



Ricerca di Sistema elettrico

Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale: Settore Automotive

G. Barbieri, F. Cognini, G. Di Girolamo,
D. Mirabile Gattia, M. Moncada, A. Tati

TECNICHE DI EFFICIENTAMENTO DEI PROCESSI DI SALDATURA INDUSTRIALE: Settore Automotive

G. Barbieri, F. Cognini, G. Di Girolamo, D. Mirabile Gattia, M. Moncada, A. Tatì (ENEA)

Con il contributo di: U. De Angelis ed E. Serra per analisi microstrutturale, G. De Santis, V. Contini (Acquisizione ed Analisi dei dati)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

Progetto: Processi e Macchinari Industriali

Obiettivo: Etichettatura energetica per l'efficientamento di macchinari - Tecniche di efficientamento di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Indice

1	SOMMARIO	4
2	STATO DELL'ARTE SUI PROCESSI DI GIUNZIONE IMPIEGATI NEL SETTORE AUTOMOTIVE	5
2.1	TECNICHE DI GIUNZIONE	6
2.2	FUTURE TENDENZE	11
2.3	STATO DELL'ARTE SUI NUOVI MATERIALI METALLICI NEL SETTORE AUTOMOTIVE	12
2.3.1	Acciai ad alta resistenza	14
2.3.2	<i>Leghe di alluminio</i>	17
2.3.3	<i>Leghe di magnesio</i>	18
2.3.4	<i>Compositi polimerici</i>	19
2.3.5	<i>Materiali utilizzati nelle prove sperimentali</i>	19
3	CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA SISTEMA LASER LHYTE CON TESTA REMOTA SCANLAB INTELLIWELD II FT E FIBRA 100 MICRON	20
3.1	ANALISI TERMOGRAFICHE	27
3.2	VALUTAZIONE DEL FEE SUL PROCESSO TIPO DI SALDATURA LASER DI LAMIERE IN SOVRAPPOSIZIONE DI ACCIAIO FeP04	31
4	PROVE SALDATURA MEDIANTE MIG	33
5	PROVE SALDATURA RSW	38
5.1	CONSUMI ENERGETICI MISURATI PER IL PROCESSO RSW	39
5.1.1	<i>Misure di consumo energetico sul generatore RSW</i>	39
5.1.2	<i>Consumi energetici robot</i>	40
5.1.3	<i>Consumi energetici complessivi per la saldatura RSW</i>	41
5.2	<i>TEST SU ACCIAIO DP600 SPESSORE 1,5 + 1, 5MM</i>	43
5.3	<i>TEST SU AA6016 T4 SPESSORE 1 + 1MM</i>	47
5.4	CONFRONTO DEI FATTORI DI EFFICIENZA ENERGETICA PER RSW	49
6	PROVE DI SALDATURA MEDIANTE CLINCHING	50
6.1	CONSUMI ENERGETICI MISURATI PER IL PROCESSO DI CLINCHING	51
6.2	ANALISI DELL'EFFICACIA DELLA GIUNZIONE PER CLINCHING	52
7	CONCLUSIONI	55
	BIBLIOGRAFIA	58

1 Sommario

Nel periodo ottobre-dicembre 2018 è stata valutata, sia attraverso ricerche bibliografiche, per capire lo stato dell'arte, sia con attività sperimentali, l'applicazione del concetto di efficienza energetica dei processi di saldatura industriale nel settore automobilistico, più precisamente nella fase di lastratura automobilistica.

Le principali tecnologie di saldatura utilizzate attualmente nel settore Automotive sono, in ordine cronologico (vedi Fig. 1):

- Saldatura a Resistenza;
- Saldatura ad Arco (principalmente MIG);
- Saldatura Laser.

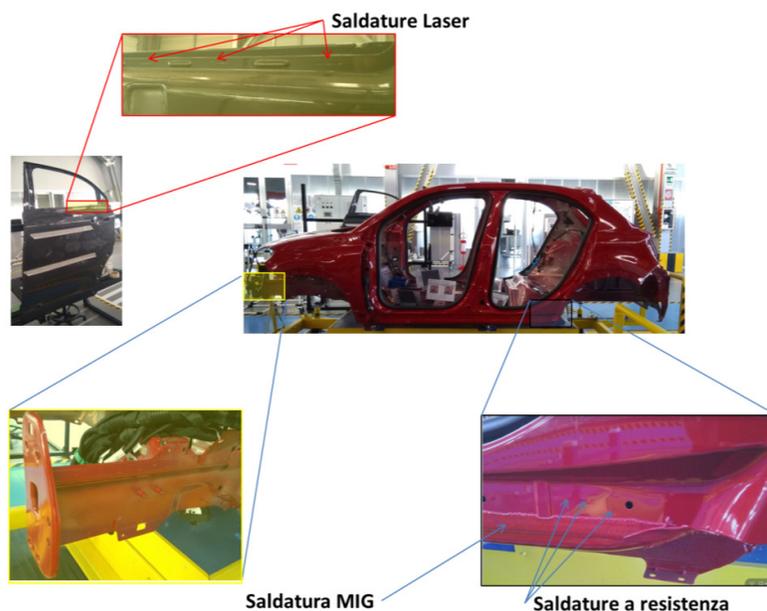


Figura 1– Principali tecniche di saldatura utilizzate nella produzione di un veicolo standard.

Inoltre, negli ultimi anni, anche grazie alla spinta nell'utilizzo di materiali leggeri (leghe di alluminio) e di acciai a elevata resistenza, sono state introdotte (sono attualmente in fase di valutazione) tecnologie che permettono anche la giunzione fra materiali dissimili come ad esempio la Self Piercing Rivet (SPR), il clinching e il Flow Drilling Screw (FDS).

I materiali da noi investigati sono stati gli ormai comuni acciai DP 600 (spessori 1,5 mm) e la lega di alluminio 6016-T4 (spessore 1 mm).

Grazie alla disponibilità del Centro Ricerche Fiat-CRF, presso la loro nuova sede del Campus Manufacturing di Melfi (PZ) è stato possibile effettuare test di misura di efficienza energetica sui seguenti sistemi:

- Saldatura **laser** robotizzata con testa di saldatura remota:
 - Caratterizzazione energetica di tutta la catena del sistema di saldatura (sorgente/fibra/testa di scansione) mediante rilievi di potenza e di caustica;
 - Saldatura di campioni per verificare l'efficacia del processo.
- Saldatura a **resistenza** con sistema robotizzato COMAU:
 - Monitoraggio dei consumi energetici al primario con sistemi master, sia del generatore sia del robot e nelle fasi di rinvivatura;
 - Materiali saldati: Acciaio e Alluminio con tre parametri efficaci.

- Saldobrasatura robotizzata **MIG**
 - Monitoraggio Primario con sistema ENEA BOX su acciaio con tre ripetizioni di parametri standard.
- **Clinching**
 - Monitoraggio dei consumi energetici al primario con sistemi master sia del generatore sia del robot in condizioni di provata efficacia della giunzione.

Tutti i rilievi di consumo energetico sono stati supportati da analisi termografiche sui principali componenti.

2 Stato dell'arte sui processi di giunzione impiegati nel settore automotive

Nel settore automobilistico i processi di saldatura nella realizzazione di una vettura incidono per il 9-11% dell'intero consumo energetico, come schematizzato nella Figura 2. Il consumo elettrico stimato, secondo uno studio del 1995 basato su impianti dislocati negli Stati Uniti e in Europa, è quantificato in 80-95 kWh per automobile; questo dato è ancora valido in quanto attualmente viene stimato essere fra 80 e 100 kWh/auto [1,2,3]. Se consideriamo che la produzione delle auto in Italia nel 2017 ha superato le 700.000 unità, l'introduzione di nuovi processi in grado di ridurre del 10% il consumo elettrico, potrebbe produrre un risparmio energetico compreso fra 5.600 e 7.000 GWh/anno, corrispondente al consumo medio di circa 2500 famiglie (ipotizzando un costo dell'energia di 0,1€/kWh il risparmio sarebbe compreso fra 560 e 700 k€/anno). Inoltre, considerando il numero elevato di unità prodotte e la propensione agli investimenti dello specifico settore produttivo, si ipotizzano tempi più rapidi nell'acquisizione di queste nuove tecnologie. L'efficienza del processo di saldatura a resistenza (il processo di gran lunga più utilizzato), può essere migliorata mediante un controllo del processo che riduca il bisogno di test distruttivi, utilizzi generatori ad inverter, risparmiando il consumo a macchina ferma e attivando le ventole quando strettamente necessario. L'unità multi-saldatura sviluppata da Lincoln utilizza meno potenza, riduce il tempo di pulizia e ha un maggiore rate di deposizione [4].

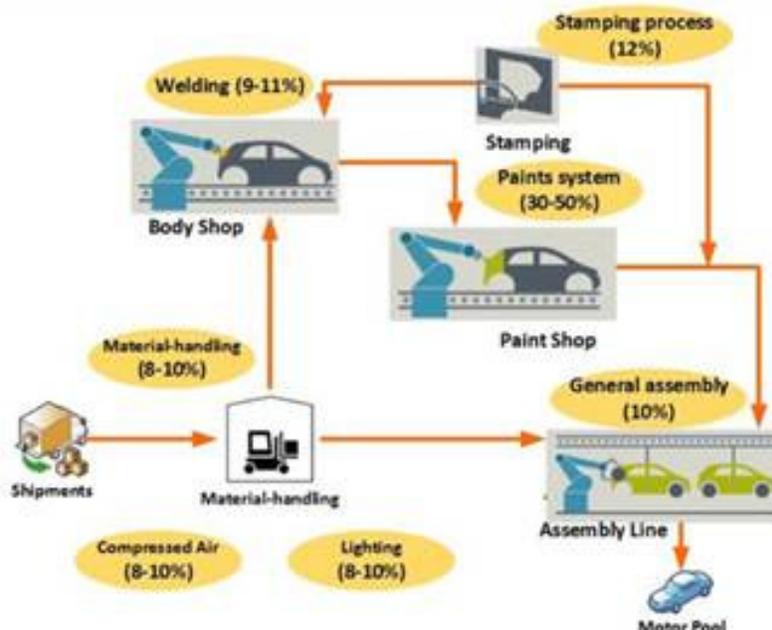


Figura 2– Incidenza energetica nel processo di produzione di un'automobile.

2.1 Tecniche di giunzione

Le principali tecnologie di saldatura utilizzate nei sistemi di lastratura automobilistica, come già evidenziato nel sommario permangono: la saldatura a Resistenza, ad Arco, Laser.

Un corpo vettura tradizionale viene realizzato mediamente con 4500 punti di saldatura a resistenza (Resistance Spot Welding, RSW). I punti vengono applicati in celle completamente robotizzate come quelle mostrate in Figura 3 e riferite allo stabilimenti FCA di Melfi ove oltre 800 robot operano sulla sola linea di lastratura per la realizzazione del corpo vettura.



Figura 3– Cella di saldatura simultanea dello stabilimento FCA di MELFI.

In una singola cella di saldatura RSW, 18 robot lavorano simultaneamente su ogni vettura applicando fino a 105 punti diversi di saldatura in soli 54 secondi.

In funzione della classe e tipologia del veicolo, le tecnologie di saldatura impiegate sono molteplici; si parte dalle più tradizionali saldature a punti e da quelle ad arco con metallo sotto protezione di gas (in gergo tecnico MIG/MAG) e si prosegue con le saldature laser, per poi arrivare all'innovativa saldobrasatura di giunzioni estetiche con tecnologia laser che garantisce un'elevatissima qualità superficiale delle giunzioni e consente di realizzare soluzioni stilistiche di alta qualità.

Infine, in particolare in autovetture che impiegano differenti tipologie di materiali, sono state introdotte nuove tecnologie di saldatura laser, nonché di chiodatura con rivetti *self piercing* per unire le parti in acciaio con quelle in lega di alluminio e di incollaggio per unire le parti in acciaio con quelle in fibra di carbonio.

Le prime auto con strutture in alluminio furono l'Audi 100 (1985) e la Ford P2000 (1998). In Figura 4 la Porsche 970 "Panamera", la cui struttura multi-materiale prevede l'impiego di parti in alluminio e in acciaio ad ultra-elevata resistenza.



Figura 4– Porsche 970 Panamera con struttura in alluminio e acciaio al boro [5].

Di seguito vengono descritte con maggior dettaglio le singole tecniche di saldatura:

La saldatura a resistenza è la più comune per produzioni di massa per giunzioni acciaio-acciaio, alluminio-alluminio e acciaio-alluminio. La saldatura a resistenza applicata per le parti in acciaio fu inizialmente impiegata anche per l'alluminio, ma necessita di una più elevata corrente di saldatura rispetto all'acciaio, aumentando i consumi e i costi, richiedendo inoltre una preparazione della superficie e implicando minore durata degli elettrodi.

La saldatura ad arco per parti di geometria complessa richiede una preventiva rimozione meccanica o chimica degli ossidi superficiali e produce dei cordoni con elevata porosità. Aggiungendo i problemi di controllo di penetrazione nelle lamiere sottili e le distorsioni prodotte dal processo ad arco ciò può influenzare negativamente le tolleranze dimensionali. A causa di queste problematiche diventa meno attrattiva per produzioni di massa di veicoli a basso peso [6] perché nell'industria automobilistica la rimozione meccanica o chimica degli ossidi superficiali prima della saldatura non è considerata una procedura accettabile nel caso di elevati volumi di produzione, in quanto comporta costi e tempi elevati. E' auspicabile, quindi, un aumento della 'fiducia' dei produttori nello sfruttamento di nuovi materiali e di nuove tecnologie di giunzione per la fabbricazione di strutture leggere in produzioni a elevato volume di produzione; questo richiede migliorie in vari settori tra cui il design, la scelta dei materiali, l'ottimizzazione e il controllo di qualità e performance, l'attenzione per l'impatto ambientale. Il fattore economico, che riveste grossa importanza nella produzione massiva delle auto, è ovviamente meno determinante per veicoli di nicchia.

La saldatura MIG viene usualmente impiegata per la giunzione di componenti strutturali di alluminio, estrusi e fusi, con spessore maggiore di 2 mm. Analogamente viene impiegata la saldatura laser, anche se generalmente il suo utilizzo è maggiormente indicato per lamiere più sottili. Queste tecnologie sono particolarmente adatte per componenti non accessibili da entrambi i lati o dove è richiesta la realizzazione di una giunzione continua.

Il laser consente di avere meno distorsioni rispetto alle altre tecniche e di unire parti fuse ed estruse. Giunti di testa sono utilizzati per supporti dei radiatori, telai delle portiere, orli flangiati al chiuso. È meno sensibile alla preparazione superficiale. Per esempio, nel progetto FLEXPROD, ENEA ha saldato con tecnologia laser leghe di alluminio (AA-6082 T6 e AA-5754 O) di spessore 1.5, 2 e 3 mm, realizzando giunti di testa e giunti sovrapposti da utilizzare in "tailored blanks".

Altre tecnologie meno diffuse sono la **friction stir welding (FSW)** che utilizza un utensile rotante nella lamiera di alluminio da saldare, determinando una sorta di saldatura allo stato solido. Più esattamente viene applicata una forza muovendo il pezzo mentre continua la rotazione; questo determina una deformazione plastica ed un flusso di materiale intorno all'utensile che produce una saldatura solida

autogena con basse distorsioni. Si tratta di un'alternativa a basso costo alla saldatura ad arco, che evita i problemi della fusione.

L'introduzione dell'alluminio ha portato allo sviluppo di nuove tecnologie di giunzione basate su deformazione meccanica o incollaggio con adesivi. Allo stato attuale, esistono diverse tecnologie per l'assemblaggio di componenti e moduli in alluminio nel settore automobilistico, specialmente per prodotti di nicchia ad elevato costo.

La rivettatura auto-perforante utilizza un rivetto tubolare guidato nelle lamiere da saldare, fra un punzone e una matrice montati su una piccola pressa. Il rivetto si espande nella lamiera inferiore senza forarla e genera un bloccaggio meccanico.

Il clinching non usa i rivetti, un punzone deforma le lamiere all'interno di una matrice che è progettata e dimensionata per consentire un bloccaggio delle lamiere in modo da formare un bottone sul lato inferiore delle lamiere. Le lamiere non vengono quindi perforate.

Il Flow Drilling Screw prevede l'impiego di viti autoperforanti e sistemi appositamente progettati e spesso con geometria proprietaria. Il grande vantaggio è quello di poter realizzare giunzioni dissimili fra acciaio, leghe di alluminio o leghe di magnesio con spessori che vanno da 0,4 a 5 mm senza necessità di preventiva preparazione e in tempi estremamente rapidi.

La Figura 5 mostra esempi di giunzioni con queste tecniche mentre la Figura 6 mostra lo schema e la vista della sezione trasversale della giunzione per clinchiatura e SPR.



Figura 5– Sistemi di giunzione meccanica.

In tabella 1 un confronto fra diverse tecniche per lamiere di alluminio 5182 dello spessore di 1.6 mm.

Carico di rottura a peeling, kN			Carico di rottura a taglio, KN		
Rivettatura auto-perforante	Clinching	Saldatura a resistenza	Rivettatura auto-perforante	Clinching	Saldatura a resistenza
1.5	0.6	1.1	5.2	1.8	5.0

Tabella 1 – Caratteristiche meccaniche di resistenza a peeling e a taglio di giunzioni realizzate mediante tecniche meccaniche e saldatura a resistenza.

I risultati mostrano che la rivettatura auto-perforante raggiunge maggiori carichi di peeling e taglio, sebbene molto dipenda dalla geometria e dal design del rivetto. Questa maggiore resistenza potrebbe essere attribuita alla resistenza del rivetto utilizzato. Per le giunzioni clinchiate, la resistenza a peeling e a taglio è meno della metà di quella ottenuta con la rivettatura auto-perforante e con la saldatura per punti. Mentre il clinching è particolarmente adatto per la giunzione di parti a basso carico, la rivettatura può essere impiegata per componenti strutturali. Le tecnologie di fissaggio meccanico sono più efficienti energeticamente della saldatura e possono essere facilmente automatizzate e non richiedono la perforatura delle lamiere. Le giunzioni di alluminio realizzate mediante rivettatura presentano migliore resistenza a fatica di quelle prodotte mediante saldatura per punti. I rivetti auto-perforanti (vedi Figura 7) sono utilizzabili per assemblare materiali differenti, almeno per materiali duttili e spesso combinati con gli adesivi.

La tecnologia di incollaggio mediante adesivi è utilizzata per assemblare parti di veicoli in acciaio e in alluminio. Gli adesivi consentono di realizzare giunzioni con capacità di sigillatura, ridotte vibrazioni, migliore distribuzione degli stress, maggiore resistenza a fatica. Tuttavia, la loro resistenza a peeling durante i crash test è bassa, per cui si consiglia un loro utilizzo in combinazione con tecnologie di saldatura per punti o di fissaggio meccanico. Generalmente gli adesivi vengono applicati in forma lineare.

Materiali dissimili non possono essere uniti con la saldatura per punti. L'uso di adesivi insieme a rivetti è molto interessante consentendo di realizzare giunzioni ibride, con migliori caratteristiche di resistenza a corrosione, fatica e impatto.

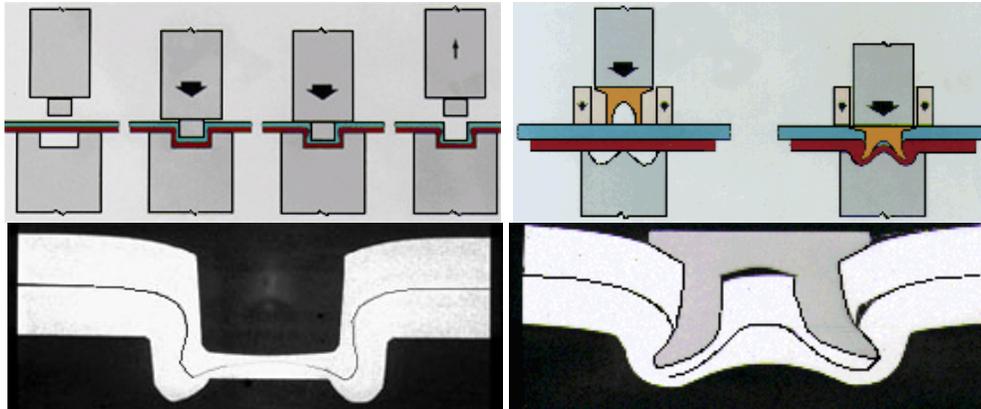


Figura 6– Schematizzazione e sezione di una giunzione realizzata mediante clinching (sn) e self-piercing riveting (dx) [9].

Per linee di produzione dove c'è l'esigenza di assemblare materiali differenti e acciai al boro ad elevata resistenza e rigidità, tecniche meccaniche e di incollaggio mediante adesivi mostrano dei limiti [7,8]. Serve quindi sviluppare delle nuove o ottimizzate tecnologie come le viti autofilettanti e la giunzione per formatura ad alta velocità [9]. Il clinching può generare cricche che incidono determinando una ridotta resistenza a fatica, a causa della bassa duttilità della lega (22MnB5), mentre le giunzioni rivettate subiscono la deformazione del rivetto a causa dell'elevata resistenza dell'acciaio al boro. La giunzione produce delle cricche intorno al foro e una punta fortemente deformata per l'elevata resistenza del materiale. Pertanto alcuni studiosi hanno presentato una nuova tecnologia per assemblare alluminio e acciaio al boro, nota come shear clinching. La lamiera di acciaio al boro viene perforata mediante l'applicazione di una forza elevata da parte della pressa che spinge il punzone [10]. Un'altra tecnica è la RIVTAC utilizzata nella Mercedes-Benz SL (R231) [11]. Un chiodo è guidato da un punzone pneumatico accelerato nel pezzo a velocità di 20-40 m/s. La punta penetra determinando un incremento momentaneo della temperatura nella zona della giunzione e una migliore scorrevolezza fa sì che il materiale scivoli nella scanalatura anulare sul gambo della punta [12]. Gli effetti di massa inerziale consentono di unire componenti a parete sottile senza una significativa deformazione globale. Inoltre, l'elevato rate di deformazione, in combinazione con l'attrito fra il chiodo e il pezzo, determina un incremento locale della temperatura quasi adiabatico, migliorando le proprietà di scorrevolezza del metallo e consentendo di assemblare materiali ad elevata resistenza [13]. Rispetto alla rivettatura con rivetti semi-cavi, il rivetto solido non è formato per creare bloccaggio [14,15]. Hahn e altri studiosi hanno anche proposto l'applicazione di metodi termo-meccanici per assemblare materiali a bassa duttilità ed elevata resistenza, che possono essere utilizzati in combinazione con gli adesivi [16,17,18,19]. La friction bit welding usa un elemento ausiliario di acciaio, collegato mediante RSW o FSW con il componente costituito da acciaio al boro, mentre la lamiera non ferrosa è unita con un positivo e un blocco di forza all'elemento ausiliario. Questo limita l'impossibilità di unire materiali diversi (ad esempio, lamiere di leghe 5754 e DP980). Non è richiesta formatura o punzonatura dell'acciaio e la tecnologia può essere adoperata per acciai martensitici con resistenza a tensione superiore a 1800 MPa. Nella Jaguar XJ venivano utilizzati rivetti e adesivi, rivetti per le parti in alluminio estruse e fuse; in seguito la percentuale di utilizzo dei rivetti è stata ridotta dell'11%, utilizzando un totale di 2840 rivetti,

corrispondenti a 5000 punti saldati per una struttura equivalente, mentre la percentuale di adesivi è stata incrementata del 50% fino a 154 m, eliminando in tal modo le saldature realizzate con tecnologia MIG [20].



Figura 7– Sezioni di giunzioni rivettate su lamiere di alluminio, realizzate con tecnologia Bollhoff [23].

Tecnica di giunzione	Numero di giunzioni o lunghezza del cordone										
	Audi A2	Audi A8 (D2)	Audi A8 (D3)	Audi A8 (D4)	BMW Z8 (spaceframe)	Mercedes-Benz SLS AMG (spaceframe)	Mercedes-Benz SL (scocca)	Mercedes-Benz SL (carrozzeria e parti attaccate) %	Aston Martin (chassis)	Corvette Z06 (spaceframe)	Audi TT (alluminio e acciaio)
Saldatura a resistenza per punti		500	-	202			135	2 + 0			1287
MIG	20 m	70	64	25	57	70 (cold metal transfer)	59.8	51 + 0			21.5
Laser welding	30 m	-	20	6						14	5.3
Hybrid welds		-	5								241 (saldatura per prigioniero)
Friction stir welding							8.1	7 + 0			
Adhesive bonding				44 m		si	76.2	19 + 56			97.2
Self-piercing riveting	1800 rivets	1100	2400	1847	890	975	1235	17 + 28	176	236	1606
Clinched joints		178	-				213	0 + 16			172
Screws (incl. Self-threading screws)				632		581	152	3 + 0	76		229
Rivetti a punzone solido (Kerb-Kouns)											96
Tacks (ImpACT)							14	1 + 0			

Tabella 2 – Comparazione fra diversi modelli di automobili che utilizzano strutture in alluminio e differenti tecnologie di giunzione.

