

# 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

Autori: G. Barbieri\*, C. Cappabianca\*, M. Moncada\*, F. Verre\*, M. Alba\*\*, E. Putignano\*\*\*, R. Debonis\*\*\*

\*ENEA FIM MAT CR Casaccia Via Anguillarese 301 - 00123 S. Maria di Galeria

\*\* ENEA FIM MAT TEC CR Trisaia SS 106 Ionica km 419,5 - 75076 Rotondella

\*\*\* Consorzio CALEF SS 106 Ionica Km 419,5 - 75076 Rotondella (MT)

## Sommario

Nel documento sono descritte le prove per la messa a punto delle giunzioni testa a testa su lamiera di acciaio S 460 NL UNI EN ISO 10113-2 "Acciaio al carbonio manganese a grano fine". Questo acciaio, che garantisce una  $R_{eH}$  di 460 MPa, non è attualmente approvato dai regolamenti RINA per la realizzazione dello scafo e di elementi strutturali mentre è previsto il suo impiego per applicazioni speciali e caldaieria. Le migliori caratteristiche meccaniche sono legate, oltre ad un affinamento del grano, anche ad un inevitabile aumento del  $C_{eq}$  rispetto agli acciai L24 ed L36 approvati dal RINA.

Il maggiore  $C_{eq}$ , associato ai forti gradienti termici ed al ridotto  $t_{8/5}$  indotti dalla saldatura laser, introduce problemi di indurimento eccessivo del giunto saldato sia in zona fusa (ZF) sia in zona termicamente alterata (ZTA). Per risolvere tale problema sono state verificate due possibili soluzioni: la prima è la realizzazione della saldatura con filo d'apporto; la seconda, da associare alla prima, consiste in una successiva passata di lisciatura che induce un effetto di *dressing* della saldatura ed un parziale rinvenimento della ZF. Per quanto riguarda l'impiego del filo d'apporto, a partire da un'analisi teorica fondata sulla riduzione del  $C_{eq}$  in ZF, sono stati valutati differenti tipi di filo, (pieno, *Flux Cored* e *Metal Cored*) che dovrebbero portare ad una riduzione della durezza ed un incremento della resilienza in ZF. Tuttavia, considerando che l'effetto del filo è inesistente in ZTA, alcuni saggi sono stati realizzati con passata di *dressing* per verificarne l'efficacia di rinvenimento.

Lo studio ha riguardato anche la verifica della possibilità di utilizzare metodi di preparazione dei lembi alternativi alla fresatura come ad esempio la tranciatura e smerigliatura. L'analisi preliminare è avvenuta mediante analisi radiografica, macrografica e di micro durezza. In particolare per un'analisi radiografica approfondita è stata utilizzata la tecnica delle elaborazioni delle immagini digitale. I campioni per i quali i rilievi di durezza erano in linea con le indicazioni del RINA e/o dello IACS sono stati sottoposti a test di trazione.

## **Introduzione**

La riduzione delle emissioni inquinanti passa attraverso la realizzazione di vettori a ridotti consumi per il trasporto di merci e persone. Una delle possibili vie da perseguire per la diminuzione dei consumi è la riduzione del peso e degli spessori dei materiali utilizzati. L'impatto ambientale, infatti, può essere ridotto anche a partire dai minori consumi in cantiere. L'impiego di materiali ad elevate caratteristiche meccaniche permette di garantire gli stessi standard di sicurezza e realizzare scafi più leggeri che permettono un duplice vantaggio: la riduzione dell'energia necessaria al movimento della nave ed un risparmio di energia nelle fasi di realizzazione dello scafo grazie ad una riduzione complessiva degli spessori saldati. La saldatura ad arco, che è la tecnica maggiormente utilizzata nella cantieristica navale, è causa di distorsioni termiche che riducono l'accuratezza della struttura prefabbricata. Le distorsioni termiche aumentano con l'aumentare degli spessori utilizzati nella realizzazione delle strutture delle navi, mentre, l'impiego della tecnologia di saldatura laser ne permette una notevole riduzione. La produzione di navi merci e passeggeri è il cuore dell'industria navale europea, questo spiega in parte perché l'Europa è il *leader* nell'applicazione del Laser nella cantieristica navale [1].

L'introduzione di materiali e processi innovativi nel settore della cantieristica navale è molto lento a causa di un ambiente estremamente conservativo e dei costi di investimento, per la variazione di un ciclo produttivo, estremamente elevati. E' quindi indispensabile sensibilizzare l'attenzione dei cantieri navali ed anche degli enti di classificazione (vedi RINA, DNV, ABS, etc.) affinché vengano omologati processi e materiali che permettano il conseguimento di tali obiettivi. Questo lavoro, svolto nell'ambito di una commessa del CALEF all'ENEA nell'ambito del progetto SINAVE (Sistema Navale Veloce), è mirato alla creazione di collaborazioni fra cantieri, centri di ricerca ed enti di classificazione per uno sviluppo di tecnologie innovative nella cantieristica navale nazionale come già avvenuto in strutture simili del nord Europa, vedi ad esempio le applicazioni di Meyer Werft.[2]

## **La saldatura laser nella cantieristica navale Europea**

Gli studi inerenti l'applicazione della saldatura laser degli acciai per lo scafo e le strutture interne sono iniziati a partire dai primi anni 90 ed hanno portato all'approvazione di due tipi di acciai, uno ordinario (L24) ed uno ad elevata resistenza (L36), ed alla definizione delle procedure di qualifica della saldatura mediante laser CO<sub>2</sub> [3].

Le prime applicazioni prototipali iniziarono nel 1994 alla Meyer Werft che installò una "*test facility*" per la fabbricazione di pannelli sandwich saldati al laser, ancora utilizzata per la produzione di tali strutture [4].

Nel 1998 una stazione per la saldatura testa a testa di un giunto lungo 16 metri per navi da crociera è stato installato alla Fincantieri di Monfalcone. Questa installazione usa una sorgente Laser da 17 kW CO<sub>2</sub> per saldare spessori fino a 20 mm, equipaggiata con un sensore per l'inseguimento del giunto e di un sensore per NDT ad ultrasuoni [5].

Odense Steel Shipyard, in Danimarca, ha sviluppato una cella di produzione flessibile e equipaggiata con una sorgente Laser CO<sub>2</sub> da 12 kW per marcatura, taglio, saldatura e rimozione della vernice. Sia l'apparecchiatura che i processi di saldatura sono stati continuamente migliorati ed utilizzati per i principali flussi di produzione. Inoltre, questa installazione che ancora aveva un carattere di prototipo, ha aiutato i cantieri a sviluppare la necessaria confidenza riguardo la saldatura Laser da parte del personale del cantiere, ed ha permesso lo studio e la qualificazioni di differenti tipi di giunzioni.

La migliore applicazione della tecnologia Laser in Europa, nel settore delle costruzioni navali, è stata realizzata dalla Meyer Werft che ha introdotto un sistema ibrido di saldatura LASER-GMAW divenuta la tecnologia di giunzione dominante per la realizzazione di componenti prefabbricati in acciaio [2]. La Meyer Werft ha attualmente installate 6 sorgenti laser di potenza per produrre pannelli sandwich attraverso la saldatura testa a testa ed a T di componenti piani per navi da crociera.

Il limite attualmente imposto alle linee guida per la messa a punto del processo di saldatura laser CO<sub>2</sub> è l'impiego di acciai omologati tipo L24 ed L36 [6]. Questo limite può essere superato grazie a due fattori: il primo è legato ai miglioramenti nella produzione degli acciai che sfruttando opportuni trattamenti termici possono essere prodotti a più elevata resistenza con ridotto C<sub>eq</sub>; il secondo è legato allo sviluppo di nuove tecnologie laser come ad esempio i "disk laser" e "fiber laser" che hanno raggiunto ormai livelli di potenza ed affidabilità in grado di sostituire le potenti sorgenti CO<sub>2</sub> con l'importante vantaggio del trasporto del fascio in fibra, del miglior accoppiamento fra lunghezza d'onda e materiale e della drastica riduzione delle problematiche legate alla formazione del plasma [7].

