



Ricerca di Sistema elettrico

Friction Stir Welding: definizione di condizioni standard di prova su impianti “on site” per il rilievo dell’efficienza di saldatura e dell’efficacia di processo per le leghe di alluminio

Carla Gambaro, Enrico Lertora, Chiara Mandolfino



FRICION STIR WELDING: DEFINIZIONE DI CONDIZIONI STANDARD DI PROVA SU IMPIANTI "ON SITE"
PER IL RILIEVO DELL'EFFICIENZA DI SALDATURA E DELL'EFFICACIA DI PROCESSO PER LE LEGHE DI ALLUMINIO

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

Settembre 2016

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: D3 "Efficienza energetica nel settore industria"

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 "«Friction Stir welding (FSW): definizione di condizioni standard di prova su impianti "on site" per il rilievo dell'efficienza di saldatura e dell'efficacia di processo per le leghe di alluminio"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. G. Barbieri



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



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 RENDIMENTO DI SALDATURA PER LA TECNOLOGIA FSW.....	6
2.1 LA SALDATURA FSW.....	6
2.1.1 <i>Descrizione del processo</i>	6
2.1.2 <i>Parametri di saldatura</i>	8
2.2 QUALIFICA DEL PROCEDIMENTO DI SALDATURA FSW.....	9
2.3 APPORTI TERMICI IN SALDATURA.....	12
3 SISTEMA DI MONITORAGGIO DEI CONSUMI ELETTRICI DURANTE LA REALIZZAZIONE DI GIUNTI MEDIANTE TECNOLOGIA FSW.....	13
3.1 TIPOLOGIE DI MACCHINE PER SALDARE FSW.....	13
3.2 RILEVAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI.....	15
4 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA E DELL'EFFICACIA DI UNA GIUNZIONE FSW: ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	18
4.1 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI GIUNTI FSW.....	19
4.2 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEI GIUNTI FSW.....	24
5 CONCLUSIONI.....	26
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	27
APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	28

Sommario

Scopo del presente studio è definire una metodologia per attribuire un'etichettatura energetica a macchine per saldatura, in modo da informare gli utenti finali sul consumo di energia della strumentazione analizzata e promuovere la scelta dei modelli con consumi più contenuti.

Prendendo spunto da quanto già messo a punto nello studio dell'efficienza energetica degli elettrodomestici, si vuole identificare una metodologia univoca di classificazione delle saldatrici, con particolare riferimento alle macchine per la saldatura Friction Stir Welding (FSW).

A tale scopo, sono stati analizzati gli aspetti peculiari della saldatura FSW, identificandone i principali parametri, e sono state individuate le normative che ne regolano la qualifica di procedimento.

Grazie ad una vasta campagna sperimentale, è stato possibile valutare l'efficacia del procedimento al variare dei parametri di saldatura, relativamente a giunzioni testa a testa eseguite su lamiere di alluminio della serie 6082 T6, di spessore pari a 5 mm.

Per determinare l'efficienza della macchina utilizzata per realizzare le saldature, è stato effettuato uno studio finalizzato alla messa a punto di un sistema di monitoraggio della potenza assorbita.

Grazie all'allestimento di un sistema di acquisizione appositamente realizzato, è stato possibile analizzare le problematiche di acquisizione dei parametri elettrici legati al funzionamento di una saldatrice FSW e definire una configurazione impiantistica da implementare per la rilevazione della potenza assorbita durante il processo di saldatura.

Le misure ottenute con tale sistema hanno permesso di individuare l'influenza delle diverse variabili di processo, quali le condizioni al contorno (materiali costituenti l'utensile, i supporti e i sistemi di ancoraggio, numero e tipo di motori elettrici della macchina) ed i parametri di saldatura.

Il lavoro di ricerca ha permesso di identificare le condizioni standard preliminari in cui effettuare la valutazione dell'efficienza energetica di impianti di saldatura FSW.

1 Introduzione

La necessità di proteggere l'ambiente, pur mantenendo un adeguato livello di benessere, è attualmente alla base delle scelte riguardanti la produzione ed il consumo dell'energia. Infatti, il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni dei "gas serra" è uno dei pilastri del "benessere sostenibile": dobbiamo tutti fare qualcosa per ridurre le emissioni inquinanti e per limitare i consumi d'energia e di altre risorse, a casa nostra e più in generale nel nostro Paese.

L'uso razionale delle risorse, energetiche ma non solo, comporta un doppio beneficio: il singolo cittadino pagherà una bolletta meno cara e la collettività si avvantaggerà di un minore inquinamento e di una minore necessità di importare energia e materie prime dall'estero. Ridurre i consumi di energia elettrica e di altre risorse è possibile.

Le possibilità di risparmio sono tante e spesso sotto gli occhi di tutti. Limitare i consumi irrazionali ed eliminare gli sprechi di energia e di acqua significa non solo ridurre le spese (le "bollette" saranno più leggere e le spese della gestione familiare più contenute) ma anche contribuire ad un ambiente più pulito; significa pensare al futuro.

Lo scopo dell'etichettatura energetica comunitaria è di informare gli utenti finali sul consumo di energia e di altre risorse essenziali dei prodotti a cui fanno riferimento, per consentire un impiego più razionale e favorire il risparmio di energia oltre a ridurre l'inquinamento atmosferico. Inoltre, promuovendo la scelta dei modelli con consumi più contenuti ed elevate prestazioni, al momento dell'acquisto, l'etichetta favorisce lo sviluppo tecnologico dei prodotti.

L'Unione Europea ha affrontato concretamente la questione a partire dal 1992, quando la direttiva 92/75/CEE ha stabilito la necessità di applicare una etichetta energetica ai principali elettrodomestici: si è partiti nel 1998 con i frigoriferi ed i congelatori, cui sono seguiti lavatrici, lavastoviglie, asciugatrici, lavasciugatrici, lampade ad uso domestico, forni elettrici e infine condizionatori nel 2003.

Nel 2010 la direttiva 2010/30/UE ha esteso la possibilità di applicare l'etichetta a tutti i "prodotti connessi all'energia" cioè a qualsiasi bene che consumi effettivamente energia nella fase d'uso (impatto diretto) o che pur non consumando direttamente energia contribuisca alla sua conservazione durante l'uso (impatto indiretto). A partire dal settembre 2010 sono state quindi riviste le etichette per i grandi elettrodomestici, i condizionatori d'aria e le sorgenti luminose mentre nuove etichette sono state introdotte per i televisori e altre sono tuttora allo studio [1].

Nonostante questa evoluzione, ad oggi la valutazione del consumo di energia e la relativa etichettatura sono essenzialmente limitate al settore consumer civile. Per il settore industriale esistono linee guida per singoli componenti (trasformatori, motori, ecc.) ma non un sistema di etichettatura semplice ed immediato da valutare.

Per quanto riguarda le macchine saldatrici non esiste attualmente un'etichettatura, nonostante stiano diventando a tutti gli effetti degli strumenti di utilizzo comune, acquistabili nei negozi di fai da te per il settore hobbistica, ed anche se a livello industriale le operazioni di saldatura determinano il 7% dei consumi legati ai processi di lavorazione.

Prendendo spunto da quanto già messo a punto nello studio dell'efficienza energetica degli elettrodomestici, si vuole quindi individuare una metodologia univoca di classificazione delle saldatrici, con particolare riferimento alle macchine per la saldatura industriale Friction Stir Welding (FSW).

2 Rendimento di saldatura per la tecnologia FSW

In questa prima fase del progetto, sono stati analizzati gli aspetti peculiari della saldatura Friction Stir Welding (FSW) e le normative che ne regolano la qualifica di procedimento, facendo riferimento alla realizzazione di giunti di pezzi in leghe di alluminio, che risultano i principali materiali saldati con questo tipo di tecnologia.

2.1 La saldatura FSW

La FSW è una tecnologia di saldatura relativamente nuova: è stata inventata dal The Welding Institute (TWI) di Cambridge (GB), che l'ha brevettata nel dicembre del 1991. Da questa data in avanti gli studi sul processo sono proseguiti rapidamente, visto il crescente interesse dimostrato dal mercato verso una tecnologia che presenta indiscussi vantaggi rispetto ai tradizionali metodi di giunzione, quali rivettature, chiodature e le ormai consolidate tecniche di saldatura per fusione ad arco quali MIG e TIG.

Ricordiamo innanzitutto che i settori principalmente interessati all'utilizzo di questa tecnologia innovativa sono quello navale su tutti, seguito dall'aerospaziale, ferroviario e automobilistico, nei quali la riduzione di peso dei manufatti ricopre un ruolo di primaria importanza; da qui nasce l'esigenza di utilizzare in maniera sempre più diffusa leghe leggere, come leghe di alluminio, titanio e magnesio, la cui giunzione, per diversi motivi, ha sempre creato problematiche sotto l'aspetto sia operativo sia di qualità del prodotto finale ottenuto.

La FSW ha avuto un rapido sviluppo in quanto, pur avendo costi iniziali di maggior rilievo rispetto alle tecnologie di saldatura tradizionali, consente di ottenere giunzioni con caratteristiche meccaniche più elevate e garantisce un considerevole aumento della vita a fatica del giunto, aspetto che risulta particolarmente significativo data la scarsa resistenza alle vibrazioni delle altre tipologie di giunzione.

Una fondamentale caratteristica del processo Friction è quella di avvenire sostanzialmente allo stato solido, senza quindi arrivare alla fusione del materiale base, come invece avviene nei più diffusi procedimenti di saldatura. La giunzione dei due pezzi da unire avviene attraverso un particolare utensile che penetra nel materiale, genera calore per attrito ed effettua un'azione di rimescolamento, creando così una continuità metallica simile a quella ottenuta con i classici procedimenti per fusione. La temperatura raggiunta non permette di portare a fusione il materiale ma solo di ottenerne uno stato viscoso-plastico, che consenta il rimescolamento da parte dell'utensile. Non vi sarà quindi una zona fusa in cui si mescolano il materiale base e quello d'apporto ma si avrà una zona plasticizzata con microstruttura a grani molto fini e quindi caratterizzata da resistenza a trazione ed a fatica molto elevate, in alcuni casi superiori a quelle del materiale base.