La tabella 2 mostra una comparazione fra diversi modelli di automobili che utilizzano strutture in alluminio e differenti tecnologie di giunzione. Nel caso dell'Audi A2 la lega Anticorodal-120 (EN AW-6016) è utilizzata per i pannelli esterni del corpo auto, mentre per i pannelli interni e strutturali viene adoperata la lega Ecodal-608 (EN AW-6181A), utilizzando tre diverse tecniche di giunzione, ovvero saldatura MIG, laser e rivettatura auto-perforante. L'Audi A8 utilizza giunzioni realizzate per clinchiatura. La seconda generazione dell'Audi A8, prodotta a partire dal 2002, ovvero il modello D3, ottimizzava l'utilizzo della saldatura laser, proponendo per la prima volta una saldatura ibrida che combinava i vantaggi delle saldature MIG e laser. La saldatura MIG era usata principalmente per unire sezioni estruse individuali, componenti pressofusi, e per unire sezioni estruse a pezzi fusi. La saldatura laser era invece adoperata per unire pannelli di grandi dimensioni alla struttura della carrozzeria. La rivettatura auto-perforante era impiegata per l'assemblaggio della struttura della carrozzeria e per le portiere. Alla conferenza "Joining in car body engineering", tenutasi nel 2018 a Metz, sono stati presentati dei casi studio su Audi A8 e Volvo XC60.

La versione D4 utilizza l'incollaggio tramite adesivi e delle viti autopercoranti che sostituiscono circa 40 m di saldatura MIG e 550 rivetti. La BMW Z8 roadster prevede 290 parti di lamiera, 86 pezzi estrusi dritti e 24 curvi, il cui assemblaggio è eseguito utilizzando saldatura MIG e 890 rivetti. La Mercedes-Benz SLS utilizza diverse tecniche per le giunzioni della struttura Spaceframe costituita da parti fuse in alluminio. Nella scocca della Mercedes-Benz SL (R231) le viti autopercoranti sono sostituite dalla tecnica ImpAcT (o RIVTAC tack-setting) che utilizza chiodi accelerati ad alta velocità, guidati nelle parti da assemblare. I vantaggi evidenti sono: giunzione senza pre-punzonatura con accesso da un solo lato, riduzione del cordone e dei tempi di ciclo al minimo, giunzione di materiali a elevata resistenza, applicazione flessibile per giunzioni miste, multistrato e ibride, possibilità di impiego con gli adesivi.

Una delle principali difficoltà riguarda la giunzione di materiali diversi, in primis di alluminio con acciai a ultraelevata resistenza. La sostituzione dell'acciaio con l'alluminio e l'introduzione di un approccio multi-materiale con l'utilizzo di acciai a elevata e ultraelevata resistenza necessitano che vengano sviluppate tecnologie di giunzione più performanti e un nuovo design, nonché investimenti in apparecchiature e training, assodato che la saldatura a resistenza rimane la tecnologia dominante per automobili con struttura in acciaio. D'altra parte, questo sviluppo può avere ricadute notevoli sulla diffusione di nuove strutture leggere e soluzioni per una produzione automobilistica più economica ed efficiente. È necessario un giusto mix in termini di resistenza, costo, efficienza. Casi studio per modelli di nicchia necessitano approfondimenti per modelli di larga produzione. Naturalmente ogni scelta dipende dalla scelta dei materiali e dalle dimensioni della carrozzeria e delle parti da assemblare.

2.2 Future tendenze

La chiave per realizzare veicoli a basso peso è utilizzare diversi materiali e tecniche di giunzione con buon rapporto costo-efficienza. La crescente diversità dei materiali e la domanda per processi affidabili, flessibili ed economici richiedono una continua innovazione. Le giunzioni ibride (saldatura a resistenza/clinching + adesivi) costituiscono già parte dello stato dell'arte da diversi anni nella manifattura delle automobili di nicchia.

La saldatura a resistenza per punti può trarre vantaggio dallo sviluppo di nuovi processi, materiali e apparecchiature, che estendano la durata degli elettrodi, la qualità della giunzione e riducano la potenza impiegata. La saldatura ad arco può beneficiare dello sviluppo di generatori di potenza a stato solido e migliori dispositivi per l'alimentazione del filo.

Incrementare la saldatura laser rispetto a quella a resistenza o utilizzare la saldatura ibrida offre maggiori opzioni per portiere e componenti strutturali, tenendo conto che la saldatura laser è particolarmente promettente per le seguenti applicazioni:

- Produzione di semilavorati su misura saldati di testa che richiedono elevata velocità, basse distorsioni.
- Giunzioni sovrapposte dove è richiesto un basso input complessivo di calore.
- Produzione di giunzioni complesse nella struttura "spaceframe" fatta di pezzi fusi ed estrusi.

La friction stir welding può essere utilizzata, come alternativa a basso costo, nella produzione di saldature lineari in lamiere ed estrusi, per esempio nella realizzazione di pavimenti e pareti di camion. La rivettatura

può essere utilizzata in applicazioni a carico elevato e il clinching in aree a basso carico, spesso in combinazione con adesivi, ad esempio nel caso di giunzioni non critiche su flange di copertura di cofano e pianale. Una combinazione di metodi di incollaggio e fissaggio meccanico mediante rivetti auto-perforanti è particolarmente adatta per parti dello chassis in alluminio, rispondendo ai requisiti di rigidità demandati. Le classiche tecniche di giunzione meccanica combinate con nuove tecnologie di giunzione mostrano buone capacità di carico per applicazioni nel settore automotive. Ogni tecnologia possiede vantaggi e svantaggi, per cui non è possibile raccomandare una sola tecnologia, piuttosto una combinazione di esse. La decisione di applicarle per una produzione di serie dipende dai limiti tecnologici dei processi, dal volume di produzione, dalla resistenza richiesta, dalla flessibilità dei materiali, dai costi dell'intero processo di giunzione e assemblaggio dell'intera struttura. In linea generale occorre implementare processi automatizzati con elevate performance, efficienza e rapporto costo-benefici, che possano influire sul futuro sviluppo delle strutture in alluminio per applicazioni di larga scala e sull'efficienza dell'intero processo di assemblaggio di vetture prodotte su larga scala.

2.3 Stato dell'arte sui nuovi materiali metallici nel settore automotive

Il settore automobilistico ha subito negli anni importanti cambiamenti legati, oltre che alla progettazione, anche ai materiali utilizzati. Le richieste in termini di riduzione dei consumi e delle emissioni ha indotto i progettisti a valutare nuovi materiali per la realizzazione di varie componenti dei veicoli. L'approccio è quello di realizzare veicoli più leggeri, con consumi ed emissioni ridotte, ma nel rispetto della normativa sulla sicurezza dei veicoli. Inoltre bisogna considerare anche il fine vita dei mezzi e la possibilità di disassemblarli facilmente per limitare la quantità di materiale da disporre in discarica e massimizzare invece il numero dei componenti recuperabili.

L'obiettivo è quello di migliorare l'efficienza termica dei veicoli sopra al 30% per motori a benzina e al 40% per i motori diesel, con l'obiettivo di raggiungere un ulteriore 5% [21]. Miglioramenti dell'efficienza di questo tipo possono essere raggiunti attraverso l'utilizzo di veicoli ibridi e elettrici. Grandi sfide si pongono nel campo dei materiali per migliorare le componenti in veicoli elettrici, in particolare batterie, celle a combustibile, motori ed elettronica [22].

Per incrementare l'efficienza di un veicolo è importante ridurre la massa. Per una macchina familiare, con un peso di circa 1450 kg, una riduzione del peso del 10% comporta un miglioramento in termini di consumi del 6-8% [23, 24, 25]. Per ridurre il peso bisogna utilizzare materiali innovativi; il costo di questi ultimi deve essere contenuto per assicurare un prezzo competitivo finale per il veicolo stesso.

In Figura 8 sono riportati diversi scenari degli effetti sul peso e sul costo di veicoli di media grandezza dovuti a diverse combinazioni di materiali innovativi [26].

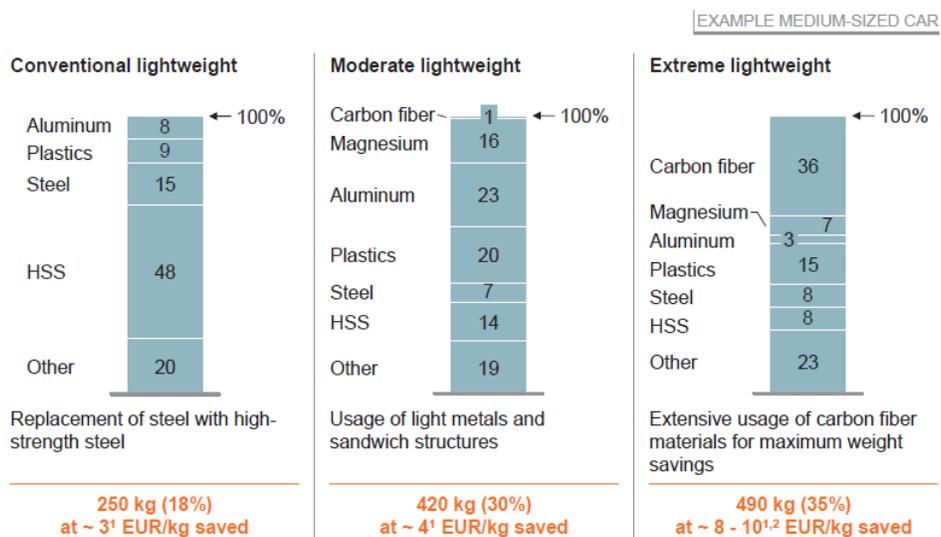


Figura 8: Possibili scenari dell'impatto sul peso e sui costi di veicoli di taglia media a seguito dell'utilizzo di combinazioni diverse di materiali innovativi [26].

In Figura 9 è riportato lo schema dei materiali utilizzati, in questo caso dalla Cadillac, della General Motors, all'interno di un veicolo ai fini dell'alleggerimento e del miglioramento della sicurezza [27].

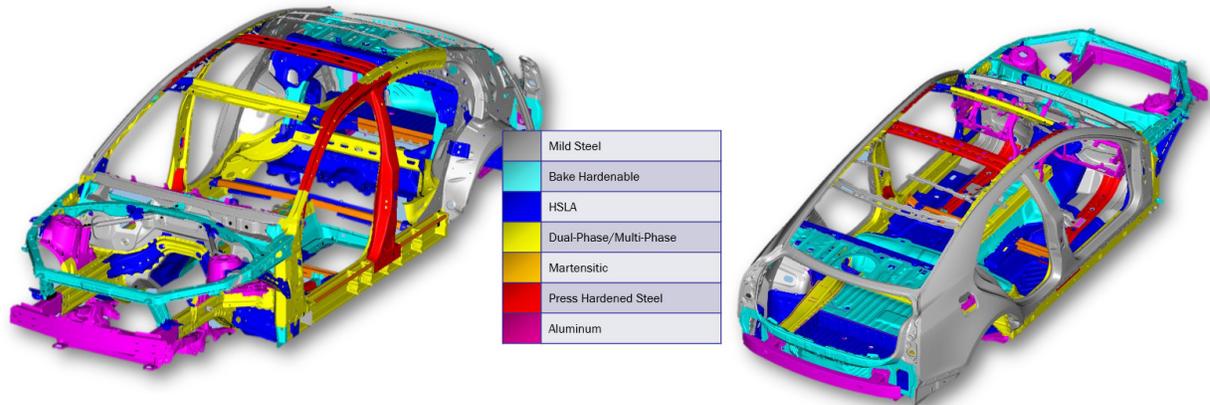


Figura 9: Materiali utilizzati all'interno di un veicolo Cadillac ATS ai fini dell'alleggerimento e della sicurezza.

Lo studio dei materiali leggeri è di grande importanza e diversi centri di ricerca nel mondo si occupano di questa tematica con un approccio multidisciplinare. Ad esempio presso il Dipartimento dell'energia americano (DOE) è attivo il gruppo di lavoro dedicato ai materiali leggeri per il settore automobilistico. L'attività di questo gruppo è incentrata su tre campi in particolare: proprietà e fabbricazione, modellazione e analisi computazionale, multi-materiali.

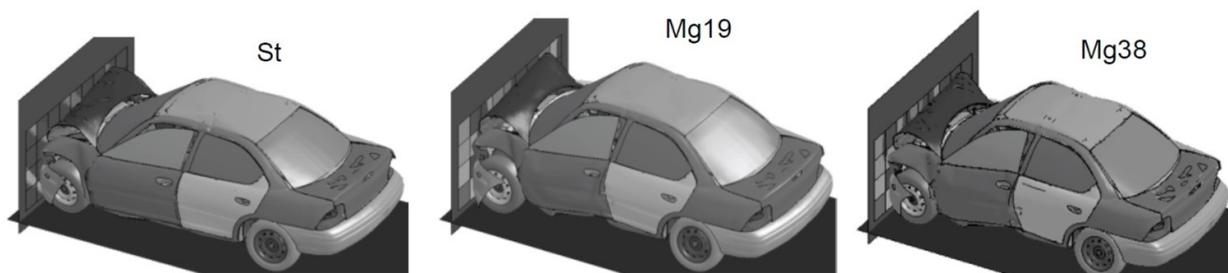


Figura 10: simulazioni di impatti in FFI (“full frontal impact”) per component strutturali in acciaio (a) e magnesio (19% e 38%, deformazione plastica a rottura) [28].

Tra le classi di materiali più promettenti, viste le proprietà meccaniche, si possono distinguere le seguenti:

- Acciai ad alta resistenza;
- Leghe alluminio e magnesio;
- Compositi polimerici in fibra di carbonio

2.3.1 Acciai ad alta resistenza

In un veicolo l’utilizzo dell’acciaio è prominente arrivando fino a circa il 70% del peso totale. Gli acciai ad alta resistenza (AHSS) sono caratterizzati da un’elevata resistenza e duttilità e potrebbero assicurare una riduzione del peso di circa il 25% a un costo di inferiore a 2 dollari per chilogrammo ridotto. Questi materiali sono compatibili con i sistemi di produzione convenzionali. In futuro è previsto l’utilizzo di acciai ad alta resistenza cosiddetti di “terza generazione”. In Figura 11, dove è riportato il carico di snervamento in funzione della deformazione per diversi tipi di acciai, si vede come questi acciai si pongano in un settore intermedio tra quelli di prima e seconda generazione [28]. In questi acciai il carico di rottura varia da 600 MPa a 1200 MPa con deformazioni tra il 10% e il 60%.

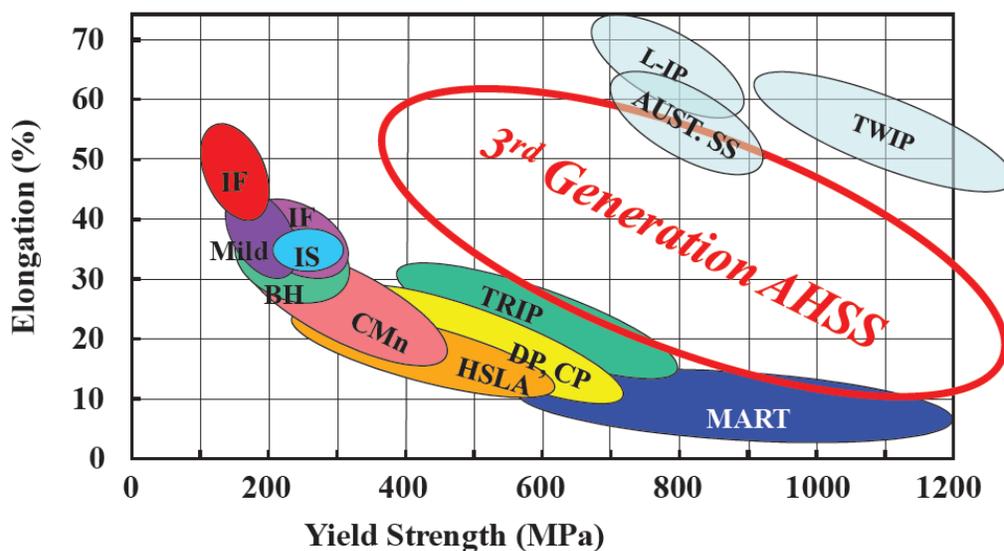


Figura 11: carico di snervamento in funzione della deformazione per alcuni tipi di acciai [28].

Diverse sono le denominazioni degli acciai AHSS: “dual-phase” (DP), “transformation-induced plasticity” (TRIP), “high-strength low-alloy” (HSLA), “complex-phase” (CP), “twinning-induced plasticity” (TWIP) e acciai martensitici.

In Figura 12 sono riportate le curve sforzo-deformazione per diversi tipi di acciaio in confronto con il DP della General Motors (GM 980X).

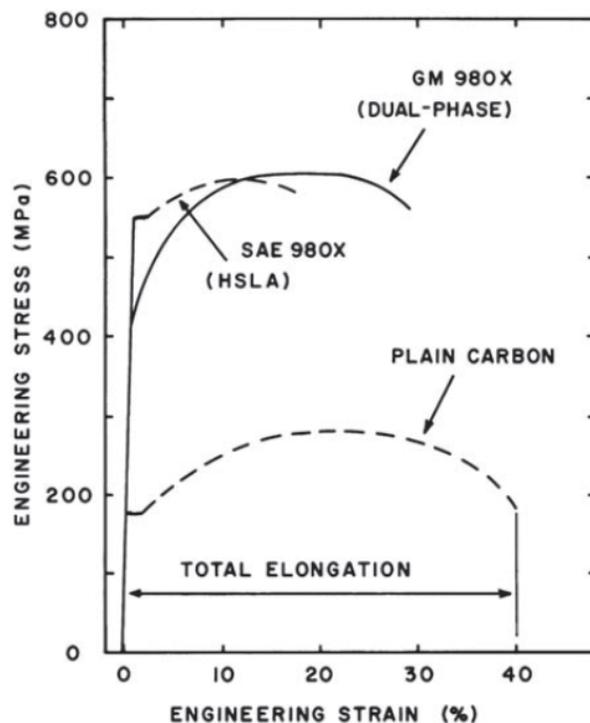


Figura 12: curva sforzo-deformazione per un acciaio DP (GM 980X) in confronto ad acciai plain-carbon e SAE 980X, basso legati ad alta resistenza (HSLA).

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del DP è ottenuto mediante opportuni trattamenti termici che ne modificano la microstruttura, in questo caso ricottura a temperature intercritiche e successiva tempra [29].

Gli AHSS vengono prodotti in principalmente in piastre laminate a caldo o a freddo e le loro specifiche rientrano all'interno della normativa ASTM International [30]. Al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche questi materiali sono sottoposti a trattamenti che ne modificano la microstruttura. Quest'ultima assieme alla tessitura può essere controllata attraverso appropriati trattamenti termomeccanici e termici. I meccanismi di miglioramento delle proprietà meccaniche si basano principalmente su indurimento attraverso soluzioni solide di elementi, precipitazione e modifiche della struttura, come riportato nello schema in Figura 13 [31].

La ricerca su questi materiali è focalizzata a migliorare le proprietà degli acciai DP e TRIP (per esempio gli acciai TRIP con Mn), a sviluppare acciai ad alta resistenza con microstruttura bainitica ultra-fine. Negli ultimi anni inoltre sono state messi a punto nuove modalità di processamento dei materiali che prevedono ad esempio trattamenti termici come il cosiddetto "quenching and partitioning" (Q&P) e fasi di riscaldamento e raffreddamento estremamente rapidi. Questi trattamenti permettono di ottenere una riduzione della dimensione dei grani e un bilancio tra martensite e austenite residua con un notevole aumento delle proprietà meccaniche [32].

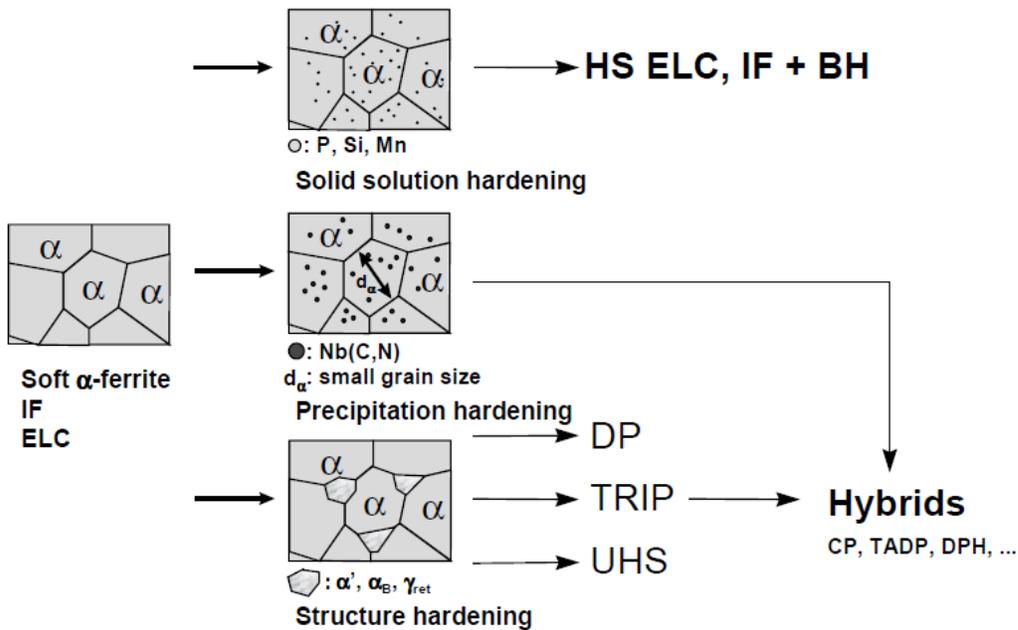


Figura 13: Meccanismi di miglioramento delle proprietà meccaniche in piastre di acciai basso legati per il settore automotive.

L'acciaio DP600 è uno dei materiali utilizzati nelle prove condotte presso il centro di Melfi. In Figura 14, le immagini riportano, per gli acciai DP, l'area di applicazione (a sinistra, curva resistenza a trazione in funzione dell'elongazione), uno schema della microstruttura (al centro), che è alla base delle caratteristiche meccaniche migliorate di questi acciai, e un confronto con gli acciai HSLA, 350/450 (a destra, curva sforzo-deformazione) [33].

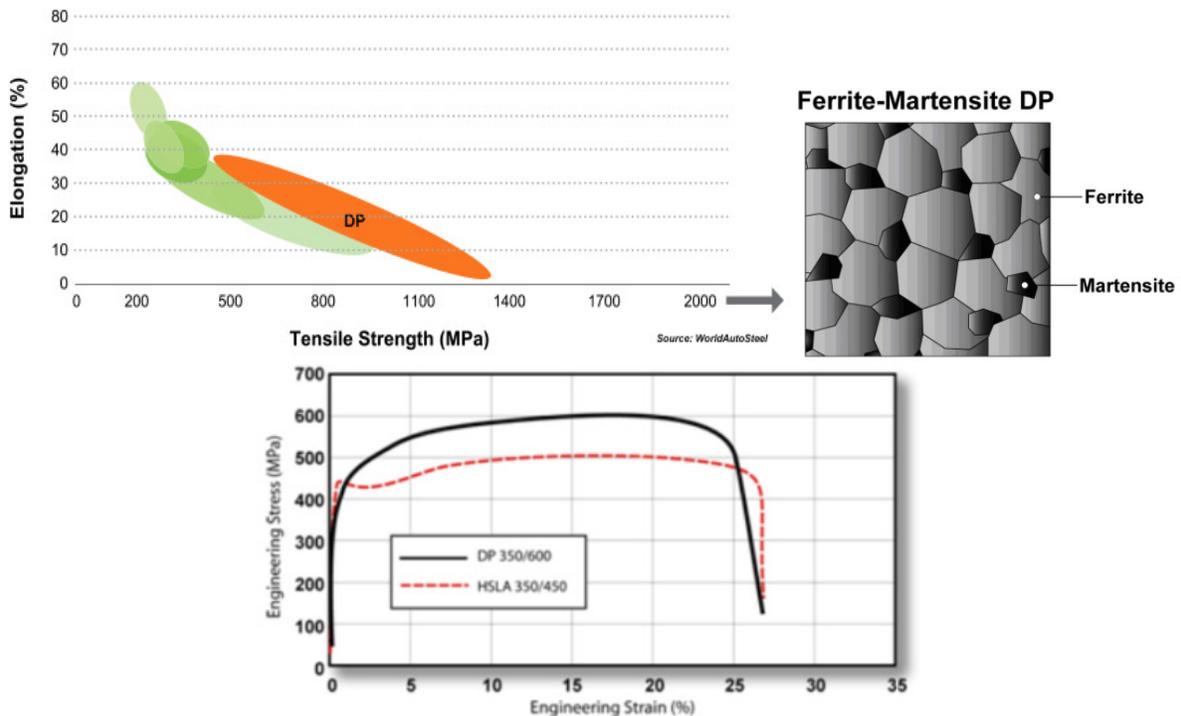


Figura 14: Le immagini riportano, per gli acciai DP l'area di applicazione (a sinistra, curva resistenza a trazione in funzione dell'elongazione), la microstruttura (al centro) che è alla base delle caratteristiche meccaniche migliorate, e un confronto con gli acciai HSLA, 350/450 (a destra, curva sforzo-deformazione) [33].