## Materiale

Il materiale trattato è un acciaio a grani fini normalizzato S460 NL con 460 MPa di R<sub>eH</sub> garantito. Il materiale è stato richiesto con contenuto di carbonio, zolfo e fosforo, per quanto possibile, entro i limiti previsti dal RINA per gli acciai L36. Nella tabella 1 è riportato il confronto fra i limiti dettati dal RINA [3,6] ed il materiale trattato.

| Colata | C           | Mn         | Si         | P            | S           | Cu          | Ni         | Cr         | Mo          | Al           | V          | Nb          | Ti   | C <sub>eq</sub> |
|--------|-------------|------------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|-------------|------|-----------------|
| RINA   | 0.15<br>Max | 0.9<br>1.6 | 0.1<br>0.5 | 0.015<br>Max | 0.01<br>Max | 0.35<br>Max | 0.4<br>Max | 0.2<br>Max | 0.08<br>Max | 0.015<br>min | 0.1<br>Max | 0.05<br>Max | 0.02 | 0.38<br>Max     |
| PN8125 | 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            |

Tabella 1: Composizione percentuale del materiale utilizzato e limiti RINA L36 (t<12mm)

Tuttavia, mentre è possibile tenere sotto controllo gli elementi dannosi come P ed S, il raggiungimento delle maggiori prestazioni meccaniche avviene con il necessario incremento degli elementi microleganti, Mn e Ni che, in questo caso, a fronte di un eccesso di carbonio di solo 0,03% portano ad un eccesso di C<sub>eq</sub> dello 0,11%.

Il RINA definisce anche un indice di suscettibilità alla cricatura a freddo P<sub>cm</sub>. Questo indice dovrebbe essere al massimo di 0,22% ma anche in questo caso l'elevato contenuto di manganese porta questo indice a circa 0,28%. E' ovvio attendersi maggiori problematiche di saldatura su questo acciaio rispetto a quelli già approvati.

| Spessore mm | Temperatura di Prova | ReH N/mm <sup>2</sup> | Rm N/mm <sup>2</sup> | A %       | Temperatura di Prova | Kv Longitudinale |
|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|----------------------|------------------|
| L36<br><50  | 20 °C                | 355<br>min            | 490<br>630           | 21<br>min | -40                  | 39               |
| 5           | 20 °C                | 518.65                | 694.97               | 30.21     | -50 °C               | 39               |

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato e limiti RINA L36.

## Set up sperimentale

In figura 1 è mostrata la stazione laser utilizzata che è un sistema ad ottica fissa a 4 gdl, con tre assi di traslazione (X,Y,Z) ed uno di rotazione. La sorgente laser associata è a CO<sub>2</sub> modello RS 860 HF con potenza nominale di 6 kW.

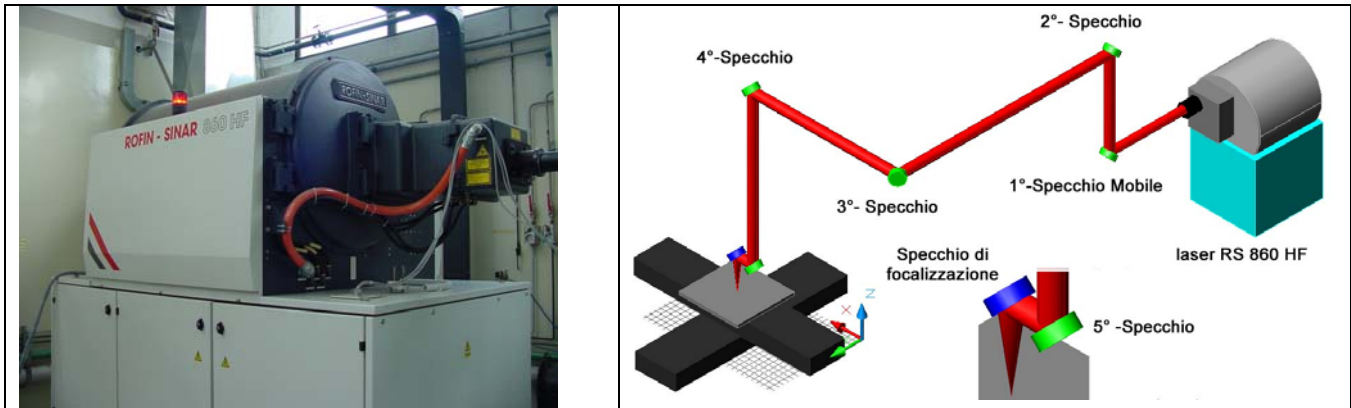


Figura 1: Sorgente laser utilizzata e schema della stazione di lavorazione.

Il fascio viene indirizzato attraverso un percorso ottico costituito da 5 specchi di rame piani ed uno specchio parabolico rivestito con un *coating* in molibdeno. La testa di focalizzazione finale è una Kugler 490 LK con specchio parabolico di focale 300 mm ed un asse rotativo, che permette di orientare il fascio a 360° intorno all'asse X. Il mantenimento in posizione dei lembi da saldare avviene mediante un sistema di bloccaggio dotato di una cava per la copertura con gas a rovescio che permette la saldatura di campioni fino a 500 mm di lunghezza.

### Preparazione dei lembi

La preparazione dei lembi per la saldatura laser è usualmente effettuata per fresatura in modo da garantire un accoppiamento con gap 0. Tale procedimento è consigliato anche dalle linee guida del RINA [6]. Tuttavia, è possibile prevedere in fase di qualifica del procedimento anche metodi alternativi fra cui: il taglio termico, associato a sabbatura o smerigliatura ed anche la tranciatura.

Mentre per la saldatura autogena è stata presa in considerazione solamente la preparazione per fresatura, nella saldatura con filo d'apporto è stata verificata l'applicabilità della tranciatura, molto economica e correntemente preferita nei cantieri navali.

Per quanto riguarda la finitura e la pulizia, considerato che lo strato di ossido di laminazione è molto duro e tenace e che le condizioni e lo spessore degli ossidi superficiali influiscono negativamente sulla qualità e ripetibilità della saldatura, le superfici dei campioni di prova e qualifica sono state smerigliate con disco GRIT 60 e sgrassate con acetone per non meno di 5 mm per lato rispetto alla linea di saldatura.

### Messa a punto dei parametri di saldatura

La definizione dei parametri di saldatura è stata eseguita prendendo come riferimento le linee guida del RINA per la definizione delle finestre velocità-saldatura (Figura 3-SX). Tuttavia, la limitata potenza disponibile ha indotto a studiare esclusivamente 4 livelli di velocità, da 400 a 1200 mm/min, per le quali sono state definite le relative potenze per il raggiungimento della piena penetrazione (Tabella 3). I campioni utilizzati per questa prima caratterizzazione hanno delle dimensioni ridotte di 60 x 200 x 5 mm.

L'analisi preliminare per ogni cordone realizzato è effettuata mediante l'analisi visiva e macrografica. L'esito positivo di queste porta alla realizzazione del profilo di durezza effettuato secondo quanto previsto dal RINA [3] in accordo con la UNI EN ISO 6507-1.

In generale i profili di durezza hanno evidenziato che l'elevato contenuto di  $C_{eq}$ , rispetto ai materiali a più basso carico di snervamento, induce una certa auto tempra della ZF con

livelli di durezza alla radice superiori a 400 HV5, (vedi il grafico mostrato in Figura 3-DX).

