

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9 – INGEGNERIA INDUSTRIALE
Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In Tecnica delle Costruzioni Meccaniche

SALDATURA SU ACCIAIO SUPERDUPLEX AD ELEVATO SPESSORE

CANDIDATO
Federico Rosetti

RELATORE
Giorgio Olmi

Anno Accademico 2011 - 2012
Sessione III

INDICE

CAPITOLO 1 - Introduzione	7
1.1 Premessa	8
1.2 Rosetti Marino s.p.a.....	8
1.3 Piattaforme offshore	9
1.4 Progetto West Franklin	10
CAPITOLO 2 - Acciaio superduplex	15
2.1 Gli acciai inossidabili.....	16
2.1.1 Acciai martensitici	16
2.1.2 Acciai ferritici	16
2.1.3 Acciai austenitici.....	17
2.1.4 Acciai duplex	17
2.2 Composizione chimica.....	18
2.2.1 Cromo (Cr).....	19
2.2.2 Nichel (Ni)	20
2.2.3 Molibdeno (Mo)	20
2.2.4 Azoto (N)	21
2.3 Metallurgia.....	21
2.4 Proprietà meccaniche e fisiche.....	24
2.5 Resistenza a corrosione.....	26
2.6 Generalità processo produttivo.....	26
2.6.1 Il metodo HIP	27
2.6.2 Sintesi del processo produttivo	27
2.6.3 Produzione della polvere metallica	31
CAPITOLO 3 - Saldatura tubazioni in acciaio superduplex	33
3.1 Impiego superduplex su piattaforma West Franklin.....	34
3.2 Cenni preliminari sul processo di saldatura	36

3.2.1 La saldatura.....	36
3.2.2 Progettazione del giunto saldato.....	36
3.2.3 Fasi preliminari.....	37
3.3 Criteri generali per la saldatura.....	38
3.3.1 Preparazione dei giunti.....	38
3.3.2 Pulizia prima della saldatura.....	39
3.3.3 Accoppiamento del giunto.....	40
3.3.4 Preriscaldamento.....	40
3.3.5 Temperatura di interpass.....	40
3.3.6 Gas protettivo.....	41
3.3.6 Apporto termico.....	42
3.3.7 Innesco ed estinzione dell'arco elettrico.....	42
3.3.8 ZTA – Zona Termicamente Alterata.....	43
3.3.9 Penetrazione e diluizione.....	43
3.3.10 Quantità di metallo depositato.....	44
3.3.11 Bilanciamento ottimale delle fasi.....	44
3.3.12 Difetti saldatura.....	44
3.3.13 saldatura di riparazione.....	45
3.3.14 Gestione materiale d'apporto.....	45
3.3.15 Sicurezza degli operatori.....	45
3.4 Procedimento di saldatura TIG.....	46
3.4.1 Apparecchiatura.....	47
3.4.2 Materiale d'apporto.....	47
3.4.3 Gas protettivo.....	47
3.4.4 Apporto termico.....	48
3.5 Metodi di controllo non distruttivi.....	48
3.5.1 Controllo visivo (VT – Visual Test).....	49
3.5.2 Ispezione con liquidi penetranti (PT – Penetrant Test).....	49

3.5.3 Ispezione radiografica (RT – Radiographic Test)	50
3.5.4 Ultrasuoni (UT – Ultrasonic Test).....	53
3.5.6 Contenuto di ferrite	55
3.6 Metodi di controllo distruttivi	55
3.6.1 Prova di piegatura	55
3.6.2 Prova di trazione	56
3.6.3 Prova di resilienza (Charpy)	57
3.6.4 Prova di durezza Vickers.....	58
3.6.5 Contenuto di ferrite	58
3.6.6 Controllo metallografico.....	59
3.6.7 Resistenza a corrosione da crepe e pitting	59
3.7 Difetti saldatura	59
3.7.1 Mancata penetrazione	59
3.7.2 Incompleta penetrazione	60
3.7.3 Eccessiva penetrazione	60
3.7.4 Rottura a caldo.....	60
3.7.5 Rottura a cratere	61
3.7.6 Porosità	61
3.7.7 Inclusione di scorie.....	62
3.7.8 Schizzi.....	62
3.7.9 Erosione	63
3.7.10 Sfondamento.....	63
3.7.11 Inneschi dell’arco elettrico	63
CAPITOLO 4 - Procedimento di qualifica tubazione di diametro 18”	65
4.1 Introduzione.....	66
4.2 Requisiti delle specifiche	66
4.3 Problemi riscontrati in qualifica	68
4.4 Controlli effettuati ed esiti riscontrati	69

4.5 Soluzioni adottate	69
CAPITOLO 5 - Applicazione in fase costruttiva.....	71
5.1 Organizzazione operazioni in cantiere.....	72
5.2 Prefabbricazione in aree bianche	73
5.3 Montaggio sulla piattaforma	75
CAPITOLO 6 - Conclusioni e ringraziamenti	77
Conclusioni.....	78
Ringraziamenti	79
Bibliografia.....	80

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Premessa

La redazione di questo trattato di tesi ha lo scopo di illustrare l'innovativo processo di saldatura di tubazioni in acciaio inossidabile di tipo superduplex ad elevato spessore, destinate all'industria petrolifera. Essendo un argomento molto ampio, si è cercato di focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche del materiale, sul processo di saldatura utilizzato, sulle attività di controllo e certificazione del procedimento e sui problemi riscontrati.

1.2 Rosetti Marino s.p.a.



Rosetti Marino è un gruppo di società che fornisce servizi di costruzione ed ingegneria a vari settori industriali quali oil & gas, petrolchimico, chimico, impianti di potenza e costruzione navale.

Grazie alle conoscenze ingegneristiche ed alle capacità di gestione maturate in anni di esperienza sul campo, il gruppo si è affermato a livello internazionale nella produzione e nella progettazione di impianti onshore e offshore.

Al giorno d'oggi per soddisfare le richieste del mercato le operazioni vengono svolte sia all'interno della Rosetti Marino in Italia nei tre cantieri nell'area di Ravenna, sia all'esterno nelle società partner del gruppo situate all'estero ed in Italia.

Rosetti Marino attraverso la sua "Oil & Gas Business Unit" ha costruito un complesso e specializzato bagaglio culturale nella costruzione e nel supporto di strutture offshore, moduli di vario tipo (moduli di processo, moduli abitativi, moduli di supporto) e jacket (basi delle piattaforme). L'azienda è inoltre in grado di provvedere a trasporto, installazione, commissioning, start-up e modifica ad impianti offshore di varie dimensioni e impieghi.

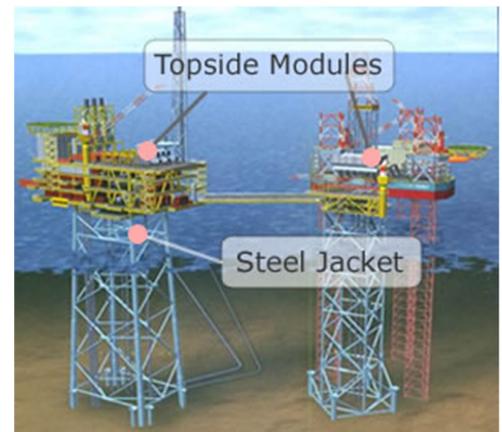
Il gruppo Rosetti dedica le sue risorse tecniche e gestionali al mantenimento e allo sviluppo continuo delle proprie competenze nella gestione di progetti, nell'ingegneria multidisciplinare e nel settore della costruzione.

1.3 Piattaforme offshore

Una piattaforma di estrazione marina, detta offshore, è una struttura che nasce per l'esigenza di estrarre petrolio e gas naturale da sotto il fondale marino. A seconda delle profondità del mare ne esistono di vario tipo e dimensione, Rosetti Marino si occupa in particolare di moduli e strutture relative a piattaforme fisse.

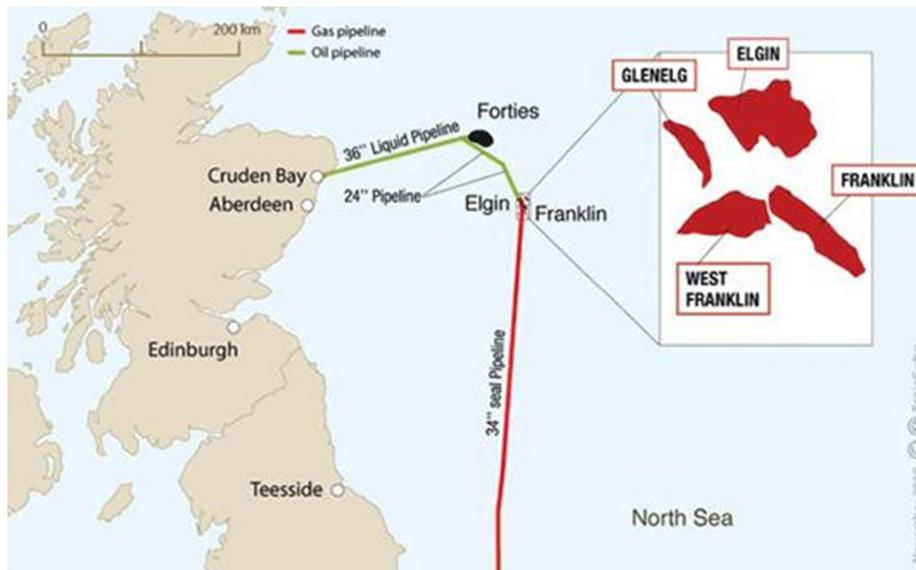


Queste sono composte da una struttura reticolare semi sommersa in acciaio detta jacket, fissata mediante pali al fondo del mare, sopra la quale vengono posizionati strutture con diversi piani di lavoro, detti topside, nei quali vengono collocati i diversi moduli di perforazione, produzione, alloggio, uffici ed un ponte elicotteri. Sopra ai giacimenti solitamente sorgono più piattaforme, ognuna con una specifica funzione (perforazione, abitazione, processo) e collegate tramite ponti sospesi e tubazioni sottomarine.



In seguito verrà trattata in particolare la piattaforma di processo, nella quale vengono svolte le principali operazioni di produzione e le funzioni di supporto come produzione di energia e trattamento del fluido estratto.

1.4 Progetto West Franklin



Nel Mare del Nord a 240km a est di Aberdeen, in una zona detta Garbean Area con un fondale di 93m di profondità, sorgono i due siti Elgin e Franklin. Essi sono ad una distanza di circa 5km l'uno dall'altro e sono entrambi connessi alla piattaforma di processo Elgin nella quale gli idrocarburi vengono separati in gas e liquidi. I gas vengono separati dai condensati (idrocarburi liquidi composti soprattutto da metano, etano, propano butano, e pentano), trattati per ottenere la qualità di mercato e mandati ad un terminal a Bacton attraverso una linea sottomarina. I liquidi vengono invece filtrati e mandati a terra in un terminal vicino ad Aberedeen dove viene trattato e processato per poi essere pronto per l'esportazione e l'utilizzo.

Il complesso Elgin-Franklin comprende attualmente due piattaforme di estrazione Elgin A e Franklin (*WHP Well Head Platform*), situate direttamente sopra al pozzo, collegate alla piattaforma di processo e servizio principale Elgin (*PUQ Process Utility Quarter*) rispettivamente tramite un ponte e tramite tubazioni sottomarine.

