



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA DEI MATERIALI

LA SALDATURA: PROCEDIMENTI E QUALIFICHE DI LABORATORIO
WELDING: PROCESSES AND LABORATORY QUALIFICATIONS

Relatore: Prof.ssa Irene Calliari

Correlatore: Dott. Ing. Marco Pizzo

Laureando: Matteo Meggiolaro

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 - I processi di saldatura	3
1.1 Introduzione.....	3
1.2 Saldatura a cannello ossiacetilenico - OFW.....	3
1.3 Saldatura ad arco.....	4
1.3.1 Saldatura con elettrodo rivestito – SMAW.....	4
1.3.2 Saldatura ad arco sommerso – SAW.....	6
1.3.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo - GMAW	7
1.3.4 Saldatura con elettrodo a flusso incorporato – FCAW.....	10
1.3.5 Saldatura TIG con elettrodo in tungsteno in gas protettivo – GTAW.....	11
1.4 Saldatura per resistenza – RW.....	11
1.5 Altri procedimenti di saldatura.....	12
1.6 Confronto tra metodi di saldatura.....	13
CAPITOLO 2- Caratterizzazione e qualifica dei processi di saldatura	15
2.1 Introduzione.....	15
2.2 Il giunto saldato.....	15
2.2.1 La zona fusa - ZF.....	16
2.2.2 La zona termicamente alterata – ZTA.....	17
2.3 Difettologia del giunto saldato.....	18
2.3.1 Cricche.....	18
2.3.2 Porosità.....	19
2.3.3 Inclusioni solide di scoria.....	19
2.3.4 Mancanza di fusione e mancanza di penetrazione.....	19
2.3.5 Difetti di forma e dimensionali.....	20
2.3.6 Altre imperfezioni.....	20
2.4 Prove di qualifica di saldatura in laboratorio.....	21
2.4.1 Prove non distruttive.....	21
2.4.2 Esame macrografico.....	21
2.4.3 Esame micrografico.....	22
2.4.4 Prove di durezza.....	23
2.4.5 Prova di trazione.....	25

2.4.6 Prova di piegamento.....	26
2.4.7 Prova di resilienza.....	26
CAPITOLO 3 - Esempio di un report di laboratorio.....	29
3.1 Introduzione.....	29
3.2 Esempio di un report di laboratorio.....	29
CONCLUSIONI.....	39
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41
RINGRAZIAMENTI.....	43

Introduzione

Scopo del seguente lavoro è quello di analizzare i vari aspetti dei diversi processi di saldatura dei metalli e dei relativi procedimenti di qualifica che si svolgono in laboratorio. Nella prima parte saranno quindi presentati e confrontati i più diffusi processi di saldatura, con un'ampia panoramica della situazione tecnologica attuale in questo campo.

Nella seconda dopo una descrizione delle caratteristiche del giunto saldato saranno presentati metodi e modalità operative per la qualifica in laboratorio dei procedimenti di saldatura descritti in precedenza, grazie alla mia esperienza di collaborazione con l'azienda CTR srl di Limena (PD).

Capitolo 1: I processi di Saldatura

1.1 Introduzione

Con il termine “processi di saldatura” si intendono tutti quei procedimenti finalizzati all'unione permanente di due parti metalliche che ne realizzino anche la continuità materiale. Tale risultato è raggiunto attraverso un apporto di calore localizzato (che in gergo si indica con il termine “passata”) che causa la fusione contemporanea dei lembi da unire e di un opportuno materiale d'apporto, anche se in alcuni casi quest'ultimo può non essere necessario. Tale apporto di calore dà origine al bagno di saldatura, che poi solidificando si trasforma nel cordone di saldatura, responsabile del collegamento tra le parti. Generalmente è sufficiente una singola passata per realizzare un cordone, ma nel caso di spessori elevati si può anche ricorrere ad una tecnica a passata multipla.

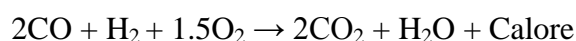
Per sviluppare le temperature piuttosto elevate richieste per la realizzazione del bagno di saldatura esistono vari metodi: ognuno di questi è dotato di particolari proprietà che lo rendono più o meno adatto ad essere usato in determinati casi e proprio l'analisi di queste particolari caratteristiche sarà oggetto di questo primo capitolo.

1.2 Saldatura a cannello ossiacetilenico – OFW¹

Il processo di saldatura a fiamma ossiacetilenica impiega un combustibile gassoso (in questo caso acetilene, C₂H₂) in abbinamento all'ossigeno per produrre una fiamma in grado di fondere i metalli all'interfaccia da unire. Il calore necessario al processo viene originato dal processo di combustione dell'acetilene e si sviluppa secondo due reazioni consecutive: la prima, che ha origine nella parte più interna della fiamma, è la seguente:



la quale, oltre a sviluppare circa un terzo del calore totale di fiamma, comporta la dissociazione dell'acetilene in monossido di carbonio e idrogeno, rendendo quindi possibile la reazione di combustione secondaria:



¹ La sigla che affianca il nome è quella usata dall'*American Welding Society* per identificare il processo

che permette di raggiungere temperature superiori ai 3000°C, ben oltre il punto di fusione della maggior parte dei materiali metallici in commercio.

Fattore di fondamentale importanza nella saldatura a fiamma ossiacetilenica è il rapporto volumetrico tra ossigeno e acetilene: definito neutro un rapporto di parità, diremo che la fiamma è ossidante quando l'ossigeno è in eccesso e carburante (o riducente) quando è in difetto. Fiamme ossidanti possono causare negli strati superficiali del materiale fenomeni di ossidazione, particolarmente pericolosi nel caso degli acciai ma auspicabili quando si ha a che fare con il rame e le sue leghe, in quanto si forma un sottile strato protettivo di scoria sopra il metallo fuso; fiamme carburanti sviluppano invece temperature più basse e sono quindi utilizzate per applicazioni che richiedono un limitato apporto di calore. Il rapporto desiderato è raggiunto in seguito ad una regolazione “a vista”, in quanto i due tipi di fiamma presentano caratteristiche ben distinte.

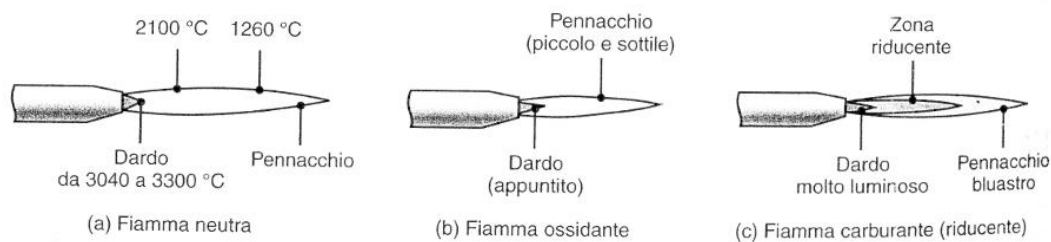


Immagine 1.1 Tipi di fiamma nella saldatura a cannello ossiacetilenico

1.3 Saldatura ad arco

In questa categoria rientrano tutti quei processi in cui il calore necessario alla fusione viene fornito dall'arco elettrico che viene fatto scoccare tra un apposito elettrodo e il materiale da fondere. L'elettrodo utilizzato per questo scopo può essere consumabile o no: nel primo caso funge anche da materiale d'apporto ed è costituito da una bacchetta rivestita o da un filo continuo, mentre nel secondo si tratta solitamente di una bacchetta di tungsteno contenuta in una torcia. La maggior parte dei processi di questo tipo necessitano di un apporto di gas in grado di dar origine ad un'atmosfera protettiva che protegga il bagno di saldatura da fenomeni quali l'ossidazione.

1.3.1 Saldatura con elettrodo rivestito – SMAW

Il metodo di saldatura ad elettrodo rivestito è uno dei più diffusi in assoluto tra i vari processi di saldatura ad arco, in quanto garantisce ottimi risultati in termini qualitativi pur mantenendo

una grande versatilità. L'apparecchiatura, piuttosto semplice, consiste in un generatore al quale attraverso un idoneo cavo di alimentazione è collegato il sistema pinza-elettrodo, oltre ai cavi di massa connessi al materiale base che permettono di chiudere il circuito. Le correnti sono comprese tra 50 e 300 A circa, mentre le potenze in gioco sono inferiori ai 10 kW.



Immagine 1.3 Apparato di saldatura a elettrodo

Per far scoccare l'arco elettrico la bacchetta-elettrodo viene sfregata contro il pezzo da saldare e poi subito allontanata (per evitare che si saldi al pezzo) ad una distanza che permette comunque di mantenere l'arco; in seguito il calore così generato fonde materiale base ed elettrodo, dando origine al bagno che una volta solidificato costituirà il cordone di saldatura.

Durante la fusione l'anima dell'elettrodo svolge il ruolo di materiale d'apporto andando ad influenzare la composizione chimica del cordone mentre il rivestimento va in parte a formare una scoria solida protettiva del bagno (che deve essere rimossa al termine della saldatura in quanto possibile punto d'innesco di processi corrosivi) e in parte una protezione gassosa attorno alla zona fusa.

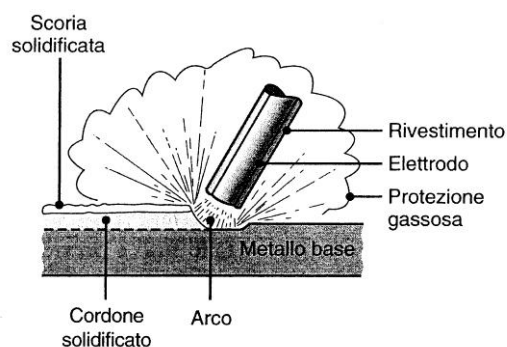


Immagine 1.4 Procedimento di saldatura ad elettrodo

Proprio per l'importanza del ruolo che svolge all'interno del processo la composizione dell'elettrodo deve essere attentamente valutata in funzione della saldatura che si effettua; il mercato offre quindi al giorno d'oggi svariati tipi di bacchette, che però possono essere raggruppate in 4 gruppi principali:

- Bacchette a rivestimento basico: sono caratterizzate dalla presenza di un gran numero di elementi depuranti al fine di ottenere ottime caratteristiche del giunto. Di conseguenza producono molta scoria, un bagno molto viscoso e sono inoltre causa di una certa instabilità dell'arco elettrico.
- Bacchette a rivestimento acido: danno origine ad un rivestimento meno viscoso del precedente che permette quindi una maggior penetrazione, ma al contempo non influenzano più di tanto la metallurgia del bagno, essendo composti perlopiù da elementi disossidanti.
- Bacchette a rivestimento rutilo: sono simili alle acide ma caratterizzate dalla presenza del rutilo (biossido di titanio, TiO_2) che conferisce al deposito una notevole fluidità ed un ottimo aspetto superficiale.
- Bacchette a rivestimento cellulosico: il rivestimento in questo caso è composto da cellulosa che durante la saldatura brucia fornendo abbondante protezione gassosa, nonché una notevole quantità di calore al bagno. La scoria è praticamente assente mentre la presenza di idrogeno nel rivestimento le rende inadatte alla saldatura di acciai Cr-Mo e di taluni inox, in quanto possono dar origine a cricche a freddo.

