

## **Valutazione della tenacità nella Zona Termicamente Alterata di un giunto saldato in acciaio strutturale mediante prove di CTOD e Wide Plate**

D. Morabito, G. Demofonti, Centro Sviluppo Materiali - Roma

### **Abstract**

Una delle tecnologie che consente di ottenere lamiere strutturali per impieghi offshore aventi buone caratteristiche di tenacità e saldabilità è quella denominata TMCP (laminazione in controllo seguita da Raffreddamento Accelerato).

Relativamente all'impiego delle lamiere per la costruzione di giunti saldati una delle problematiche più sentite dagli utilizzatori è quella della tenacità nella Zona Termicamente Alterata (ZTA).

Vengono presi in esame due acciai: di grado 355 ad alto e basso Nb saldati in condizioni di "overmatching"<sup>1</sup>. L'effetto del Nb e del tipo di prove utilizzate per valutare la tenacità in ZTA sono discussi alla luce di risultati sperimentali ottenuti con prove di CTOD e Wide Plate.

### **1. Introduzione**

La tenacità dei giunti saldati è uno tra i più importanti requisiti richiesti agli acciai strutturali da impiegarsi in costruzioni off-shore.

E' ormai ben noto che il processo di saldatura sottopone il materiale base adiacente al cianfrino ad un trattamento termico caratterizzato da ripidi gradienti. Il risultato di tale trattamento è la Zona Termicamente Alterata (ZTA) che viene usualmente suddivisa in zone caratterizzate da diversa microstruttura. La sovrapposizione di più cordoni di saldatura, necessari in presenza di lamiere di forte spessore, introduce ulteriori trattamenti termici con il risultato di aumentare il numero di microstrutture a diversa tenacità. Alcune di queste, a tenacità molto bassa, sono state indicate con il nome di "Local Brittle Zone" e sono ritenute responsabili dello scadimento delle caratteristiche di tenacità che spesso vengono riscontrate nelle prove di laboratorio. Naturalmente le prove di laboratorio sono state fatte oggetto di normativa per la caratterizzazione delle giunzioni saldate [1,2], ma la loro intrinseca impossibilità di riprodurre il comportamento globale di un giunto (presenza di tensioni residue, diversa geometria dei difetti, diverse condizioni di costrizione plastica, ecc.) ha fatto spostare l'attenzione su prove su giunti saldati di diverse dimensioni che riescono a simulare meglio il reale comportamento di un giunto: tali tipi di prove sono dette Wide Plate per le elevate dimensioni del campione di prova. Esse possono, potenzialmente, permettere di quantificare dei criteri di trasferibilità tra una prova CTOD e la struttura reale, e

---

<sup>1</sup> Si parla di overmatching quando le caratteristiche meccaniche del materiale d'apporto, intese come tensioni di snervamento e di rottura, superano quelle del materiale base.

dunque in ultima analisi "aiutare" a definire i valori minimi di CTOD da richiedere a livello di specifica per assicurare una buona tenacità del giunto saldato nel suo complesso. Da un punto di vista tecnico esse hanno permesso di evidenziare da una parte la "severità" (in molti casi) delle prove di CTOD e dall'altra l'effetto positivo dell'overmatching sull'integrità del giunto saldato. Relativamente a quest'ultimo punto rimane aperto il problema del livello ottimale di overmatching (per un dato materiale base) per assicurare l'effetto benefico sull'integrità del giunto non rinunciando ad una buona tenacità della zona fusa.

Il lavoro sperimentale del presente articolo vuole valutare, mediante prove CTOD e Wide Plate, la tenacità della ZTA di giunti saldati realizzati con due acciai di grado 355 (equivalente rispetto alla BS7191) aventi diversi livelli di Nb, ottenuti col processo TMCP; i giunti sono stati realizzati con due diversi livelli di overmatching.

## **2. Lavoro sperimentale**

Il lavoro sperimentale si è articolato in una serie di misure di tenacità a  $-10^{\circ}\text{C}$  effettuate sulla ZTA di giunti saldati con l'uso della tecnica SAW (Submerged Arc Welding). Sono state impiegate provette TPB per misure di CTOD e Wide Plate.