- **Elgin**

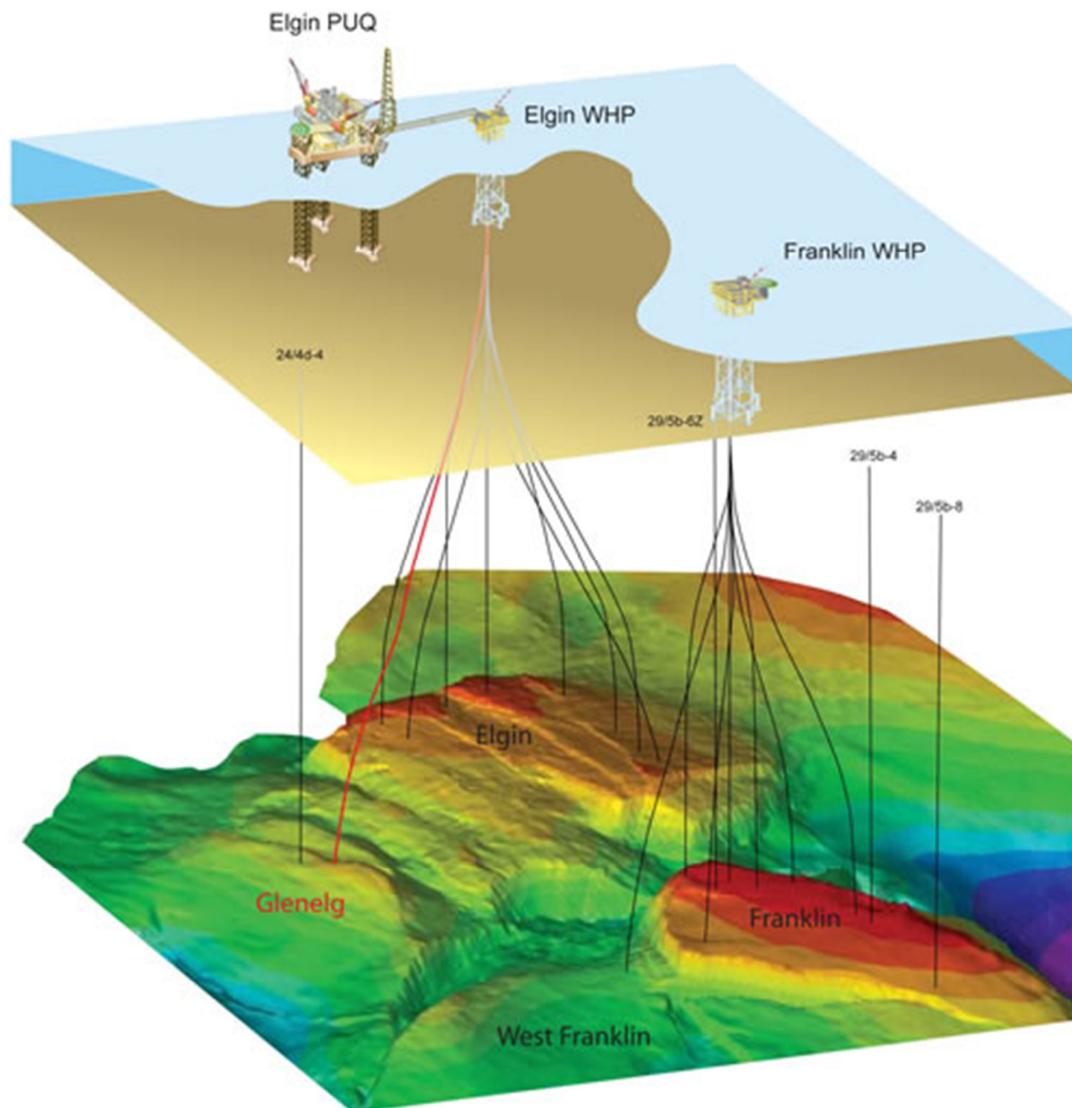
Piattaforma di processo PUQ che, a differenza delle WHP costituite da una struttura di supporto fissa (*jacket*), è supportata da una struttura mobile per permettere di costruirla interamente a terra e trainarla successivamente in mare nel sito stabilito. Fissata al fondo marino da 3 gambe mobili, si innalza a 34m sopra il livello del mare ed ha un peso complessivo di 24000t.

- **Elgin A**

Piattaforma di estrazione WHP del complesso Elgin composta da una struttura di 2800t sostenuta da un jacket a 4 gambe di 2715t, in grado di ospitare 12 moduli.

- **Franklin**

Piattaforma di estrazione WHP formata da una struttura da 2093t supportata da un jacket a 4 gambe di 2800t, contenente 9 moduli.



Progettare il complesso Elgin- Franklin fu un'ardua sfida ingegneristica a causa della complessa conformazione geologica del sottosuolo e delle elevate temperature e pressioni di lavoro. In ambito offshore questi due valori si ritengono tali quando superano le soglie di 170°C e 450bar: le piattaforme Elgin A e Franklin sono state progettate per lavorare con temperature comprese tra -35 e +190 °C, pressioni di processo fino a 860bar e pressioni di estrazione comprese tra i 650 e 1100bar. E' grazie a queste caratteristiche che detiene il record mondiale per le massime temperature e pressioni di utilizzo.

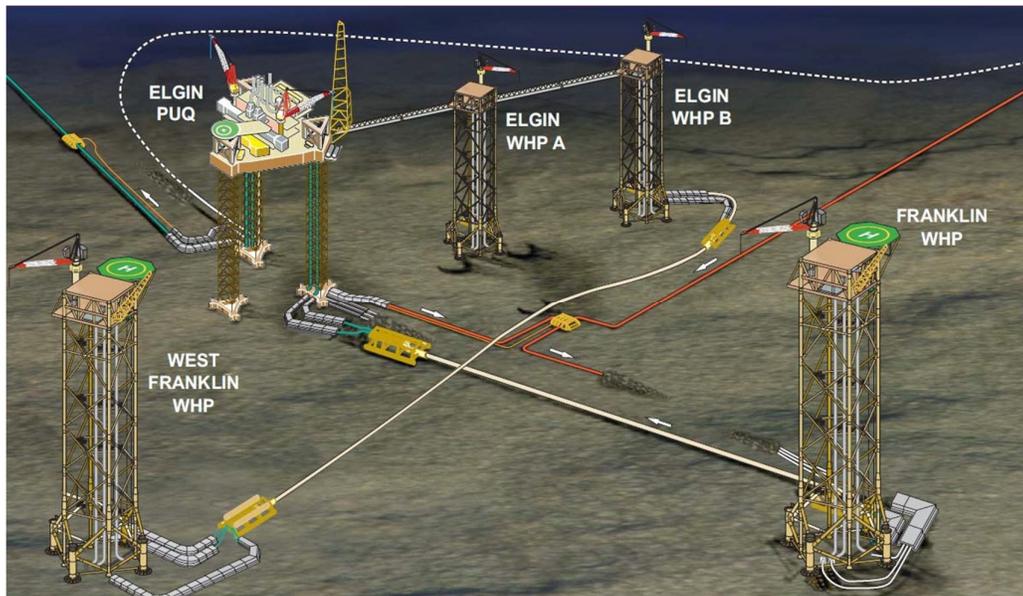
Le riserve dell'intero giacimento sono stimate intorno ai 60 milioni di metri cubi di gas condensato e 50 miliardi di metri cubi di gas. L'inizio della produzione in questi due giacimenti di gas avvenne nel marzo del 2001 e si prevede di poterlo sfruttare fino al 2022. Il gas condensato presente nel giacimento contiene una media del 3.5% di diossido di carbonio con una concentrazione al di sopra di 40ppm di solfuro di idrogeno.

Messo in produzione del 2001, a marzo 2002 il giacimento raggiunse un picco di produzione di 140000 barili di condensato e 485 milioni di piedi cubi di gas al giorno. Successivamente nel 2003 un nuovo record fu battuto, effettuando perforazioni fino a 6.1 km con una sosta a 1.5 km per fronteggiare un accumulo di gas alla temperatura di 197°C con pressioni di 1155bar.

Total investì nel progetto Elgin-Franklin più di 1.65 miliardi di £ (2.8 miliardi di euro). Il picco di capacità produttiva attuale del sito Elgin-Franklin è di 280000 barili di petrolio al giorno, 175000 barili al giorno di condensato e 15.5 milioni di metri cubi di gas al giorno.



Altri due siti satellite vicini al complesso Elgin-Franklin furono successivamente scoperti: si tratta di Glenelg nel 1999 e West Franklin nel 2003. Entrambi sono ad alte temperatura e pressione e contengono accumuli di gas condensato in condizioni super-critiche. I risultati positivi riscontrati nella prima fase di sviluppo del progetto West Franklin hanno mostrato la possibilità dell'avvio di una seconda fase. Originariamente il progetto di sviluppo di tale struttura proponeva di sfruttare la piattaforma di estrazione Elgin A come supporto per le attrezzature di West Franklin, ma a causa di diversi problemi tecnici e meccanici riscontrati su Elgin, si decise di realizzare una nuova piattaforma Elgin B (WHP) contenente i nuovi moduli necessari al funzionamento di Elgin, collegata alle altre due sorelle da un ponte.



Lo sviluppo della seconda fase di West Franklin e di Elgin B consiste di tre punti:

- **West Franklin** – realizzare una piattaforma di estrazione con 12 moduli specifici, operante senza ausilio di personale, completa di sistema di trasporto degli idrocarburi.
- **Elgin B** – realizzare una piattaforma di estrazione con 9 moduli, collegata da un ponte alla piattaforma Elgin e provvista, inoltre, delle attrezzature per il trattamento degli idrocarburi provenienti dalla piattaforma West Franklin attraverso condotte sottomarine.
- **Brown field** – integrazione del sistema di trattamento degli idrocarburi di Elgin B e West Franklin e modifica dell'impianto di collegamento tra Elgin B e Elgin.

A tal fine è stato stipulato un contratto con la Basis Engineering, facente parte del gruppo Rosetti, per sviluppare ed integrare i progetti Elgin B e West Franklin.

CAPITOLO 2

Acciaio superduplex

2.1 Gli acciai inossidabili

Per acciai inossidabili (inox) si intendono quelle leghe a base di ferro, cromo e carbonio (eventualmente contenenti altri elementi come Ni, Mo, Si, N) la cui peculiarità è la resistenza alla corrosione. Tale caratteristica è dovuta alla loro proprietà di passivarsi in presenza di un ambiente ossidante. Il processo di passivazione consiste nella formazione di uno strato invisibile di ossido, composto principalmente da ossido di cromo, variabile in funzione della composizione chimica dell'acciaio, del trattamento termico e del tipo di ambiente ossidante. Tale spessore costituisce una barriera al proseguimento dell'ossidazione e della corrosione, se asportato, inoltre, si riforma spontaneamente. Condizione indispensabile per la formazione dello strato protettivo è la presenza di una quantità di cromo pari almeno all'11%. Gli acciai inossidabili si dividono in diverse classi in funzione della loro composizione chimica e quindi della possibilità, o meno, di modificare la loro struttura mediante trattamenti termici. Di seguito verranno descritte le quattro principali tipologie di acciai inossidabili.

2.1.1 Acciai martensitici

Sono essenzialmente acciai al solo cromo in percentuali del 11 % - 18 % contenenti eventualmente piccole quantità di altri elementi. Caratteristica fondamentale di questi acciai è l'attitudine a migliorare le loro proprietà meccaniche mediante un trattamento termico di tempra seguito da rinvenimento.

Variando le temperature si possono conciliare buone caratteristiche meccaniche con una buona resistenza alla corrosione. Gli acciai inossidabili martensitici sono particolarmente indicati per applicazioni che richiedono elevata resistenza meccanica, durezza, resistenza all'abrasione insieme ad una sufficiente resistenza alla corrosione.