Ulteriore vantaggio è costituito dall'assenza di materiale d'apporto, con la conseguente possibilità di evitare la preparazione dei giunti prima di saldatura: viene utilizzata una preparazione a lembi retti che assicura la presenza del materiale necessario alla creazione di un cordone piatto, in modo da non costituire un intaglio strutturale e aumentare così la vita a fatica. Anche dal punto di vista economico, la preparazione a lembi retti rappresenta un notevole risparmio, non riscontrabile in nessun altro procedimento ad arco, se non per particolari applicazioni TIG su spessori molto sottili.

La FSW è un processo asimmetrico, per la combinazione del moto di rotazione dell'utensile e di traslazione per l'avanzamento lungo l'asse del giunto. Si possono distinguere due lati, divisi dall'asse del giunto: quello in cui la velocità periferica e quella di avanzamento dell'utensile sono concordi, denominato comunemente *advancing side* (in questo caso si parla anche di lato caldo), e quello dove le due velocità sono discordi, che è chiamato *retreating side* (detto anche lato freddo).

2.1.1 Descrizione del processo

La saldatura FSW si basa sul noto principio per cui ogni materiale, all'aumentare della temperatura, presenta un abbassamento della resistenza meccanica (in particolare del carico di snervamento) ed un incremento della deformabilità. Sfruttando questo principio, si è resa possibile l'unione di due o più pezzi grazie all'azione di un utensile che viene posto in rotazione e successivamente fatto penetrare all'interno del materiale.

Si distinguono quattro fasi del processo (Fig. 1):

- a) l'utensile, messo in rotazione, si appoggia sulle parti da saldare in corrispondenza della linea di contatto dei lembi;
- b) sotto la spinta applicata dalla macchina, l'estremità inferiore dell'utensile, detta punta o "pin", penetra nella zona plasticizzata fino a che la spalla (cioè la parte a sezione maggiore, sovrastante il pin, detta anche "shoulder") tocca la superficie del materiale da saldare;
- c) l'utensile, mantenendo il suo moto di rotazione, trasla lungo la linea di contatto dei lembi; il metallo viene trascinato in rotazione da un lembo all'altro e viene trasferito dietro all'utensile, creando la tipica configurazione del materiale ad "anelli di cipolla" (onion rings);
- d) alla fine del giunto, l'utensile viene sollevato e lascia un foro non passante delle stesse dimensioni del pin.

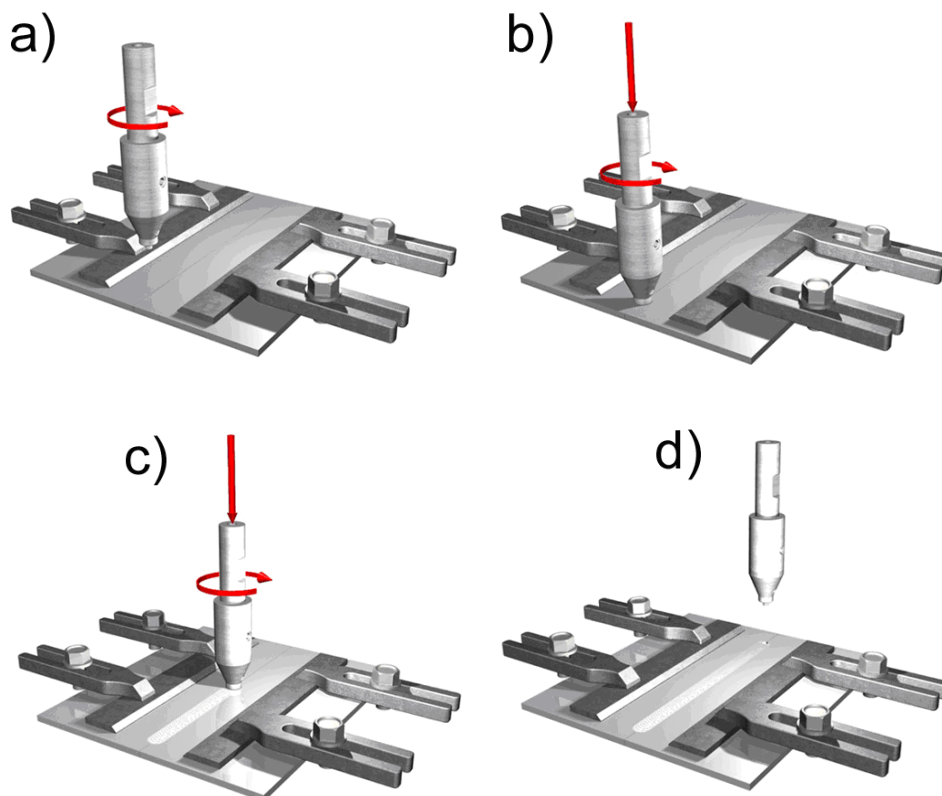


Fig. 1 Fasi del processo FSW

Da quanto descritto, si può subito notare come l'utensile rivesta un ruolo fondamentale all'interno del processo, in quanto è l'elemento che genera il calore necessario a plasticizzare il materiale; appare quindi subito evidente la necessità di realizzarlo con un materiale che sia in grado di resistere ad elevate sollecitazioni di tipo sia meccanico sia termico, mantenendo inalterate le proprie caratteristiche.

In figura 2 viene mostrata la tipica geometria di un utensile per FSW. Come già in parte anticipato nella descrizione del processo, l'utensile è costituito da due elementi fondamentali, la punta e la spalla, le quali possono essere ricavate di pezzo da un'unica barra od essere realizzate separatamente, opzione quest'ultima giustificata dalle differenti funzioni richieste ai due elementi, che suggeriscono l'uso di materiali diversi [2,3].

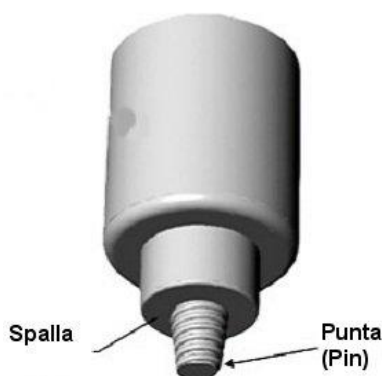


Fig. 2 Utensile per FSW

La punta è quella parte dell'utensile che penetra nel materiale base lungo la linea di giunzione dei due pezzi da saldare ed opera l'azione di rimescolamento. Le caratteristiche meccaniche del pin dovranno quindi essere superiori a quelle del materiale da giuntare e mantenersi tali anche alle elevate temperature del processo. La forma tipica è conica o cilindrica e spesso è presente una filettatura con senso dell'elica discorde rispetto al senso di rotazione dell'utensile (moto a "svitare"), per migliorarne l'efficacia. La lunghezza del pin è legata direttamente allo spessore dei pezzi da unire: leggermente inferiore allo spessore nel caso di giunti testa a testa eseguiti in un'unica passata, pari a poco più di metà spessore nel caso di giunti testa a testa eseguiti in doppia passata (una al dritto, l'altra al rovescio), soluzione tipica delle giunzioni tra pezzi di spessore elevato.

La spalla è la parte sovrastante il pin, di forma solitamente cilindrica, il cui diametro è alcune volte superiore a quello del pin. Il compito esercitato dalla spalla è quello di produrre calore, per effetto dell'attrito generato dal movimento relativo tra pezzo ed utensile, e trasmetterlo ai lembi da unire; deve inoltre mantenere il materiale plasticizzato nella zona da saldare, evitandone la fuoriuscita, delimitando così quello che sarà il cordone di saldatura.

Morfologicamente, il giunto apparirà quindi di larghezza pari al diametro della spalla dell'utensile, con un caratteristico aspetto ad evoluzione circolare piatta, molto simile a quello di una fresatura convenzionale, e senza sovrametallo, grazie al fatto che il processo non richiede alcun materiale d'apporto e la preparazione è a lembi retti. Ai lati del cordone, sono talvolta presenti piccole bave originate dall'elevato stato di plasticizzazione raggiunto dal metallo e dalla insufficiente azione di contenimento della spalla. Il rovescio del giunto apparirà privo di imperfezioni: non sarà più visibile la linea di contatto fra i lembi e la giunzione sarà esente da incisioni e mancanze di penetrazione al vertice [4].

2.1.2 Parametri di saldatura

Il processo FSW differisce dalle tradizionali tecniche di saldatura in quanto il giunto non viene creato per fusione ma attraverso un procedimento termo-meccanico.

Per ottenere un giunto privo di difettologie importanti e che assicuri le caratteristiche meccaniche richieste, occorrerà individuare i corretti valori dell'insieme di variabili che governano il processo. Fra le variabili principali, si possono individuare:

- le caratteristiche geometriche dell'utensile (diametro e forma della spalla; diametro, lunghezza e forma del pin);
- la velocità di rotazione dell'utensile;
- la velocità di avanzamento dell'utensile (velocità di saldatura);
- la forza verticale esercitata dalla macchina sull'utensile;
- l'angolo di inclinazione dell'utensile ("tilt angle");
- la profondità di penetrazione dell'utensile.

Particolare attenzione merita l'angolo di inclinazione in quanto, forse, è la meno intuitiva fra le variabili indicate. Infatti si potrebbe pensare, come effettivamente è stato storicamente fatto, che sia sufficiente che l'utensile penetri perpendicolarmente alla superficie dei pezzi da unire e che avanzi mantenendo questa posizione. In queste condizioni di saldatura, si sono però riscontrati alcuni problemi: primo fra tutti

l'elevato valore della forza con cui il materiale si oppone all'avanzamento dell'utensile, dovuto all'accumulo di materiale plasticizzato di fronte alla spalla, e la fuoriuscita dal lato "retreating" di una bava continua di materiale plasticizzato, per l'elevata pressione esercitata dalla spalla dell'utensile. Per risolvere questi problemi, si è ricorso all'inclinazione dell'asse dell'utensile di un angolo di pochi gradi ($1.5^\circ - 3^\circ$), in modo che la spalla riesca a convogliare sotto di sé il materiale.