### **Selezione dei materiali base e d'apporto e definizione delle condizioni di saldatura.**

I materiali base per la preparazione dei giunti appartengono alla classe degli acciai strutturali da TMCP sotto forma di lamiere di spessore 50 mm.

Sono state impiegate due lamiere aventi composizione chimica e caratteristiche meccaniche come riportate nelle Tab.I e II.

I materiali d'apporto per la saldatura SAW consistono in un unico tipo di flusso (OP 121TT) in unione con due diversi fili (OE-SD3 e OE-S3).

Con il materiale ad elevato contenuto di Nb (materiale A) sono stati realizzati dei giunti di prova per la messa a punto dei parametri di saldatura in funzione del raggiungimento di un apporto termico di circa 4.5 kJ/mm. In Tab.III sono riportati i parametri elettrici ottimali.

Il cianfrino e lo schema delle passate di saldatura sono state prescelte perché giudicate idonee a fornire una elevata percentuale di zona GHAZ (Grain Coarsened Heat Affected Zone).

Sui giunti di prova è stata compiuta la determinazione della quantità di GHAZ ottenuta, riscontrando valori variabili tra il 28% ed il 45%.

L'overmatching è stato stimato mediante prove di trazione su campioni estratti longitudinalmente in metallo d'apporto e trasversali (con tratto utile in zona fusa) e misure di durezza.

Il riepilogo relativo alle prove di trazione è riportato in Tab.IV ed in Tab. V si possono vedere i valori di overmatching medi ottenuti per le diverse combinazioni materiale-filo.

Le misure di durezza (HV5) sono state effettuate con lo scopo di indagare, in maniera semplice, sui livelli di overmatching dei singoli giunti.

Nelle Fig. 1,2 sono mostrati due andamenti tipici che confermano in termini qualitativi la presenza dell'overmatching.

### **Caratterizzazione dei giunti saldati mediante prove di CTOD**

Le prove di CTOD sono state effettuate su campioni di geometria Bx2B e BxB<sup>2</sup>.

Nei campioni BxB il posizionamento dell'intaglio è di tipo superficiale (così come la cricca introdotta nei Wide Plate).

Nei campioni Bx2B l'intaglio è attraverso lo spessore (through thickness) e la cricca avanza parallelamente ai cordoni di saldatura.

Il metodo di sezionamento utilizzato per le indagini metallografiche post-prova e i criteri di accettabilità dei CTOD in ZTA sono quelli suggeriti in letteratura [1,2,3].

Le misure di CTOD con provette Bx2B, tutte a -10° C, sono state condotte su campioni estratti da giunti realizzati con apporti termici pari a 4 e 5 kJ/mm.

In Tab. VI sono riportati i risultati ottenuti; i valori più bassi sono stati riscontrati, ad entrambi gli apporti termici considerati, sui campioni con acciaio al Niobio.

I CTOD relativi all'acciaio senza Niobio hanno fatto misurare valori generalmente superiori a .25 mm.

Le provette BxB per la misura del CTOD sono state prelevate da giunti saldati con apporto termico di 4.5 kJ/mm, come i giunti per le prove Wide Plate.

I risultati di tali prove sono mostrati in Tab. VII.

### **Caratterizzazione dei giunti saldati mediante prove Wide Plate**

La geometria dei Wide Plate qui esaminati è mostrata in Fig. 3.

Poiché per i Wide Plate non esiste una normativa che ne definisca le dimensioni, la scelta delle misure citate è stata fatta in base ad un orientamento generalizzato [4] a non utilizzare provette troppo piccole su cui si potrebbe non avere una riproduzione dell'effetto delle tensioni residue o della costrizione plastica del materiale circostante come avviene nelle strutture reali.

L'intaglio, posizionato nella ZTA, è di tipo superficiale con una lunghezza media di 200 mm.

Tutti i Wide Plate sono stati precriccati a fatica.

