



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione dell'efficienza energetica delle tecnologie di saldatura Electron Beam, Laser e arco ad elettrodo infusibile

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

VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DELLE TECNOLOGIE DI SALDATURA ELECTRON BEAM,
LASER E ARCO AD ELETTRODO INFUSIBILE

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

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: "Efficienza energetica nel settore industria"

Obiettivo: Impiego tecnologie elettriche nei processi industriali - Efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
2 STATO DELL'ARTE: ANALISI NORMATIVA E SCIENTIFICA DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NEI PROCESSI DI SALDATURA,.....	7
2.1 INCIDENZA ENERGETICA DEI PROCESSI DI SALDATURA SUI PROCESSI PRODUTTIVI E DIRETTIVE PER IL LORO CONTENIMENTO.....	7
2.2 ANALISI DEI PRINCIPALI PROCESSI DI SALDATURA E DELLE BEST PRACTICES PER L'EFFICIENZA DEI GENERATORI E DEL PROCESSO. ...	11
2.2.1 <i>Definizione di efficienza ed efficienza dei generatori di potenza</i>	11
2.2.2 <i>Processo GTAW</i>	14
2.2.3 <i>Saldatura laser (LBW)</i>	17
2.2.4 <i>Saldatura a fascio elettronico (EBW)</i>	20
2.2.5 <i>Friction Stir Welding (FSW)</i>	21
2.2.6 <i>Accorgimenti da adottare per massimizzare l'efficienza</i>	23
3 CONCETTO DI "EFFICACIA" E DI "EFFICIENZA" DEI PROCESSI DI SALDATURA.	24
3.1 NORMATIVE DI RIFERIMENTO PER LA QUALIFICA DEI PROCESSI DI SALDATURA.....	25
3.2 DEFINIZIONE DEL CONCETTO DI EFFICIENZA ENERGETICA	26
4 ATTIVITÀ SPERIMENTALE	31
4.1 ANALISI DEI GENERATORI TIG, LASER ED EBW ED IDENTIFICAZIONE DEGLI STRUMENTI DI ACQUISIZIONE DATI E DI RILEVAZIONE DELLE ENERGIE.	31
4.1.1 <i>TIG</i>	31
4.1.2 <i>Fascio elettronico</i>	32
4.1.3 <i>Laser</i>	34
4.2 ANALISI E COMPARAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA FRA LA SALDATURA TIG- LASER ED EBW SU ACCIAI DA COSTRUZIONE.	43
4.2.1 <i>Saldatura di acciai da caldareria a elevate prestazioni: confronto fra tecnologia TIG e EBW</i>	43
4.2.2 <i>Saldatura di acciai da costruzioni ad elevate prestazioni: confronto fra tecnologia TIG e Laser</i>	48
4.3 ANALISI E COMPARAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA FRA LA SALDATURA LASER, TIG E FSW SU LEGHE DI ALLUMINIO.....	53
5 CONCLUSIONI.....	57
6 BIBLIOGRAFIA.....	59

Sommario

Il rapporto descrive le attività svolte nell'ambito dello studio relativo alla valutazione dell'efficienza energetica delle tecnologie di saldatura industriali. In particolare, sono state analizzate le tecnologie Electron Beam, Laser e arco ad elettrodo infusibile. Il lavoro riporta sia dati di letteratura che attività sperimentali ed è mirato alla definizione di un regolamento atto alla comparazione dell'efficienza energetica delle varie tecnologie di saldature industriali in modo da poter fornire un valido strumento in grado di guidare l'utenza industriale nella definizione e nella scelta di processi di saldatura ad elevata efficienza energetica. Questo ha ricadute positive sulla competitività industriale del paese ma soprattutto con vantaggi indotti sulla collettività grazie alla riduzione dei consumi energetici del settore che corrispondono al 6% dei consumi della manifattura industriale.

Il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

- Analisi dello stato dell'arte riferito sia a normative/direttive nazionali e comunitari sia a letteratura scientifica relative al tema dell'efficienza energetica nei processi di saldatura;
- Definizione del Concetto di "Efficacia" e di "Efficienza" dei processi di saldatura;
- Attività Sperimentale relativa allo sviluppo di processi di saldatura "efficaci" con tecnologie TIG, Laser e Electron Beam;
- Studi comparativi dell'efficienza sia misurata che calcolata anche con il processo di saldatura Friction Stir Welding (FSW), quando ammissibile grazie ai dati e sperimentazioni effettuate Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell'Università di Genova (cobeneficiario).

In estrema sintesi, non risultano attualmente esistenti regolamenti specifici per la verifica dell'efficienza energetica dei generatori o dei processi di saldatura industriali ma solo direttive di riferimento a cui gli utilizzatori ed i costruttori sono invitati a seguire come le direttive sull'EcoDesign (Energy-related Products (ErP) Directive 2009/125/EC).

A livello di letteratura scientifica esistono molti lavori che si occupano separatamente di singoli processi o che in alcuni casi portano a comparazioni basate su principi di produttività e riduzione dei costi che solo parzialmente sono collegati all'analisi dell'efficienza elettrica del processo.

Risulta quindi estremamente interessante un approccio collegato direttamente alla valutazione dell'efficienza energetica del consumo alla presa per realizzare una giunzione che garantisca pari efficacia meccanica per giunzioni tipo, (5 e 10 mm di spessore) per identificare condizioni standard per la valutazione e la definizione dei etichette energetiche per vari materiali con vari tipi di generatori e processi.

L'attività sperimentale ha riguardato la definizione delle condizioni di efficacia e quindi di qualifica dei processi dal punto di vista strutturale, e successivamente l'analisi sotto l'aspetto energetico dei processi di saldatura e dei relativi generatori. Tale analisi ha portato alla definizione delle apparecchiature necessarie per effettuare le misure dei consumi alla presa da un lato e dell'input teorico sui componenti.

In particolare, per i processi di saldatura laser è stato acquisito un apposito strumento per valutare sia la quantità che la qualità dell'energia messa a disposizione, ed è stato potenziato il generatore laser esistente passando da una potenza nominale massima di 2000W a 4000W per permettere una maggiore finestra di parametri operativi.

Una serie di test di saldatura sono stati effettuati per identificare le condizioni di efficacia di giunzione. Nelle condizioni di giunto efficace sono stati analizzati sotto il punto di vista energetico i giunti realizzati.

Al fine di realizzare una facility di prova sono state effettuate una serie di azioni inerenti l'adeguamento di un locale con sistemi di aspirazione, di confinamento ed areazione degli ausiliari e, con il supporto del Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", è stato sviluppato un sistema di acquisizione dei dati relativi ai vari tipi di assorbimento energetico.

I risultati mostrano senza ombra di dubbio come dal punto di vista energetico le tecnologie di saldatura ad elevata densità di energia consentano di raggiungere maggiore efficienza energetica. Questo è legato in primis alla maggiore efficienza di penetrazione e di fusione con conseguente riduzione delle perdite per conduzione legata alla distribuzione cilindrica dell'energia nel pezzo. Inoltre, in questi ultimi anni l'efficienza energetica dei generatori laser a stato solido, siano essi in fibra, disco o a diodo sono aumentata di un ordine di grandezza passando dal 2-5 % delle sorgenti CO₂ e Nd Yag di inizio secolo al 35-50% delle attuali sorgenti.

Per quanto riguarda la saldatura delle leghe di alluminio, la tecnologia Friction Stir Welding sembra da un lato promettere le migliori performance in termini di qualità e quindi di efficacia di giunzione dall'altro un consumo energetico che, in un'analisi di primo grado che tiene conto solo dei consumi diretti di energia, si presenta, almeno per le leghe di alluminio, come un processo efficiente alla stregua della saldatura laser.

Sostanzialmente quindi queste tecnologie di saldatura meno convenzionali promettono processi a più alta efficienza energetica a scapito del costo di impianto più elevato.

1 Introduzione

Negli ultimi anni grossi sforzi sono stati effettuati per introdurre interventi di miglioramento dell'efficienza energetica nel settore industriale. Tuttavia questi interventi molto spesso si sono bloccati all'edificio non intervenendo direttamente nell'aggiornamento e sostituzione dei processi di produzione dove è più complicato intervenire anche per aspetti culturali (tradizionalismo dei settori).

L'analisi dei processi industriali, con particolare riguardo alla sostituzione di tecnologie ed apparecchiature, che oltre ad essere più efficienti elettricamente risultino più efficienti nel processo, permetterebbe di introdurre notevoli vantaggi in termini di efficienza elettrica del tessuto produttivo industriale Nazionale.

In particolare, uno dei processi più utilizzati nella fabbricazione, dalle piccole carpenterie metalliche, al settore degli elettrodomestici, del navale, dell'automotive fino alla costruzione dei grandi impianti civili ed industriali, è certamente la saldatura.

I processi di saldatura sono realizzati principalmente sfruttando processi ad arco elettrico che trasformano l'energia elettrica a livelli di tensione e corrente sicure dal punto di vista dei rischi elettrici per l'incolumità degli addetti e comunque atte a fondere il materiale per effetto Joule. Per questa tecnologia significa che fissato/ estremizzato il rendimento di trasformazione dell'energia elettrica con i moderni sistemi inverter, il modo con cui questa energia viene trasformata in calore per fondere i lembi dei materiali e realizzare la giunzione definisce il rendimento di saldatura che possiamo intendere in prima approssimazione come il rapporto fra il volume di materiale fuso rispetto all'energia impiegata.

I processi di saldatura industriali in generale vengono scelti per vari fattori: in primis per le specifiche caratteristiche e la qualità del processo in funzione della particolare applicazione (Efficacia), il secondo fattore è il costo ed il terzo l'impatto ambientale. Nella moderna ingegneria di fabbricazione, gli aspetti economici ed ambientali sono legati strettamente con la riduzione dei consumi energetici. L'aggiornamento dei generatori e/o la sostituzione della tecnologia di saldatura, associate ad una maggiore comprensione ed ottimizzazione di processi mirati oltre che all'efficacia, in termini di caratteristiche qualitative, anche all'efficienza energetica può risultare come al linea guida da seguire per conseguire importanti risultati sul risparmio energetico nel settore industriale manifatturiero.

La definizione di efficienza complessiva del processo di saldatura risulta tuttavia assai più complessa e dipendente da vari fattori (spessori, materiali, fattore di forma). In generale, i processi a maggiore concentrazione del calore e minore apporto termico ed in particolare i processi di saldatura Key Hole come ad esempio la saldatura laser e plasma, riducono notevolmente le perdite di calore permettono di ottenere i processi più efficienti. La differenza di rendimento è ancora più marcata se viene associata un'analisi di secondo grado relativa all'intero processo industriale di fabbricazione saldata che viene seguito da processi di raddrizzatura e verniciatura che risultano estremamente più semplificati o nulli in termini di tempi e quindi di energia addizionale impiegata nella fabbricazione completa dei beni.

Tuttavia, non esiste allo stato attuale la definizione di condizioni standard di comparazione di apparecchiature di saldatura ad arco e a maggior ragione una procedura di comparazione normalizzata per comparazioni fra processi che sfruttano differenti fonti di energia come tools per la saldatura (Corrente, attrito, fotoni etc.).

Il lavoro che si intende svolgere a termine è mirato all'individuazione di un sistema di comparazione normalizzato dei consumi a parità di efficacia del processo con l'intento di portare alla definizione di un sistema di *labelling* differenziato per spessori e materiali ma armonizzato fra le varie possibili tecnologie applicabili che possa portare l'imprenditore a scegliere consapevolmente ed oggettivamente il sistema di saldatura a minor consumo energetico per la specifica applicazione.

2 Stato dell'arte: analisi normativa e scientifica dell'efficienza energetica nei processi di saldatura,

Lo stato dell'arte è stato effettuato valutando due elementi:

- lo stato delle normative, degli studi e delle direttive governative sull'efficienza energetica nel settore dei processi di manifattura per saldatura;
- la valutazione dell'efficienza energetica dei differenti processi, con particolare riguardo a quelli presi in considerazione nell'ambito di questo PaR che ha riguardato la tecnologia ad arco ad elettrodo infusibile (TIG), Laser (LBW), Electron Beam (EBW), e Friction Stir Welding (FSW) con la contribuzione del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti dell'Università di Genova.

La pubblicazione di norme, alcune che risalgono ai primi anni 70, dimostra l'interesse a livello internazionale nello studio di processi a maggiore efficienza nel campo delle saldature. Come riportato di seguito però mancano, nonostante siano presenti studi in letteratura sulla tematica, norme, direttive, regolamenti che inquadrino la tematica in maniera organica e che indirizzino verso l'utilizzo di processi e di strumentazioni più efficienti dal punto di vista energetico.

La norma ISO 2401:1972: "Covered electrodes – Determination of efficiency, metal recovery and deposition coefficient" descrive il metodo di misura dell'efficienza, recupero di metallo e coefficienti di deposizione, nel processo di saldatura manuale ad arco a elettrodi rivestiti e introduce alcuni parametri quali l'efficienza nominale dell'elettrodo, l'efficienza effettiva dell'elettrodo e l'efficienza di deposizione. La norma è stata rivista e risulta ancora in vigore nel 2016. Tuttavia non tratta di efficienza energetica ma efficienza di deposizione in generale intesa come rapporto fra il materiale depositato e il materiale totale dell'elettrodo. Come ben noto non tutto l'elettrodo si trasforma in materiale depositato per la saldatura, ma una parte, per quanto piccola, non partecipa al processo di saldatura in quanto resta nella pinza di saldatura. Il rivestimento di vario genere serve a proteggere il bagno di fusione ma genera una scoria che va rimossa prima di iniziare lo strato successivo di riempimento.

Nel 1991 il Bureau of Indian Standards pubblica una norma dal titolo "Covered manual metal arc welding electrodes – Determination of efficiency, metal recovery and deposition coefficient" che recepisce completamente la norma ISO del 1972. Come è riportato nella norma, questo standard è stato formulato per aiutare i produttori e facilitare l'uso di elettrodi rivestiti in saldatura.

E' ovvio che indirettamente queste norme sono correlate anche ad una maggiore efficienza energetica complessiva del processo ed è altresì noto come anche per altri tipi di tecnologie ad Arco esistono vari accorgimenti che permettono di incrementare il fattore di deposizione a parità di parametri di saldatura e quindi di conseguenza si ottengono processi più efficienti anche a livello energetico. Lo stesso si può dire per quanto riguarda i vari marchi registrati da differenti produttori chi generatori ad arco che in qualche modo determinano una variante del processo base e che promettono mediamente produttività maggiore e di conseguenza maggiore efficienza energetica. Come anticipato nell'introduzione non esiste tuttavia una valutazione di terza parte e duna direttiva specifica sulla valutazione dell'efficienza energetica ne dei generatori tradizionali ne di quelli innovativi che forniscano uno strumento di valutazione e di comparazione immediato ed oggettivo.

2.1 Incidenza Energetica dei processi di saldatura sui processi produttivi e direttive per il loro contenimento.

Per quanto riguarda le direttive e gli studi, i principali documenti analizzati sono la direttiva europea EuP 2005 (Direttiva 2005/32/CE Energy-using Products) e la ErP Energy-related Products (ErP) Directive 2009/125/EC. Sulla base della prima, che è stata adottata dai paesi membri e trasposta in legge nazionale nell'agosto 2007 sono stati effettuati vari studi, fra cui quello commissionato alla EPTA Greca (EPTA 2007: 'Study for preparing the first working plan of the EcoDesign Directive'. Report for tender No. ENTR/06/026, 2007).

Successivamente la EuP è stata sostituita con la ErP Energy-related Products (ErP) Directive 2009/125/EC.

Questa direttiva– anche nota come Eco-design – è una riformulazione della EuP ed è di fatto una direttiva quadro che attraverso specifici regolamenti attuativi regolamerà i requisiti di Eco-design per tutti i prodotti che utilizzano energia, eccetto per quelli destinati al settore dei trasporti. Tale direttiva rappresenta la più importante iniziativa intrapresa dall'UE per migliorare **l'efficienza energetica del 20% entro l'anno 2020**.

Nel documento BAT (Best Available Techniques) della Comunità Europea del 2009 intitolato “Energy Efficiency” vengono evidenziati alcune “migliori tecnologie” che consentono di ottenere sistemi, processi o attività più efficienti energeticamente. Nel caso delle attrezzature per saldatura viene dato risalto al controllo della presenza di armoniche generate dal sistema di fornitura di energia. Infatti attrezzature elettriche con carichi non lineari presentano armoniche, ovvero la presenza di distorsioni nell’onda sinusoidale di alimentazione. In questo caso la soluzione è l’utilizzo di filtri per eliminare o limitare le armoniche. Il documento richiama alcune norme europee in merito all’attenuazione della formazione di armoniche come metodo per implementare il fattore di potenza, quali la EN 61000-3-2 e la EN 61000-3-12.

La Tabella 1 riporta il consumo finale di elettricità sotto differenti scenari per l’intero settore europeo della saldatura negli anni a venire. Lo scenario BAT (Best Available Technology) è stato calcolato considerando il potenziale di miglioramento per gli impianti di saldatura attraverso la combinazione di tre opzioni:

- efficienza dei generatori di potenza della saldatura ad arco del 85% piuttosto che del 75%.
- 10% di risparmio di gas attraverso un migliore controllo del processo.
- consumo di potenza a macchina ferma inferiore a 10 W.

Nel caso del BAU (Business As Usual), il consumo elettrico sarà costante nei prossimi anni, perché non sono previsti cambi nello stock degli apparecchi di saldatura [1].

Tabella 1- Attrezzature per saldatura – Consumi elettrici finali (in TWh) nel tempo per diversi scenari

	2012	2016	2019	2022	2025	2030	2040
Business as Usual (BAU)	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99
Mandatory ecodesign requirements (MER)	3.99	3.96	3.88	3.79	3.79	3.79	3.79
Best Available Technology (BAT)	3.99	3.92	3.72	3.51	3.51	3.51	3.51

Le regole di MER dovrebbero essere definiti entro il 2016 per gli anni successivi sulla base di Policy Options (POs), fra queste la promozione dei sistemi di saldatura automatizzati.

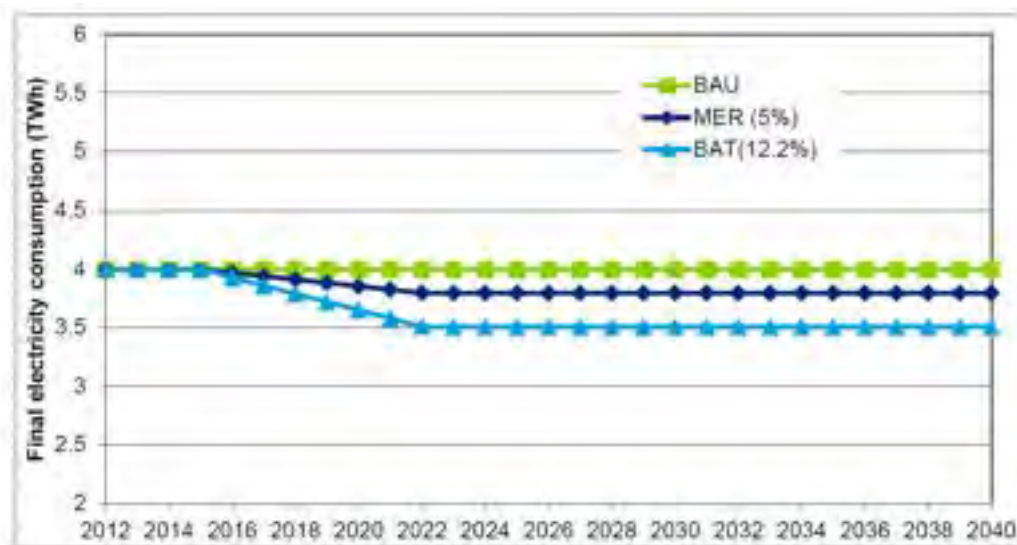


Figura 1:- Consumo di elettricità complessiva del settore della saldatura ipotizzando differenti scenari [1].

La norma IEC 60974-1 “Arc welding equipment – Part 1: Welding power sources” del 2012 specifica requisiti di sicurezza e prestazioni dei sistemi di alimentazione per saldatura ad arco e sistemi di taglio al plasma. Questa norma è stata recepita in Italia come norma CEI EN 60974-1 ed è stata pubblicata nel marzo del 2013. In particolare, nell’Annex M, vengono riportate alcune indicazioni in termini di efficienza. Vengono indicati i dati che i produttori devono dare al cliente, quali il consumo di energia al massimo carico, consumo a macchina accesa ma inattiva, consumo in standby etc. Inoltre sono specificati i metodi da seguire per l’effettuazione delle misure per assicurare ripetibilità e accuratezza.

Uno studio del Fraunhofer-Institut, “Machine tools and related machinery”, condotto nell’ambito delle consultazioni che hanno portato alla redazione della direttiva “Ecodesign of Energy-related Products (ErP)” 2009/125/EC (che ha sostituito la precedente direttiva EuP 2005/32/EC), individua e suggerisce le strategie per migliorare le prestazioni ambientali di prodotti, che usano energia per tutta la loro vita utile, da porre in atto nella fase di progettazione, la quale si deve basare sulla metodologia della Commissione Europea per questa tipologia di prodotti (MEEuP). Ovviamente tra le macchine utensili riportate nello studio ci sono le attrezzature per le saldature. Attualmente sono presenti nel territorio EU a 27 circa 7.1 milioni di macchine per saldatura e brasatura delle quali circa 1.5 milioni sono stazionarie. Il consumo stimato delle macchine per saldatura è pari a 46 PJ (10^{15} J) per anno, superiore a quello dell’industria della lavorazione del legno e del taglio. Il rapporto continua stimando gli effetti di interventi per il miglioramento dell’efficienza nel campo industriale. Mediante interventi sulle macchine per saldatura è possibile un risparmio potenziale di energia totale del 12.2% con riferimento al loro ciclo di vita .

La Commissione Europea ha emanato il Regolamento 21 maggio 2014, n. 548/2014/UE per l’attuazione della Direttiva 2009/125/CE ErP, relativa all’istituzione di un quadro per l’elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all’energia. Lo studio alla base della Direttiva Europea, ha mostrato che l’aspetto più rilevante che può essere influenzato dalla progettazione dei prodotti connessi all’energia è l’energia nella fase di esercizio. Per questo motivo il regolamento definisce i requisiti in materia di progettazione ecocompatibile per l’immissione sul mercato o la messa in servizio di trasformatori con specifici requisiti di rendimento energetico. Il regolamento però non si applica, tra i vari campi, al caso di trasformatori per saldatrici, progettati specificatamente per essere utilizzati in apparecchiature per saldatura ad arco o apparecchiature per la saldatura a resistenza [2].

La Commissione Europea ha creato un gruppo di lavoro il quale ha realizzato un documento per l’“Ecodesign Consultation Forum” sulle macchine utensili e similari, nella forma di “discussion notes”, del 5 maggio 2014, in merito al tema efficienza energetica nel campo delle macchine utensili (lavorazione dei

metalli, del legno, della pietra, dei materiali ceramici e attrezzature per la saldatura). In questi documenti vengono riportate alcune indicazioni che, nel campo della saldatura, sono ancora al livello di buona pratica. Nel documento è riportato come il consumo totale stimato di elettricità nella Comunità Europea associato alle macchine utensili si aggiri intorno ai 67 TWh per anno. Di questi, il 6% (4 TWh) è rappresentato dalle attrezzature per le saldature.

Il documento fa riferimento inoltre anche al gas protettivo che presuppone una certa quantità di energia per la produzione (separazione dall'aria, estrazione, compressione e trasporto).

Come riportato nella tabella in basso, alcune misure di efficientamento, che rientrano nelle "policy options" PO-1 (Mandatory Ecodesign requirements) e PO-4 (Good Design Practice Checklist), riguardano l'utilizzo di apparati di alimentazione più efficienti (inverter) e sistemi che presentino bassi consumi nella fase di inattività ("idle").

Tabella 2: Misure di efficientamento previste per i generatori ad arco in funzione delle Policy Option [3]

Technical measure	Market	Base Case scope	Exclusions	Technical Constraints
More efficient welding power sources	Welding machinery	Base Case 9	Does not apply to hobby type welding equipment (which has very low duties)	The cost of moving from transformer to inverter topology is disproportionate for the hobby type welding equipment sector, where equipment will only be used for a very short time.
Limits on idling power consumption	Welding machinery	Base Case 9	Does not apply to hobby type MMA ¹ welding equipment.	The cost of moving from transformer to inverter topology is disproportionate for this sector, where equipment will only be used very briefly per year.

Le macchine utilizzate in ambito hobbistico non rientrano nel campo di applicazione di queste misure di efficientamento.

La tabella seguente riporta le caratteristiche tecniche che dovrebbero essere obbligatorie delle attrezzature per saldatura e che quindi dovrebbero essere considerate nella fase di progettazione da parte delle aziende produttrici.

Tabella 3: Caratteristiche minime previste per i nuovi generatori ad arco [3]

Measure	Tier 1 (2017)	Tier 2 (2019)	Tier 3 (2021)
Minimum inverter efficiency of machinery (3 phase)	75%	80%	85%
Minimum inverter efficiency of machinery (1 phase)	70%	75%	80%
Maximum idling power	150W	70W	50W

L'efficienza in questo caso è definita come rapporto in percentuale tra energia in uscita e in ingresso. Questi dati sono stati elaborati a partire dai dati forniti dall'Associazione Europea Saldature. Tra il 2017 e il 2021 i consumi energetici a macchina ferma dovranno essere ridotti di 3 volte mentre l'efficienza dovrà essere

implementata di un valore prossimo al 15%. Alcune attrezzature sono escluse dall'applicazione di queste specifiche, in particolare le macchine per saldatura ad arco sommerso, con correnti superiori a 600 A, che presentano un volume di vendite basso, inferiore alle 800 unità per anno, e le macchine per uso hobbistico (che rientrano nella norma EN 60974-6), le quali vengono utilizzate per poche ore l'anno e che richiederebbero la sostituzione con tecnologie ad inverter. Per gli aspetti legati al processo di standardizzazione lo stesso documento fa riferimento all'Annex M della norma già citata, IEC/EN 60974-1.

Come già anticipato, ulteriori indicazioni vengono riportate nel documento della Comunità Europea, in merito all'efficientamento energetico nella forma di norme di buona pratica [3]:

- Ottimizzazione della fornitura del gas di protezione durante la saldatura:
 - o Utilizzare flussimetri regolabili;
 - o Ottimizzare i settaggi del sistema in pressione;
 - o Calibrazione dei flussimetri;
 - o Minimizzare il volume presente tra la punta della torcia e la fornitura del gas;
 - o Utilizzo di regolatori di gas per permettere al saldatore di impostare piccoli flussi;
- Manutenzione sulle linee gas per prevenire danni e perdite;
- Disponibilità delle parti di ricambio: almeno per più di 5 anni;
- Prodotti più longevi: aggiornamento del software; raccomandazioni sulla manutenzione preventiva sono già inclusi in diverse norme EN;
- Fine vita dei prodotti e smaltimento: progettazione che preveda un rapido disassemblaggio, in particolare accesso alle componenti elettroniche e alle batterie se presenti.

