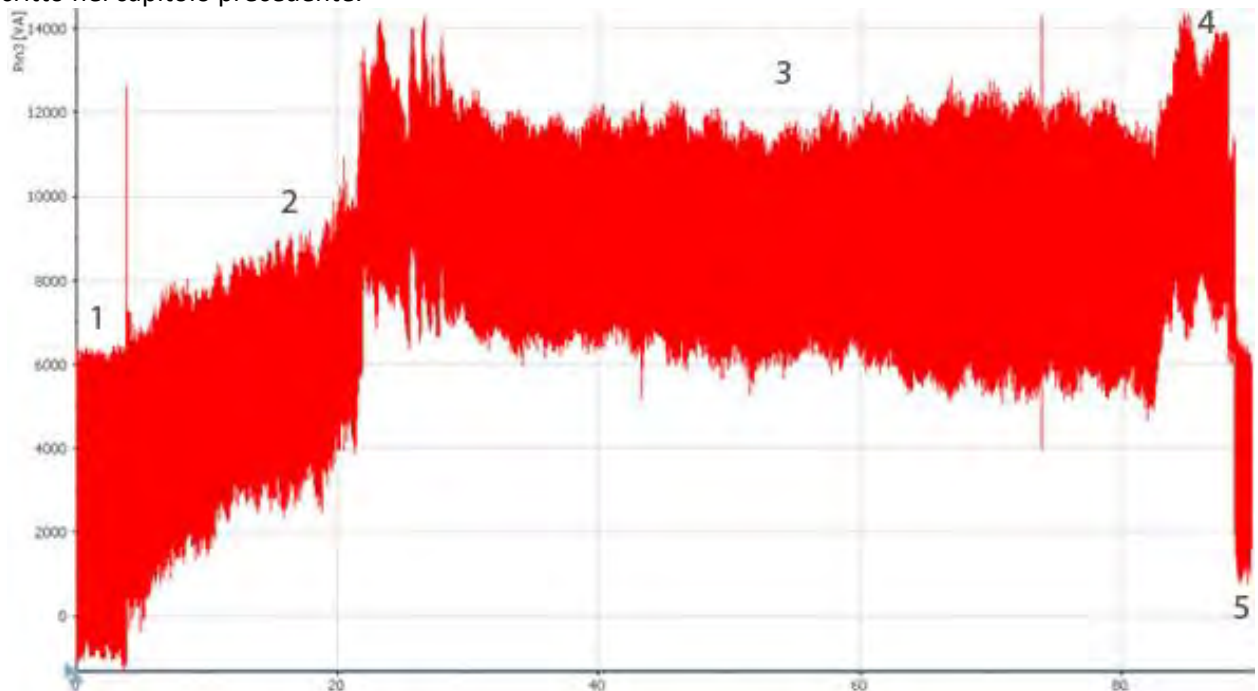


Fig 14 Andamento della potenza istantanea assorbita durante il test

Il grafico permette di evidenziare le diverse fasi del processo di saldatura FSW:

- 1- potenza assorbita dal motore elettrico a “vuoto”;
- 2- rampa di potenza assorbita fino ad un valore di picco relativo alla fase di penetrazione dell’utensile;
- 3- potenza assorbita costante, nella fase di avanzamento dell’utensile;
- 4- picco di potenza osservato in corrispondenza del momento in cui la spalla dell’utensile si stacca dal metallo ormai saldato;
- 5- rampa di discesa nella fase finale, in cui il motore ruota a “vuoto”.

I valori della potenza apparente e della potenza attiva, calcolati dall’analisi della potenza istantanea, sono riportati nella tabella 4.

Tab. 4 Potenza apparente ed attiva

Fase	P_apparente [VA]	P_attiva [W]
1 A vuoto, prima della penetrazione dell’utensile	3848	1005
3 Durante la saldatura	8498	4487
5 A vuoto, dopo la saldatura	3889	1010

4 Rilevazione della temperatura

Oltre alle misurazioni dell’assorbimento elettrico, sono state condotte rilevazioni di carattere termico mediante termo camere.

Come noto, una termocamera consente di misurare e rappresentare graficamente la radiazione infrarossa emessa da un oggetto. Poiché la radiazione infrarossa è funzione della temperatura della superficie di un dato oggetto, la termocamera è in grado di calcolare e visualizzare tale temperatura.

Le termocamere utilizzate per le riprese termiche effettuate durante la realizzazione delle saldature sono una ThermaCAM S60 (figura 15) e una E8 (figura 16), entrambe della FLIR Systems.