2.3.2 Leghe di alluminio

La densità dell'alluminio è circa un terzo di quella dell'acciaio (2.7 kg/m³), ma per un certo numero di parti è necessario incrementare lo spessore della lamiera per raggiungere le medesime caratteristiche di resistenza meccanica, secondo un fattore 1.5 circa (per applicazioni di lamiere con rigidità critica), per cui la riduzione di peso stimata sarebbe di circa il 50%. Naturalmente, la geometria del componente influisce sulle caratteristiche meccaniche. Per modelli di nicchia con telaio in alluminio la riduzione di peso è quantificabile in 30-40%, ovvero fra 70 e 140 kg, dipendentemente dalle dimensioni dell'auto [34].

Le auto moderne contengono circa 140 kg di alluminio. La Audi A8, la Jaguar XJ e la Range Rover hanno un contenuto di alluminio superiore a 500 kg. Uno studio pubblicato da Ducker Worldwide in collaborazione con la European Aluminium Association mostra che il contenuto di alluminio utilizzato per le auto prodotte in Europa fra il 1990 e il 2012 è triplicato, passando da 50 kg a 140 kg. Si ritiene che aumenterà fino a 160 kg entro il 2020 e fino a 180 kg se le automobili piccole e medie seguiranno la medesima evoluzione. Il modello si basa su un'analisi dettagliata che rappresenta un volume di produzione di 17 milioni di veicoli (2012). Si sta perciò assistendo a una riduzione nell'uso degli acciai a media resistenza e alla progressiva introduzione dell'alluminio per la fabbricazione di pezzi fusi per il treno motore, cofani, parafranghi anteriori, portiere, fascioni, cerchi, componenti prodotti mediante fusione, estrusione e forgiatura. L'acciaio, invece, è generalmente utilizzato per il telaio, le chiusure e lo chassis (scocca, treno motore, equipaggiamento interno, sospensioni, pannelli), in una percentuale del 49.5 secondo uno studio PSA, mentre la percentuale di alluminio è del 10.3% [35].

Per il 2025 il potenziale di riduzione del peso dei veicoli si stima in un massimo di 100 kg, mentre il costo del materiale dovrebbe aumentare da 2 a 3, e considerando l'impatto dell'investimento, si raggiungerebbe un target equivalente di 35 kg grazie ad un maggior utilizzo dell'alluminio nella scocca. Una stima della riduzione di peso nel settore automotive è riportata nella Figura 15.

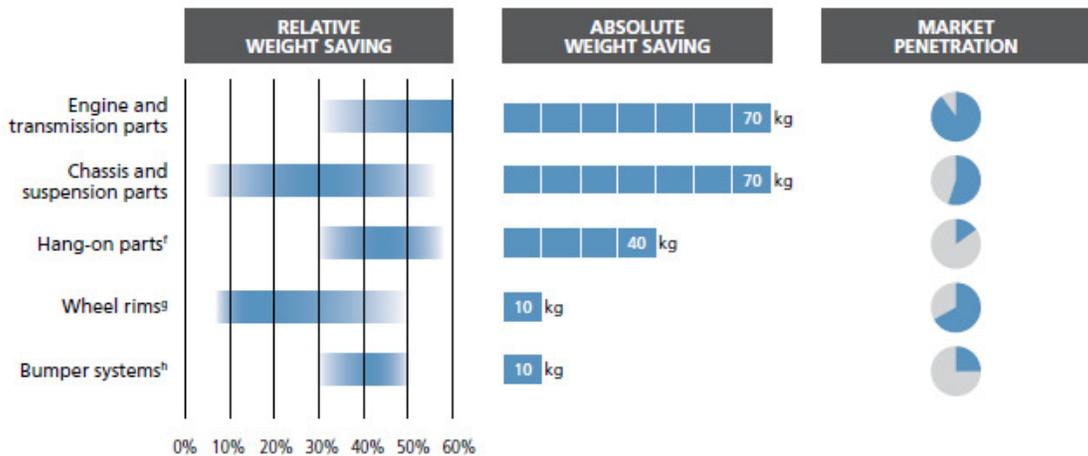


Figura 15: Riduzione di peso con maggiore impiego dell'alluminio e penetrazione nel mercato [5].

È importante poter ridurre il peso migliorando la rigidità e la resistenza al crash a costi ragionevoli, pertanto la via più promettente è seguire un approccio multi-materiale per il design dell'auto. La scelta di specifici materiali e loro combinazioni dipende dal target di costo e dal segmento di mercato del particolare veicolo.

La Figura 16 mostra la distribuzione dell'alluminio nella realizzazione di componenti per le automobili prodotte in Europa, mentre la Figura 17 mostra la distribuzione dell'alluminio nelle automobili europee.

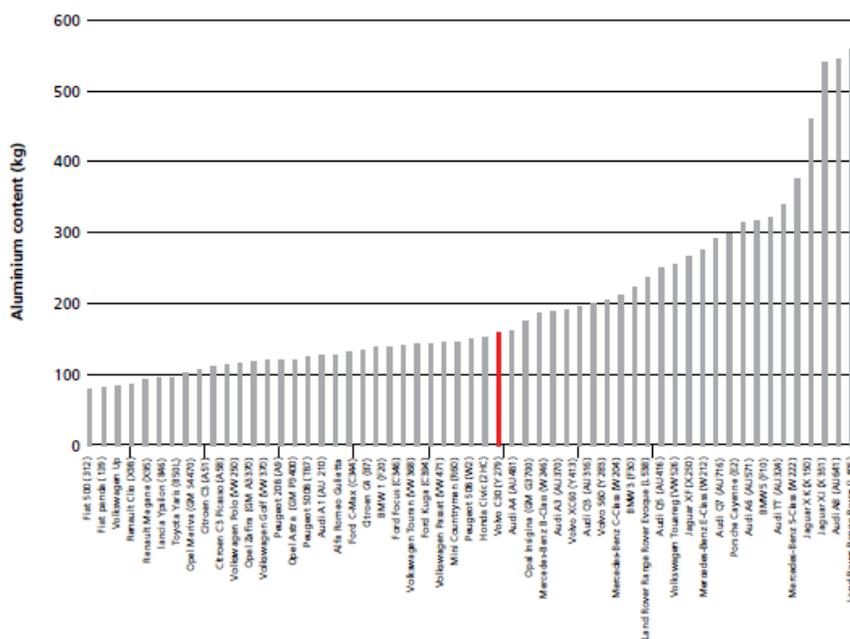


Figura 16: Contenuto di alluminio in alcune automobili prodotte in Europa [5].

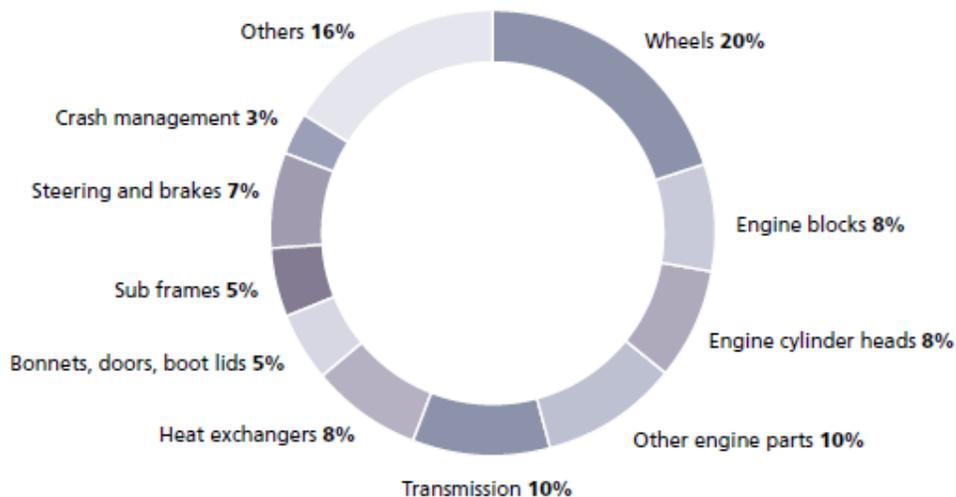


Figura 17: Distribuzione dell’alluminio nelle automobili europee [5].

2.3.3 Leghe di magnesio

Il magnesio è il metallo strutturale con la densità più bassa, $1,74 \text{ kg/m}^3$. Utilizzando il magnesio per la sostituzione di componenti si potrebbe arrivare a riduzioni del peso pari a circa il 60%. Attualmente l’utilizzo di leghe a base magnesio è intorno all’1% del peso totale dei veicoli. Il motivo per il quale il quantitativo di magnesio all’interno di veicoli è ancora così basso è dovuto al costo del materiale (circa l’87% del magnesio nel mondo è prodotto in Cina e questa fornisce il 94% di magnesio utilizzato in Europa [36]), bassa rigidità, difficoltà nel realizzare lastre a freddo, bassa duttilità dei componenti finiti e un numero limitato di leghe disponibili. Altri aspetti che rendono ancora difficile l’introduzione di questo tipo di leghe nel settore automobilistico sono: giunzioni di multi-materiali, corrosione, riparazione dei

componenti e riciclo. Attualmente il tasso di riciclo dei componenti in lega di magnesio dal settore automobilistico è molto basso, quasi nullo [37].

2.3.4 Compositi polimerici

I compositi polimerici non sono studio della presente attività, focalizzata sui materiali metallici, per questo motivo vengono di seguito riportate solamente alcune indicazioni generali.

I compositi polimerici, generalmente in fibra di carbonio, sono stati introdotti inizialmente nel settore dell'aviazione. Anche se con questo tipo di materiali si potrebbero ottenere drastiche riduzioni del peso di un veicolo, l'introduzione nel mercato automobilistico dei compositi in fibra è ancora limitato a causa degli alti costi, delle difficoltà nella realizzazione di giunzioni, della sicurezza e delle problematiche legate allo smaltimento a fine vita.

2.3.5 Materiali utilizzati nelle prove sperimentali

I materiali utilizzati nelle prove sperimentali sono riportati nella tabella seguente che contiene: il tipo di materiale, i trattamenti effettuati, le specifiche sulla composizione e le caratteristiche meccaniche:

Materiale	Test effettuato	Tipologia	Composizione %	Rm (N/mm ²)	Rp0,2 N/mm ²	A5%
Acciaio FeP04	Laser e MIG	Lamiera Stampaggio CR04 spessore 1.5 mm	C=0.010; Si=0.003; Mn=0.107; P=0.009; S=0.009; Al=0.050	279	162	43,7
Acciaio DP600	RSW	Lamiera Stampaggio Norma DPC330Y590T Spessore 1.5 mm	C=0.14; Mn max 2.1; Si max 0.4	624	411	22,0
Lega di alluminio AW6016-T4	RSW e Clinciatura	Norma EN AW6016-T4 Spessore 1.0 mm	Cu=0.0800; Si=1.0800; Mn=0.080; Mg=0.3600; Fe=0.1800; Zn=0.0200; Ti=0.0200; Cr=0.0100	217	106	22,0

Tabella 3: Materiali utilizzati per le prove sperimentali.

La piastra di acciaio DP della serie 600 utilizzata è stata laminata a freddo e da specifica presenta un limite di snervamento a 330 MPa e un carico di rottura pari a 590 MPa.

3 Caratterizzazione energetica sistema Laser LhyTe con testa remota Scanlab intelliWELD II FT e fibra 100 micron

Il CRF, ha una cella di saldatura Laser e Laser Arci presso i Laboratori del Campus Manufacturing di Melfi che riproduce fedelmente i sistemi normalmente utilizzati in produzione.

In particolare uno dei sistemi utilizzati è costituito da un Robot COMAU con carico di polso di 160 kg capace di inter cambiare testa di saldatura e potendo così investigare processi di saldatura diversi.

La saldatura laser remota con testa Scan Lab intelliweld è utilizzata nella giunzione ad elevata velocità con piccoli tratti di saldatura ad esempio di parti di carrozzeria (portiere, cofani ecc.); in questo caso il processo avviene a distanza con il robot quasi fermo e il sistema scanner a movimentare il fascio entro un area di lavoro di circa 1 mq. Lo stesso Robot può utilizzare una testa di saldatura MIG o una testa di saldatura laser arco per processi ibridi.

In questo paragrafo saranno descritte le attività e i risultati riferiti alla valutazione energetica quantitativa e qualitativa della sorgente comprensiva del percorso ottico e la valutazione del FEE del processo standard di saldatura laser.

Nella prima fase è stato essenzialmente monitorato il consumo energetico della sorgente laser Comau LHYTE NIR, in modalità lavoro "fibra", mediante rilevamento dell'energia assorbita dalla rete con sistema di misura master Fluke 1738 collegato all'armadio elettrico della sorgente e rilevando la misura di potenza reale in uscita dalla testa scanner (per cui comprensiva del percorso ottico di fibra e collimatore) con calorimetro Primes Power Monitor PM48. Tale strumento ha i limiti operativi seguenti: diametro fascio <32 mm, potenza < 8 kW, intensità < 15 kW/cm². La **Figura 18** riporta il set up adottato per il rilievo della potenza.

La testa di focalizzazione intelliWELD II FT, obiettivo F-Theta, $f = 460$ mm ha una distanza nominale di tiro (A') di 541 mm con possibilità di variare la posizione z di +/- 70mm.

La **Figura 19** mostra lo schema della testa di saldatura remota.

In funzione di questi dati di targa è stato definito il set up in modo che il fascio laser defocalizzato venisse raccolto in modo completo nel calorimetro. La verifica sperimentale è avvenuta anche mediante l'impiego di rilievi termografici che hanno evidenziato assenza di riscaldamenti sul PM48.

La prima parte delle misure è stata mirata alla valutazione quantitativa dell'efficienza energetica della Sorgente laser Compatta effettuando rilievi impostando la percentuale di potenza nominale massima a partire dal 15% a step di 5% con durate della misura di 30 secondi.

La **Figura 20** sintetizza le misure effettuate. Dalle misure è risultato che, tra la potenza impostata e quella effettiva (in uscita dalla testa di focalizzazione) c'è una differenza che cresce col valore nominale richiesto, passando da 270 W (al 15% di regolazione) a 800 W (al 100%): di questo si deve tener conto nella valutazione dell'efficienza energetica della sorgente.

L'andamento della potenza utile è abbastanza lineare fino a 2 kW utili circa per poi divergere (saturazione).

La causa di tale comportamento non è nota anche se vi sono indizi, dall'esame delle caustiche di focalizzazione che saranno presentate più avanti, della presenza di ottiche interne in condizioni non ottimali, nel collimatore. L'ottica della testa di focalizzazione è stata infatti sostituita con una nuova prima dell'inizio dei test.

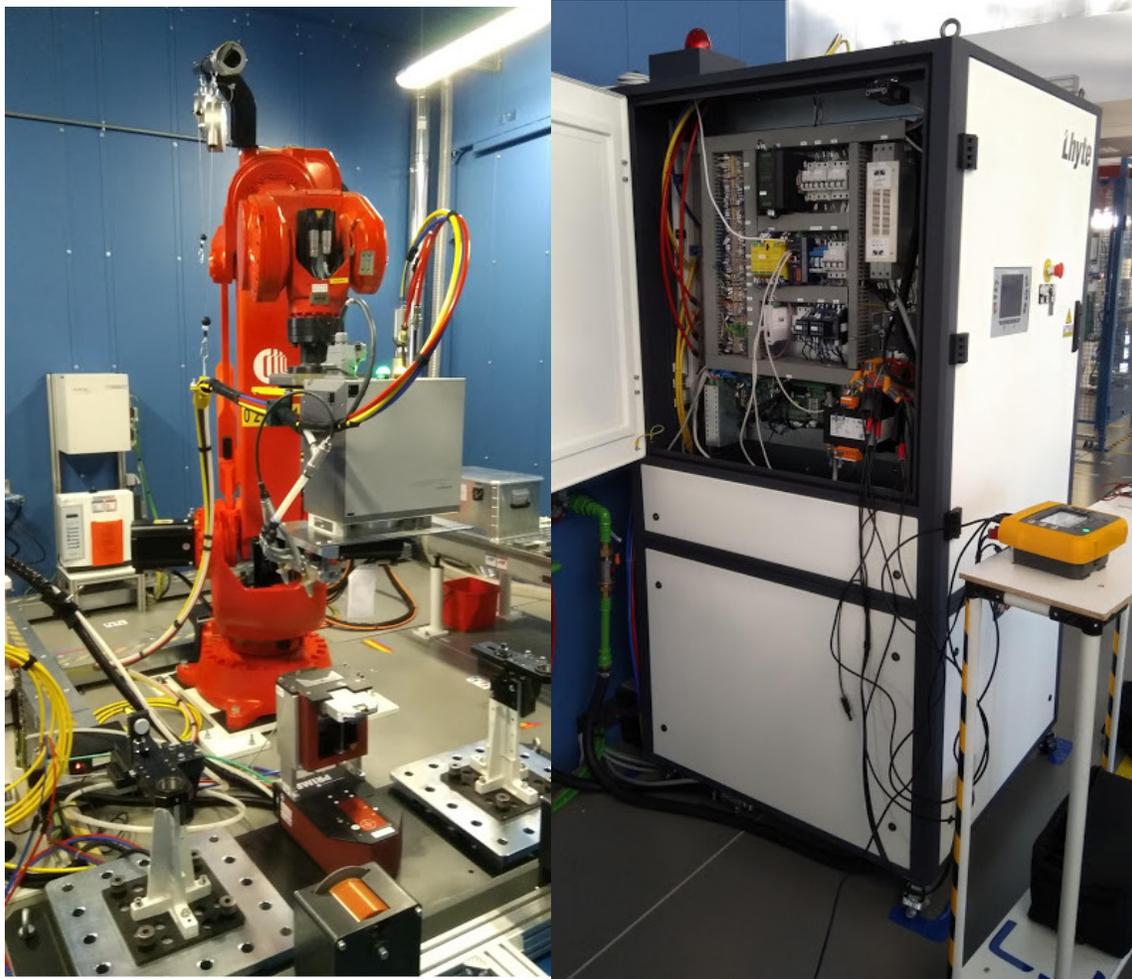


Figura 18: Sistema di saldatura laser con testa scanner remota e set di misura di efficienza energetica del sistema. A dx la sorgente laser compatta LyTe da 3500 W nominali; a sn il robot con testa scanner per saldatura remota, in basso il sistema PRIMES per la caratterizzazione del fascio.

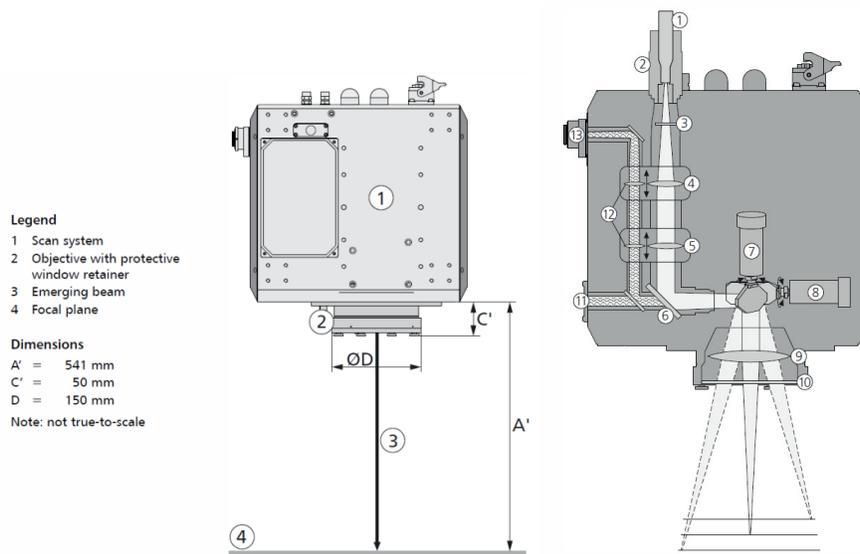


Figura 19: Schema della testa di saldatura remota Scanlab Intelliweld.

regolazione (%)	pannello macchina (W)	power monitor (W)
15	530	260
20	705	423
25	880	578
30	1054	745
35	1230	918
40	1403	1090
45	1578	1260
50	1753	1430
55	1928	1608
60	2104	1750
65	2278	1900
70	2453	2050
75	2628	2180
80	2802	2310
85	2977	2440
90	3152	2540
95	3327	2610
100	3503	2700

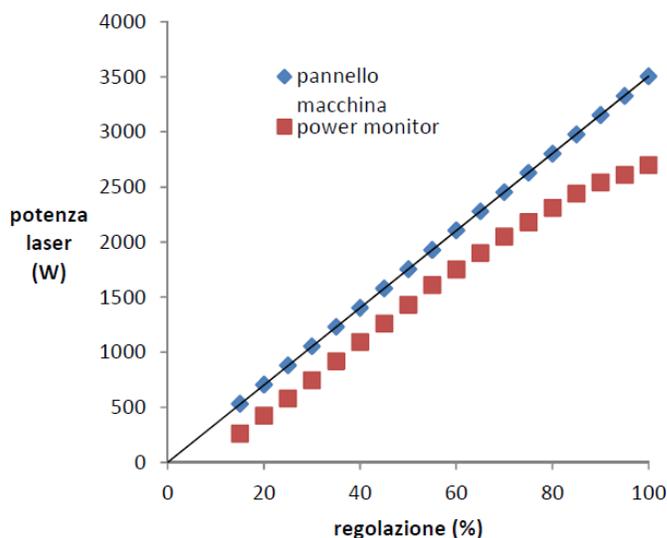


Figura 20: Confronto tra lettura a pannello e misura reale mediante calorimetro PM 48.

In parallelo alle misurazioni della potenza laser sono stati registrati i consumi energetici (a eccezione della porzione di raffreddamento secondario in quanto avviene con sistema centralizzato).

Il grafico seguente contiene la potenza utile e quella assorbita dalla rete, misurata con analizzatore Fluke 1738 (P assorbita in blu) confrontata con la potenza utile sul pezzo misurata con il calorimetro (curva rossa).

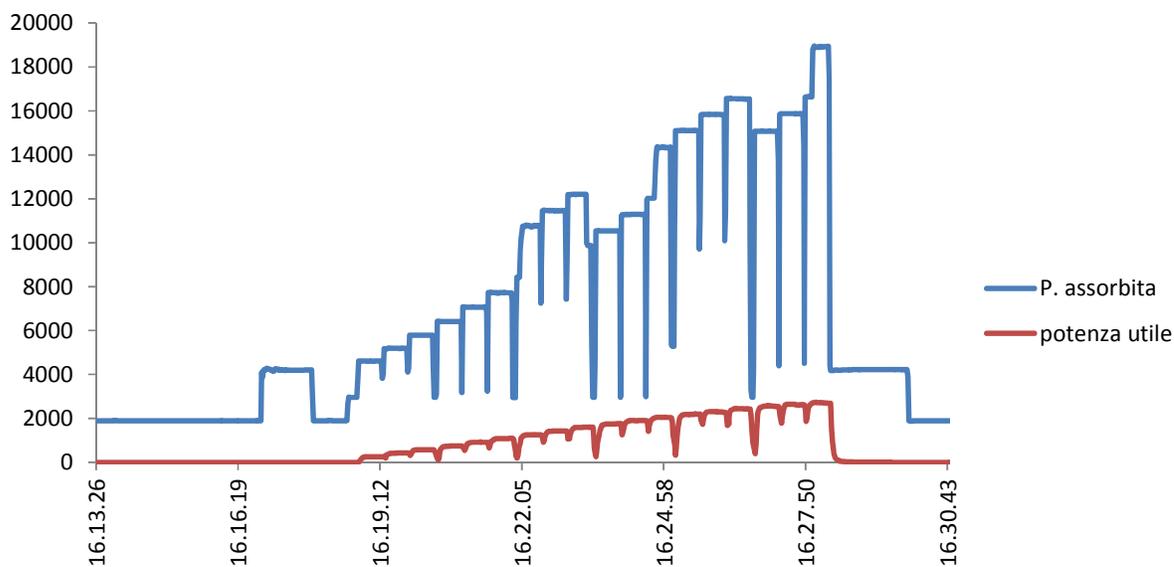


Figura 21: andamento dell'assorbimento della rete al variare della potenza laser utile durante l'esecuzione della curva di potenza.