Il parametro di saldatura sicuramente più importante è però la velocità di rotazione dell'utensile, in quanto da questa dipende la quantità di calore prodotta per attrito fra spalla e pezzi da saldare ed è attraverso la rotazione dell'utensile nel materiale che hanno luogo i fenomeni di ricristallizzazione dinamica, che generano una struttura molto fine e quindi con proprietà meccaniche elevate. Per questi motivi, è in funzione di questo parametro che vengono scelti tutti gli altri.

Per evitare una mancanza di penetrazione al vertice del giunto, è importante determinare con esattezza la lunghezza del pin, tenendo conto non solo dello spessore del pezzo da saldare ma anche del fatto che l'estensione della zona all'interno della quale il materiale subisce la plasticizzazione è leggermente superiore (qualche decimo di millimetro). Il pin non dovrà quindi essere né troppo lungo, per evitare di saldare il pezzo alla tavola di sostegno, né troppo corto, per evitare il rischio di avere mancanza di penetrazione, con conseguente presenza di intaglio sul rovescio del giunto.

La velocità di avanzamento determina le caratteristiche dei giunti; se si mantiene costante la velocità di rotazione dell'utensile e si fa variare la velocità di saldatura, si ottengono le seguenti tipologie di giunti:

- "freddi", se la velocità di saldatura è troppo elevata e l'attrito tra la spalla ed il materiale da saldare non riesce a generare una quantità di calore sufficiente a plasticizzare il materiale. In questo caso prevale l'azione di forgiatura e l'utensile è particolarmente sollecitato in quanto il materiale relativamente freddo gli oppone elevata resistenza, con conseguenti pericoli di rottura.
- "caldi", se la velocità di saldatura è relativamente bassa e di conseguenza l'apporto termico è elevato, quindi in grado di provocare alterazione della microstruttura del materiale, soprattutto nella ZTA. Un eventuale ingrossamento del grano in questa zona determina la significativa riduzione delle proprietà meccaniche del giunto, effetto particolarmente pericoloso in quei materiali dove non è possibile migliorare le caratteristiche mediante trattamenti termici eseguiti dopo saldatura.

Infine, la forza verticale è funzione delle velocità di rotazione e di avanzamento dell'utensile; da essa dipende l'entità del calore generato per attrito fra la spalla e il pezzo da saldare.

Oltre a questi parametri principali ve ne sono altri secondari che si possono considerare funzione dei primi, come ad esempio le forze trasversali e longitudinali, che tendono ad allontanare i pezzi da saldare e ad opporsi all'avanzamento dell'utensile. [5-7].

2.2 Qualifica del procedimento di saldatura FSW

La qualifica del procedimento di saldatura FSW è regolata dalla normativa internazionale UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 "Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura".

Tale norma specifica quali sono i requisiti per la qualifica del processo di saldatura FSW applicato alle leghe d'alluminio e quali criteri adottare per la stesura della specifica standard di saldatura (WPS).

Si ricorda che la qualifica di un processo di saldatura è un'operazione necessaria prima che vengano realizzate le saldature di produzione e consiste nella realizzazione di un saggio di dimensioni standard, come mostrato in figura 3.

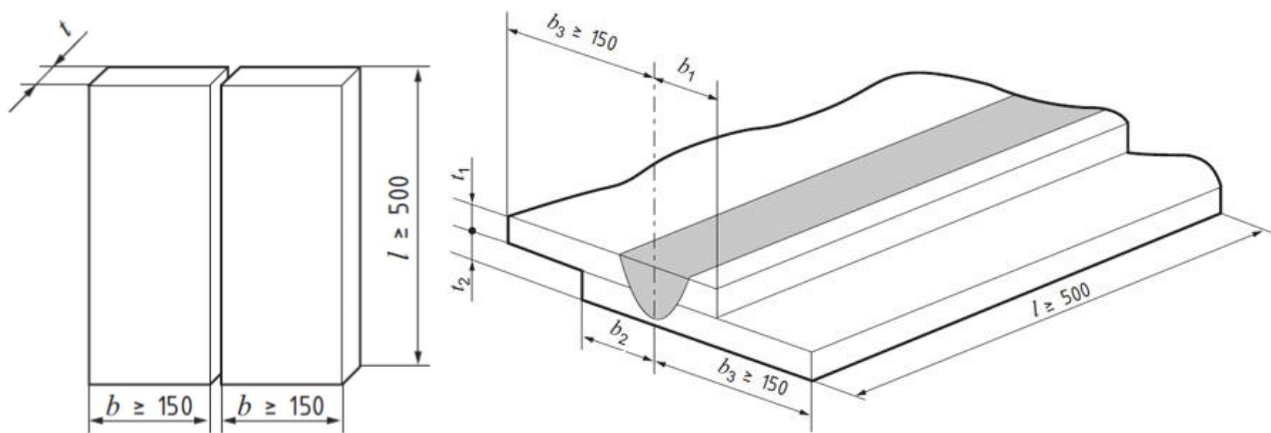


Fig. 3 Campioni per qualifica di giunti FSW testa a testa (a sinistra) ed a sovrapposizione (a destra)

Su tale campione, dovranno essere eseguiti controlli non distruttivi e prove meccaniche, come riportato nella tabella 1.

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

Tipo di controllo o prova	Estensione dell'esame	
	Giunto testa - testa	Giunto a sovrapposizione
Controllo visivo	100%	100%
Prova di trazione trasversale	2 campioni	NO
Prova di piega trasversale	2 campioni al rovescio (lega da incrudimento) 2 campioni al dritto (lega da fonderia)	NO
Analisi macrografica	1 campione	1 campione
Test aggiuntivi	Se richiesti	Se richiesti

Il controllo visivo è finalizzato all'individuazione di difetti macroscopici od irregolarità di profilo. Successivamente, si procede al prelievo dei saggi da cui estrarre i campioni da sottoporre a prova. Le posizioni in cui estrarre tali campioni sono riportate in figura 4.

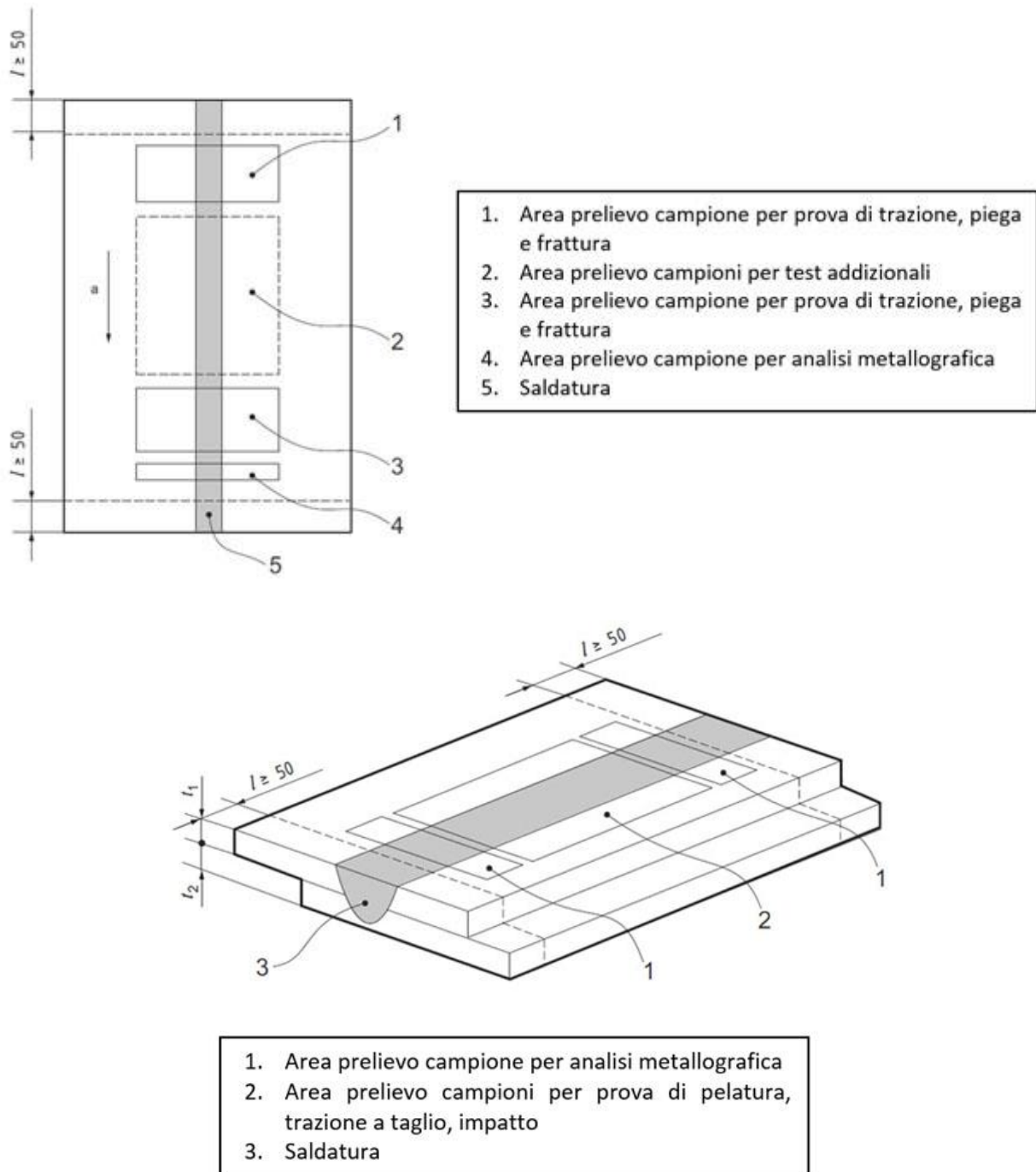


Fig. 4 Zone di estrazione dei campioni da sopporre a prove di qualifica

La prova di trazione trasversale, eseguita solamente nel caso di saldature testa testa, permette di valutare la tensione di rottura del campione saldato. Tale valore dovrà essere maggiore della tensione di rottura del materiale base moltiplicata per un fattore di efficienza meccanica del giunto (f):

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

In tabella 2 sono riportati i valori di alcuni fattori di efficienza meccanica del giunto, a seconda del tipo di lega di alluminio saldata.