Secondo quanto riportato in una relazione dell'ANASTA (Associazione Nazionale Aziende Saldatura Taglio e Tecniche Affini), nell'edizione 5 della norma EN60974-1 ed. 5, la cui pubblicazione è prevista per il mese di giugno 2017, verrà inclusa una procedura per la misura dell'efficienza energetica delle saldatrici [4].

2.2 *Analisi dei principali processi di saldatura e delle best practices per l'efficienza dei generatori e del processo.*

2.2.1 *Definizione di efficienza ed efficienza dei generatori di potenza*

L'obiettivo del presente studio è mettere a punto un protocollo con delle procedure operative che consentano di ridurre i consumi energetici nei processi industriali di saldatura e, di conseguenza, i relativi costi e l'impatto ambientale. Perché ciò sia possibile, oltre a ridurre i consumi elettrici, è certamente necessario migliorare la sicurezza dei processi, ridurre gli scarti di materiale e ottimizzare la qualità delle giunzioni realizzate in termini di microstruttura e resistenza meccanica.

Nella sua accezione generale, l'efficienza totale del processo di saldatura può essere definita come il rapporto fra la potenza finale effettivamente impiegata per la realizzazione della giunzione e la potenza iniziale messa a disposizione dalla rete elettrica e dagli eventuali servizi ancillari. Tenendo conto del consumo di potenza lungo tutta la linea, tale rapporto sarà certamente inferiore all'unità. Pertanto, l'efficienza totale è data dal prodotto di tre diversi fattori:

$$\eta = \eta_{\text{gen}} * \eta_a * \eta_m$$

dove η_{gen} è l'efficienza del generatore di potenza (tiene conto delle perdite di potenza a causa della generazione del calore all'interno della stessa unità), η_a è l'efficienza di trasferimento dell'energia al fuso (tiene conto della potenza non direttamente trasferita al bagno di saldatura) ed η_m è l'efficienza della procedura di saldatura, ovvero del processo di fusione in sé. Quest'ultima tiene conto delle effettive perdite di calore nel giunto e quantifica la frazione netta di calore di apporto fornita al pezzo da saldare

adoperata per generare il fuso. Essa dipende dai parametri di processo (per esempio, dimensione e forma del giunto, numero di passate, velocità e rate di deposizione), dalle proprietà termomeccaniche, chimiche e fisiche del materiale, dalle condizioni ambientali e dal tipo di sorgente di energia utilizzata. La valutazione dei vari parametri coinvolti è molto complessa, dal momento che intervengono diversi fattori e sono spesso richieste misurazioni in-situ di varie grandezze.

Un approccio semplificato tiene essenzialmente conto di due fattori: l'efficienza della procedura di saldatura e l'efficienza della sorgente di energia, ossia il rapporto fra la potenza trasmessa attraverso il mezzo (arco elettrico, laser, fascio elettronico, ecc.) e il consumo di potenza lungo tutta la linea. Nel seguito, per i diversi tipi di processi oggetto del progetto discuteremo nel dettaglio le procedure e le formule per il calcolo dell'efficienza [5] [6].

Un'analisi dettagliata certamente merita l'efficienza del generatore di potenza. L'efficienza del sistema di alimentazione indica la quantità di energia che è effettivamente fornita al processo di saldatura. Nel caso della saldatura ad arco, l'alimentatore è progettato per ridurre la tensione d'ingresso a valori compatibili con il processo (20-80 V). In alcune applicazioni l'energia è fornita mediante motori a combustione interna, notoriamente caratterizzati da perdite elevate a causa del riscaldamento delle apparecchiature, che determinano un'efficienza di circa il 35 %, mentre l'efficienza dei sistemi con tiristore rettificatore può raggiungere il 75 % a pieno carico. I sistemi tradizionali sono basati sull'utilizzo di trasformatori convenzionali, in cui la corrente è rettificata in modo da ottenere corrente continua. Tali sistemi sono generalmente pesanti ed ingombranti. Inoltre, richiedono un elevato costo di design, pesanti unità di raffreddamento e, nel complesso, non consentono un controllo ottimale dell'arco di saldatura.



Figura 2:- Sistemi di alimentazione per saldature ad arco: 1) alimentazione a combustione interna; 2) sistema con tiristore raddrizzatore; 3) sistema a inverter.

I notevoli progressi in ambito elettronico e la diffusione della tecnologia basata sull'utilizzo degli inverter hanno apportato notevoli benefici in termini di efficienza dei generatori di potenza. Nei generatori a inverter AC/DC, la corrente alternata a 50-60 Hz proveniente dalla rete elettrica viene prima rettificata in corrente continua e successivamente inviata alla sezione inverter del sistema di alimentazione, che la converte in corrente alternata e la pulsa ad elevata frequenza (20-80 kHz). Questa corrente continua pulsata a elevata tensione viene inviata al trasformatore di potenza che, a sua volta, la trasforma in corrente continua a bassa tensione (10-80 V). Al fine di controllare l'intero processo di saldatura, i circuiti elettrici di controllo attuano il sistema inverter in modo da manipolare la potenza in uscita e raggiungere le caratteristiche volute, cioè corrente costante o tensione costante oppure corrente alternata o corrente continua. Gli inverter operano a frequenza molto elevata rispetto ai valori standard, ciò implicando un maggiore fattore di potenza, minori perdite, quindi maggiore efficienza e minori costi operativi. Generalmente è dimostrato che, quando il generatore è utilizzato alla massima potenza, l'efficienza migliora. La Figura 1 mostra alcuni generatori di potenza utilizzati per la saldatura ad arco.

Un fattore indicativo dell'efficienza di un generatore è dato dalle perdite misurate a circuito aperto, ovvero dall'energia consumata dal generatore quando esso è acceso ma non impegnato nel processo di saldatura. Nel caso di un sistema a inverter, quando la macchina è ferma, la potenza elettrica non viene fornita e le ventole di raffreddamento si attivano solo quando è necessario, evitando ulteriore consumo elettrico. È stato riportato che le nuove unità a inverter consentono di risparmiare una porzione di energia dal 10 al 40 % rispetto ai sistemi tradizionali. Un esempio è riportato nel grafico della Figura 2. In un altro studio si è

visto che, considerando l'efficienza di un alimentatore del tipo inverter pari al 75-85 % e un carico di 500 A e 40 V, le perdite quantificate sono dell'ordine di 3-5 kW [7].

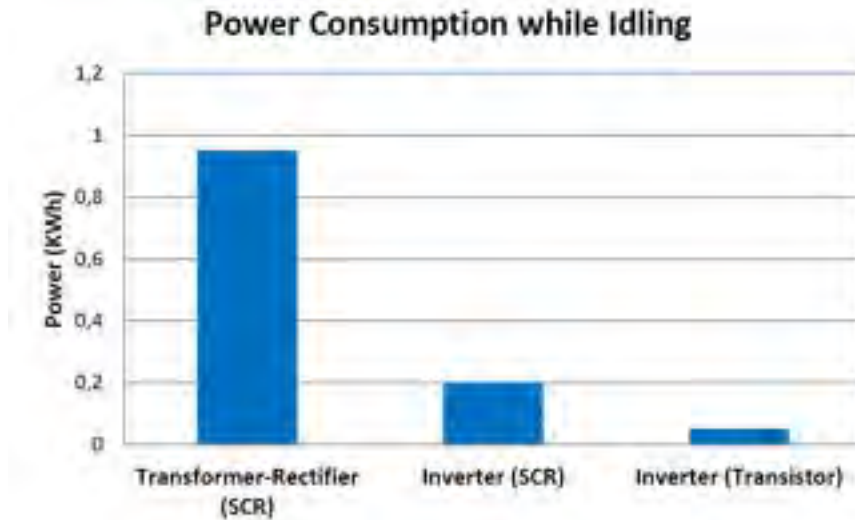


Figura 3 – Consumo di potenza a macchina ferma per differenti tipi di unità di potenza per saldatura.

Le unità di potenza con inverter sono più compatte, leggere e portatili. Consentono un migliore controllo del processo e una maggiore produttività. Per esempio, i saldatori trifase ad inverter della Miller hanno un'efficienza media dell'80 %, arrivando anche a punte dell'85 %. La speciale funzione "energy saving" contribuisce a evitare gli sprechi, attivando le alimentazioni ausiliarie, la ventilazione del generatore e il raffreddamento della torcia solo quando è richiesto. In ambienti sporchi o polverosi ciò riduce la presenza di contaminanti volatili, mantenendo i componenti interni puliti e riducendo i tempi di manutenzione [8]. Si hanno inneschi perfetti e un controllo ottimale dell'arco e del bagno di saldatura. In tal modo si ottengono saldature di estrema precisione, risultati ripetibili nel tempo, flessibilità e semplicità d'uso, unite ad una elevata stabilità dell'arco elettrico [9]. Riguardo al monitoraggio, il sistema E2MAS consente di misurare alcuni parametri come corrente e tensione di saldatura, il rate di alimentazione del filo di riempimento, la portata del gas di protezione, la velocità di saldatura, la temperatura di preriscaldamento, il calore di input fornito al giunto [10].

I sistemi a inverter che utilizzano i transistor hanno un *rate* di conversione di energia molto elevato e forniscono dei tempi di risposta molto rapidi e frequenze più elevate rispetto ai sistemi convenzionali a transistor consentendo, nel caso della saldatura ad arco, migliore manipolazione della corrente e della tensione, migliore bilanciamento dell'arco e trasferimento del metallo fuso. Ciò si traduce in superiore durata degli elettrodi, riduzione degli stress nei circuiti e nei componenti, minore consumo di energia, minori costi di investimento, possibilità di alimentazione trifase e di impiego in zone geografiche soggette a fluttuazioni o sottodimensionamento. Con i sistemi moderni è possibile ottimizzare il processo di saldatura producendo forme d'onda pulsate. L'uso di circuiti di *switching* ad alta velocità consente di ridurre le turbolenze nell'arco e di ottenere elevate velocità di deposizione. La Tabella 1 riporta una comparazione fra i generatori di potenza tradizionali e quelli ad inverter, mentre la Tabella 2 riporta i valori di efficienza corrispondenti a diversi tipi di generatori di potenza per saldatura ad arco [11] [12].

Tabella 4 -Comparazione di unità di potenza tradizionali e ad inverter.

Power Sources	Traditional	Inverter
Power Consumption	High	Low
Electrical Efficiency	Poor	Good
Size	Large	Compact
Weight	More	Less
Frequency of Operations	Low	High
Running Cost	High	Low
Cost of Production	High	Low
Labor Cost	High	Low
Material Cost	High	Low
Number of Tappings in Transformer	More	None
Design	Simpler	Complex
Control of metal transfer mode	Poor	Better
Arc Stability	Low	High

Tabella 5 – Efficienza di diversi tipi di generatori per la saldatura ad arco.

Technology	Inverter single phase	Inverter three phase	Thyristor or Chopper three phase	Transformer single phase	Transformer three phase	Rotating type
Mean efficiency (%)	78	81	73	68	71	43

I sistemi di controllo digitali mediante processori di segnali incorporati assicurano una performance elevata e consentono di monitorare l’arco in tempo reale, al fine di correggere eventuali irregolarità ivi presenti. Mediante l’uso di algoritmi è possibile attuare una manipolazione automatica dei parametri di saldatura e ottimizzare il funzionamento dei generatori di potenza basati su inverter. [13] [14]. Nel complesso, l’utilizzo dei moderni generatori consente di adeguarsi agli standard internazionali (EN 61000-3-12).

Da quanto riportato scaturisce che, al fine di massimizzare l’efficienza dei processi di saldatura, è necessario utilizzare delle unità di potenza efficienti.

Prima di introdurre le procedure e le formule per la valutazione dell’efficienza, è utile introdurre i processi di saldatura maggiormente utilizzati in ambito industriale e oggetto del presente progetto.

2.2.2 Processo GTAW

La saldatura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ha avuto un ruolo molto importante nella realizzazione di saldature su lamiere di alluminio. L’arco elettrico si forma tra un elettrodo non consumabile di tungsteno e il componente da saldare, in un’atmosfera inerte di argon o elio. Un preciso controllo dell’arco consente di ottenere saldature senza schizzi e di buona qualità; quando si usa un elettrodo consumabile, il saldatore non deve bilanciare l’apporto di calore dell’arco, poiché il metallo è depositato dall’elettrodo. Se è richiesto l’uso del materiale d’apporto, esso viene aggiunto separatamente alla zona fusa. Se il materiale d’apporto è direttamente utilizzato senza alcun trattamento, si parla di saldatura a filo freddo (cold-wire GTAW), se è preriscaldato di saldatura a filo caldo. In tal caso, si ha un maggior rate di deposizione, sebbene il sistema abbia un costo addizionale rispetto al precedente.

Il generatore di potenza deve fornire corrente costante, sia alternata che continua. Un generatore di corrente costante è essenziale per evitare che si raggiungano correnti troppo elevate quando l’elettrodo è cortocircuitato sulla superficie del pezzo. Ciò può accadere o durante l’avviamento dell’arco o, inavvertitamente, nel corso della saldatura. Se si usa un generatore flat a basso voltaggio, il contatto tra l’elettrodo e la superficie del pezzo va assolutamente evitato, per non incorrere nella fusione dell’elettrodo stesso o nel danneggiamento della sua punta. In corrente continua, essendo il calore dell’arco distribuito approssimativamente per 1/3 al catodo e per 2/3 all’anodo, l’elettrodo deve sempre avere polarità

negativa per prevenire il surriscaldamento e la fusione. Tuttavia, quando il catodo è sul pezzo, un elettrodo con polarità positiva ha il vantaggio di ripulire la superficie da eventuali contaminazioni di ossido. Per questa ragione la corrente alternata si usa quando i materiali da saldare hanno uno strato superficiale tenace di ossido, come nel caso dell'alluminio. La Figura 3 riporta uno schema del processo GTAW.

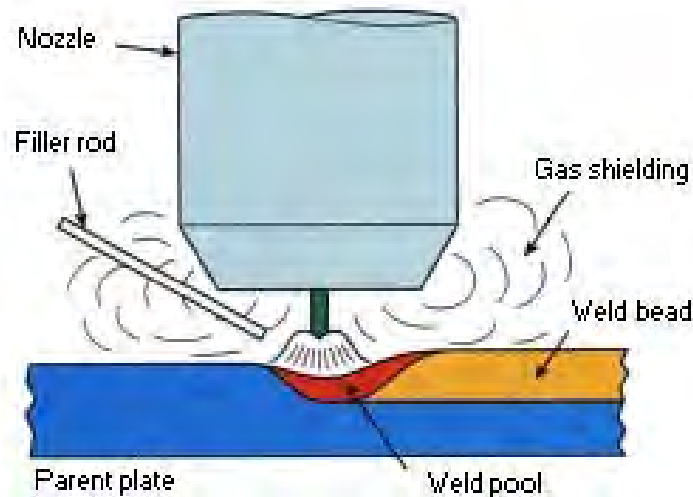


Figura 4 - Schematizzazione del processo di saldatura ad arco.

L'arco può essere avviato "graffiando" la superficie e così formando un cortocircuito. Solamente quando il cortocircuito viene interrotto, la corrente principale di saldatura inizia a fluire. Il modo più comune di avviare l'arco per la saldatura GTAW è l'uso dell'alta frequenza: questa tecnica consiste nella creazione di scintille ad alto voltaggio (diverse migliaia di Volt) con durata di pochi microsecondi che ionizzano il gap tra l'elettrodo e il pezzo. Una volta formata la nube di elettroni/ioni, la corrente può fluire liberamente. Come riportato nel precedente paragrafo, l'efficienza totale del processo è data dal prodotto di diversi fattori:

$$\eta = \eta_{gen} * \eta_a * \eta_m$$

dove η_{gen} è l'efficienza del generatore, η_a è l'efficienza dell'arco e η_m è l'efficienza della fusione. Per misurare sperimentalmente η_m per dato processo e per determinati parametri bisogna prima calcolare η_a , che tiene conto della potenza non direttamente trasferita al fuso. Per processi diversi dall'arco di deve tener conto del mezzo di trasmissione del calore. Ora:

$$\eta_a = q_w / q_n,$$

dove q_w è la potenza (J/s) di input trasferita al substrato e q_n è la potenza nominale di input fornita all'arco dalla sorgente di potenza ($q_n = I * V$, dove I è la corrente, V la tensione). Nel caso di corrente sinusoidale si possono usare i valori effettivi di corrente e tensione insieme al fattore di potenza, quando si misura la potenza d'arco, $P = V * I * \cos\phi$. Una migliore stima si ha utilizzando la media aritmetica del valore istantaneo della potenza:

$$P_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i I_i$$

Per alte frequenze: $P_{av} = 1/T \int V(t) * I(t) dt$.

Per misurare q_w si possono adoperare due metodi, diretto e indiretto.

Il primo metodo (calorimetrico) consiste nel misurare l'energia trasferita al substrato $q_w = E_{cal}$ seguendo uno dei seguenti metodi: [15] [16]

- Se nel corso del processo si utilizza acqua di raffreddamento per rimuovere il calore dal substrato, l'efficienza sarà stimata dall'aumento di temperatura e dalla portata dell'acqua.
- Se il pezzo è direttamente immerso in azoto liquido, si misura la perdita di peso dell'azoto dovuta alla vaporizzazione.
- Se la saldatura è effettuata su un piatto posto alla base del calorimetro, l'elettrodo viene ritirato e il coperchio del calorimetro viene chiuso. Il trasferimento di calore totale al pezzo è stimato integrando il segnale fornito dal calorimetro sull'intero tempo di raffreddamento.

Esiste un secondo metodo di calcolo basato su modellazioni e simulazioni numeriche, attraverso la calibrazione di modelli del flusso di calore con i parametri misurati (ad esempio, profondità, area fusa o massima temperatura a una certa distanza dal centro della saldatura).

È stato riportato che circa l'89 % del trasferimento di energia dall'arco è dovuto agli elettroni, il restante 11 % a convezione e irraggiamento e può essere influenzato da una più bassa temperatura della superficie. In sostanza, non dovrebbe avere un effetto molto significativo sull'efficienza d'arco. Naturalmente il metodo calorimetrico può comportare diversi errori, in primis dovuti al metodo di misura di tensione e corrente. In totale, durante la saldatura e il trasferimento di calore si verificano perdite per evaporazione, irraggiamento e convezione. Le perdite per convezione sono state calcolate come

$$P_c = (T - T_0)^{1.25} h A_{bm}$$

dove T è la temperatura della superficie, T₀ è la temperatura ambiente, h è il coefficiente di convezione e A_{bm} è l'area della superficie del metallo base.

Più in generale, le perdite della torcia sono calcolate come

$$q = v \Delta T c_p$$

dove ΔT è la differenza di temperatura (vanno misurate temperatura e portata dell'acqua) e c_p = 4.181 kJ/Kg*K. Questa percentuale di perdite è stata valutata dell'ordine del 5-10 %. Si dovrebbe tenere conto anche delle perdite dovute ad irraggiamento (valore medio ~7 %). Questi valori sono stati ottenuti per un elettrodo di tungsteno WT20 (98% wolfram, 2 % thorium, polarità negativa, tip angle di 60°) di 2.4 mm, potenza della sorgente 400 AC/DC, portata di gas (Ar, Ar+2H₂) di 10 l/min, tensione misurata alla torcia, corrente di saldatura misurata con un elemento Hall.

L'efficienza della fusione è data da:

$$\eta_m = q_m / q_w,$$

dove q_m è la potenza utilizzata per fondere il materiale e q_w la potenza fornita al substrato.

$$\eta_m = \frac{E_{fm} v_{fm} + E_s v_s}{\eta_a V I t}$$

dove l'energia necessaria a portare il metallo di riempimento (E_{fm}) e il substrato (E_s) al punto di fusione e a fornire il calore latente di fusione è

$$E = \int_{T_0}^{T_f} c_p(T) dT + \Delta H_f$$

(c_p calore specifico, ΔH_f calore latente di fusione), v_{fm} è il volume del metallo di riempimento depositato e v_s il volume del substrato fuso [17].

In uno studio precedente è stata proposta una formula del tipo:

$$\eta_m = 1 / \left(\frac{8 \alpha}{5 S d} + 2 \right)$$

dove α è la diffusività termica del metallo base, S la velocità e d l'ampiezza della saldatura [18].

Successivamente è stata sviluppata una nuova formula, secondo cui l'efficienza di saldatura può essere calcolata dai parametri di processo e dalle proprietà del materiale. Si tratta di una relazione semi-empirica:

$$\eta_m = A \exp \left(-B / \frac{\eta_a V I S}{E \alpha v} \right)$$

dove η_A è l'efficienza d'arco, S è la velocità, E è la variazione totale di entalpia dovuta alla fusione, α è la diffusività termica a 300 K e ν è la viscosità cinematica al punto di fusione. A è una costante che rappresenta il massimo valore dell'efficienza per una data giunzione o geometria del substrato, che è ottenuta quando la quantità a denominatore dell'esponente è grande. A e B possono essere determinate dall'intercetta ($\ln A$) e dalla pendenza ($-B$) del grafico che rappresenta il $\ln(\eta_m)$ in funzione di $(\eta_A V I S / E \alpha \nu)^{-1}$.

Relativamente all'energia generata dall'arco e dall'elettrodo, parte viene trasmessa al pezzo, parte viene persa nell'ambiente. Di quella trasmessa al pezzo, una parte è utilizzata per la fusione e il resto è disperso per conduzione termica al di fuori della zona fusa. Questa zona contribuisce alla formazione della zona termicamente alterata (ZTA) e al riscaldamento del metallo base. Ossia:

$$E_{\text{arco}} + E_{\text{elettrodo}} = E_{\text{perdite}} + E_{\text{fz}} + E_{\text{bm}}$$

in cui E_{perdite} è l'energia persa nell'ambiente, E_{fz} è l'energia usata per la fusione e E_{bm} è l'energia persa per il riscaldamento del metallo base. La somma di E_{fz} e E_{bm} rappresenta l'energia trasmessa al pezzo. Quindi $\eta_{\text{arco}} = (E_{\text{fz}} + E_{\text{bm}}) / (E_{\text{arco}} + E_{\text{elettrodo}})$ e $\eta_{\text{fusione}} = E_{\text{fz}} / (E_{\text{fz}} + E_{\text{bm}})$.

La fusione completa del metallo d'apporto comporta un consumo di una parte del calore generato dal bagno fuso. Il rate di deposizione dipende dall'energia fornita. Per migliorare la produttività si può stabilire un arco secondario fra il filo e l'elettrodo, al fine di fondere il filo ed eliminare la dipendenza del rate di deposizione dalla massa del bagno fuso. Per far ciò solitamente si utilizza un secondo generatore di potenza.

Con la variante dell'arco pulsato (P-GTAW) si ha la possibilità di ridurre i consumi, essendo necessario fornire meno calore. Il calore necessario alla fusione viene prodotto durante i picchi di corrente mentre, quando la corrente si attesta al valore di fondo, sufficiente a tenere stabile l'arco, l'area fusa si raffredda e solidifica. Ciò si traduce in una ZTA più stretta, una microstruttura più fine, minori stress residui e distorsioni, migliori proprietà meccaniche del giunto e minori difetti (cricche, porosità, ecc).

2.2.3 Saldatura laser (LBW)

Nella saldatura laser l'energia radiante è convogliata in un fascio ad elevata densità di potenza, focalizzato sulla superficie del metallo da saldare, come si evince dalla Figura 4. Questo tipo di saldatura richiede elevate densità di energia, che possono essere ottenute lavorando sul punto focale del sistema ottico. A potenze specifiche sufficientemente elevate ($10^5 \div 10^6$ W/cm²) il materiale di base vaporizza, formando una zona in cui sono contenuti i vapori, detta keyhole. Il materiale successivamente si raffredda, originando il cordone di saldatura.

Un ruolo molto importante nella creazione del fascio laser è svolto dal mezzo attivo che ne determina la lunghezza d'onda. Distinguiamo i laser a CO₂ e i laser allo stato solido (Nd:YAG e fibra).

Nel caso del laser a CO₂ il medium è costituito da una miscela di gas (CO₂+He+N₂). Questo tipo di laser è usato prevalentemente per saldare gli acciai. La lunghezza d'onda è 10,6 μ m (medio infrarosso). Esistono tre categorie di laser a CO₂, dipendentemente dalla differente modalità di circolazione del gas, che può essere assiale o trasversale rispetto all'asse ottico del fascio, e dal tipo di cavità utilizzata:

- CO₂ laser a flusso assiale veloce (potenze da 750 W a 20 kW).
- CO₂ laser a flusso trasverso (da 1.5 a 45 kW).
- SLAB CO₂ laser (da 100 W a 2.5 kW).

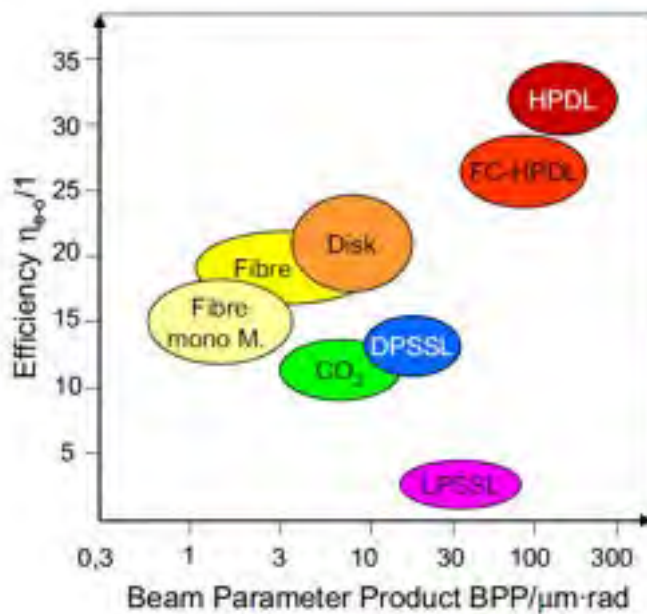
I laser allo stato solido hanno, solitamente, mezzo attivo costituito da cristalli (barrette o dischi) YAG (granato di ittrio e alluminio) drogato con neodimio oppure fibre di vetro drogato con itterbio. La lunghezza d'onda è di 1 μ m circa (infrarosso vicino) pari cioè ad 1/10 di quella del laser CO₂. Questa caratteristica è molto importante perché permette di trasportare il fascio con l'impiego di fibre ottiche di piccolo diametro (tra 0.4 e 1 mm, quindi per distanze molto maggiori). Anche in questo caso distinguiamo due tipologie: laser in continuo (potenza massima 5 kW) e impulsati (potenze medie di 2 kW, energia < 150 J, frequenza < 1000 Hz). Un ulteriore tipo di laser è quello a diodi (potenze da 100 W a 2 kW). Un laser allo stato solido

impulsato ha una potenza di picco di circa 10-50 kW. Generalmente i sistemi laser sono stati caratterizzati da un rate di conversione di energia elettrica-ottica basso, tuttavia i nuovi sistemi a CO₂ e a fibra hanno un'efficienza decisamente più elevata.