L'assorbimento ha una base di 1,9 kW ed è nel complesso proporzionale all'uscita con degli scarti di 2,3 kW dovuti all'intervento di ausiliari per il raffreddamento. Si può notare già prima dell'inizio della rampa un temporaneo incremento dal valore base a 4,2 kW. Al momento del test la sorgente era già attiva da 2 ore e tutto il diagramma della potenza assorbita contiene questi transitori che si addensano in corrispondenza dei momenti di effettivo utilizzo.

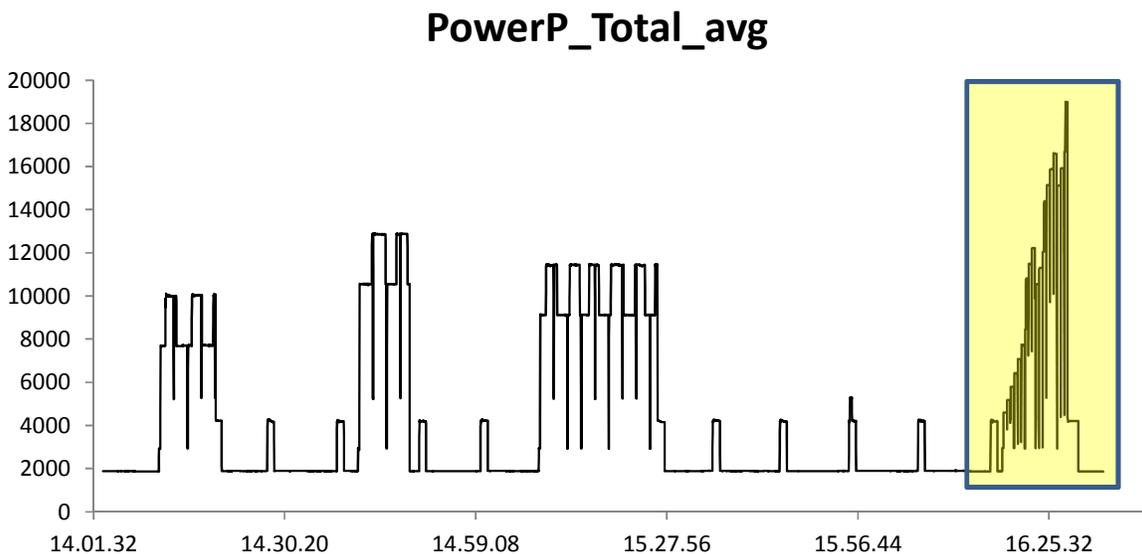


Figura 22: Lettura complessiva della potenza istantanea misurata con Fluke 1738 durante tutte le prove. Evidenziata la porzione corrispondente alle fasi di misura della curva di potenza dal 15 al 100%.

Il grafico del consumo tal quale mostra una dispersione che si riduce scontando dell'aliquota 2,3 kW i punti opportuni: la curva continua mostra quindi la potenza richiesta dall'emissione laser solamente.

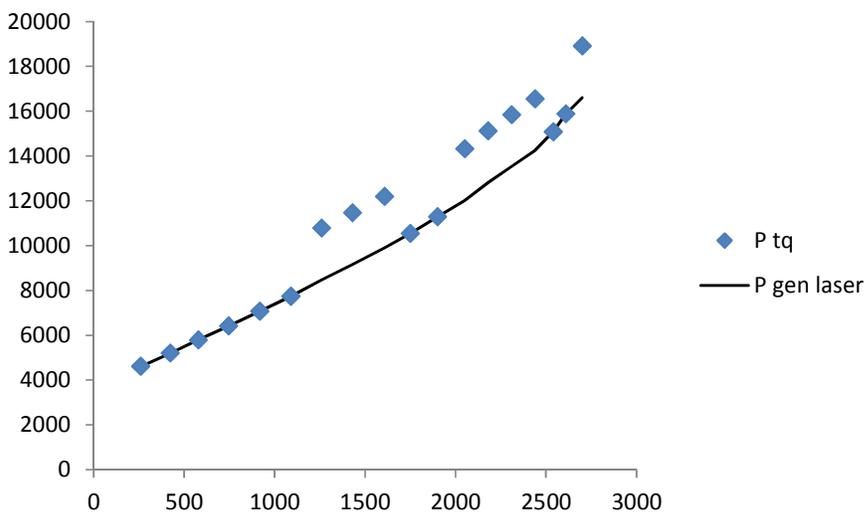


Figura 23: Analisi del comportamento energetico della sorgente laser con discriminazione della curva di assorbimento della sola generazione laser in funzione della potenza effettivamente erogata.

Per valutare il rendimento sono stati considerati i dati fino alla potenza utile di 2 kW circa, che sono più rappresentativi del normale funzionamento della macchina. La **Figura 24** mostra sull'asse x i valori della potenza legata all'emissione laser al netto della potenza assorbita dall'apparato in assenza di emissioni di radiazione e in ordinata la potenza utile misurata sul PM. La pendenza della retta di compenso è del 24%

circa ma non è il rendimento reale in quanto è comunque presente un'aliquota base di consumo pari a 3 kW circa.

P.utile

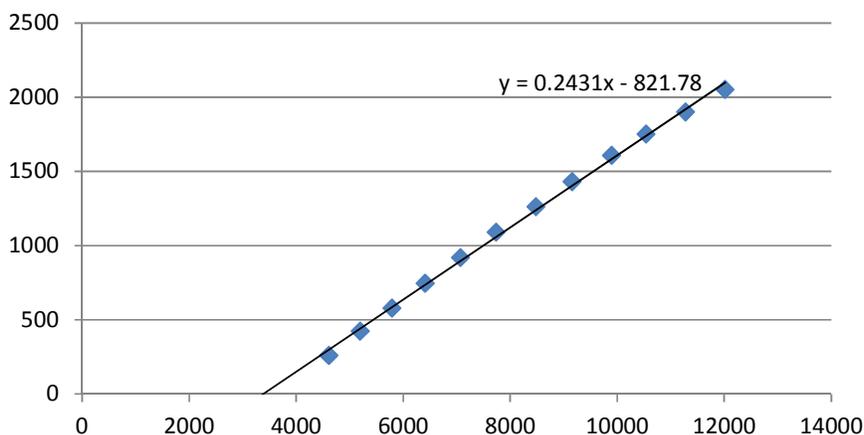


Figura 24: Curva potenza utile vs potenza assorbita. La pendenza definisce il rendimento della sorgente laser apparente (rendimento elettro ottico netto).

Per valutare il rendimento effettivo, tenendo conto anche degli ausiliari, si consideri l'energia consumata e quella utile. Il consumo nell'intervallo 16:18:29 – 16:28:23 è stato di 1,74 kWh pari a 6250 kJ. L'energia laser utile è invece 861 kJ e il rendimento totale è pari al 14%. Tale valore può considerarsi rappresentativo di un utilizzo a livelli diversi di potenza; se il laser è invece utilizzato costantemente a potenza prossima alla nominale il rendimento medio sarà maggiore come è normale aspettarsi. Il grafico seguente mostra il riassunto dei rendimenti misurati nel corso della prova.

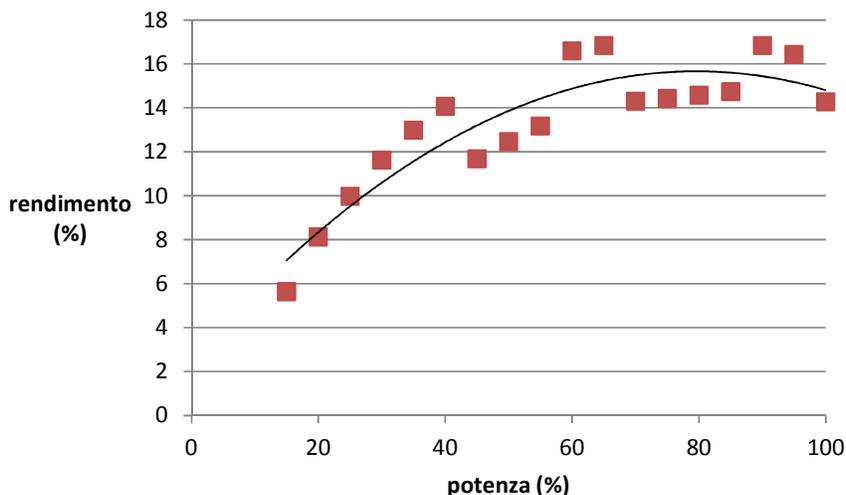


Figura 25: Andamento del rendimento reale (sia sorgente che percorso ottico) in funzione della percentuale di potenza nominale impostata.

All'analisi quantitativa è stata associata l'analisi qualitativa del fascio effettuata misurando la caustica del fascio a tre livelli di potenza: 1000, 1450 e 1730 W.

Nella figura seguente sono mostrati alcuni dei profili (caustiche del fascio) bidimensionali e tridimensionali.

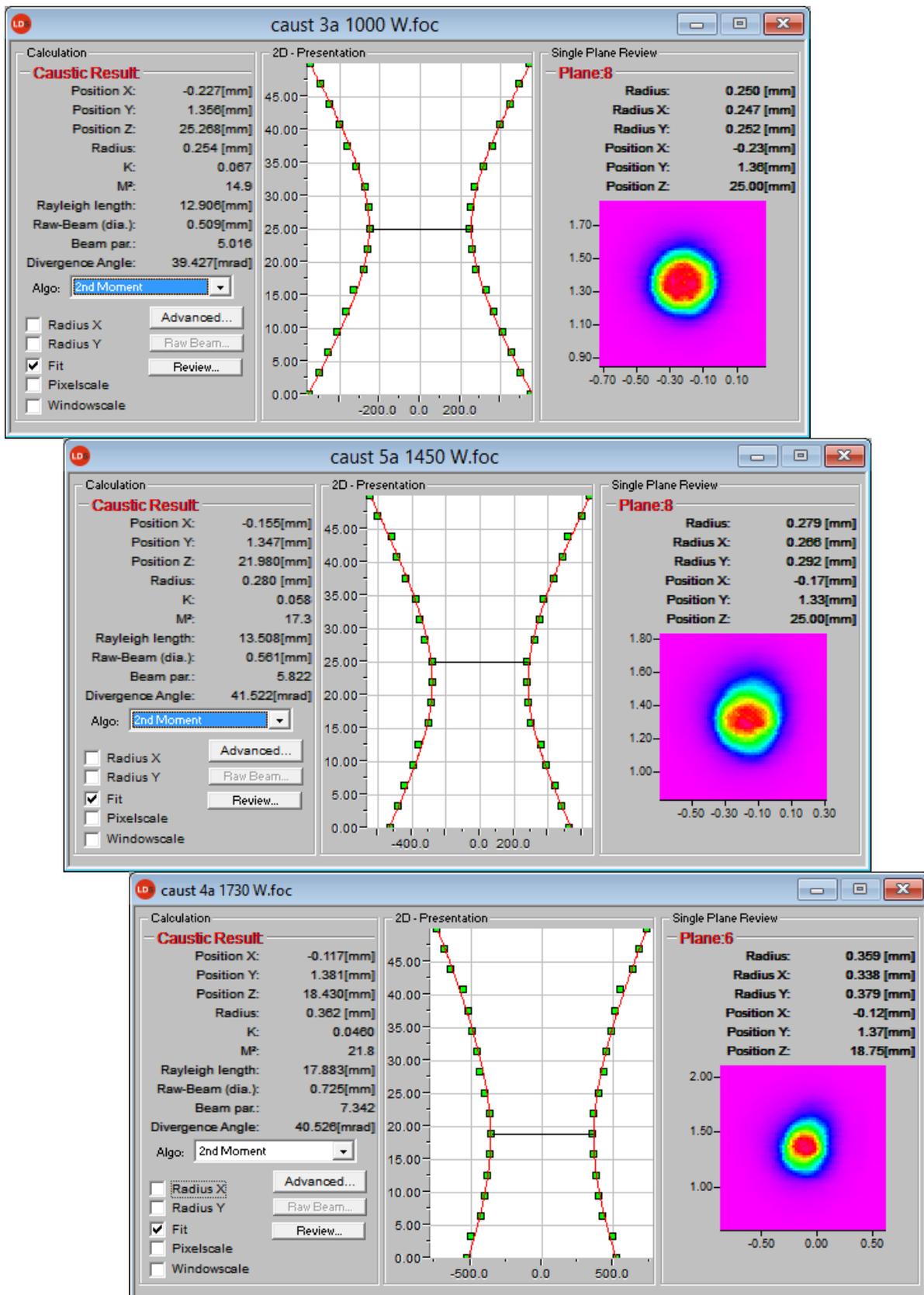


Figura 26: focalizzazione a diverse potenze (1,0, 1,45 e 1,73 kW).

A 1000 W la posizione nominale del fuoco risulta a circa 25 mm dal piano di riferimento del Focus Monitor, con un diametro del fascio di 0,508 mm e un BPP di circa 5; a 1,45 kW la posizione focale passa a circa 21 mm ed il diametro del fascio cresce a 0,560 mm con un peggioramento del BPP che è maggiore di 5,8 mm/mrad; l'ulteriore incremento di potenza induce un'ulteriore variazione del fuoco che scende sotto i 18 mm con un diametro del fascio di 0,724 mm ed un BPP maggiore di 7 mm/mrad. La figura seguente sintetizza l'andamento di BPP e posizione focale.

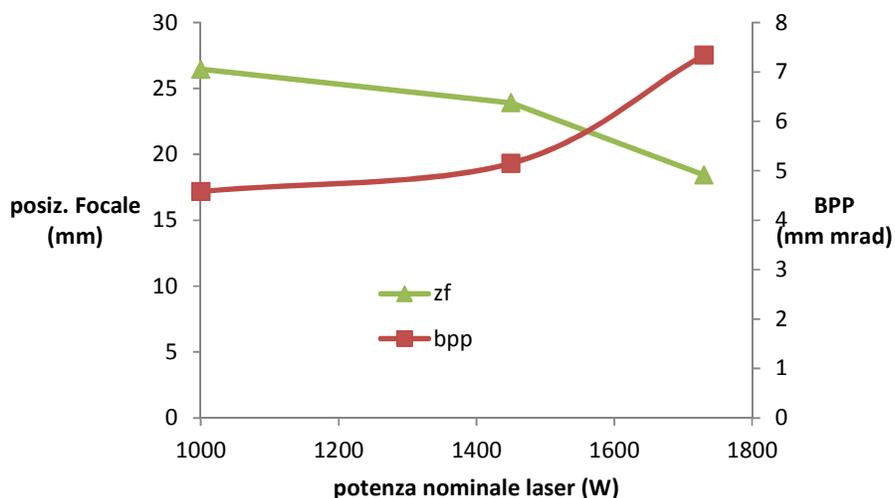


Figura 27: variazione di parametri qualitativi principali del fascio laser al variare della potenza.

Per quanto la profondità di campo Zf si mantenga superiore a 12 mm, l'incremento della reale dimensione dello spot focale induce una riduzione della densità di potenza della metà fra 1000 e 1730 W; questo, se può essere ben tollerato nella saldature dell'acciaio, può provocare problemi di innesco e riflessione nella saldatura delle leghe di alluminio che con tale sorgente e sistema ottico probabilmente non possono essere saldate in quanto non si riesce a raggiungere una potenza di soglia sufficiente.

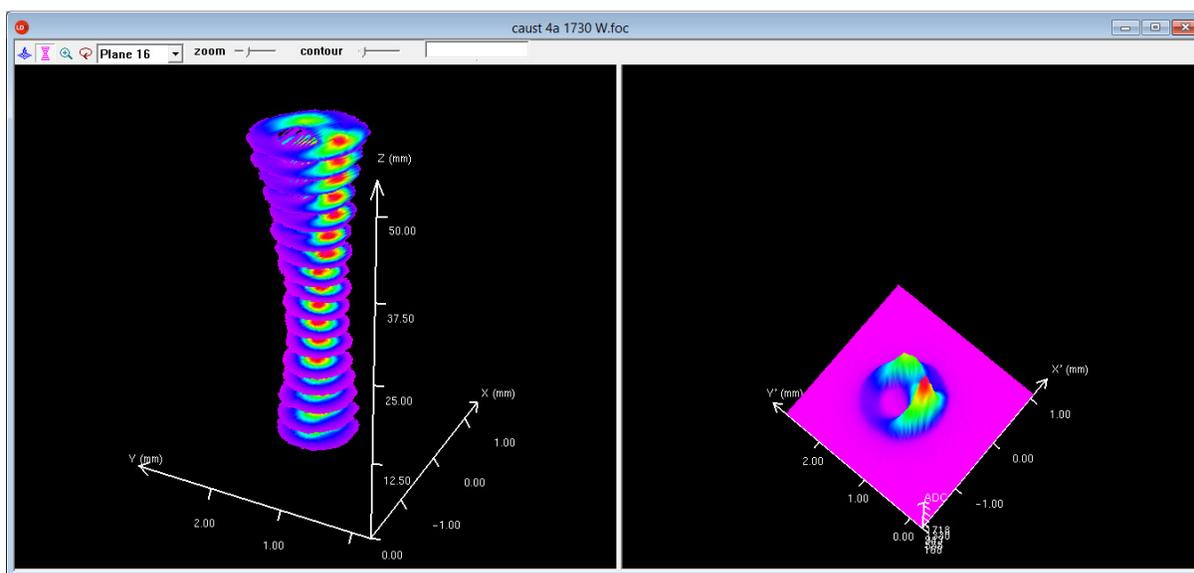


Figura 28: vista d'insieme della caustica a 1730 W. Profilo del fascio tipico di problemi di contaminazione a livello del collimatore.

La caustica 3D mette bene in evidenza la presenza di un “foro” di potenza nel fascio che è tipico di problemi di allineamento e sporcamento del sistema di collimazione che giustificherebbero anche la notevole differenza fra potenza realmente erogata e potenza letta al pannello della macchina che alla potenza nominale massima raggiunge il 20% mentre in un sistema efficiente non dovrebbe superare anche con testa remota e specchi galvanometrici il 3-5%.

I dati di targa di questa sorgente sono riportati nella tabella seguente.

Technical data	Hybrid	
	Fiber	Diode
Optical specifications		
Laser	DL-XX4F	DL-6DXX
Max. output power	4000 W	6000 W
Beam quality	4 mm * mrad	66 mm * mrad
Optical fiber, min.	100 µm, NA 0.22	600 µm, NA 0.22
Power stability	max +/- 2% (over 8h @ Pnom)	
Reaction time	>100 µs CNC >100 ms fieldbus	
Wavelength range	920 nm - 1070 nm	
Pilot laser	635 nm, class II	
Mechanical specifications		
Weight	approx. 900 kg (chiller included)	
Dimensions	960x990x2050 mm (chiller included)	
Connection data		
Voltage	400-480 V, 3 phase, PE, 50 or 60 Hz	
Power connector	CEE 32 A - 6h	
Power consumption	27,6 kW	

Tabella 4: Dati di targa del lase LhYte [https://www.comau.com/Download/our-competences/robotics/Automation_Products/Comau_LHYTE_Brochure_EN.pdf]

Ipotizzando che l’assorbimento dichiarato sia riferito alla massima potenza il rendimento dell’apparecchiatura in condizioni ottimali dovrebbe essere di circa il 16% nel funzionamento analizzato di laser in fibra, dato in linea con il valore misurato del 14%.

3.1 Analisi Termografiche

Durante le prove di diagnostica sulla sorgente sono stati effettuati rilievi termografici per individuare eventuali anomalie e a supporto della definizione del miglior set up.

In particolare sono stati monitorati:

- l’armadio elettrico della sorgente laser;
- l’armadio elettrico della movimentazione del robot;
- il sistema di diagnosi del fascio laser (Power Monitor e Focus Monitor);
- la testa laser;
- la base Chiller interno del lase LhYTE;
- I tubi di raffreddamento del circuito generale

Nelle immagini seguenti sono mostrate, come esempio, alcune delle acquisizioni effettuate durante le prove.

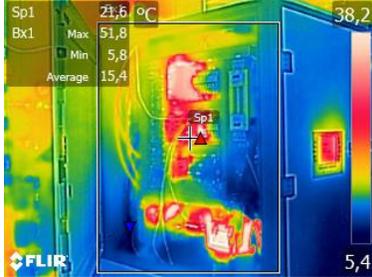
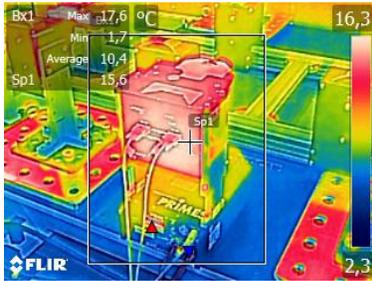
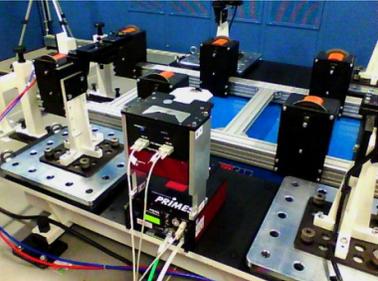
<p>Armadio Laser</p>		
<p>Armadio Movimentazione braccio antropomorfo COMAU</p>		
<p>Misuratore potenza Laser PRIMES</p>		

Tabella 5 Immagini termiche e visibili dei dispositivi utilizzati durante le prove laser.

<p>Testa Laser</p>		
<p>Chiller</p>		
<p>Tubi di raffreddamento</p>		

Tabella 6 Immagini termiche e visibili dei dispositivi utilizzati durante le prove laser.

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature massime registrate in funzione della percentuale di potenza di prova impostata.

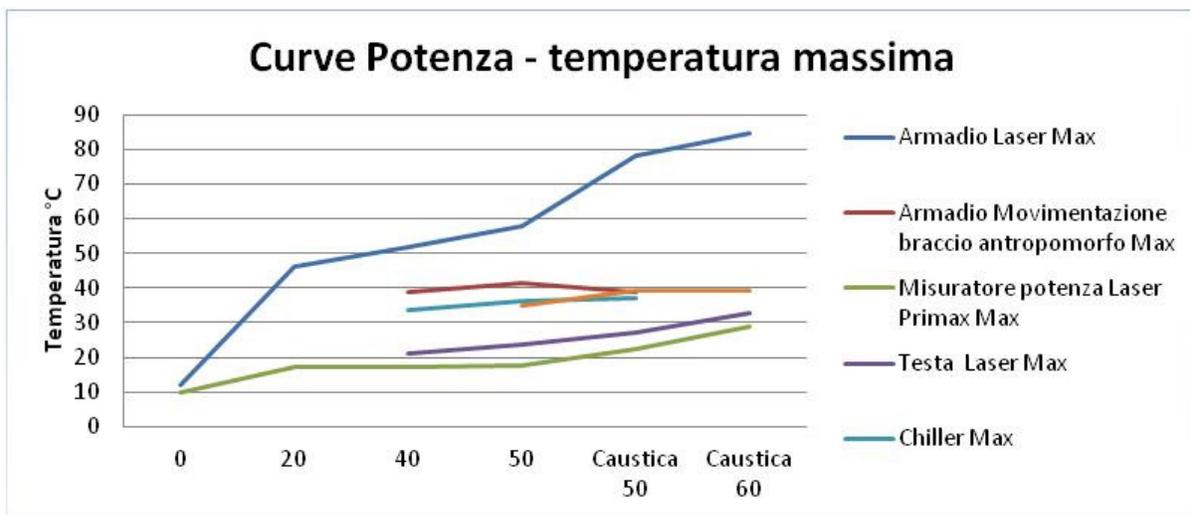


Figura 29 Grafico relazione potenza temperatura dei dispositivi.

Nella tabella seguente i dati numerici.