Fig. 15 Termocamera ThermoCAM S60



Fig. 16 Termocamera E8

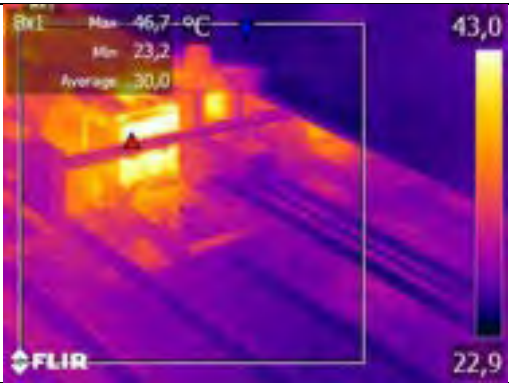

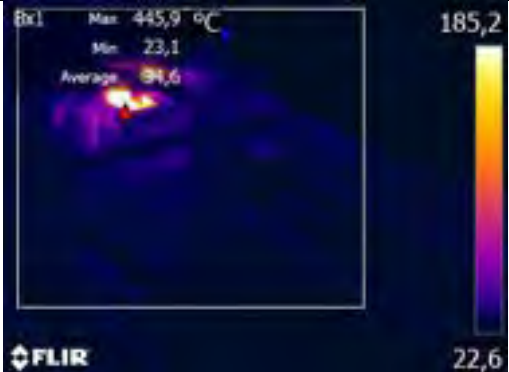
La termocamera ThermaCAM S60 è dotata di un obiettivo incorporato da 24°x18°; presenta un sensore a raggi infrarossi allo stato solido con circa 77.000 punti di misurazione. Tale strumento consente di effettuare riprese di immagini nell'onda lunga; offre una sensibilità termica molto elevata (fino a 0,08 °C) ed ha capacità di misurare temperature da -40 °C a +2.000 °C. La precisione di misurazione è del 2% e l'intervallo spettrale rilevato si mantiene all'interno del range di valori 7,5-13 μm. Come detto, il sensore Micro IR è in grado di operare su intervalli di temperatura molto ampi: oltre ai due intervalli standard di temperatura (da -40 °C a +120 °C e da 0 °C a +500 °C), è possibile impostare intervalli opzionali per le alte temperature, fino +2.000 °C. Le caratteristiche del sistema consentono di misurare e di visualizzare fino a dieci temperature discrete contemporaneamente.

La termocamera E8 è dotata di un obiettivo incorporato da 45°x34°, con un sensore ad infrarossi con 76.800 punti di misurazione; offre una sensibilità di misura maggiore rispetto alla precedente (0.06 °C), ma ha una capacità di misura in un intervallo più ristretto (da -20 °C a +250 °C).

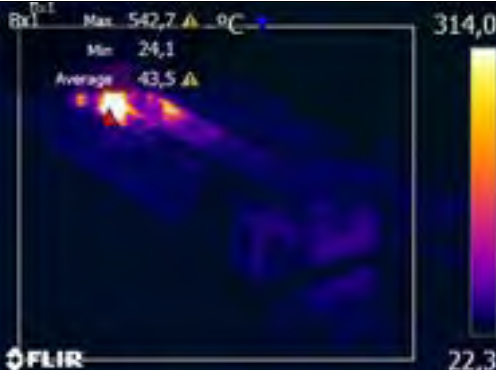
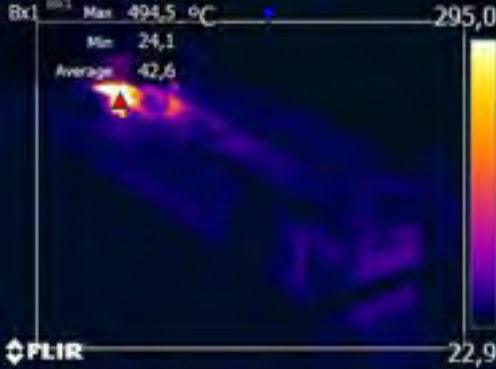


Entrambe le termocamere sono interfacciabili a PC mediante software dedicato ThermaCAM FLIR, che permette l'analisi dei dati e la stesura dei rapporti.

Le rilevazioni effettuate durante la realizzazione del giunto oggetto della ricerca sono riportate in tabella 5.