È infine importante sottolineare la possibilità di scegliere la polarità della corrente continua, anche in funzione del materiale che compone il rivestimento: una polarità diretta (pezzo polo positivo e elettrodo negativo) implica una debole penetrazione ed è quindi indicata per la saldatura di lamiere o lembi a grande distanza fra di loro, mentre una polarità inversa (pezzo polo negativo e elettrodo positivo) consente di ottenere maggiori profondità di penetrazione.

1.3.2 Saldatura ad arco sommerso – SAW

Come suggerisce il nome nella saldatura ad arco sommerso l'arco elettrico che scocca tra materiale base e l'elettrodo (che in questo caso è un filo fusibile alimentato con continuità) è completamente ricoperto da un flusso granulare di silicati, ossidi e ferroleghie che viene depositato per gravità nella zona di saldatura. Tale modus operandi permette numerosi vantaggi: si previene la formazione di spruzzi e scintille, è possibile usare correnti elevate (da 300 a 2000A), l'emissione di fumi e raggi UV dannosi per l'operatore è molto limitata e la

saldatura può penetrare profondamente nel pezzo in quanto il deposito svolge anche il ruolo di isolante termico. Parte di tale flusso viene fusa dal calore sviluppato dall'arco, andando così a finire nel bagno di saldatura dove reagisce chimicamente con gli altri elementi presenti, il che lo porterà poi a costituire la scoria che ricopre il cordone. Il fondamentale ruolo svolto dal flusso granulare in questo processo implica l'obbligo di lavorare quasi esclusivamente in piano: questo, insieme ad altri fattori come l'impossibilità di determinare con precisione la posizione dell'arco (che è completamente coperto dal deposito) e il considerevole ingombro dell'intero apparato di saldatura, favorisce senza alcun dubbio l'automatizzazione del processo e quindi il raggiungimento di altissimi livelli di produttività, fino a 10 volte maggiori di quelli della saldatura ad elettrodo.

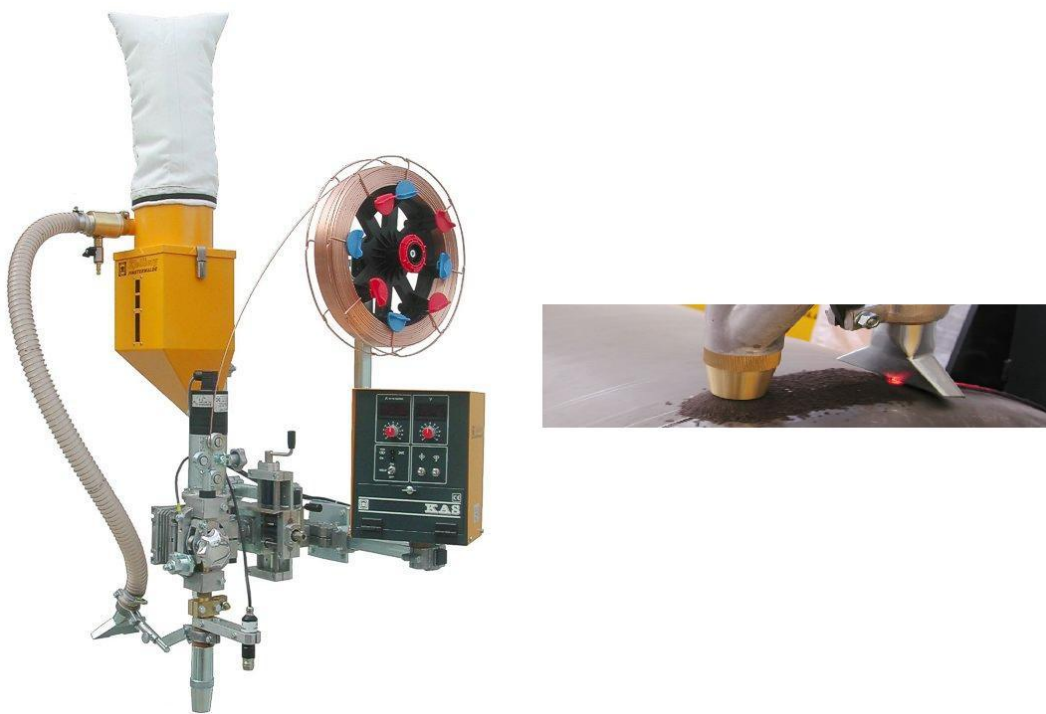


Immagine 1.5 Apparato di saldatura ad arco sommerso e particolare della torcia

1.3.3 Saldatura con elettrodo fusibile in gas protettivo – GMAW

La saldatura ad elettrodo fusibile in gas protettivo prevede, come per quella in arco sommerso, che la doppia funzione di elettrodo e materiale d'apporto sia svolta da un filo alimentato in continuo nella zona di saldatura attraverso un'apposita pistola, la quale provvede anche all'erogazione della quantità di gas necessaria a dar origine all'atmosfera protettiva la cui presenza è fondamentale per la buona riuscita del tutto. L'apparato di saldatura prevede quindi un generatore di corrente, una bombola di gas, un sistema di alimentazione in continuo

del filo e una pistola-torcia: il tutto può essere organizzato in modo da essere relativamente mobile, magari servendosi di un carrello dove posizionare il sistema bombola-generatore-gruppo di alimentazione.



Immagine 1.6 Apparato di saldatura in gas protettivo

Tale procedimento risulta essere piuttosto versatile, anche grazie alla possibilità di poter variare il gas usato per creare l'atmosfera protettiva; relativamente a quest'aspetto possiamo identificare due versioni della saldatura GMAW:

- Il procedimento viene detto di tipo MIG (*Metal Inert Gas*) quando il gas utilizzato è l'Argon, l'Elio o una miscela dei 2: l'Argon garantisce un'ottima stabilità dell'arco, con conseguente regolarità nel trasferimento del materiale d'apporto, il che permette quindi una facile gestione di tutto il processo; l'Elio invece comporta un maggior apporto termico, rendendo il suo uso adatto a processi in cui sono necessarie notevoli velocità esecutive. Ovviamente una miscela dei due permetterà di ottenere delle caratteristiche "di compromesso".
- Il procedimento viene detto di tipo MAG (*Metal Active Gas*) quando oltre a Elio e Argon viene utilizzata anche una percentuale di gas attivo, la cui composizione

influenza chimicamente il bagno di saldatura. Nella maggior parte dei casi tali gas sono miscele di anidride carbonica, la quale permette di ottenere un bagno maggiormente caldo e penetrante, anche se a scapito della qualità del giunto); in alcuni casi specifici sono usate anche miscele di ossigeno, idrogeno o azoto.

Anche le diverse modalità di trasferimento delle gocce di elettrodo fuso al bagno di saldatura permettono di adattare il processo alle diverse necessità operative; a seconda dei casi sarà quindi possibile scegliere uno dei tre meccanismi seguenti:

- **Trasferimento a spruzzo:** Le gocce di elettrodo fuso vengono trasferite al bagno di saldatura al ritmo di centinaia al secondo, evitando così gli spruzzi indesiderati e garantendo allo stesso tempo un arco elettrico molto stabile. Sono necessari elevate intensità di corrente, elettrodi di grosso diametro e atmosfere protettive ricche di argon.
- **Trasferimento globulare:** Gas protettivi ricchi di CO₂ e intensità di corrente medio-basse danno origine a grosse gocce di metallo fuso il cui trasferimento avviene a velocità relativamente lente (poche decine al secondo). Tale meccanismo permette di ottenere buoni risultati in fatto di penetrazione e velocità di saldatura, a fronte però di una certa instabilità dell'arco e della difficoltà di ottenere un cordone di saldatura regolare e privo di spruzzi.
- **Trasferimento a immersione o per corto circuito:** Questo particolare metodo richiede i più bassi valori di corrente in assoluto tra i tre, fili di piccolo diametro e gas protettivi ricchi di CO₂. Il trasferimento di materiale d'apporto al cordone in formazione avviene una goccia alla volta: queste infatti si formano sulla punta dell'elettrodo e ad un certo punto del loro accrescimento entrano in contatto con il bagno di saldatura: questo causa un corto circuito e di conseguenza lo spegnimento dell'arco, che però è subito ripristinato una volta che la tensione superficiale del bagno cattura la goccia.

Vale la pena di sottolineare che negli ultimi 15-20 anni diverse aziende hanno sviluppato ulteriormente il processo in questione: la variante più interessante è senza dubbio il processo STT della Lincoln Electric, che attraverso un controllo della corrente permette di ottenere benefici sotto l'aspetto qualitativo (meno spruzzi), della sicurezza dell'operatore (meno fumi) e del costo dei materiali consumabili (è possibile usare un gas 100% CO₂ -più economica- per l'atmosfera protettiva).