Nel complesso, la saldatura laser è un processo efficiente. Utilizzando un basso apporto di energia permette di ottenere cordoni di saldatura con un buon livello di penetrazione. Poiché le velocità di saldatura risultano elevate, la diffusione di calore è ridotta e la ZTA limitata. Impostando correttamente i parametri di saldatura, inoltre, si possono ridurre sensibilmente le deformazioni rispetto alle altre metodologie di giunzione. A fronte di queste performance, i costi da sostenere per l'impianto sono elevati. Secondo uno studio di Zhao un laser di 1 kW richiede una potenza elettrica di 35 kW [19]. Generalmente, all'aumentare della potenza del laser e della frequenza si ha un incremento dell'efficienza energetica. Oggi i dati relativi all'efficienza energetica della saldatura laser sono pochi. Come riportato in un recente studio, l'efficienza energetica può essere considerata su quattro diversi livelli: processo, macchina, linea e azienda. Il design della macchina utensile e l'ottimizzazione dei parametri di processo consentono di migliorare l'efficienza energetica. Si sono definiti un indice per misurare l'efficienza energetica dell'intero sistema macchina laser e un indice per misurare l'interazione fra il pezzo da saldare e il fascio laser [20].

I laser a disco ed i laser in fibra offrono una lunghezza d'onda simile a quella dei laser a Nd:YAG, ma una maggiore qualità del fascio ed un'efficienza wall-plug fino al 40 % (invece che del 2 %) che determina un minore consumo di potenza e ingombro ridotto. Inoltre i laser in fibra offrono maggiore brillantezza, quindi maggiore profondità di penetrazione durante la saldatura ad alta velocità. Il consumo di energia alla massima potenza è inferiore a quello del laser Nd:YAG, circa un decimo di quello della saldatura ad arco convenzionale [21].

Di seguito un grafico rappresentativo di due parametri che definiscono l'efficienza energetica delle sorgenti laser. La più alta efficienza elettro-ottica è ottenuta dai diodi laser che sono però caratterizzati da una minore brillantezza (correlata inversamente al BPP¹). La valutazione dell'efficienza va quindi condotta tenendo conto anche delle prestazioni (penetrazione) a pari potenza e velocità di processo.



HPDL: High Power Diode Laser

Disk: Disk Laser

CO₂

DPSSL; Nd-YA pompati a Diodi

LPSSL: Nd-YAG pompati a Lampade

Figura 5 – Rappresentazione dell'efficienza elettro ottica e della qualità di differenti sorgenti di saldatura industriale per saldatura

¹ BPP=raggio minimo × divergenza (metà angolo) di un fascio laser

La saldatura laser è particolarmente adatta a saldare componenti leggeri del settore *automotive* e materiali differenti (ad esempio, acciaio ed alluminio), componenti ibridi ad elevata resistenza e deformabilità, garantendo riproducibilità ed elevata velocità di processo. La saldatura laser riduce le distorsioni e consente di ottenere elevate profondità di saldatura, riducendo il consumo di materiale e la necessità di fare lavorazioni di finitura. La saldatura risulta difficoltosa per materiali altamente riflettenti e metalli termicamente conduttivi, inoltre in taluni casi può generare la formazione di difetti microstrutturali.

La saldatura Key hole, il cui schema è mostrato nella figura seguente, sfrutta l'elevata densità di potenza generata nel punto focale che produce un'istantanea vaporizzazione del metallo.

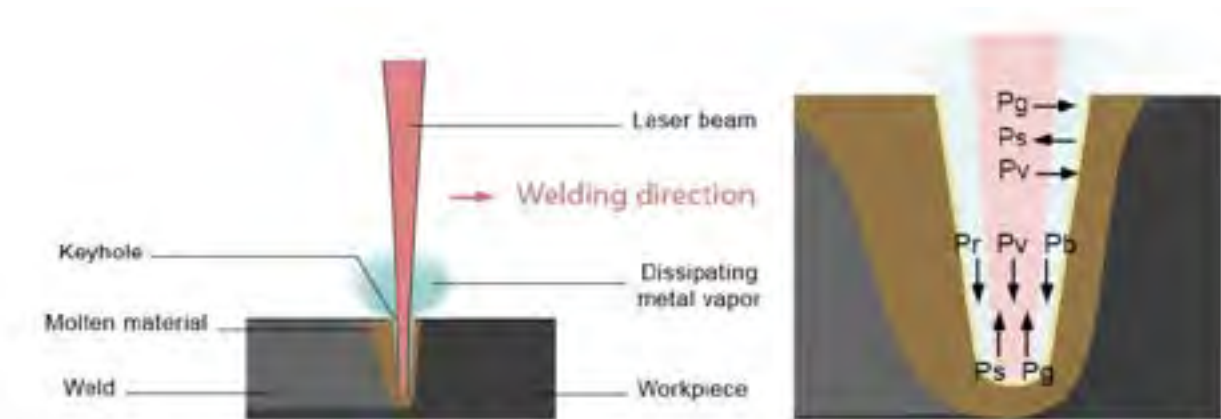


Figura 6– Schematizzazione del processo di saldatura laser.

La forma del keyhole è determinata dal bilancio delle diverse azioni che si sviluppano al suo interno. Lo schema evidenzia le pressioni in gioco.

Pr: pressione di ritorno, derivante dall'evaporazione particelle in superficie;

Pv : pressione di vapore causata dalla vaporizzazione di metallo;

Pb: la pressione del fascio, causata dagli urti fra fotoni ed elettroni;

Pg: pressione gravitazione, nel caso saldatura profonda;

Ps: pressione di tensione superficiale.

La superficie del keyhole si comporta come una membrana elastica cilindrica e collassa se la densità di energia scende al di sotto di un livello di soglia. Il keyhole produce un drastico miglioramento dell'accoppiamento radiazione-pezzo, a causa delle riflessioni multiple cui il fascio è soggetto al suo interno.

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

Unocic e DuPont, nel 2004 hanno proposto una formulazione dell'efficienza di trasferimento di energia mediante il laser secondo la seguente relazione [22]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$P_L = P_a + P_d$$

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

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

2.2.4 Saldatura a fascio elettronico (EBW)

Il processo di saldatura a fascio elettronico utilizza un fascio concentrato di elettroni ad alta velocità (dal 30 al 70% della velocità della luce), che impattano sulla superficie del materiale base. La caratteristica più vantaggiosa della EBW è la sua profonda penetrazione. Gli elettroni colpiscono la superficie e penetrano al di sotto di essa: a questo punto rilasciano la maggior parte della loro energia cinetica, che si trasforma in energia termica. Questo porta ad un enorme riscaldamento nel punto di impatto del fascio e alla parziale evaporazione del materiale base. Il fascio può viaggiare con una facilità maggiore attraverso questi vapori che non attraverso il metallo allo stato solido, il che agevola l'ulteriore penetrazione degli elettroni nel metallo stesso. La larghezza della zona fusa risulta estremamente contenuta: il rapporto profondità/larghezza può superare il valore 20:1.

Per la valutazione dell'efficienza vale quanto detto a proposito della saldatura laser. Naturalmente, nel caso del laser, bisogna tenere conto delle perdite dovute alla riflessione della radiazioni incidente, che non andranno considerate nel caso della saldatura EBW che, inoltre, viene effettuata in condizioni di vuoto, quindi in assenza di aria e di un gas di protezione.

2.2.5 Friction Stir Welding (FSW)

La tecnica friction stir welding, brevettata nel 1991 dal Welding Institute (TWI, UK), sfrutta la trasformazione dell'energia meccanica in calore per attrito, in modo da portare a termine il processo completamente allo stato solido, ovvero senza fusione del materiale. La saldatura per frizione consiste nel mettere a contatto i due componenti, dei quali uno è fermo mentre l'altro è posto in rapida rotazione intorno al proprio asse (vedi Figura 5). Quando la quantità di calore sviluppata è sufficiente, la rotazione si interrompe e si applica il carico per facilitare la diffusione allo stato solido, espellendo le eventuali impurità. Le saldature ottenute in tal modo hanno caratteristiche meccaniche molto prossime a quelle del materiale base. Le fasi del processo possono essere così riassunte: preriscaldamento, deformazione iniziale, estrusione, forgiatura e raffreddamento.

Generalmente, per poter sfruttare questa tecnica, il giunto deve avere simmetria rotazionale, per cui non tutte le geometrie risultano saldabili. Lo strumento che si utilizza è a sezione circolare, ad eccezione dell'estremità, dove è alloggiata una sonda filettata o con una scanalatura; il punto in cui si uniscono la parte cilindrica e la sonda viene denominato shoulder. Mentre la sonda penetra nel componente, lo shoulder ne friziona la superficie. Le parti devono essere strette su una barra di sostegno, in modo da evitare che le superfici confinanti del componente si allontanino. Il calore che si genera fra il pezzo e l'utensile fa sì che il pezzo si ammorbidisca senza raggiungere la temperatura di fusione. Il materiale plasticizzato viene trasferito dal bordo d'attacco dell'utensile alla sonda e viene forgiato dal contatto diretto tra lo shoulder e il profilo del perno. La saldatura per frizione può essere considerata una tecnica di saldatura con un keyhole allo stato solido, poiché l'utensile genera un foro per permettere alla sonda di avanzare, foro che viene colmato con l'avanzamento lungo la linea di giunzione.

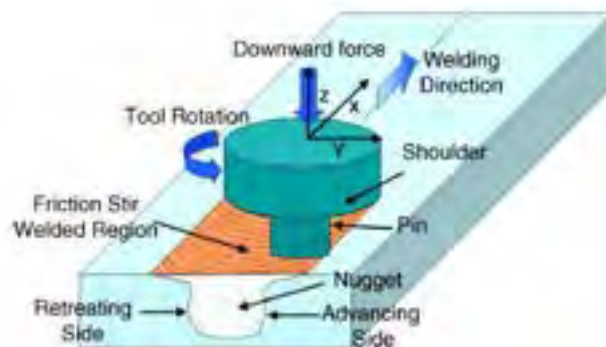


Figura 7 – Schematizzazione del processo friction stir welding.

Si tratta, dunque, di un processo termico e di deformazione allo stato solido, in cui intervengono diverse interazioni termodinamiche: consideriamo i rate di riscaldamento e di raffreddamento, la deformazione plastica e il flusso del materiale processato intorno all'utensile. Talora vengono utilizzati utensili speciali che prevengono la formazione del keyhole all'atto dell'estrazione dell'utensile. In certi casi si effettua un raffreddamento con CO₂ al fine di rendere più fine la microstruttura e migliorarne la resistenza.

Il sistema friction stir spot welding ha una migliore flessibilità, minori consumi e minori costi operativi, inoltre produce minori distorsioni. Non c'è movimento trasversale, ma si utilizzano un pin centrale, una guaina e un pistone esterno che si muovono indipendentemente a diversa velocità. In tal modo, è possibile controllare il movimento reciproco delle parti e applicare la pressione per realizzare la saldatura.

Un altro sistema prevede una rotazione duale contraria, che consente di ridurre il carico e il surriscaldamento del materiale. Il pin e lo shoulder sono indipendenti e possono ruotare in senso contrario e indipendentemente durante il processo di saldatura [23].

Principalmente, la FSW permette di saldare piastre, ma può essere adattata per saldare tubi e sezioni cave. I materiali più adatti ad essere saldati con questa tecnica sono i materiali termoplastici.

I principali parametri di processo sono la velocità di rotazione, la pressione di frizione, la pressione di forgiatura, lo spostamento e il tempo di vibrazione. La microstruttura di una saldatura dipende

essenzialmente dal tipo di utensile, dalle velocità di rotazione e di avanzamento, dal carico applicato sull'utensile e dalle caratteristiche dei materiali da saldare. La struttura stratificata circolare è una diretta conseguenza del modo in cui l'utensile filettato deposita il materiale: esso agisce come se ad ogni rotazione portasse via un foglio di materiale.

Uno dei principali vantaggi della FSW deriva dal fatto che il processo avviene allo stato solido, in questo modo si possono saldare materiali difficilmente saldabili con le tecniche per fusione. La saldatura per frizione è una tecnica piuttosto economica ed energeticamente efficiente. La preparazione dei materiali base è pressoché nulla: bisogna solo tenere in conto un leggero accorciamento dei componenti dovuto al processo di saldatura. La riproducibilità è molto elevata e il processo si presta molto bene all'automazione, grazie a controllabilità e versatilità, quindi può essere idoneo per produzioni di massa.

Tabella 6– Benefici del processo Friction Stir Welding. [24]

Metallurgical Benefits	Environmental benefits	Energy Benefits
1. Solid Phase Process	1. No shielding gas required for materials with low melting temperature.	1. Improved materials use (e.g. joining different thickness) allows reduction in weight.
2. No loss of alloying elements.	2. Eliminates solvents required for degreasing.	2. Decreased fuel consumption in lightweight aircraft, automotive, and ship applications.
3. Low distortion	3. Minimal surface cleaning required.	3. Only 2.5% of the energy needed for a laser weld.
4. Good dimensional stability and repeatability	4. Eliminates grinding wastes.	
5. Excellent mechanical properties in the joint area.	5. Consumable materials saving.	
6. Fine recrystallized microstructure.	6. No harmful emissions.	
7. Absence of solidification cracking.		
8. Replaces multiple parts joined by fasteners.		

I principali vantaggi del processo, descritti nella Tabella 3, possono essere così riassunti:

- l'utensile può essere usato per una lunghezza di saldatura fino a 1000 m (per leghe di alluminio serie 6000).
- non è richiesto materiale d'apporto.
- non è richiesto gas di protezione per saldare materiali a bassa temperatura di fusione.
- il materiale non viene fuso.
- distorsioni e difetti sono ridotti al minimo.
- non vengono emessi vapori, fumi, schizzi e radiazioni (basso impatto ambientale).
- la qualità delle giunzioni è elevata (microstruttura fine, elevate proprietà meccaniche).
- si hanno un minore consumo di energia e un minor numero di passate rispetto ai processi di saldatura per fusione.

La saldatura FSW può permettere di ridurre fino al 70 % la quantità di energia consumata rispetto alle tradizionali saldature ad arco. Consente di ridurre l'uso di materiale e di eliminare trattamenti termici pre- e post-saldatura [25]. La riduzione dei consumi è stata generalmente valutata qualitativamente, al momento manca una analisi quantitativa basata sulla misurazione dell'energia impiegata nel corso del processo. Uno studio recente ha permesso di comparare il consumo energetico delle tecniche FWS e GMAW nel caso della saldatura di leghe di alluminio. Per i parametri di processo utilizzati, si è evidenziato un risparmio del 42 % in termini di energia impiegata per la saldatura e per i trattamenti pre- e post-saldatura, e del 10 % in termini di materiale utilizzato al fine di ottenere la medesima resistenza meccanica del processo GMAW. Ciò si traduce in una riduzione delle emissioni del 31 % [26].

2.2.6 Accorgimenti da adottare per massimizzare l'efficienza

Indipendentemente dal processo adoperato, per migliorare l'efficienza è necessario ridurre il consumo di potenza, migliorare il controllo e la manipolazione della potenza, aumentare il rate di deposizione, ridurre i tempi di ciclo e i tempi di preparazione della giunzione, ridurre l'estensione della zona termicamente alterata utilizzando processi di tipo keyhole, ridurre la necessità di lavorazioni successive, migliorare le proprietà del giunto, facilitare l'automazione e migliorare le performance dei sistemi di controllo e monitoraggio.

La prima accortezza sta nell'utilizzare generatori a inverter ad elevata frequenza, al fine di ridurre le perdite nell'unità di potenza ed il consumo di energia sulla linea. Purtroppo, non c'è una linea comune fra i vari processi, soprattutto in termini di efficienza di trasferimento dell'energia e di efficienza del processo di fusione vero e proprio. Pertanto, stabiliti il materiale, lo spessore e il tipo di giunto, occorre mettere a punto delle procedure che tengano conto dei vari parametri del processo, delle caratteristiche del materiale e dell'ambiente circostante.

Ridurre l'apporto di calore mediante processi a elevato rate di deposizione e di tipo keyhole, come la saldatura laser, consente di ridurre l'ammontare del materiale di riempimento da utilizzare per un dato spessore della giunzione [27]. Nella Figura 7 è riportata una stima dell'apporto di calore necessario per realizzare una saldatura in funzione della larghezza del cordone [27].

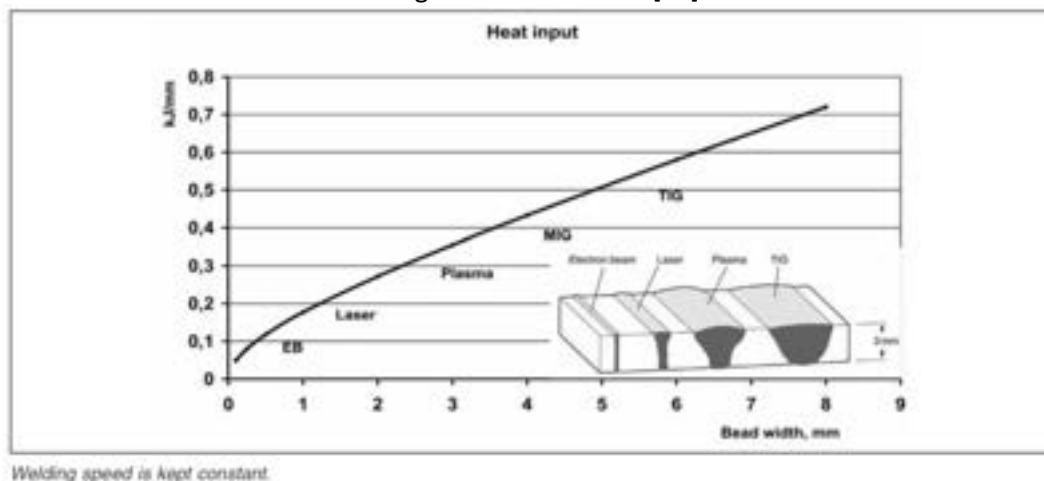


Figura 8- Valore simulato della quantità di calore necessaria alla saldatura al variare della larghezza del cordone di saldatura.

Nel caso della saldatura laser il costo energetico è ridotto, nonostante la bassa efficienza, grazie alle misure ridotte del cordone, il che significa quanto sia importante progettare il giunto al fine di minimizzare la quantità di metallo di riempimento che deve essere utilizzata per un dato spessore. Un aumento della velocità di deposizione comporta notevoli benefici in termini di efficienza, così come una riduzione delle passate.

La Tabella 4 riporta i parametri più significativi di cui bisogna tenere conto per l'incremento dell'efficienza dei processi. Nel caso della saldatura GTAW è stato studiato l'effetto sull'efficienza di vari parametri, quali l'angolo della punta dell'elettrodo, la composizione del gas protettivo e il livello di corrente [28]. Come riportato in precedenza, l'efficienza di processo è definita come il rapporto tra l'energia totale che entra nella piastra o nella sezione da saldare e l'energia totale disponibile all'arco per unità di lunghezza. A sua volta, l'efficienza di fusione è definita come il rapporto tra l'energia per unità di lunghezza richiesta per fondere il materiale del cordone di saldatura e l'energia totale disponibile all'arco per unità di lunghezza. In pratica il primo fattore è legato alle perdite di calore lungo il pezzo da saldare e il secondo al calore necessario a fondere il materiale per la realizzazione del cordone. Si è riscontrato che l'efficienza del processo non varia al variare dell'angolo della punta dell'elettrodo, cresce all'aumentare della velocità di passata, tende a diminuire all'aumentare della corrente, in maniera differente dipendentemente dal gas di protezione utilizzato. L'efficienza di fusione cresce al crescere dell'angolo della punta dell'elettrodo, aumenta se si utilizza He in luogo di Ar. L'efficienza di fusione cresce al crescere del livello di corrente e con la velocità della passata, qualunque sia la miscela di gas adoperata.

Nel caso del laser, le efficienze di trasferimento dell'energia e di fusione sono fortemente dipendenti dalla velocità di saldatura. Inoltre, bisogna considerare i meccanismi di assorbimento che determinano fenomeni di riflessione interna multipla all'interno della zona fusa. La profondità di penetrazione diminuisce con l'aumentare della velocità di deposizione, per effetto della riduzione locale della quantità di energia utile per la fusione con l'aumentare della stessa velocità. Con l'aumentare della profondità di penetrazione aumenta l'efficienza di trasferimento di energia. Si è verificato che l'efficienza del processo è bassa per piccole distanze di penetrazione (velocità elevate) e raggiunge un massimo per velocità di saldatura intermedie, mentre diminuisce nuovamente per saldature estremamente lente. L'uso di He come gas di copertura migliora l'efficienza [29]. Per ridotte profondità di passata l'efficienza di una saldatura laser può essere inferiore al 30%, mentre per saldature profonde supera il 65%. [25] Infatti, per saldature poco profonde solamente una piccola frazione dell'energia del fascio laser incidente è assorbita dal pezzo ma, se la profondità di penetrazione si avvicina a 1 mm, viene assorbita una frazione maggiore di energia. La riduzione dell'assorbimento del fascio con il diminuire della profondità del fuso è consistente con i meccanismi di assorbimento che implicano riflessioni interne multiple all'interno del fuso. Se la profondità di penetrazione è ridotta i raggi incidenti sono maggiormente riflessi fuori dalla cavità.

Tabella 7– Principali fattori che influiscono sull'efficienza dei processi di saldatura, per dato spessore e geometria del giunto. (in rosso i parametri con maggiore influenza)

GTAW	LBW	EBW	FSW
Parametri di processo: Velocità di passata Potenza iniziale Distanza Ampiezza della saldatura Geometria dell'elettrodo Numero di passate Proprietà del materiale: Diffusività termica Rugosità Ambiente: Pressione atmosferica Gas di protezione (portata, composizione, ecc)	Parametri di processo: Velocità di passata Potenza iniziale Posizione del punto focale Tempo Diametro del fascio Numero di passate ? Proprietà del materiale: Diffusività termica Rugosità Riflettività Ambiente: Pressione atmosferica Gas di protezione (portata, composizione, ecc)	Parametri di processo: Velocità di passata Potenza iniziale Posizione del punto focale Tempo Diametro del fascio Numero di passate ? Proprietà del materiale: Diffusività termica Rugosità Ambiente: Livello di vuoto	Parametri di processo: Velocità di Avanzamento Velocità di rotazione dell'utensile Forma dell'utensile Angolo di Tiltaggio Proprietà del materiale: Diffusività termica Durezza Ambiente: Sistema di Bloccaggio Eventuale gas di protezione

Nel processo di tipo keyhole che si genera nelle saldature ad elevata densità di energia (laser, fascio elettronico e laser) permette di incrementare notevolmente l'efficienza grazie alla riduzione delle perdite di calore per conduzione. Questi fenomeni permettono di avere piccole dimensioni del fuso e della ZTA e minime deformazioni del pezzo da saldare, così limitando l'energia e i costi necessari per le successive lavorazioni correttive sul materiale saldato.

3 Concetto di “Efficacia” e di “Efficienza” dei processi di saldatura.

L'obiettivo finale del lavoro è la definizione di condizioni standard di prova per la valutazione dell'efficienza energetica dei processi di fabbricazione industriale di saldatura. Questo non può quindi prescindere dalla definizione di condizioni di prova che rappresentino casi studio, quanto possibili usuali nella produzione industriale. Ciò porta a scegliere dei materiali da costruzione largamente utilizzati quali acciai e leghe di alluminio e a definire le condizioni di efficacia corrispondenti a processi di saldatura qualificati. Solo in queste condizioni ha senso effettuare delle misure o delle valutazioni dell'efficienza energetica. In tal caso quindi, nelle finestre dei parametri di qualifica, si può mirare a scegliere i parametri ottimali anche in

termini di riduzione dei consumi energetici ovvero nelle condizioni o con la tecnologia che promette la migliore efficienza energetica.

3.1 Normative di riferimento per la qualifica dei processi di saldatura.

Per quanto riguarda il processo industriale di saldatura, al fine di valutarne in modo completo l'efficienza energetica alla presa, è necessario che questa sia misurata/valutata in condizione di "efficacia" del giunto. Nella maggior parte dei casi, i giunti a migliore qualità sono realizzati con bassi apporti termici. Tuttavia, l'apporto termico non può scendere al di sotto di specifici valori di soglia (per privilegiare l'efficienza energetica del processo) perché verrebbe meno la capacità del giunto a garantire i requisiti minimi di resistenza strutturale.

Quindi possiamo definire "l'efficacia" della saldatura **come la capacità del giunto di garantire l'adeguata resistenza strutturale nel tempo**. In funzione del materiale e del processo, esistono adeguate normative di riferimento che definiscono i requisiti minimi che la saldatura deve garantire in funzione del campo di applicazione. Le principali norme cui è stato fatto riferimento sono le ISO, sia per la definizione dei requisiti di qualità che per la definizione delle *Welding Procedure Specification (WPS)*: queste ultime sono, di fatto, la sintesi dei parametri di saldatura e dei limiti di validità del processo tali da garantire l'efficacia della saldatura.

Alcune delle principali normative di riferimento per la definizione **dell'efficacia** delle saldature sono riportate in tabella:

Tabella 8– Principali normative di riferimento per la qualifica dei processi di saldatura

Identificativo	Titolo
UNI EN ISO 3834- dalla parte 1 alla 6	Requisiti di qualità per la saldatura per fusione dei materiali metallici: Criteri per la scelta del livello appropriato dei requisiti di qualità, Requisiti di qualità estesi, Requisiti di qualità normali, Requisiti di qualità elementari, etc.
UNI EN ISO 5718: 2014	Saldatura - Giunti saldati per fusione di acciaio, nichel, titanio e loro leghe (esclusa la saldatura a fascio di energia) - Livelli di qualità delle imperfezioni
UNI EN ISO 13919- parte 1 e parte 2 a seconda che siano acciai o leghe di alluminio	Saldatura - Giunti saldati a fascio elettronico e laser - Guida dei livelli di qualità delle imperfezioni
UNI EN ISO 15609- dalla parte 1 alla parte 6 a seconda del procedimento di saldatura .	Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici
UNI ENE ISO 15614- dalla parte 1 alle 11 a seconda del procedimento di saldatura	Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Prove di qualificazione della procedura di saldatura
UNI EN ISO 15613	Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Qualificazione sulla base di prove di saldatura di pre-produzione
UNI EN ISO 6520-1:2008	Saldatura e procedimenti connessi - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici - Parte 1: Saldatura per fusione
UNI EN ISO 10042:2007	Saldatura - Giunti di alluminio e di sue leghe saldati ad arco - Livelli di qualità delle imperfezioni
UNI EN ISO 25239 – 4: 2012	Saldatura friction stir – alluminio – Specificazione e qualificazione delle procedure di saldatura".