La strumentazione applicata alle provette Wide Plate è così composta:

- a) Trasduttori di spostamento (LVDT) che operano su una base di misura di 600 mm e misurano dunque un allungamento globale del giunto (ovunque sia localizzata la deformazione)
- b) Termoresistenze per la rilevazione della temperatura durante la prova.
- c) Un clip-gauge per la misurazione dell'apertura della cricca durante la prova.

---

<sup>2</sup> Si intende con B lo spessore delle provette. La geometria BxB implica provette con intaglio superficiale la Bx2B intaglio "attraverso lo spessore".

Sono state eseguite 5 prove suddivise in base alle combinazioni:

SD3/1

SD3/2 Acciaio A e filo SD3 - overmatching 19%

SD3/3

SD3/7 Acciaio B e filo SD3 - overmatching 32%

S3/1 Acciaio B e filo S3 - overmatching 23%

Da ogni Wide Plate sono state ricavate 4 o 5 sezioni metallografiche ortogonali alla superficie di frattura. Dall'osservazione di queste sezioni si è risaliti alla microstruttura campionata dall'apice della cricca di fatica ed alle microstrutture interessate dalla propagazione della cricca. Mediamente l'apice della cricca di fatica si è trovato nella zona di transizione tra grano fine (FCHAZ) e grano grosso (GCHAZ); si ritiene pertanto che i Wide Plate siano in questo caso rappresentativi della tenacità della ZTA di tali acciai. In Fig.4 sono riportate a titolo di esempio le sezioni metallografiche eseguite sul Wide Plate SD3/3.

In Tab.VIII si fornisce un quadro riassuntivo dei risultati delle prove Wide Plate.

### 3. Discussione

Sulle sezioni metallografiche compiute sui Wide Plate sono state osservate le microstrutture riportate nella Tab.VIII. Si è andati dalla GCHAZ alla FCHAZ. La seconda ha notoriamente caratteristiche di tenacità superiori a quelle della GCHAZ ma, avendo comunque effettuato la sezioni in corrispondenza di più o meno evidenti punti di innesco ed avendo osservato sulla superficie di frattura dei Wide Plate delle zone d'aspetto dichiaratamente fragile, si considerano i risultati di queste prove rappresentativi. Si ritiene infatti che essi abbiano abbastanza ben rappresentato il propagarsi di una cricca lungo strutture a differente tenacità (dalla più bassa in corrispondenza di zone fragili alla più alta in zone con evidente aspetto plastico).

Il Niobio ha un effetto negativo sulla tenacità in ZTA, come dimostra il basso valor medio del CTOD misurato con le provette Bx2B relative al materiale A. Tale comportamento, già evidenziato da altri lavori [5], è associabile alla presenza di isole di MA che si generano nella IRGCHAZ (Intercritical Reheated GCHAZ).

La presenza di queste microstrutture sembra non avere effetti negativi sulle provette Wide Plate, infatti anche per i Wide Plate di materiale base A si sono registrate elevate deformazioni globali (solo in un caso uguali all'1.5 %, nei restanti due superiori al 3%).

Un comportamento sostanzialmente analogo a quello dei Wide Plate si è manifestato nel caso delle provette CTOD BxB con il medesimo materiale base.

La spiegazione di tale diverso comportamento probabilmente può essere ricercata nelle diverse dimensioni delle provette e nel differente orientamento della cricca di fatica rispetto al cordone di saldatura, e dunque rispetto alle diverse microstrutture presenti nella ZTA.

Quanto trovato confermerebbe dunque l'estrema conservatività delle prove CTOD Bx2B

che non riescono a dare un'esatta approssimazione del comportamento reale del giunto poiché le modalità di campionamento della microstruttura non sono quelle riscontrabili nella realtà .

Per quanto riguarda l'effetto dell'overmatching si attendono altri dati di ulteriori prove attualmente in corso, ma volendo considerare i dati di prove Wide Plate fin qui a disposizione si può osservare che, a parità di profondità della cricca per i Wide Plate di materiale base B (per il quale si sono avute le combinazioni con overmatching più alto), si sono anche avuti i più alti valori di deformazione globale (6.4 e 5.5%).