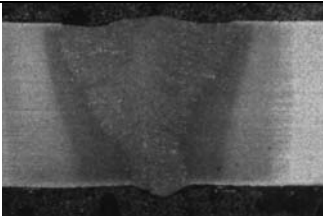
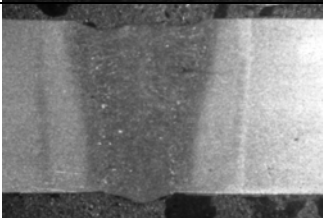
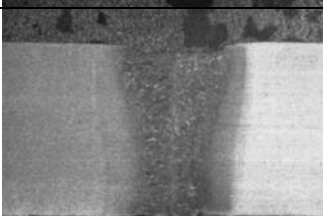
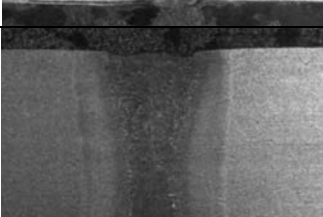
| ID | P [W] | V [mm/min] | Ugello | fuoco | Lembi e Superf.                              | Gas di assistenza [l/min] | Miniatura  |
|----|-------|------------|--------|-------|--|---------------------------|--|
| 4  | 3400  | 400        | Kugler | 0     | Fresatura + Smerigliate e Sgassate (Acetone) | He<br>30+30               |   |
| 5  | 4300  | 700        |        | 0     |  |                           |   |
| 6  | 5200  | 1000       |        | 0     |  |                           |   |
| 1  | 5500  | 1200       |        | 0     |  |                           |  |

Tabella 3: Messa a punto del processo di saldatura autogeno

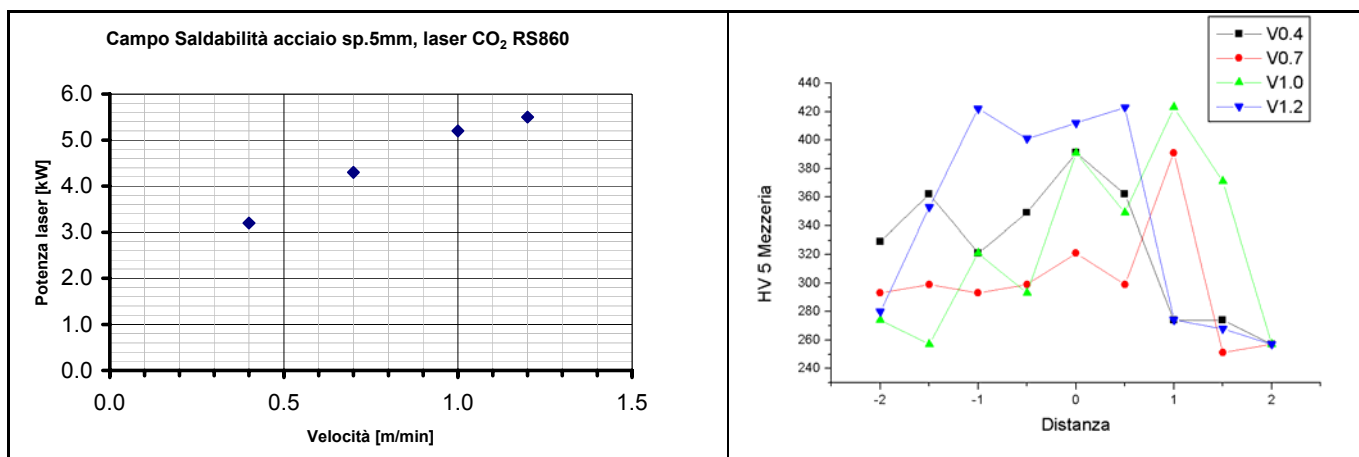


Figura 3: (SX):Grafico velocità-potenza [9]; (DX): Durezza in funzione della velocità

Considerato che sono stati rilevati valori di durezza di circa 400 HV5 anche con la velocità di 400 mm/min, è stato deciso di mettere a punto il processo alla massima velocità possibile e individuare un modo alternativo all'usuale trattamento termico di rinvenimento, per ridurre la durezza ed incrementare la duttilità del cordone di saldatura.

I parametri per la saldatura autogena sono riportati in tabella 4. La loro validità è stata verificata in un range di velocità fra 1100 e 1300 mm /min. Da un punto di vista tecnico è possibile saldate anche con azoto ma è stato verificato che ciò comporta un ulteriore incremento di durezza [10].

| ID  | P [W]<br>Laser | V<br>[mm/min] | Ugello | Fuoco | Lembi   | Gas di<br>assistenza<br>[Nl/min] |
|-----|----------------|---------------|--------|-------|---------|----------------------------------|
| PT1 | 5100           | 1200          | Kugler | 0     | Fresati | He<br>30+30                      |

Tabella 4: Parametri di saldatura laser autogena del giunto di testa s=5 mm S460 NL

### Scelta dei fili d'apporto:

I fili d'apporto sono stati scelti in funzione di tre caratteristiche riportate in ordine di importanza: la composizione chimica, la resilienza e le proprietà tensili del depositato. Infatti, i dati dei produttori inerenti le caratteristiche di resilienza e di resistenza a trazione sono indicativi esclusivamente per i processi MIG/MAG mentre, come già visto per la saldatura autogena, gli elevati gradienti termici della saldatura laser portano ad una microstruttura della ZF inattesa. Il problema principale rimane la duttilità e la tenacità del giunto sia in ZF sia nella pur limitata ZTA.

Nella tabella 5 sono riportati i principali fili oggetto di studio tutti di diametro 1,2 mm. I fili scelti sono *Flux Cored* (FC), *Metal Cored* (MC) e pieni. In particolare dal punto di vista chimico i FC presentano il minore livello di  $C_{eq}$  seguiti dai MC. Il filo pieno considerato, se pur approvato dal RINA ed utilizzato per la prima fase di messa a punto del processo, ha un  $C_{eq}$  relativamente alto.

| ESAB Tubrod 15.15 FCAW rutile acciai al carbonio EN 758 T46 2 P M 2 H5 (ABS 3YSA) |      |       |        |         |                       |                      |      |
|---|------|-------|--------|---------|-----------------------|----------------------|------|
| C   | Ni   | Cu    | Mn     | Si      | Cr                    | Mo                   | V    |
| 0,05  | 0,00 | 0,00  | 1,30   | 0,30    | 0,00                  | 0,00                 | 0,00 |
|   |      |       | Kv [J] | T [°C]  | R <sub>eH</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A%   |
| Ceq   | 0,27 | 140   |        | -20     | 520                   | 580                  | 28%  |
| ESAB Tubrod 14.13 MCAW acciai al carbonio EN 758 T42 4 Z M M 2 H5 (ABS 3YSA)      |      |       |        |         |                       |                      |      |
| C   | Ni   | Cu    | Mn     | Si      | Cr                    | Mo                   | V    |
| 0,06  | 0,00 | 0,00  | 1,40   | 0,50    | 0,00                  | 0,00                 | 0,00 |
|   |      |       | Kv [J] | T [°C]  | R <sub>eH</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A%   |
| Ceq   | 0,29 | 90    |        | -20     | 480                   | 580                  | 28%  |
| ESAB Tubrod 14.05 MCAW acciai bassolegati EN 758 T42 4 Z M M 2 H10 (ABS 3YSA)     |      |       |        |         |                       |                      |      |
| C   | Ni   | Cu    | Mn     | Si      | Cr                    | Mo                   | V    |
| 0,06  | 0,90 | 0,00  | 1,30   | 0,50    | 0,00                  | 0,00                 | 0,00 |
|   |      |       | Kv [J] | T [°C]  | R <sub>eH</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A%   |
| Ceq   | 0,34 | 100   |        | -40     | 460                   | 550                  | 26%  |
| ESAB Aristorod 12.63/ 12 64 filo pieno C-Mn EN 440 G4Si1 (RINA SG56A3)            |      |       |        |         |                       |                      |      |
| C   | Ni   | Cu    | Mn     | Si      | Cr                    | Mo                   | V    |
| 0,10  | 0,00 | 0,00  | 1,70   | 1,00    | 0,00                  | 0,00                 | 0,00 |
|   |      |       | Kv [J] | T [°C]  | R <sub>eH</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A%   |
| Ceq   | 0,38 | 90/70 |        | -20/-30 | 525                   | 595                  | 26%  |

Tabella 5: Principali caratteristiche chimico fisiche dei fili d'apporto utilizzabili



### Saldatura con filo d'apporto:

La saldatura con filo d'apporto permette di introdurre elementi di lega in modo da variare la metallurgia del bagno fuso in funzione del rapporto di diluizione (Rd) [11]. Rispetto alle tecniche di saldatura tradizionale il Rd nella saldatura laser *single pass* è molto elevato. Vale a dire che per garantire elevate velocità di processo, la cianfrinatura è ridotta ad uno smusso di circa 1-2 mm in funzione dello spessore totale ed il filo d'apporto ha comunque sezioni e velocità limitate. Nella figura 4 sono riportate le attrezzature e lo schema di saldatura impiegato.