Tab. 5 Rilevazione termografica

Fase	Immagine termografica	Tmax [°C]
A vuoto, prima della penetrazione dell'utensile nel materiale da saldare		46.7
Inizio fase di penetrazione della punta dell'utensile nel materiale da saldare		137.2
Penetrazione completa della punta e contatto spalla utensile-superficie del pezzo da saldare		445.9

<p>Inizio avanzamento dell'utensile</p>		<p>492.0</p>
<p>Saldatura</p>		<p>514.9</p>
<p>Saldatura</p>		<p>520.4</p>
<p>Saldatura</p>		<p>523.1</p>

Saldatura		542.7
Termine avanzamento dell'utensile		494.5
Estrazione dell'utensile		200.7
A vuoto al termine della saldatura		87.1

Il valore medio della temperatura rilevata durante la fase di saldatura risulta essere pari a 525.2 °C.

5 Valutazione dell'efficienza dei giunti FSW

L'analisi delle temperature raggiunte durante la saldatura, la valutazione delle dimensioni delle zone termicamente alterate del giunto saldato e le prove meccaniche confermano che i parametri utilizzati permettono di ottenere giunti caratterizzati da efficacia elevata.

Avendo valutato l'estensione delle zone interessate dal flusso termico, considerando una lunghezza del giunto di riferimento pari a 10 mm, e noto il calore specifico dell'alluminio ($c=800 \frac{J}{kg \cdot K}$), è possibile calcolare l'energia assorbita dal materiale. Conoscendo inoltre la velocità di avanzamento, è immediato calcolare la potenza utilizzata per plasticizzare i lembi. I valori rilevati e calcolati sono riportati in tabella 6. Per valutare l'efficienza delle saldature è necessario fare il rapporto tra la potenza assorbita dal materiale e la potenza totale assorbita dalla rete.

Tab. 6 Energia assorbita durante la saldatura FSW

ID Prova (Vel. di rotazione [giri/min] / Vel. di avanzamento [mm/min])	Dimensioni della zona plasticizzata		Temperatura raggiunta [K]	Energia assorbita dal materiale [J]	Potenza assorbita dal materiale [W]	Efficienza saldatura [%]
	Area [mm ²]	Volume [mm ³]				
720/260	62.6	626.8	798	1040	450.8	10.05

6 Standard di prova

A conclusione della presente ricerca, è possibile stabilire uno standard di prova per la determinazione dell'efficienza energetica di una macchina per saldatura Friction Stir Welding.

Di seguito sono elencati i materiali, le geometrie dell'utensile e le condizioni di prova da adottare per effettuare una saldatura FSW durante la quale si vuole rilevare l'assorbimento di energia utile per il calcolo dell'efficienza energetica della macchina.

Materiale: lamiera in lega di alluminio del tipo AA6082 T6, spessore 5 mm.

Utensile (Vedere figg. 2-3): spalla piatta diametro 19 mm; pin tronco conico con diametro alla base pari a 7 mm ed angolo di conicità 12°. La parte conica deve inoltre presentare una filettatura destrorsa con passo 1mm. Il pin deve fuoriuscire dalla spalla di 4.9 mm.

Parametri di prova: velocità di rotazione dell'utensile 720 giri /min, velocità di avanzamento in saldatura 260 mm/min e senso di rotazione antiorario.

Rilevazioni necessarie: durante la saldatura è necessario rilevare sia l'assorbimento elettrico, mediante la potenza istantanea rilevata alla presa della macchina, sia la temperatura del materiale durante la saldatura.

7 Conclusioni

I dati ricavati strumentando una macchina per saldatura FSW hanno permesso di valutare il consumo energetico in differenti condizioni di funzionamento, mentre l'analisi della saldatura realizzata ha permesso di stabilire la quantità di energia assorbita dal materiale.

Con i dati così acquisiti, è stato possibile valutare l'efficienza energetica, durante l'esecuzione di saldature tra parti in lega di alluminio della serie AA6XXX, e sono state definite le condizioni (velocità di rotazione, velocità di avanzamento, tipo di utensile) in cui devono essere realizzate le saldature, per determinare il fattore di efficienza della macchina utilizzata per realizzare il processo FSW.

8 Riferimenti bibliografici

- [1] W.M. Thomas, E.D. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, and C.J. Dawes, "Friction Stir Butt Welding", International Patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application 9125978.8, 6 December 1991, and U.S. Patent 5,460,317, US Patent Office, Alexandria, VA, 1995.
- [2] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, and C.J. Dawes, "Improvements Relating to Friction Welding", International Patent Application B23K 20/12, B29C 65/06, 1993.
- [3] C. Gambaro, L. Fratini, A. Squillace, J. Adamowki, M. Ponte, "Friction Stir Welding – introduzione alla tecnologia", 2009, Aracne Editrice.
- [4] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50, 2005, pgg. 1-78
- [5] UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 "Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura"