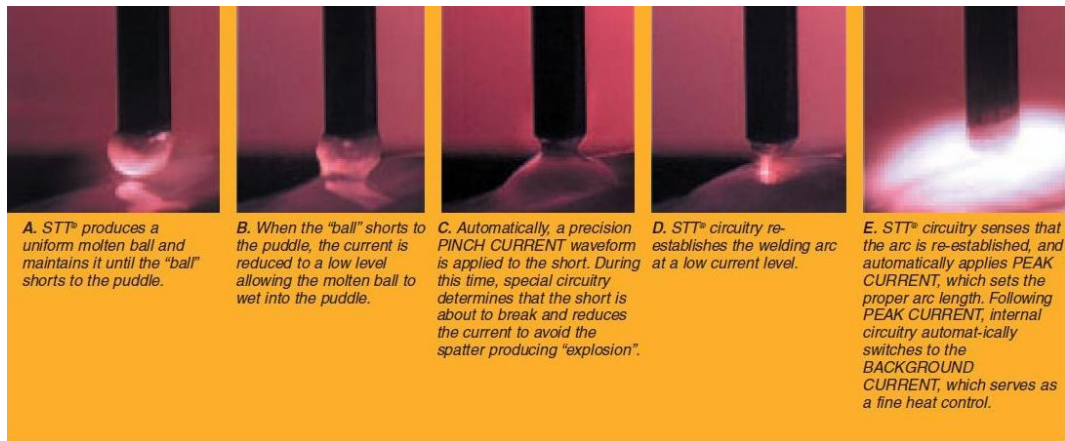


Immagine 1.7 Sintesi del funzionamento del processo STT

1.3.4 Saldatura con elettrodo a flusso incorporato - FCAW

Tale procedimento può essere considerato come una variazione del GMAW precedentemente presentato (l'impianto di saldatura infatti è lo stesso): l'unica differenza sta nell'uso di un filo animato anziché di un filo in metallo massiccio, ovvero un elettrodo a filo con una struttura tubolare riempita con un flusso (solitamente una miscela di polveri).

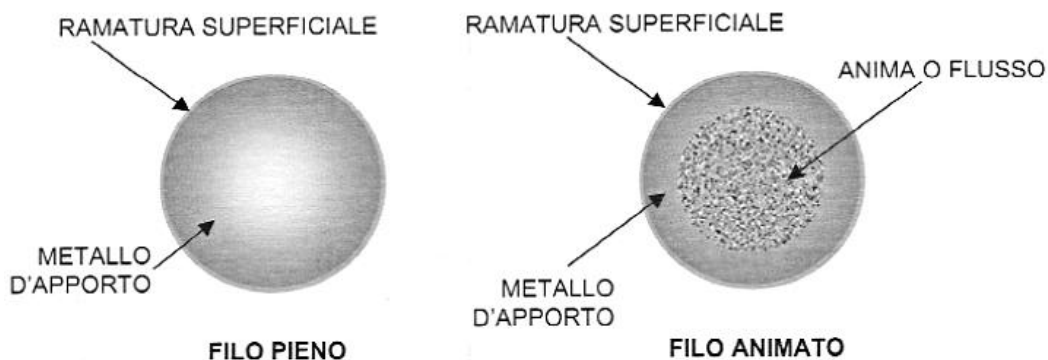


Immagine 1.8 Confronto tra fili pieni e fili animati

Una tale struttura dell'elettrodo permette un maggior rendimento del processo, una buona stabilità dell'arco e la possibilità di ottenere specifiche proprietà metallurgiche, anche se ovviamente si va incontro a spese maggiori. Di seguito sono elencate le principali categorie di filo presenti al giorno d'oggi sul mercato, seguite da una breve descrizione del loro effetto sul processo di saldatura:

- Fili animati rutili: Garantiscono ottima regolarità di deposito e stabilità dell'arco.
- Fili animati basici: Danno origine ad una scoria relativamente spessa che garantisce un'ottima purificazione del bagno di saldatura.

- Fili a riempimento metallico: Sono i fili che permettono di raggiungere i più elevati valori di rendimento, in quanto il flusso composto da polveri metalliche fa sì che la scoria prodotta sia minima.
- Fili animati autoprotetti: Sono fili che permettono di saldare senza dover ricorrere all'apporto di un gas per generare l'atmosfera protettiva. Ciò risulta particolarmente utile in ambiti come la saldatura in cantiere o comunque dove è difficile realizzare un'adeguata atmosfera protettiva.

1.3.5 Saldatura TIG con elettrodo in tungsteno in gas protettivo – GTAW

Nel processo TIG l'elettrodo è infusibile ed è composto da una bacchetta di tungsteno (da qui il nome TIG, *tungsten inert gas*) contenuta in una torcia che provvede anche all'erogazione del gas protettivo (solitamente Argon o Elio), similmente a quanto avviene per il processo GMAW.

Poiché l'elettrodo è infusibile è necessario fornire al bagno il necessario materiale d'apporto, realizzato sotto forma di bacchette, anche se nel caso di saldatura di piccoli spessori se ne può fare a meno. La potenza richiesta dal processo è compresa tra gli 8 e i 20 kW.

È importante sottolineare che la saldatura TIG richiede più degli altri processi una buona preparazione dell'operatore: il caratteristico elettrodo in tungsteno deve infatti essere sempre mantenuto ad un'adeguata distanza dal bagno di saldatura, pena la contaminazione di quest'ultimo; in caso di contatto infatti l'elettrodo può frammentarsi rilasciando nel bagno dei frammenti di tungsteno che possono poi risultare punti di innesco per rotture fragili.

Data l'elevata stabilità dell'arco, le ridotte dimensioni della sorgente di calore e la possibilità di operare senza materiale d'apporto rende il processo TIG adattissimo ad eseguire saldature di qualità molto elevata su spessori critici o su materiali particolarmente sensibili al calore come gli acciai inossidabili.

1.4 Saldatura per resistenza – RW

La saldatura per resistenza appresenta uno dei metodi più semplici, veloci ed economici per unire due parti metalliche. Il funzionamento è molto semplice: i lembi da unire sono schiacciati da due elettrodi metallici attraverso i quali viene fatta passare della corrente che per effetto Joule genera il calore necessario a fondere e unire il materiale. Ovviamente tale tecnica è adatta a lavorare solo su piccoli spessori ma l'estrema semplicità che la caratterizza la rende adattissima all'automazione: è infatti largamente diffusa nella produzione in serie in campo automobilistico.

1.5 Altri procedimenti di saldatura

Sono di seguito elencati e brevemente descritti i processi di saldatura meno diffusi (in quanto di recente sviluppo o perché destinati ad un utilizzo piuttosto specifico).

- Saldatura per elettroscoria – ESW: È un procedimento specifico per le saldature in posizione verticale con lembi testa a testa. Tali lembi formano insieme a due pattini di rame un “catino” in cui è introdotto un opportuno flusso di materiale attraverso il quale viene fatto avanzare il filo elettrodo; il calore necessario al processo di saldatura viene poi generato per effetto Joule.

Tale metodo permette l'unione di grossi spessori anche in una sola passata ma la grande quantità di energia che deve essere fornita, l'obbligo di lavorare solamente in verticale e l'impossibilità di interrompere il processo senza poi dover riportare a fusione tutto il flusso lo rendono adatto solo ad applicazioni specifiche, come i serbatoi di grandi dimensioni.

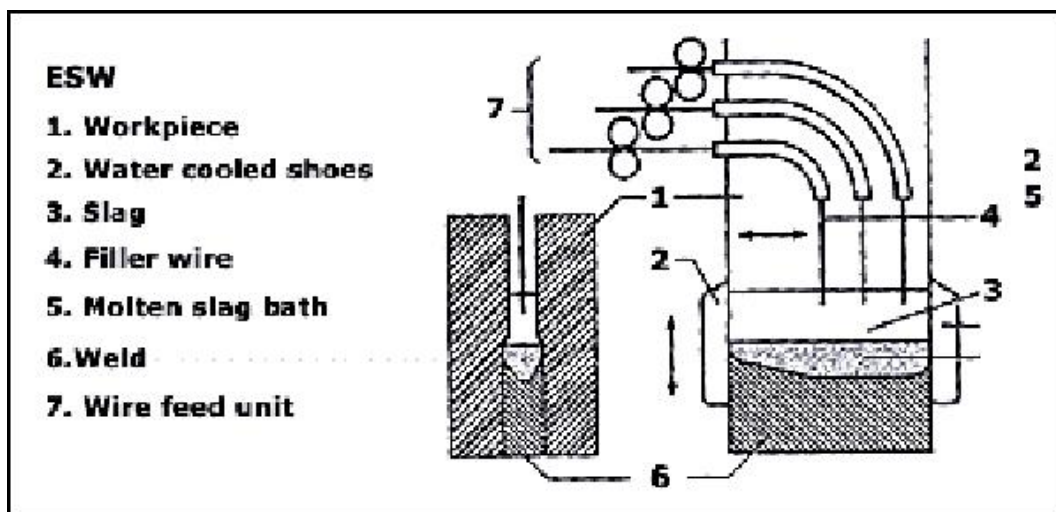


Immagine 1.10 Schema di funzionamento processo ad elettroscoria

- Saldatura elettrogas – EGW: Simile all'elettroscoria, prevede l'uso di un gas inerte al posto della scoria per proteggere il bagno, il che rende impossibile sfruttare l'effetto Joule per generare il calore (il gas non conduce bene calore come la scoria) e implica il ricorso all'arco elettrico. Con l'elettroscoria condivide l'idea di base, ovvero la creazione di un crogiolo di saldatura attraverso l'uso di pattini in rame, così come il campo di applicazione.

- Saldatura laser – LBW: Tale metodo impiega dei fasci laser ad elevata potenza per produrre la fusione localizzata delle parti in metallo. Data la notevole possibilità di focalizzazione del fascio tale metodo risulta particolarmente adatto per tutti quei lavori dove sono richiesti grande precisione e forte capacità di penetrazione.
- La saldatura al plasma – PAW: Può essere considerata come un'evoluzione della tecnologia TIG: il principio che sta alla base del processo prevede che attorno all'elettrodo di tungsteno venga fatto passare un gas, solitamente argon, che in presenza del campo elettrico diventa plasma, ovvero gas fortemente ionizzato ad altissima temperatura (decine di migliaia di gradi). Tale gas viene poi fatto passare attraverso un orifizio in modo da dar origine ad un fascio di energia concentrata che permette lavori di precisione estrema.