Potenza	0	20	40	50	Caustica 50	Caustica 60
Armadio Laser Max	12,1	46,2	51,8	57,8	78,0	84,8
Min	7,8	6,9	5,8	9,9	13,7	14,9
Media	9,2	11,8	15,4	20,8	27,5	28,1
Armadio Movimentazione braccio antropomorfo Max			39,0	41,6	38,8	
Min			10,4	19,3	19,1	
Media			18,4	27,3	27,9	
Misuratore potenza Laser Primax Max	9,9	17,2	17,1	17,6	22,5	29,0
Min	7,4	2,9	5,6	1,7	5,8	5,4
Media	8,4	9,1	10,9	10,4	15,1	17,3
Testa Laser Max	17,1		21,1	23,9	27,1	32,9
Min	5,4		8,7	10,9	12,2	16,6
Media	10,7		15,5	18,0	20,0	21,8
Chiller Max			33,8	36,1	37,3	
Min			12,6	13,7	15,8	
Media			20,6	20,6	23,3	
Tubi di raffreddamento Max				35,0	39,3	39,2
Min				11,0	15,1	12,2
Media				17,4	22,3	20,3

Tabella 7 Temperature (°C) alle diverse potenze.

I rilievi termografici mostrano come l'incremento di temperatura con l'utilizzo sia evidente sul Power monitor ma limitato fra i 18 e i 29 ° C che considerato un flusso di acqua non del tutto ottimale è del tutto giustificabile in quanto ha il ruolo di smaltire il calore. E molto evidente sull'armadio della Sorgente ed arriva a temperatura superiori a 80° C cosa non giustificabile visto che il sistema è raffreddato e quindi è uno degli elementi che va investigato per trovare le cause delle anomalie in termini di potenza utile e peggioramento della qualità del fascio; ad esempio potrebbe essere sporco o disallineato il collimatore in fibra del fascio. Altro riscaldamento leggermente anomalo è quello della testa scanner che passa da circa 17 ° C a 32,9 ° C con l'utilizzo.

3.2 Valutazione del FEE sul processo tipo di saldatura laser di lamiere in sovrapposizione di acciaio FeP04

Sono state saldate coppie di lamiere in Fe P04, sp. 1,5 mm, giunto a sovrapposizione, con i parametri seguenti.

V (mm/s)	P (W)	Fuoco (mm)	Gas	Gap (mm)
20	2700	0	No	0,1
				0
				0,2

Tabella 8: Riepilogo dei parametri di saldatura laser su FeP04

Le tre prove sono state effettuate con parametri energetici identici mentre è stato modificato il set up inerente il sistema di clamping per simulare differenti condizioni di saldatura relativamente al GAP (vuoto fra le lamiere).

La potenza assorbita dalla rete dal laser (vedi prove precedenti) è pari a 17,75 kW ($2,7/17,75 = \eta = 15\%$). Il robot che trasporta la testa di focalizzazione ha un assorbimento di circa 450 W circa durante la saldatura e di circa 120 W in stand by.

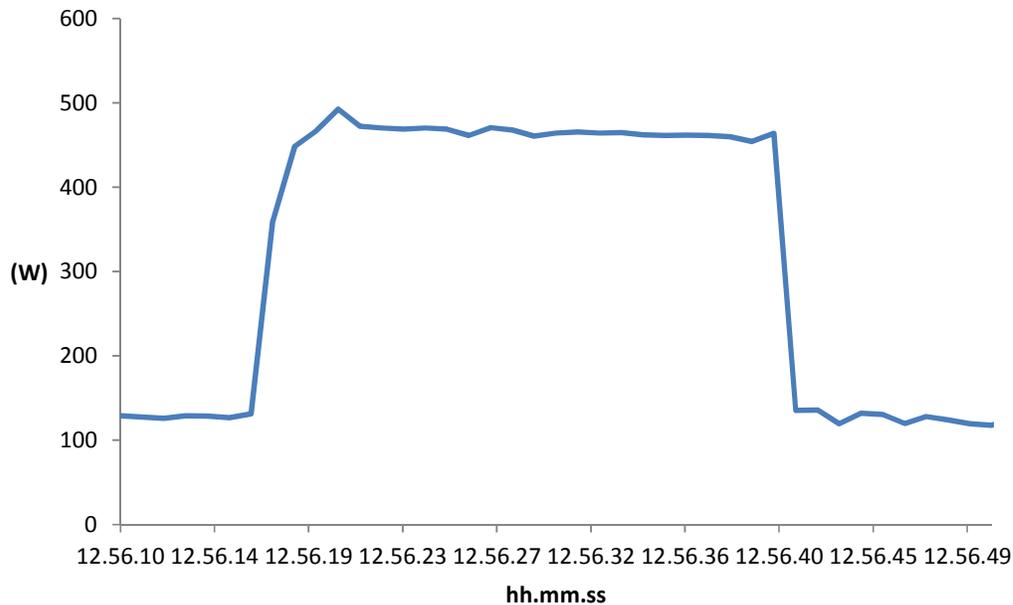


Figura 30: Grafico di assorbimento del robot durante il processo di saldatura laser

Prendendo come dimensione della sezione resistente la larghezza della zona fusa (b) il fattore di efficienza³⁸ (cfr. pag. 45) è valutato:

$$FEE = 20 * b / (17,75 + 0,45) = 1,10 b$$

La tabella seguente riepiloga i risultati della saldatura in differenti condizioni di clamping.

In linea generale si osserva come il parametro utilizzato in produzione (corrispondente a L1) permette di avere il FFE maggiore. La saldatura con GAP controllato, oltre a permettere che lo Zinco superficiale evaporato fuoriesca senza generare porosità, permette di incrementare di circa il 15% "b" perseguendo il maggiore FEE.

Va considerato che il FEE potrebbe essere ulteriormente incrementato se si utilizzassero sorgenti laser più performanti dal punto di vista del rendimento energetico. Le caratterizzazioni di altri produttori di sorgenti a stato solido, riportate nei rapporti RdS/PAR2016/097 e RdS/PAR2017/004 mostrano infatti come il rendimento sia mediamente il 25% con picchi del 35% che consentirebbero quindi FEE circa doppi rispetto a quanto misurato.

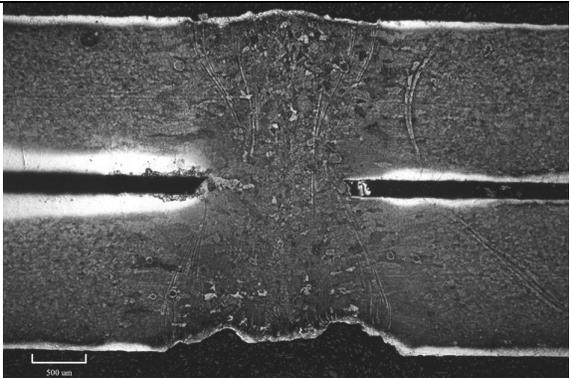
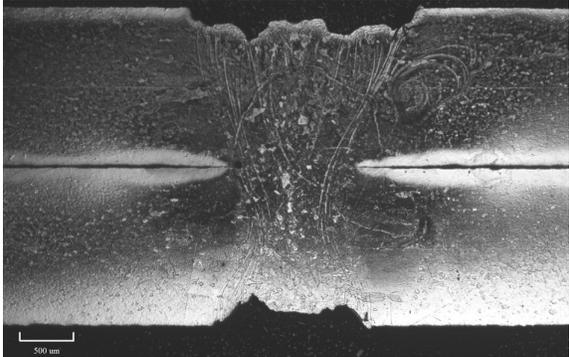
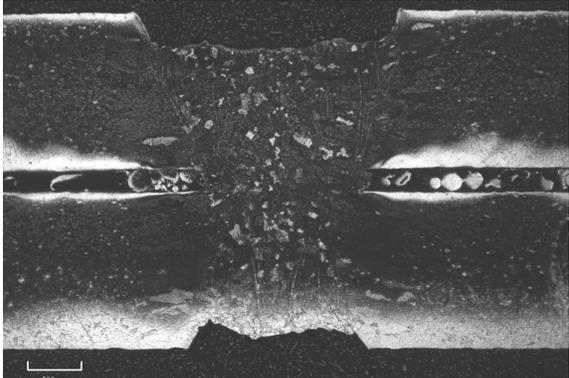
ID	GAP	AREA [mm ²]	B [mm]	FEE (mm ² /kJ)	Sezione Macrografica
L1	0,1	4,36	1,32	1,45	
L2	0	3,34	1,15	1,27	
L3	0,2	4,25	1,34	1,47	

Tabella 9: Riepilogo efficienza energetica di saldature laser su FeP04 con laser Lhyte

4 Prove saldatura mediante MIG

Le prove di saldatura MIG sono state effettuate con generatore Fronius TransPlus Synergic 5000. È un generatore multi processo TIG/MIG/MAG e SMAW. La figura seguente mostra il generatore in configurazione MIG con il BOX Ecoweld per l'acquisizione dei consumi energetici durante il processo di saldatura.



Figura 31: Generatore MIG Fronius per saldobrasature in sovrapposizione.

L'acquisizione dati fa uso dei dispositivi Ecoweld (per il generatore) e Fluke 1730 (per il robot). Sono state eseguite 3 saldature su lamiere in Fe P04, spessore 1,5 mm. Giunto a sovrapposizione. Materiale d'apporto G3Si1, diam. 1 mm.

Parametri

Velocità (m/min)	Corrente (A)	Tensione (V)	V filo (m/min)	flusso Ar (l/min)
0,48	137	20,5	5	12,5

Tabella 10: Riepilogo dei parametri di saldatura MIG su FeP04

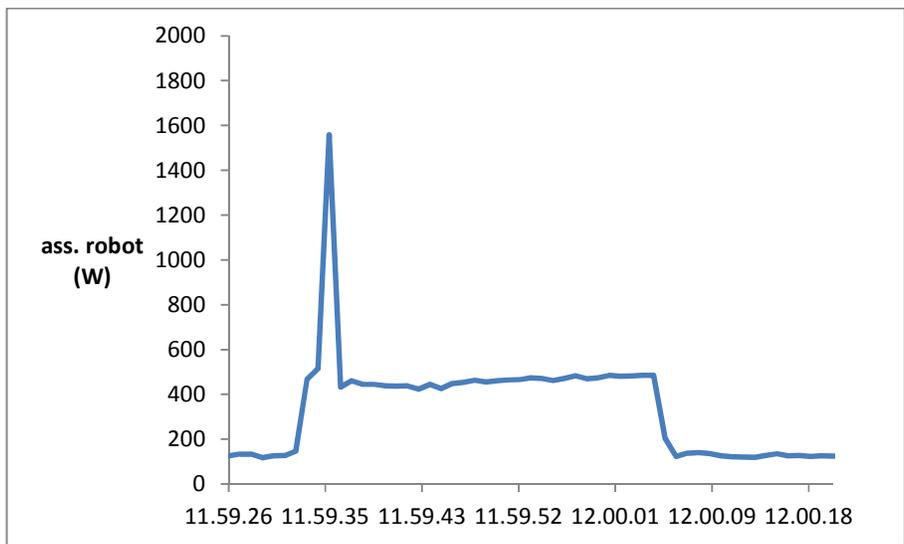


Figura 32: Grafico di assorbimento del robot durante il processo di saldatura MIG

Per una singola prova il consumo del robot ammonta a 4,7 Wh=16,9 kJ. La potenza media è 450 W, mentre il picco di potenza massima iniziale è dovuto al movimento di avvicinamento.

I dati relativi al generatore MIG sono acquisiti dal dispositivo Ecoweld. La potenza in ingresso ha l'andamento del grafico seguente. Il valore medio durante la saldatura è di 3800 W circa mentre l'assorbimento durante lo stand-by è di 650 W circa.

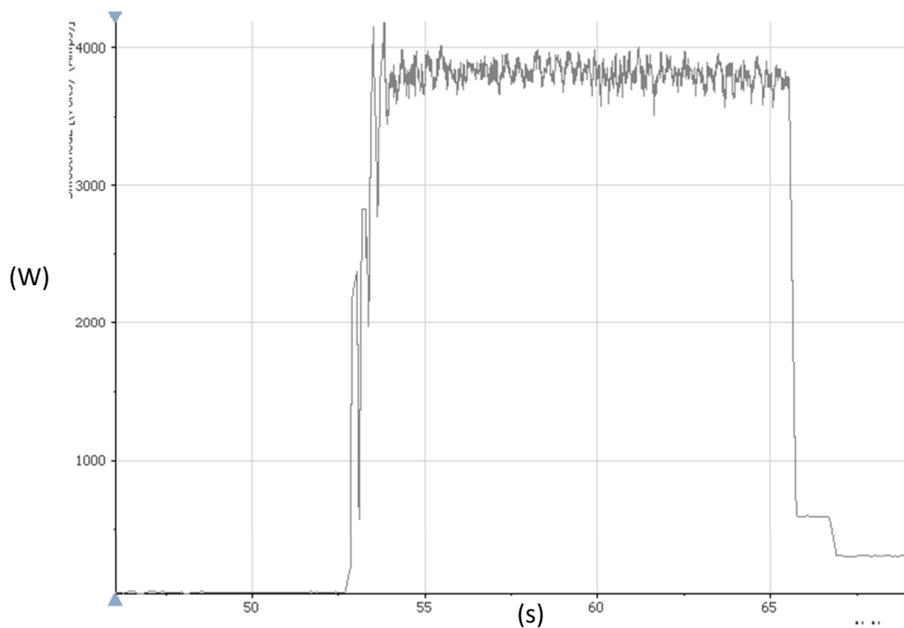


Figura 33: Grafico di assorbimento del generatore di saldatura MIG

Le grandezze relative all'arco sono state registrate con lo stesso dispositivo: il grafico seguente mostra l'andamento della tensione d'arco.

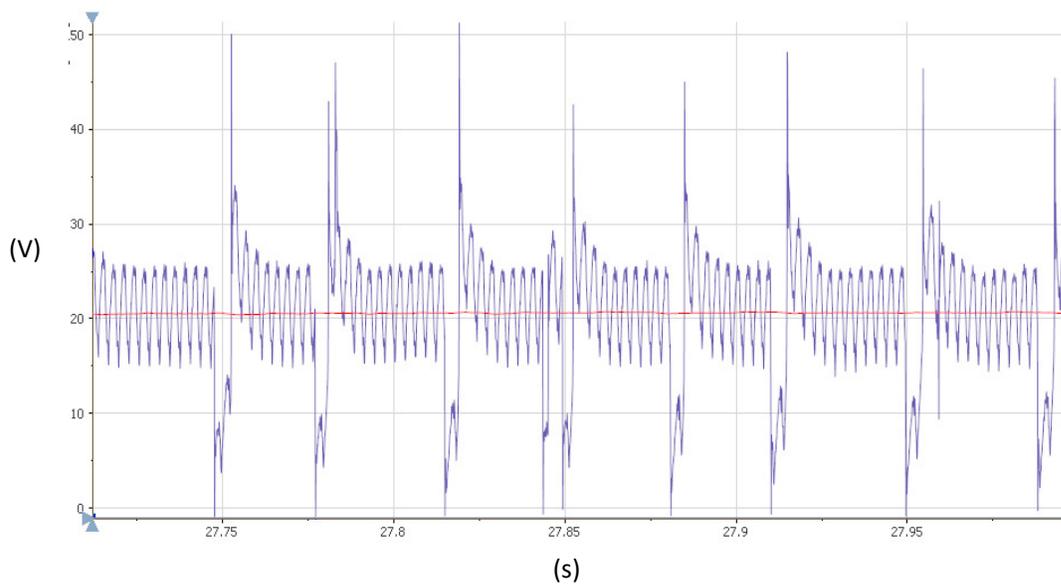


Figura 34: Grafico di tensione registrata sulla pinza.

La forma d'onda presenta oscillazioni di frequenza base 30 Hz circa dovute alla modalità di trasferimento in atto ma il valore medio è sensibilmente vicino a quello impostato (20,5 V).



Figura 35: Valori rilevati a pannello durante la saldatura.

Per la stima del rendimento del generatore MIG si possono utilizzare i valori medi di corrente 137 A e tensione 20,5 V. La potenza utile media è quindi 2810 W; il rendimento istantaneo è 74 %. Da osservare come da dati di targa, l'efficienza dichiarata, misurata nelle condizioni di massima corrente di esercizio è pari al 90% (vedi tabella seguente).

Cos phi	0.99		
Efficiency	90 %		
Welding current range	MIG/MAG	3 - 500 A	
	Rod electrode	10 - 500 A	
	TIG	3 - 500 A	
Welding current at	10 min / 40 °C (104 °F)	40 % d.c. ²⁾	500 A
		60 % d.c. ²⁾	450 A
		100% d.c. ²⁾	360 A
Welding voltage range according to standard characteristic	MIG/MAG	14.2 - 39.0 V	
	Rod electrode	20.4 - 40.0 V	
	TIG	10.1 - 30.0 V	
Max. welding voltage	49.2 V		
Open circuit voltage	70 V		

Tabella 11: Estratto delle principali caratteristiche del generatore dal manuale operatore

Il fattore di efficienza energetica è $v \cdot t_{eq} / P_t$

La potenza P_t è la somma dell'assorbimento del robot e del generatore: $450+3800=4250$ W.

Lo spessore equivalente dipende dal modello statico e dal criterio di resistenza utilizzato. Come proposta consideriamo lo schema consueto con la sezione di gola e le due tensioni agenti σ e τ . Per unità di profondità:



$$\begin{aligned}
 F &= \sigma A \cos \alpha + \tau A \sin \alpha \\
 \sigma A \sin \alpha &= \tau A \cos \alpha \\
 A &= t \sin \alpha \\
 \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \\
 &= \frac{F}{t} \sqrt{1 + \frac{3}{\tan^2 \alpha}}
 \end{aligned}$$

Figura 36: Valutazione sezione efficace di giunzione

Se l'angolo è 45° la tensione equivalente è $2F/t$ quindi $t_{eq}=t/2$.

$$FEE = \frac{v \cdot t/2}{P_{ass}} = \frac{480/60 \cdot 0,75}{4,3} = 1,4 \frac{mm^2}{kJ}$$

Di seguito sono presentate le sezioni dei cordoni realizzati. Le porosità sono legate al materiale saldato (evaporazione dello zinco superficiale).

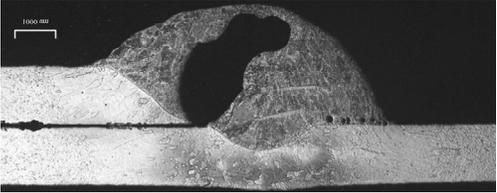
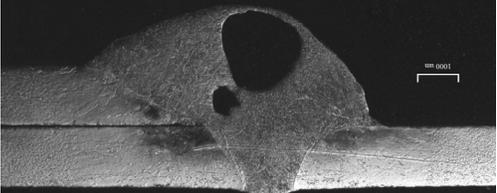
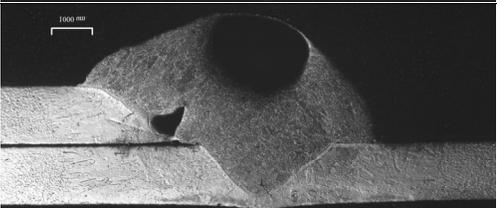
ID	Area fusa (mm ²)	Sezione
M1	14,88	
M2	15,85	
M2	16,80	

Figura 37: Comparazione mediante analisi macrografica per la valutazione del FEE.

5 Prove saldatura RSW

Per la misura degli assorbimenti sono stati utilizzati 2 misuratori, uno sul sistema robot ed uno sul generatore.



Figura 38: Configurazione di misura per il sistema Robot e generatore di saldatura a Resistenza.

L'analizzatore Fluke 1738 è stato collegato all'armadio del generatore RSW, mentre il Fluke 435 (messo a disposizione dal CRF) all'armadio principale del Robot.

Da tenere in considerazione che i consumi monitorati dal Robot riguardano anche i consumi relativi oltre che alla movimentazione anche all'attuatore elettromeccanico che conferisce la pressione fra gli elettrodi.

Inoltre, i consumi del Robot comprendono anche quelli della fase di ravvivatura degli elettrodi; anche questa fase, realizzata in modo automatizzato in funzione del materiale saldato, può essere necessario effettuarla ogni 40 - 45 punti di saldatura sugli acciai e ogni 10-15 punti sulle leghe di alluminio.

Gli elettrodi in rame sono da 10 mm di diametro e sono raffreddati da un sistema centralizzato i cui consumi non è stato possibile monitorare.

Per i test di consumo energetico sono stati effettuati 45 punti di saldatura in sequenza ad una distanza ognuno di 25 mm.

Il ciclo di saldatura standard utilizzato può essere rappresentato come in Figura 30 dove è evidenziato in blu l'andamento della forza applicata ai punti e in rosso quello della corrente di saldatura.

Il tempo di accostamento è il tempo in cui viene applicato il carico fra i due elettrodi e le lamiere vengono premute assieme; il tempo di saldatura è il tempo di applicazione della corrente di saldatura che viene seguito dal tempo di ritegno, fase in cui la pressione applicata ha un effetto di forgiatura localizzata.

I programmi reali, spesso anche proprietari delle case costruttrici, non sono disponibili. Inoltre, non è stato possibile misurare le correnti e tensioni al secondario con il Box ENEA poiché al momento non è dotato di sonde capaci di misurare correnti nell'ordine delle decine di kA tipiche dei processi RSW. L'Università di Tor Vergata (Cobeneficiaria) grazie ai dati raccolti ha comunque potuto progettare l'upgrading del sistema di misura sia hardware che software.

La misura dei consumi energetici alla presa attraverso i misuratori master ha consentito tuttavia la piena valutazione dei consumi energetici al primario, necessari per la valutazione del FEE e la comparazione fra differenti tecnologie.

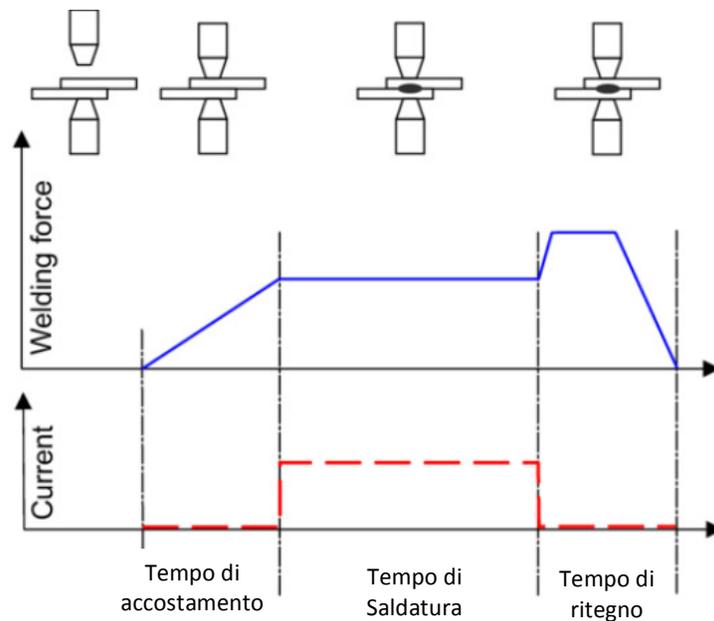


Figura 39: Rappresentazione di un ciclo standard di RSW.

5.1 Consumi energetici misurati per il processo RSW

Di seguito sono riportate le misure di energia assorbita dal processo di saldatura nel suo complesso per arrivare alla valutazione del Fattore di Efficienza energetico di questo processo.

5.1.1 Misure di consumo energetico sul generatore RSW

I consumi energetici registrati con il Fluke 1738 sono stati elaborati con lo specifico programma. La figura seguente mostra il grafico dei consumi monitorati durante tutte le prove RSW.