Tab. 2 Valori dei fattori di efficienza meccanica di giunti FSW realizzati tra pezzi in leghe di alluminio

Materiale	Tipo di trattamento termico	Trattamento post saldatura	Fattore di efficienza meccanica del giunto - f
Alluminio puro	Tutti	Nessuno	1
Leghe non trattabile termicamente	-----	Nessuno	1
Leghe trattabile termicamente	T4	Invecchiamento naturale	0.7
	T4	Invecchiamento artificiale	0.7
	T5 e T6	Invecchiamento naturale	0.6
	T5 e T6	Invecchiamento artificiale	0.7

La prova di piega risulta positiva solo se i campioni raggiungono un angolo minimo di 150°, senza che si rilevi la presenza di cricche, qualsiasi sia la lega di alluminio utilizzata. I rulli utilizzati per la prova 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;

Δl è l'allungamento minimo percentuale del materiale base.

Dall'esame macrografico non si devono evidenziare difetti nella zona di saldatura. A tale scopo, il livello di accettabilità dei difetti per un giunto saldato FSW è riportato nella norma UNI EN ISO 25239-5: 2012 "Saldatura friction stir – alluminio – Requisiti di qualità e ispezione" [8].

2.3 Apporti termici in saldatura

L'apporto termico indotto da un processo di saldatura ad arco per portare a fusione i lembi dei pezzi da unire è funzione dei parametri elettrici adottati, secondo la relazione [9]:

$$A.T. \left[\frac{J}{cm} \right] = \eta_1 \cdot \frac{V[V] \cdot I[A]}{v[cm/min]} \cdot 60$$

in cui:

I = intensità della corrente di saldatura;

V = tensione di saldatura;

v = velocità di traslazione della sorgente termica;

η₁ = efficienza termica di saldatura, che indica la percentuale di calore effettivamente trasmessa dall'arco elettrico al materiale da portare a fusione. Nella saldatura dell'acciaio, i valori tipici di η₁ sono compresi tra 0.7 e 0.9.

Per quanto riguarda la tecnica di saldatura FSW, nella quale non si raggiunge la fusione del materiale, la formula per determinare l'apporto termico, elaborata attraverso misure sperimentali in analogia a quella utilizzata nei processi per fusione ad arco[10-12], è:

$$A.T. \left[\frac{J}{cm} \right] = \eta_2 \cdot \frac{\omega[giri/min] \cdot M[N \cdot m]}{30 \cdot v[cm/s]}$$

dove:

- ω = velocità di rotazione dell'utensile;
- M = momento torcente;
- η_2 = efficienza termica di saldatura, che indica la percentuale di calore effettivamente trasmesso dall'utensile al materiale da plasticizzare ($\eta_2 = 0,9$ nel caso di alluminio e $\eta_2 = 0,6$ nel caso di acciaio e titanio);
- v = velocità di avanzamento dell'utensile.

In entrambi i casi, la valutazione dell'apporto termico tiene conto (attraverso il coefficiente η_1 per la saldatura ad arco elettrico, η_2 per la saldatura FSW) del fatto che parte del calore generato (dall'arco elettrico o dall'attrito) non viene trasferito nel giunto ma viene dissipato a causa della conduttività termica delle parti a contatto e della convezione dell'aria.

In particolare, in figura 5 è riportato uno schema che mostra come si distribuisce l'energia fornita dall'utensile nel processo FSW.

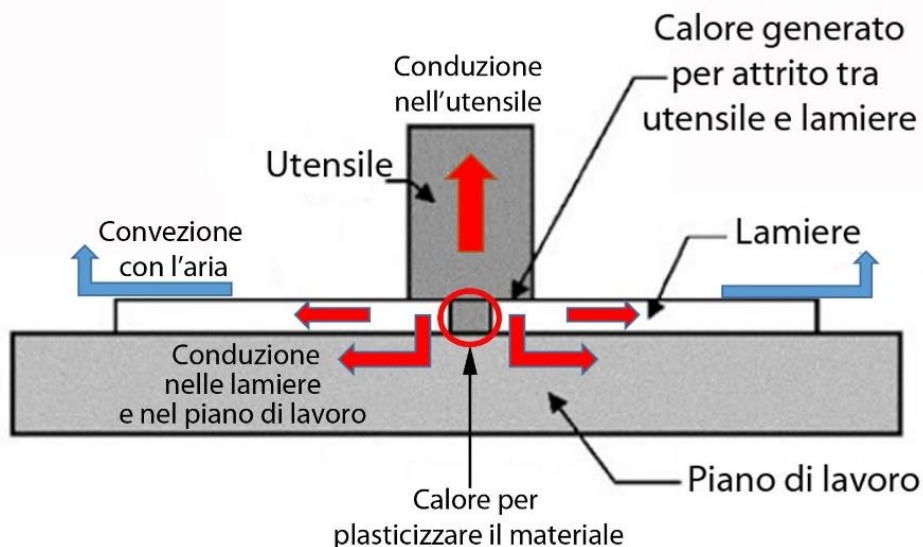


Fig. 5 Schematizzazione di come viene utilizzato/disperso il calore durante una saldatura FSW

Una parte del calore generato per attrito dall'azione della spalla dell'utensile sulla superficie dei pezzi viene dissipata per conduzione dal sistema di fissaggio dei pezzi, dall'utensile e dai pezzi stessi e dipende quindi dallo spessore e dal materiale con cui questi vari elementi sono realizzati. Un'altra parte dell'energia viene trasmessa per convezione all'ambiente circostante il giunto e solo una parte del calore viene effettivamente utilizzata per portare i lembi dei pezzi da saldare alla temperatura necessaria (circa 450 °C) perché l'utensile possa effettuare il rimescolamento e generare quindi la giunzione.

3 Sistema di monitoraggio dei consumi elettrici durante la realizzazione di giunti mediante tecnologia FSW

Nella seconda fase della ricerca sono state analizzate le varie tipologie costruttive delle macchine per saldare FSW, al fine di individuare i componenti responsabili dell'assorbimento energetico. Inoltre sono stati selezionati gli strumenti necessari alla rilevazione dei consumi energetici.

3.1 Tipologie di macchine per saldare FSW

La tecnologia Friction Stir Welding presenta moltissime similitudini con un convenzionale processo di fresatura. All'utensile devono essere infatti trasmessi sia i moti di rotazione e di avanzamento sia quello di

avvicinamento al pezzo, in maniera analoga a quanto succede in fresatura. Per questo motivo, la tecnologia FSW può essere applicata utilizzando o una stazione appositamente realizzata od una comune fresatrice opportunamente modificata.

Ciò che principalmente differenzia le due tipologie di macchine è la presenza o meno di controlli in continuo, sia delle velocità di avanzamento e di rotazione, sia della posizione dell'utensile e del carico verticale applicato al mandrino, in quanto questi sistemi sono presenti solamente nelle stazioni dedicate. Dato che questi controlli consentono di ottenere giunti di qualità superiore, negli ultimi anni le aziende produttrici di macchine per saldatura FSW hanno reso disponibili sul mercato anche singole teste di saldatura fornite di tali controlli ed adattabili su macchine convenzionali, in modo tale da agevolare quelle aziende che già possiedono centri di lavoro.

In figura 6 è riportata l'immagine di una fresatrice universale trasformata in saldatrice FSW. Si nota la presenza di due motori elettrici che governano, rispettivamente, la rotazione del mandrino e la movimentazione della tavola portapezzo.

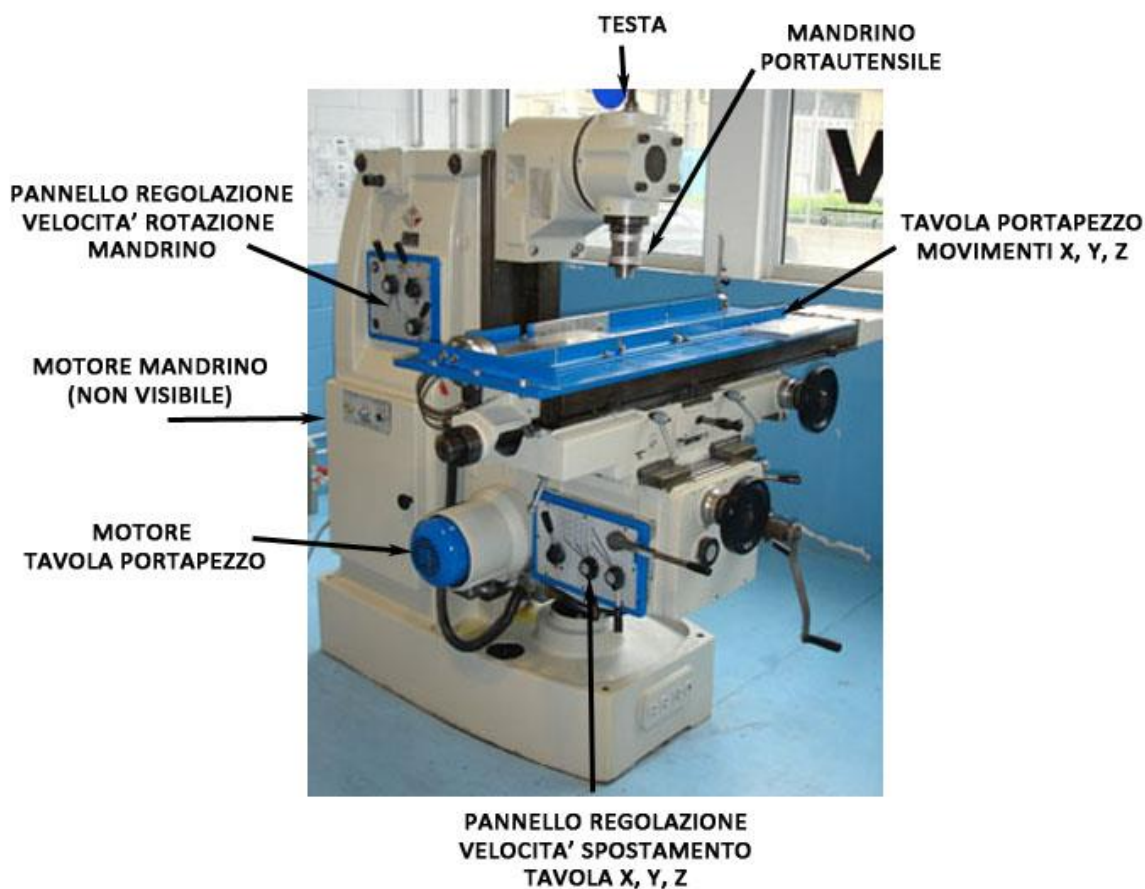


Fig. 6 Fresatrice universale trasformata in saldatrice FSW

Lo schema di figura 7 evidenzia i punti di consumo energetico della fresatrice sopra illustrata.