1.6 Confronto tra i metodi di saldatura

Come abbiamo visto l'attuale offerta in fatto di tecnologie di saldatura è piuttosto ampia e differenziata: ogni processo infatti gode di precise caratteristiche che lo rende più o meno adatto ad un particolare utilizzo. Un riassunto di tali caratteristiche è presentata nella tabella seguente:

Processo	Esecuzione	Vantaggi	Posizioni	Distorsione	Costo
SMAW	Manuale	Trasportabile e flessibile	Tutte	Medio-alta	Basso
SAW	Automatica	Elevata produttività	In piano	Medio-alta	Medio-alto
GMAW	Semiautomatica o automatica	Applicabile a molti metalli	Tutte	Media	Medio-alto
GTAW	Manuale o automatica	Applicabile a molti metalli	Tutte	Media	Medio
FCAW	Semiautomatica o automatica	Elevata produttività	Tutte	Media	Medio
OFW	Manuale	Trasportabile e flessibile	Tutte	Medio-Bassa	Basso

Tabella 1.1 Confronto tra metodi di saldatura

Oltre ai fattori sopra elencati quando si sceglie un processo bisogna poi tener conto anche della saldabilità di un metallo, ovvero della sua attitudine a formare legami saldati: fattori come la presenza di determinati elementi in lega, la finitura superficiale, la presenza di impurezze e inclusioni risultano infatti decisivi nella scelta. Le tabelle che seguono raccolgono delle valutazioni e considerazioni sulla saldabilità dei più diffusi tipi di acciai e leghe non ferrose:

Tipo di acciaio	Saldabilità	Considerazioni
Acciai dolci	Ottima	Saldabili con qualsiasi processo
Acciai duri	Bassa	La presenza del carbonio in fragilisce la struttura (si tempra la ZTA), problemi di corrosione.
Acciai inox ferritico-martensitici	Bassa	La struttura è fragile per i grossi grani di cromo in matrice martensitica, è necessario un preriscaldamento e anche un trattamento di rinvenimento a saldatura effettuata.
Acciai inox austenitici	Ottima	L'unica cosa a cui prestare attenzione è la pulizia dalle scorie.
Ghise	Pessima	L'alto carbonio le rende fragilissime, la situazione migliora leggermente solo con quelle sferoidali.

Tabella 1.2 Saldabilità degli acciai

Metallo o lega	Saldabilità	Considerazioni
Alluminio e sue leghe	Media	Sono necessarie grandi potenze per fondere lo strato di ossido che si forma al semplice contatto con l'aria
Rame	Buona	Bisogna stare attenti agli ossidi che lo rendono estremamente fragile
Piombo	Buona	Solo in piano per il basso punto di fusione
Titanio	Media	Necessario l'impiego di opportuni gas protettivi

Tabella 1.3 Saldabilità di metalli o leghe non ferrosi

Capitolo 2: Caratterizzazione e qualifica dei processi di saldatura

2.1 Introduzione

Per un'adeguata comprensione dei principi di funzionamento dei processi di qualifica in laboratorio è necessario innanzitutto conoscere le caratteristiche fondamentali del giunto saldato. Una volta acquisite queste nozioni sarà più facile approfondire tutti gli aspetti più specifici dei procedimenti che si mettono in atto in un laboratorio di qualifica; inoltre, al fine di realizzare una trattazione esaustiva del tutto, oltre agli aspetti più pratici riguardanti modalità, macchinari e materiali sono presenti anche notazioni sulla parte normativa.

2.2 Il giunto saldato

La struttura di un giunto saldato è divisibile in tre zone ben distinte:

1. Il metallo base (MB), ovvero la zona di materiale che non ha subito modificazioni importanti.
2. La zona termicamente alterata (ZTA), ovvero quella parte di materiale che ha subito modificazioni importanti ma senza che arrivi alla fusione.
3. La zona fusa (ZF), composta dal materiale che è fuso durante il processo di saldatura e poi solidificandosi ha dato origine al cordone.

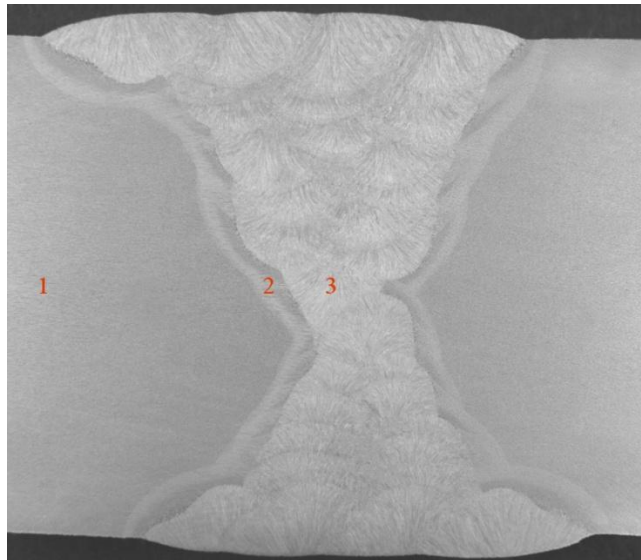


Immagine 2.1 Struttura di un giunto saldato

Poiché le caratteristiche della zona fusa e della zona termicamente alterata sono determinanti per quanto riguarda la qualità della saldatura è necessario un approfondimento delle loro caratteristiche:

2.2.1 La zona fusa - ZF

La solidificazione della zona fusa comincia con la nucleazione dei nuovi grani in corrispondenza della superficie di separazione con la zona termicamente alterata. A questa fase segue poi un accrescimento di tipo dendritico, finalizzato a massimizzare lo smaltimento di calore all'interfaccia.

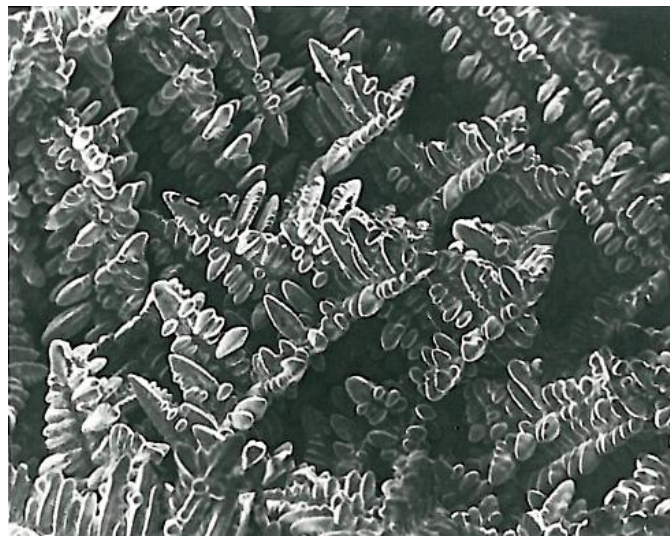


Immagine 2.2 Accrescimento dendritico

La dimensione finale dei grani risulta fondamentale nel determinare le proprietà meccaniche del giunto saldato, ad esempio una struttura a grano ingrossato risulta infatti particolarmente sfavorevole per alcune proprietà come la tenacità.

I fattori che determinano le dimensioni dei grani sono:

- Velocità di raffreddamento: alte velocità di raffreddamento (e quindi cicli termici severi) portano ad avere grani di dimensioni ridotte, mentre cicli termici blandi danno origine ad una struttura a grano ingrossato.
- Numero trasformazioni allotropiche allo stato solido: ad ogni trasformazione corrisponde una diminuzione della dimensione dei grani.
- Dimensioni del materiale base: in quanto la struttura della zona fusa tende a “copiare” a quella del materiale base.

2.2.2 La zona termicamente alterata - ZTA

Come già detto in precedenza la ZTA corrisponde alla zona nelle immediate vicinanze del cordone di saldatura che ha subito importanti modificazioni nella struttura cristallina. La sua dimensione e struttura sono direttamente collegate alla tipologia di materiale base utilizzato. Per quanto riguarda agli acciai possiamo individuare due casi:

- Acciai non legati e bassolegati: In questo caso la ZTA può essere suddivisa in tre zone la cui struttura è collegata alla temperatura massima raggiunta durante il processo. Avremo quindi una zona a grano ingrossato per quei punti che raggiungono temperature comprese tra i 1100°C e i 1500°C, una zona ricristallizzata a grano affinato per temperature comprese tra 850°C e 1100°C e una zona con austenitizzazione parziale per permanenze tra i 720°C e gli 850 °C.

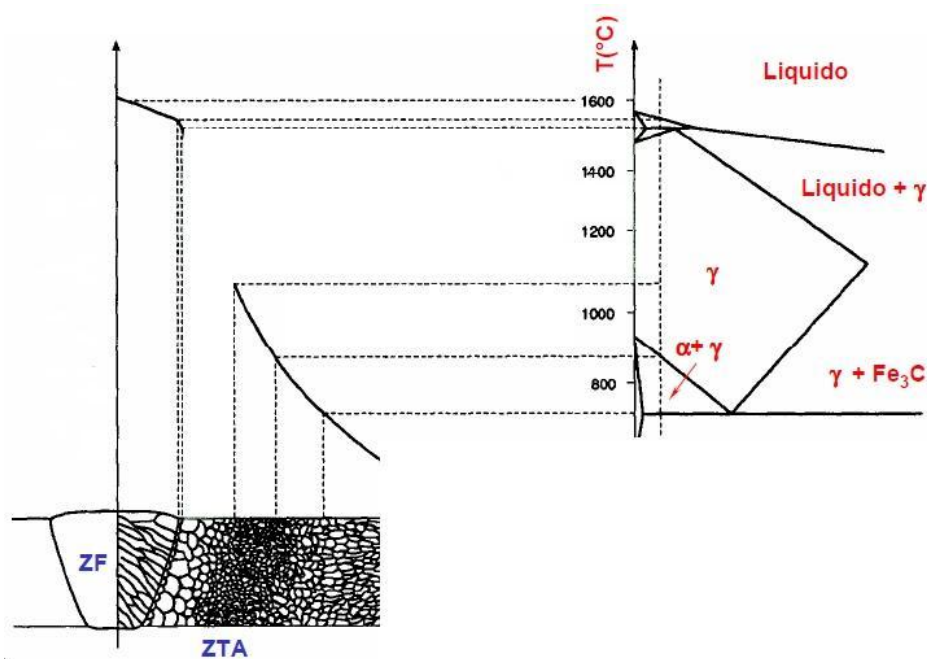


Immagine 2.3 Struttura metallurgica di un cordone di saldatura rapportata al diagramma Fe₃C

- Acciai inossidabili: Nella porzione di ZTA che raggiunge temperature comprese tra i 450 e gli 850°C (per gli inossidabili al cromo-nichel) o tra i 950°C e i 1150°C (per gli inossidabili al solo cromo) si verifica il fenomeno della sensibilizzazione, ovvero la precipitazione a bordo grano di carburi di cromo: di conseguenza il tenore di cromo si abbassa notevolmente e non è più sufficiente a garantire una protezione efficace dalla corrosione.