Figura 1 - micrografia acciaio inossidabile martensitico

2.1.2 Acciai ferritici

Sono acciai contenenti 12 ÷ 27% cromo e carbonio generalmente $\leq 0,20\%$ con eventuali piccole aggiunte di altri elementi. La loro caratteristica principale è di avere una struttura ferritica a qualsiasi temperatura e quindi di non essere suscettibili di aumento delle caratteristiche meccaniche mediante trattamenti termici.

Si può tuttavia ottenere un innalzamento del carico di rottura e della durezza mediante opportune lavorazioni a freddo, che determinano un incrudimento del materiale. Questi acciai presentano però un brusco abbassamento dei valori di tenacità alle basse temperature, risultano quindi inadatti per impieghi a temperature inferiori a quella ambiente.

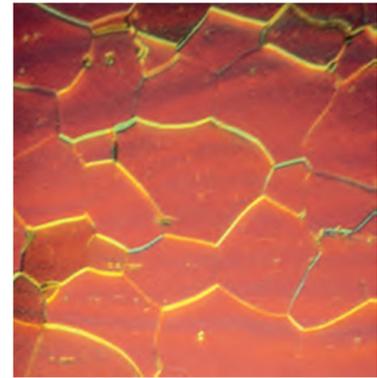


Figura 2 - micrografia acciaio inossidabile ferritico

2.1.3 Acciai austenitici

Contengono Cr al 16 - 20%, Ni al 7 – 18% ed in alcuni tipi Mo al 2 - 6% con un tenore di carbonio di solito inferiore a 0,08%. La presenza di elementi stabilizzanti, come il Ti, migliora ulteriormente la resistenza alla corrosione (in particolare quella intergranulare) e la resistenza ad alta temperatura. Questi acciai sono caratterizzati da una struttura austenitica stabile a qualsiasi temperatura, non presentano pertanto alcun aumento di resistenza meccanica dopo trattamento termico.

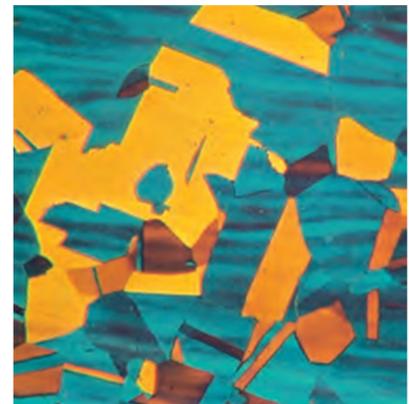


Figura 3 - micrografia acciaio inossidabile austenitico

La loro resistenza meccanica può essere aumentata con aggiunte di azoto o mediante lavorazioni di deformazione a freddo (laminazione, trafilatura, stampaggio, estrusione etc.) che incrudiscono il materiale facendone aumentare la durezza, inducendo anche un più o meno accentuato magnetismo. Questi acciai presentano caratteristiche meccaniche non particolarmente elevate a temperatura ambiente, tuttavia tali caratteristiche risultano notevoli anche alle basse temperature, in particolare la resilienza.

2.1.4 Acciai duplex

Presentano di norma un tenore di Cr elevato sempre superiore al 16 %, Ni tendenzialmente basso tra 5 % - 7 % accompagnato da elementi tipo Mo, Si, Mn, Cu il che comporta la caratteristica peculiare di presentare a temperatura ambiente una microstruttura bifasica composta da austenite e ferrite in eguali proporzioni. Da qui anche la definizione di "bifasici" o "austenoferritici".

Hanno caratteristiche meccaniche a temperatura ambiente più elevate sia degli austenitici che dei ferritici e buona resistenza alla corrosione, migliore dei ferritici e paragonabile, in ambiente acido, a quella degli austenitici. Particolarmente significativa è la resistenza alla corrosione per vaiolatura ed alla corrosione interstiziale da cloruri, conferita dai tenori di cromo, molibdeno, tungsteno ed azoto.

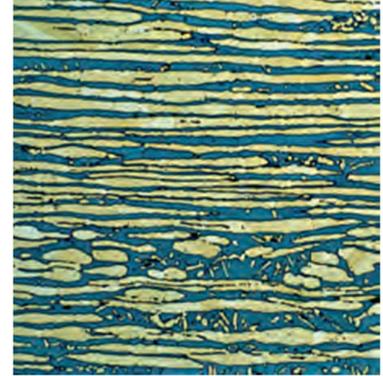


Figura 4 - micrografia acciaio inossidabile duplex

I moderni acciai inossidabili di tipo duplex sono suddivisi in range basati sulla loro resistenza a corrosione (indice PREN) dovuta ai vari elementi di lega, si possono distinguere cinque gruppi principali:

- Lean duplex (2304), senza aggiunta di molibdeno;
- Standard duplex (2205), più impiegato in ambito lavorativo;
- 25 Cr duplex (alloy 255), con $PREN < 40$;
- Superduplex(2507), con $40 < PREN < 45$;
- Iperduplex, con $PREN > 45$.

PREN: Pitting Resistance Equivalent Number

$$PERN = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N$$

Di seguito l'attenzione sarà focalizzata sugli acciai superduplex e iperduplex.

2.2 Composizione chimica

Gli acciai inox duplex raggiungono proprietà ottimali quando il bilanciamento delle fasi tra ferrite ed austenite è compreso tra il 30 % ed il 70 %, ma si ritiene comunemente che abbiano indicativamente le stesse quantità di delle due fasi, con una leggera prevalenza di quest'ultima nei gradi commerciali per favorire la tenacità e la lavorabilità. Le interazioni tra i principali elementi di lega, principalmente cromo, molibdeno, azoto e nichel, sono piuttosto complesse e per ottenere una microstruttura bifasica stabile è necessario porre attenzione ad ottenere il corretto tenore di questi elementi.

SUPERDUPLEX									
GRADO	EN N°	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
2507	1,441	0,03	24,0 - 26,0	6,0 - 8,0	3,0 - 5,0	0,24 - 0,32	1,20	0,50	-
	1,4501	0,03	24,0 - 26,0	6,0 - 8,0	3,0 - 4,0	0,20 - 0,30	1,00	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0
		0,03	27,0 - 27,9	7,0 - 8,2	0,8 - 1,2	0,30 - 0,40	1,10	-	2,1 - 2,5
		0,03	28,0 - 30,0	5,8 - 7,5	1,5 - 2,6	0,30 - 0,40	0,80 - 1,50	0,80	-
		0,03	26,0 - 29,0	3,5 - 5,2	1,0 - 2,5	0,15 - 0,35	2,00	-	-
		0,03	24,0 - 26,0	6,8 - 8,0	2,5 - 3,5	0,24 - 0,32	1,00	0,2 - 0,8	1,5 - 2,5
		0,025	24,0 - 26,0	6,5 - 8,0	3,0 - 4,0	0,23 - 0,33	0,80	1,2 - 2,0	0,8 - 1,2
	1,4477	0,03	28,0 - 30,0	5,8 - 7,5	1,5 - 2,6	0,30 - 0,40	0,80 - 1,50	≤0,8	-
IPERDUPLEX									
GRADO	EN N°	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
		0,03	26,0 - 29,0	5,5 - 9,5	4,0 - 5,0	0,30 - 0,50	1,50	1,0	-
		0,03	29,0 - 33,0	6,0 - 9,0	3,0 - 5,0	0,40 - 0,60	1,50	1,00	-

Tabella 1 - composizione chimica acciaio inossidabile superduplex e iperduplex

Il secondo punto essenziale riguarda l'analisi chimica in quanto tali acciai tendono a formare fasi intermetalliche dannose ad alte temperature, dette "fasi sigma", le quali precipitano nella matrice ferritica. L'unico modo per ritardare questo processo è l'aggiunta di azoto, processo che verrà trattato successivamente.

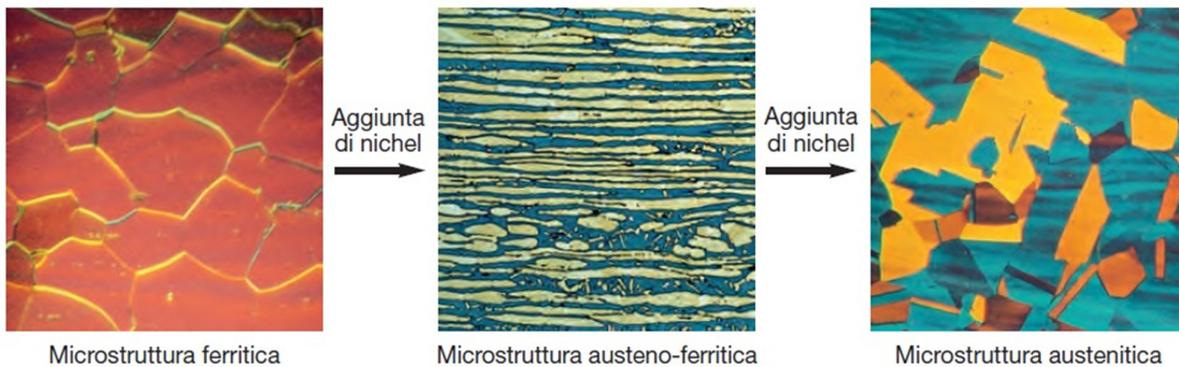
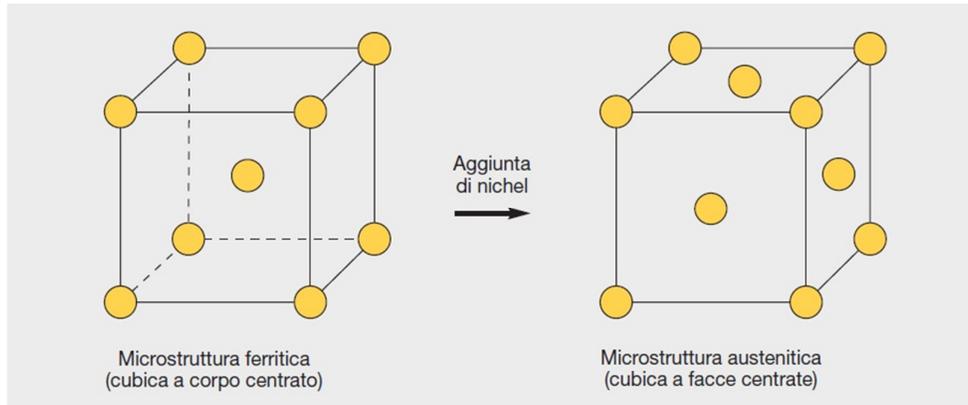
Di seguito vengono elencati i principali elementi di lega ed i loro contributi alle proprietà meccaniche e fisiche ed alla resistenza corrosione del materiale.

2.2.1 Cromo (Cr)

La resistenza alla corrosione di un acciaio inossidabile aumenta all'aumentare del tenore di cromo. Per formare uno strato di passivazione superficiale stabile, in grado di preservare l'acciaio dalla corrosione atmosferica, è necessario un tenore di cromo pari ad almeno il 10,5 %. Tale elemento tende anche ad incrementare la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura, effetto importante in relazione alla formazione ed alla rimozione di ossidi grossolani durante i trattamenti termici o la saldatura. Esso è detto "ferritizzante", ossia favorisce la formazione di microstrutture cubiche a corpo centrato nel ferro. In presenza di elevati tenori di cromo inoltre aumenta la possibilità di formazione di composti intermetallici ed è necessario quindi più nichel per ottenere una microstruttura austeno-ferritica. Il cromo di norma è presente almeno al 20% negli acciai inossidabili di tipo duplex.