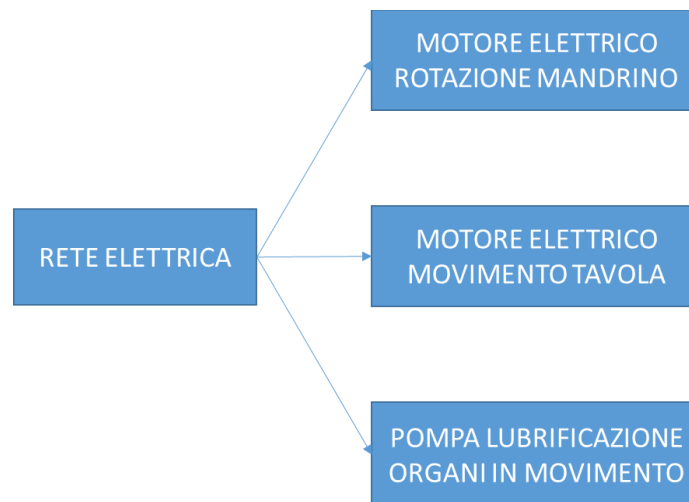


Fig. 7 Schema dei punti di consumo energetico

Come per le operazioni di fresatura, anche per le operazioni di saldatura FSW è possibile scegliere tra robot o macchine cartesiane. La necessità di produrre saldature in tre dimensioni implica l'utilizzo di robot, scelta che penalizza fortemente gli spessori lavorabili in quanto la scarsa rigidità delle stazioni robotizzate non permette di applicare forze particolarmente elevate.

Le macchine cartesiane garantiscono elevata rigidità ed assenza di vibrazioni anche nel caso di saldature su grossi spessori, a scapito però della possibilità di realizzare giunti tridimensionali.

Un buon compromesso è rappresentato dalle strutture a portali che, se opportunamente equipaggiate con teste basculanti, uniscono ottime doti di rigidità alla possibilità di eseguire giunti in tre dimensioni [13-15].

3.2 Rilevazione dei consumi energetici

Per valutare l'efficienza di un processo, è necessario rilevare i consumi energetici ad esso associati.

In particolare, per misurare la potenza attiva in un circuito elettrico si impiegano i wattmetri.

Dal punto di vista costruttivo, esistono tipologie di wattmetri molto diverse tra loro. In passato, venivano impiegati gli strumenti di tipo elettrodinamico mentre oggi sono essenzialmente utilizzati quelli di tipo elettronico (analogici o digitali).

Se i valori della tensione ($u(t)$) o della corrente ($i(t)$) sono troppo elevati per l'applicazione diretta allo strumento, si impiegano opportuni trasduttori di interfaccia che riducono la tensione e la corrente (VT = Voltage Transducer e CT = Current Transducer). Le uscite di questi sono applicate agli ingressi del wattmetro.

I wattmetri elettronici analogici sono costituiti in sostanza da circuiti moltiplicatori, che eseguono il prodotto dei valori della tensione e della corrente ed, attraverso l'azione di un filtro passa-basso (LPF, low pass filter), forniscono il valore della potenza attiva (Fig. 8).

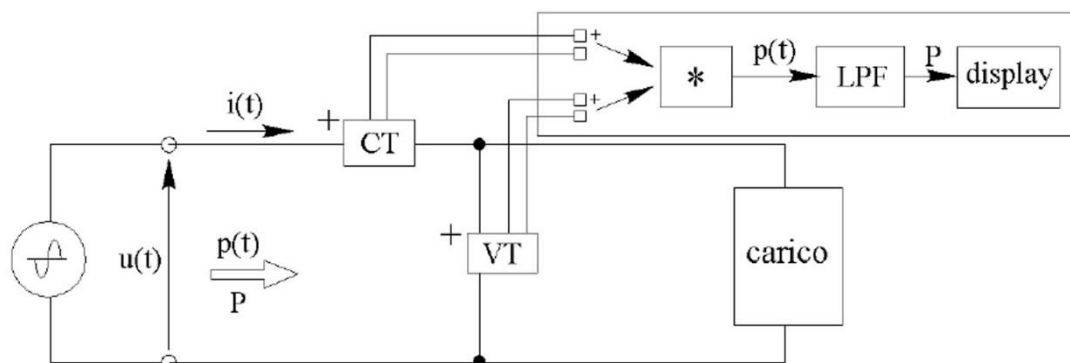


Fig. 8 Schema di un wattmetro analogico

I wattmetri elettronici digitali si basano invece sulla elaborazione di segnali campionati tramite circuiti di *digital signal processing* dedicati, oppure tramite sistemi di acquisizione dati gestiti da PC (Fig. 9).

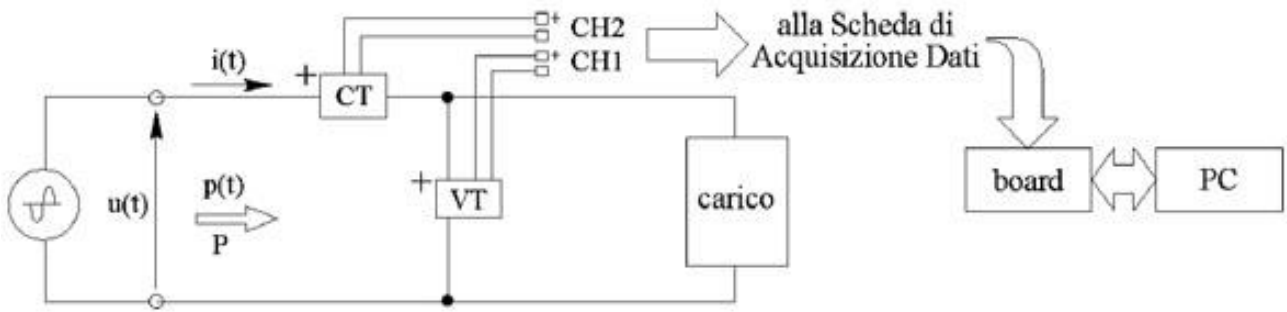


Fig. 9 Schema di un wattmetro digitale

Questi strumenti implementano in forma discreta l’algoritmo della potenza su campioni di tensione u_h e di corrente i_h . Detto N_p il numero di campioni di ciascun segnale nel periodo T , la potenza risulta:

$$P = \frac{1}{E_p} \sum_{h=1}^{N_p} u_h \cdot i_h$$

A prescindere dal principio di funzionamento utilizzato, il collegamento di un wattmetro su una fase può essere realizzato secondo gli schemi riportati in figura 10.

Nella stessa figura sono disegnati anche i diagrammi fasoriali, per un funzionamento in regime sinusoidale.

Negli schemi, si nota che il wattmetro (W) presenta due coppie di morsetti:

- v_1 e v_2 facenti capo al circuito voltmetrico, derivato fra i conduttori di linea,
- i_1 e i_2 facenti capo al circuito amperometrico, attraversato dalla corrente di linea.

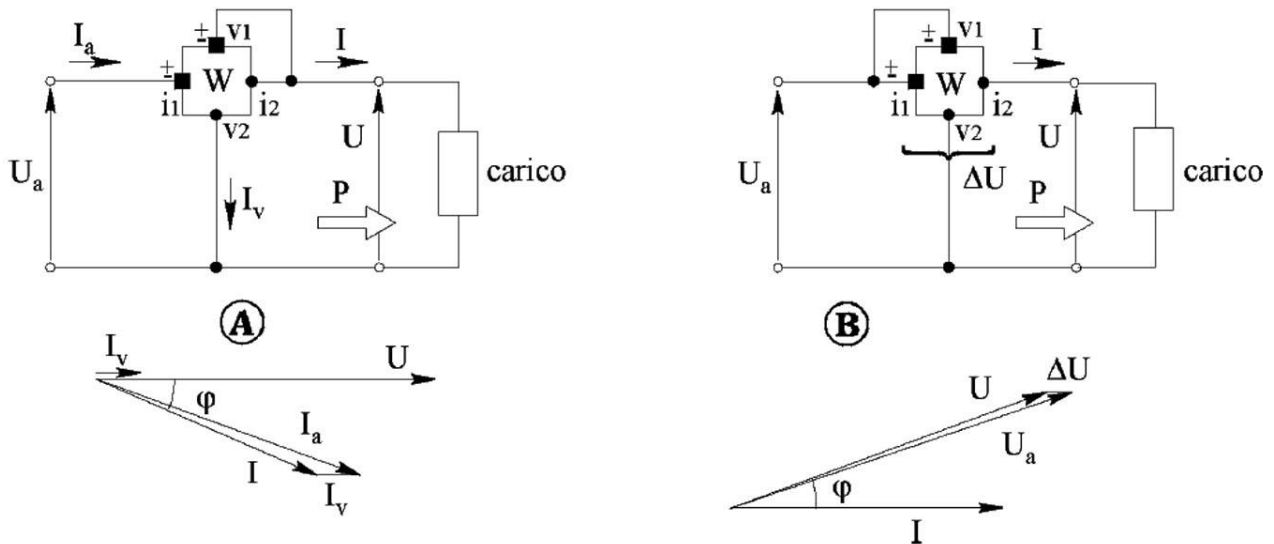


Fig. 10 Connessioni di un wattmetro

U ed I sono i fasori rappresentativi della tensione e della corrente effettive sul carico [16].

In commercio, esistono molti apparecchi elettronici che soddisfano i requisiti di analisi della potenza richiesti da una macchina elettrica con motore trifase. A titolo di esempio, si riportano alcune immagini di wattmetri trifase (Fig. 11).