#### **4. Conclusioni**

Misure di CTOD e prove di Wide Plate a -10° C hanno permesso di valutare la tenacità della ZTA di giunti saldati (SAW) in condizioni di overmatching (20-30%) realizzati con materiali base a diverso contenuto di Niobio (50 e 250 ppm).

Dall'analisi dei risultati, circa la tenacità della ZTA ed i tipi di prova impiegati usate per la sua valutazione, sono emerse le seguenti indicazioni:

- Le misure di CTOD compiute con provette Bx2B hanno posto in evidenza l'effetto negativo del Nb, in quantità pari a 250 ppm, sulla tenacità della ZTA: i valori di CTOD misurati nel caso dell'acciaio con Nb sono risultati inferiori a .25 mm.

- La valutazione della tenacità della ZTA di un giunto può, per il grado ed i livelli di overmatching esaminati, essere decisamente influenzata dal tipo di prova impiegata: sia nel caso dell'acciaio ad alto Nb che per basso Nb le prove di Wide Plate si sono sempre concluse con deformazione globale del giunto a rottura  $\geq 1.5\%$ .

Nell'ipotesi che la prova Wide Plate sia rappresentativa del comportamento reale, le misure di CTOD su provette Bx2B possono risultare troppo conservative. Per contro le misure di CTOD che impiegano provette BxB risultano (nei limiti del numero di prove eseguite) in sostanziale accordo con i risultati delle prove Wide Plate.

#### **Ringraziamenti**

Gli Autori ringraziano l'ILVA, nella persona dell'Ing. L. Rizzi, e la CECA per il supporto finanziario concesso per la realizzazione del presente lavoro.

#### **Bibliografia**

- [1] EEMUA - Steel specification for fixed offshore structures (adapted for Offshore from BS4360 :1986).
- [2] BS7191 - British Standard Specification for Weldable Structural Steels for fixed Offshore Structures - 1989.
- [3] H.G. Pisarski, R.J. Pargeter - Fracture toughness of HAZ in Steels for offshore Platforms - Metal Construction, July 1984, pp.412-417.
- [4] P.L. Harrison - The fracture of Welded Joints in High Strength Structural Steels -ECSC Project n.7210.KE/820 (F5.7/89).

- [5] M. Pontremoli et al. - Compositional Effects in TMCP Plates for Offshore Structures on Local Brittle Zones and HAZ Toughness of SAW Joints - Proceedings of the International Conference Welding '90, Ed. I.I.T.T. International, pp. 191-200.

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Al (%)	Nb (%)	Ni (%)	Ti (%)	N (ppm)	O (ppm)
A	.059	1.61	.23	.0036	.019	.022	.024	.35	.029	98	41
B	.082	1.30	.26	.002	.012	.039	.005	.35	.028	87	35

Tab.I Composizione chimica degli acciai A (Alto Nb) e B (Basso Nb)

		Trasversale		Longitudinale	
		T.A.	-10°C	T.A.	-10°C
$\sigma_y$ (MPa)	A	435	430	428	428
	B	380	393	370	387
$\sigma_R$ (MPa)	A	537	534	525	528
	B	490	515	480	494

Tab.II Caratteristiche Meccaniche degli acciai A and B.

Apporto Termico: 4.5 kJ/mm	
Corrente (Ampere)	700
Voltaggio (Volt)	34
Velocità (mm/min)	317