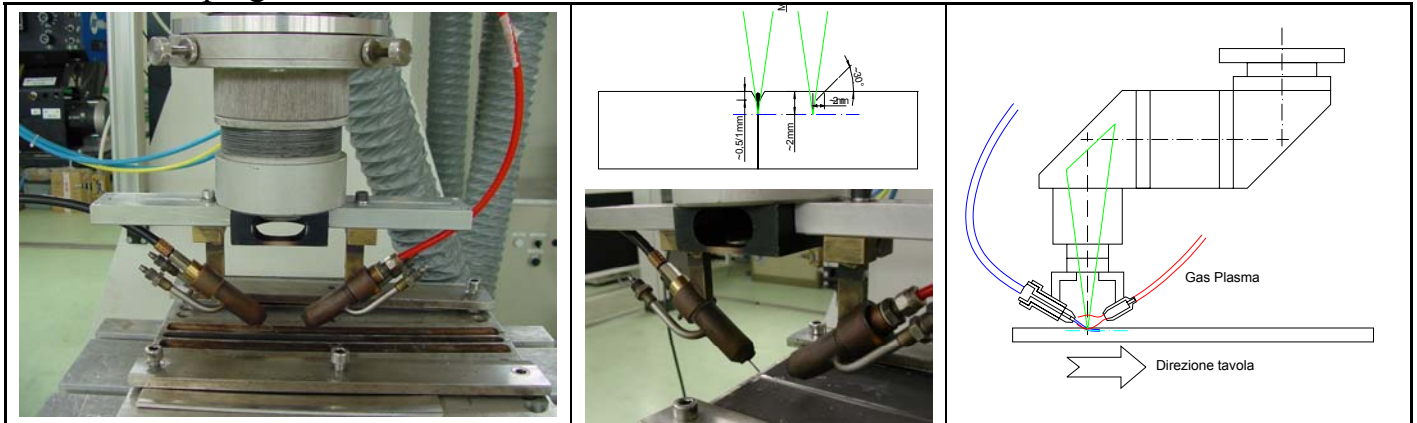


Figura 4: Attrezzatura e configurazione di saldatura con filo d'apporto

Nella tabella 6 sono riportate le principali prove per la definizione dei parametri di saldatura. L'impiego del filo d'apporto ha portato ad una necessaria riduzione della velocità di processo che passa da 1,2 m/min a 0,8 m/min. La velocità del filo ( $V_w$ ) ottimale, con filo pieno e smusso  $1 \times 1 \times 45^\circ$ , è di 1,9 m/min mentre la focalizzazione del fascio laser è stata portata a 2 mm all'interno del pezzo. La distanza fra guida filo e pezzo ( $D_w$ ) deve essere limitata a non più di 12 mm. Distanze maggiori, generano problemi di allineamento fra laser e filo con quest'ultimo che tende a fuoriuscire dal bagno fuso compromettendo il corretto svolgimento del processo [9].

Sono state eseguite alcune prove con filo FC tuttavia l'analisi visiva e macrografica hanno dato esiti negativi. Infatti, la scoria rutilica prodotta resta intrappolata nel bagno fuso in quanto il tempo di solidificazione è estremamente ridotto.

Per la saldatura con filo MC è stato invece sufficiente portare la  $V_w$  a 2,5 m/min in modo da depositare una massa corrispondente a quella del filo pieno.

La passata di *dressing* è effettuata alla stessa potenza ma con fascio laser defocalizzato di 10 mm sopra la superficie del pezzo e velocità ridotta a 0,6 m/min. Affinché abbia un minimo effetto di rinvenimento è necessario che questa sia eseguita immediatamente dopo la passata di saldatura al fine di sfruttare l'effetto di preriscaldamento ed il maggiore apporto termico con conseguente aumento del  $t_{8/5}$ . È stato inoltre verificata la sua efficacia anche nelle eventuali operazioni di riparazione, in questo caso l'effetto principale è estetico.

Considerata l'impossibilità di impiego dei fili FC a più basso  $C_{eq}$ , i fili utilizzati per la riduzione del  $C_{eq}$  in ZF sono stati il Tubrod 14.05 ed il 14.13.

Sono state realizzate delle piastre saldate di testa sia con saldatura laser autogena sia con saldatura con filo d'apporto anche con passata di *dressing* conformi a quanto previsto dalla UNI EN 15614-11. Su tali piastre sono state eseguite: Macrografie, durezza, liquidi penetranti ed RX, queste ultime digitalizzate ed analizzate mediante elaborazione delle immagini.





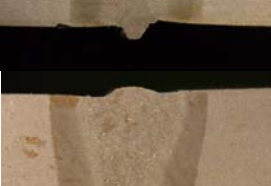

| ID      | P [W]<br>Laser<br>/<br>Pezzo | V<br>[mm/<br>min] | Ugello  | F  | Lembi  | Gas<br>[NI/<br>min] | Filo   | Dw<br>[mm] | Vw<br>[mm/min<br>] | Miniatura   |
|---------|------------------------------|-------------------|---------|----|--|---------------------|--|------------|--------------------|---|
| AP<br>2 | 6000<br>5100                 | 1000              | Apporto | -2 | Fresati con smussi ottenuti per smerigliati<br>+ Sgrassatura con Acetone | He<br>30            | ESAB Aristorod 12.63<br>EN 440 G4Si1 (RINA SG56A3) | 16         | 1000               |    |
| AP<br>4 | 6000<br>5100                 | 1000              |         | -2 |  | He<br>40            |  | 12         | 1000               |    |
| AP<br>5 | 6000<br>5100                 | 800               |         | -2 |  | He<br>40            |  | 12         | 1400               |    |
| AP<br>6 | 6000<br>5100                 | 800               |         | -2 |  | He<br>40            |  | 12         | 1500               |   |
| AP<br>7 | 6000<br>5100                 | 800               |         | -2 |  | He<br>40            |  | 12         | 1700               |  |
| AP<br>8 | 6000<br>5100                 | 800               |         | -2 |  | He<br>40            |  | 12         | 1900               |  |

Tabella 6: Messa a punto del processo di saldatura laser con filo d'apporto.

### **Analisi macrografica, durezza e confronto fra saldatura autogena e con filo d'apporto.**

L'analisi macrografica e le durezza sono esaminate per confrontare la saldatura autogena (PT1) e la saldatura con il filo d'apporto a più basso carbonio equivalente, (AP18 ed AP19 - l'ESAB Tubrod 14.13 *Metal Cored*). La saldatura dei campioni di qualifica è stata eseguita volutamente con preparazione di tranciatura e smerigliatura per circa 5mm per lato. Come hanno evidenziato le sezioni macrografiche riportate in figura 5, questa preparazione non permette di raggiungere i livelli di qualità osservati per le prove di messa a punto ove i campioni di dimensioni ridotti erano stati preparati per fresatura.

In particolare, la rastremazione sui lembi dovuta in parte allo schiacciamento della trancia ed accentuata dalla smerigliatura manuale per l'asportazione dello strato di ossido, induce una riduzione dello spessore saldato e di conseguenza della sezione resistente non tollerabile.