2.3 Difettologia del giunto saldato

La norma UNI EN ISO 6520-1:2008 definisce imperfezione una qualsiasi modificazione rispetto ad una saldatura ideale e difetto un'imperfezione non accettabile. La stessa norma divide le imperfezioni nei 6 gruppi elencati qui di seguito:

2.3.1 Cricche

Le cricche sono dei distaccamenti tra due lembi di materiale che possiamo trovare sia in zona fusa che in ZTA. Sono difetti sostanzialmente bidimensionali (i lembi sono infatti piuttosto ravvicinati) e risultano essere piuttosto pericolose in quanto possibili zone di concentrazione delle tensioni; possono aver origine sia mentre il giunto è ad elevate temperature (cricche a caldo) sia una volta che questo si è raffreddato (cricche a freddo):

- Cricche a caldo: L'origine di tali difetti è riconducibile a due cause, la prima delle quali è la presenza nel materiale base di elementi come il carbonio, lo zolfo o il fosforo che ritardano la fusione delle zone intergranulari e compromettono quindi l'uniformità del processo di raffreddamento. La seconda causa di comparsa delle cricche a caldo è invece la presenza di legami che impediscono la contrazione del giunto saldato durante il raffreddamento.
- Cricche a freddo: Si tratta principalmente di fenomeni dovuti alla presenza di idrogeno nel bagno di saldatura, che porta ad un notevole calo della duttilità del materiale; questo fatto, unitamente alla formazione di strutture fragili nella zona saldata, porta alla creazione di cricche in zona fusa se il materiale d'apporto è più temprante del materiale base o in ZTA nel caso contrario.

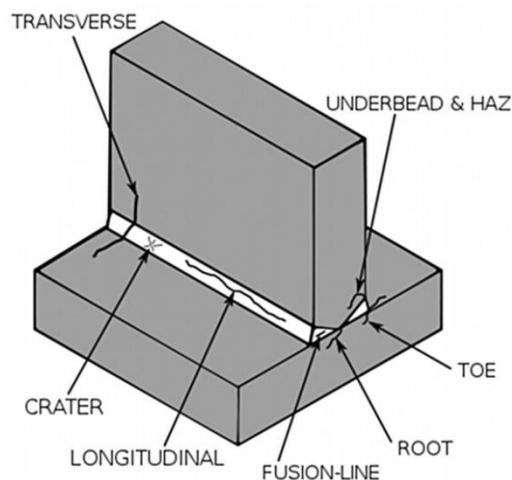


Immagine 2.4 Diversi tipi di cricche

Per prevenire la formazione di cricche è necessario adottare i seguenti accorgimenti: progettare il giunto in modo da minimizzare le tensioni durante il ritiro, preriscaldare i componenti da saldare, evitare raffreddamenti troppo veloci e nel caso di saldatura ad elettrodo prevenire la formazione di umidità in quest'ultimi conservandoli in maniera opportuna.

2.3.2 Porosità

La presenza di porosità nella zona saldata è riconducibile alla presenza di gas intrappolati e rilasciati durante la fusione, a reazioni chimiche che avvengono durante la saldatura o alla presenza nel bagno di fusione di elementi contaminanti. In particolare la presenza di idrogeno, dovuto a residui di umidità nel flusso, nell'atmosfera o nel materiale base, può risultare determinante nella formazione di cavità.

È quindi necessario scegliere con accuratezza i materiali d'apporto, pulire adeguatamente i lembi da saldare e diminuire la velocità di saldatura per lasciare ai gas il tempo di uscire dal bagno.

2.3.3 Inclusioni solide di scoria

I tipi di scoria che possiamo trovare nel giunto saldato sono essenzialmente di due tipi: quelle prodotte durante la solidificazione del bagno di saldatura che non sono state rimosse (o sono state rimosse in malo modo) attraverso un accurato procedimento di pulizia e quelle costituite dai rivestimenti in tungsteno degli elettrodi, dovute principalmente ad una scarsa attenzione dell'operatore nel maneggiare la torcia.

2.3.4 Mancanza di fusione e mancanza di penetrazione

La mancata fusione e la mancata penetrazione in una saldatura hanno come risultato la realizzazione di cordoni di scarsa qualità e sono quasi sempre considerate dei difetti inaccettabili. Spesso si verificano quando si saldano giunti dalle geometrie piuttosto complesse (ad esempio giunti ad angolo o giunti di testa con cianfrino a V), quando si utilizzano correnti di saldatura troppo basse o quando la passata viene effettuata a velocità troppo alte: un opportuno controllo di questi aspetti abbinato ad un pre-riscaldamento dei giunti da collegare è quindi auspicabile. Nel caso di mancata penetrazione in giunti a V inoltre il problema può essere risolto con una passata di ripresa preceduta da un'operazione di solcatura.

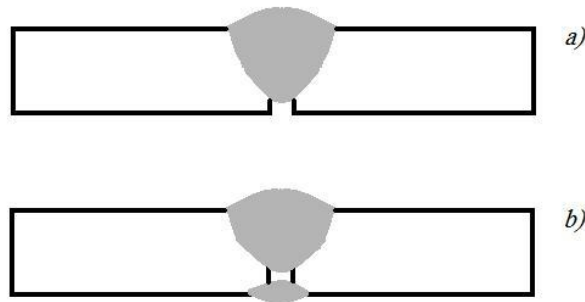


Immagine 2.5 Esempi di mancata penetrazione

2.3.5 Difetti di forma e dimensionali

L'aspetto esteriore di una saldatura risulta essere importante non solo per il profilo estetico, ma anche perché una saldatura “brutta” è spesso indice di un processo non eseguito in maniera corretta. Questi i più comuni difetti di forma:

- **Eccesso di sovrametallo:** Un cordone di saldatura molto alto è indice di una corrente troppo elevata; spesso non viene nemmeno considerato un difetto (anzi addirittura si potrebbe credere che la resistenza della saldatura vada pari passo con le dimensioni del cordone) ma poiché profili irregolari danno origine a zone di concentrazione degli sforzi, bisogna assolutamente effettuare un'adeguata regolazione dell'intensità di corrente.
- **Riempimento incompleto:** Difetto speculare all'eccesso di sovrametallo, è indice di penetrazione eccessiva o di un insufficiente apporto di materiale.
- **Incisioni marginali:** Hanno origine quando si ha un'eccessiva fusione del metallo base (quindi corrente eccessiva o errato posizionamento della torcia) e poiché danno origine ad un profilo irregolare possono anch'esse essere zone di concentrazione degli sforzi.

2.3.6 Altre imperfezioni

Fanno parte di quest'ultima categoria i difetti “minori”, quali:

- **Colpi d'arco, di mola o di scalpello** dovuti ad imperizia dell'operatore che sono spesso accompagnati da cricche più o meno grandi.
- **Spruzzi**, ovvero depositi di materiale fuso distaccati dal cordone di saldatura, assolutamente da evitare in quanto possibili sedi di fenomeni corrosivi.
- **Difetti di colorazione**, tipici dei metalli suscettibili all'ossidazione e indici di un'inadeguata purezza del gas.

2.4 Le prove per la qualifica della saldatura in laboratorio

La qualifica di uno specifico procedimento di saldatura è realizzata attraverso l'esecuzione da parte di un ente qualificato di determinate prove su degli appositi saggi di prova rappresentativi del processo, la cui forma e dimensioni devono essere quelle previste dalla relativa norma. Qualora un procedimento di saldatura superi con esito soddisfacente le prove previste dalla norma può considerarsi qualificato per il relativo campo di validità. Per quanto riguarda la saldatura ad arco e quella a fiamma degli acciai si fa riferimento alla normativa europea EN ISO 15614-1:2008 e successive modificazioni.

2.4.1 Prove non distruttive

Preliminarmente al prelievo dei provini dal saggio di prova su quest'ultimo vengono eseguiti dei controlli non distruttivi volti perlopiù ad individuare difetti superficiali come ad esempio le cricche affioranti. Quindi in relazione alla geometria del giunto, ai materiali utilizzati, ai requisiti di produzione ed in conformità alle relative norme, sul saggio possono essere eseguiti i seguenti esami:

- Controllo visivo
- Controllo radiografico
- Controllo ad ultrasuoni
- Controllo con liquidi penetranti
- Controllo con particelle magnetiche

2.4.2 Esame macrografico

L'esame macrografico di una saldatura prevede innanzitutto che il provino sia adeguatamente preparato sul lato che si intende esaminare, in conformità a quanto descritto dalla UNI EN 1321:1997. Il tallone viene quindi lucidato per mezzo di dischi ricoperti da apposite carte a grana crescente fino ad ottenere il desiderato livello di finitura superficiale; nell'eseguire tale procedimento è di fondamentale importanza che prima di passare alla carta successiva il provino sia lavorato in modo uniforme su tutta la sua superficie, altrimenti i solchi più profondi non possono più essere rimossi, compromettendo così il risultato finale.

Per i talloni di piccole dimensioni (indicativamente fino ai 30 mm di lato lungo), data la difficoltà di mantenerli piani durante la lucidatura, possiamo far ricorso all'inglobatura in apposite resine, ottenendo così un manufatto di dimensioni maggiori che risulta facilmente lavorabile sia a mano sia per mezzo di lucidatrici automatiche.

Una volta completata la fase di lucidatura il campione va attaccato chimicamente in modo da mettere chiaramente in evidenza la linea di fusione, la ZTA e eventualmente le varie passate effettuate per realizzare il cordone di saldatura. I tipi di attacco utilizzabili sono diversi e variano in funzione del tipo di metallo che costituisce il tallone, oltre che in base a quanto previsto dai diversi organismi di normalizzazione.

Per gli acciai al carbonio la normativa europea prevede l'uso del Nital 10% (una miscela di alcol e di acido nitrico in rapporto di volume 9:1) che viene versato sul pezzo in modo da bagnarlo uniformemente. In seguito viene lasciato agire il tempo necessario a mettere in evidenza i diversi particolari della faccia, dopodiché viene rimosso attraverso un semplice lavaggio con alcol, seguito da una rapida asciugatura con aria calda.