La UNI EN ISO 15609 fornisce gli elementi essenziali per la compilazione in modo corretto di una Welding Procedure Specification ovvero della procedura contenente tutti i parametri per realizzare in modo ripetitivo giunzioni “efficaci”.

La UNI EN ISO 15614 definisce tutte le prove di qualificazione necessarie per l’approvazione della procedura di saldatura per fusione e lo stesso fa in modo analogo la UNI EN ISO 25239 – 4: 2012 per le saldature FSF.

A titolo di esempio, di seguito è riportato uno schema standard di saggio di qualifica e relativo schema di estrazione dei provini necessari alla qualifica di un processo di saldatura testa a testa fra lamiere.

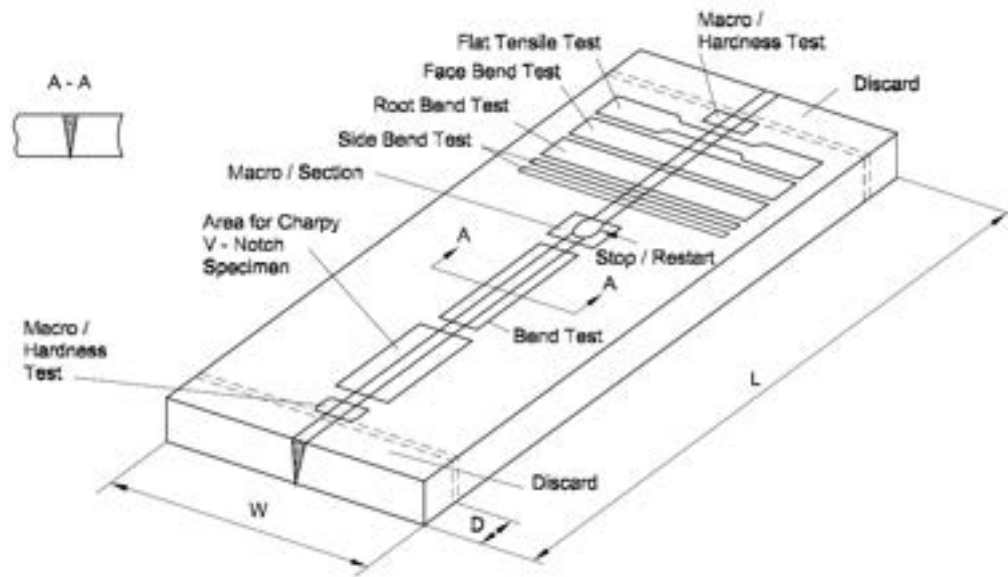


Figura 9- Schema tipico di estrazione di saggi di prova da un campione di qualifica di un procedimento di saldatura.

Quindi, la qualifica di un processo di saldatura qualunque esso sia, che porti a identificare una saldatura “efficace”, consiste (a meno di ulteriori caratteristiche richieste dalla specifica applicazione) nella realizzazione di un campione rappresentativo da sottoporre a una serie di test per verificare la qualità e la capacità quindi di garantire i requisiti strutturali richiesti dell’applicazione. Il resoconto di tutte le prove viene definito *Welding Procedure Approval Report* (WPAR). A seguito della registrazione del superamento di tutte le prove può essere redatta la WPS che è la procedura che permette di replicare il risultato nel tempo e definisce i parametri per l’ottenimento di un giunto efficace.

3.2 Definizione del concetto di efficienza energetica

Per quanto riguarda “l’efficienza energetica” del processo di saldatura, come visto nel paragrafo precedente, esistono definizioni più o meno complesse per i vari tipi di processi, tuttavia non sempre paragonabili o confrontabili fra tipi diversi di tecnologie.

Il concetto di “efficienza energetica”, definita per i processi di saldatura per fusione, rappresenta il **rapporto fra l’energia minima specifica necessaria alla fusione dello specifico materiale in un sistema adiabatico**, quindi privo di perdite, **rispetto all’energia assorbita dalla presa**. Tale rapporto va però normalizzato con il fattore di forma della saldatura, cioè il rapporto fra la profondità tipica e la larghezza tipica del giunto. Ciò permette di mettere in relazione tutti i differenti processi di saldatura per fusione, siano essi ad arco con trasferimento dell’energia per conduzione sferica, oppure ad energia concentrata, con trasferimento dell’energia key-hole o cilindrica.

Quindi, per quanto riguarda il concetto di efficienza energetica, essa vuole essere definita come un parametro normalizzato allo spessore che, in condizioni di giunto efficace rappresenta il rapporto fra l'energia minima indispensabile per l'ottenimento della giunzione e l'energia assorbita dalla rete.

Ipotizzato un sistema che, a seconda del tipo di processo scelto, realizzi la giunzione portando a fusione il materiale, il rendimento globale ovvero "l'efficienza energetica" può essere definito come il prodotto del "rendimento di fusione" per il "rendimento di penetrazione". Dove il rendimento di fusione può essere definito come il rapporto fra calore minimo indispensabile a portare a fusione il volume specifico e l'energia assorbita dalla rete. Il rendimento di penetrazione può essere fatto coincidere con il fattore di forma tipico.

$$\eta_e = \eta_f * \eta_p$$

Dove: η_e è l'efficienza energetica del processo sullo specifico materiale in condizione di efficacia della saldatura;

η_f è il rendimento di fusione che tiene conto di tutte le perdite di energia dalla presa alla zona fusa rispetto ad un sistema teorico senza perdite di energia;

η_p è l'efficienza di penetrazione che tiene conto come l'energia viene distribuita nel materiale, della densità di potenza e della velocità di processo che rende più adiabatico il sistema riducendo intrinsecamente le perdite.

La Figura 10 seguente mostra i differenti modi di trasmissione del calore per processi di saldatura ad arco e per processi di saldatura ad elevata densità di energia [30] [31].

Essenzialmente si passa dalla distribuzione sferica di energia dei processi ad arco, in cui il fenomeno della conduzione e le relative perdite di energia giocano un ruolo importante, ai processi ad alta densità di energia, dove la distribuzione viene considerata cilindrica e associata a velocità di processo elevate in modo tale che le perdite per conduzione risultano molto ridotte.

Inoltre, se analizziamo lo schema della Figura 11 possiamo definire, fissata una lunghezza unitaria, caratteristica del processo, (ul) il rendimento di fusione secondo l'equazione seguente:

$$\eta_f = \frac{A_f * ul * \rho * [Ct * (Tf - T_0) + \lambda]}{WE} = \frac{A_f * Vs * \rho * [Ct * (Tf - T_0) + \lambda]}{WP}$$

dove A_f è l'area fusa della singola passata, ρ è la densità del materiale Ct è la capacità termica, Tf la temperatura di fusione del materiale, T_0 la temperatura di test e λ il calore latente di fusione. Il tutto rapportato a WE (*Wall Energy*) che è l'energia assorbita alla presa.

Lo stesso rendimento può essere calcolato riferendo i dati alla velocità del processo di saldatura (Vs) e alla potenza WP assorbita dalla rete (*Wall Power*).

Per quanto riguarda η_p equivale in pratica al fattore di forma, ovvero al rapporto fra penetrazione e larghezza media del bagno di fusione come da relazione seguente.

$$\eta_p = \frac{p}{w}$$

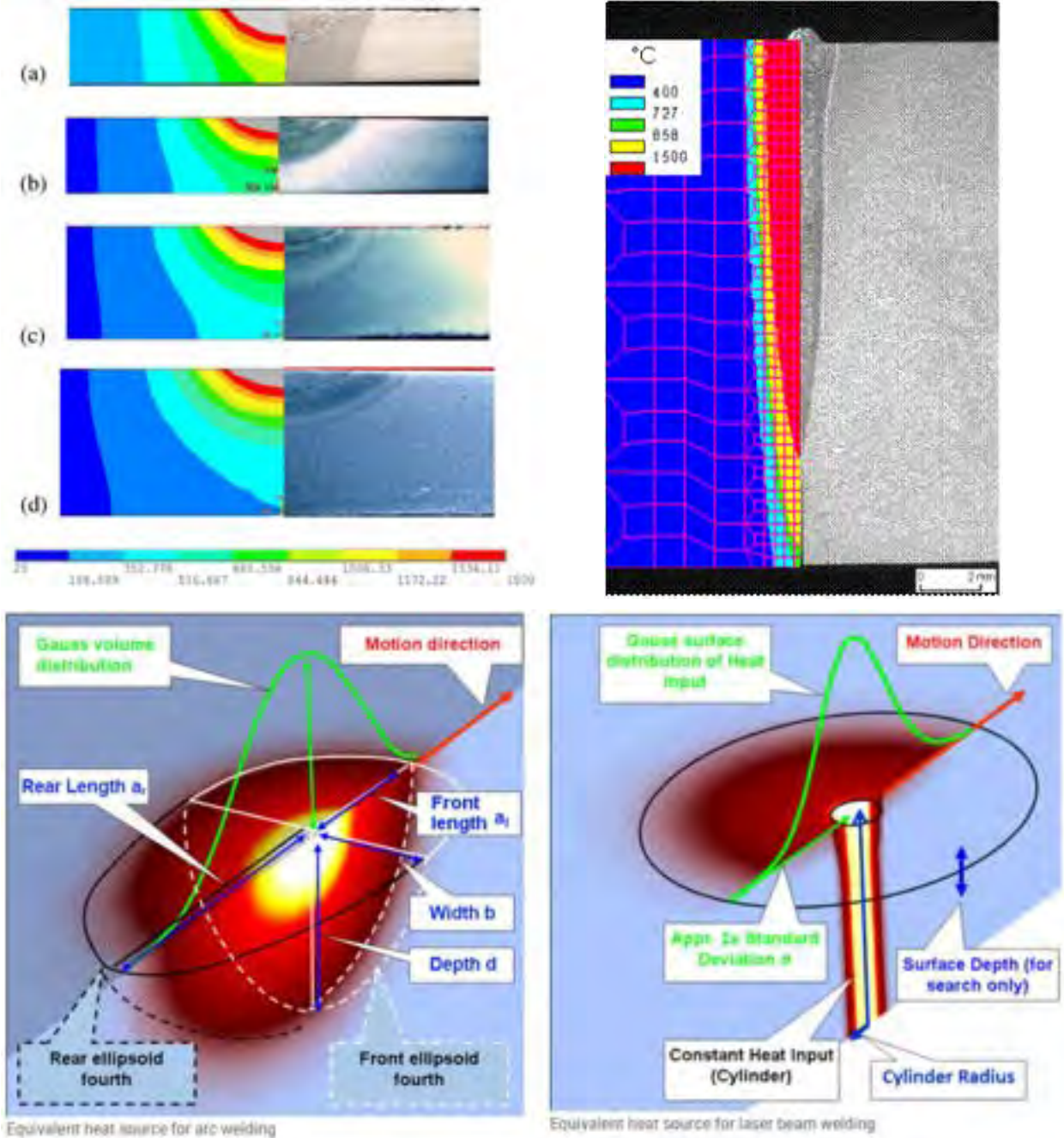


Figura 10- Distribuzioni tipiche di energia dei processi di saldatura per fusione. (SX) trasferimento sferico tipico dei processi ad arco; (DX) trasferimento cilindrico di energia tipico dei processi keyhole

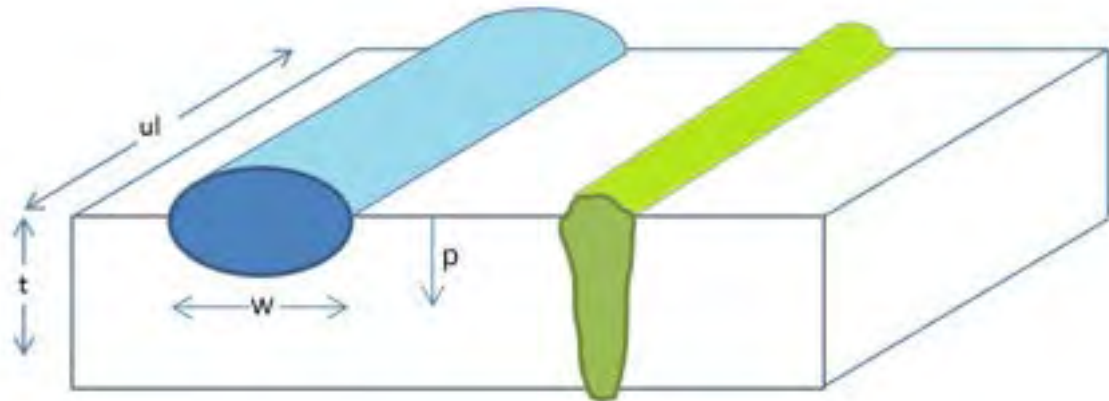


Figura 11- Schematizzazione degli effetti di forma per i processi di saldatura: con trasferimento di energia sferica (processi ad arco come il TIG); trasferimento di energia cilindrica (processi ad elevata densità di energia EBW, Laser)

Resta tuttavia non semplice il confronto fra le tecniche per fusione e quelle basate su principi differenti come la FSW in cui il mescolamento dei lembi non avviene spontaneamente in fase liquida ma è forzato dalla rotazione dell'utensile che agisce sul materiale allo stato pastoso.

Si potrebbe comunque applicare anche alla FSW il procedimento descritto, sostituendo il volume del *nugget* a quello della zona fusa e la temperatura di plasticizzazione (T_p) alla temperatura di fusione (T_f).

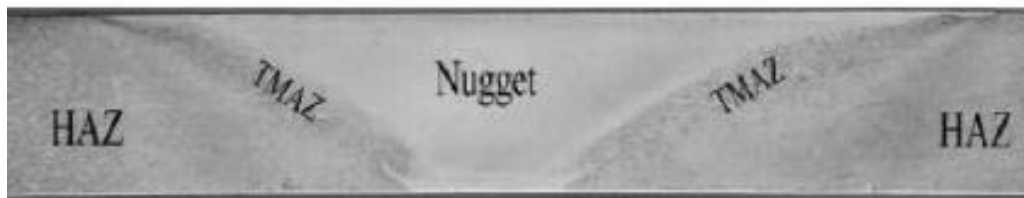


Figura 12- Schematizzazione del giunto FSW

Anche superando le difficoltà derivanti dalla difformità tra le varie tecniche di giunzione considerate, restano dei dubbi sull'applicabilità dell'approccio adottato per la valutazione dell'efficienza: infatti esso si presta bene alla valutazione termodinamica del processo e alla valutazione tecnica delle varie fonti di dissipazioni, ma necessità di dati termo-fisici di non sempre immediata disponibilità, in particolare per quelle leghe che presentano uno o più cambiamenti di fase.

Per tale ragione, fermo restando l'interesse tecnico-scientifico delle valutazioni a base termodinamica, è stato valutato un ulteriore (preliminare) fattore comparativo dell'efficienza dei processi, in condizioni standard di spessore e materiale.

Non si tratta in questo caso di un'efficienza o rendimento (tipicamente adimensionale) ma di un fattore di efficienza energetica, esprimibile con la seguente relazione.

$$FEE = \frac{V_{sc} * \rho c}{W P_c}$$

In unità internazionali questo fattore è espresso come $[m/N \text{ o } mm^2/J]$.

- V_{SC} : velocità di saldatura *complessiva*, cioè, nel caso di passate multiple V_{SC} è il valore di velocità di processo diviso il numero di passate (uguali) che ha dato luogo al giunto considerato;
- p_c : penetrazione complessiva che andrebbe preferibilmente scelta in un gruppo prestabilito di valori standard (per es. 2, 5 e 10 mm);
- WP_c : potenza elettrica complessiva, prodotto della potenza impiegata nella singola passata moltiplicata per il loro numero.

Tale fattore, estremamente semplificato, permetterebbe tuttavia di comparare in modo oggettivo qualsiasi tecnica di saldatura fornendo informazioni dirette e indirette: esso infatti è tanto più elevato quanto maggiore è la velocità e quanto minore è l'energia complessiva assorbita dalla rete non solo del generatore ma complessiva del processo compresi gli ausiliari.

Al fine di valutarlo è però necessario avere a disposizione dati di consumi alla presa elettrica reali e statistici sui vari processi e per questo è richiesta una campagna di misure estensive che potrà essere svolta solo in una fase successiva considerato che i sistemi di acquisizione si sono resi disponibili sono a fine del PaR.

Una preliminare valutazione considerati i dati disponibili è comunque riportata nei paragrafi successivi, relativi alle attività sperimentali.

4 Attività Sperimentale

L'attività sperimentale è suddivisa in due fasi: la prima relativa all'analisi dei differenti generatori di saldatura, del loro principio di funzionamento e dei punti di consumo ed erogazione di energia e alla progettazione di un sistema di acquisizione dati multi generatore con il supporto dell'Università di Tor Vergata. La seconda fase prevede test di saldatura per determinare le condizioni di efficacia dei processi su materiali di riferimento (acciai e leghe di alluminio) e una prima comparazione energetica in funzione della forma dei giunti. Per la parte di saldatura arco, laser e EBW i test sono effettuati in ENEA mentre per il processo FSW ci si avvale dell'ausilio dell'Università di Genova.

4.1 *Analisi dei generatori TIG, Laser ed EBW ed Identificazione degli strumenti di acquisizione dati e di rilevazione delle energie.*

Questo paragrafo riporta l'analisi del funzionamento elettrico ed elettronico delle apparecchiature di saldatura, analizzate nei loro componenti principali evidenziando i flussi di energia e definendo il sistema di misura necessario per la valutazione energetica dei processi di saldatura.

In generale, trattandosi di apparati industriali collegati alla rete elettrica, tutti hanno un ingresso simile (alimentazione elettrica trifase) mentre l'uscita varia a seconda della tipologia (corrente alla pinza, onda elettromagnetica -laser-, elettroni nell'EBW). Ove possibile sono stati individuati eventuali punti di misura intermedi sui generatori per valutare eventuali le perdite di trasformazione. Per tutti i processi sono stati analizzati i componenti ausiliari che originano ulteriori consumi elettrici (chiller, pompe da vuoto ecc.). Questa attività sono state condotte prendendo a riferimento strumentazione presente nei laboratori di Enea-Casaccia.

4.1.1 TIG

Il generatore TIG converte l'alimentazione elettrica industriale (corrente alternata trifase, 400 V) in un'uscita monofase, modulabile in forme d'onda di vario tipo (a seconda del materiale da saldare e del processo) che produce un arco tra il pezzo e la punta di un elettrodo in tungsteno. Il calore generato dall'arco fonde i lembi da saldare e l'eventuale materiale di apporto, fornito sotto forma di filo continuo o bacchetta. La potenza disponibile è in teoria data dal prodotto di corrente e differenza di potenziale il cui ordine di grandezza è, rispettivamente, 100 A e 10 V. Per diversi motivi non tutta l'energia in gioco viene trasmessa al pezzo. Esiste quindi un'efficienza del trasferimento di energia, variamente stimata tra il 50 e 80%. L'elettrodo e la zona di processo sono protette da un flusso di gas inerte (argon o elio). Le modalità operative principali sono:

- Corrente continua, elettrodo negativo: gli elettroni vanno dall'elettrodo al pezzo. La corrente può essere opportunamente modulata e/o pulsata. Massima efficienza energetica e penetrazione.
- Corrente continua, elettrodo positivo: indicata in presenza di ossidi superficiali tenaci (vedi leghe di Al), minore efficienza.
- Corrente alternata: riunisce i pregi delle due precedenti tecniche e offre ulteriori gradi di libertà per affinare il risultato, come frequenza, rapporto ciclico ecc.

La regolazione del processo avviene quindi impostando la polarità, la forma d'onda e il valore della corrente. La tensione dell'arco invece dipende principalmente dalla distanza elettrodo-pezzo e dal materiale saldato e dal gas di assistenza.

L'analisi del funzionamento è stata effettuata sul generatore Nertamatic 450 (installato presso Enea-Casaccia) che ha le seguenti caratteristiche principali (Figura 13):



Figura 13- Schema di funzionamento del generatore TIG NERTAMATIC 450

Sono evidenziati anche i punti di misura dell’energia in ingresso (tensione e corrente nelle linee L1÷3) e in uscita (corrente di saldatura, misurata sul cavo di ritorno e tensione all’elettrodo).

L’impianto comprende dei dispositivi ausiliari, alcuni interni, cioè tutta la parte di supervisione e controllo, altri esterni cioè: scambiatore di calore acqua-aria per il raffreddamento della torcia, dispositivo svolgi filo per il materiale di apporto, dispositivo per l’innesco dell’arco ad alta frequenza, elettrovalvole gas. L’assorbimento di tali componenti (per alcuni dei quali è trascurabile) sarà valutato mediante misura, ove possibile, o da dati macchina.

4.1.2 Fascio elettronico

Il generatore per saldatura a fascio elettronico agisce anch’esso, globalmente, come un convertitore di energia: la sua uscita è un flusso di elettroni, emesso da un catodo in tungsteno e accelerato dalla differenza di potenziale di alcune decine di kV. L’emissione avviene nel cannone, mantenuto alla pressione di 10^{-5} mbar circa. Gli elettroni viaggiano verso il pezzo, collocato in una camera alla pressione di 10^{-4} mbar circa e lo colpiscono cedendo la propria energia cinetica. Il fascio è opportunamente focalizzato con lenti elettromagnetiche. L’impianto presente in Enea-Casaccia ha le seguenti caratteristiche:

- Cannone elettronico con funzionamento in triodo, mod. Techmeta CT4

- Potenza max 50 kW, tensione max 80 kV
- Catodo a riscaldamento indiretto (bombardamento elettronico)
- Camera di saldatura da 1,3 m³, tempo di svuotamento 3 minuti circa
- Deflessione del fascio su due assi, frequenza max 2 kHz
- Posizionatore CNC, 2 assi lineari e mandrino

La Figura 14 mostra lo schema del cannone e una vista d'insieme dell'impianto.

A differenza del TIG, nel fascio elettronico gli ausiliari hanno un "peso" sensibile nel bilancio energetico. Sono presenti infatti:

- pompa da vuoto a diffusione del cannone;
- pompa roots cannone;
- pompa a diffusione camera;
- pompa roots e pompa a pistoni camera;
- sistema di riscaldamento del catodo.

Il sistema del vuoto prevede che le pompe a diffusione (resistenze di riscaldamento dell'olio) e la roots del cannone siano permanentemente accese mentre le pompe meccaniche della camera si fermano quando la camera è portata a pressione atmosferica per il carico e scarico pezzi.

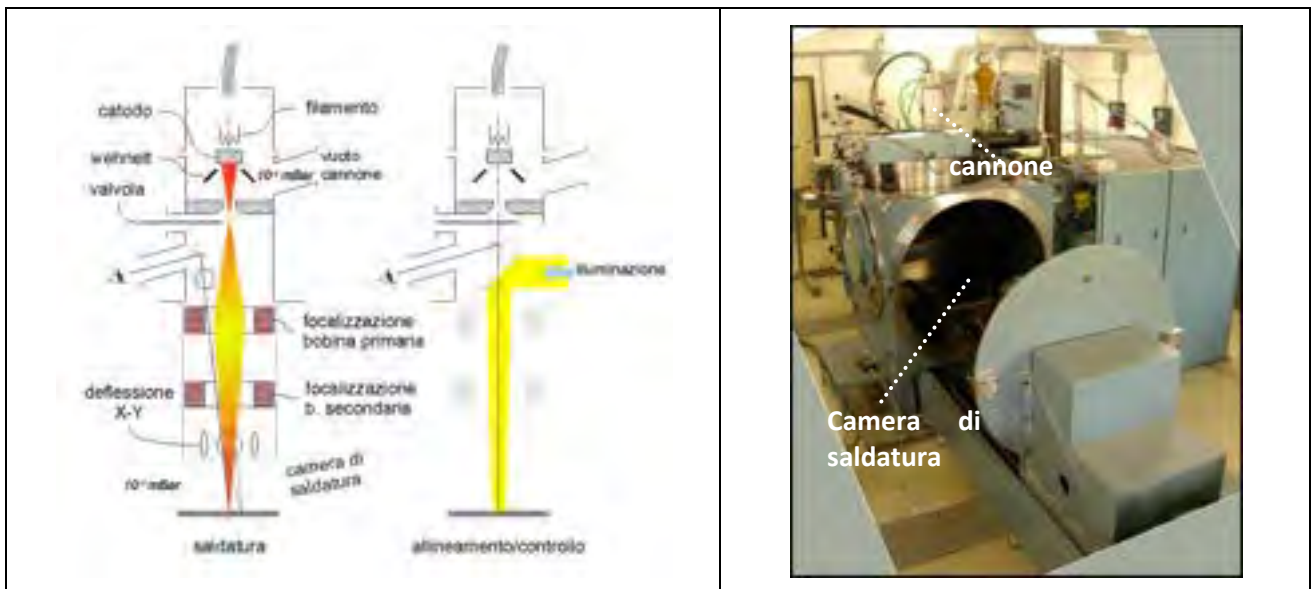


Figura 14: Impianto Fascio Elettronico CR ENEA Casaccia

Il bilancio energetico della macchina è valutato monitorando l'alimentazione (trifase, 400 V, 50 Hz) e i parametri del fascio, corrente e tensione il cui prodotto dà la potenza istantanea di saldatura. Nel caso del fascio elettronico l'efficienza del trasferimento di energia al pezzo è pressoché unitaria ovvero le perdite sono trascurabili. Data la natura particolare della macchina non è possibile accedere direttamente alle grandezze in uscita (problema alta tensione) ma si utilizzano i segnali di misura messi a disposizione dal sistema di controllo. Nella figura seguente è riportato lo schema funzionale della parte ad alta tensione della macchina. I blocchi ME e MA indicano appunto gli organi di misura di tensione e corrente di saldatura la cui uscita è elaborata nel sistema di acquisizione dati esterno (oltre che dal controllo interno del generatore).

Lo schema fa riferimento al funzionamento in modalità diodo, in cui ad ogni tensione di accelerazione corrisponde una corrente (e quindi una potenza). Per maggiore flessibilità di utilizzo tale corrente è modulabile variando il potenziale del wehnelt (modalità triodo).