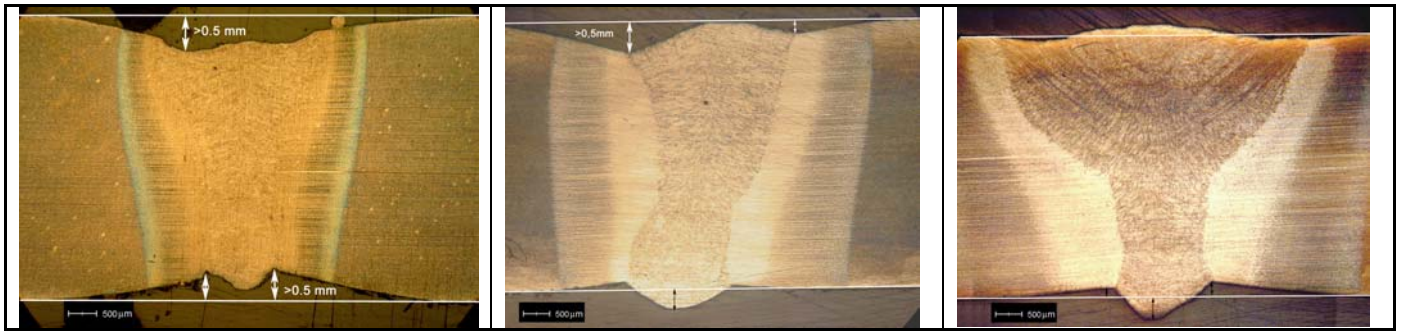


Figura 5: da SX a DX in ordine PT1, AP18 ed AP19

La valutazione dei difetti, è stata effettuata secondo la UNI EN ISO 13919-1 livello C “*intermediate*”. Ipotizzando i difetti di preparazione dei lembi simili ad incisioni marginali (imperfezione tipo 5011 e 5012 secondo ISO 6520) per le quali è possibile tollerare profondità delle incisioni  $h \leq 0,1$  t o  $0,5$  mm (il più piccolo fra i due limiti), è stato verificato che l’AP19 eseguita con lisciatura rientra nei limiti di accettazione mentre la PT1 e l’AP18 risultano fuori dai limiti di tolleranza con incisioni rispettivamente di 0,63 e 0,53 mm.

Fermo restando che la preparazione dei lembi per tranciatura e smerigliatura manuale risulta poco applicabile alla saldatura laser, l’analisi basata su una singola sezione macrografica è limitativa ma indispensabile alla calibrazione del sistema di analisi di immagine delle RX.

I profili di durezza riportati in figura 6 mostrano che la saldatura autogena PT1 porta a livelli di durezza eccedenti i limiti ammissibili. I profili dei cordoni AP18 ed AP19, eseguiti con filo d’apporto, evidenziano l’addolcimento desiderato in ZF. Inoltre, la passata di *dressing* della AP19 contribuisce alla riduzione della durezza anche in ZTA dove la durezza si mantiene al di sotto di 350 HV5 per il profilo superiore (testa) e intorno a 380 HV5 per il profilo inferiore (radice) rientrando nei limiti. Le linee di durezza ammissibile riportate nei grafici riguardano i due differenti limiti imposti da RINA [3] e dallo IACS [7] rispettivamente di 380 HV5 e 400 HV10.

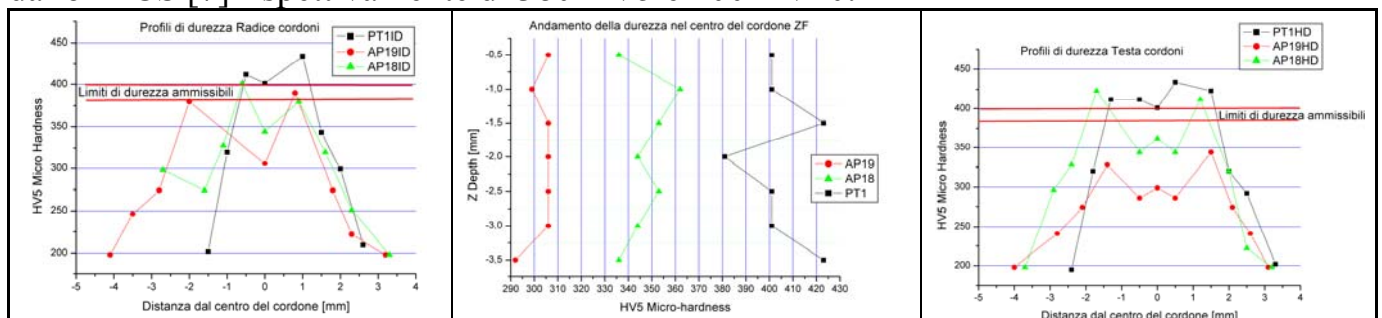


Figura 6: Profili di durezza

## Liquidi penetranti

Le prove con liquidi penetranti sono state eseguite in accordo con la UNI EN 571-1, secondo la seguente sequenza di test:

- spazzolatura dei cordoni e pulitura con *kleenex*;
- soffiatura con aria compressa essiccata;
- Applicazione del REMOVER: ATICA CR120;
- pulitura con *kleenex* e soffiatura;
- Applicazione del liquido penetrante CHECK RED-1 (attesa 10 minuti);

- rimozione dell'eccesso di liquido penetrante con *kleenex* e *Remover*
- applicazione del rivelatore: bianco SPOTCHECK/Zyglo
- attesa 10-15 min:
- ispezione.

Tutti i campioni saldati non hanno mostrato difetti rilevabili con i liquidi penetranti. Alcune false indicazioni hanno riguardato l'accumulo di penetrante intorno alle goccioline di "spatter". Confrontando quelle presenti sul cordone con le indicazioni identiche rilevate intorno a "spatter" sul materiale base è stato possibile discriminare fra difetti reali e false indicazioni anche con osservazione ad elevati ingrandimenti come riportato in figura 7.

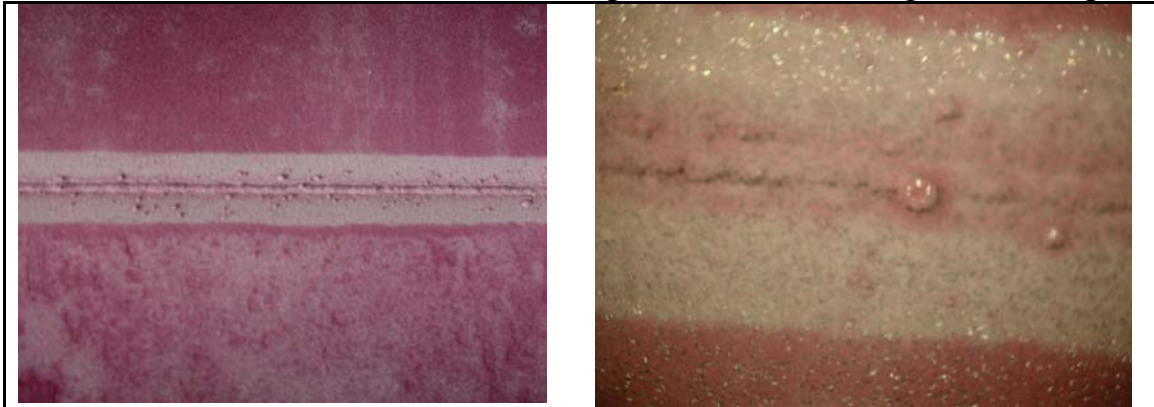


Figura 7: (SX) PT sul rovescio del campione PT1; (DX) particolare *spatter*.

E' opportuno inserire nella pWPS un'operazione di asportazione meccanica degli *spatter*, in particolare sul rovescio, in modo da evitare false indicazione ma anche incrementare la vita a fatica dei componenti.