Fig. 11 Wattmetri trifase

Una prima indagine, per la rilevazione della potenza assorbita e per analizzare le problematiche di acquisizione dei parametri elettrici dalla macchina per saldare FSW, è stata possibile mediante l'allestimento di un sistema di acquisizione composto da un wattmetro monofase Fluke (Fig. 12), un oscilloscopio Le Croy (Fig. 13) e le relative pinze amperometriche per la rilevazione della corrente circolante in ogni singola fase (Fig. 14). L'oscilloscopio è stato introdotto nella catena di misura per monitorare l'andamento delle tre fasi distintamente ed il loro sfasamento.



Fig. 12 Wattmetro elettronico digitale Fluke – modello 418

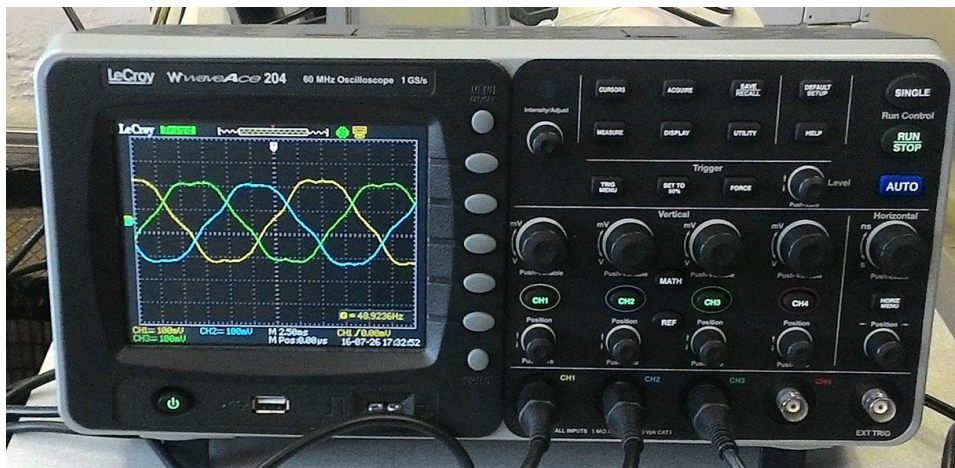


Fig. 13 Oscilloscopio LeCroy – modello WaveAce 204



Fig. 14 Pinze amperometriche

Mediante la disposizione degli strumenti sopracitati, è possibile valutare la potenza assorbita sia quando la macchina è in funzione ma non sta saldando, sia quando si eseguono le saldature. La rilevazione della potenza assorbita dalla macchina in condizione di funzionamento senza effettuare la saldatura è necessaria poiché alla potenza assorbita durante la giunzione si deve sottrarre la potenza assorbita a vuoto, se si vuole individuare la potenza utilizzata per generare il calore necessario per realizzare le saldature. Alcune prove preliminari hanno permesso di valutare la potenza assorbita dalla macchina a vuoto. Il valore rilevato è pari a 2,43 kW.

4 Valutazione dell'efficienza e dell'efficacia di una giunzione FSW: attività sperimentale

L'efficienza e l'efficacia sono due concetti molto importanti nel mondo del lavoro.

Per definizione, come efficacia si intende la capacità di raggiungere un determinato obiettivo, mentre l'efficienza è la capacità di raggiungerlo con la minima allocazione possibile di risorse.

Nel caso della FSW, è quindi necessario valutare l'efficacia del processo facendo riferimento ad una finestra di saldabilità, in cui sono identificati gli accoppiamenti dei parametri di saldatura che permettono di ottenere giunti privi di difetti e quindi in grado di soddisfare i requisiti delle prove di qualifica precedentemente esposti.

Una volta individuati i parametri di maggior efficacia, si dovrà valutare l'efficienza del processo. Fra tutti i parametri di saldatura che hanno permesso di realizzare giunti qualificati, si dovrà individuare quali permettono di ottenere un consumo energetico minore, mediante la valutazione della potenza assorbita.

La finestra di saldabilità presa in considerazione è quella relativa a giunti testa a testa realizzati tra lamiere di alluminio della serie 6082 T6, di spessore pari a 5 mm.

In tabella 3 sono riportate le combinazioni velocità di avanzamento-velocità di rotazione dell'utensile di saldatura applicabili utilizzando la fresatrice universale a disposizione per la sperimentazione e già mostrata in figura 6. Le sigle 00-PXX identificano i giunti realizzati.

Tab. 3 Combinazioni Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione dell'utensile

Velocità di avanzamento utensile [mm/min]	Velocità di rotazione utensile [giri/min]						
	1700	1230	880	630	460	330	230
585	00-P18	00-P12	00-P15				
390	00-P016	00-P11	00-P14	00-P20			
260		00-P10	00-P13	00-P17	00-P19		
170		00-P06	00-P07	00-P08	00-P09	00-P21	
115		00-P03	00-P02	00-P05	00-P04	00-P22	00-P01

Durante l'esecuzione dei giunti, è stato mantenuto un angolo di tilt pari a 1,5°.

4.1 Valutazione dell'efficacia dei giunti FSW

Su tutti i giunti prodotti, è stato effettuato l'esame visivo, in modo da verificare la presenza di macro difetti affioranti in superficie o difetti al rovescio. Un'eccezione è stata fatta per il giunto 00-P01, la cui realizzazione si è fermata dopo pochi centimetri a causa delle eccessive sollecitazioni subite dall'utensile, che hanno determinato la rottura di quest'ultimo. Le sollecitazioni elevate sono dovute ad un rapporto molto basso tra velocità di rotazione e velocità di avanzamento dell'utensile, che ha determinato un riscaldamento insufficiente del materiale da saldare.

Durante l'analisi delle giunzioni, sono state riscontrate due principali tipologie di difetti: un'eccessiva espulsione di materiale ai lati del cordone, identificata con il termine di flash laterale (Fig. 15 a sinistra) e un'apertura longitudinale, per parte della lunghezza della saldatura, denominata tunnel (Fig. 15 a destra).

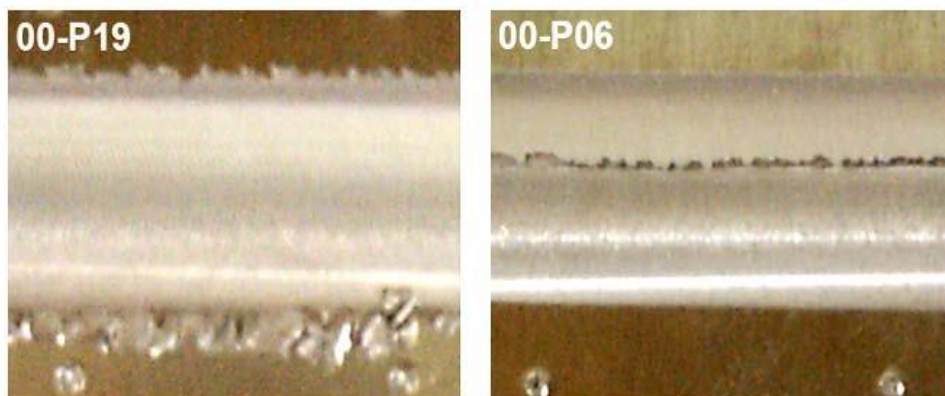


Fig. 15 Difetti superficiali riscontrati sui giunti 00-P19 e 00-P06

Il tunnel rappresentato in figura 15 è stato generato da un rapporto di saldatura che ha causato un riscaldamento troppo elevato del materiale.

Durante l'esame visivo, è stato inoltre possibile notare come le saldature realizzate con elevate velocità di rotazione (880, 1230 e 1700 giri/min) abbiano prodotto giunzioni caratterizzate da una superficie rugosa e molto opaca mentre le saldature realizzate con velocità di rotazione dell'utensile meno elevate abbiano dato origine a giunti caratterizzati da superfici più lisce e lucide.

In figura 16 è riportata la comparazione di tre giunti, realizzati tutti con velocità di avanzamento pari a 115 mm/min e con velocità di rotazione pari rispettivamente a 1230, 460 e 330 giri/min.

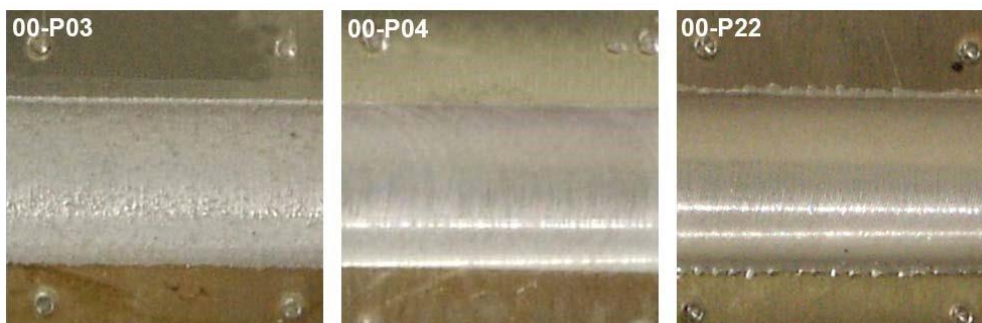


Fig. 16 Fotografie della superficie di alcuni giunti in lega AA6082 T6

Dalla figura, è immediato notare come il giunto più “caldo” (realizzato con una velocità di rotazione elevata) presenti una superficie più opaca e ricoperta di piccole particelle che danno un aspetto rugoso al cordone.

Al contrario, i giunti più “freddi” danno origine a saldature dalla superficie più regolare e liscia.





Il prosieguo della ricerca ha visto la realizzazione di prove, distruttive e non, destinate alla determinazione delle caratteristiche meccaniche e strutturali dei giunti.

Su tutti i giunti è stato effettuato un esame radiografico, in modo da individuare l’eventuale presenza di difetti interni, non rilevabili con esame visivo, quali tunnel o mancanze di penetrazione. Su alcune saldature sono stati riscontrati tunnel dovuti a diversi fattori:

- non perfetto fissaggio ed allineamento delle lamiere prima della saldatura;
- parametri di saldatura corrispondenti ad elevati rapporti velocità rotazione /velocità avanzamento (elevati rapporti implicano un elevato apporto termico ed una eccessiva plasticizzazione del materiale).