2.2.2 Nichel (Ni)

La sua presenza di nichel nella metà circa della microstruttura degli acciai duplex aumenta fortemente la loro tenacità in paragone agli acciai inossidabili ferritici. Esso è un austenitizzante che favorisce la trasformazione della microstruttura cubica a corpo centrato (ferritica) degli acciai in cubica a facce centrate (austenitica). Gli acciai duplex contengono tenori di nichel ridotti o medi tra 1,5% e 7%.



2.2.3 Molibdeno (Mo)

Il molibdeno collabora con il cromo per incrementare la resistenza a vaiolatura degli acciai inossidabili. Se il tenore di cromo è almeno il 18 %, le aggiunte di molibdeno risultano più efficaci di quelle di cromo di oltre tre volte in relazione alla resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale in ambienti clorurati. Anche tale elemento è ferritizzante e tende ad aumentare la tendenza dell'acciaio inossidabile a formare dannose fasi intermetalliche. Di conseguenza, il suo tenore è di norma limitato al 4% negli acciai di tipo duplex.

2.2.4 Azoto (N)

L'azoto aumenta la resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale degli acciai inossidabili austenitici e duplex. Esso aumenta inoltre significativamente la loro resistenza e, di fatto, rappresenta l'elemento di lega sostituzionale più efficace ed economico. La maggiore tenacità degli acciai duplex contenenti azoto è dovuta al loro maggiore tenore di austenite ed al ridotto tenore di fasi intermetalliche. Tale elemento è infatti aggiunto negli acciai inossidabili austenitici e duplex ad elevata resistenza alla corrosione (contenenti elevati tenori di cromo e molibdeno) per contrastarne la tendenza alla formazione di fase sigma. L'azoto è un forte austenitizzante e tende a ridurre l'energia di impilamento dei difetti reticolari, incrementando così la velocità di incrudimento dell'austenite. Negli acciai duplex, l'azoto è di norma presente ed il tenore di nichel viene regolato di conseguenza per ottenere il voluto bilanciamento delle fasi. I ferritizzanti, cromo e molibdeno, sono bilanciati rispetto agli austenitizzanti, nichel ed azoto, per ottenere la struttura bifasica.

2.3 Metallurgia

La struttura metallurgica degli acciai duplex può essere facilmente compresa attraverso il diagramma di stato ternario ferro-nichel-cromo. Una sezione ottenuta al 68 % di ferro indica che queste leghe solidificano in fase ferritica (α), parte della quale si trasforma quindi in austenite (γ) non appena la temperatura scende intorno a 1000 °C, in funzione della composizione chimica. Vi è un ulteriore piccolo cambiamento nell'equilibrio tra ferrite ed austenite a temperature inferiori. L'effetto dell'aumento dell'azoto è indicato in *figura 4*. Termodinamicamente, dato che l'austenite si separa dalla ferrite, risulta impossibile per la lega superare le condizioni di equilibrio dell'austenite. Tuttavia, mano a mano che il raffreddamento continua a temperature minori, carburi, nitruri, fase sigma ed altre fasi intermetalliche possono divenire possibili componenti microstrutturali.

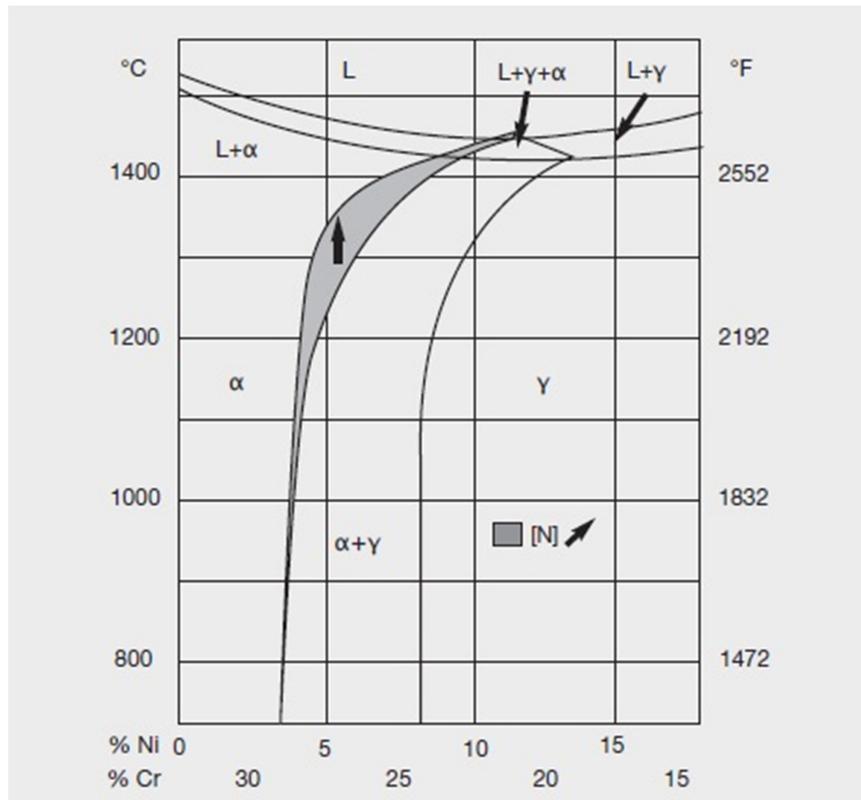


Figura 4 - Diagramma ternario Fe-Cr-Ni al 68% Fe

Il bilanciamento tra microstruttura ferritica e può essere stimato quantitativamente con le seguenti relazioni lineari:

$$Cr_{eq} = \% Cr + 1,73 \% Si + 0,88 \% Mo$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 24,55 \% C + 21,75 \% N + 0,4 \% Cu$$

$$\% Ferrite = -20,93 + 4,01 Cr_{eq} - 5,6 Ni_{eq} + 0,016 T$$

In cui T (° C) è la temperatura di ricottura nell'intervallo 1050–1150 °C e le composizioni chimiche sono espresse in massa %.

Per quanto riguarda la formazione di fasi intermetalliche, dato che la fase sigma precipita a temperature inferiori a quella di trasformazione della ferrite, durante il raffreddamento l'obiettivo è quello di controllare la temperatura di ricottura, assicurando in tal modo che l'acciaio sia raffreddato il più rapidamente possibile dalla temperatura di ricottura per prevenire la formazione di fase sigma. Anche la fase α' è stabile negli acciai inossidabili duplex, dato che si forma nella matrice ferritica intorno a 525 °C (950 °F).

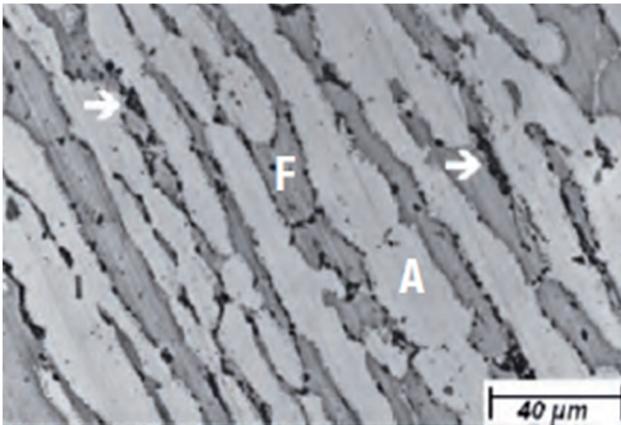


Figura 5 - Microstruttura di un campione di acciaio EN 1.4462 (2205) trattato a 850°C per 40 minuti con precipitazione fase sigma (freccie) in corrispondenza dei bordi grano tra ferrite e austenite. La fase ferritica (F) appare più scura rispetto a quella austenitica (A) nella micrografia.

Un diagramma di precipitazione di tipo isoterma per gli acciai inossidabili duplex tipo 2304, 2205 e 2507 è mostrato in figura 6. Si possono evidenziare tre diverse tipologie di precipitato di seguito descritti.

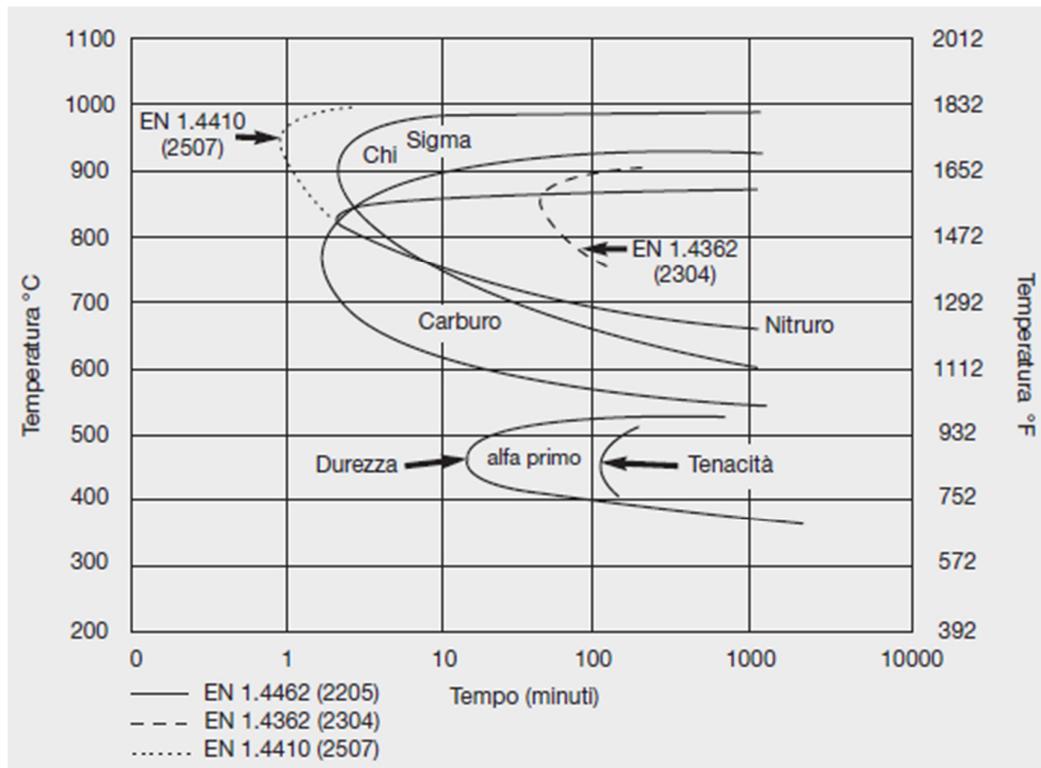


Figura 6 - diagramma di precipitazione isoterma acciai duplex 2304, 2205, 2507

- **Precipitazione di nitruri di cromo**

Fenomeno che si verifica nel tempo relativamente breve di 1–2 minuti alle temperature indicate e dovuto, almeno in parte, all'elevata solubilità di carbonio ed azoto nella fase austenitica a ridotto tenore di nichel ed all'effetto di ritardo svolto

dall'azoto nei confronti della precipitazione di carburi. Come risultato, i gradi duplex sono relativamente resistenti alla sensibilizzazione in fase di raffreddamento.

- **Precipitazione di fase sigma e chi**

Fenomeno che si verifica a temperature leggermente superiori ma in tempi simili alla precipitazione di carburi e nitruri. I gradi duplex maggiormente legati con cromo, molibdeno e nichel tendono ad avere cinetiche di precipitazione di tali fasi più rapide rispetto al tipo 2205, mentre gradi con tenori inferiori di questi elementi hanno il comportamento opposto. Questo effetto è illustrato dal diagramma indicato in Figura 5 con linea tratteggiata, in cui si nota una formazione di fase sigma e chi più rapida nel tipo 2507, maggiormente legato, e più lenta nel tipo 2304, meno legato.