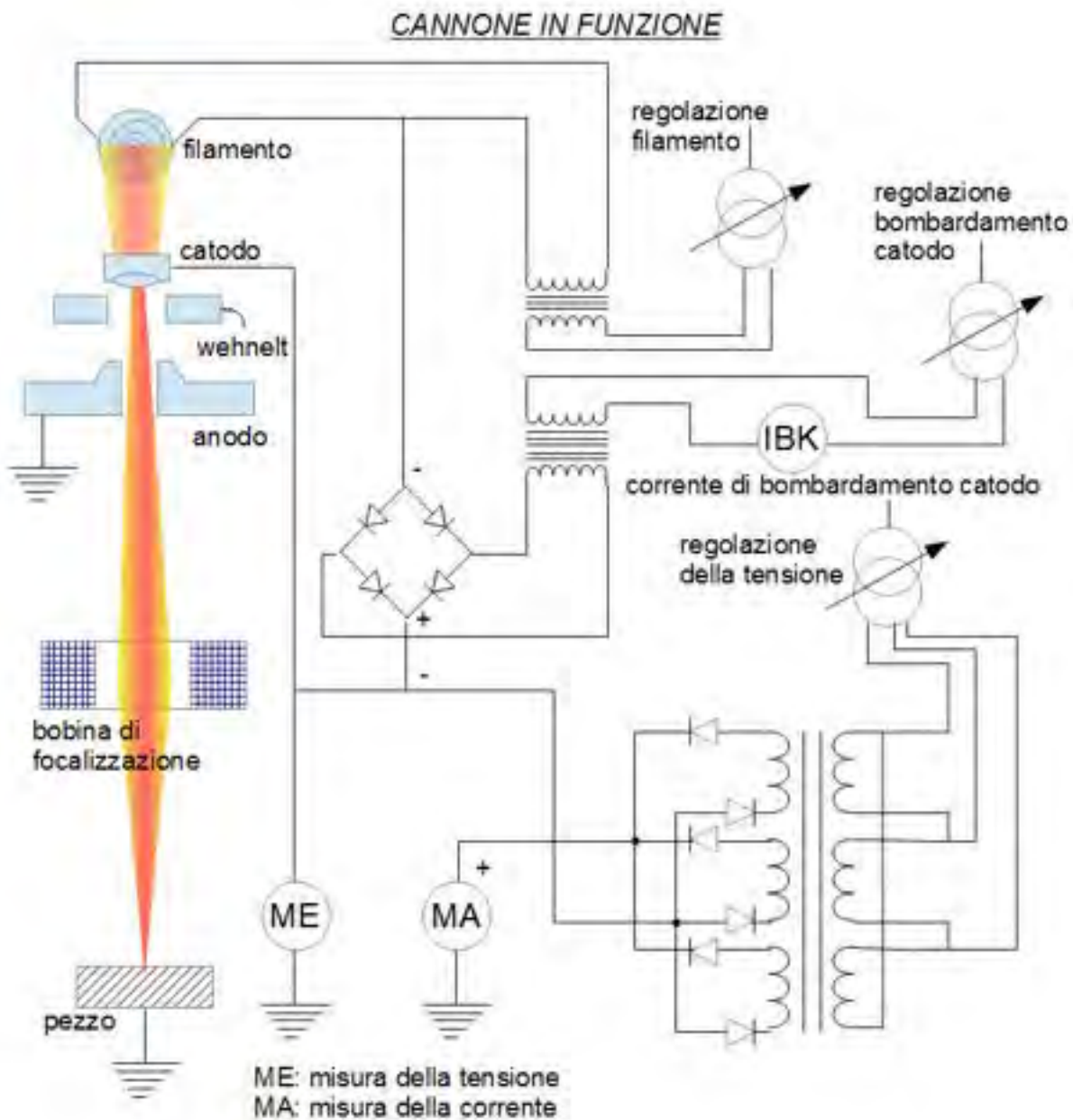


Figura 15: Schema elettrico della misura delle grandezze elettriche in processo (corrente e tensione di saldatura)

4.1.3 Laser

A differenza dei sistemi ad arco e a fascio elettronico, il laser trasferisce l'energia al pezzo mediante un'onda elettromagnetica (fascio) generata sfruttando il fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione che può verificarsi in mezzi portati in uno stato di inversione di popolazione.

La caratteristica fondamentale del fascio laser è l'elevata brillantezza ovvero l'energia disponibile per unità di superficie e di angolo solido [32]. Il limite fisico per tale parametro è

$$B = \frac{P}{\lambda^2 (M^2)^2}$$

(P potenza, λ lunghezza d'onda, $M^2 \geq 1$ parametro di qualità del fascio, vale 1 nei fasci con profilo gaussiano)

L'attivazione del mezzo richiede un input energetico idoneo (pompaggio). Lo schema energetico del mezzo attivo, ovvero il numero e l'energia dei livelli quantici coinvolti, determinano il limite superiore dell'efficienza del generatore, che non è possibile superare. Il laser preso in considerazione nell'attività è del tipo allo stato solido, con mezzo attivo costituito da fibra di vetro drogato con itterbio.

Il pompaggio è ottenuto con diodi laser, ad alta efficienza.

L'emissione avviene alla lunghezza d'onda di 1 μm circa (infrarosso vicino). La macchina ha architettura modulare: il fascio laser di lavoro è la somma delle emissioni di moduli uguali e indipendenti. Ciò può consentire, entro certi limiti, il potenziamento del laser integrando moduli aggiuntivi. La potenza massima nominale è 2200 W. L'emissione è in onda continua (CW) o modulata. Il rendimento energetico complessivo è piuttosto alto (25% circa) e comunque sensibilmente maggiore a quello dei precedenti tipi di laser, sia a gas (CO_2) che a stato solido (Nd:YAG). Il fascio è accoppiato internamente con una fibra ottica che lo trasporta alla testa di focalizzazione dove è presente un sistema di lenti in grado di concentrare la radiazione sul pezzo da saldare. Le caratteristiche principali della macchina sono riportate nella tabella seguente

Tabella 9– Principali caratteristiche del sistema laser

<i>Caratteristica</i>	<i>valore</i>
Modo operativo	Onda continua (CW) o modulata
Polarizzazione	Casuale
Potenza nominale	2200 W upgradato a 4000 W
Campo regolazione potenza	10÷105 %
Lunghezza d'onda	1068÷1080 nm
Frequenza di modulazione	5 kHz
Diametro fibra ottica di processo	100 μm
Prodotto caratteristico (BPP)	3,5 mm-mrad

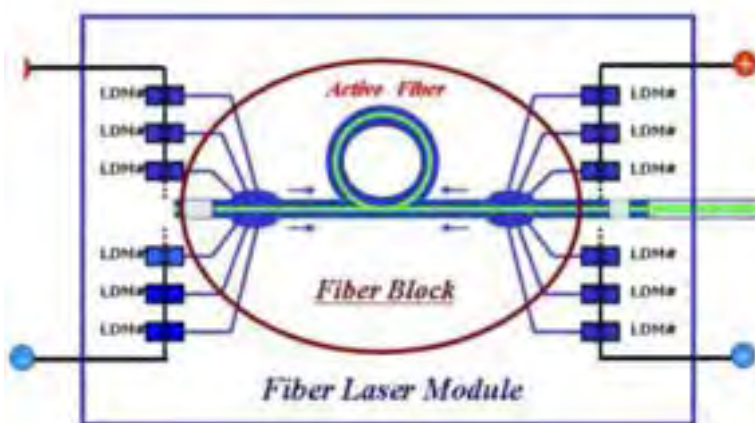


Figura 16: sorgente laser in fibra e schema di uno dei suoi moduli

Il laser impiega l'energia in ingresso principalmente per alimentare i diodi che effettuano il pompaggio del mezzo attivo. Il rendimento relativamente alto di questo tipo di sorgente è dovuto a vari motivi:

- efficienza quantica dello schema di pompaggio
- alto rendimento dei diodi
- efficacia dell'accoppiamento dell'energia di pompaggio con il mezzo attivo
- assenza di parti in movimento

Nel complesso la sorgente si comporta come un “convertitore di brillantezza” che somma le energie dei singoli diodi laser in un’unica uscita a brillantezza notevolmente maggiore.

L’energia non trasformata in fascio laser deve essere continuamente asportata per evitare il surriscaldamento del generatore. Inoltre i componenti ottici sono soggetti a riscaldamento per effetto della loro riflettività superficiale e devono essere raffreddati. Il laser è quindi accoppiato con un refrigeratore acqua-aria il cui fabbisogno energetico medio è proporzionale a $P \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) / C.O.P.$

Per sfruttare l’energia del fascio laser questo deve colpire il pezzo in modo concentrato, il che si ottiene con ottiche idonee (lenti e/o specchi). L’accoppiamento dell’energia elettromagnetica è fortemente legata alla focalizzazione in quanto i materiali metallici, oggetto di saldatura, alla temperatura ambiente sono generalmente molto riflettenti alle lunghezze d’onda del laser.

Per la valutazione dell’efficienza dei generatori Laser è stato necessario identificare adeguati sistemi di misura sulla base della valutazione quantitativa e qualitativa del fascio laser prodotto dal generatore.

L’analisi quantitativa energetica del sistema consiste nella misura dell’assorbimento elettrico dalla rete (trifase, 400 V, 50 Hz) e dalla misura della potenza utile dopo la testa di focalizzazione. Tale misura è effettuata con metodo calorimetrico dirigendo il fascio in un assorbitore totale (corpo nero) con una piccola apertura di ingresso. La misura della portata e del salto termico dell’acqua di raffreddamento determina la misura della potenza in ingresso.

Tuttavia, per i laser l’analisi della reale del generatore non può basarsi solo sul fattore quantitativo sopra esposto, ma deve prendere in considerazione la qualità del fascio. Un’analogia può essere fatta con il calore che, come ben noto, permette effetti estremamente differenti se la stessa quantità è disponibile a bassa o alta temperatura.

Data l’importanza della focalizzazione per un efficiente trasferimento energetico, è stato acquisito il sistema di caratterizzazione del fascio che consente di verificare la dimensione del punto focale e di valutare i parametri ottici del fascio (profondità di campo, M^2 , ecc.).

Le prestazioni dei laser di potenza nella saldatura e in altri processi termici (taglio, foratura ecc.) sono direttamente influenzate dalla distribuzione trasversale di intensità del fascio. La coerenza della radiazione laser fa sì che essa possa essere concentrata in aree di dimensioni dell’ordine della lunghezza d’onda. Un generico fascio laser a simmetria assiale si propaga variando il suo diametro secondo l’equazione seguente:

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}$$

(z distanza dalla cintola, z_R distanza di Rayleigh).

Nella figure seguenti sono evidenziate le grandezze riportate nella formula.

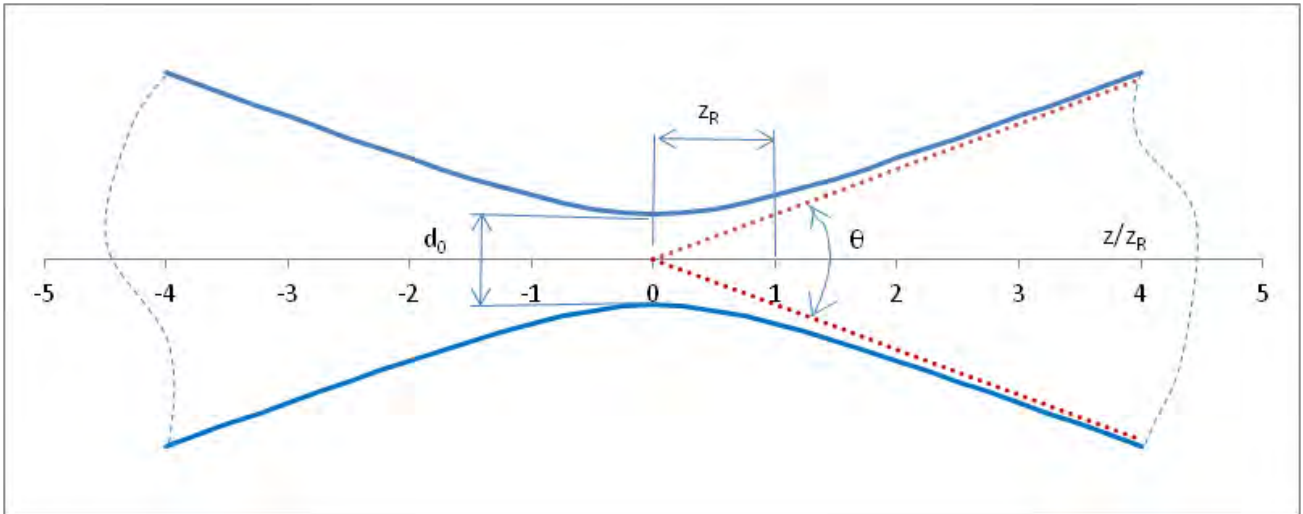


Figura 17: Schematizzazione del fascio laser focalizzato e delle principali grandezze qualitative.

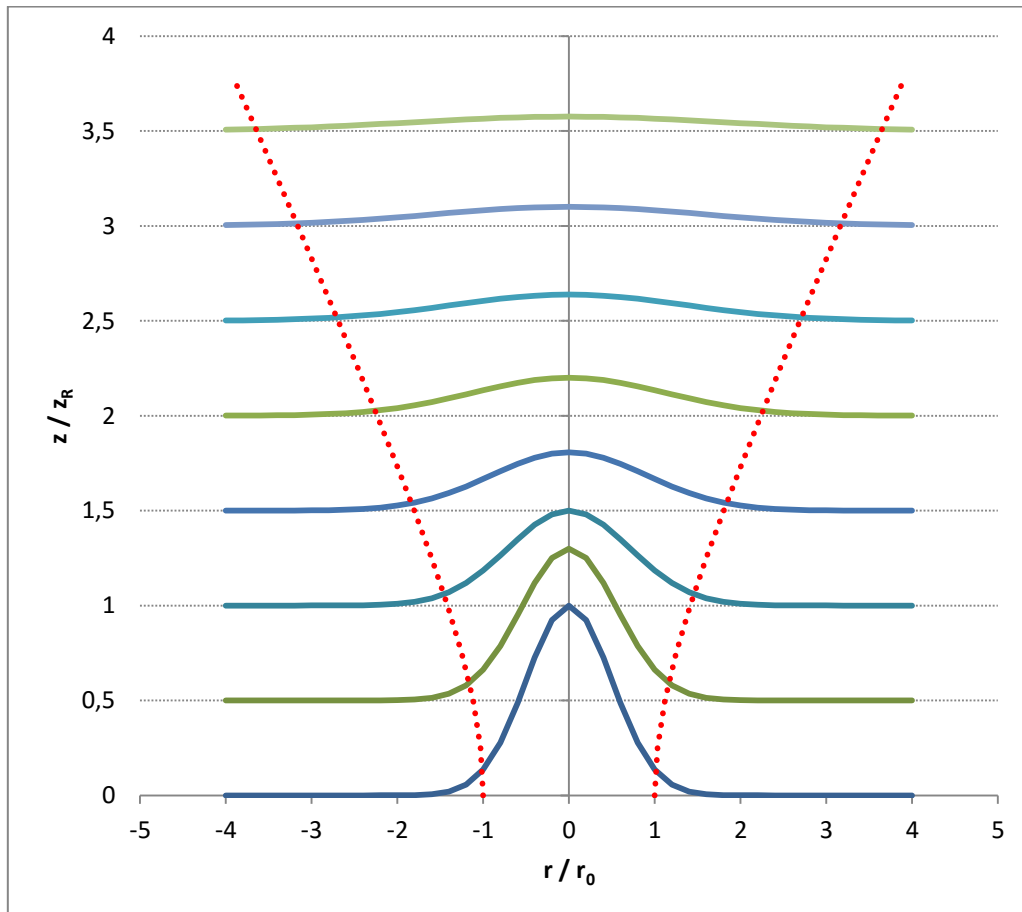


Figura 18: profili di intensità normalizzati, a diverse distanze dalla cintola del fascio, per un fascio gaussiano.

Fissato d_0 , la divergenza

$$\vartheta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d}{z} = \frac{d_0}{z_R}$$

dipende dalla distribuzione trasversale di intensità ed è minima per il fascio gaussiano, il cui profilo di intensità è

$$I_0 \left(\frac{d_0}{d(z)} \right)^2 e^{-8 \frac{r^2}{d^2(z)}}$$

Si ha pertanto

$$\vartheta \geq \vartheta_G = 4 \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{d_0}$$

Quindi il prodotto di divergenza e diametro minimo è tale che

$$\vartheta d_0 = 4 \frac{\lambda}{\pi} M^2$$

In cui è introdotto il fattore M^2 che misura il grado di deviazione del generico fascio laser dal profilo "ideale" gaussiano [33]. Tale grandezza assume il ruolo di parametro di qualità e resta costante nel passaggio del fascio in elementi ottici come lenti e specchi.

Un fascio laser "reale" sarà sempre focalizzato meno del corrispondente gaussiano di uguale diametro e divergenza, infatti, indicando con D il diametro del fascio collimato che investe una lente di focale f , si ha

$$d_0 = 4 \frac{\lambda}{\pi} M^2 \frac{f}{D}$$

($\theta = D / f$).

La densità media di potenza nel fuoco

$$\frac{4 P}{\pi d_0^2}$$

è inversamente proporzionale al quadrato di M^2 come pure la brillantezza (potenza emessa per unità di superficie e di angolo solido)

$$B = \frac{P}{\frac{\pi d_0^2}{4} \frac{\pi \vartheta^2}{4}} = \frac{P}{\lambda^2 M^4}$$

Si intuisce quindi l'importanza della valutazione di tale parametro che avviene generalmente misurando d_0 e z_R del fascio focalizzato, infatti

$$z_R = \frac{d_0}{\vartheta} = \frac{d_0^2}{4 \frac{\lambda}{\pi} M^2}$$

Da cui

$$M^2 = \frac{\pi d_0^2}{4 \lambda z_R}$$

In quanto detto fin qui non è stata data una definizione del diametro del fascio: nel fascio gaussiano in effetti si ha, nei punti a distanza $d_0/2$ dall'asse, un'intensità che è $1/e^2 \approx 13,5\%$ della massima. La stessa non può dirsi in generale e si ricorre quindi a definizioni del diametro basate sull'energia totale che investe aree circolari di dimensioni opportune.

Al fine di identificare i migliori strumenti per la valutazione della qualità del fascio laser, è stata condotta una ricerca di mercato sulle principali apparecchiature commerciali applicate per la caratterizzazione di fasci laser ad alta potenza che ha evidenziato la presenza di strumenti basati su principi di misura diversi:

- campionamento diretto del fascio: una sonda raccoglie l'energia che incide su una piccola area (diametro di alcune decine di μm) e la invia a un fotodiode. Un sistema di movimentazione a due o tre assi effettua la scansione del fascio in uno o più piani trasversali. Le misure sono elaborate per fornire le distribuzioni di intensità del fascio e valutarne quindi il diametro in accordo con gli standard. Misurazioni ripetute a diverse altezze consentono di ricostruire la caustica determinando la posizione della cintola del fascio, la presenza di astigmatismo, la qualità (parametri M^2 o K) ecc. Lo strumento è direttamente investito dal fascio laser ad alta intensità.
- tecnica del knife edge: uno o più coltelli mobili passano davanti al fascio e ne oscurano porzioni variabili. L'energia residua colpisce un sensore a semiconduttore generando un segnale variabile nel tempo. Il profilo del fascio viene ricostruito con tecniche di tomografia (TC). L'affidabilità del profilo di intensità trasversale ottenuto dipende dal grado di simmetria del fascio e dal numero di

coltelli usati (fino a 7 nella pratica). Lo strumento non può essere esposto direttamente a fasci laser ad alta potenza ma serve un sistema di campionamento che devii una percentuale dell'intensità originale, senza distorsioni (per es. specchi semiriflettenti).

- 3) visualizzazione diretta della caustica: Il fascio è inquadrato lateralmente da una telecamera sensibile alla radiazione diffusa (effetto di Rayleigh). La misura è completamente senza contatto quindi esente da problemi di danneggiamento per esposizione a intensità e/o durate eccessive. Per una misura ottimale il fascio deve altresì avere una combinazione di diametro minimo e profondità di campo compresa in un determinato intervallo. La distribuzione trasversale di intensità è ricostruita in due direzioni ortogonali.

In considerazione delle elevate prestazioni e del principio di misura già consolidato, la scelta, per quanto riguarda la caratterizzazione del profilo del fascio, è stata indirizzata su uno strumento del primo tipo per il quale il fornitore più affidabile che fornisce i principali produttori di strumentazione laser di potenza è risultato la PRIMES tedesca [34]. Al fine di avere un sistema flessibile e affidabile la scelta del sistema di misura per la qualità del fascio ha portato anche all'acquisto del sistema di misura della potenza, basato sul principio calorimetrico a misura continua (della stessa azienda in modo da poter integrare gli strumenti e di conseguenza le misure).

Sono stati quindi acquisiti i dispositivi Focus Monitor Primes FM120 e Power Monitor Primes PM48. Il primo strumento esegue la scansione del fascio focalizzato, campionando la sezione trasversale con un'apertura circolare (pinhole) di diametro 20 μm . La sonda guida la porzione di fascio catturata su di un sensore piroelettrico o un fotodiolo la cui uscita, opportunamente tarata consente di valutare l'intensità locale del fascio. La movimentazione comprende 3 assi: 2 per la scansione trasversale, uno (Z) per quella assiale, in modo da ricostruire la caustica di focalizzazione.

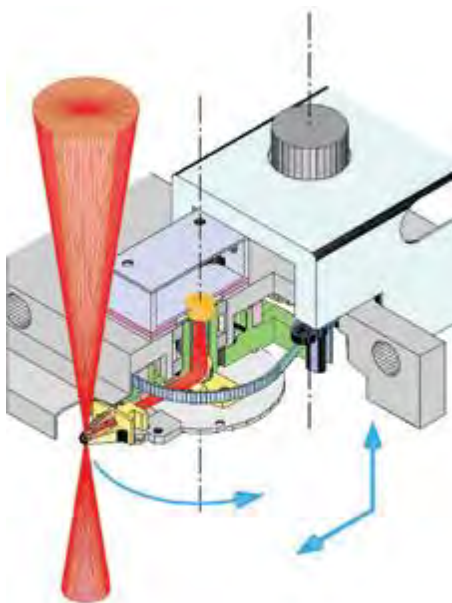


Figura 19: (SX) schema di funzionamento del Focus Monitor, percorso ottico del fascio campionato (in rosso) e assi di movimentazione (freccette celesti); (DX) aspetto del FM 120

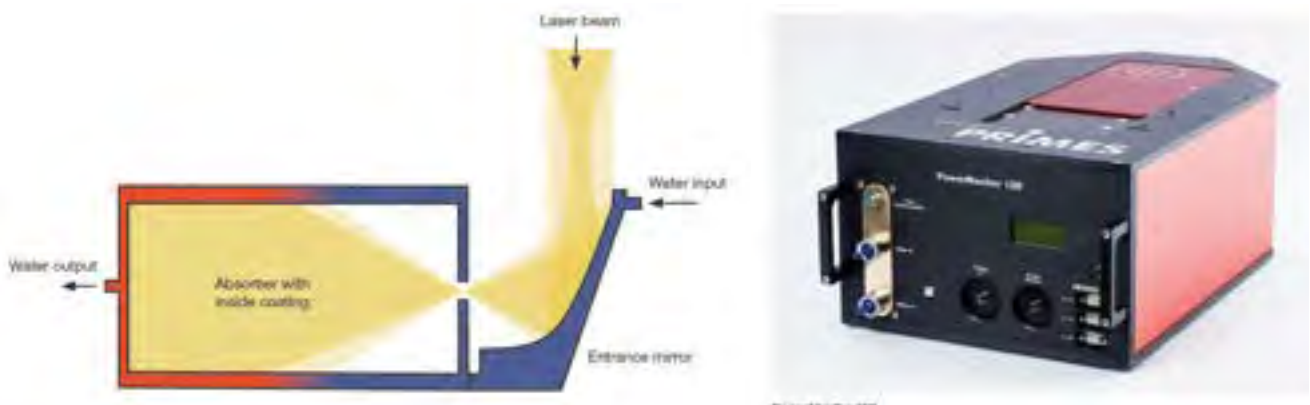


Figura 20: (SX) schema di funzionamento del Power Monitor, percorso ottico del fascio che viene indirizzato in un corpo nero; (DX)aspetto del PM 48

Lo strumento, se correttamente posizionato, fornisce quindi le caratteristiche principali del fascio: diametro minimo, posizione del fuoco, distanza di Rayleigh, parametro di qualità M2.

La misura di potenza è effettuata con metodo calorimetrico: il fascio entra in un assorbitore perfetto (corpo nero) raffreddato ad acqua e collocato in un involucro termicamente isolato dall'ambiente. L'energia incidente in un determinato tempo è il prodotto della portata, del calore specifico e del salto di temperatura dell'acqua tra uscita e ingresso.



Figura 21: Set up di misura contemporanea di potenza e qualità del fascio (fasi di collaudo presso PRIMES)

Di seguito sono riportate le misure effettuate su due sistemi laser commerciali, il primo un Trumpf Disk Laser presso la PRIMES, durante le fasi di collaudo dell'apparecchiatura, il secondo il Laser in fibra disponibile presso i laboratori della Casaccia di ENEA.

La Figura 22 mostra una visione qualitativa del fascio mediante caustica 3D in mappe di colori (che descrive visivamente l'omogeneità del fascio prodotto dalla sorgente laser) mentre la successiva riporta i parametri quantitativi, relativi alle principali caratteristiche ottiche del laser, che qualificano il fascio e quindi l'abilità a produrre giunzioni a elevata penetrazione, con ricadute sull'efficienza energetica del processo.