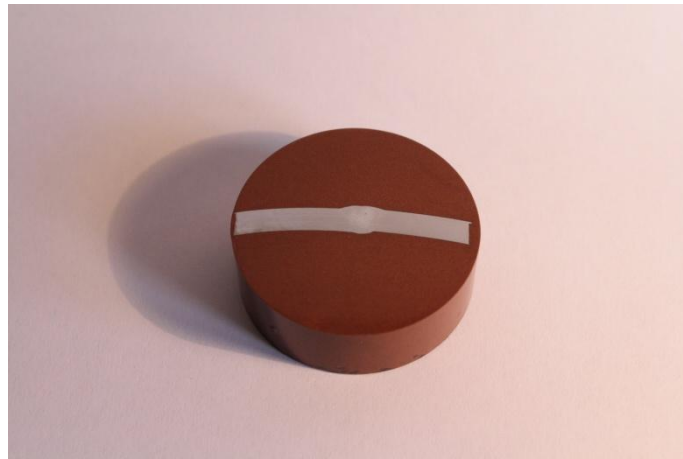


Immagine 2.6 Tallone di saldatura inglobato, lucidato e attaccato chimicamente

Ora il pezzo è pronto per la realizzazione della macrografia: la riproduzione fotografica viene realizzata fotografando il pezzo in condizioni di luce controllate e ottimizzate per avere un'immagine totalmente priva di difetti e in cui siano ben distinte le diverse zone di saldatura. Se eseguita in modo accurato una macrografia si rivela essere una preziosissima fonte di informazioni sul giunto saldato: essa permette infatti di rilevare la presenza di una grande quantità di difetti quali cricche, porosità, mancate fusioni, mancate penetrazioni e difetti di forma.

2.4.3 Esame micrografico

L'esame micrografico consiste nella realizzazione di immagini a elevati ingrandimenti (l'originale risulta ingrandito di alcune centinaia di volte) del provino saldato; può essere visto

come un “approfondimento” dell'esame macrografico, con il quale condivide anche le tecniche di preparazione del campione, alle quali però si deve prestare una ancor maggiore attenzione in quanto a tali livelli d'ingrandimento una non perfetta pulizia della superficie può compromettere anche totalmente l'osservazione. A questo scopo alla lucidatura del campione per mezzo di carte abrasive si fanno seguire dei passaggi su appositi panni sui quali viene spruzzata una sospensione diamantata che garantisce ottimi risultati in termini di finitura superficiale. La preparazione si conclude poi con un attacco chimico eseguito secondo le usuali modalità.

A questo punto si procede all'osservazione del campione e all' acquisizione dell'immagine micrografica: per arrivare agli elevati livelli d'ingrandimento richiesti ci si avvale di microscopi ottici ai quali viene collegata una fotocamera. L'immagine ottenuta in tal modo permette accurate osservazioni del pezzo, fornendo di conseguenza informazioni importanti soprattutto per quanto riguarda l'aspetto metallurgico: attraverso le micrografie è possibile infatti effettuare una precisa analisi delle fasi metalliche presenti nel giunto.



Immagine 2.7 Micrografie di un giunto saldato, in ordine: materiale base, ZTA e zona fusa

2.4.4 Prova di durezza

La prova di durezza valuta la resistenza alla deformazione permanente del campione e consiste nella misurazione dimensionale dell'impronta lasciata da un penetratore di forma nota sulla superficie (opportunamente preparata) del pezzo. Il carico che deve essere applicato al penetratore è stabilito dalle relative normative, mentre lo strumento utilizzato per tale prova è il durometro.



Immagine 2.8 Un moderno durometro

Per quanto riguarda i talloni di saldatura la prova di durezza prevista dalla UNI EN 1043-1:1997 è del tipo HV10, ovvero viene effettuata misurando l'area dell'impronta realizzata usando un penetratore di tipo Vickers (dalla forma piramidale a base quadrata ed un angolo al vertice di 136°) con 10 kg di carico applicato. Le misurazioni devono essere effettuate su tutta la superficie del provino, prendendo quindi in considerazione materiale base, zona termicamente alterata e zona fusa; per ognuna di queste zone inoltre devono essere effettuate almeno tre misurazioni. Dato l'alto numero di misurazioni che si vanno ad effettuare (nell'ordine di qualche decina) per evitare incomprensioni e altri problemi di lettura le diverse norme di qualifica prevedono l'uso di schemi di prelievo dei punti di durezza, nei quale dovranno essere riportati in ordine preciso i punti dove sono state prese le misurazioni.

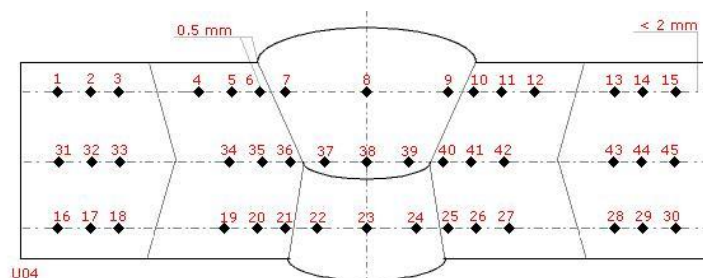


Immagine 2.9 Esempio di schema di raccolta punti durezza

Lo scopo fondamentale della prova di durezza è quello di verificare nel pezzo l'assenza di fenomeni di tempra, in particolare per quanto riguarda la ZTA: i processi di saldatura infatti prevedono l'apporto sul pezzo di altissime quantità di calore che abbinate ad alte velocità di raffreddamento possono da origine a fase martensitica nella zona subito adiacente al bagno di saldatura. La martensite è caratterizzata da un'elevatissima durezza ma anche fortemente tensionata: una tale struttura non è assolutamente auspicabile (a meno di applicazioni specifiche) in quanto favorirebbe fenomeni di rottura fragile del metallo.

2.4.5 Prova di trazione

La prova di trazione sul giunto saldato ci permette di tracciare il grafico sforzo-deformazione del pezzo: se opportunamente analizzato tale grafico si rivela essere una preziosa fonte di informazioni.

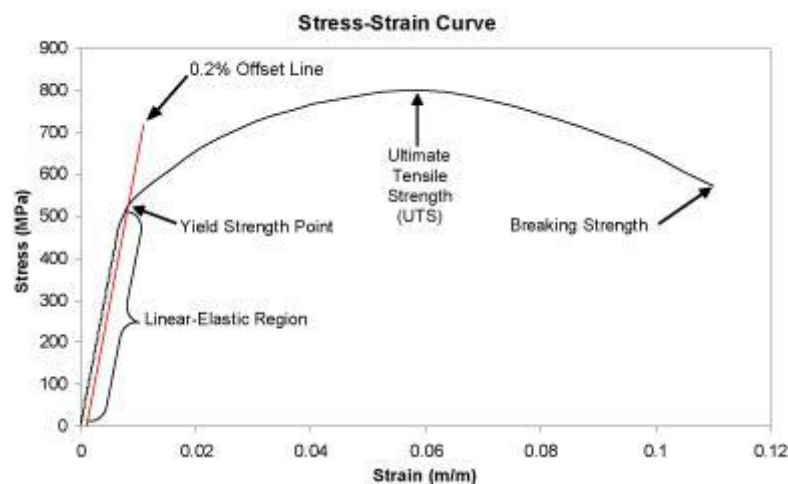


Immagine 2.10 Grafico sforzo-deformazione

Per quanto riguarda la caratterizzazione del giunto saldato le informazioni che devono secondo la UNI EN 895:1997 devono essere riportate sono:

- Il carico di rottura: carichi troppo bassi sono indice di probabili difetti di saldatura nel materiale, ad esempio cricche.
- Posizione di rottura: forse questa è l'informazione più importante in quanto alle diverse posizioni di rottura è possibile correlare dei difetti specifici. Ad esempio una rottura lungo la linea di fusione è indice di una mancata adesione o della presenza di incisioni marginali, mentre una rottura in zona fusa sta ad indicare la presenza di

cricche o inclusioni. Una rottura in materiale base invece è indice di una saldatura ben eseguita.

- Eventuali osservazioni, come ad esempio l'aspetto della frattura.

2.4.6 Prova di piegamento

Utilizzata per valutare la duttilità del materiale, la prova di piegamento sui giunti saldati prevede l'applicazione del carico nella mezzeria del provino semplicemente appoggiato; in alcuni casi possono essere previste modalità differenti, come l'esecuzione di prove guidate o il piegamento su rulli. Le prove possono essere eseguite, in base a quanto prevedono le relative norme, al dritto, al rovescio o laterali; nel rapporto di prova inoltre devono essere riportate, tra le varie cose, anche le caratteristiche geometriche del meccanismo utilizzato per la piegatura (diametro e distanza tra i rulli, distanza del mandrino, angolo di piega).

Di fondamentale importanza affinché la prova sia ritenuta valida è che il provino non riveli difetti di dimensioni rilevanti (maggiori di 3 mm) sulla sua superficie durante l'esecuzione della piega.

2.4.7 Prova di resilienza

A dispetto del nome la prova di resilienza, nota anche come “Prova di Charpy”, fornisce indicazioni sulla tenacità del giunto saldato, ovvero la capacità di resistere alle propagazioni di un intaglio. L'indicazione sulla tenacità è data dal valore di energia impattante necessaria a rompere un provino intagliato utilizzando una mazza inserita in una struttura a pendolo: calcolando la differenza tra l'energia potenziale del pendolo prima e dopo l'impatto è infatti possibile arrivare a conoscere il valore cercato.

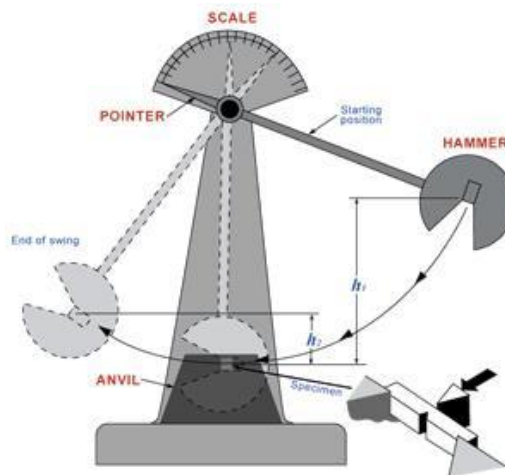


Immagine 2.11 Pendolo di Charpy

Per assicurare risultati comparabili e prove ripetibili sia la mazza sia il provino hanno precise caratteristiche riportate nelle relative norme. Per quanto riguarda la mazza:

- La massa deve essere di 30 Kg
- La forma deve essere quella prevista dalle relative norme.