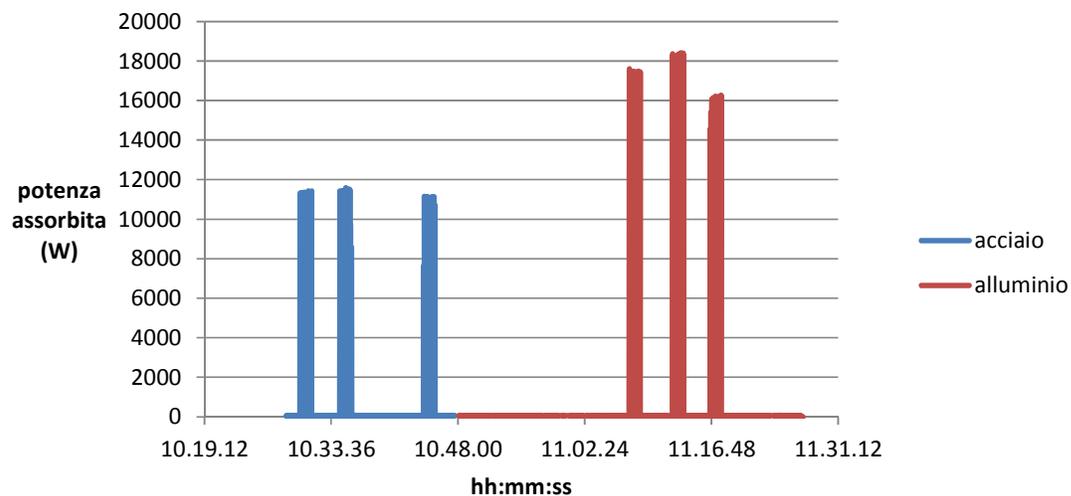


Figura 40: Monitoraggio energetico del generatore primario.

Si possono osservare tre picchi, per ognuno dei processi che sono compresi fra assorbimenti di 10-12 kW per i tre set di prova di saldatura su acciaio, e i 16-18,5 kW per i tre set di prova di saldatura su lega di alluminio.

Se si analizza una singola colonna, si possono discriminare gli assorbimenti dei singoli punti di saldatura evidenziando la potenza media in intervalli di 1 secondo.

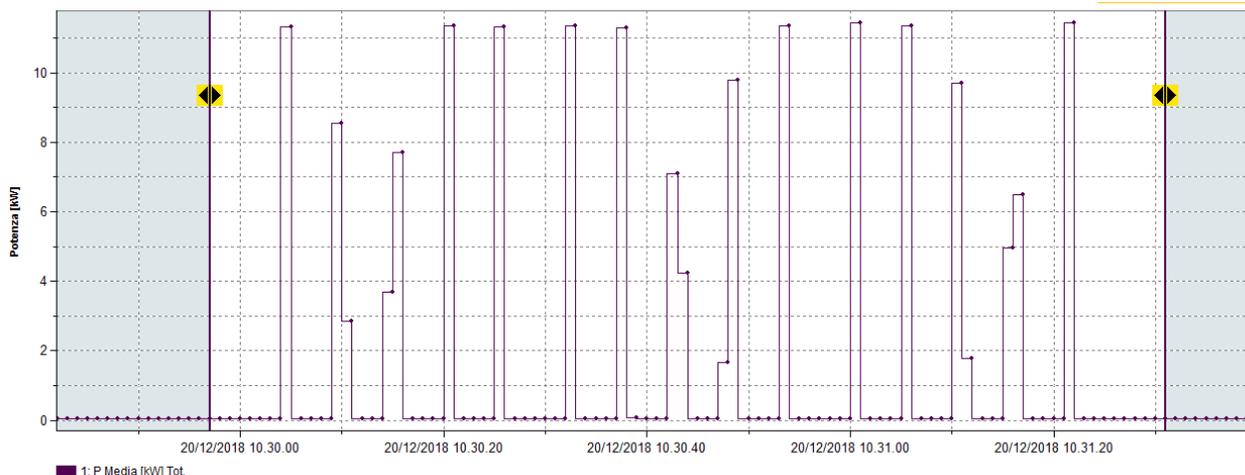


Figura 41: Particolare del primo SET di saldatura su acciaio.

Lo *stand-by* assorbe mediamente 50 W circa. L'intervallo di registrazione non è abbastanza breve per riprodurre i dettagli dell'andamento reale ma lo strumento registra comunque fedelmente l'energia assorbita dal generatore.

Per ridurre l'errore di valutazione dell'energia assorbita per singolo punto si è considerata l'energia assorbita per singolo set e ripartita la stessa per i 15 punti.

5.1.2 Consumi energetici robot

La potenza assorbita dal robot per la movimentazione è di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla potenza del generatore elettrico.

Il grafico seguente mostra la potenza assorbita dal robot che movimentava la pinza durante l'esecuzione di una serie di 15 punti su acciaio. Il robot presenta una base di assorbimento in *stand-by* di 180 W circa. Il movimento causa un incremento della potenza media di circa 580W ed una potenza in fase di saldatura (applicazione del carico) di circa 780W. Il grafico è realizzato con dati registrati da due diversi strumenti con differente tasso di archiviazione per cui l'andamento della potenza di saldatura è solo indicativo. La sincronizzazione tra i due strumenti sembra comunque adeguata (ciascun punto è eseguito in 1 secondo circa).

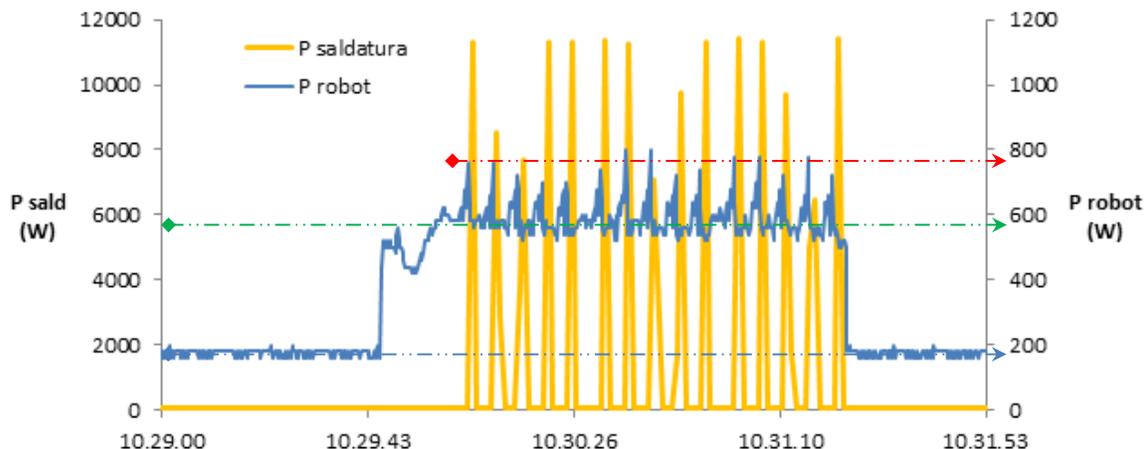


Figura 42: Grafico complessivo dei consumi energetici del processo di saldatura RSW su acciaio

L'energia utilizzata dal robot nell'intervallo mostrato ammonta a 62,1 kJ. Nello stesso tempo lo stand-by avrebbe richiesto 23,4 kJ quindi ogni punto consuma 2,6 kJ netti. In produzione il fattore di utilizzo della pinza è sicuramente alto per cui è corretto considerare il consumo lordo che è 4,1 kJ per punto. Va considerata l'energia necessaria per la rattivatura, operazione che su lamiere di acciaio può essere effettuata ogni 50 punti con un consumo aggiuntivo (rilevato) di 60 kJ circa: su ogni singolo punto vanno quindi sommati 1,2 kJ.

In totale, sommando l'energia di saldatura media (11,5 kJ) si arriva a 16,8 kJ per punto, su acciaio.

Il grafico dei consumi per due serie successive di 15 punti su alluminio è mostrato di seguito.

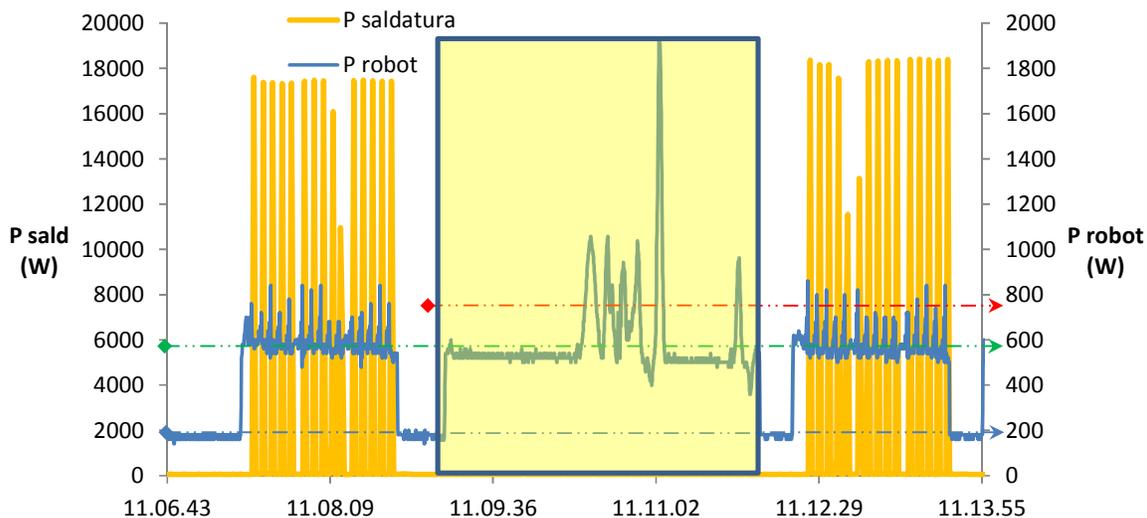


Figura 43: Grafico complessivo dei consumi energetici del processo di saldatura RSW su alluminio

L'energia necessaria all'esecuzione del giunto in alluminio è superiore rispetto all'acciaio, come detto sopra, mentre il manipolatore, attuatore compreso, ha un consumo simile (con picchi leggermente più pronunciati). Lo stesso grafico mostra, al centro nell'area evidenziata, l'assorbimento per la rattivatura elettrodi, gestita dallo stesso quadro del robot in automatico e che per l'alluminio è necessario effettuare ogni 15 punti. L'affilatura, effettuata con un sistema automatico di molatura e aspirazione fa salire anche se solo per pochi secondi il consumo istantaneo del sistema "robot" a 1900W.

Il robot in saldatura di questo gruppo richiede 3,7 kJ per punto. La rattivatura consuma 79 kJ quindi ogni punto richiede 5,3 kJ in media. Sommando l'energia media di fusione (17,5 kJ) si arriva a 26,5 kJ per punto, su alluminio.

5.1.3 Consumi energetici complessivi per la saldatura RSW

Di seguito sono riportati i dati inerenti il consumo elettrico complessivo nelle tre differenti condizioni di saldatura sia per acciaio che per alluminio. Unico dato che non è stato possibile misurare è l'energia necessaria per il raffreddamento degli elettrodi.

Riassumendo, in media si sono ottenuti i seguenti consumi:

Saldatura per resistenza	Acciaio	Alluminio
n. punti	45	45
Fusione (kJ)	519	811
Movim. Pinza (kJ)	184	162
Ravvivature (kJ)	55	230
Totale (kJ)	755	1203
Tot. Per punto (kJ)	16,8	26,7

Tabella 12: Consumi energetici medi: confronto fra DP600 ed AA 6016 T4

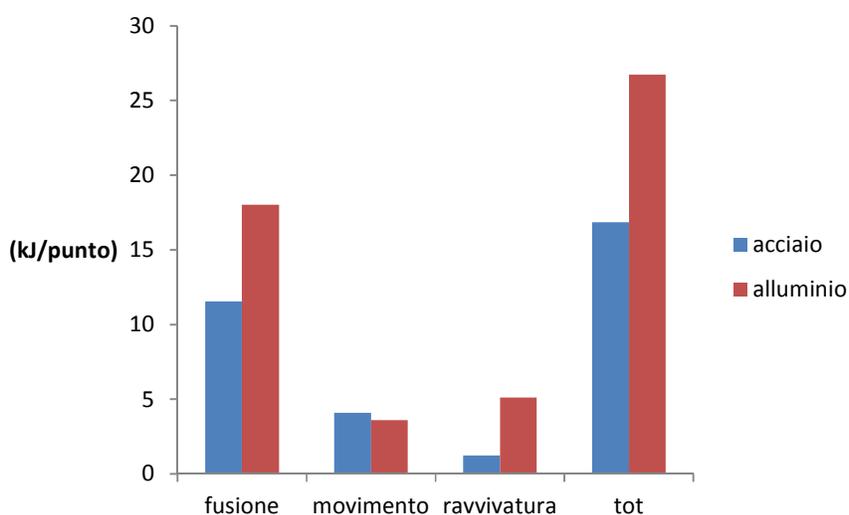


Figura 44: Sintesi dei consumi per le varie utenze per acciaio ed alluminio

La differenza tra i due materiali è dovuta essenzialmente al diverso input energetico per la fusione ed in secondo luogo per la necessità di effettuare la ravvivatura mediamente con una frequenza di tre volte superiore.

Di seguito i dati specifici per i singoli SET di punti, utili a discriminare il parametro in funzione del FEE. La tabella seguente riepiloga i dati di energia totale ed energia per singolo punto, oltre che la potenza massima assorbita dalla rete, nelle tre condizioni di saldatura per l'acciaio.

Gruppo / n. punti	Energia tot. (kJ)			En. Per saldatura (kJ)		Potenza max (kW)	
	Generatore	Robot	Affilatura	Generatore	Robot	Generatore	Robot
1° / 15	173,5	62,1	60	11,6	4,1+1,3	11,4	1,9
2° / 15	175,7	62,1		11,7	4,1+1,3	11,6	1,9
3° / 15	169,6	62,1		11,3	4,1+1,3	11,2	1,9

Tabella 13: Consumi energetici per la saldatura delle lamiere in acciaio DP600.

Le tabella seguente riepiloga i dati di energia totale ed energia per singolo punto, oltre che la potenza massima assorbita dalla rete, nelle tre condizioni di saldatura per la lega di alluminio.

Gruppo / n. punti	Energia tot. (kJ)			En. Per saldatura (kJ)		Potenza max (kW)	
	Generatore	Robot	Affilatura	Generatore	Robot	Generatore	Robot
1° / 15	273,6	55	79	18,2	3,7+5,3	17,8	1,9
2° / 15	287,3	55	79	19,1	3,7+5,3	18,4	1,9
3° / 15	249,8	55	79	16,7	3,7+5,3	16,3	1,9

Tabella 14: Consumi energetici per la saldatura delle lamiere in lega di alluminio AA6016 T6.

5.2 Test su acciaio DP600 spessore 1,5 + 1, 5mm

Sono stati realizzati 3 set di prove su due piastre sovrapposte di dimensione 150 x 300 mm x 1,5 mm. La sequenza dei punti di saldatura è riportata nella **Figura 45** in cui il tempo complessivo fra un punto di saldatura ed il successivo è di circa 4 secondi, tempo che aumenta a circa 8 secondi nel passaggio dal punto 5 al punto 6 e dal punto 10 al punto 11 (linee verdi).

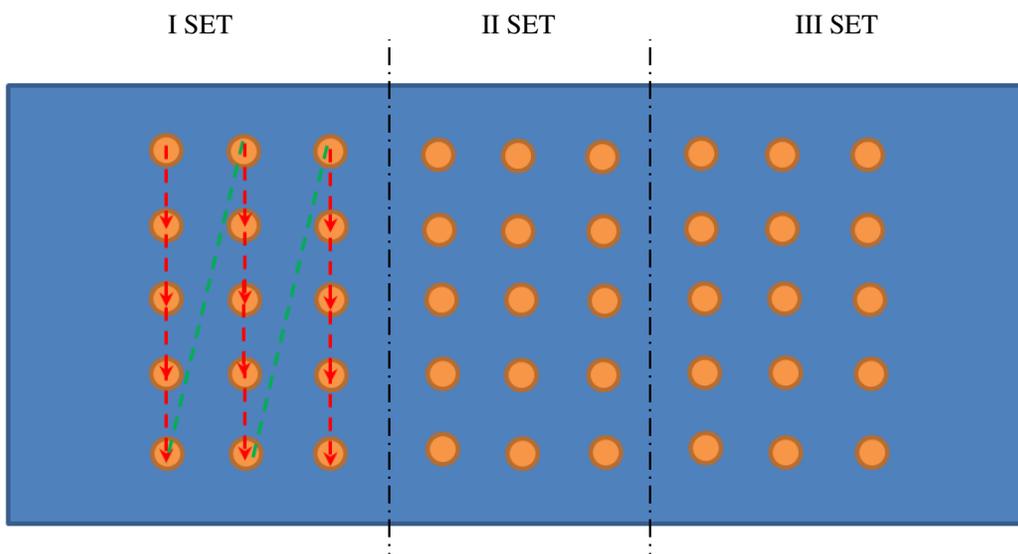


Figura 45: Sequenza di Saldatura.

Sono stati mantenuti costanti il tempo di accostamento (200 ms), il tempo di ritegno (200 ms) o tempo di forgiatura e la forza applicata (3 kN). Sono stati invece variati il tempo di saldatura e la corrente di saldatura come meglio specificato nella tabella seguente.

I tre parametri utilizzati sono stati precedentemente investigati dal CRF come parametri di saldatura ad efficacia di giunzione equivalente.

SET	Tempo di saldatura [ms]	Corrente di saldatura [kA]	Tempo complessivo di saldatura [ms]	ID Metallografia
1	380	9	780	C
2	450	8	850	D
3	310	10	710	E

Tabella 15: parametri di saldatura su piastre 1, 5mm di DP600

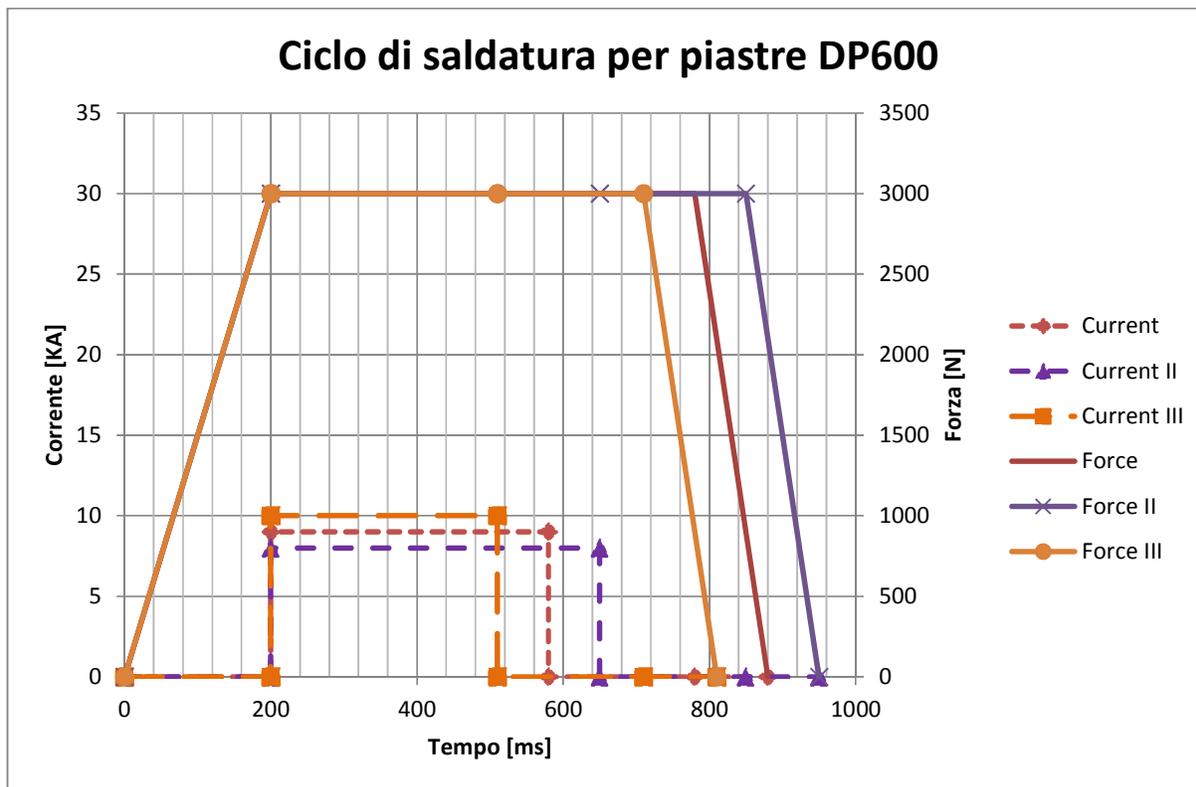


Figura 46: Grafico dell'andamento forza e corrente di saldatura per acciaio.

La piastra è stata sezionata per analizzare la geometria del nocciolo di fusione (nugget) della RSW.

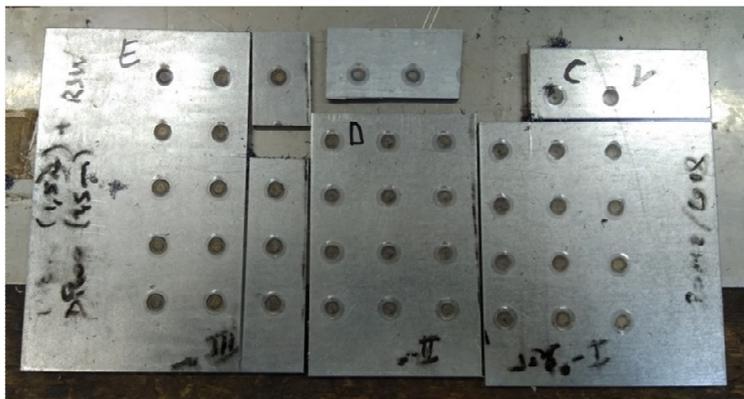
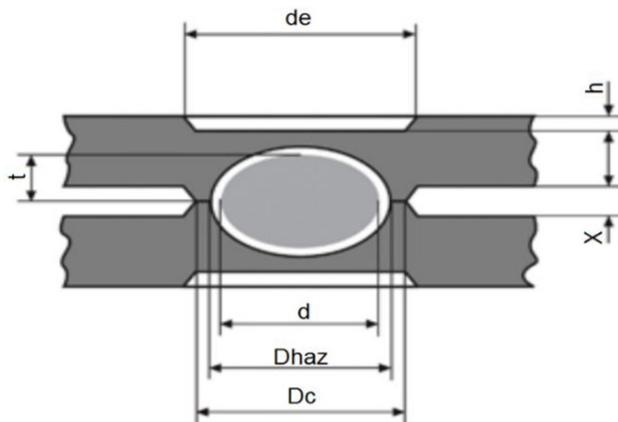


Figura 47: Piastra sezionata nei tre set di prove effettuati.

I parametri da misurare per la verifica dell'efficacia della giunzione sono mostrati nella figura seguente:



de= diametro esterno del punto;
d= diametro di nocciolo (nugget);
Dhaz= diametro della zona termicamente alterata
Dc= Diametro della zona di diffusione
h= profondità di indentazione;
X= gap fra le lamiere

Figura 48: Principali parametri geometrici di valutazione delle saldatura realizzate mediante RSW

Nello specifico il FEE definito in generale per la saldatura e applicato per valutare l'efficienza dei processi e tecnologie di saldatura (ad arco, laser ma anche FSW) mediante la qualificazione con giunti di testa è espresso dalla seguente relazione:

$$FEE = \frac{V_{sc} \cdot p_c}{PE_c} \text{ (mm}^2/\text{kJ)}$$

che per le tecniche multi pass si esplicita nella seguente espressione:

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

Per la saldatura a punti possiamo applicare lo stesso concetto in cui l'area fusa corrisponde all'area fusa massima:

$$FEE = \frac{\text{area nugget}}{\text{energia}}$$

Dall'analisi macroscopica, riportata nella seguente tabella riepilogativa si evidenzia come tutti e tre i parametri forniscano valori di area fusa equivalenti per i valori di corrente di 9 e 10 kA mentre con il valore di 8 kA si osserva una riduzione della Area fusa di circa il 10%.

Nota:
l'area per il calcolo del FEE è stata individuata con considerazioni simili a quelle fatte su altre tecniche (arco, laser, FSW, ecc.). Sono possibili scelte diverse: dalla letteratura (cfr. ad es.³⁹) emerge come la sezione resistente in diverse condizioni di carico, sia essenzialmente proporzionale al prodotto t·d (spessore × diam. del punto). Ciò è giustificato dal punto di vista statico e confermato sperimentalmente, infatti, per dato materiale, il carico di rottura di saldature realizzate con spessori e parametri diversi è sensibilmente costante se normalizzato con i fattori t d (per rottura a taglio) e 1,36 t d (per rottura a strappo).