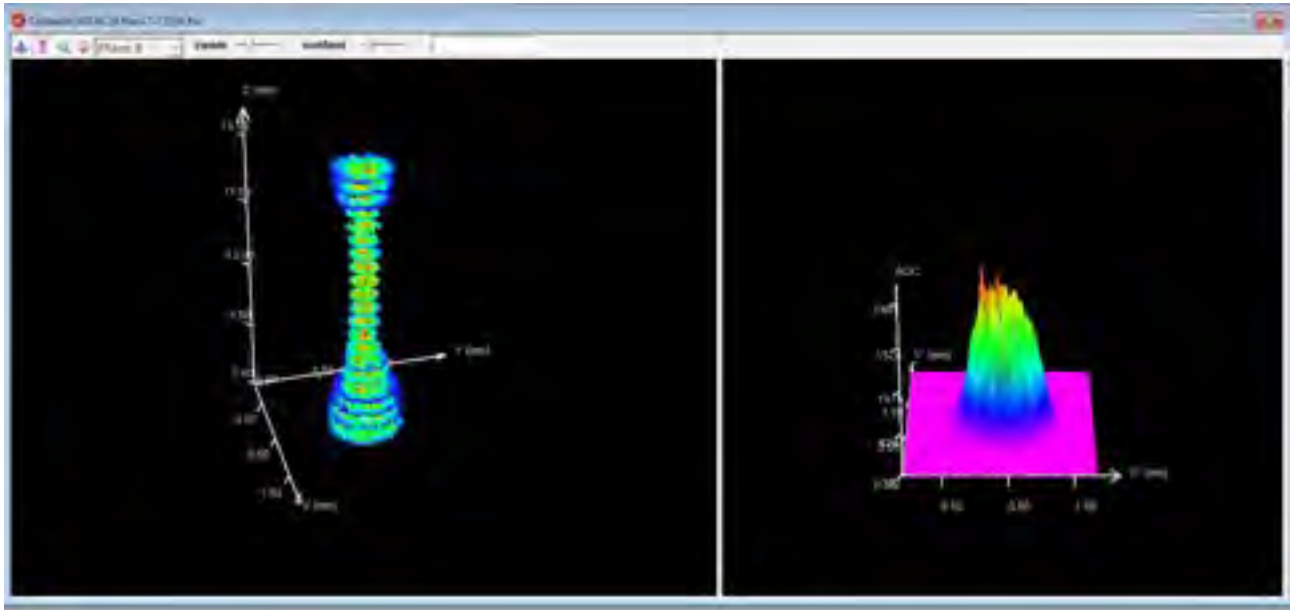


Figura 22: Caustica 3D di un sistema laser a Disco Trumpf 2000

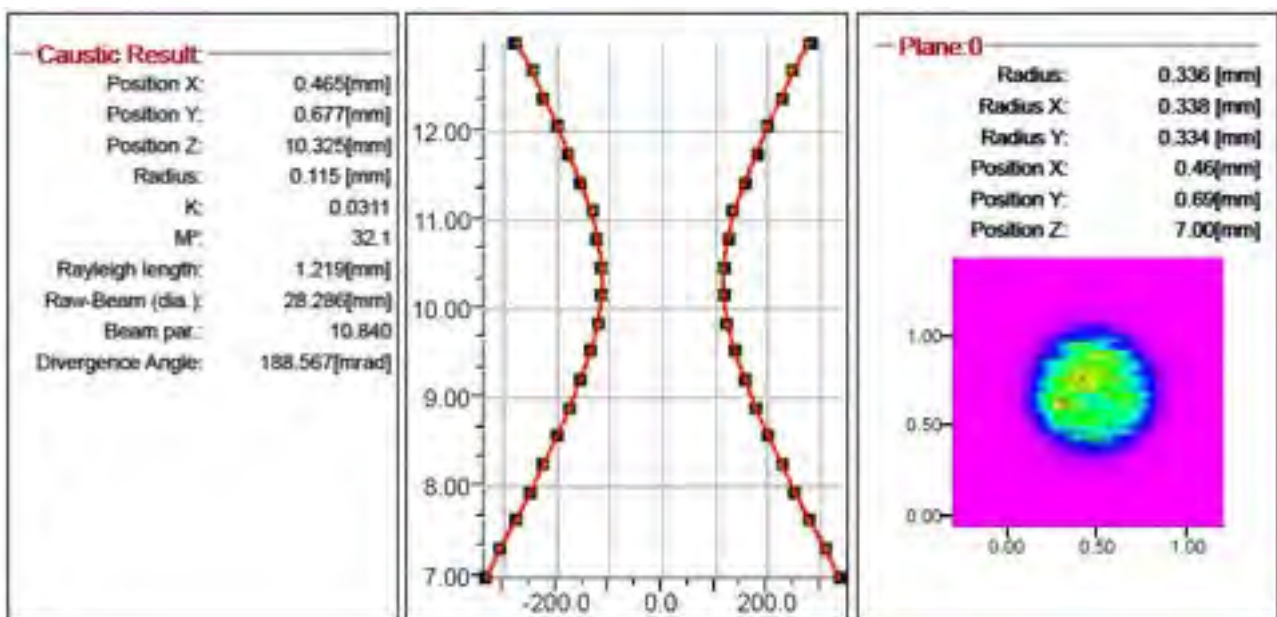


Figura 23: Caustica 2D di un sistema laser a Disco Trumpf 2000 con valutazione di tutte le caratteristiche di qualità del fascio.

In particolare, nella Figura 23, sono riportati:

- ✓ Diametro minimo del fascio focalizzato 0,23 mm;

- ✓ Profondità di campo $\pm 1,219$ mm (distanza di Rayleigh);
- ✓ BPP (Beam Product Parameter) superiore a 10 mm mrad.

Altri elementi qualitativi riguardano la circolarità del fascio che in questo caso è pressoché perfetta.

Lo stesse misurazioni sono state effettuate sul laser in Fibra IPG YLS 2000.

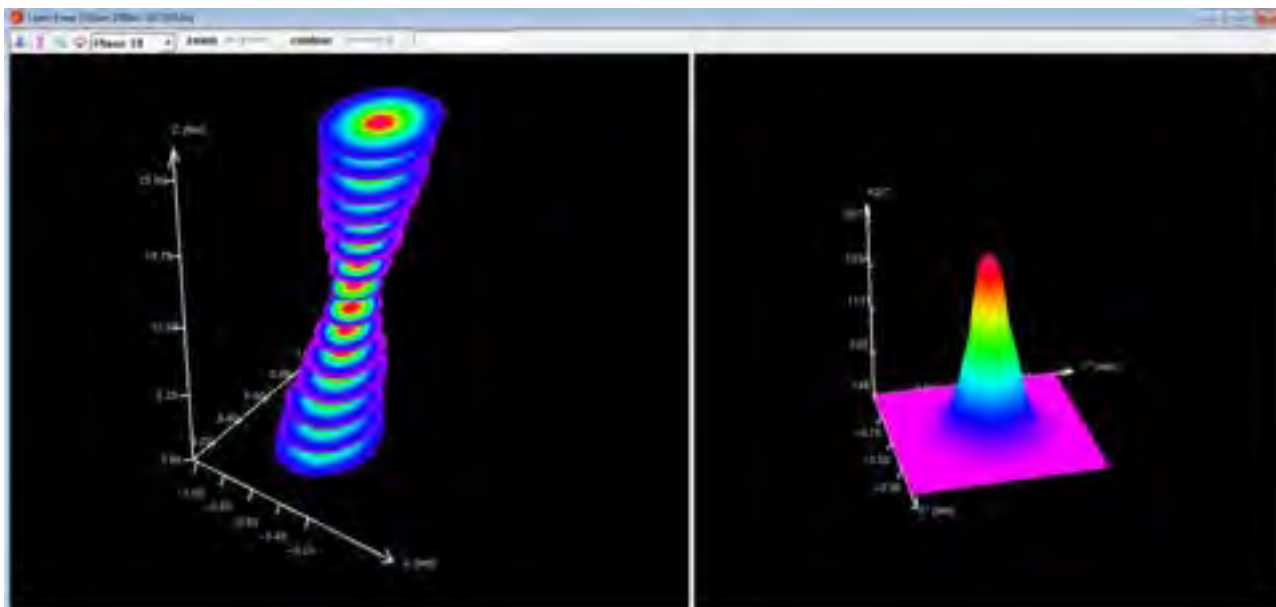


Figura 24: Caustica 3D del sistema laser in fibra IPG YLS 2000

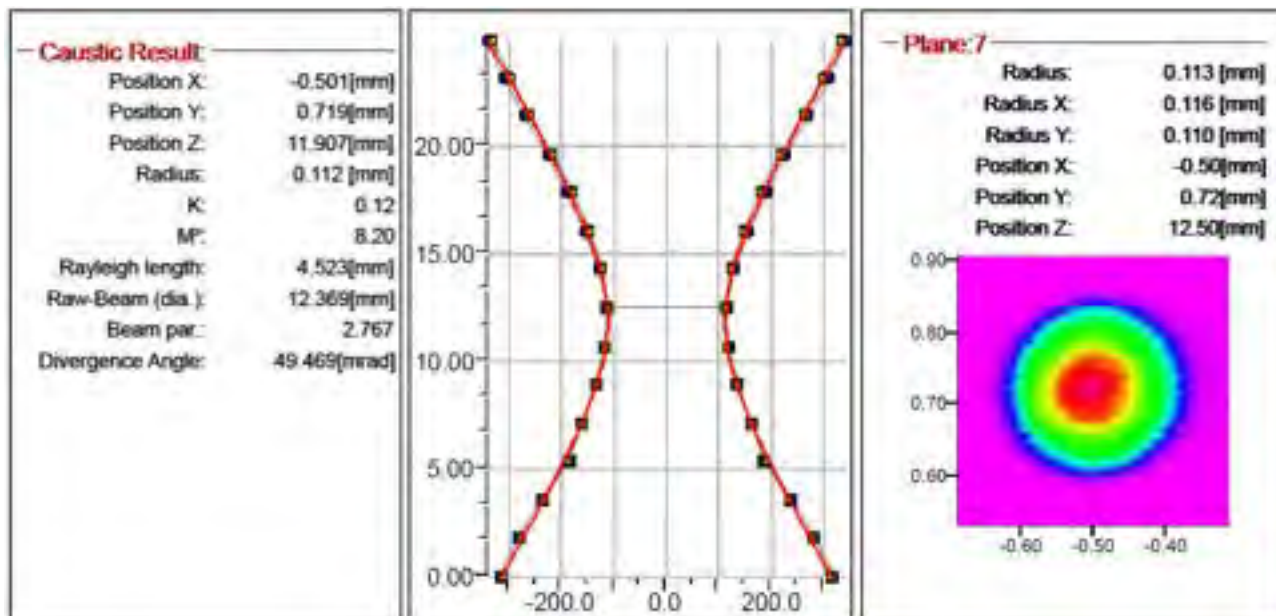


Figura 25: Caustica del sistema laser in fibra IPG YLS 2000 con valutazione di tutte le caratteristiche di qualità del fascio.

Le misure effettuate sul sistema laser ENEA, con questo tipo di strumento, ne evidenziano tutte le caratteristiche di qualità, in particolare:

- ✓ Diametro minimo del fascio focalizzato 0,22 mm;
- ✓ Profondità di campo $\pm 4,5$ mm (distanza di Rayleigh);
- ✓ BPP (Beam Product Parameter) inferiore a 3 mm mrad (come da specifica della sorgente).

Anche in questo caso il fascio, almeno nella macchia focale, si presenta quasi perfettamente circolare. Il confronto fra le due sorgenti nella specifica configurazione fa osservare come, a parità di spot focale, il Laser IPG abbia una maggiore brillantezza (fattore 15×, a parità di potenza) ovvero una maggiore qualità del fascio e grazie alla maggiore profondità di campo è in grado di garantire, a parità di potenza, una maggiore penetrazione e una maggiore robustezza del processo (tolleranza alla variazione di distanza focale).

4.2 Analisi e comparazione dell'efficienza energetica fra la saldatura TIG- LASER ed EBW su acciai da costruzione.

Gli acciai sono i materiali più largamente utilizzati nella costruzione dei beni, sia di uso comune che industriali. La saldatura è certamente la tecnologia più utilizzata per la realizzazione di strutture anche complesse ed è un processo ormai consolidato.

Al fine di valutare l'efficienza energetica sono stati presi in considerazione il processo tradizionale TIG (nella forma meccanizzata, per avere risultati indipendenti dall'abilità dell'operatore) e processi innovativi basati su EBW e Laser.

In particolare, il confronto fra TIG ed EBW è stato condotto su un acciaio largamente impiegato nei prodotti di caldareria industriale, il P91, un acciaio legato al cromo – molibdeno, resistente al creep, a elevate prestazioni.

Il secondo confronto è stato realizzato nella saldatura di un acciaio da costruzione al carbonio – manganese ad elevate prestazioni, S460NL, i cui impieghi possono essere sia in campo navale che, in generale, nella carpenteria strutturale. La lega scelta è dotata di maggiore resistenza meccanica rispetto agli acciai strutturali standard della stessa classe.

L'impiego di tali materiali, al posto dei corrispondenti standard, introduce la tematica dei materiali ad alte prestazioni che, associati a processi di saldatura ad elevata efficienza, possono consentire un aumento dell'efficienza energetica complessiva, maggiore rispetto a quello possibile con il solo cambio di tecnologia di saldatura. L'impiego di tecnologie di saldatura più efficienti (e più costose) giustifica anche l'impiego di materiali più performanti [35]: si registra spesso una riduzione dei costi, dovuta al minore impiego in termini quantitativi di materiale. Ci sono cioè concreti riscontri, nella pratica, all'idea che l'eco-design dei prodotti debba coinvolgere nuovi materiali e nuove tecnologie per realizzare l'obiettivo di un minore dispendio sia di energia che di materie prime.

4.2.1 Saldatura di acciai da caldareria a elevate prestazioni: confronto fra tecnologia TIG e EBW

Come anticipato, l'impiego di materiali a elevate prestazioni rispetto a materiali standard è certamente sinergico nel definire linee guida per la riduzione dei consumi energetici. Nella Figura 26 è riportato un esempio di riduzione di spessore possibile relativo all'applicazione di differenti acciai resistenti al creep per la realizzazione di un componente. In Blu le dimensioni del componente realizzato in P22 un acciaio 2 ¼ Cr 1 Mo (2,25 Cr, 1Mo) largamente impiegato negli impianti di produzione di energia, in giallo l'acciaio oggetto di studio che è maggiormente legato con il 9 % di cromo e 2,25% di Mo.

Come evidenziato dalla figura lo spessore sul componente principale di 450 mm di diametro interno viene ridotto da 155 a 67 mm e sul bocchettone a diametro minore da 103 a 45 mm con una riduzione percentuale di quasi il 60%.

L'impiego di P91 quindi induce una riduzione dell'energia sia in fase di produzione del materiale sia per la saldatura in termini di tempi e di costi, confermando che la prassi di utilizzare materiali con migliori caratteristiche meccaniche è una buona regola di ecodesign.

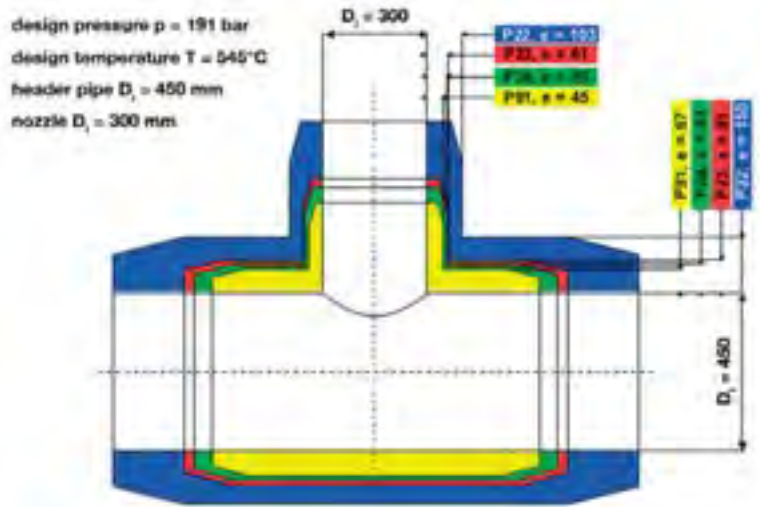


Figura 26: Schematizzazione della riduzione di spessore ottenibile in funzione del tipo di acciaio resistente al creep (P22, P23, P24 and P91) utilizzato per la realizzazione di un componente in pressione in accordo alla EN 13480-3 [36]

La messa a punto del processo è stata effettuata utilizzando lamiere di spessore 12,5 mm di P91 la cui composizione chimica è riportata nella tabella seguente.

Tabella 10 – Composizione acciaio da caldareria

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	V	N ₂	Cu
P91	0.102	0.205	0.457	0.019	0.0016	8.977	0.852	0.238	0.012	0.082	0.20	0.0458	0.053

I test per l’ottimizzazione della saldatura TIG e quindi per la realizzazione del giunto strutturale sono stati effettuati in accordo alla normativa ISO.

La saldatura TIG è stata ottimizzata in due configurazioni, con cianfrino 60° e cianfrino 70°, con due tecniche differenti di saldatura *multipass* (saldatura con passate multiple), una a cordoni stretti, l’altra a cordoni larghi e sottili. La saldatura EBW è stata realizzata invece a lembi retti, senza cianfrinatura, in un’unica passata.

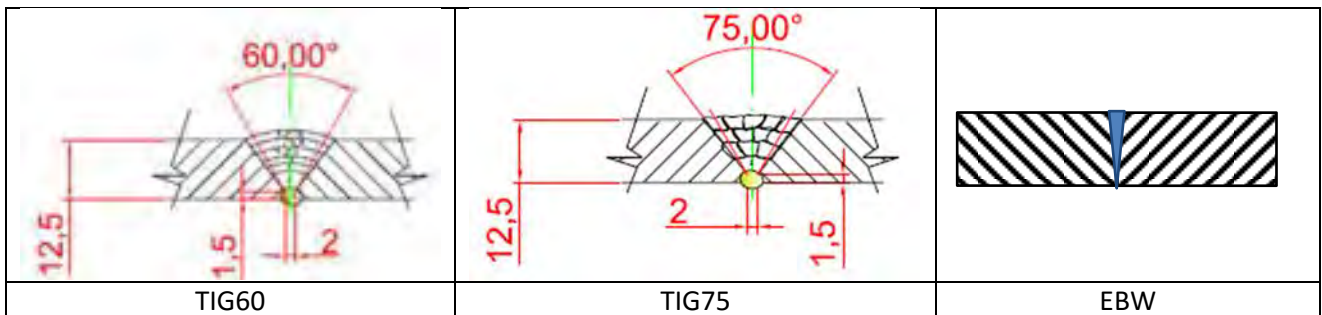


Figura 27: Schematizzazione preparazione dei lembi per la saldatura TIG ed EBW.

Per la qualifica dei campioni sono stati condotti tutti i test distruttivi e non distruttivi previsti per la specifica applicazione. A titolo di esempio nella Figura 28 viene schematizzata la procedura di qualifica che porta a definire le condizioni di efficacia del giunto. Per maggiori approfondimenti si rimanda a specifiche pubblicazioni [37] [38].

La procedura prevede, previa esecuzione di test non distruttivi di tipo superficiale e volumetrico (che mostrino la continuità di giunzione e l’assenza di difetti) il campionamento del saggio di saldatura per la

realizzazione di prove di trazione trasversale, trazione longitudinale, piega, analisi macrografica, profilo di durezza e test di resilienza secondo quanto previsto dalla ISO 15614.

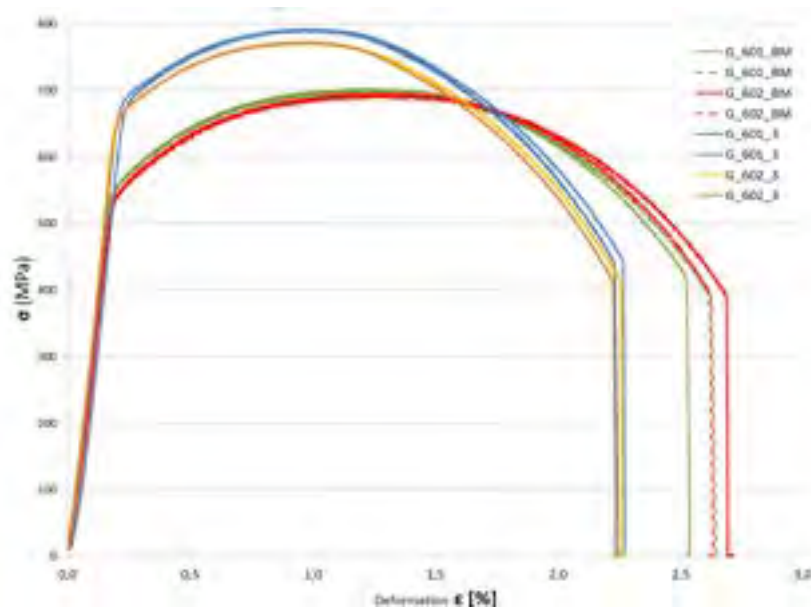
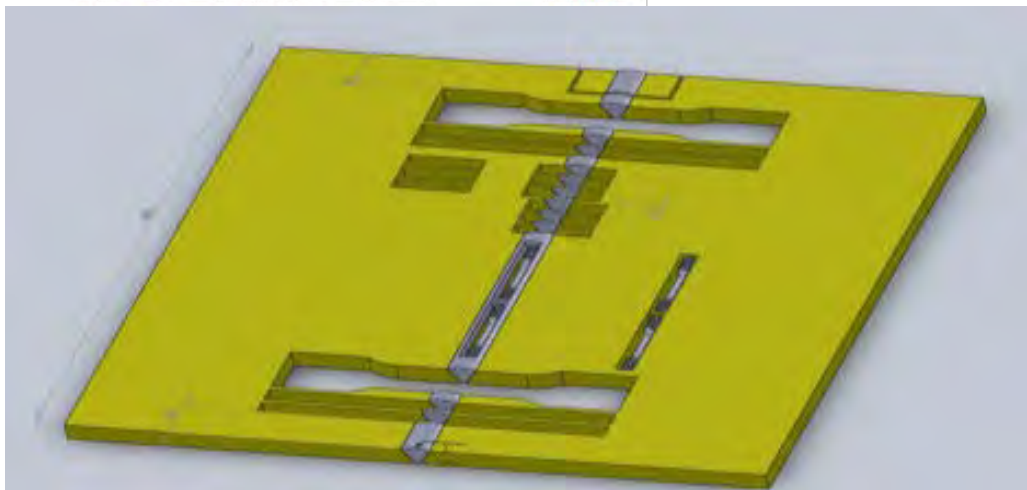
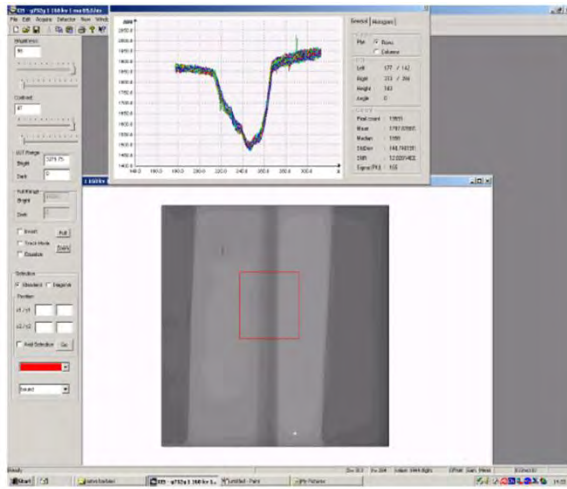


Figura 28: Schematizzazione della procedura di qualifica dell'efficacia di giunzione.

La Figura 28 mostra un esempio di analisi volumetrica mediante radiografia RX e successiva elaborazione dell'immagine, lo schema di estrazione dei provini per le varie prove meccaniche e analisi metallografiche e i risultati dei test meccanici che mostrano una resistenza (statica) del saldato superiore a quella del materiale base.

In questo specifico lavoro i parametri sono stati analizzati sotto l'aspetto energetico, misurando la dimensione della zona fusa e l'apporto termico complessivo.

La saldatura EBW viene realizzata senza la necessità della cianfrinatura a V e questo comporta complessivamente già un primo risparmio sia di materiale che di energia per le minori quantità di lavorazioni meccaniche necessarie per la preparazione.

La Figura 29 mostra il confronto fra una saldatura Electron Beam Welding e la saldatura TIG di piastre di acciaio spesse 12,5 mm, in condizione di giunto efficace, ovvero completamente qualificato per l'applicazione strutturale.

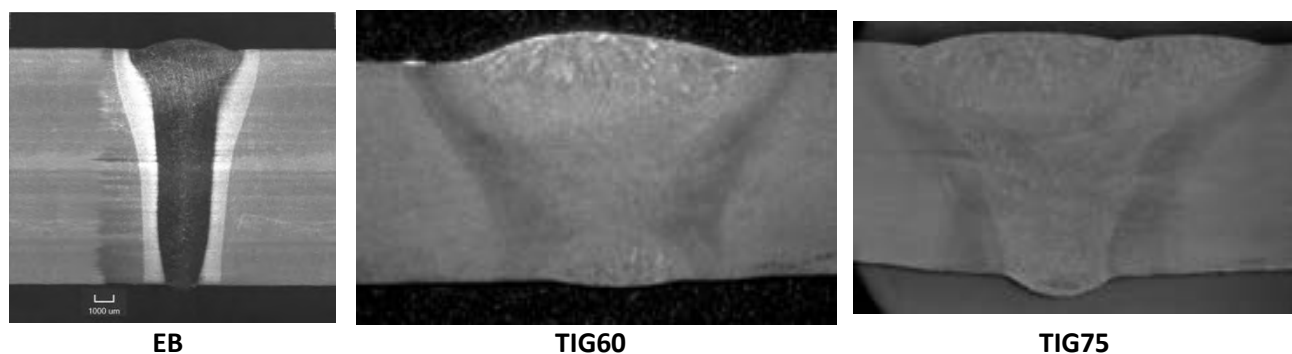


Figura 29: Confronto fra saldatura di acciaio spessore 12,5 mm: EBW (sx) e TIG (dx).

La Tabella 11 riporta i parametri finali ottimizzati nelle due configurazioni qualificate di saldatura TIG identificate con le sigle TIG75 e TIG60 e mediante saldatura EB.

Tabella 11 – Tabella di comparazione fra i principali parametri di saldatura con saldatura TIG ed EBW

Id	I (A)	V (V)	vs (mm/min)	vf (mm/min)	HI(kJ/mm)	N.pass.*	D.R.(g/cm)**	Bevel***	Q (J/mm)
EB	0,2	60000	1000	NA	0,72	1	NA	0	720
TIG75	230	12	120	1320	1,41	11	0,67	75°	15510
TIG60	250	12	90	990	1,84	8	0,67	60°	14720

*N. Pass indica il numero di passate necessarie per completare il processo

** D.R. (Deposition Ratio) indica i grammi di materiale d'apporto specifici depositati (applicabile principalmente ai processi ad arco in cui è necessario un riempimento del cianfrino)

***BEVEL indica il tipo preparazione dei lembi (cianfrinatura)

Come si evince dall'ultima colonna della tabella, riferita all'apporto termico specifico complessivo per unità di lunghezza Q (J/mm), si può osservare come l'efficienza di fusione del processo EBW sia molto più elevata nel trasferimento di energia secondaria ("dalla torcia") rispetto al processo ad arco, TIG.