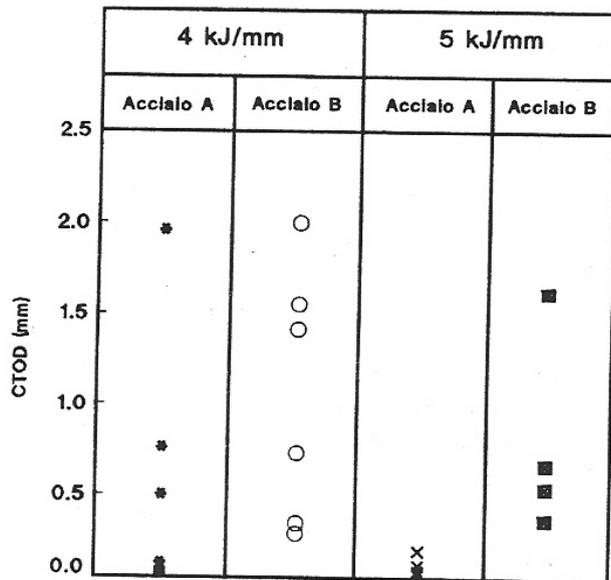
Tab.III Parametri di saldatura

	Matching (filo OE-S3) -10°C		Overmatching (filo OE-SD3) -10°C
	L	T	L
	$\sigma_y$ (MPa)	475	451
$\sigma_R$ (MPa)	576	572	609

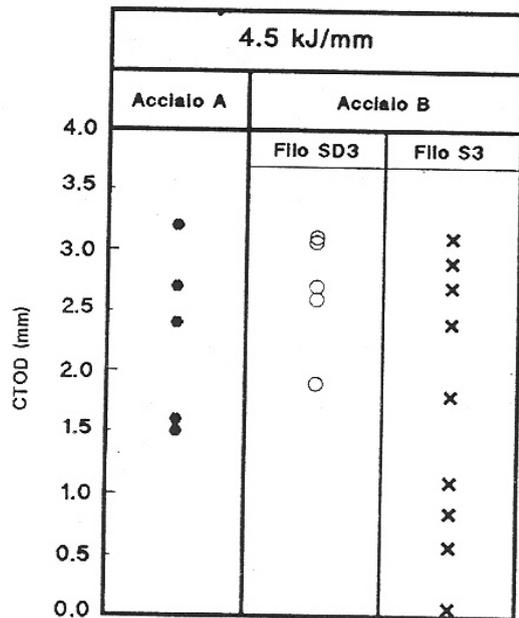
Tab.IV prove di trazione in metallo d'apporto  
L,T = Direzioni longitudinale e trasversale rispetto al cordone di saldatura

Materiale Base	Filo	Overmatching (%)
A	SD3	19
B	SD3	32
B	S3	23

Tab.V Overmatching medio per le diverse combinazioni Metallo Base-Filo



Tab.VI Valori di CTOD misurati su campioni Bx2B



Tab.VII Valori di CTOD misurati su campioni BxB

Sigla WP	SD3/1	SD3/2	SD3/3	SD3/7	S3/1
Tipo Acciaio	A	A	A	B	B
Filo	SD3	SD3	SD3	S3	S3
Overmatching (%)	19	19	19	32	23
Profondità cricca (mm)	25.6	8.4	25.4	7	6
Area della cricca (mm <sup>2</sup> )	3817	1453	3533	1211	1080
Carico Massimo (MN) al 3%	10.7	13.3	10.5	13.7	12.3
Deformazione globale (%)	8.5	12.2	-	12.4	11.2
Gross Stress (MPa) al 3%	357	443	350	457	410
Net Stress (MPa) al 3%	283	408	-	413	373
	450	509	436	476	425
	357	468	-	431	387
GCOD al 3%	10	8.6	10	4.7	2.4
	10	3.2	-	2.1	1.4
Posizione apice cricca	FGHAZ	GCHAZ FGHAZ	GCHAZ	FGHAZ	GCHAZ FGHAZ

Tab.VIII Sommario delle prove Wide Plate

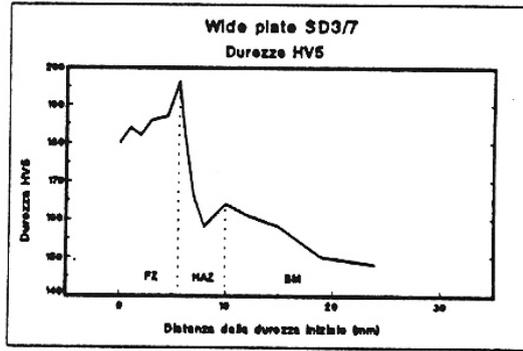
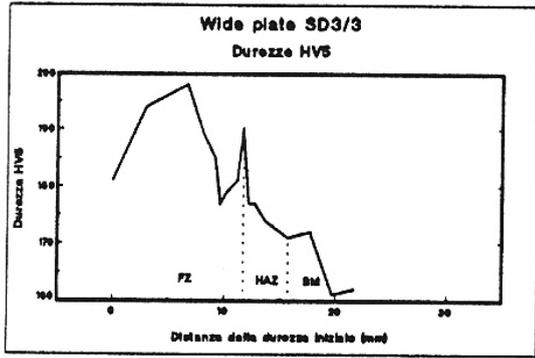