- **Precipitazione della fase alfa primo nella matrice ferritica**

Fenomeno che comporta un indurimento ed un infragilimento della ferrite e dato che gli acciai duplex contengono circa il 50 % di austenite gli effetti non risultano così gravi. Per limitare l'infragilimento è necessario imporre un limite superiore alle temperature di esercizio.

2.4 Proprietà meccaniche e fisiche

Gli acciai inossidabili duplex hanno eccezionali proprietà meccaniche. Il loro carico di snervamento a temperatura ambiente allo stato solubilizzato è più che doppio rispetto ad un acciaio inossidabile austenitico non legato con azoto. Ciò può consentire al progettista di ridurre gli spessori di parete in diverse applicazioni.

CARICO DI SNERVAMENTO		CARICO DI ROTTURA		ALLUNGAMENTO %		DUREZZA VICKERS		RESILIENZA 46°C	
RP _{0.2} min	RP _{0.2} eff	R _m min	R _m eff	Al. % min	Al. % eff	HV max	HV eff	KCV min	KCV eff
550 MPa	620-650 MPa	750 MPa	850-870 MPa	25	35-40	320	10	40 J	80-100 J

Tabella 2 - proprietà meccaniche acciaio superduplex (produttore: SANDVIK)

Le proprietà meccaniche di semilavorati di questo tipo di acciaio sono di norma fortemente anisotrope, il che significa che possono variare notevolmente in funzione della direzione che assumono. Tale fenomeno è dovuto alla presenza di grani allungati ed alla microstruttura cristallina derivante dalla laminazione a caldo o a freddo.

La struttura di solidificazione di un acciaio duplex è tipicamente isotropa, se esso viene in seguito laminato o forgiato e quindi successivamente ricotto in presenza di entrambe le fasi. L'aspetto delle due fasi nel prodotto finale indica la direzionalità del processo eseguito. Si ottengono i seguenti effetti:

- La **resistenza** risulta maggiore perpendicolarmente alla direzione di laminazione rispetto a quella a questa parallela;
- La **resilienza** è maggiore nel caso di intaglio posizionato perpendicolarmente alla direzione di laminazione piuttosto che nella direzione di laminazione;
- La **tenacità** misurata è di norma maggiore per una provetta longitudinale che nelle altre direzioni di prova;

l'energia di rottura di una provetta trasversale di una lamiera di acciaio duplex varia tipicamente da 1/2 ad 1/3 rispetto a quella di una provetta ricavata in direzione longitudinale.

Nonostante l'elevata resistenza, gli acciai duplex presentano buona duttilità e tenacità. Confrontati con gli acciai al carbonio o con gli inossidabili ferritici, presentano una transizione duttile-fragile più graduale. Gli acciai duplex conservano infatti una buona tenacità anche a temperature inferiori a quella ambiente, fino persino a temperature di -40 °C.



Le proprietà fisiche degli acciai duplex sono comprese tra quelle degli acciai al carbonio e quelle degli acciai inossidabili austenitici, ma tendono ad essere più vicine a questi ultimi. Di seguito vengono elencate le principale proprietà alla temperatura di 20°C:

Densità	7,79 g/cm ³
Calore specifico	485 J/(kg K)
Resistività elettrica	0,83 μΩ m
Modulo di Young	200 Gpa
Modulo elastico	200 Gpa
Conduktività termica	16,0 W/(m K)

2.5 Resistenza a corrosione

Gli acciai inossidabili duplex vantano un'elevata resistenza alla corrosione nella maggior parte delle condizioni. Tuttavia, vi sono alcune significative eccezioni, in cui essi risultano nettamente superiori. Ciò è dovuto al loro elevato tenore di cromo, che produce effetti positivi in presenza di acidi ossidanti, così come adeguati tenori di molibdeno e di nichel garantiscono resistenza in ambienti acidi mediamente riducenti. I tenori di cromo, molibdeno ed azoto relativamente alti conferiscono loro anche resistenza nei confronti della vaiolatura da cloruri e della corrosione interstiziale. La loro struttura bifasica è un vantaggio in ambienti in grado di promuovere criccabilità da tensocorrosione. Se la microstruttura contiene almeno dal 25 al 35 % di ferrite, gli acciai duplex sono molto più resistenti alla criccabilità da tensocorrosione da cloruri rispetto agli austenitici. La ferrite, tuttavia, è sensibile all'infragilimento da idrogeno. Ne deriva che gli acciai inossidabili duplex non hanno una particolare resistenza in ambienti o applicazioni in cui l'idrogeno può diffondere nella matrice, causandone l'infragilimento.

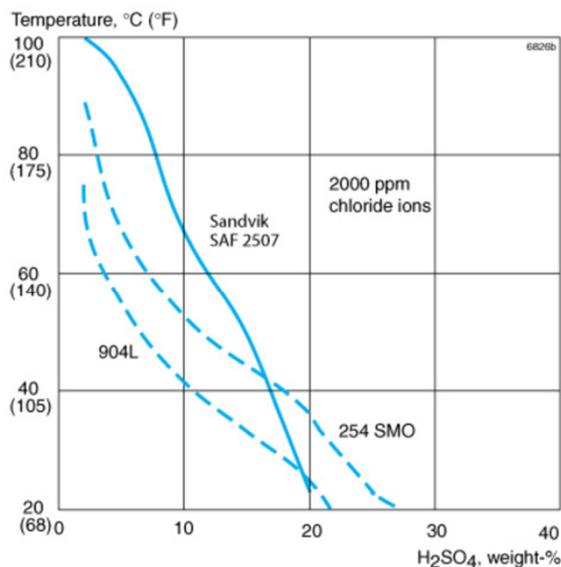


Figura 7 – diagramma di isocorrosione, 0.1 mm/anno, aerato naturalmente, in acido solforico contenente 2000 ppm di ioni di cloro.

2.6 Generalità processo produttivo

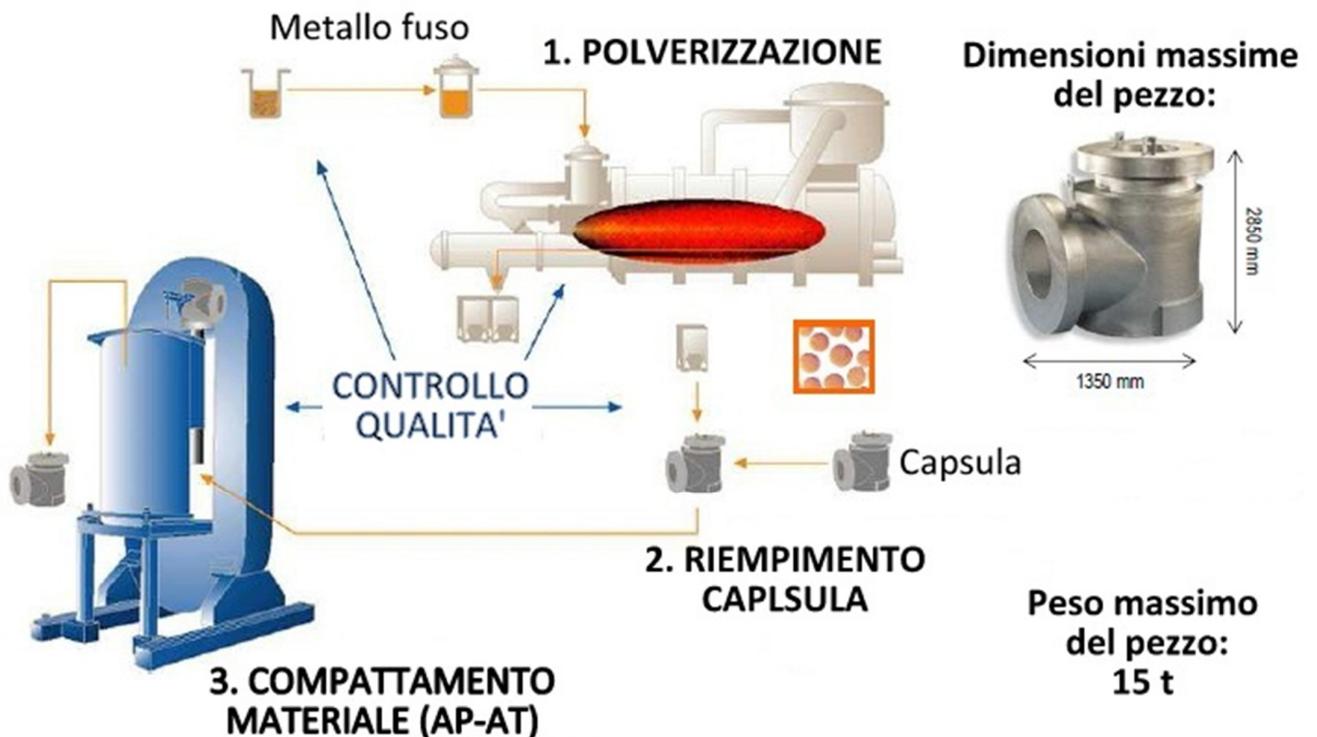
Le tubazioni in acciaio superduplex vengono prodotte dalla Savndvik, azienda svedese leader a livello internazionale nello sviluppo e nella realizzazione di prodotti in acciai inox di qualità, e di prodotti e sistemi per industria termica.

Il processo usato per realizzarli è detto Hot Isostatic Pressing (HIP), un nuovo metodo di formatura basato sull'uso di fine polvere metallica e sull'impegno di nuove tecnologie di fusione. Esso consiste nel versare la polvere di metallo all'interno di una forma prefabbricata dello stesso materiale della polvere, per poi porre il tutto all'interno di un macchinario speciale che crea un ambiente con elevate temperature ed elevate pressioni isostatiche, in modo da fondere uniformemente tutto il materiale fino ad ottenere un unico pezzo finito.

2.6.1 Il metodo HIP

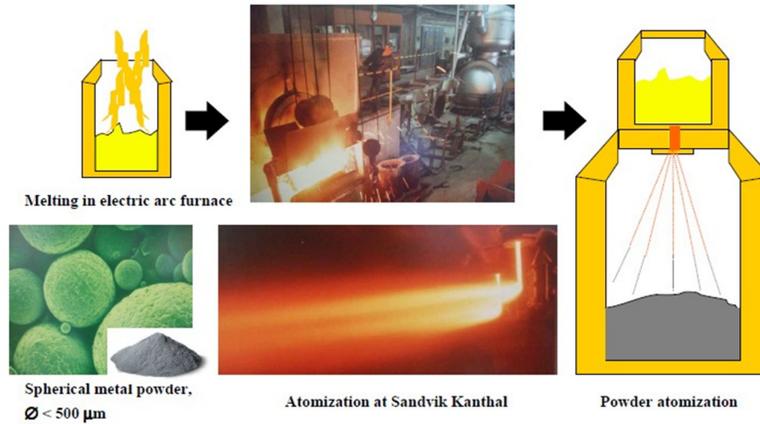
L'HIP è un processo di addensamento del materiale metallico attraverso l'applicazione di pressioni isostatiche maggiori di 1000bar e temperature poco al di sotto della temperatura di fusione del materiale, solitamente tra i 1100-1200°C. Lo scopo è quello di consolidare la polvere metallica posta all'interno di una forma, realizzata con stesso materiale della polvere, ed ottenere così un prodotto finito di elevata qualità.

2.6.2 Sintesi del processo produttivo



- **Fase 1**

Un flusso di metallo fuso passa attraverso un getto di gas atomizzato che produce la fine polvere metallica.