## Controllo radiografico mediante elaborazione delle immagini

### Attrezzature

Il Bunker della Trisaia è dotato di un gruppo radiogeno a potenziale costante della Yxlon model MG 452 con potenza massima 4500W (vedi Figura 8). Il sistema di alimentazione è bipolare alimentato da due differenti generatori, questo permette un range di tensione di lavoro da 20 a 450 kV con una risoluzione in kV 0,2 ed un range di regolazione della corrente da 0,5 a 15 mA con risoluzione di 0,05 mA in modalità standard e di 0,01 mA nella modalità alta risoluzione.

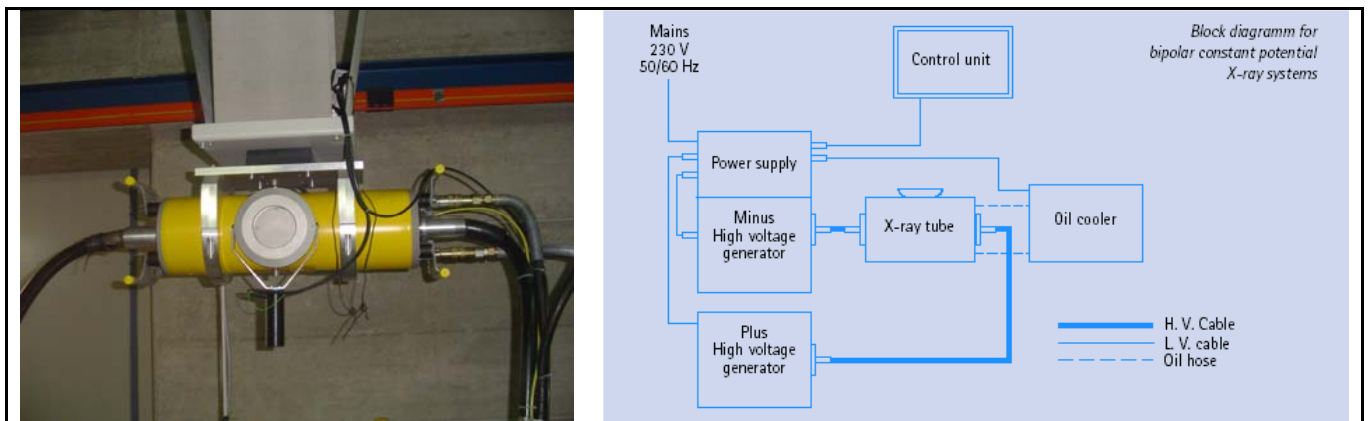


Figura 8: Gruppo radiogeno Yxlon 452 installato presso il bunker del CR ENEA Trisaia.

Grazie al sistema bipolare questo gruppo radiogeno offre una grande stabilità nel mantenimento dei valori di tensione e corrente sia per brevi che lunghi tempi di

esposizione permettendo di radiografare sia lastre sottili di leghe leggere sia spessori elevati di acciaio (fino a 115mm). Il sistema, come evidenziato dallo schema a blocchi, è costituito da due generatori differenti uno per lavorare a bassi valori di voltaggio e uno per gli alti. Con questa configurazione il gruppo radiogeno grazie anche al microprocessore del controller MGC 41 controlla continuamente i valori di operatività con quelli massimi di default impostati dal sistema interfacciandoli con quelli di temperatura controllata da una centralina che gestisce una pompa di ricircolo per il raffreddamento ad olio.

Il gruppo radiogeno è inserito in un moderno Bunker certificato per potenze di 0.5 Mev e asservito da un sistema di movimentazione su tre gradi di libertà che consente di spostare la testa del gruppo con la massima facilità con l'integrazione di un carro ponte per la manipolazione di forgiati di grandi dimensioni.

### Parametri dei test radiografici

I provini PT1, AP18 ed AP 19 fanno parte di un lotto più ampio di "giunti testa-testa" di spessore 5 mm che sono stati analizzati secondo le specifiche della UNI EN ISO 13919-1 utilizzando IQI 13 FE EN. La sorgente radiogena è stata posizionata ad una distanza di 700 mm dal piano di rilevazione con lastra di piombo per attenuare il fenomeno di *backscattering*. I parametri sono riportati in tabella 7.

Tutti i Film utilizzati Agfa D7 sono stati processati con sviluppatrice automatica Agfa NDT 1 con ciclo di sviluppo da 8 min.

| kV  | mA | T    | DDF mm | DENS | FOC. |
|-----|----|------|--------|------|------|
| 120 | 4  | 1,10 | 700    | 2,20 | 3    |

Tabella 7: Parametri di esposizione per giunti di testa su lamiera spesse 5mm di S460 NL

### Sistema di elaborazione delle immagini

Il sistema di acquisizione ed elaborazioni delle immagini utilizzato è il RADVIEW le cui caratteristiche principali sono riportate in tabella 8.

| Scanner AGFA FS 50  | PC   |
|---|--|
| Densità di lettura: da 0,05 a 4,0 D<br>Sorgente di lettura: laser He-Ne<br>Velocità di scansione: 14x17" da 7 a 120 Sec.<br>Interfaccia scsi/scsi<br>Software RADVIEW | Intel Pentium III con Windows 2000 OS<br>512 Mb Ram; 90 Gb HD<br>Monitor: Monocromatico High Resolution<br>Scheda video: Barco 2 MP1NT<br>Risoluzione: 1200x1600 a 75 Hz |

Tabella 8: Caratteristiche sistema di acquisizione RX

### Elaborazione ed analisi delle immagini

Tutti i film costituenti il rapporto di prova sono stati acquisiti tramite scanner ed elaborati con il software RADVIEW per evidenziare al meglio, attraverso le varie funzioni del programma, le zone critiche in cui erano presenti bassi valori di contrasto.

Il settaggio delle immagini, avvenuto con l'ottimizzazione dei valori di "livello" e di "window" relativamente alla scala dei toni grigio, ha consentito di impostare una maschera per ogni singolo film per modificare la "latitudine" della lastra e contemporaneamente creare un effetto d'equalizzazione per evidenziare eventuali microdifetti.

Sono state create delle apposite R.O.I. nei punti di maggior evidenza del difetto aumentando l'ingrandimento relativo. Gli ingrandimenti utilizzati sono stati di 2,5-3X.

L'elaborazione delle immagini permette di confermare quanto già osservato dalle macrografie. In particolare la preparazione dei lembi di PT1 induce una zona a minor



assorbimento intorno al cordone di saldatura per un'estensione globale di circa 7 mm. per la AP18 i difetti di preparazione riguardano fondamentalmente uno dei lembi. Nella AP19 i lembi risultano preparati con maggiore cura e l'effetto di lisciatura riduce la differenza di densità ad indicare un buon raccordo fra lamiera e cordone. In figura 9 è evidenziata la zona di riparazione e ripresa che risulta comunque priva di imperfezioni rilevanti.

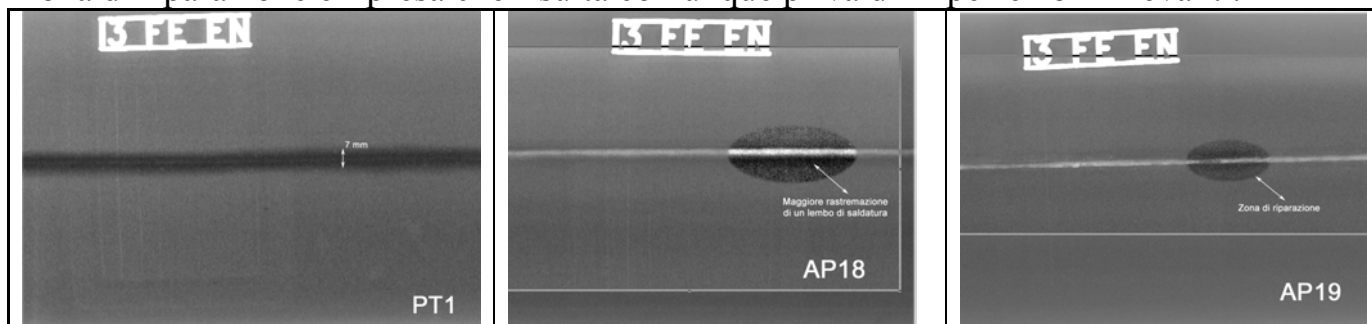


Figura 9: Elaborazione immagini delle RX digitalizzate.