Alcuni esempi di esame radiografico sono riportati in tabella 4.

Tab. 4 Analisi radiografica dei giunti in lega AA6082 T6

Provino numero	Analisi radiografica	Note
00-P16		Tunnel longitudinale sull’intera lunghezza
00-P11		Tunnel longitudinale in fase transitoria.
00-P20		Saldatura buona, presenza di flash.
00-P03		Saldatura ottima.

Per eseguire le prove di trazione e di piega, ogni giunto è stato tagliato secondo lo schema indicato in figura 4. In tal modo, si sono ottenuti, per ogni giunto, sei provini: tre da utilizzarsi per le prove di piega e tre destinati alle prove di trazione.

Le prove di trazione sono state effettuate utilizzando una macchina Zwick Materialprufung 1475, attrezzata con una cella di carico in grado di misurare carichi fino a 100 kN. I risultati delle prove sono riportati in tabella 5.

Tab. 5 Risultati delle prove di trazione

Numero Prova	R _m Materiale Base [MPa]	R _m Giunto Saldato [MPa]	Efficienza meccanica del giunto [R _m Giunto Saldato/ R _m Materiale Base]
00-P02	340	183,35	54
00-P03		194,50	57,2
00-P04		187,50	55,1
00-P05		193,85	57
00-P07		202,47	59,5
00-P08		204,31	60,1
00-P09		203,95	60
00-P10		213,74	62,8
00-P13		207,61	61
00-P14		216,44	63,6
00-P15		229,04	67,3
00-P17		213,14	62,7
00-P18		234,49	69
00-P19		218,96	64,4
00-P20		218,53	64,2
00-P22		187,19	55

La rottura del provino si è verificata generalmente nella zona termicamente alterata, dopo che si è avuta strizione nella medesima sezione. Nei rari casi di rottura nel giunto, essa è normalmente imputabile a difetti rilevabili tramite una attenta analisi micrografica. In figura 17 è riportato l'istogramma dei carichi unitari di rottura.

Prove di trazione su AA6082 T6

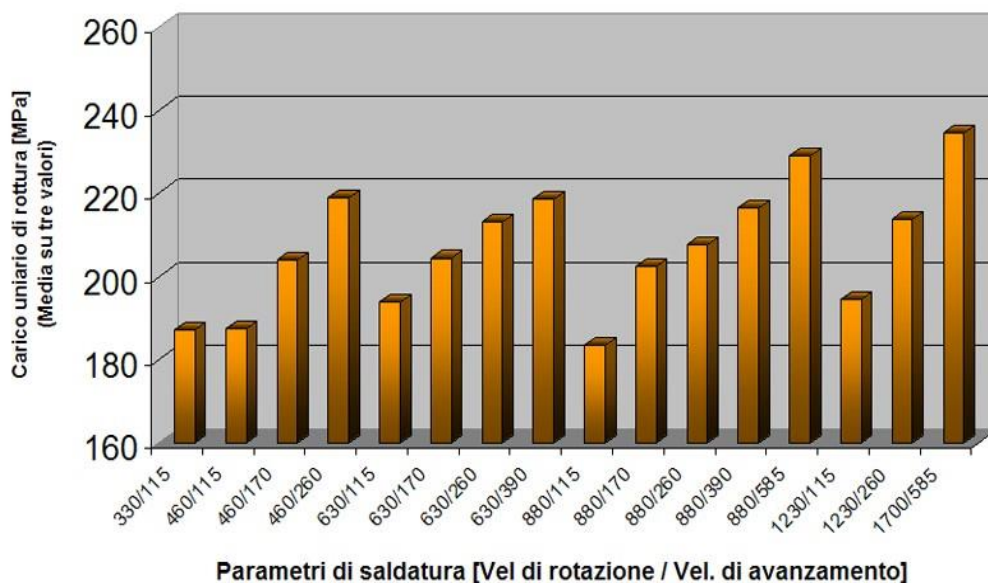


Fig. 17 Iistogramma dei risultati delle prove di trazione

Considerando la media dei carichi di rottura riscontrati nei tre provini realizzati per ogni giunto, è possibile individuare una tendenza delle variazioni di resistenza in relazione ai parametri di saldatura adottati. I migliori giunti presentano una resistenza pari a circa il 70% di quella del materiale base, condizione paragonabile a quella dei migliori giunti realizzabili tramite tecnologie TIG-MIG. Per quanto riguarda le prove di piega, come richiesto dalla norma, 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. I risultati delle prove di piega sono riassunti in tabella 6.

Tab. 6 Risultati delle prove di piega

N° giunto	Risultati		N° Giunto	Risultati	
	Lato diritto	Lato rovescio		Lato diritto	Lato rovescio
00-P01			00-P12	Rottura 70°	Prova superata
00-P02	Prova superata	Prova superata	00-P13	Prova superata	Prova superata
00-P03	Prova superata	Prova superata	00-P14	Scollamento	Prova superata
00-P04	Prova superata	Prova superata	00-P15	Prova superata	Rottura a 90°
00-P05	Rottura a 55°	Prova superata	00-P16		
00-P06			00-P17	Prova superata	Prova superata
00-P07	Prova superata	Prova superata	00-P18	Rottura a 20°	Rottura a 15°
00-P08	Prova superata	Prova superata	00-P19	Prova superata	Prova superata
00-P09	Prova superata	Prova superata	00-P20	Prova superata	Prova superata
00-P10	Prova superata	Prova superata	00-P21	Scollamento	Prova superata
00-P11			00-P22	Prova superata	Prova superata

Nel caso dei giunti 00-P06, 00-P11 e 00-P16, la presenza di gravi difetti, rilevati mediante controllo visivo o tramite radiografia, ha reso inutile l'effettuazione delle prove di piega. Interessanti sono i risultati ottenuti dai provini 00-P14 e 00-P21, dove si è avuta rottura per scollamento durante la piega al diritto (Fig. 18). I risultati della maggior parte delle prove appaiono comunque positivi (angolo di piega superiore a 150°).



Figura 18 Provino di piega 00-P21 – rottura per sfaldamento/scollatura

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 più elevati sono stati riscontrati nella zona centrale del giunto: si sono misurati valori fino a 80 HV_{0,2}, pari a 1,15 volte la durezza del materiale base. I valori più bassi sono stati invece rilevati nella zona termicamente alterata dei giunti. In queste zone è stato notato un calo di durezza del 15%, rispetto a quella del materiale base (Fig. 19).

Prova di durezza Vickers su AA6082 T6 Giunto 00-P17

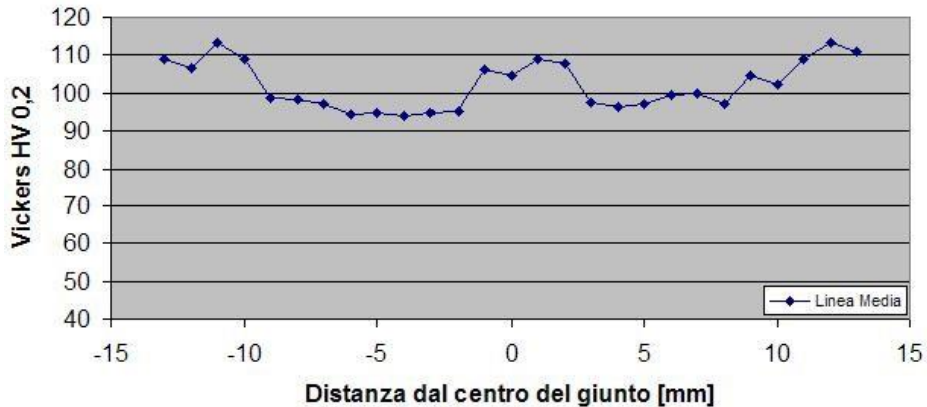


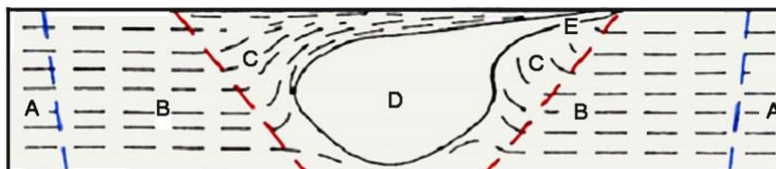
Fig. 19 Mappa delle durezza rilevate sul giunto 00-P17

I provini metallografici sono stati ricavati perpendicolarmente alla direzione di saldatura, in modo da osservare le strutture presenti nelle varie zone dei giunti. Dopo il taglio, i provini sono stati inglobati in resina e successivamente lucidati; è stato poi effettuato un attacco con reagente di Keller e si è proceduto all'esame della struttura mediante microscopio ottico (Fig. 20).



Fig. 20 Vista di un provino metallografico

All'interno di un giunto FSW, si possono distinguere quattro zone, identificate dalle lettere A-D in figura 21. 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. Le zone C, chiamate ZTMA – Zona Termo-Meccanicamente Alterata, 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 – Zona Termicamente Alterata) 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. 21 Zone caratteristiche di un giunto FSW

Le immagini riportate in figura 22 mostrano alcuni particolari del giunto 00-P05 (630 giri/min-115 mm/min, rapporto = 5.48 giri/mm): l’anima del giunto o Nugget (Fig. 22a) e la zona termo-meccanicamente alterata - ZTMA (Fig. 22b).

Nell’immagine che mostra l’anima della saldatura è possibile individuare le striature, normalmente definite “onion rings” (anelli di cipolla), caratteristiche del processo FSW. Tali striature sono dovute all’azione di rimescolamento operata dal pin sul materiale plasticizzato ed indicano una corretta esecuzione della saldatura.