- [6] UNI EN ISO 25239-5: 2012 “Saldatura friction stir – alluminio – Requisiti di qualità e ispezione”
- [7] H.S. CARSLAW AND J.C. JAEGER, Conduction of heat in solids, Oxford Press
- [8] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, Flow visualization and residual microstructures associated with the FSW of 2024 aluminum to 6061 aluminum, *Materials Science and Engineering*, vol. A271, (1999), pp. 213-223
- [9] T.J. Lienert, W.L. Stellwag, L.R. Lehman, *Heat Inputs, Peak Temperatures and Process Efficiencies for FSW*, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, (2003).
- [10] P. Zelinski, “Welding on a machining centre”, www.toolingu.com/articles .
- [11] Ponte M., Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., “Low-cost transformation of a conventional milling machine into a simple FSW work station”, 7th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST '05, Udine, 9-10 Giugno 2005, pgg. 357-365.
- [12] M.F. Zaeh; D. Eireiner; L. Papadakis, “Friction stir welding with modern milling machines - requirements, approach and application”, 5th International FSW Symposium; Metz, Francia 14-16 Settembre 2004.

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Meccanica Energetica Gestionale e dei Trasporti della Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Genova, coordinato dalla Professoressa Carla Gambaro, collabora da anni con Università e Centri di Ricerca italiani ed europei, effettuando studi inerenti le diverse tecniche di giunzione.

In particolare, sono state effettuate diverse campagne di prova per determinare le finestre di saldabilità di numerose leghe di alluminio e compositi a matrice metallica, mediante la tecnica di saldatura Friction Stir Welding (FSW).

Il gruppo è composto da tre ricercatori, due dei quali hanno conseguito la qualifica di International Welding Engineer, figura di coordinamento del processo di saldatura, riconosciuta dall'International Welding Federation.

A conferma delle competenze acquisite, il gruppo ha gestito diversi progetti di ricerca relativi allo studio della FSW, tra i quali si citano i seguenti:

- Studio e sviluppo di processi innovativi per l'applicazione industriale di tecnologie di Friction Stir Welding (FSW), finanziato nell'ambito del Docup Ob 2 Mis. 1.4 Sottomisura B della Legge 598/94
 - Sviluppo di metodologie innovative per l'indurimento superficiale mediante FSW, di stampi impiegati nella lavorazione di materiali polimerici termoplastici, finanziato dal Parco Scientifico e Tecnologico della Liguria nell'ambito del Docup Ob. 2 Misura 1.4 Sostegno all'innovazione Legge 598/94.
 - Resistenza a fatica di giunti in lega AA8090 saldati mediante FSW, finanziato dall'Università di Genova
- Di seguito vengono riportate le principali pubblicazioni, suddivise per tipologia, redatte a seguito dell'attività di ricerca svolta presso i laboratori del gruppo oppure in collaborazione con alcuni tra i maggiori centri di ricerca europei, quali EADS e GKSS.

Lavori su libro:

- Gambaro C., Adamowski J., "Le metodologie di giunzione", Auto e alluminio, 2004, p. 241-250, BRESCIA: Edimet, ISBN/ISSN: 788886259262.
- Gambaro C., Adamowski J., "Methods of joining aluminium alloys", Aluminium and cars, 2005, p. 241-250, BRESCIA: Edimet, ISBN/ISSN: 88-86259-24-7.
- Gambaro C., Lertora E., Metodologie di giunzione a freddo - L'alluminio e il mare. p. 154-163, BRESCIA: Edimet, 2008 ISBN/ISSN: 88-86259-29-8.
- Gambaro C., Fratini L., Squillace A., Adamowski J., Buffa G., Ponte M., Friction Stir Welding – introduzione alla tecnologia, 2009 ISBN: 978-88-548-2530-7.

Lavori pubblicati su rivista internazionale:

- Tovo R., Gambaro C., Volpone M.L., "Friction Stir Welding: an innovative seam technology", Welding International, Vol. 17, n. 1, pagg. 36–42, 2003.
- Uzun H., Dalle Donne C., Argagnotto A., Ghidini T., Gambaro C., "Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel", ELSEVIER. vol. 26, pp. 41-46 ISSN: 0922-3444, 2004
- Marzoli M.L., Von Strombeck A., Dos Santos J.F., Gambaro C., Volpone M.L., "Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20p reinforced alloy, Composites science and technology Elsevier, pagg. 363-371, 2005.
- Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., Ponte M., Szkodo M., "Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6", Archives of materials science and engineering (AMSE), Agosto 2007, Volume 28-8, pagg.: 453-460.
- Lertora E., Ponte M., Gambaro C., "Mechanical – structural characterisation of friction stir welds between AA5754 H32 and AA2024 T3 alloys", Scientific Applications and Technical Notes, Gennaio 2009, Volume 1, pagg.: 39-50, ISSN: 1974-8493.
- Lertora E., Gambaro C., "AA8090 Al-Li alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life", International Journal of Material Forming, vol. 3, 2010, pagg. 1003-1006, DOI: 10.1007/s12289-010-0939-1.