### Prove di trazione

Le prove meccaniche eseguite per valutare la reale integrità delle saldature hanno riguardato esclusivamente la valutazione delle caratteristiche tensili delle giunzioni. Infatti, non è stato possibile ricavare dei campioni di resilienza di dimensioni standard per via del ridotto spessore del materiale in esame (vedi UNI EN 10045). I test sono stati eseguiti su campioni rispondenti alle prescrizioni della UNI EN 895 e della UNI EN ISO 10002-1. Le lamiere saldate sono state portate ad uno spessore nominale di 4mm per eliminare le incisioni marginali e poter effettuare un confronto diretto fra saldatura autogena e saldatura con filo d'apporto con e senza passata di *dressing*. Per ogni lastra di qualifica sono stati realizzati tre campioni di prova, due alle estremità della zona di qualifica ed uno al centro della lastra, nella zona usualmente destinata alla realizzazione dei provini di resilienza. Lo schema di prelievo adottato permette di fornire un'analisi statistica dell'integrità della saldatura sull'intera lunghezza e confermare quanto già evidenziato dalle prove radiografiche. La macchina di prova utilizzata è elettro-meccanica della DMG, Denison Mayes Group, ad attuatore centrale e movimentazione tramite vite e madrevite a ricircolazione di sfere. La capacità di carico massima è pari a  $\pm 100$  kN e le velocità di traslazione della traversa mobile sono comprese tra 5  $\mu\text{m}/\text{min}$  e 200 mm/min.

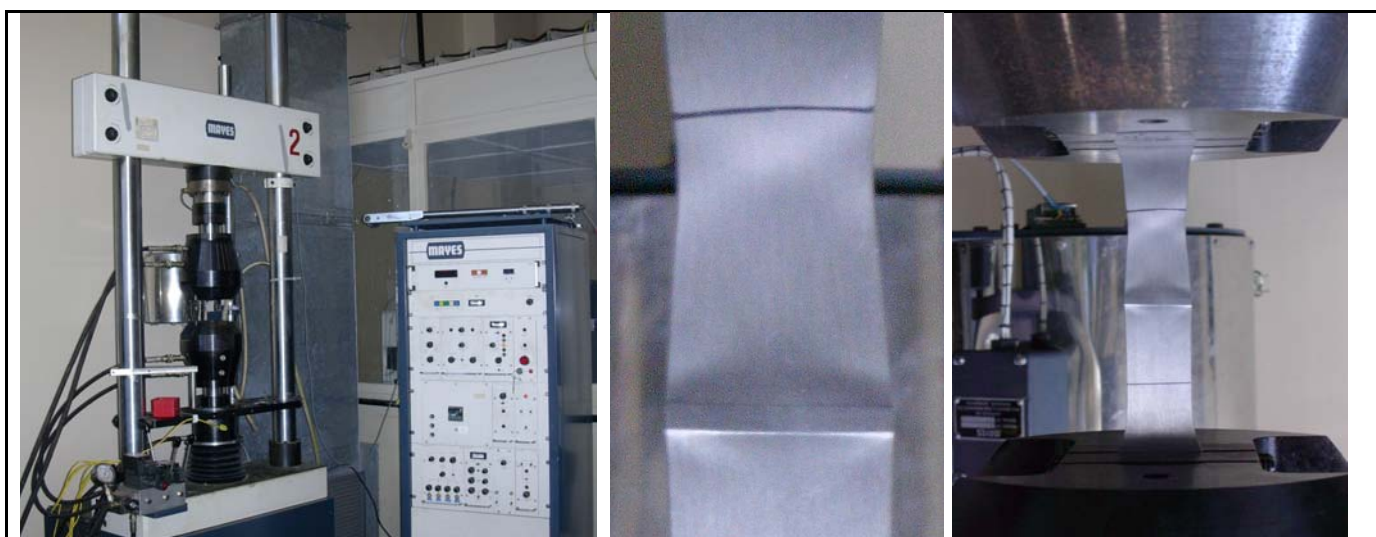


Figura 10: (SX) Macchina per test di trazione; (DX) rottura tipica dei campioni analizzati.

In figura 10 (DX), sono riportate le foto del campione PT1\_01 pochi istanti prima della rottura. E' possibile osservare il differente comportamento della ZF, più dura e meno duttile che permane quasi completamente indeformata rispetto al MB dove va a configurarsi la rottura. La zona indeformata è più o meno ampia a secondo della tecnica di saldatura utilizzata.

Nella Tabella 9 sono riportate i principali risultati estrapolati dai test di trazione. Va ricordato, che per un giunto saldato, l'unico dato di confronto assoluto per un test di trazione trasversale è il valore di  $R_m$ . Il confronto riguardante  $R_{eH}$  e  $A\%$  rimane esclusivamente interpretativo in quanto, come descritto dalla UNI EN 895, la presenza di tre differenti zone (MB, ZTA e ZF) con differenti comportamenti non permette una valutazione omogenea, mentre molto importante è la descrizione della zona e del tipo di rottura.

| ID      | t [mm] | w [mm] | Lc [mm] | Rm [MPa] | R <sub>m</sub> Ave [MPa] | R <sub>eH</sub> [MPa] | R <sub>eH</sub> Ave [MPa] | N [N]   | Lo [mm] | Lu [mm] | A%     | A% Ave |
|---------|--------|--------|---------|----------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| PT1_01  | 3,95   | 25,01  | 75      | 691,82   | 691,2                    | 474,48                | 476,9                     | 68344,8 | 55,5    | 65,4    | 17,84% | 18,68  |
| PT1_02  | 3,94   | 25,01  | 75      | 689,05   |                          | 477,87                |                           | 67898,6 | 55,45   | 66,2    | 19,39% |        |
| PT1_03  | 3,94   | 25,02  | 75      | 692,72   |                          | 478,35                |                           | 68287,8 | 55,8    | 66,3    | 18,82% |        |
| AP18_01 | 3,71   | 25,01  | 75      | 674,97   | 673,89                   | 501,95                | 496,64                    | 62628,4 | 56,25   | 67,6    | 20,18% | 20,08  |
| AP18_02 | 3,72   | 25,00  | 75      | 670,77   |                          | 490,72                |                           | 62381,8 | 56,25   | 67,7    | 20,36% |        |
| AP18_03 | 3,71   | 25,00  | 75      | 675,93   |                          | 497,25                |                           | 62692,5 | 56,3    | 67,4    | 19,72% |        |
| AP19_01 | 3,94   | 25,02  | 75      | 672,21   | 671,88                   | 489,62                | 491                       | 66265,8 | 55,6    | 65,4    | 17,63% | 17,51  |
| AP19_02 | 3,94   | 25,04  | 75      | 672,33   |                          | 490,37                |                           | 66330,7 | 55,4    | 64,85   | 17,06% |        |
| AP19_03 | 3,94   | 25,03  | 75      | 671,08   |                          | 493,03                |                           | 66180,9 | 55,5    | 65,4    | 17,84% |        |

Tabella 9: Risultati delle prove meccaniche

La rottura dei campioni è avvenuta per tutti nel materiale base all'interno della Lo, per questo motivo il grafico, riportato in figura 11 (SX), mostra un andamento quasi identico per le curve di carico dei differenti campioni.