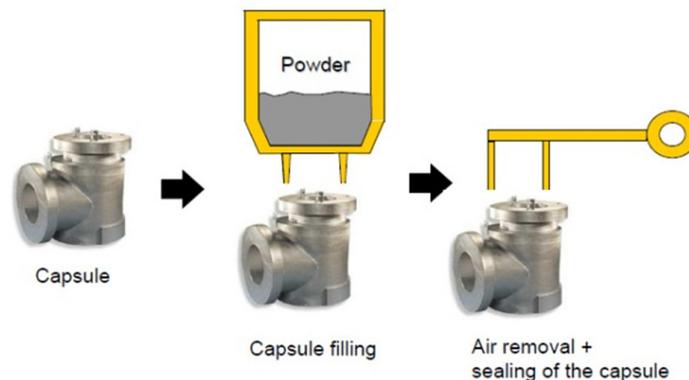
- **Fase 2**

Viene realizzato un contenitore dello stesso materiale della polvere avente la forma del pezzo finito.



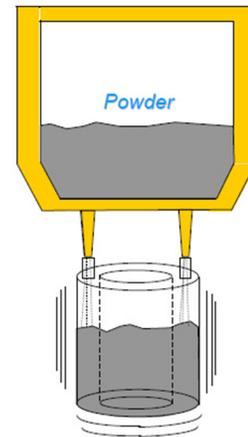
- **Fase 3**

Il contenitore viene riempito di polvere fino ad ottenere una capsula, la quale viene messa sotto vuoto per asportare tutta l'aria all'interno e poi sigillata.



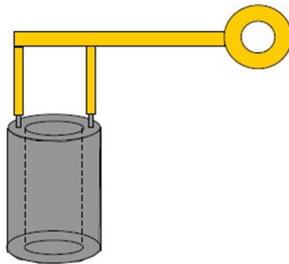
- **Fase 4**

La capsula viene riempita di polvere con un apposito macchinario in un'atmosfera protetta, segue una compattazione del contenuto mediante vibrazione.

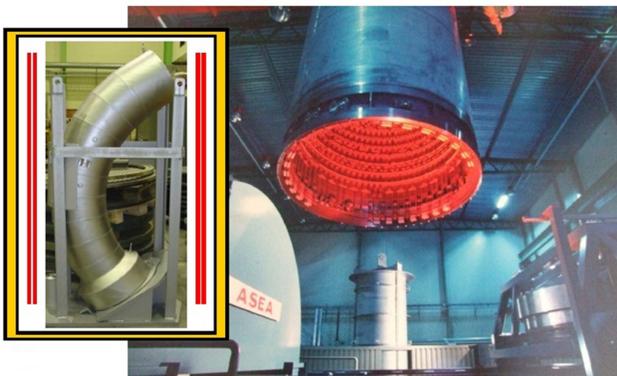


- **Fase 5**

L'aria viene rimossa dalla capsula in modo da evitare inclusioni di gas nel prodotto finito.



- **Fase 6**



Compattazione attraverso il processo HIP. Nella camera dove avviene il processo la capsula viene posta a temperature intorno ai 1150°C e pressioni maggiori di 1000bar per un tempo di circa 2-3 ore, fino ad ottenere la densità del metallo desiderata. La compattazione avviene allo stato solido, la capsula non raggiunge mai lo stato fuso. Grazie alla pressione isostatica, inoltre, la microstruttura del metallo risulta isotropica.

- **Fase 7**

Solubilizzazione: trattamento termico che consiste in una fase di riscaldamento e mantenimento a temperatura elevata (1110°C) seguita da un rapido raffreddamento con acqua, volto ad impedire la precipitazione di carburi di cromo, che avrebbero il tempo di formarsi nel caso di un raffreddamento più lento. I carburi di cromo sono tipicamente responsabili della corrosione intercristallina.



- **Fase 8**

Rimozione imperfezioni superficiali attraverso bagno in H_2SO_4 e successiva passivazione superficiale attraverso bagno in HNO_3 .

- **Fase 9**

Il pezzo viene lavorato con macchine utensili a controllo automatico per rimuovere la capsula esterna e ottenere la forma finale.

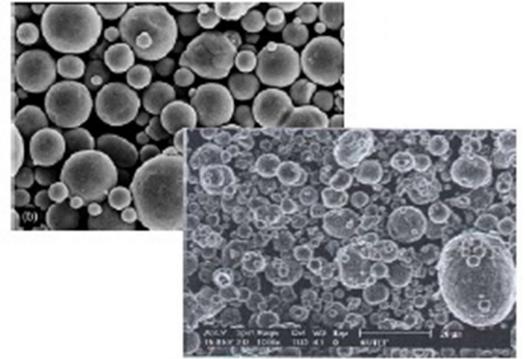
- **Fase 10**

- Controllo e certificazione del pezzo finito:
- controlli dimensionali;
- controlli distruttivi su campioni ricavati direttamente da parti apposite della capsula;
- controlli non distruttivi su tutto il prodotto finito;
- controllo composizione chimica;
- controllo struttura metallurgica.

2.6.3 Produzione della polvere metallica

L'atomizzazione dell'acciaio fuso attraverso getto di Argon (gas inerte) produce una polvere di metallo con la peculiare caratteristica di essere formata da grani di forma sferica regolare, caratteristica molto apprezzata per:

- maggiore densità di impaccettamento;
- minore viscosità di scorrimento;
- sintetizzazione isotropica (minori cambiamenti dimensionali).

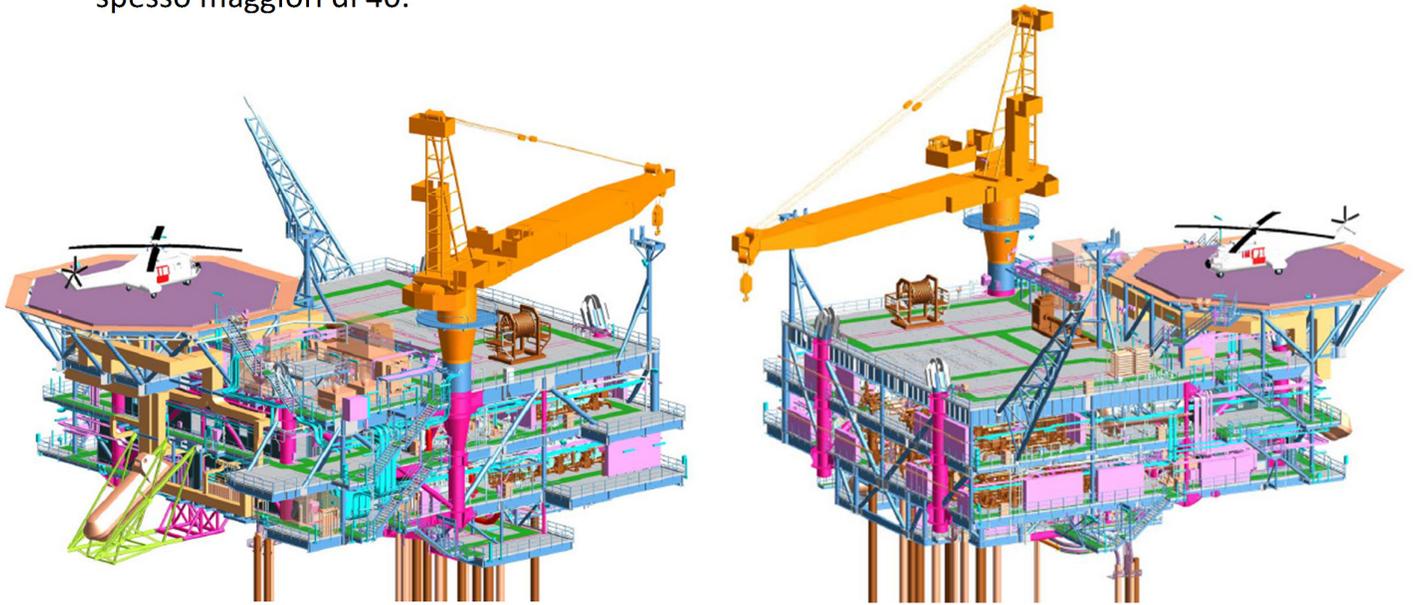


CAPITOLO 3

Saldatura tubazioni in acciaio superduplex

3.1 Impiego superduplex su piattaforma West Franklin

Nel settore oil & gas gli acciai superduplex hanno avuto un ruolo determinante in presenza di condizioni severe dovute soprattutto al continuo contatto con acqua salata, all'impiego di fluidi altamente corrosivi ed alle condizioni ambientali estreme (temperatura e pressione). Ciò è dovuto alla loro resistenza meccanica ed alla loro particolare resistenza a vaiolatura e corrosione interstiziale, superiore ai convenzionali acciai austenitici, con valori di resistenza equivalente al pitting (PREN) spesso maggiori di 40.



Le principali applicazioni degli acciai superduplex sono sistemi di tubazioni di processo ed apparecchiature come separatori, scrubber (filtri per gas) e pompe. Sott'acqua i duplex sono impiegati nella fabbricazione di tubi interrati, sistemi di tubazioni e collettori, componenti ad albero di natale (collegamento piattaforma pozzo), linee di processo e pipeline per il trasporto di fluidi corrosivi.

I suoi impieghi all'interno dei progetti sviluppati da Rosetti-Marino sono:

- **Riser - collettore verticale per impianti offshore**

Collettore utilizzato nei pozzi offshore per collegare la testa pozzo sottomarina con la superficie. Ne esistono due tipi:

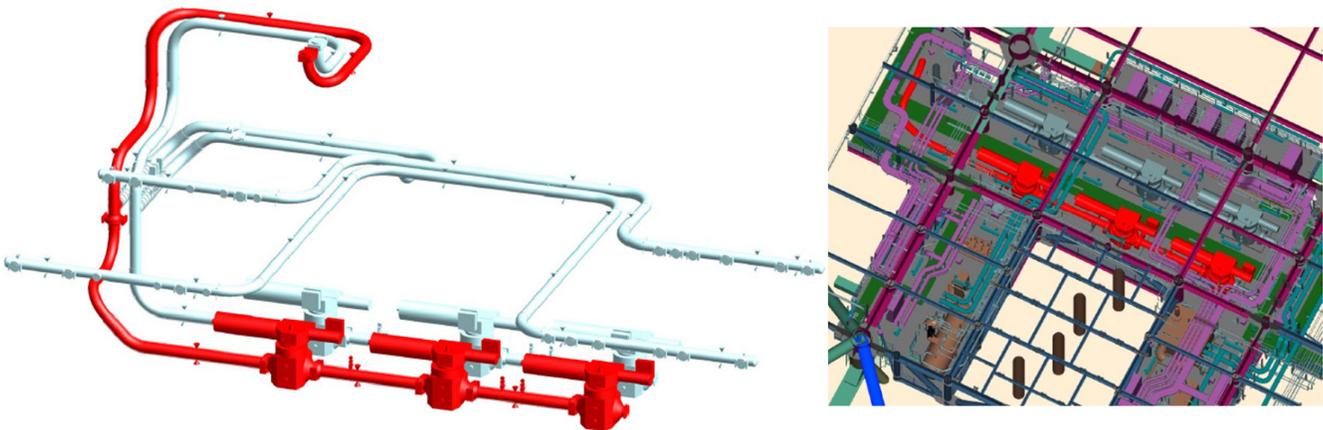
- *riser di perforazione* - collegano con la superficie i sistemi anti-eruzione (BOP) sottomarini;

- *riser di produzione* - collegano i vari moduli di processo alla piattaforma ai vari pozzo sottostanti.