Fig.1 Tipico andamento delle durezza nell'acciaio A

Fig.2 Tipico andamento delle durezza nell'acciaio B

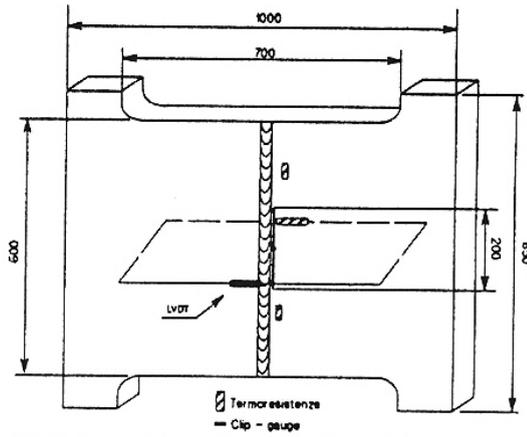


Fig.3 Geometria e strumentazione dei Wide Plate

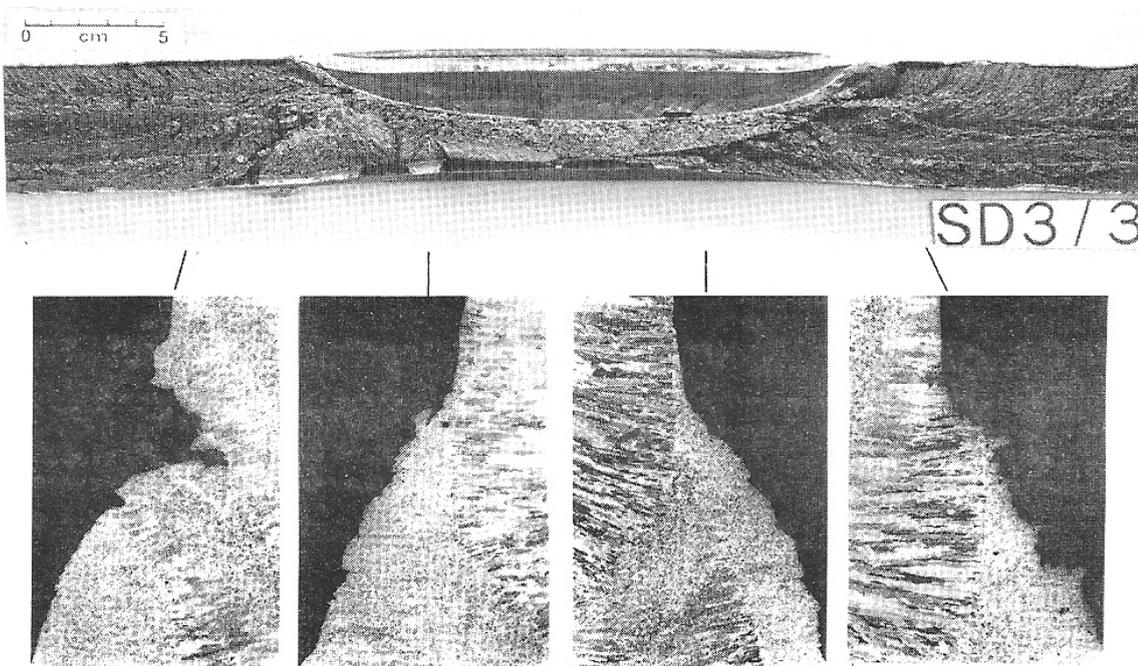


Fig.4 Sezioni metallografiche del Wide Plate SD3/3