Infatti, l'apporto termico specifico complessivo per l'EBW è di 720 J/mm mentre per la saldatura TIG, in entrambe le condizioni analizzate, è più di 20 volte superiore. L'EBW impiega quindi solamente il 5% dell'energia rispetto al TIG, per realizzare una saldatura analoga.

Considerato che questi due processi hanno principi di trasformazione dell'energia alla presa simili, per quanto possano incidere i maggiori consumi energetici degli ausiliari per la generazione del vuoto del processo EBW, il risultato conferma quanto riportato in letteratura.

Per quanto riguarda l'efficienza di fusione η_f , l'efficienza di penetrazione η_p e la corrispondente efficienza elettrica η_e queste sono state valutate determinando l'energia adiabatica e misurando le aree della ZF.

$$\eta_e = \eta_f * \eta_p$$

Per la determinazione del η_f è stata valutata l'entalpia a 2203 K ovvero 1750 °C come riportato da Niles e Jackson [39]. Grazie ai moderni strumenti di calcolo è stato possibile valutare gli specifici parametri termofisici del P91 in funzione della composizione chimica. In particolare il software JMATPRO™ ha fornito dati in linea con l'articolo citato ma più precisi perché adattati alla specifica lega. La figura seguente mostra la simulazione del processo di riscaldamento e raffreddamento dell'acciaio P91, il valore dell'entalpia a 1750° C è di 1488 J/g.

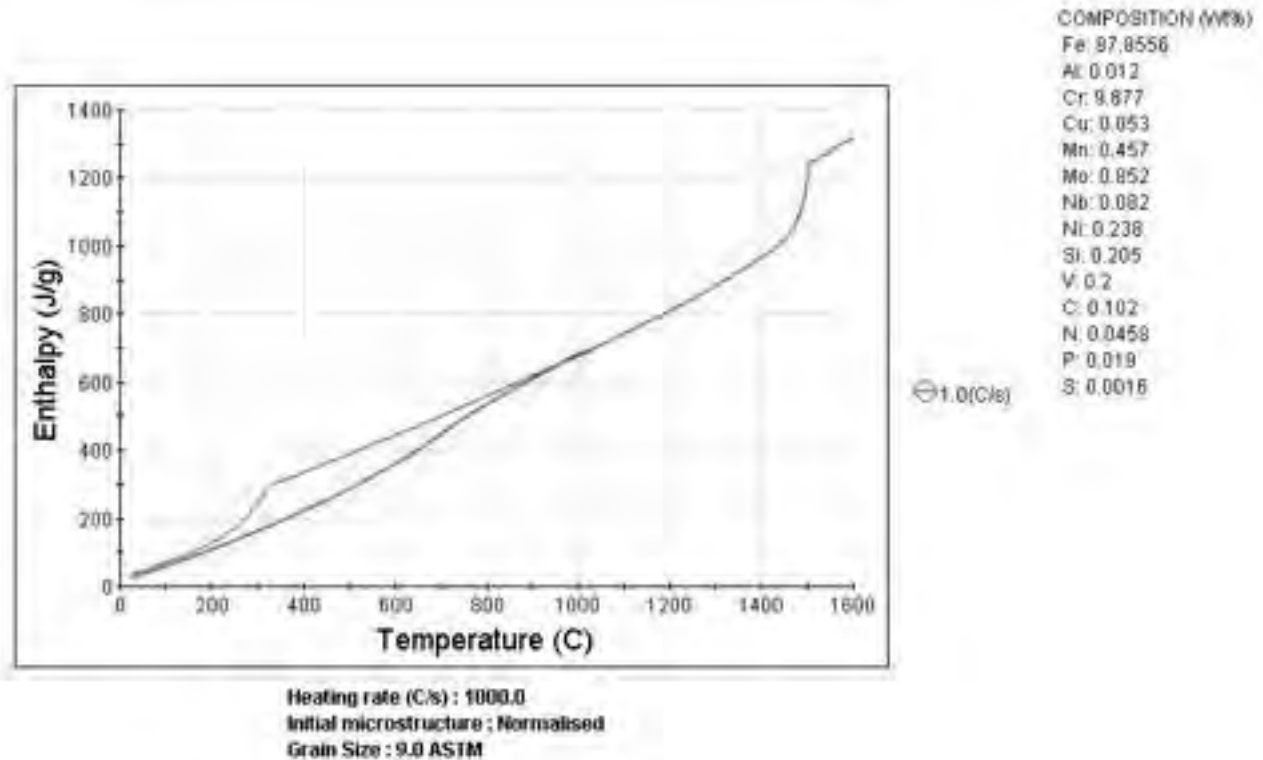


Figura 30: Simulazione mediante JMATPRO™ dell'energia necessaria a portare 1g di P91 ad una determinata temperatura comprese variazioni di fase e fusione.

L'energia adiabatica di fusione può essere determinata con maggiore precisione rispetto alla formula semplificata esposta nel paragrafo 3.2 (in cui si richiede il calore specifico medio).

$$\eta_f = \frac{A_f * u_l * \rho * [Ct * (Tf - T0) + \lambda]}{WE} = \frac{A_f * V_s * \rho * [Ct * (Tf - T0) + \lambda]}{WP} = \frac{A_f * V_s * \rho * \Delta H_{2023K}}{WP}$$

Di seguito per semplicità sono inoltre riportate le relazioni per gli altri rendimenti e fattori descritti nel paragrafo 3.2 e calcolate di seguito per i due processi.

$$\eta_p = \frac{p}{w}$$

$$FEE = \frac{V_{sc} * p_c}{W_{PC}} \text{ (mm}^2/\text{kJ)}$$

La tabella seguente riporta infatti i dati comparativi in termine dei rendimenti definiti in questo lavoro.

Tabella 12 – Tabella di comparazione fra i principali parametri di saldatura con saldatura TIG ed EBW

Id	Bevel	vs (mm/min)	HI(kJ/mm)	N. pass.	WP (W)	WPc (W)	Af (mm ²)	η_f (%)	η_p (%)	η_e (%)	FEE (mm/kJ)
EB	0	1000	0.72	1	16000	16000	38	46.3	4,3	199.1	13,0
TIG75	75°	120	1,41	11	3247	35717	156	10	0,7	7	0,064
TIG60	60°	90	1,84	8	3529	28232	146	9.9	0,7	6.9	0,083

***WP valutata considerando un'efficienza elettrica del 75% per l'impianto EB e dell'85% per il TIG inverter**

Le celle evidenziate mostrano valori paragonabili tra loro ma minori (di più ordini di grandezza) rispetto al fattore di efficienza dell'EB.

Il valori dell'efficienza η_e (compensata con il rapporto di forma) confermano quanto mostrato nella comparazione dei consumi, ove si osservava che di fatto il consumo elettrico del processo al fascio elettronico era solamente del 5%, in questo caso, tenendo in considerazione anche elementi inerenti il rendimento di penetrazione la differenza risulta ancora più marcata.

Per quanto riguarda il fattore di efficienza energetica FEE, si osserva come questo sia di praticamente 3 ordini di grandezza inferiore a quello delle saldatura laser. Questo è dovuto al numero elevato di passate che quindi induce riduzioni di produttività ed incrementi di consumi ovvero l'FEE è inversamente proporzionale al quadrato del numero di passate di saldatura.

4.2.2 Saldatura di acciai da costruzioni ad elevate prestazioni: confronto fra tecnologia TIG e Laser

Tra gli acciai da costruzione strutturali più diffuso è certamente UNI ISO 10025 S275, tuttavia cominciano ad essere utilizzati anche acciai da carpenteria a maggiore resistenza come S355 e superiori. L'identificazione numerica dell'acciaio da costruzione carbonio – manganese aiuta nel determinarne le caratteristiche. Infatti, per questa serie l'identificativo numerico corrisponde al carico di snervamento, parametro di resistenza meccanica su cui si basano la maggior parte dei codici di calcolo e progettazione. L'impiego di acciai da costruzione a maggiore resistenza, in analogia a quanto descritto in precedenza per gli acciai da caldareria resistenti al creep, permette, se non ci sono limiti imposti dalla deformabilità del componente, di ridurre gli spessori e quindi anche la dimensione delle saldature in modo proporzionale alla resistenza a snervamento. Il materiale utilizzato per la comparazione fra TIG e Laser è un acciaio da costruzione ad alta resistenza, l'S460 NL UNI ENE ISO 10113 con carico di snervamento minimo di 460 MPa che promette quindi una riduzione delle sezioni resistenti, rispettivamente circa del 23% e del 40%, rispetto ai più comuni S355 e S275.

La tabella seguente riporta la composizione chimica dell'acciaio preso in considerazione.

Tabella 13 – Composizione Acciaio Strutturale

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb	Ti	C _{eq}
S460 NL	0.18	1.54	0.27	0.011	0.004	0.02	0.49	0.03	0	0.028	0.07	0.035	0	0.49

Anche in questo caso l'ottimizzazione del processo per garantire l'efficacia di saldatura mediante laser è avvenuta con metodologia simile al caso precedente; per i dettagli si rimanda a lavori precedenti [40]. L'analisi dal punto di vista energetico dei giunti saldati laser è stato effettuata su tre tipologie: 1) saldatura laser *stand alone*, che permette le maggiori velocità di processo, 2) saldatura con filo d'apporto, che migliora la duttilità del giunto, 3) saldatura con filo d'apporto e passata di lisciatura, per aumentare la vita a fatica del componente.

In pratica, per la tecnologia laser, la valutazione dell'efficienza energetica è stata effettuata a tre livelli di efficacia di giunzione dal punto di vista strutturale.

La figura seguente mostra gli 8 campioni analizzati che sono stati anche realizzati con differenti tipi di gas di protezione e differenti materiali d'apporto. Parte delle analisi sono state condotte dall'Università Roma Tor Vergata in particolare per la valutazione della dimensione della ZF, mediante profili di microdurezza (si rimanda al report RdS/PAR2015/069).

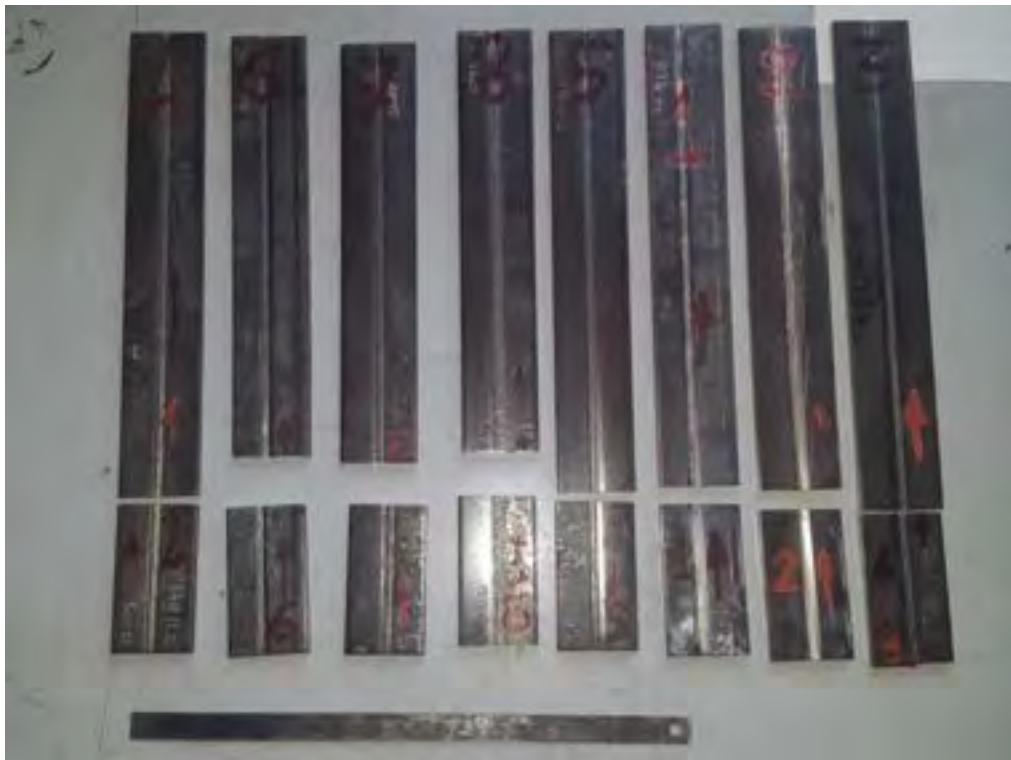


Figura 31: Campioni estratti da coupon di saldatura realizzati con parametri di saldatura ottimizzati dal punto di vista di efficacia di saldatura con differenti livelli di qualità

Da ogni campione è stata prelevata una sezione centrale di circa 20 mm. Le sezioni (20 x 20 x 5 mm) sono state inglobate in resina fenolica e successivamente state levigate con carte abrasive, lucidate su panni con l'utilizzo di paste diamantate fino a dimensioni dell'abrasivo 1 μm e attaccate con Nital 2% per poterne evidenziare la zona fusa e la zona termicamente alterata della sezione trasversale del cordone. Le immagini ottenute mediante microscopio ottico dei campioni dopo l'attacco acido sono riportate nel seguito.

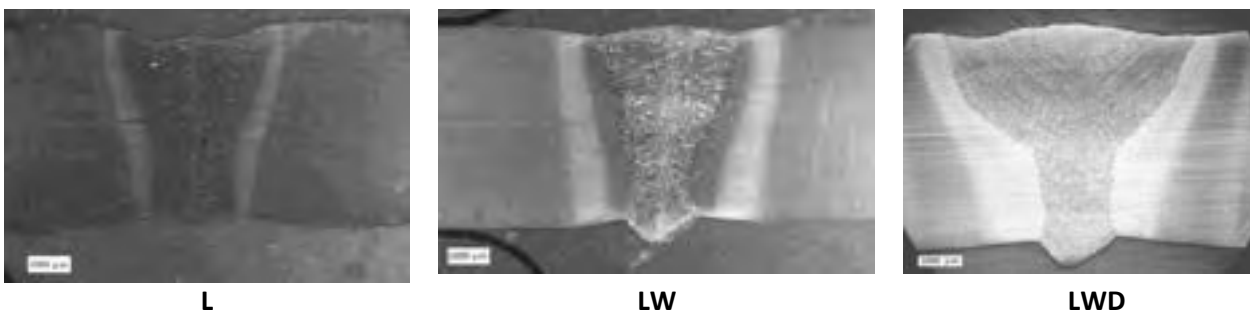


Figura 32: Sezioni trasversali rappresentative per le sezioni trasversali delle saldature laser (L); Laser con filo d'apporto (LW); laser con filo d'apporto e successiva passata di lisciatura o "Dressing" (LWD).

Le immagini mostrano chiaramente il metallo base, la zona termicamente alterata e la zona del fuso, in accordo alla microstruttura standard dei giunti saldati in acciaio.

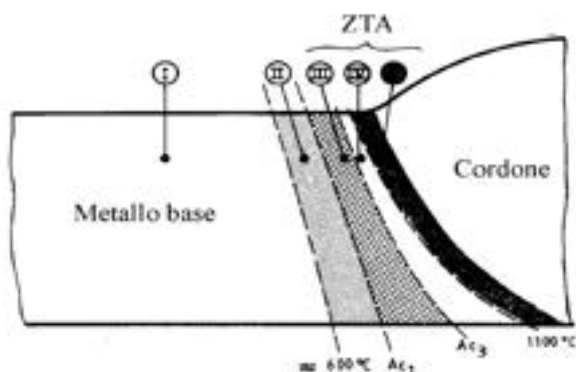


Figura 33: Schematizzazione delle zone di giunti saldati di acciaio. L’area del cordone è quella fusa completamente.

Misurando l’area fusa (A_f) e conoscendo la velocità di saldatura è possibile risalire al volume fuso nell’unità di tempo.

Nel caso del campione LWD sono evidenziate, in maniera qualitativa, le due aree di fuso, per le due passate. Si osserva infatti per le saldature L e LW che la pulitura dei lembi ed il ritiro localizzato della saldatura genera delle incisioni marginali. Tali incisioni risultano nei limiti di qualifica del processo in accordo alla UNI ISO 13919-1; le prove meccaniche statiche, per i cui dettagli si rimanda al lavoro di messa a punto del processo [40], mostrano una buona resistenza meccanica con rotture al di fuori del giunto saldato, tuttavia, in alcuni casi, per componenti che fossero soggetti a fatica, è stata anche messa a punto una procedura che in gergo viene definita “Lisciatura” o “Dressing”, per migliorare le caratteristiche di resistenza a questo tipo di sollecitazione. Questo in quanto il fenomeno delle incisioni marginali è tipico dei processi laser (veloci) mentre è completamente controllabile ed evitabile con i processi di saldatura TIG. Per una comparazione complessiva con quest’ultimo processo, più lento ma che certamente permette dei cordoni di qualità eccellente, il confronto è stato effettuato anche con questa variante di saldatura laser a due passate, la prima di saldatura con filo d’apporto, la seconda, defocalizzata, di lisciatura.

La figura seguente mostra la distinzione delle due aree sul cordone LWD.

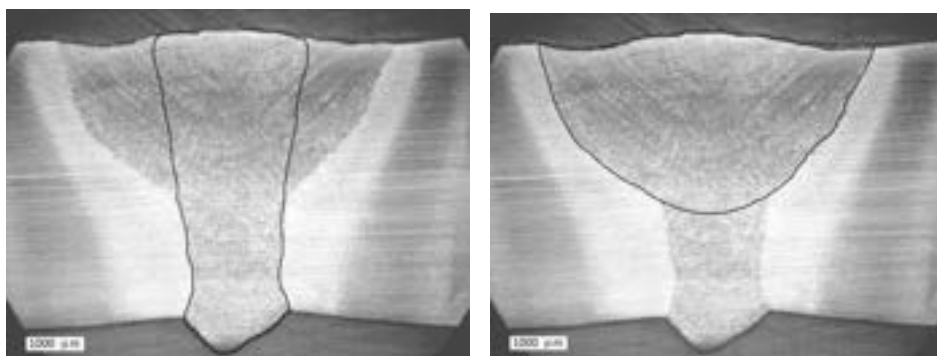


Figura 34: Estrapolazione delle AF generate dalle due passate successive di saldatura e lisciatura laser.

Il valore dell’entalpia di fusione è stato calcolato sempre con il programma JMATPRO™ inserendo la specifica composizione chimica dell’S460. La figura seguente mostra il grafico della simulazione effettuata fino a 1750°C e il valore corrispondente di $\Delta H_{2023K}=1460 \text{ J/g}$ leggermente inferiore a quello del P91.

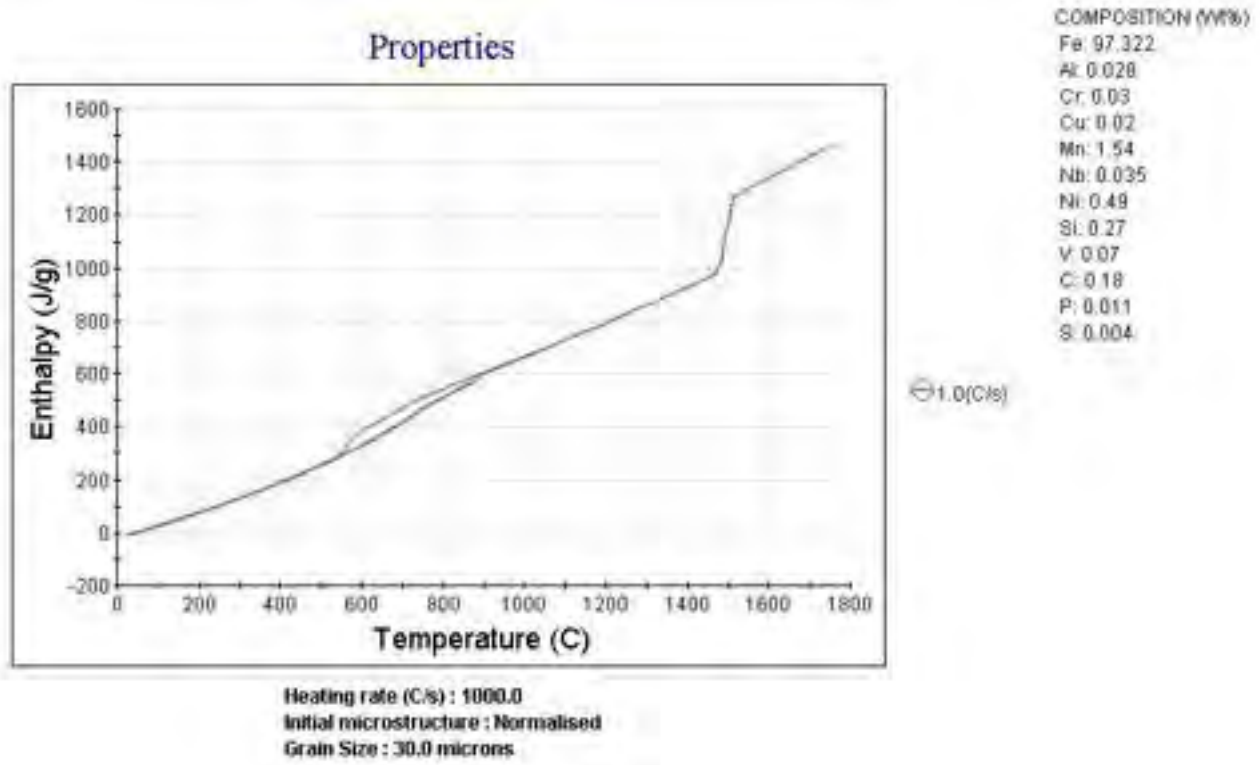


Figura 35: Simulazione mediante JMATPRO™ dell'energia necessaria a portare 1g di S460 ad una determinata temperatura comprese variazioni di fase e fusione.

La tabella seguente riporta i principali parametri di saldatura con i dati energetici relativi alla saldatura laser e TIG

Id	Bevel	Vs (mm/min)	P (W)	HI (kJ/mm)	N. Pass.	Q (J/mm)	WPc (kW)	Af (mm ²)	η_f (%)	η_p (%)	η_e (%)	FEE (mm ² /kJ)
L	0	1200	5100	0,255	1	255	17	8,3	11,2	2,1	23.5	5,9
LW	1x45°	800	5100	0,383	1	383	17	10,6	9,6	2,1	20.2	3,9
LWD	1x45°	800	5100	0,383	2	766	34	15,7	7,1	1,5	11.3	0,98
TIG	60°	90	3000	1,84	3	5520	10,6	48	7,8	0,7	5,5	0,24

*PEc valutata considerando un'efficienza elettrica del 30% per l'impianto Laser e del 85% per il TIG inverter

Per quanto riguarda il rendimento elettrico η_e si osserva, nel caso della saldatura Laser a singola passata (con e senza filo), un valore che è circa 4 volte quello del TIG mentre, con due passate, il vantaggio dimezza. In questa comparazione il fattore preponderante è la capacità di penetrazione del laser mentre il rendimento di fusione collegato all'energia assorbita dalla rete è comparabile, grazie al maggior rendimento dei generatori ad arco inverter. Va considerato che, per la valutazione, è stato ipotizzato un rendimento di trasformazione elettrica del laser del 30% ma attualmente, nuove sorgenti laser raggiungono valori superiori, fino al 50%.

Per il FEE, anche in questo caso TIG risulta svantaggiato, sebbene nel laser vi sia un ampio *range* di valori in relazione alle varianti del processo considerate, in particolare il valore si abbassa considerevolmente con la doppia passata, che incide notevolmente sulla produttività e quindi sui tempi di utilizzo dell'impianto. Questo avvalorava l'impiego dell'FEE come fattore che tiene in considerazione sia il consumo energetico diretto che quelli indiretti.

Il grafico seguente sintetizza quanto sopra esposto.

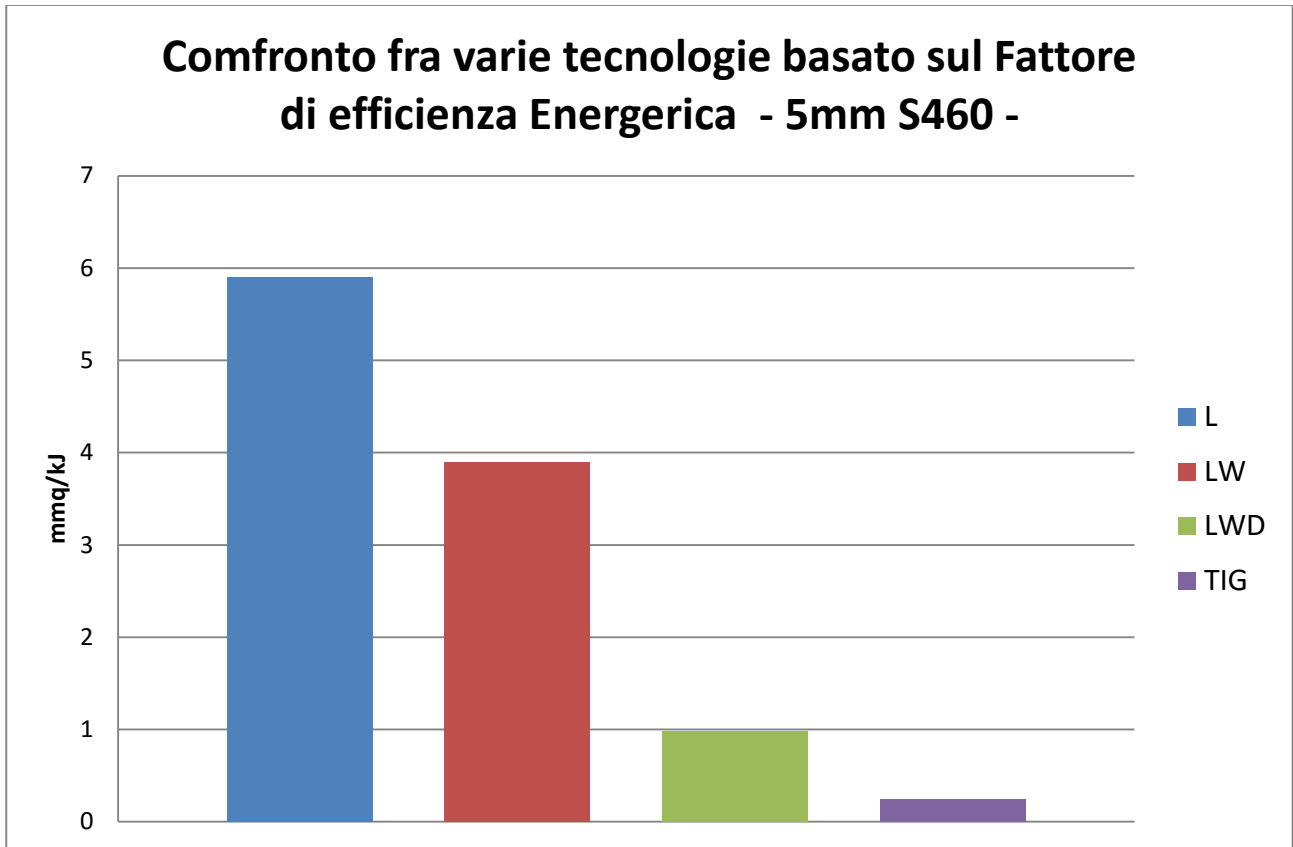


Figura 36: Confronto sull'efficienza energetica fra differenti tecnologie nella saldatura di acciai strutturali al carbonio manganese

4.3 Analisi e comparazione dell'efficienza energetica fra la saldatura LASER, TIG e FSW su leghe di alluminio.

Le leghe di alluminio trovano una sempre maggiore applicazione, in particolare nel settore dei trasporti per conseguire l'alleggerimento strutturale, ma anche nel settore chimico per le caratteristiche legate alla resistenza a corrosione e resistenza criogenica. Certamente, dopo gli acciai, le leghe di alluminio sono i materiali da costruzione più utilizzati.