Essenzialmente il *riser* è costituito da una tubazione principale di supporto strutturale per vari tubi di flusso e per il controllo del pozzo e dei BOP o della croce di produzione. È realizzato mediante più spezzoni lunghi 50 ft (15 m circa), collegati tra loro con connessioni a innesto rapido ed elementi di tenuta. Il riser si collega alla testa pozzo sottomarina e alla piattaforma tramite due giunti sferici flessibili che consentono il disassamento (10°) tra testa pozzo, riser e piattaforma. Sotto il giunto flessibile superiore si trova un giunto telescopico che assorbe il moto ondoso.

- **Pipe line – tubazione di processo**

Tubi utilizzati per la realizzazione di oleodotti e gasdotti. Tali tubi hanno un diametro esterno che varia da 2" a 56" (5÷142 cm), ma arriva anche a 80" (2 m), e la loro lunghezza è compresa tra 40 e 50 ft (12÷15 m). Gli spessori sono funzione della sollecitazione alla quale sono sottoposti. Di seguito verrà presa in considerazione la questa tipologia di tubazione all'interno del progetto West Franklin.



All'interno del progetto della piattaforma West Franklin, il superduplex viene usato per la costruzione delle tubazioni di distribuzione principali. La linea più imponente è quella con diametro esterno di 18" (457,2 mm) e 75mm di spessore, che convoglia il fluido proveniente dal riser in tutte le altre linee per consentirne la lavorazione, la cui costruzione verrà trattata in seguito dettagliatamente.

3.2 Cenni preliminari sul processo di saldatura

3.2.1 La saldatura

La saldatura è un procedimento che permette il collegamento permanente di parti solide, realizzando la continuità del materiale. Tale operazione viene eseguita grazie ad un apporto di calore localizzato che fonde i lembi e il materiale d'apporto, creando una giunzione permanente. La saldatura così ottenuta può presentare però difetti che devono essere caratterizzati e giudicati per stabilire se accettarne la presenza o ricorrere ad una riparazione. Essa presenta, inoltre, tensioni residue dovute al ritiro di saldatura durante la solidificazione, che possono causare deformazione del giunto, facilitare fenomeni di criccabilità, e influenzare in modo negativo la vita di elementi soggetti a fatica. Non esistono controlli non distruttivi che garantiscano le caratteristiche meccaniche e metallografiche dell'intero giunto saldato, per questo motivo è necessario stabilire un processo che dia come risultato un certo tipo di saldatura, con caratteristiche stimate entro determinati limiti.



3.2.2 Progettazione del giunto saldato

Una volta eseguita una saldatura è possibile stabilirne la qualità volumetrica, valutando il tipo e le dimensioni delle eventuali discontinuità presenti attraverso controlli non distruttivi, ma risulta impossibile stabilire con certezza la composizione chimica e la struttura metallurgica del giunto saldato. Per questo è necessario, per ogni tipologia di saldatura, stabilire un dettagliato processo di saldatura in modo da poter avere una stima delle qualità finali di ogni giunto eseguito. A tale scopo vengono di utilizzano due tipi di documenti:

- **WPS – Welding Procedure Specification** (appendice A)
Specifica di saldatura contenente istruzioni dettagliate su come operare la saldatura, quali parametri geometrici, termici ed elettrici utilizzare e che tipo di materiale d'apporto impiegare.
- **PQR – Procedure Qualification Record** (appendice B)
Procedura contenente i dati del giunto saldato con una determinata WPS, al quale viene applicata una serie di prove distruttive per caratterizzarlo dal punto di vista meccanico, chimico e di resistenza a corrosione, stabilendo un range di valori all'interno dei quali è possibile ottenere una saldatura priva di difetti con le proprietà desiderate.

3.2.3 Fasi preliminari

Prima dell'esecuzione materiale della saldatura sono necessari tre passaggi fondamentali:

- 1) l'ingegneria di saldatura;
- 2) la qualifica dei procedimenti e la definizione delle WPS di produzione;
- 3) la qualifica del personale di saldatura.

Nella prima fase viene definito il processo di saldatura da impiegare e come effettuarlo in funzione di vari parametri quali:

- salute e sicurezza degli operatori;
- materiali coinvolti;
- forme geometriche e dimensioni;
- potenzialità dell'azienda deputata all'esecuzione della lavorazione;
- accessibilità del giunto;
- richieste contrattuali e normative applicabili.

Nella seconda fase viene definita una WPS preliminare e successivamente viene realizzata una PQR per garantire che utilizzando il processo descritto si ottengono i risultati desiderati. Approvata la PQR, si può utilizzare la WPS in produzione, definendo così in modo molto rigido e preciso i materiali da adoperare e la loro dimensione, le precauzioni e la preparazione dei giunti, i parametri elettrici per la gestione degli apporti termici, la disposizione delle passate, la temperatura minima e massima entro il quale eseguire il deposito di saldatura, la qualità dei gas tecnici da adoperare e la loro portata.

L'ultima fase prima della saldatura è la qualifica di ogni saldatore. Questi deve realizzare una saldatura di prova nelle stesse condizioni descritte dalla WPS, allo scopo di verificare le sue capacità e garantire la buona riuscita dell'operazione. Se il pezzo una volta controllato risulta avere le caratteristiche desiderate, il saldatore può procedere all'esecuzione della saldatura sul giunto.

3.3 Criteri generali per la saldatura

L'acciaio superduplex di cui è composta la linea da 18" possiede una buona saldabilità. I problemi più rilevanti sono legati alla temperatura della zona termicamente alterata (ZTA), all'eccessiva formazione di ferrite, alla formazione di fasi intermetalliche e all'elevata suscettibilità alla formazione di cricche a caldo. Tali argomenti verranno trattati a fondo in seguito. La saldabilità del materiale base può essere alterata variandone la composizione chimica o lo stato di fornitura (metodo di fabbricazione), per questo è necessario che lo stato metallurgico del materiale usato per la costruzione sia lo stesso di quello usato per la qualifica del processo di saldatura. Partendo da questi presupposti è possibile stabilire alcune linee guida per la saldatura degli acciai superduplex.

3.3.1 Preparazione dei giunti

Nella saldatura di acciai superduplex una meticolosa preparazione dei lembi ed una corretta scelta del tipo di giunto sono fondamentali per un buon risultato.

Per un risultato ottimale è preferibile una lavorazione a macchina più che una molatura, ed ogni residuo va accuratamente rimosso. Di seguito vengono mostrate le configurazioni maggiormente utilizzate nella saldatura della tubazione da 18" in acciaio superduplex con processo TIG.



1. Giunto a I

Joint type 1

I-joint, $t < 2.5$ mm

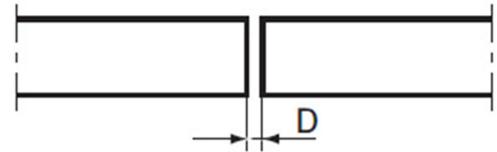
$D = 1.0-2.0$ mm

Single-sided, with or without root backing

I-joint, $t < 4.0$ mm

$D = 2.0-2.5$ mm

Double-sided without root backing but with root grinding



2. Giunto a V

Joint type 2

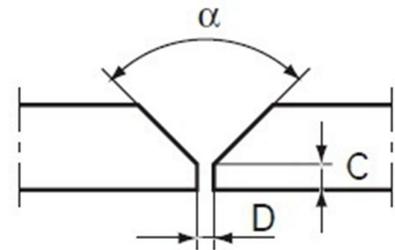
V-joint, $t = 4-16$ mm

$\alpha = 60^\circ-70^\circ$

$C = 0.5-1.5$ mm

$D = 2.0-4.0$ mm (4-6 mm against abacking)

Single-sided, with or without root backing



3. Giunto semplice a U

Joint type 3

U-joint, $t > 20$ mm

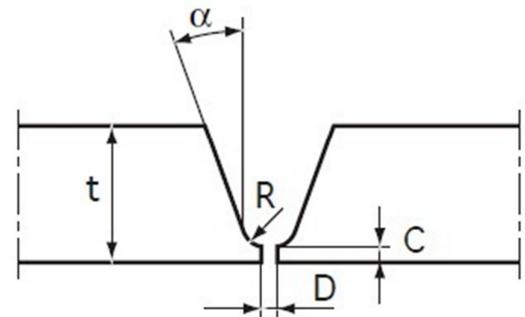
$\alpha = 10^\circ$

$R = 8$ mm

$C = 2.0-2.5$ mm

$D = 2.0-2.5$ mm (4-6 mm against a backing)

Double-sided without root backing but with root grinding

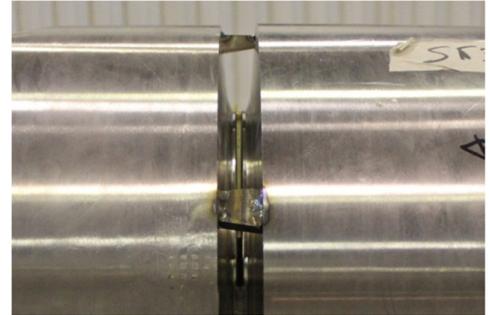


3.3.2 Pulizia prima della saldatura

Per questo tipo di acciaio prima di iniziare la saldatura è di fondamentale importanza che i lembi del giunto siano puliti con acetone o altri solventi che non inquinino la zona di lavoro e garantiscano la rimozione di grassi, oli, umidità o altre sostanze derivate dal taglio e dalla preparazione del giunto. L'analisi chimica del materiale base e dei consumabili viene sviluppata supponendo l'assenza di contaminazioni esterne, le quali devono essere assenti anche nel momento dell'esecuzione della saldatura.

3.3.3 Accoppiamento del giunto

Durante la saldatura si verifica una contrazione dei lembi dovuta alla dilatazione termica dell'acciaio. Per garantire un'adeguata penetrazione ed una corretta geometria del giunto è di fondamentale importanza fissare i due lati del giunto. Tale operazione viene eseguita tramite l'uso di centratori e con la puntatura, operazione che consiste nella saldatura provvisoria al giunto di diversi distanziali, costituiti da sfridi di tubo dello stesso materiale del metallo base, posti in diverse posizioni radiali. Solitamente nella tubazione da 18" i distanziali vengono posizionati ad una distanza di 150-200mm e devono avere una lunghezza pari allo spessore del tubo, minimo 15mm. La puntatura andrà poi rimossa e pulita man mano che la saldatura si avvicina alla zona puntata.

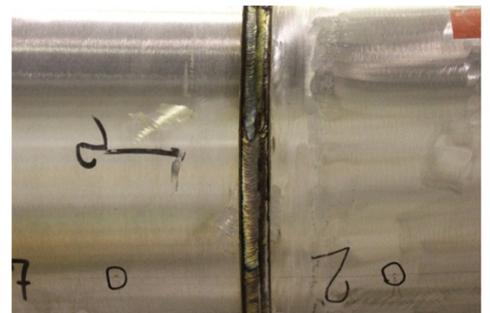


3.3.4 Preriscaldamento

A meno che non sia previsto da particolari accorgimenti in procedura, per questo materiale il preriscaldamento non è raccomandato. Può essere però un benefico se usato per eliminare l'umidità dalla superficie dell'acciaio e fare in modo che la temperatura iniziale del materiale non sia inferiore a 5°C, in tal caso dopo la pulizia viene effettuato un riscaldamento uniforme fino a 50°C tramite resistenza elettrica oppure aria calda.