Mentre per quanto riguarda il provino:

- Le dimensioni devono essere 55x10x10 mm
- L'intaglio è di tipo a V profondo 2 mm e deve essere effettuato nelle varie posizioni e direzioni previste dalla norma, nel nostro caso la UNI EN 875:1997.

Attraverso tale prova è anche possibile valutare le variazioni del comportamento del metallo a varie temperature: l'interpolazione dei dati raccolti permette poi di tracciare le curve di transizione della tenacità per i diversi materiali, rendendo così possibile la valutazione del comportamento in condizioni particolari. Ad esempio raffreddando i provini per immersione in azoto liquido subito prima del test sarà possibile valutare il comportamento del giunto saldato a temperature inferiori a quella di transizione duttile-fragile.

Capitolo 3: Esempio di un report di laboratorio

3.1 Introduzione

Tutto il lavoro di qualifica di un processo di saldatura che si svolge in laboratorio è sintetizzato nel report di laboratorio, un documento in cui sono riportati i risultati delle diverse prove, i criteri di accettabilità e tutto ciò che è necessario a completare l'analisi del processo analizzato. Di seguito è presentato e commentato un esempio di report realizzato durante il mio periodo di collaborazione con il CTR srl.

3.2 Esempio di un report di laboratorio

La prima pagina di un report contiene quasi esclusivamente informazioni di carattere amministrativo-commerciale, che quindi non risultano essere di nostro interesse. Le uniche cose a cui val la pena prestare attenzione sono i riferimenti normativi e il materiale in cui è composto il provino: nel caso riportato la parte normativa fa riferimento alla già citata UNI EN ISO 15614-1:2008 mentre il materiale in cui è costituito il provino è identificato, secondo la codifica ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), dalla sigla SA516 grade 60, ovvero un acciaio largamente usato nel campo dell'industria petrolchimica per la realizzazione di recipienti e tubazioni, caratterizzato da un'eccellente saldabilità.

La seconda pagina del report riguarda la prova di trazione, procedura descritta al paragrafo 2.4.5: nella parte evidenziata della tabella possiamo vedere tutti i parametri di esecuzione della prova (temperatura alla quale è stata eseguita, tipo di provino e sue dimensioni) e i risultati della stessa (carico e posizione della rottura), mentre la parte inferiore contiene una legenda che consente un'adeguata comprensione di tutte le sigle utilizzate.



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 610 400
F: +39 049 610 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com



Pag 1 di 6

Cliente
Customer

Vs. Rif. Your Ref.	Ordine n. Order n.	Data:	11/07/2011
Ns. Rif. Our Ref.	Report n. Test Report n.	Data:	25/08/2011
	Commissa Work	Data:	21/07/2011
	42744		
	42744		

Note Remarks	-
Progetto: Project:	-

Norme di collaudo Standard reference	UNI EN ISO 15614-1:2008
--	-------------------------

Il presente report comprende n°6 pagine compresa questa cover e quelle di seguito descritte

This Report is made of n° 6 pages including this cover plus the following pages

Prova Test	Pag. Pag.
Prova di trazione	2
Prove di resilienza	3
Prove di piegamento	4
Esame macrografico	5
Prove di durezza	6
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

Il presente Rapporto di Prova (RPR) comprende i risultati dei test eseguiti sui seguenti materiali

This Report (RPR) contains tests results for the following materials

Rif. Ref.	Identificazione Identification	Materiale dichiarato dal cliente Material declared by client	Colata [heat]	Thk [mm]	Note Remarks
MIF 44902 ###	NF 7666-7667	Tallone da lamiera SA516 Gr. 60	2815F801 S7/3527	20,0	-

Firmato per conto di	Cliente	Ispettore	Ispettore

Condizioni generali:

1. Il committente si impegna a sottostare alle condizioni generali e tariffe stabilite dal Laboratorio per l'esecuzione delle prove.
2. I risultati delle prove verranno comunicati solo per mezzo di rapporto di prova, salvo diversi accordi contrattuali.
3. Il materiale residuo di prova verrà inviato a smaltire dopo 3 mesi dalla prova stessa, salvo diversa richiesta scritta del Committente.
4. Il materiale giacente verrà inviato a smaltire dopo 3 mesi dal ricevimento, salvo diversa richiesta scritta dal Committente.
5. I risultati riportati nel seguente rapporto di prova si riferiscono ai soli oggetti provati citati nel presente.
6. La data ricevimento materiale corrisponde alla data di apertura commessa, salvo diversa informazione.
7. Il laboratorio ha esaminato i materiali forniti dal cliente come campionati dal medesimo in accordo agli standard richiesti.

Questo rapporto di prova non può essere riprodotto se non integralmente, senza previa autorizzazione scritta del Laboratorio emittente

M4.05-PIR2 E2 del 29/04/11

Immagine 3.1 – Report di saldatura, pagina 1



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 810 400
F: +39 049 810 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com



Pag 2 di 6

Prove eseguite in accordo :	UNI EN ISO 6892-1:2009 B15, UNI EN 895:1997.		
Strumentazione usata: 963	PROVA DI TRAZIONE Tensile Test		
Inizio prove il:	25/08/11	Fine prove il:	25/08/11

TEST RESULTS

Requisiti Required	Min.	-	-	-	-	-	415	-	-	-
	Max.	-	-	-	-	-	550	-	-	-

Riferimenti Ref.		T Temperatura	Posizione Position	Tipo di provino Type of specimen	Dimensioni Dimensions	Sezione Section	Lc	Lo	Le	ReH	ReL	Rp0.2%	Rp1%	Rt0.5%	Rm	A	Z	Note	
Lab.	Client	°C		piece	mm	mm ²	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%		
MIF 44902	NF 7666-7667	RT	TW	F	20,30x25,00	507,5	95	-	-	-	-	-	-	-	459	-	-	(*)	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Norma di riferimento: Standard ref.	SA516
--	-------

<p>Note Remarks</p>	<p>RT: Temperatura ambiente/ Room Temperature F: Provino piatto / Flat test piece C: Provino cilindrico / Cylindrical test piece T: Trasversale in Materiale Base / Transversal on Base Metal L: Longitudinale in Materiale Base / Longitudinal on Base Metal TS: Trasversale lungo lo Spessore / Transversal along thickness base metal TW: Trasversale attraverso saldatura / Transversal across weld metal LW: Longitudinale in saldatura / Longitudinal in weld metal</p> <p>(*): Rottura fuori saldatura / Rupture out of weld metal</p> <p>- Velocità di prova in campo elastico basata sul gradiente di carico specifico (Metodo B: $\dot{R}=15MPa s^{-1}$) Speed of test in elastic field based on the gradient of specific load (Method B: $\dot{R}=15MPa s^{-1}$)</p> <p>- Velocità di prova dopo la fase elastica basata su una velocità di separazione degli afferraggi ($v=20 mm/min.$) Speed of test after the based elastic phase (plastic field) on a speed of separation of the grips ($v=20 mm/min.$)</p>
--------------------------------	---

Operator	Client	Inspector	Inspector
Dott. Ing. Mauro ISCARO			

Mod.05-PIR2E2 del 29/04/11

Anche per quanto riguarda la prova di resilienza, alla pagina 3 del report, si possono trovare in tabella sia i dati di esecuzione della prova che i risultati. È particolarmente interessante notare che (su richiesta del cliente) per l'esecuzione di questo procedimento di qualifica i provini di acciaio sono stati portati, mediante raffreddamento con ghiaccio secco, alla temperatura di -5°C , ovvero al di sotto degli 0°C ai quali i metalli di questo tipo effettuano la transizione duttile-fragile, rendendo particolarmente critiche le condizioni di prova.

A seguire è presentata la quarta pagina del report, quella riguardante la prova di piegamento, la cui struttura ricalca i due casi precedenti: nella parte evidenziata troveremo quindi ancora una volta i parametri di esecuzione e i risultati delle prove eseguite.



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 610 400
F: +39 049 610 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com



Pag 3 di 6

Prove eseguite in accordo :	UNI EN ISO 148-1:2011, UNI EN 875:1997		
Strumentazione usata: 1151-602	PROVA DI RESILIENZA Charpy Impact Test		
Inizio prove il:	25/08/11	Fine prove il:	25/08/11

TEST RESULTS

Energia nominale macchina : 450 J Nominal energy machine : 450 J	Requisiti Required	valore -	A -	valore -	B -	valore -	C -	Media Average	27
---	-----------------------	-------------	--------	-------------	--------	-------------	--------	------------------	----

Test Ref.	T Temperature	Posizione Position	Dimensione Dimension	Intaglio Notch	Valore Value		Shear		Lateral Exp.		Valore Value		Shear		Lateral Exp.		Media Average
					J	%	mm	J	%	mm	J	%	mm	J			
MIF 44902-1	NF 7666-7667	-5	VWT	10x10	KV ₂	264	-	-	292	-	-	310	-	-	-	-	289
MIF 44902-2	NF 7666-7667	-5	VHT	10x10	KV ₂	126	-	-	124	-	-	117	-	-	-	-	122
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Norme di riferimento: Standard ref.	-
---	---

Note Remarks	RT: Temperatura ambiente/ Room Temperature VWT: Trasversale in Zona Fusa / Transversal on Weld Metal center line VHT: Trasversale in Zona Termicamente Alterata / Transversal Heat Affected Zone FLT: Trasversale in Linea di fusione / Transversal on Fusion Line T: Trasversale in Materiale Base / Transversal on Base Metal L: Longitudinale in Materiale Base / Longitudinal on Base Metal
------------------------	--

Operator	Client	Inspector	Inspector
Dott. Ing. Mauro ISCARO			

Mod.05-P1R2E2 del 29/04/11

Immagine 3.3 Report di saldatura, pagina 3



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 610 400
F: +39 049 610 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com



Pag 4 di 6

Prove eseguite in accordo:	UNI EN ISO 5173:2010		
Strumentazione usata: 78	PROVA PIEGAMENTO Bend test		
Inizio prove il:	04/08/11	Fine prove il:	04/08/11

TEST RESULTS

Riferimenti Ref.		T Temperature	Posizione Position	Dimensioni Dimensions	Mandrino Jig	Distanza rulli Distance rollers	Angolo angle	Esito Results	Note Remarks
Lab.	Client.	°C		mm	mm	mm	°		
MIF 44902-1	NF 7666-7667	RT	SBB	10,2x20,3	40	70	180	Non presenta alcun difetto	(*)
MIF 44902-2	NF 7666-7667	RT	SBB	10,2x20,3	40	70	180	Non presenta alcun difetto	(*)
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Norme di riferimento: Standard ref.	UNI EN ISO 5173:2010
--	----------------------

Note Remarks	RT: Temperatura ambiente / Room Temperature SBB: Pieghie Trasversali Lateral / Transversal Side bend test TFBB: Pieghie Trasversali al Dritto / Transversal Face bend test TRBB: Pieghie Trasversali al Rovescio / Transversal Root bend test (*) Metodo prova di piegamento utilizzato: FORMER / Method of bend testing using a FORMER
-----------------	--

Operator	Client	Inspector	Inspector
Dott. Ing. Mauro ISCARO			

Mod.05-P1R2E2 del 29/04/11

La quinta pagina del report presenta invece una macrografia della zona saldata, la quale mette in luce la struttura della zona fusa: in questo caso è ben visibile come sia stata utilizzata la tecnica della ripresa al rovescio, la quale prevede che per la realizzazione del cordone i lembi vengano saldati da entrambi i lati per garantire una maggiore tenacità del giunto; sono visibili inoltre le diverse passate che vanno a comporre il cordone, mentre non si rilevano difetti di alcun tipo.