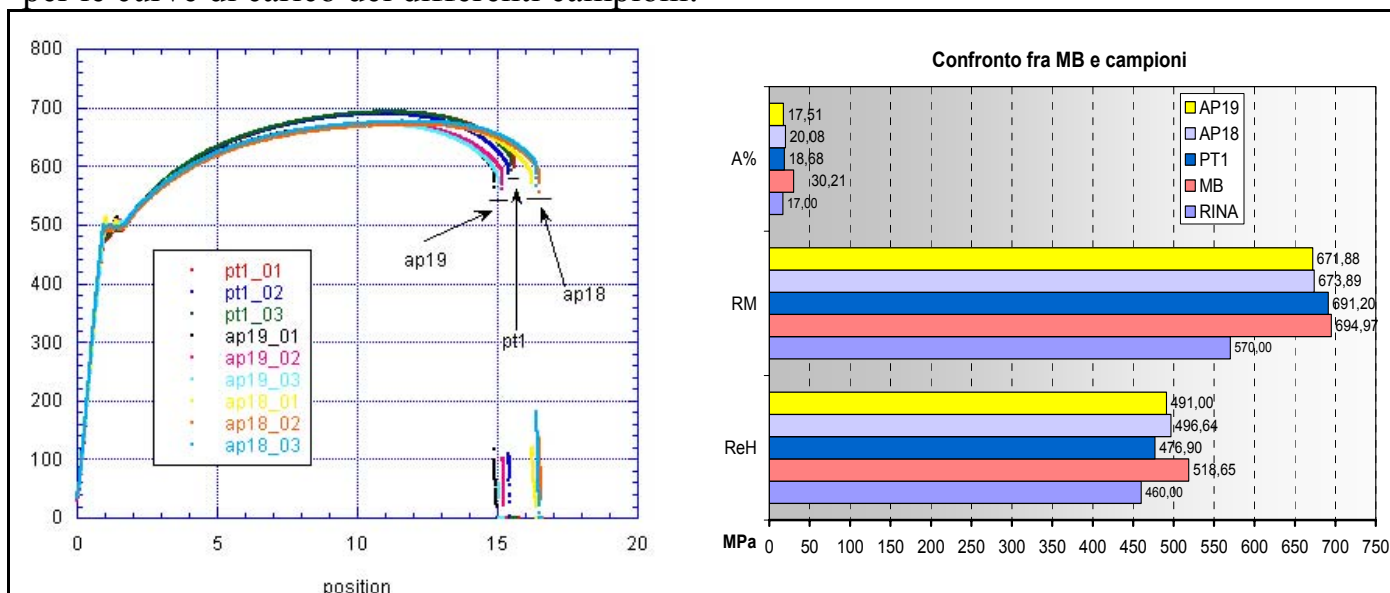


Figura 11: (SX) Grafico tensione – spostamento; (DX) Grafico di confronto MB-campioni.

Il grafico di figura 11 (DX) mostra un confronto fra  $R_m$ ,  $R_{eH}$  e  $A\%$  medi dei campioni analizzati rispetto ad i valori minimi fissati dal RINA e i valori certificati per il materiale utilizzato. Mentre  $R_m$  fra MB e campioni è praticamente identico,  $R_{eH}$  e  $A\%$  sono sostanzialmente differenti in quanto la presenza della saldatura incide sui valori di allungamento percentuale e carico di snervamento misurati per i provini saldati. Ad

esempio è facile intuire che la presenza del cordone lascia poco deformato un tratto del provino che quindi mostrerà un  $\Delta L$  inferiore rispetto al materiale base. Allo stesso tempo, la pendenza del tratto lineare della curva di carico sarà differente in quanto influenzata dalle differenti  $R_{eH}$  delle differenti zone. Va comunque evidenziato l'ottimo risultato delle prove in quanto sia i valori di  $R_m$  sia quelli di  $R_{eH}$  e  $A\%$  sono comunque superiori ai limiti minimi previsti dal RINA.

## **Conclusioni**

I risultati ottenuti permettono di affermare che la saldatura laser del materiale S460 NL per spessori limitati a 5-6 mm è un processo, che con i dovuti affinamenti, potrà essere utilizzato nella realizzazione dello scafo delle imbarcazioni in acciaio. In particolare, un incremento del 29,5% dell'  $R_{eH}$  rispetto ai convenzionali acciai strutturali attualmente previsti 36L permetterebbe una riduzione proporzionale degli spessori con vantaggi considerevoli in termini di impatto ambientale. Inoltre, i maggiori costi del materiale possono essere facilmente compensati sia dal minor quantitativo necessario sia dalla maggiore produttività permessa dalla saldatura laser altamente automatizzata. Il lavoro ha evidenziato, che per ottenere risultati soddisfacenti è necessaria la preparazione dei lembi per fresatura, mentre l'impiego del filo d'apporto associato ad una passata di cosmesi permette di rientrare nei limiti di durezza previsti dagli enti di certificazione. L'analisi radiografica con elaborazione delle immagini fornisce un grande contributo nell'individuare e discriminare difetti reali rispetto a false indicazioni. In particolare, è stato verificato come alcune indicazioni, che ad una classica analisi visiva delle lastre RX erano state interpretate come possibili cricche longitudinali, in realtà erano da attribuire a incisioni marginali strette e profonde tipiche dei processi ad elevata densità di energia in particolare in condizioni di preparazione dei lembi non ottimali. L'analisi con scala dei grigi eseguita con scansione ed elaborazione delle stesse immagini al computer ha permesso di discriminare il difetto definendo dei campioni radiografici di riferimento. Questo permette di aiutare l'operatore nel discriminare i difetti di giunti saldati laser che spesso presentano una morfologia assai differente rispetto alle tecniche tradizionali.

Ulteriori sviluppi di questo lavoro riguarderanno l'applicazione della tecnologia a spessori maggiori e l'integrazione di un sistema di saldatura Laser-Arco. Infatti, la minore produttività dovuta alla necessità di realizzare la passata di *dressing* può essere superata associando alla saldatura laser la saldatura ad arco realizzando in tal modo una saldatura laser ibrida (*Hybrid Laser Welding* - HLW). Test preliminari presso il laboratorio laser dell'ENEA Trisaia hanno dimostrato la possibilità di raddoppiare la velocità di saldatura.

## **Ringraziamenti**

Si ringrazia il Consorzio CALEF per il materiale di prova fornito e i tecnici del laboratorio di caratterizzazione meccanica del CR ENEA CASACCIA, U. De Angelis e D. Ferrara per il supporto dato nella realizzazione delle prove meccaniche.



## Bibliografia

1. F. Roland “Latest trends of Laser Welding in European Shipbuilding“, Welding Research Abroad Volume 49 n° 11 Novembre 2003
2. R. Möller, S. Koczera “Meyer Papenburg Shipyard first to use automated, Hybrid-laser panel-welding line”, Meyer Werft
3. RINA “Approvazione del procedimento di saldatura laser CO2”, Parte D, Cap 5, Sez 5 pp235-241 Regolamenti per la Classificazione delle Navi 2004
4. F. Roland “ Stake welding of lightweight Structures for shipbuilding using High power laser” United technologies Focal Spot Seminar, Orlando FL 1995
5. F Cotta, E. Pedaci “ In grossen dimensionen” laser Praxis 1998/10 pp15-17
6. Registri navali “Guidelines for approval of CO2 laser Welding” Draft, maggio 2001 rev 1.
7. IACS W28 ” Welding procedure qualification tests of steels for hull construction and marine structures” June 2005 par.4.2.2.7 p. 6
8. H. Ozden “Investigating Fiber lasers for Shipbuilding and marine construction” Welding Journal volume 86 n.5 Maggio 2007 pp 26-29
9. S. Gobbi, L. Monaco, “Saldatura di lamiera di acciaio saldabile a grano fine S460 NL UNI 10113-2 con laser Co2 6 kW” Report 4426/2 RTM
10. G. Barbieri “Messa a Punto della saldatura laser si giunti di testa ed a T su lamiera di S460 NL (UNI EN ISO 10113-2) di spessore 5 ed 8 mm” Luglio 2005 RT-TEC(2005)02\_Rev0 Report ENEA pp. 11-13
11. Istituto Italiano della Saldatura “Saldatura per fusione:Metallurgia e saldabilità dei materiali metallici” , Hoepli p.267