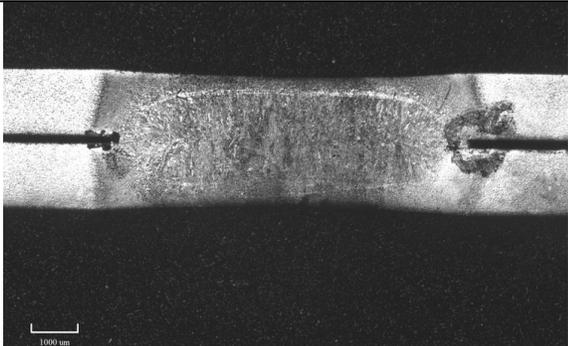
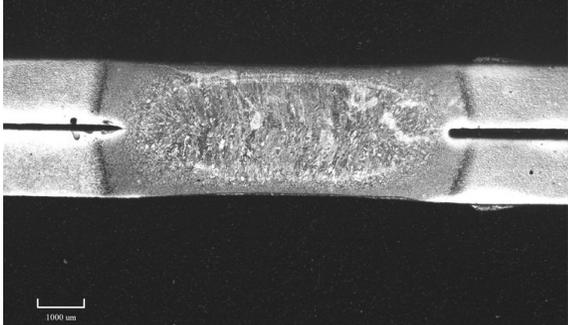
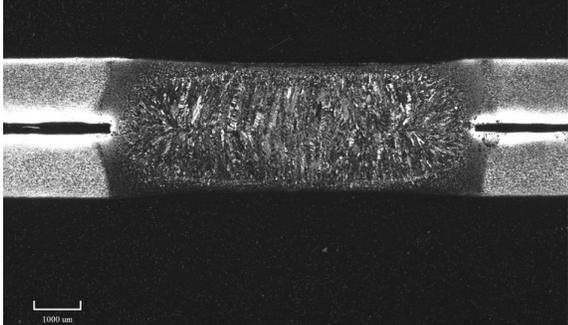
ID	AREA nugget	Energia per punto	FEE (mm ² /kJ)	Sezione Macrografica
C	12,54	17,0	0,74	
D	11,21	17,1	0,66	
E	14,79	16,7	0,89	

Figura 49: Comparazione dei tre set di prova mediante analisi macrografica per la valutazione del FEE.

I test sono stati monitorati anche mediante termografia con termocamera Flir T440. La figura seguente mostra alcune delle fasi della saldatura del II SET e III SET.

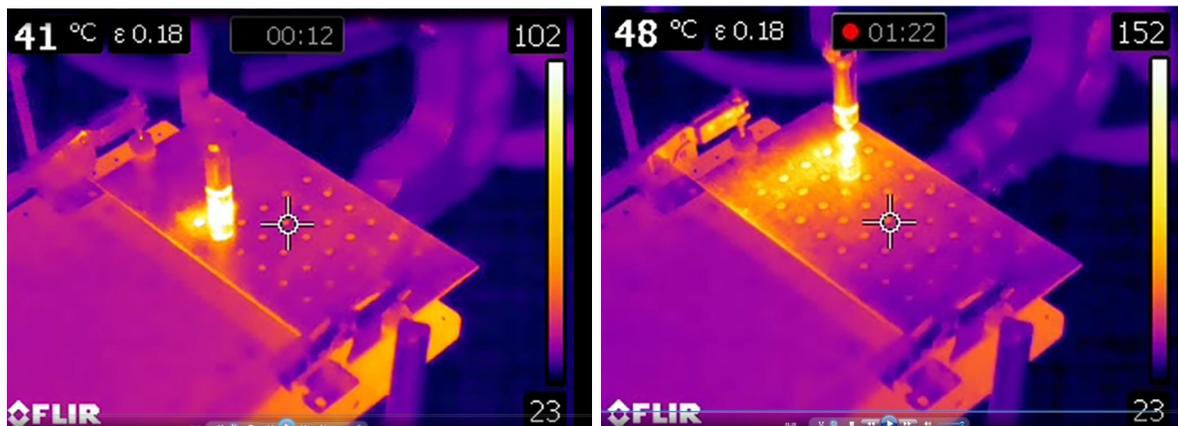


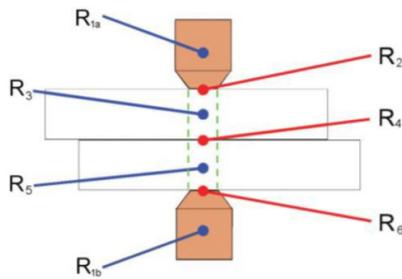
Figura 50: Immagini termografica a metà dell'esecuzione del terzo set di prove e alla fine del terzo set.

Il processo avviene senza l'emissione di fumi o schizzi e il calore è concentrato in corrispondenza degli elettrodi raffreddati. La piastra presenta una temperatura media di circa 50° C. Solo dopo l'esecuzione in sequenza di 15 punti realizzati (considerato il tempo di movimentazione) ogni circa 4 secondi per gli spostamenti brevi ed 8 secondi per quello maggiore. Lo smaltimento del calore avviene principalmente e direttamente nella fasi di forgiatura attraverso i punzoni raffreddati in rame.

5.3 Test su AA6016 T4 spessore 1 + 1mm

In analogia a quanto effettuato con le piastre in acciaio DP600 zincato, sono state effettuati test di saldatura su lamiera di alluminio AA6016T4, lega attualmente utilizzata ad esempio per i cofani e le portiere di vari modelli del gruppo FCA.

Le leghe di alluminio conducono molto meglio rispetto all'acciaio ed in passato la saldatura a resistenza di questo materiale risultava più difficoltosa in quanto i livelli di corrente da raggiungere erano notevolmente più alti in quanto la resistenza del circuito generato dal processo è, per ovvi motivi, più bassa (vedi schema seguente).



$$Q = R * I^2 * t$$

Q= calore sviluppato per effetto Joule

R= resistenza

I= corrente

T= tempo di saldatura

R₄ deve essere >> delle R_i in modo da avere l'effetto di fusione nella zona ottimale

Figura 51: Schematizzazione della caratteristica esterna (circuito elettrico) che si genera, legata al tipo di materiale/contatto fra i diversi elementi della catena.

Sono stati definiti 3 set di parametri considerati equivalenti dal punto di vista dell'efficacia di giunzione mantenendo costanti il tempo di accostamento (200 ms) ed il tempo di ritegno (100 ms).

Rispetto al ciclo di saldatura su acciai, la saldatura su alluminio viene effettuata con una presaldatura che è stata realizzata con parametri costanti di tempo e corrente rispettivamente di 100 ms e 10 KA. Sono invece stati variati il tempo, la corrente e la forza di saldatura come riportato in tabella.

Set	Tempo di pre saldatura [ms]	Corrente di pre saldatura [kA]	Tempo di saldatura [ms]	Corrente di saldatura [kA]	Forza [KN]	Tempo complessivo di saldatura [ms]	ID Metallografia
1	100	10	100	28	3	500	F
2	100	10	100	29	3,5	500	G
3	100	10	80	30	3,5	480	H

Tabella 16: parametri di saldatura su piastre di spessore 1mm di AA6061 T4.

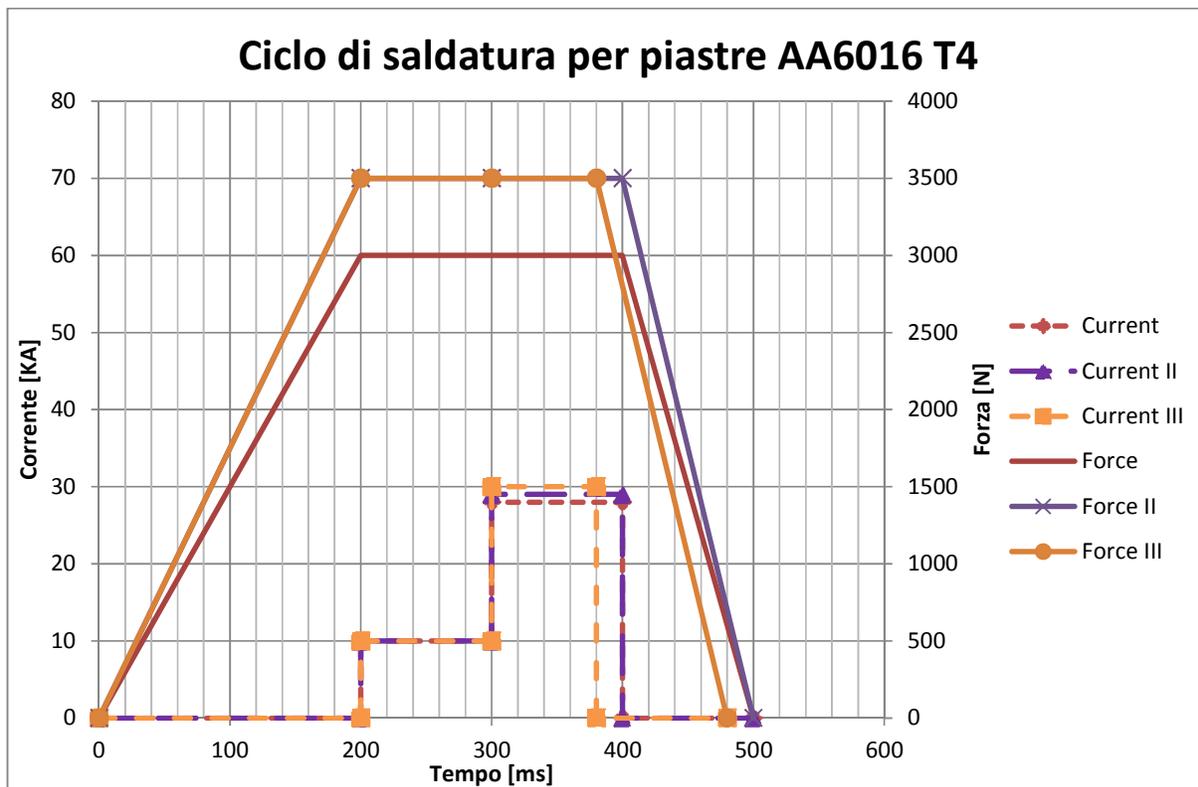


Figura 52: Grafico dell'andamento forza e corrente di saldatura per leghe di alluminio.

La rattivatura automatizzata degli elettrodi in questo caso è necessaria alla fine di ogni set di 15 punti per evitare l'incollaggio dell'elettrodo in rame alle lamiere di alluminio. Questo fenomeno è dovuto a tre fattori: maggiore compatibilità fra alluminio e rame, minore temperatura di fusione dell'alluminio, correnti applicate più alte. La piastra è stata sezionata per l'analisi macrografica e la determinazione dei parametri geometrici del nugget.

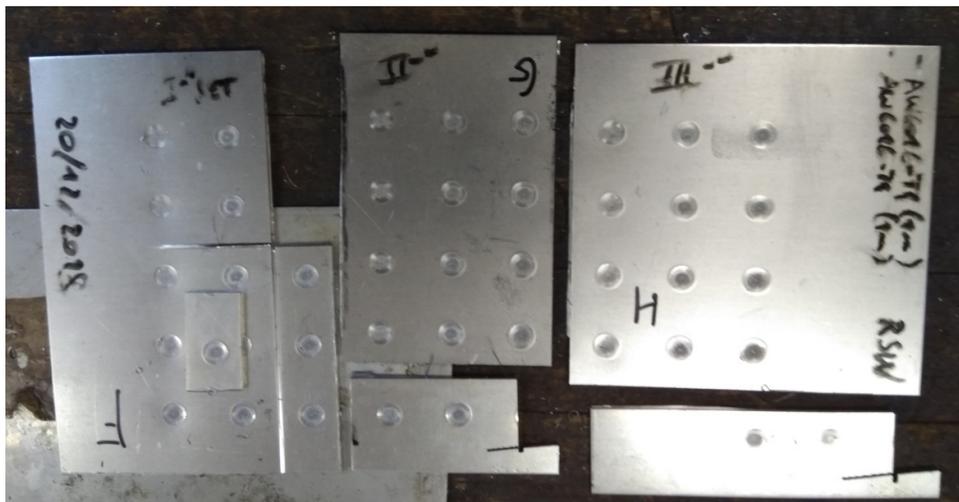


Figura 53: Piastra di AA6016 T6 saldata sezionata nei tre set di prove effettuate.

Di seguito una figura che riporta sotto forma di tabella i risultati di riepilogo sia sotto forma di Efficacia (macrografie) sia di Efficienza energetica (FEE).

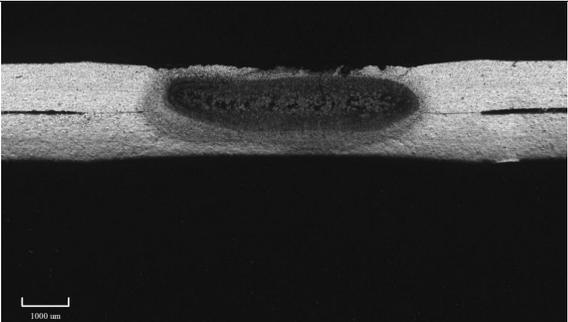
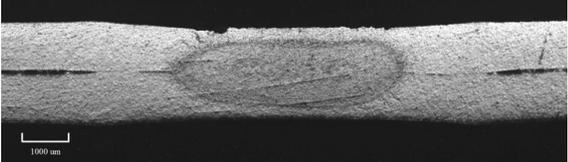
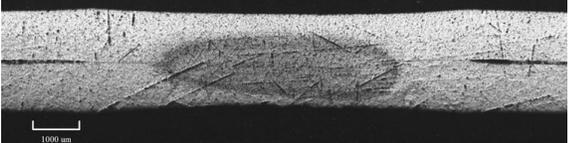
ID	AREA nugget	Energia per punto	FEE (mm ² /kJ)	Sezione Macrografica
F	4,64	27,2	0,17	
G	5,07	28,1	0,18	
H	4,26	25,7	0,17	

Figura 54: Comparazione dei tre set di prova mediante analisi macrografica per la valutazione del FEE.

5.4 Confronto dei Fattori di Efficienza Energetica per RSW

Il grafico seguente mostra come, in termini di FEE, la saldatura RSW dell'alluminio ha un'efficienza inferiore al 25% rispetto all'acciaio.

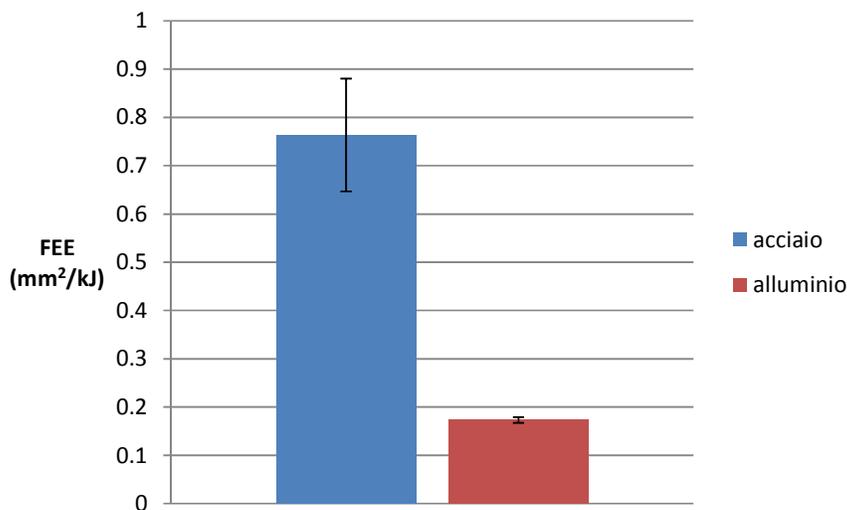


Figura 55: FEE a confronto fra RSW di acciaio ed Alluminio

In una discussione più ampia, se pur semplificando, l'acciaio utilizzato (DP600, dove 600 indica il carico di rottura Minimo in MPa) ha una resistenza circa doppia rispetto alla lega d'alluminio. Considerato un FEE

circa 4 volte superiore (con la stessa quantità di energia si riesce a fondere un volume 4 volte superiore rispetto all'alluminio) si può intuire come in realtà l'impiego di acciai ad elevata resistenza possa essere una scelta vincente sia sotto l'aspetto dell'alleggerimento strutturale sia sotto l'aspetto dell'energia di assemblaggio.

6 Prove di saldatura mediante Clinching

Le prove di clinchiatura sono state effettuate su lamiera di alluminio, analoga a quella utilizzata per le prove RSW (6016-T4 1mm+1mm). La figura seguente mostra la pinza di clinchiatura, (sempre movimentata mediante lo stesso Robot utilizzato per la RSW) e lo schema di funzionamento dello specifico set matrice-punzone TOX-SKB.

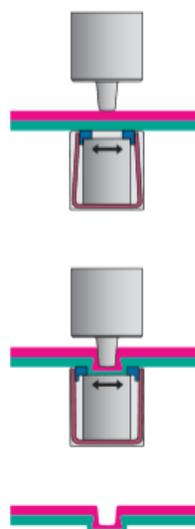
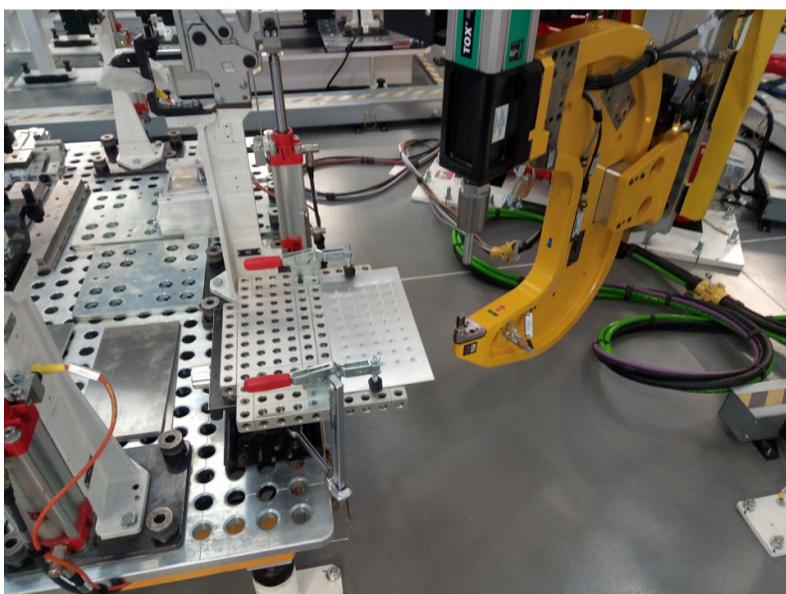


Figura 56: Pinza robotizzata di clinchiatura TOX PRESSOTECHNIK e principio di funzionamento.

Il set punzone-matrice ha un diametro di punzone di 5,6 mm ed una matrice a segmenti TOX-SBK con un diametro di 9 mm ed un fondo di 1 mm, lo spessore del fondo della giunzione (inteso come distanza fra fondo della matrice e punzone) è di 0,6 mm che è in pratica l'unico parametro del processo (X). La forza di clinchiatura rilevata pari a 27,6 kN è un parametro indiretto funzione quindi del materiale.

Lo schema del sistema TOX SBK utilizzato è mostrato nella figura seguente.

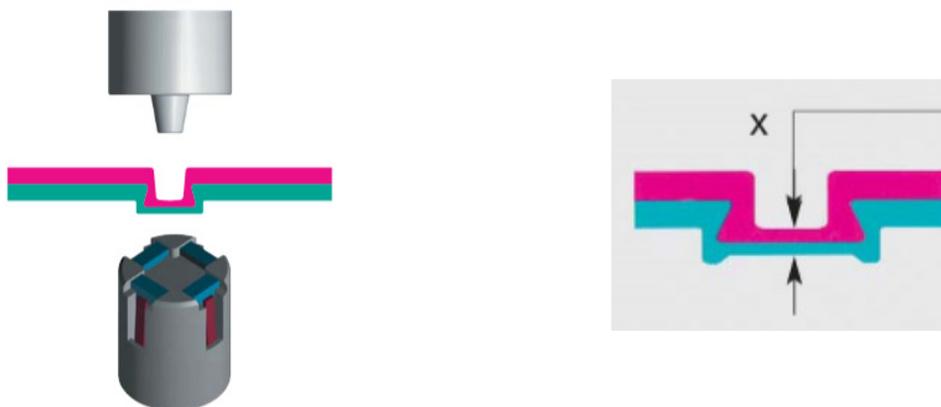


Figura 57: SET matrice a setti mobili - punzone TOX SBK

La speciale matrice del sistema SBK ha una parte fissa e una mobile, costituita da 4 - 6 segmenti mobili. La parte fissa fa in modo che la formazione del punto sia precisa, tramite l'esatto centraggio del materiale e del punzone. Gli elementi mobili, posti tra quelli fissi, permettono la compenetrazione dei materiali, tramite lo scorrimento degli stessi. Risulta più compatta e quindi rende permette una maggiore accessibilità e permette un migliore adattamento a vari materiali e spessori risultando particolarmente adatta nei casi di giunzioni ibride che prevedono l'impiego di collanti all'interfaccia delle lamiera spesso utilizzati anche come barriera anticorrosione incrementando quindi la resistenza meccanica e a corrosione.

6.1 Consumi energetici misurati per il processo di clinching

L'assorbimento della pinza di saldatura è stato monitorato mediante Fluke 1738 collegato all'interruttore generale del quadro di potenza e controllo del sistema della pinza che opera la giunzione per deformazione plastica localizzata delle due lamiera. L'andamento è riportato nel grafico seguente insieme all'assorbimento del robot che movimenta la pinza stessa, letto da Fluke 435.

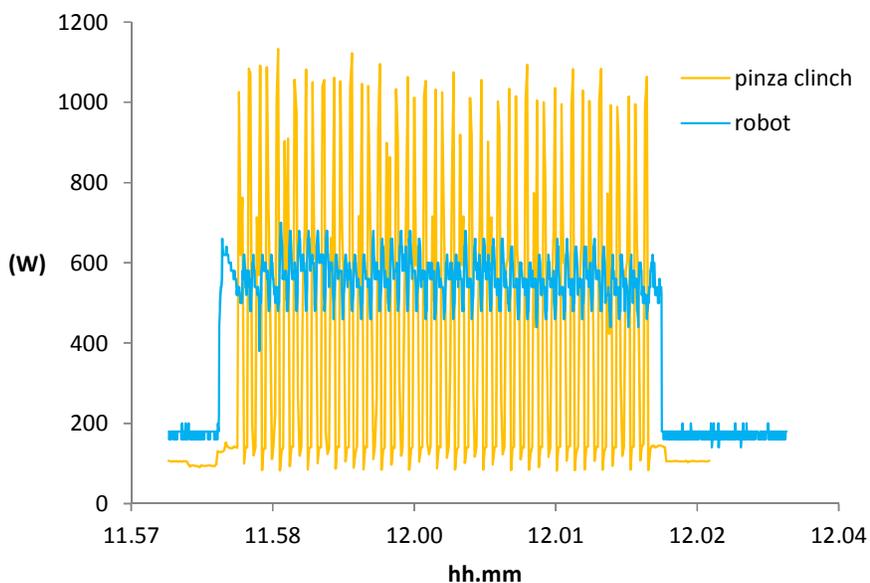


Figura 58: Grafico complessivo dei consumi energetici fra pinza di "clinching" TOX e robot per l'intero ciclo di puntatura

I consumi per questo processo sono in pratica confrontabili. La potenza media di movimentazione del robot è simile a quella del processo RSW (600W)



Figura 59: Particolare dei consumi rilevati per il processo clinching

Come in precedenza la risoluzione del segnale relativo al robot è maggiore. L'assorbimento è più costante in quanto il serraggio è affidato alla pinza che ha l'alimentazione elettrica separata.

Completivamente

n. punti	45
Pinza clinch (kJ)	125
Movim. Pinza (kJ)	166
Totale (kJ)	291
Tot. Per punto (kJ)	6,5

Tabella 17: Riepilogo dei consumi energetici per punto di Clinchiatura

6.2 Analisi dell'efficacia della giunzione per clinching

Sono stati eseguiti 45 punti di clinchiatura in sequenza, nella figura seguente viene mostrata l'aspetto dei punti realizzato e la relativa sezione macrografica. La sezione macrografica conferma il rispetto della distanza di controllo X, pari a 0,6 mm.