- Lertora E., “Comparison of AA 2024 T3 friction stir welded and riveted overlap joints with the addition of a pressurization test” *Materials and design*, vol. 49, 2013, pagg. 259-266, ISSN 0261-3069, 10.1016/j.matdes.2013.01.052
- M. Pedemonte, C. Gambaro, E. Lertora, C. Mandolino, “Fatigue assessment of AA8090 friction stir butt welds after surface finishing treatment”, *Aerospace science and technology*, vol 27, 2013, pagg 188-192, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2012.08.006>.
- Lertora E., Mandolino C., Gambaro C., “Effect of welding parameters on AA8090 Al-Li alloy FSW T-joint”, *Key Engineering Materials*, vol 554-557, 2013, pagg. 985-995, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.985.

Lavori pubblicati su rivista nazionale:

- Marzoli L., Von Strombeck, Dos Santos J., Gambaro C., Volpone M., Rizzuto E., “Giunzioni di Al-CMM mediante Friction Stir Welding: influenza sulla distribuzione e sulle dimensioni delle particelle della fase dispersa”, *La metallurgia italiana*, n° 10, 2003, pagg. 33-38, Edimet, Brescia, Italia.
- Volpone M.L., Gambaro C., Lertora E., Magnasco M., Dos Santos J., “Recenti sviluppi della tecnologia Friction Stir Welding – l’acciaio: una scommessa?”; *Rivista Italiana della Saldatura*, n° 3, 2004, pagg. 731-735, Istituto Italiano della Saldatura, Genova, Italia.
- Ponte M., Lertora E., Adamowski J., Gambaro C., “Caratterizzazione meccanica di giunti Friction Stir Welding tra materiali dissimili”, *Rivista Italiana della Saldatura*, n° 2, 2006, pagg. 211-217, Istituto Italiano della Saldatura, Genova, Italia.
- Ponte M., Lertora E., Adamowski J., Gambaro C., “[Mechanical characterisation of FSW joints](#)”, *A&L - Aluminium and its Alloys*, Settembre 2006, pagg.: 116-121.
- Ponte M., Lertora E., Gambaro C., “Caratterizzazione meccanico strutturale di giunzioni friction stir tra le leghe AA5754 H32 e AA2024 T3”, *La metallurgia italiana*, Settembre 2007, pagg.: 13-19.
- Lertora E., Gambaro C., Ponte M., Gelci R., “Confronto tra giunti rivettati e giunti FSW a sovrapposizione”, *Lamiera*, Settembre 2008, pagg.: 124-131.
- Pedemonte M., Gambaro C., Lertora E., Mandolino C., “La Friction Stir welding per incrementare la vita a fatica”, *Lamiera*, Ottobre 2010, pagg.: 86-89.

Lavori presentati a congressi internazionali:

- Marzoli L., Von Strombeck A., Dos Santos J.F., Gambaro C., Volpone M.L., “Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20% reinforced alloy”, 6th International Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials, 2003, pagg. 1-5, Vicenza, Italia, SGEEditoriali, Padova, Italia.
- Marzoli M.L., Von Strombeck, Dos Santos J.F., Limberg W., Gambaro C., Volpone M.L., Rizzuto E., “Tool wear in Friction Stir Welding of an AA6061/Al₂O₃/20p alloy”, 12th International Conference on Experimental Mechanics ICEM 12, 2004, pagg. 1-8, Bari, Italia.
- Ponte M., Adamowski J., Gambaro C., Lertora E., “Low-cost transformation of a conventional milling machine into a simple FSW workstation”, 7th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology AMST '05, 2005, pagg. 357-365, Udine, Italia.
- Ceschini L., Boromei I., Gambaro C., Minak G., Morri A., Tarterini F., “Friction Stir Welding of aluminium based composites reinforced with Al₂O₃ particles”, *Thermec International Conference on Processing & Manufacturing Of Advanced Materials*, MARITIM Hotel Berlin, Germany, August 25-29, 2009.
- Lertora E., Gambaro C., “AA8090 Al-Li alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life”, 13th International ESAFORM Conference on Material Forming, ESAFORM 2010, Brescia, Italy, 7-9 Aprile 2010.