In analogia a quanto fatto per gli acciai, a partire da processi ottimizzati dal punto di vista dell'efficacia strutturale della saldatura, i giunti sono stati analizzati sotto l'aspetto energetico.

In particolare per questo tipo di saldatura il confronto è stato effettuato con la saldatura FSW grazie a dati forniti dall'università di Genova. I materiali di riferimento sono stati le leghe della serie 6xxx, in particolare la lega AA6082, ampiamente utilizzata in vari settori e disponibile sia sotto forma di estrusi sia di piastre.

La saldatura delle leghe di alluminio risente della presenza di uno strato di ossido alto fondente di difficile rimozione: sono stati quindi valutati anche processi ibridi laser-arco. In questo caso infatti la saldatura avviene in polarità alternata in modo che lo strato di ossido superficiale possa essere "rotto" mediante il processo di sabbiatura ionico. Questo effetto, normalmente utilizzato nella saldatura TIG delle leghe di alluminio, è sfruttato positivamente e sinergicamente anche nella saldatura laser.

La Tabella 14 mostra i risultati di due processi di saldatura, il primo solamente laser, il secondo con un processo sinergico laser accoppiato ad arco.

Tabella 14 – Principali parametri di saldatura Laser e ibrida Laser TIG

Potenza (W)	vs (mm/min)	vf (mm/min)	qr (Nl/min)	HI (J/mm)	WPc (kW)	Esc (J/mm)	Sezione trasversale
Laser 3800	1200	3000	20	190	12,7	633	
Laser 2200 TIG 1080 Totale 3280	800	1600	20	246	8,6	645	

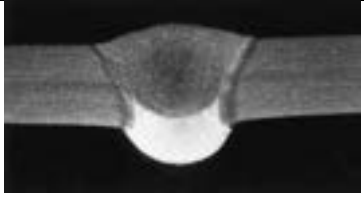
*WPc valutato con un'efficienza elettrica del 30% per l'impianto Laser e dell'85% per il TIG inverter

In entrambi i casi è stata raggiunta la condizione di efficacia meccanica del giunto; l'apporto termico complessivo è minore nel caso del primo processo (190 J/mm) rispetto al secondo (246 J/mm). Dal punto di vista dell'efficienza di fusione il processo di saldatura laser *stand alone* è migliore. Tuttavia nel primo caso l'intera energia viene fornita da un generatore laser con rendimento ipotizzato pari al 30%; nel secondo caso invece la potenza viene erogata per circa 2/3 dal laser (2200 W) e il resto dal generatore Nertamatic 450 in modalità pulsata (1080 W) con rendimento valutato l'85%. La potenza elettrica assume quindi i valori

12,7 kW per il laser e 8,6 kW per il TIG. È anche interessante valutare la “l’Energia Specifica complessiva” (Esc) che è quasi uguale nei due casi (rispettivamente 633 e 645 kJ/mm).

Per quanto riguarda la saldatura TIG, da dati di letteratura sono stati estrapolati i seguenti parametri di saldatura.

Tabella 15 – Parametri di saldatura TIG leghe di alluminio da letteratura [41]

Tensione (V)	Corrente (I)	Vs (mm/min)	HI (J/mm)	N	WPc (kW)	Esc (J/mm)	Sezione trasversale
14	250	250	840	2	8,2	1976	

*WPc valutata considerando un’efficienza elettrica dell’85% per il TIG inverter

Sulle leghe di alluminio è possibile il confronto anche con la saldatura FSW che avviene allo stato solido e promette la migliore efficacia di processo.

A tale riguardo l’Università di Genova ha condotto test per ottimizzare i parametri e ha identificato la procedura e i punti di assorbimento di energia elettrica: in questo caso la macchina deve fornire energia meccanica che viene in parte dissipata per attrito generando il calore che porta la temperature delle parti a circa 400°C, in parte trascina, rimescolandolo, il materiale allo stato pastoso.

Di seguito la sezione trasversale ottimizzata realizzata e i dati relativi al processo FSW per la giunzione efficace su spessori di 5 mm della stessa lega.

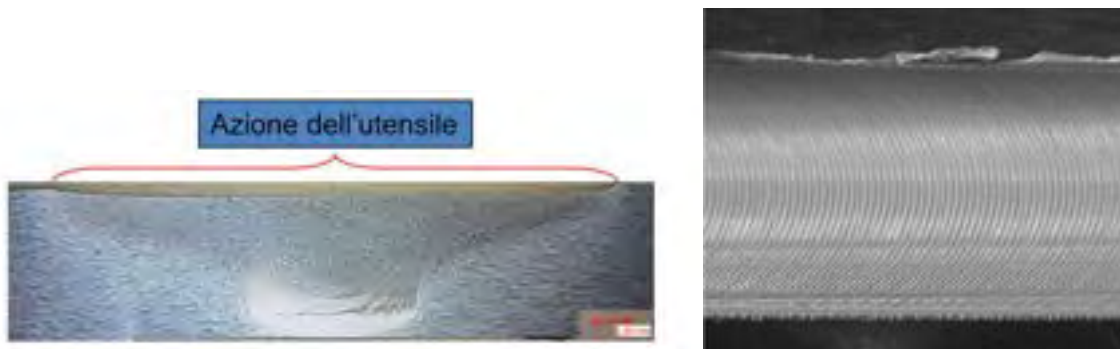


Figura 37: Sezione e vista dall’alto di uno dei giunti realizzati

La tabella seguente mostra i parametri, relativi a questo specifico processo di saldatura allo stato solido in cui la “potenza totale assorbita” è riferita alla misura diretta dell’assorbimento della rete, HE è l’apporto specifico di energia sia termica che meccanica che può essere un parametro di confronto con le altre tecnologie: esso è valutato sottraendo, alla potenza elettrica misurata durante la saldatura, la potenza a vuoto (2430 W).

Tabella 16 Parametri di saldatura e potenza totale assorbita

ID Prova	Parametri di saldatura		Potenza totale assorbita* [W]	HE [kJ/mm]	Esc [J/mm]
	Velocità di rotazione utensile [giri/min]	Velocità di avanzamento dell'utensile vs [mm/min]			
1	1230	260	6300	0,89	1450
2	630	260	5225	0,645	1210
3	460	260	4520	0,482	1040
4	630	390	5240	0,432	810

*valore misurato

Complessivamente si osserva che la riduzione della velocità di rotazione dell'utensile a parità di velocità di saldatura riduce l'apporto termico quindi, a parità di efficacia garantita, è da privilegiare il parametro della prova 4 che introduce anche un incremento di produttività.

Considerata la condizione a minore necessità di energia alla presa e calcolando il fattore di efficienza energetica per i 4 processi, essenzialmente in funzione della velocità complessiva del processo e della Potenza specifica assorbita alla presa, i risultati sono riepilogati nella tabella seguente.

Tabella 17 Confronto fra differenti processi di saldatura *single-pass* su lamiere di 5 mm di spessore in leghe di alluminio 6xxx mediante il Fattore di Efficienza Energetica (FEE)

Tecnologia	VSc (mm/s)	WPc (kW)	FEE (mm ² /kJ)
LASER	20	12,7	7,9
LASER TIG	13,3	8,6	7,8
TIG	4,2	8,2	2,6
FSW	6,5	5,2	6,3

I risultati mostrano come la FSW abbia un FEE superiore di ¼ circa rispetto al TIG e i processi Laser TIG e laser abbiano un FEE superiore a quello del FSW, della stessa misura (25% in più).

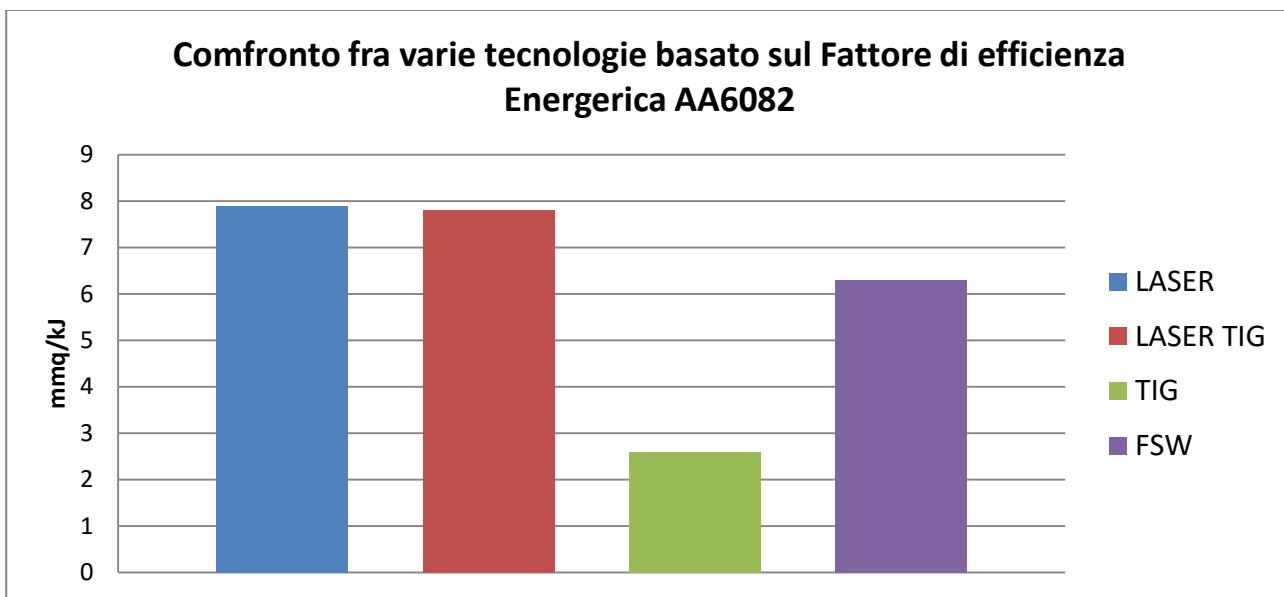


Figura 38: Confronto fra tecnologie di saldatura laser, FSW e TIG

Il FEE di fatto sintetizza e racchiude anche informazioni sulla produttività e sui fattori di secondo livello di consumo energetico a esso legati.

La figura seguente mostra infatti, sullo stesso grafico, la velocità di processo e l'assorbimento energetico complessivo (PEC). Si nota, ad esempio, che le tecniche Laser e Laser-TIG, pur avendo velocità diverse, sono simili dal punto di vista dell'assorbimento totale (per effetto del maggiore rendimento elettrico del generatore TIG). La diversa velocità e quindi produttività può essere un criterio di scelta nelle applicazioni, a parità di consumi specifici.

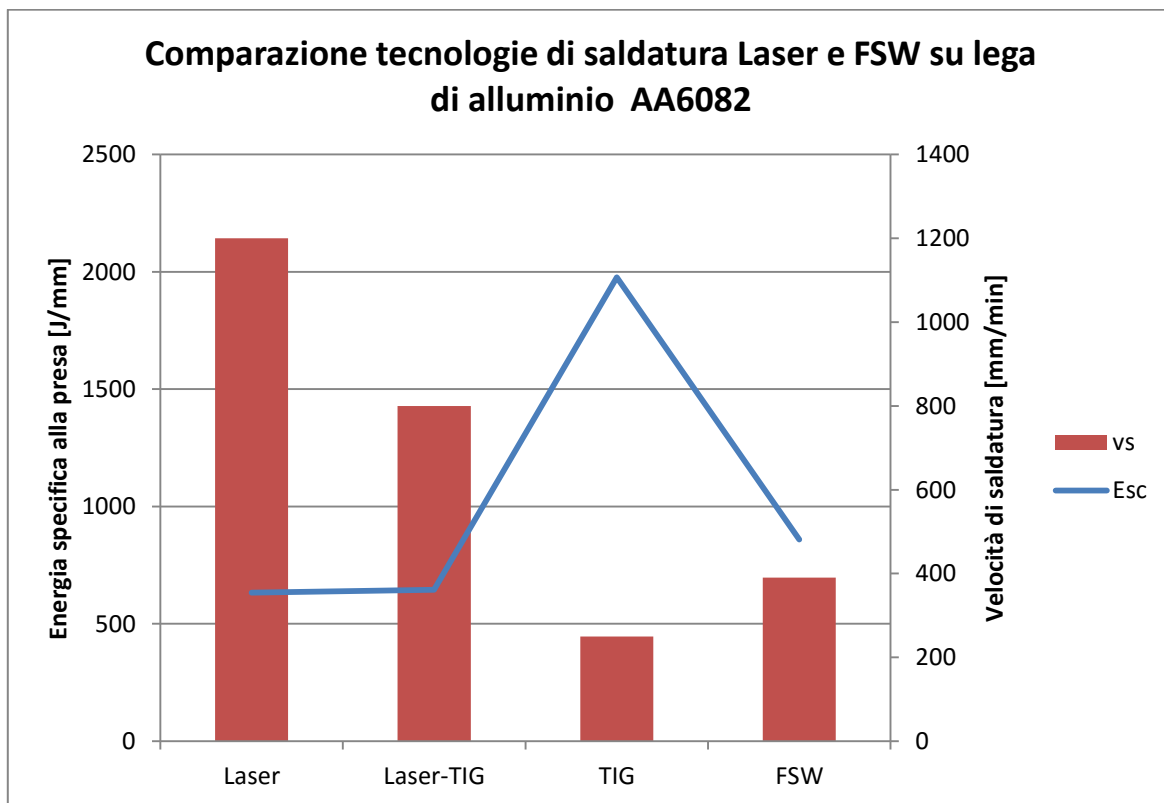


Figura 39: Grafico di comparazione fra le tecnologia di saldatura Laser, TIG e FSW

5 Conclusioni

Sono state analizzate le norme e le direttive che potenzialmente possono essere applicate al settore della saldatura industriale. Il lavoro ha evidenziato un'effettiva carenza di norme specifiche di classificazione energetica, sia dei generatori e ancor più per i processi, evidenziando essenzialmente studi di letteratura incompleti o di parte, in cui l'elemento centrale è il fattore economico e il fattore energetico spesso una grandezza correlata.

In generale la EU indica Best Practices relative all'eco-design del prodotto sia esso il generatore stesso di saldatura o i manufatti saldati, con possibilità di realizzare nel lungo periodo risparmi dell'ordine del 6%.

E' stato possibile realizzare una campagna sperimentale sulle diverse tecniche, in parte grazie all'aggiornamento di attrezzature già presenti in ENEA, in parte acquisendo nuovi componenti o sistemi di misura ad hoc, che hanno permesso l'allestimento di un laboratorio unico nel suo genere, destinato al testing energetico di generatori arco e laser di diversa natura, in specifiche condizioni reali di utilizzo per certificarne la reale efficienza.

In tale laboratorio è presente:

- a- Un sistema di movimentazione automatico X-Y con corsa assi di 500 mm e velocità fino a 10.000 mm/min corredato di:
 - i. Sistema di aspirazione fumi certificato per condizioni di saldatura sicure e ripetibili;
 - ii. Sistema di posizionamento dei provini standard di qualifica termostato;
 - iii. Sistema di materiale di apporto e distribuzione dei gas multi linea;
- b- Generatore ad arco inverter Air Liquid Welding Nertamatic 450:
 - i. saldatura di acciaio con torcia per sistemi industriali MEC4 nella modalità TIG DC
 - ii. saldatura leghe di alluminio con torcia industriale MEC4 nella modalità TIG AC;
 - iii. Saldatura pulsata;
 - iv. Saldatura Plasma con torcia specifica SP7
- c- Generatore laser in fibra con potenze fino a 4000 W;
 - i. Testa di focalizzazione fissa e wobbling, fino a 6000 W di potenza;
 - ii. Potenza continua e modulata
- d- Sistemi ausiliari di refrigerazione separati per torce ad arco e per testa di focalizzazione laser;
- e- E' stata sviluppata una prima versione del sistema di monitoraggio dei vari segnali con software di gestione e registrazione in ambiente LabVIEW che integra:
 - i. Uno chassis National Instruments Compact DAQ 9188 capace di ospitare fino a 8 moduli di acquisizione di diverso tipo e, al contempo, fornire connessioni wired (Ethernet) e wireless (IEEE 802.11g) verso un PC remoto. Moduli impiegati NI9205 (misura tensione), NI9203 (corrente)
 - ii. Sistema di misura della potenza e della qualità del fascio PRIMES per sorgenti laser fino a 8000 W con registrazione computerizzata della qualità del fascio e analisi della caustica e misuratore della potenza con registrazione dai su PC e uscita analogica aggiuntiva da interfacciare con Sistema di acquisizione NI;

Il sistema installato nel laboratorio, costituito da componenti portatili, sarà utilizzato come *test bench* per la riproduzione di un sistema ad hoc da utilizzare anche sul campo in installazioni industriali; esso sarà collaudato anche sull'impianto EBW.

E' stato inoltre definito il primo modello di definizione di efficienza energetica globale del processo che andrà applicato a casi tipo per eventuali correzioni basate su misure reali.

Sulla base della comparazione dei processi basata in parte su consumi misurati in parte su consumi calcolati (in funzione di rendimenti dei generatori standard) alcune interessanti indicazioni si osservano, sia per la saldatura degli acciai che in quella delle leghe di alluminio.

In particolare, i processi di saldatura ibridi laser-arco, che permettono di avere anche una buona qualità del giunto, risultano più promettenti rispetto alla saldatura FSW.

Allo stesso tempo, anche se certamente i costi di impianto sono assai più elevati, i processi ad alta densità di energia, nella saldatura di spessori di 5 e 12 mm di acciaio, risultano estremamente più efficienti dal

punto di vista energetico con vantaggi che, per la tecnologia EBW superano l'ordine di grandezza rispetto alla saldatura arco.

Riguardo ai parametri di comparazione identificati si è osservato come il rendimento elettrico η_e sia uno strumento di comparazione adeguato per i processi di saldatura per fusione: tale parametro può risultare anche superiore al 100% per i processi più efficienti, come quello electron beam, in cui il rapporto profondità/larghezza della zona fusa può essere maggiore di 10.

Maggiore attenzione va invece data sul FEE che sintetizza efficacemente il fabbisogno energetico complessivo di diversi procedimenti. Per le leghe d'alluminio invece questo fattore è risultato estremamente utile e promettente per la comparazione, permettendo di mettere in evidenza anche effetti di produttività collegati al risparmio energetico.

6 Bibliografia

- [1] "Enterprise and industry directorate-general, Working document for the eco-design consultation forum on machine tools and related machinery (ENTR LOT5) – Annex E: Draft impact assessment energy savings modelling per MT sector," 6 May 2014. [Online]. Available: <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering/produkter-med-krav/verktygsmaskiner/annex-e-entr-lot-5-ia-electricity-consumption-scenarios.pdf>.
- [2] "Regolamento (UE) n. 548/2014 della Commissione, del 21 maggio 2014 , recante modalità di applicazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda i trasformatori di potenza piccoli, medi e grandi," [Online].
- [3] C. Europea, "WORKING DOCUMENT FOR THE ECODESIGN CONSULTATION FORUM ON MACHINE TOOLS AND RELATED MACHINERY (ENTR LOT 5), 6 MAY 2014," 11 Aprile 2014. [Online]. Available: https://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering/produkter-med-krav/verktygsmaskiner/working-document-entr-lot-5-consultation-forum-6may14_final.pdf.
- [4] ANASTA, "RELAZIONE ANNUALE ANASTA- PARTE PUBBLICA," 26 Aprile 2016. [Online]. Available: <https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi-kqLDnM7PAhWE0RQKHdlbA3sQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.anasta.it%2FImagePub.aspx%3Fid%3D301475&usg=AFQjCNHUrCgzqqcM627F9YCW6k7aTXTNsA&sig2=WOBn37nRjLvhv-Zx3HrSbg>.
- [5] M. Sokolov, "Thick section laser beam welding of structural steels: methods for improving welding efficiency," *PhD Thesis, Finland*, 2015.
- [6] A. S. M. Sokolov, "Improving laser beam welding efficiency," *Engineering*, vol. 6, pp. 559-571, 2014.
- [7] T. Bird, "Inverter power sources: an efficient alternative," *Welding Jurnal*, vol. 72, pp. 37-40, 1993.
- [8] [Online]. Available: www.millerwelds.com.
- [9] [Online]. Available: www.ceaweld.com.
- [10] S. Nai, P. Q. L. Dayou, G. Zhao and S. A. J. Chen-Nana, "Energy efficient welding via process monitoring," in *SimTech*, 2014.
- [11] P. Praveen, P. Yarlagadda and M. Kang, "Advancements in pulse gas metal arc welding," *J. Mater. Proc. Technol.*, pp. 1113-1119, 2005.
- [12] S. Karsten, F. Nils and L. Klaus-Dieter, "Welding equipment under the Energy-related products directive," *J. Ind. Ecology*, vol. 18, pp. 517-528, 2014.
- [13] V. Lebedev and S. Maximov, *Advanced mechanized equipment for welding and surfacing and its technical and technological possibilities*, Kiev: Osnova.
- [14] V. Lebedev, M. Sorokin and A. Belov, "Algorithms for controlling inverter sources of welding current to optimize the electrode metal transfer parameters," *Welding Int.*, vol. 28, pp. 957-961, 2014.
- [15] N. Stenbacka, "On arc efficiency in gas tungsten arc welding," *Soldag. Insp. Sao Paulo*, vol. 18, pp. 380-390, 2013.
- [16] H. Astrom, N. Stenbacka and K. Hurtig, "Arc efficiency dor gas tungsten welding DCEN-GTAW".
- [17] J. M. R. Dupont, "Thermal efficiency of arc welding processes," *Welding Research Supplement*, pp. 406-416, 1995.
- [18] A. Wells, "Heat flow in welding," *Welding Journal*, vol. 31, pp. 263-267, 1952.
- [19] B. Zhao, K. Duan, W. Zhao, C. Li and Y. Wang, "Experimental study on high power all-fiber laser," *Chin. Opt. Laser*, vol. 8, pp. 41-47, 2010.
- [20] F. Apostolos, P. Alexios, P. Georgios, S. Panagiotis and C. George, "Energy efficiency of manufacturing processes: a critical review," in *CIRP* 7, 2013.
- [21] F. Vollersten, "properties and prospects of high brightness solid state lasers," *Laser Systems*, vol. 5,

pp. 27-31, 2009.

- [22] R. Unocic and J. Du Pont, "Process efficiency measurement in the laser engineered net shaping process," *Metall and Materi Trans B*, vol. 35, no. 1, pp. 143-152, 2004.
- [23] R. Mishra and Z. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mat. Sci. Eng. R.*, vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [24] R. Nandan, T. DebRoy and H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding process, weldment structure and properties," *Progress Mater. Sci.*, vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
- [25] U.S. Department of Energy, Industrial Technology Program, "Energy-intensive processes portfolio: addressing key energy challenges across U.S.: industry," 2011.
- [26] A. Shrivastava, M. Kronen and F. Pfefferkorn, "Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 9, pp. 159-168, 2015.
- [27] Select Committee Environment, "Notes on power efficiency in welding," *Welding in the world*, vol. 62, pp. 67-70, 2008.
- [28] R. Niles and C. Jackson, "Weld thermal efficiency of the GTAW process," *Welding Research Supplement*, pp. 25-32, 1975.
- [29] T. Kim, C. Albright and S. Chiang, "The energy transfer efficiency in laser welding process," *J. Laser Applications*, vol. 2, pp. 23-28, 1990.
- [30] P. de Freitas Teixeira, D. Bezerra de Araújo and L. Bragança da Cunha, "STUDY OF THE GAUSSIAN DISTRIBUTION HEAT SOURCE MODEL APPLIED," *Science & Engineering Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 115-122, 2014.
- [31] Simufact.welding, "Info-Sheet Heat source," [Online]. Available: http://www.simufact.com/files/Medien/_1Anwendungsfelder/Welding/Simufact-InfoSheet-HeatSourceGeometry-en.pdf.
- [32] P. Das, *Laser and Optical Engineering*, New York: Springer Verlag, 1991.
- [33] W. Steen and J. Mazumder, *Laser material processing*, Springer-Verlag London, 2010.
- [34] [Online]. Available: www.primes.eu.
- [35] M. Shome and M. Tumuluru, *Welding and joining af advanced high strength steel*, Elsevier, 2015.
- [36] "Welding Filler Metals for Plant Engineering," 1 2008. [Online]. Available: https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjEpeu8zuLPAhVB1RQKHVLRDKsQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.mip-co.com%2FDownload.ashx%3F%3D%2FUploads%2FPhotos%2Fwelding_filler_metals_for_plant_engineering_01_2008.pdf&usg=AFQjCNEDu32.
- [37] G. BARBIERI, Results of the P91 weldability analysis, www.eera-jpnm.eu/.../Deliverable%20D6.3%20MATTER.pdf.
- [38] M. C. & o. G. Barbieri, "Influence of welding parameters on microstructure of welded joints SMAW/GTAW steel X10 CrMoVNb 9-1 (P91)," *Metallurgia Italiana*, vol. 3, no. 107, pp. 37-45, 2015.
- [39] i. R. W. N. a. C. E. Jakson, "Weld thermal efficiency of the GTAW process," *Welding Journal*, vol. 54, pp. 25-32, 1975.
- [40] C. C. & O. G. Barbieri, "Messa a punto di un processo di saldatura laser su lamiera di acciaio S 460 NL (UNI EN 10113-2) per applicazioni nella cantieristica navale e controllo RX mediante l'elaborazione delle immagini," in *Convegno AIPND - http://www.ndt.net/article/aipnd2007/files/orig/10.pdf*, FIRENZE, 2007.
- [41] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, 2002.