Il report si conclude con la sesta pagina dove sono riportati i risultati delle misurazioni di durezza: in questo caso è stato utilizzato un classico schema a 45 punti, lo stesso visibile nell'immagine 2.9. I risultati mostrano un comportamento standard del materiale: i massimi valori di durezza sono rilevati in zona fusa e nei punti della ZTA più vicini al cordone, ovvero in quelle zone che hanno subito il ciclo termico più severo.

Tutte le prove effettuate hanno dato esito positivo.



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 810 400
F: +39 049 810 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com



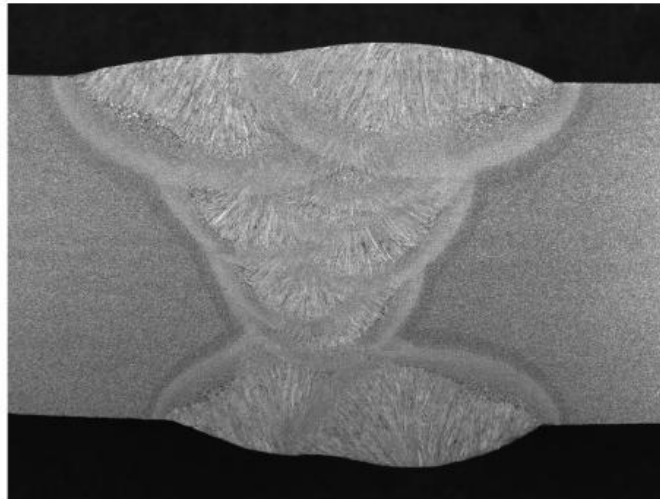
Pag 5 di 6

Prove eseguite in accordo :	UNI 3138 :1984, UNI EN 1321:1997		
Strumentazione usata: 17;1164.	MACROGRAFIA Macrography		
Inizio prove il:	29/07/11	Fine prove il:	29/07/11

TEST RESULTS

Test / Ref.		Macrografia nr. 1
Lab.	Client	
MIF 44902	NF 7666-7667	

Ingrandimento 2,8x
Magnification



Attacco Nital 10%
Etching

Norme di riferimento: Standard ref.	-
--	---

Note Remarks	-
-----------------	---

Operator Per. Ind. Michele BALDAN	Client	Inspector	Inspector
---	---------------	------------------	------------------

Mod.05-P1R2E2 del 29/04/11

Immagine 3.5 Report di saldatura, pagina 5



CTR Srl
Unipersonale
Via del Santo 211
35010 Limena (PD)
Italy

RPR N°

Rev.0 Data 25/08/2011

T: +39 049 810 400
F: +39 049 810 539
E: padova@exova.com
W: www.exova.com

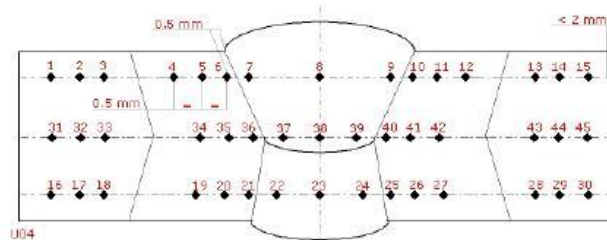


Pag 6 di 6

Prove eseguite in accordo :	UNI EN ISO 6507-1:2006, UNI EN 1043-1:1997		
Strumentazione usata: 17,111;	PROVA DI DUREZZA <i>Hardness Test</i>		
Inizio prove il:	29/07/11	Fine prove il:	29/07/11

TEST RESULTS

Test / Ref		Schema posizioni / Position :
Lab.	Client	
MIF 44902	NF 7666-7667	



HV10		HV10		HV10		HV10		HV10	
Punto #	Valore	Punto #	Valore	Punto #	Valore	Punto #	Valore	Punto #	Valore
# 1	144	# 21	167	# 41	151	# 61	-	# 81	-
# 2	143	# 22	189	# 42	151	# 62	-	# 82	-
# 3	148	# 23	189	# 43	145	# 63	-	# 83	-
# 4	145	# 24	178	# 44	143	# 64	-	# 84	-
# 5	153	# 25	161	# 45	141	# 65	-	# 85	-
# 6	180	# 26	154	# 46	-	# 66	-	# 86	-
# 7	176	# 27	149	# 47	-	# 67	-	# 87	-
# 8	192	# 28	130	# 48	-	# 68	-	# 88	-
# 9	184	# 29	133	# 49	-	# 69	-	# 89	-
# 10	168	# 30	129	# 50	-	# 70	-	# 90	-
# 11	152	# 31	146	# 51	-	# 71	-	# 91	-
# 12	141	# 32	143	# 52	-	# 72	-	# 92	-
# 13	135	# 33	145	# 53	-	# 73	-	# 93	-
# 14	135	# 34	150	# 54	-	# 74	-	# 94	-
# 15	138	# 35	156	# 55	-	# 75	-	# 95	-
# 16	130	# 36	174	# 56	-	# 76	-	# 96	-
# 17	134	# 37	195	# 57	-	# 77	-	# 97	-
# 18	129	# 38	178	# 58	-	# 78	-	# 98	-
# 19	145	# 39	188	# 59	-	# 79	-	# 99	-
# 20	154	# 40	159	# 60	-	# 80	-	# 100	-

Norme di riferimento: Standard ref.	-
--	---

Note Remarks	Criterio di accettabilità: 221 HV max.
-----------------	--

Operator	Client	Inspector	Inspector
Per. Ind. Michele BALDAN			

Mod.05-PIR2E2 del 29/04/11

Immagine 3.6 Report di saldatura, pagina 6

Conclusioni

Scopo di questo lavoro è descrivere lo stato attuale di conoscenze sia per quanto riguarda le tecniche di saldatura, sia per i procedimenti di qualifica; la trattazione di questo secondo aspetto in particolare ha risentito in maniera largamente positiva della mia esperienza di collaborazione con l'azienda CTR srl di Limena PD, dove ho potuto partecipare in prima persona alle operazioni di qualifica dei procedimenti di saldatura in laboratorio e di conseguenza capire la loro fondamentale importanza nell'ambito industriale odierno.

Il continuo sviluppo delle tecnologie di saldatura infatti è strettamente collegato ai progressi effettuati nel campo dei procedimenti di qualifica, che attualmente permettono di indagare in maniera estremamente precisa molti aspetti della struttura del giunto saldato; conseguenza di questo fatto è la possibilità di acquisire una gran quantità di informazioni relative ai diversi processi di saldatura, il che permette di capire sia quali aspetti possono essere migliorati sia quale può essere la tecnica più adatta per una specifica applicazione.

Riferimenti bibliografici

1. Bramfitt B.L., Lawrence S.J., *Metallography and Microstructures, ASM Handbook*, ASM International, 2004.
2. *Corso per saldatori e operatori International Welder*, Istituto Italiano Saldatura, 2005.
3. Jensen J.S., *Maritime Welding Handbook, 10th edition*, Wilhelmsen Ships Service, 2009.
4. Kalpakjian Serope, Schmid Steven R. (2008) *Tecnologia Meccanica, 5^a ed.*, Pearson, 2008.
5. Ortolani A., *La saldatura per resistenza a punti, a rilievi, a rulli. Criteri di scelta, applicabilità, confronti*, Rivista La Meccanica Italiana n. 167, Novembre 1982.
6. Paolucci G.M., *Lezioni di Metallurgia vol. 2*, Edizioni Libreria Progetto Padova, 2002.

Siti Web

<http://www.esab.it>

<http://www.kjellberg.de>

<http://www.lincolnelectric.com>

<http://www.wilson-hardness.com>

<http://www.ndt-ed.org>

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo lavoro desidero esprimere la mia gratitudine nei confronti delle persone che mi hanno aiutato nella scrittura di questa tesi.

Vorrei quindi ringraziare:

La Prof.ssa Irene Calliari, per la grande disponibilità nei miei confronti, i preziosi consigli e tutto il tempo dedicatomi.

Il Sig. Alessandro Schivalocchi, per tutto il materiale fornitomi, senza il quale non avrei mai potuto scrivere questa tesi.

Il Dott. Ing. Marco Pizzo, per avermi seguito e istruito durante tutto il mio periodo di tirocinio, per tutte le conoscenze trasmesse ma soprattutto per avermi insegnato che prima di tutto il lavoro deve anche divertire. Ovviamente i miei ringraziamenti vanno anche a *Michele Baldan* e a tutto il *Laboratorio CTR srl*.

Oltre a loro mi sento in dovere di ringraziare anche tutte le persone che mi sono state vicine in tutti questi anni di studi universitari:

I miei genitori per avermi sostenuto durante tutti questi anni e aver sempre dimostrato una grande fiducia nelle mie capacità.

I miei compagni di università Matteo, Marco (X2), Riccardo, Silvia per tutto l'aiuto che mi hanno dato in questi anni ma soprattutto per esser prima di tutto dei veri amici. Stanco se ti aspettavi che ricambiassi i ringraziamenti "dedicati" ti sbagliavi di grosso.

Il Bar Paradise (quello vero) per esser stato qualcosa di più di una seconda casa.