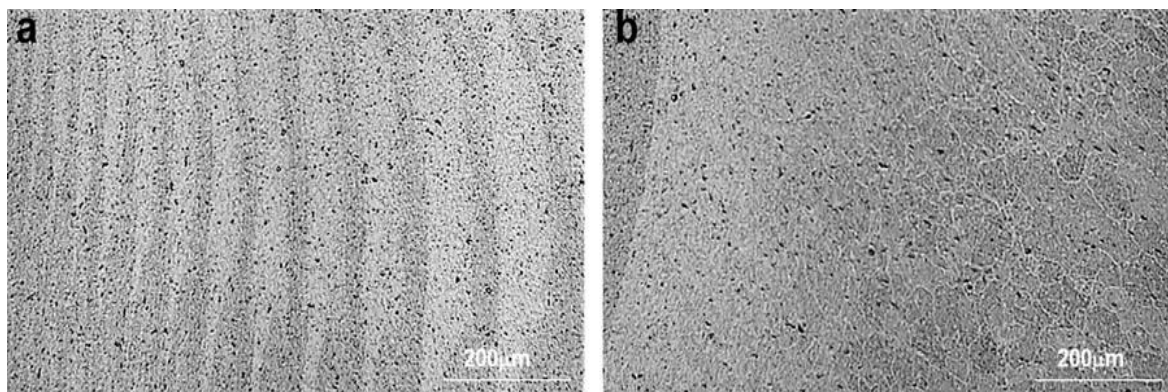


Figura 22 Microstruttura di un giunto FSW: a) anima della saldatura o Nugget; b) Zona Termo-Meccanicamente Alterata.

La finestra di saldatura relativa ai giunti analizzati nel presente studio (Lega AA6082 T6 spessore 5 mm) è rappresentata in figura 23.

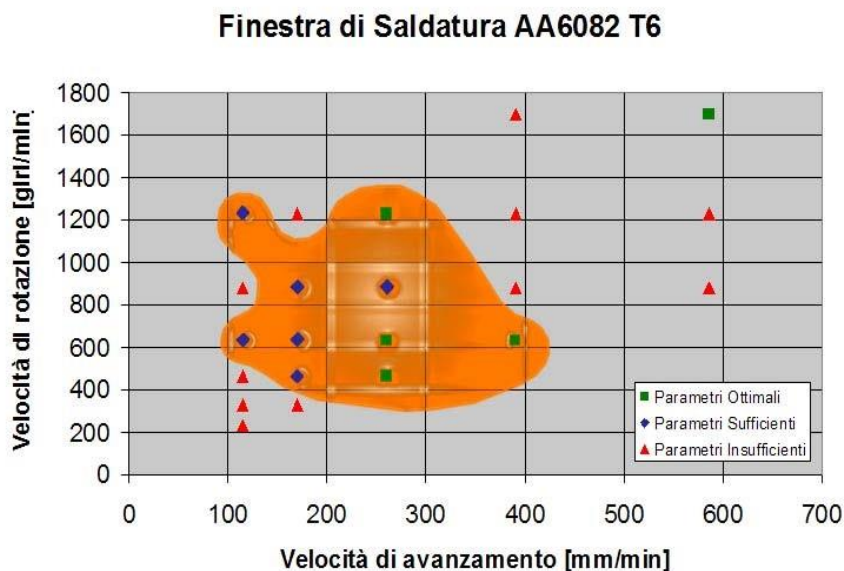


Fig. 23 Finestra di saldabilità dell’alluminio AA6082 T6 spessore 5 mm

La finestra di saldabilità evidenzia che l’efficacia del procedimento si ottiene adottando velocità di avanzamento comprese tra i 100 ed i 350 mm/min e velocità di rotazione tra i 350 e i 1200 giri/min.

4.2 Valutazione dell’efficienza dei giunti FSW

Individuati i parametri che hanno permesso di ottenere giunti caratterizzati dalla maggiore efficacia, si è proceduto alla rilevazione dei consumi energetici utilizzando l’attrezzatura descritta nel paragrafo 3.

In tabella 7 sono riportati i parametri di saldatura adottati ed i consumi elettrici rilevati.

Tab. 7 Parametri di saldatura e potenza totale assorbita

ID Prova	Parametri di saldatura		Potenza totale assorbita [W]
	Velocità di rotazione utensile [giri/min]	Velocità di avanzamento dell'utensile [mm/min]	
1	1230	260	6300
2	630	260	5225
3	460	260	4520
4	630	390	5240

Ricordando, come indicato nel paragrafo 3, che la potenza a vuoto è pari a 2,43 kW, in tabella è riportato il valore della potenza totale assorbita dalla macchina in fase di saldatura.

Dall'analisi macrografica dei giunti, si è valutata l'area del materiale portato alla temperatura di plasticizzazione (evidenziata in figura 24).

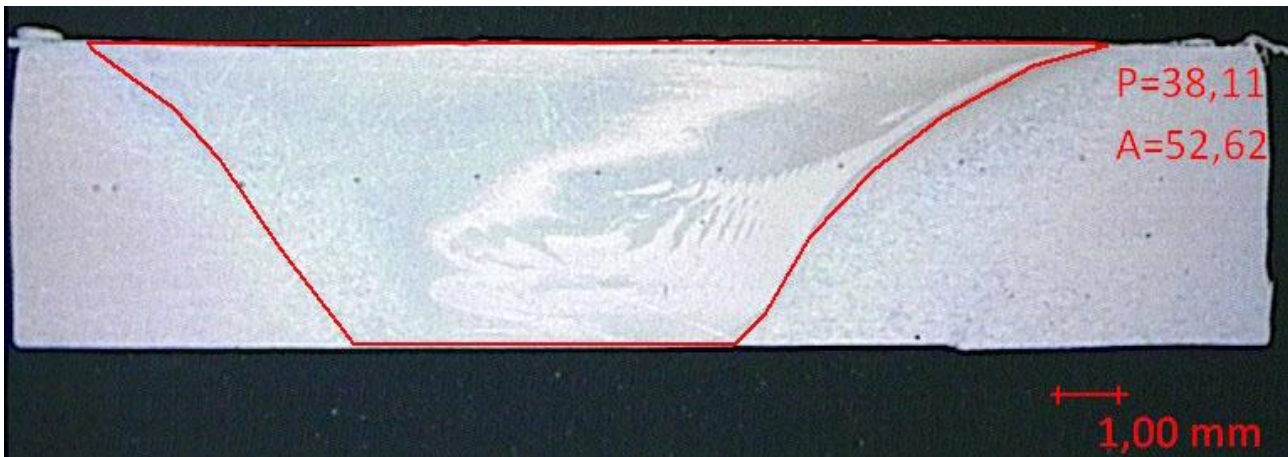


Fig. 24 Esempio di misura della zona plasticizzata

Quindi, 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 fornita al giunto. 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 8.

Tab. 8 Dimensioni della zona plasticizzata ed energia assorbita dal materiale

ID Prova	Dimensioni della zona plasticizzata		Temperatura raggiunta [K]	Energia assorbita dal materiale [J]	Potenza assorbita dal materiale [W]
	Area [mm ²]	Volume [mm ³]			
1	74,48	744,8	748	1159	502
2	62,96	629,6	723	947	410
3	52,62	526,2	698	764	331
4	50,41	504,1	690	723	470

Per valutare l'efficienza delle saldature è sufficiente fare il rapporto tra la potenza assorbita dal materiale e la potenza totale assorbita dalla rete. In tabella 9 sono riportati i valori di efficienza delle saldature FSW realizzate.

Tab. 9 Efficienza di saldatura FSW

ID Prova	Efficienza di saldatura FSW [%]
1	7,97
2	7,85
3	7,32
4	8,97

5 Conclusioni

La ricerca ha permesso di individuare la strumentazione necessaria per la rilevazione della potenza assorbita durante il processo di saldatura.

Come mostrato nel paragrafo 3, l'efficienza del procedimento risente in maniera significativa delle condizioni al contorno, quali la tipologia dei materiali costituenti l'utensile, i supporti ed i sistemi di ancoraggio dei pezzi da saldare, nonché del numero e della tipologia di motori elettrici installati sulla macchina.

Dall'analisi dei risultati delle prime tre prove indicate in tabella 9, si può concludere che una diminuzione della velocità di rotazione comporta un decremento dell'efficienza del processo di saldatura. Questo può essere non facilmente comprensibile in quanto riducendo la velocità di rotazione del mandrino dovrebbero ridursi i consumi energetici. Bisogna però tener conto del fatto che il calore fornito al materiale è dovuto all'attrito che si genera fra l'utensile posto in rotazione e la superficie dei pezzi da saldare. Una minore velocità di rotazione genera meno calore e quindi la temperatura raggiunta dal materiale risulta inferiore, rendendo più difficile l'azione di rimescolamento. Inoltre l'avanzamento dell'utensile all'interno di un materiale più freddo e quindi più resistente necessita di un maggiore apporto di energia, ulteriore giustificazione del fatto che l'efficienza del processo diminuisce.

Se si considerano le due prove eseguite a parità di velocità di rotazione (ID 2 e 4 di tabella 9) si può notare che adottando una velocità di avanzamento maggiore si ha un certo incremento dell'efficienza di processo, oltre ad un aumento della produttività.

Per definire la classe energetica di una macchina per realizzare saldature FSW è quindi necessario tenere conto di tutti gli aspetti sopra elencati.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] AA. VV., "L'etichetta energetica", ENEA
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] C. Gambaro, L. Fratini, A. Squillace, J. Adamowki, M. Ponte, "Friction Stir Welding – introduzione alla tecnologia", 2009, Aracne Editrice.
- [5] C. J. Dawes, "Friction Stir Welding", Talat Lecture 4410.
- [6] M. J. Greitmann, P. Deimel, "Friction Stir Welding - innovative technology for Joining Aluminium Components", Otto-Graf-Journal Vol. 16, 2005, pgg. 185-192
- [7] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50, 2005, pgg. 1-78
- [8] UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 "Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura"
- [9] H.S. CARSLAW AND J.C. JAEGER, Conduction of heat in solids, Oxford Press
- [10] 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
- [11] T.J. Lienert, W.L. Stellwag, L.R. Lehman, *Comparison of Heat Inputs: Friction Stir Welding vs. Arc Welding*, Abstracts of the AWS conference, (2002), paper 011
- [12] 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).
- [13] P. Zelinski, "Welding on a machining centre", www.toolingu.com/articles .
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] AA.VV. "Appunti di Misure Elettriche ed Elettroniche", Gruppo di Misure Elettriche ed Elettroniche dell'Università di Napoli Federico II e della Seconda Università di Napoli, Napoli 2008.

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.