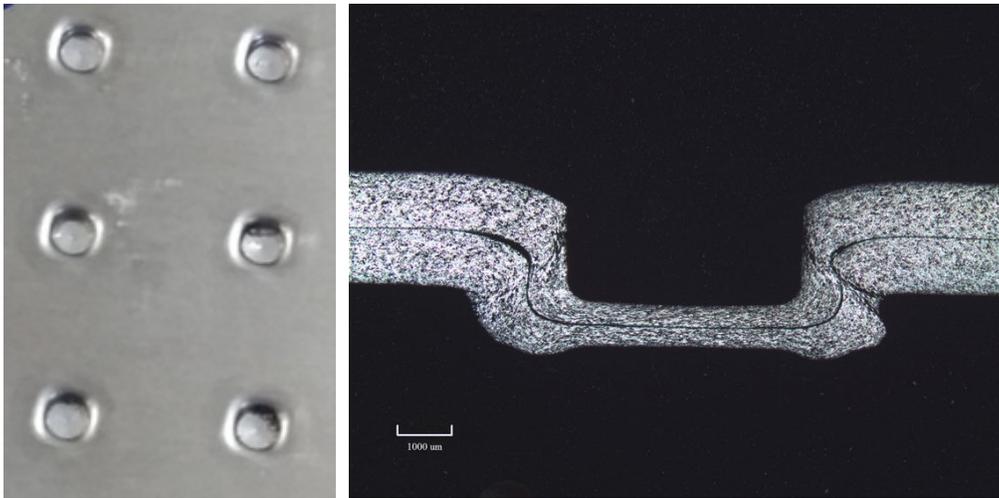


Figura 60: SET matrice a setti mobili - punzone TOX SBK

I profili di durezza sul punto, mostrano come pur essendo una lega da solubilizzazione trattamento termico, l'incrudimento dovuto al clinching genera un incremento notevole della durezza delle lamiere giustificabile anche con un affinamento del grano evidenziato dalla macrografia.

I valori di durezza passano da circa 70 a 110 Kgf/mm² con un incremento di durezza superiore al 50%. Questo giustifica che, anche in presenza di riduzione dello spessore, la resistenza del materiale aumenta. I punti per clinchiatura da letteratura hanno comunque una resistenza fra il 15 ed il 20 % rispetto alla classica RSW per gli acciai (Figura 62). La differenza si riduce nel caso delle leghe di alluminio ma non supera il 30-35% rispetto alla saldatura a resistenza.

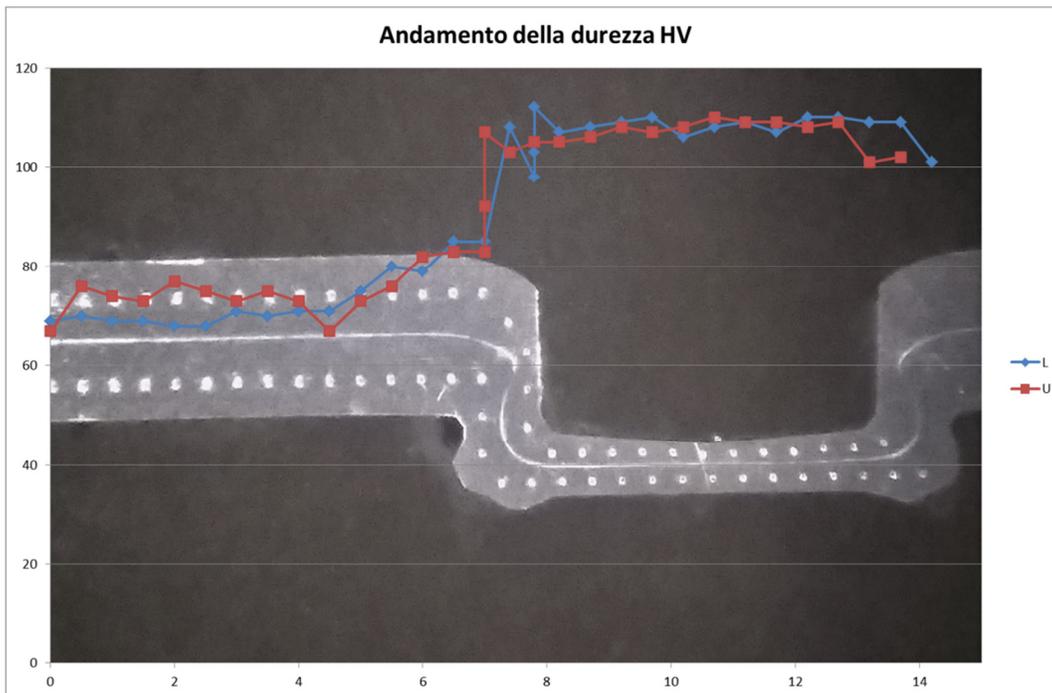


Figura 61: Profilo di durezza

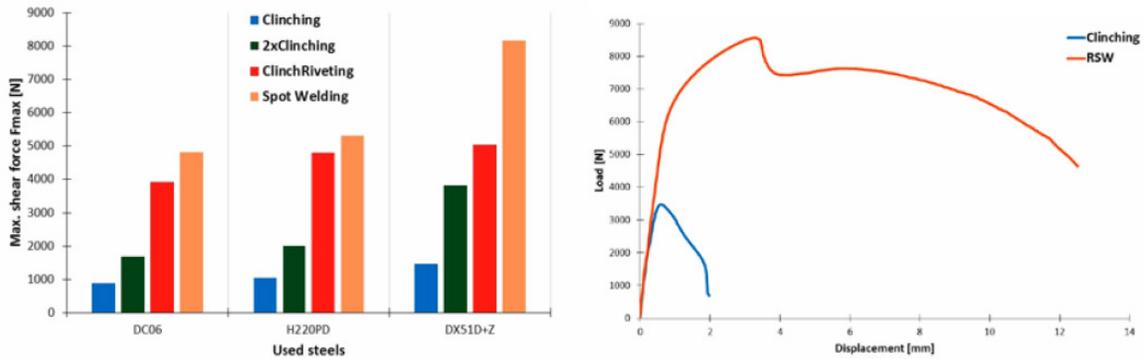


Figura 62: Comparazione fra la resistenza per clinciatura e per RSW su acciai [1]

Per il calcolo del FEE di giunzioni per clinch è utile riferirsi alla sezione resistente40

$$A_N = \pi(2 R_p t_N + t_N^2)$$

Cioè l'area proiettata del legamento nella lamiera superiore (R_p raggio punzone, t_N spessore del legamento)

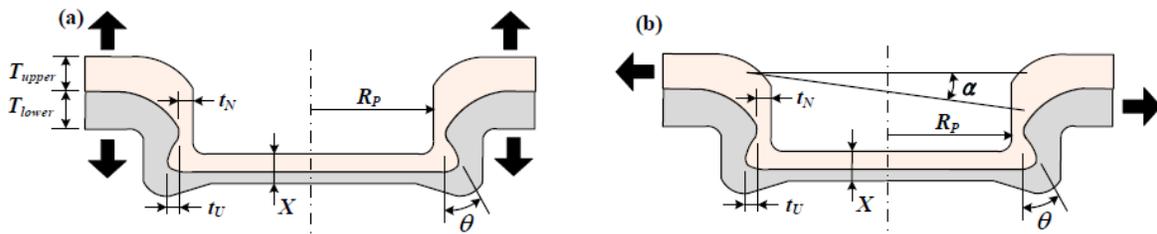


Figura 63: Valutazione della sezione efficace della giunzione per clinciatura

Il raggio è noto una volta definito l'utensile mentre lo spessore può essere rilevato solo da sezioni macrografiche, a meno di non inserire lo spessore della lamiera superiore, eventualmente ridotto di un fattore empirico noto. Nel caso in esame, dalla sezione risulta $R=2,2$ mm e $t=0,6$ mm da cui $A= 9,4$ mm².

Il fattore è quindi

$$FEE=A / E = 9,4 / 6,5 = 1,45 \text{ mm}^2/\text{kJ}$$

Il valore calcolato permette il confronto tra diversi parametri di processo e impianti ma sempre all'interno della tecnica di clinciatura: il confronto con la saldatura a resistenza deve tenere conto delle diverse prestazioni in termini di carico di rottura statico e a fatica.

7 Conclusioni

Sono state effettuate misure su apparecchiature che riproducono fedelmente i sistemi automatizzati di saldatura industriale degli stabilimenti FCA.

In particolare è stato caratterizzato in modo completo il sistema di saldatura laser con misure relative sia all'efficienza della sorgente che all'efficienza del processo.

La sorgente ha mostrato un rendimento di circa il 14% e delle problematiche di qualità del fascio che incidono negativamente sul focus shifting ed in generale sull'effettivo FEE.

I valori rilevati di FEE da 1,27 a 1,47 possono essere raddoppiati con l'impiego di sorgenti laser in fibra che raggiungono rendimenti del 25-35%.

Per il calcolo del FEE è stata considerata la sezione resistente riferita quindi alla larghezza del giunto all'interfaccia fra le due lamiere. La profondità di penetrazione invece utilizzata per gli usuali giunti di testa è più che doppia.

La saldatura MIG ha mostrato un livello qualitativo notevolmente inferiore. Mentre il laser vaporizza istantaneamente lo strato di zincatura e non sono state evidenti porosità, nelle saldature MIG che coprono una superficie notevolmente maggiore e che non raggiungono la penetrazione completa delle due lamiere, i vapori di zinco restano intrappolati per cui le saldature mostrano grosse soffiature.

IL FEE risulta paragonabile a quella della saldatura laser (FEE 1,4) tuttavia la sezione resistente è $t/2$ mentre per i lap joint laser questa era non inferiore a $\frac{3}{4}t$; ciò implica un numero minore di saldature laser rispetto alle saldature MIG per ottenere la stessa resistenza oltre che un maggiore produttività.

In conclusione per la riduzione dell'energia nel processo di lastrature si dovrebbe massimizzare la saldatura laser a scapito della saldatura MIG. Anche in questo caso è stato evidenziato come rispetto al rendimento dichiarato nei dati di targa (90%), nelle condizioni reali di utilizzo il rendimento sia sempre più basso (in questo caso il 74%).

Per quanto riguarda la saldatura a resistenza e la saldatura clinching, il grafico seguente riassume i risultati in termini di energia necessaria per punto.

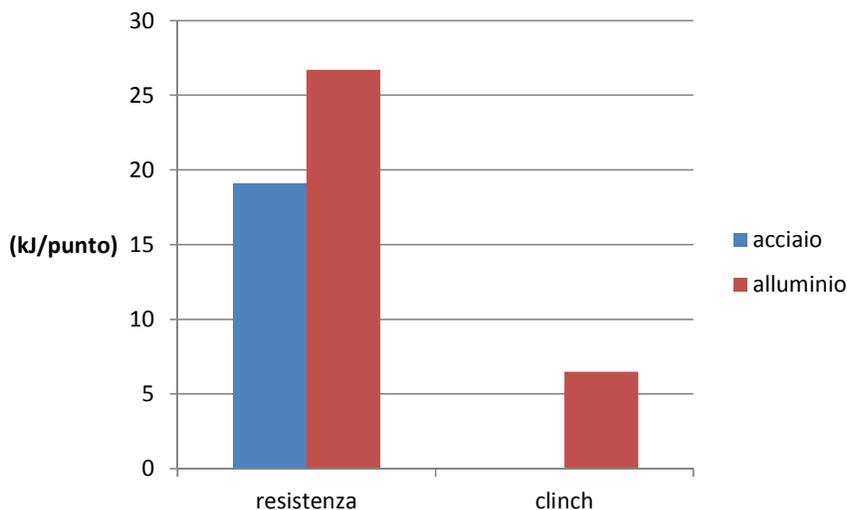


Figura 64: Energia necessari per punto

Nella saldatura a resistenza il consumo principale è legato al generatore elettrico mentre la movimentazione del robot assorbe una quota limitata di circa un ordine di grandezza inferiore. La saldatura dell'alluminio necessita di molta più energia. La clinchiatura assorbe molta meno energia per singolo punto anche se la resistenza meccanica di un punto di clinchiatura è in generale il 20-30% di un punto di saldatura a

resistenza. Tale differenza potrebbe essere meno marcata sugli acciai ove l'energia di deformazione da applicare è maggiore e l'energia per la RSW è inferiore.

Confrontando i FEE si osserva come nei casi analizzati la saldatura Laser, la saldatura MIG e la saldatura Clinching abbiano un valore prossimo a 1,4 mm²/kJ, relativamente alla sezione efficace.

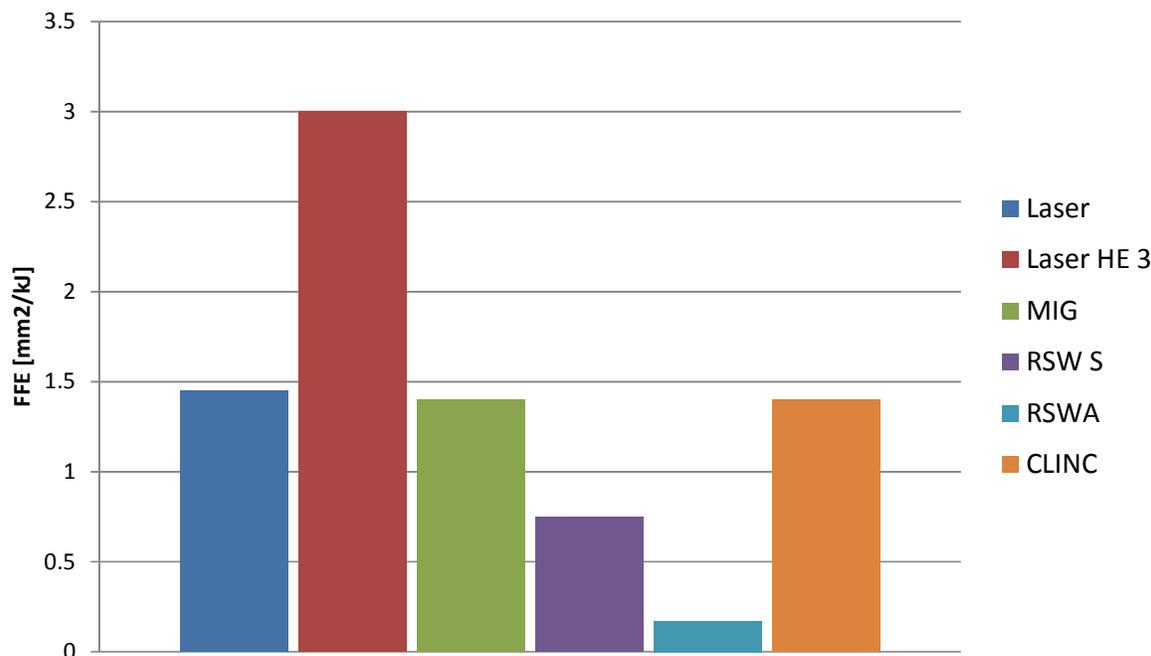


Figura 65: Confronto FEE dei processi analizzati nel settore Automotive

Il processo RSW ha valori di circa la metà sull'acciaio e di poco superiore al 12% per l'alluminio.

Il processo vincente, in particolare impiegando sorgenti a elevata efficienza (LASER HE) è la saldatura laser.

A livello complessivo, le azioni svolte (nell'ambito specifica attività di progetto relativa all'efficienza energetica dei processi di saldatura industriale) risultano estremamente attuali e in linea con le Direttive europee di Ecodesign delle apparecchiature industriali di saldatura.

Un recente documento approvato (Ecodesign Directive 2009/125/EC on a draft Ecodesign Regulation for welding equipment) prevede a partire dal 1 gennaio 2021 l'entrata in vigore di nuovi limiti per i generatori ad arco.

Infatti i consumi relativi alle tecniche di saldatura sono previsti per il 2030 superiori a 6 TWh e le misure che si vogliono adottare (fra cui la riduzione dei consumi in standby e l'incremento del rendimento dei generatori) dovrebbero portare (sempre entro il 2030) a un risparmio di energia superiore a 1 TWh.

La Direttiva tuttavia

- si limita a fornire restrizioni sui principali generatori e processi di saldatura ad arco (come la TIG, MIG, MAG, SMAW, FCAW) e di taglio Plasma;

- non individua direttive o modalità di incentivazione per cambi radicali di paradigma (cambio di tecnologia, ad esempio da Arco a Laser o da Arco a FSW o a tecnologie Ibride);
- lascia ancora non regolamentati i processi ad arco sommerso e non contempla tecnologie Plasma o laser il cui impiego è crescente.

Altro limite della Direttiva è che pur definendo nuovi limiti sull'efficienza minima che i nuovi generatori, a partire dal 2023, dovranno avere (fra l'80 e l'85%) ne considera solo uno, misurato nelle condizioni di massima potenza.

Gli studi effettuati in questi tre anni su differenti generatori ad arco, di vari costruttori e vari periodi di costruzione, hanno mostrato come anche i più moderni generatori che riportano direttamente o indirettamente il rendimento di targa, nelle condizioni medie e reali di utilizzo hanno dei rendimenti inferiori rispetto a quanto dichiarato e misurato nelle condizioni di massima potenza.

Le macchine vengono mediamente utilizzate con potenze nell'ordine del 30-80% della potenza massima e in queste condizioni i rendimenti rilevati sono stati inferiori del 15-20% rispetto a quello dichiarato dal costruttore.

A supporto di quanto proposto da questo lavoro, la Commissione ipotizza di stabilire condizioni standard di prova per la misura dell'efficienza dei generatori: a tale proposito il suggerimento che i dati raccolti in questi anni forniscono è di obbligare ad esporre almeno tre differenti rendimenti, misurati al 30%, al 60% oltre al 100% della potenza nominale del generatore.

Bibliografia

- [1] A. Price, M.H. Ross. (1989). Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study. *The Electricity Journal*. July: 40-51.
- [2] B. Leven, C. Weber. (2001). Energy Efficiency in Innovative Industries: Application and Benefits of Energy Indicators in the Automobile Industry. In: 2001 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry Proceedings Volume 1. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), Washington, D.C. pp 67-75.
- [3] C. Galitsky, E. Worrell, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry, An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers, LBNL-50939-Revision, Marzo 2008, 1-81.
- [4] Lincoln Electric Company. (2001). Helmark/Falcon Reaps Significant Savings with Latest Technology Power Sources and Self-Shielded Flux-Cored Electrodes. National Electrical Manufacturers Association (NEMA).
- [5] Boellhoff Group, N.N. Fourth Generation Joins in the 4th Dimension. Boellhoff Press Release, May 26 2010; Image source: Porsche AG.<http://www.boellhoff.de/de/de/unternehmen/news-presse/pressemitteilungen/2010/porsche-panamera.php>
- [6] H.J. Powell, K. Wiemer, Joining technology for high volume manufacturing of lightweight vehicle structures, Proceedings, 29th International Symposium on automotive technology & automation, Florence, Italy, 3-6 June 1996.
- [7] O. Hahn, G. Meschut, S. Suellentrop, V. Janzen, T. Olfermann, Joining Technologies in Hybrid Lightweight Structures (in German), *Leichtbau der Fahrzeugtechnik*, H. Friedrich, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, Germany, 2013, p 622–662
- [8] B. Bartczak, J. Mucha, T. Trezepiecinski, Stress Distribution in Adhesively Bonded Joints and the Loading Capacity of Hybrid Joints of Car Body Steels for the Automotive Industry, *Int. J. Adhesion Adhesives*, 2013, 45, p 42–52.
- [9] P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst, F. Resch, Joining by Forming—A Review on Joint Mechanisms, Applications and Future Trends, *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, 214, p 1062–1093
- [10] S. Busse, M. Merklein, K. Roll, M. Zurn, H. Schubert, Numerical and Experimental Investigations of an Innovative Clinching Process. Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), Dusseldorf, 2011, p 736–741
- [11] H. Schubert, M. Moehring, Flexible material joining technology for tomorrow's innovative lightweight design. Proceedings to Conference Joining in Car Body Engineering 2012, Automotive Circle International/ Vincentz Network Hannover, Bad Nauheim, Germany, 18 April 2012
- [12] <https://www.boellhoff.com/de-en/products-and-services/assembly-technology/high-speed-joining-rivtac.php>
- [13] T. Draht, Joining in the automotive industry—one-sided joining without pre-hole (in German), *Lightweight Design*, Vol 1(6), Dec 2008; Springer, Wiesbaden, Germany (ISSN: 1865-4819), p 20–23
- [14] J. Mucha, The Effect of Material Properties and Joining Process Parameters on Behaviour of Self-Pierce Riveting Joints Made with the Solid Rivet, *J. Mater. Des.*, 2013, 52, p 932–946
- [15] J. Mucha, The Numerical Analysis of the Effect of the Joining Process Parameters on Self Piercing Riveting Using the Solid Rivet, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 14(3), 2013, 444-454.
- [16] M. Miles, S.-T. Hong, C. Woodward, Y.H. Jeong, Spot Welding of Aluminium and Cast Iron by Friction Bit Joining, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2013, 14(6), p 1003–1006
- [17] Y. Li, Z. Wei, Z. Wang, Y. Li, Friction Self-Piercing Riveting of Aluminium Alloy AA6061-T6 to Magnesium Alloy AZ31B, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2013, 135(6), p 061007
- [18] G. Meschut, O. Hahn, T. Olfermann, V. Janzen, Innovative Joining Technologies for Multi-Material Structures, *Weld. World*, 2014, 58(1), p 65–75
- [19] G. Meschut, V. Janzen, M. Matzke, T. Olfermann, Comparison of Innovative Thermal Joining Technologies for Joining Ultra-High- Strength Steels in Multi-Material Structures (in German), *DVS Berichte*, Band 296. DVS Media GmbH, Dusseldorf, Germany, 2013.
- [20] European Aluminium Association (EAA), Aluminium automotive manual, 2013. <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>
- [21] L. Brooke , *Automot. Eng. Int.* 2 (5), 18 (2015)
- [22] Alan I. Taub, A.A. Luo, *MRS Bulletin*, 40 (2015) 1045-1053
- [23] W.J. Joost , *JOM* 64 (9), 1032 (2012).
- [24] “2010 Annual Progress Report: Lightweighting Material” (DOE 2010)
- [25] “Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2017 -- Executive Summary” (EPA-420-S-18-001), <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100TGLC.pdf>.

- [26] R. Heuss, N. Müller, W. van Sintern, A. Starke, A. Tschiesner, "Lightweight, heavy impact. How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive" (2012). Report of McKinsey & company
- [27] <https://www.autosteel.org/-/media/files/autosteel/great-designs-in-steel/gdis-2012/advanced-high-strength-steel-technologies-in-the-2013-cadillac-ats.ashx>
- [28] Lightweighting Material – 2010 annual progress report of DOE
- [29] M.S. Rashid, B.V.N. Rao, Conference Proceedings Fundamental of Dual-Phase Steels Symp, (1981) 249-264
- [30] ASTM International Standard. A1079 - 2013
- [31] Barbe L. "Physical Metallurgy of P-Alloyed TRIP Steels" PhD Thesis. University of Gent (2005)
- [32] De Moor E., Gibbs P.J., Speer J.G., Matlock D.K., Schroth J.G., Iron Steel Technol. 7 (2010) 133–144.
- [33] Dal sito internet di WorldAutoSteel (<https://www.worldautosteel.org>)
- [34] European Aluminium Association (EAA), Aluminium in cars unlocking the lightweighting potential, aprile 2013.
- [35] L. David, MATERIAL CHALLENGES IN DESIGNING THE CAR OF THE FUTURE, settembre 2017.
- [36] ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_it
- [37] https://www.intlmag.org/page/sustain_eu_study report commissioned by the International Magnesium Association (IMA) carried out independently by Oakdene Hollins
- [38] G. Barbieri, F. Cognini, U. De Angelis, G. De Santis, D. Mirabile Gattia, M. Moncada, TECNICHE DI EFFICIENTAMENTO DEI PROCESSI DI SALDATURA INDUSTRIALE, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2017, (2018)
- [39] Y. J. Chao, «Ultimate strength and failure mechanism of resistance spot weld subjected to tensile, shear, or combined tensile/shear loads,» J. Eng. Mater. - T. ASME, vol. 125, pp. 125-132, 2003.
- [40] Chan-Joo Lee, Sang-Kon Lee, Byung-Min Kim, Dae-Cheol Ko, Failure mode dependent load bearing characteristics of mechanical clinching under mixed mode loading condition, Procedia Engineering, Volume 207, 2017, Pages 938-943

ACRONIMI

- AHSS** Advanced High Strength Steel
- BPP** beam product parameter
- CRF** Centro Ricerche Fiat
- DP** dual phase
- FCA** Fiat Chrysler Automobiles
- FDS** Flow Drilling Screw
- FEE** Fattore Efficienza Energetica
- FSW** Friction Stir Welding
- HSLA** High-strength low-alloy steel
- MIG** Metal-arc Inert Gas
- MAG** Metal-arc Active Gas
- RSW** Resistance Spot Welding
- SPR** Self Piercing Rivet
- TIG** Tungsten Inert Gas
- TRIP** transformation induced plasticity

Ringraziamenti:

Si ringrazia il CRF, in particolare i tecnici e ingegneri del Campus Manufacturing di Melfi WCM, per aver fornito supporto per l'esecuzione di prove e rilievi di consumo energetico su impianti di saldatura che riproducono le apparecchiature standard di fabbrica.