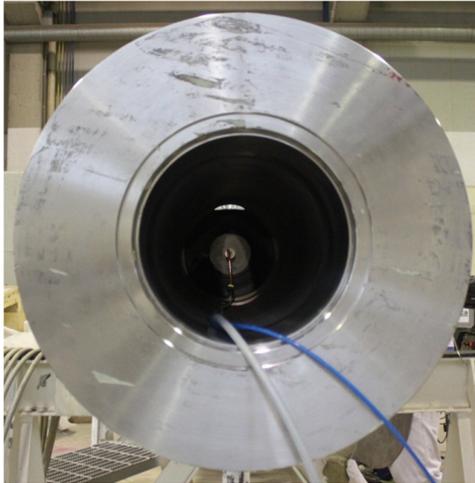
3.3.5 Temperatura di interpass

La temperatura di interpass è la temperatura misurata tra una passata e l'altra nell'esecuzione di una saldatura composta da più passate, ed uno dei principali fattori che determina il ciclo termico della ZTA.

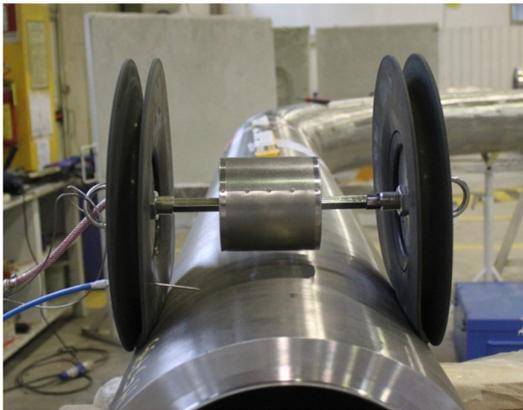


Tale temperatura influenza, inoltre, il bilanciamento delle fasi e la formazione di composti intermetallici e fasi instabili. Per gli acciai superduplex essa è stimata intorno ai 100-120°C, valore che va gestito a seconda dell'esito riscontrato durante le prove di qualifica.

3.3.6 Gas protettivo



La saldatura del giunto va eseguita in un'atmosfera protettiva per evitare la formazioni di ossidi e impurità nel bagno fuso. Tale funzione è svolta sia dal gas emesso dalla torcia, sia creando all'interno del tubo un'atmosfera priva di ossigeno, utilizzando in entrambi i casi argon puro al 99.99% o una miscela di argon e azoto al 2%. Per riempire il tubo di gas protettivo si usano appositi tamponi che isolano il giunto dal resto della condotta, che vengono rimossi una volta ultimata la saldatura.



I livelli di ossigeno devono essere continuamente monitorati utilizzando appositi strumenti, mantenendo una concentrazione al di sotto di 500ppm. Il gas protettivo è di fondamentale importanza soprattutto nelle prime quattro passate, dove vengono riempiti i primi 5mm del giunto. Per le passate successive risulta superfluo in quanto la base del giunto è già stata riempita ed è sufficiente l'azione protettiva del gas uscente dalla torcia.

COMPOSIZIONE GAS PROTETTIVO

Componente	Concentrazione
Argon - Ar	> 99,99%
Acqua - H2O	< 10ppm
Ossigeno - O2	< 10ppm
Anidride carbonica - CO2	< 10ppm
Idrocarburi - HC	< 5ppm
Azoto - N2	< 40ppm

3.3.6 Apporto termico

Gli acciai superduplex sono in grado di sopportare solo apporti termici limitati. Un eccessivo apporto termico può causare:

- eccessivi tenori di ferrite in zona fusa e in ZTA con conseguenti diminuzioni di tenacità e di resistenza alla corrosione;
- rischio di formazione di fasi intermetalliche, per questo è necessario limitare il più possibile permanenze alle temperature di 700-980°C.

Per fare una stima del calore fornito al materiale si può utilizzare la seguente formula:

$$\text{Calore fornito [kJ/mm]} = \frac{\text{corrente [A]} \times \text{voltaggio [V]}}{\text{velocità di avanzamento [mm/s} \times 1000]}$$

Tali valori variano a seconda del materiale e sono determinati da vari fattori, il più importante lo spessore del materiale da saldare. Per l'acciaio superduplex tale valore è solitamente compreso tra 0,7 e 1,4 kJ/mm.

Per evitare problemi nel giunto le procedure di saldatura devono quindi consentire un adeguato raffreddamento del bagno dopo saldatura ed il calore fornito va continuamente monitorato attraverso l'uso di termometri elettronici o termocoppie. In caso di un numero elevato di saldature risulta utile ed economico programmare le varie passate in modo da avere un tempo di raffreddamento ottimale, schierando contemporaneamente più postazioni di saldatura per ogni squadra di operatori.

3.3.7 Innesco ed estinzione dell'arco elettrico

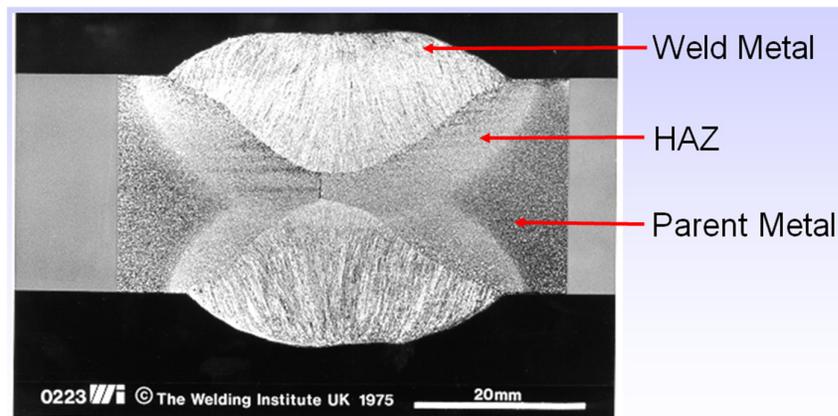
Ogni tipo di saldatura ha un inizio e una fine. Questi sono punti critici per la resistenza a corrosione, per le proprietà meccaniche e per l'integrità strutturale. Innescare l'arco sulla superficie del tubo può creare effetti negativi sulla resistenza a corrosione di quel punto (con successiva riparazione), per questo motivo è necessario innescare l'arco in un punto del giunto.



L'estinzione dell'arco va effettuata con attenzione, muovendo in modo circolare l'elettrodo sopra alla zona centrale del bagno e spostandolo verso l'esterno di circa 10mm. Se tale operazione venisse effettuata troppo rapidamente si rischia di creare crateri nel bagno, effetto ovviamente indesiderato.

3.3.8 ZTA - Zona Termicamente Alterata

La ZTA è la zona intorno alla saldatura che viene riscaldata durante l'operazione. Proprietà come durezza e resistenza a corrosione possono essere modificate dall'apporto termico della saldatura, in questo modo si rischia di ottenere proprietà differenti tra cordone, ZTA e metallo base. Per poter controllare tale fenomeno è necessario porre particolare attenzione ai parametri di saldatura e monitorare la temperatura del materiale.



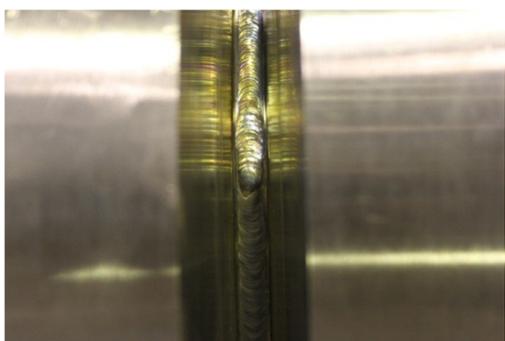
3.3.9 Penetrazione e diluizione

Generalmente la piena penetrazione è essenziale per ottenere la massima resistenza a corrosione e la massima integrità strutturale della zona saldata. La diluizione del materiale saldato corrisponde alla proporzione in volume di metallo base fuso presente nel bagno: una diluizione del 30% indica una che il 30% della saldatura è composto da metallo base e il restante 70% da metallo d'apporto. La diluizione aumenta a seconda di tre principali fattori:

- aumento calore fornito;
- arco elettrico rivolto più perso il materiale base che verso la mezzeria del giunto;
- diminuzione dell'angolo di saldatura.

Un aumento eccessivo della diluizione può però aumentare la propensione a criccabilità a caldo del materiale, è quindi necessario scegliere adeguatamente i parametri di saldatura. Un valore tipico per processo di saldatura TIG e acciaio superduplex è del 20%.

3.3.10 Quantità di metallo depositato



La quantità di metallo fornita al bagno della saldatura, solitamente misurata in kg all'ora, corrisponde alla quantità di metallo che può essere depositato in un determinato periodo di tempo. A seconda del tipo di materiale e del procedimento di saldatura impiegato viene stabilito tale valore.

Per acciai superduplex e processo di saldatura TIG il quantitativo di materiale depositato varia tra 0.7 - 1 kg/h ed il diametro dei consumabili è compreso tra 2,00 - 2,40 mm.

3.3.11 Bilanciamento ottimale delle fasi

Teoricamente la fase ferritica e austenitica sono egualmente bilanciate all'interno della struttura dell'acciaio superduplex, tuttavia questo non è rigorosamente esatto poiché i moderni acciai vengono bilanciati per avere un tenore di ferrite tra il 40% e il 50% e la parte restante di austenite. Di norma, si ritiene che le favorevoli caratteristiche dei duplex siano possibili se è presente almeno il 30% di ferrite e la restante parte di austenite. Il bilanciamento delle fasi in ZTA è di norma leggermente sbilanciato verso la ferrite rispetto al materiale base. Questa difformità tra saldatura e materiale base è anche dovuta al fatto che il giunto saldato, a differenza del materiale, non subisce un trattamento termico di solubilizzazione.

3.3.12 Difetti saldatura

Per evitare la formazione di difetti è necessario porre particolare attenzione ai seguenti aspetti:

- controllo della stabilità dell'arco e della fluidità del materiale;
- pulizia sia del giunto che dell'area adiacente;
- sequenza di saldatura e disposizione delle passate;

- purezza del gas di protezione emesso dalla torcia;
- pulizia delle bacchette di consumabile impiegate durante la saldatura;
- controllo del deterioramento dell'elettrodo di tungsteno;
- controllo attrezzatura e utensili utilizzati.

I difetti maggiormente riscontrati risultano incompleta penetrazione, inclusione di ossidi e porosità. Per evitare che si verifichino è necessario fare in modo che i parametri di saldatura siano molto precisi e che la manualità degli operatori sia di altissimo livello.

3.3.13 saldatura di riparazione

Tutti i difetti che si riscontrano vanno adeguatamente riparati. Difetti superficiali come schizzi, scorie e isole di ossido possono facilmente essere rimosse attraverso una molatura seguita da una lucidatura. Tutti gli strumenti usati non devono contaminare il metallo, solitamente si preferisce l'uso di utensili in superduplex. Difetti estesi e difetti interni richiedono invece una rimozione di materiale. Nel caso si riscontri un difetto in prima passata, il tubo a volte viene tagliato, si preparano nuovamente i lembi e la saldatura viene effettuata da capo. Nel caso di difetti nelle successive passate si esegue una molatura fino ad asportare completamente l'imperfezione, successivamente si salda la cavità per riempire il volume di materiale rimosso. Nella saldatura della tubazione da 18" sono consentite fino a 2 riparazioni, superata tale soglia il pezzo deve essere scartato.

3.3.14 Gestione materiale d'apporto

Le bacchette di materiale d'apporto usate per saldare le tubazioni in superduplex sono generalmente composte di superduplex o iperduplex (impiegato soprattutto nelle prime passate o nelle riparazioni in radice). Lo stoccaggio dei pacchi di bacchette va effettuato a temperature controllate di almeno 15°C, con un'umidità relativa non superiore al 50%, condizioni imposte per evitare eccessivi depositi di umidità sul materiale e per preservarne al meglio le proprietà, evitandone il deterioramento.

3.3.15 Sicurezza degli operatori

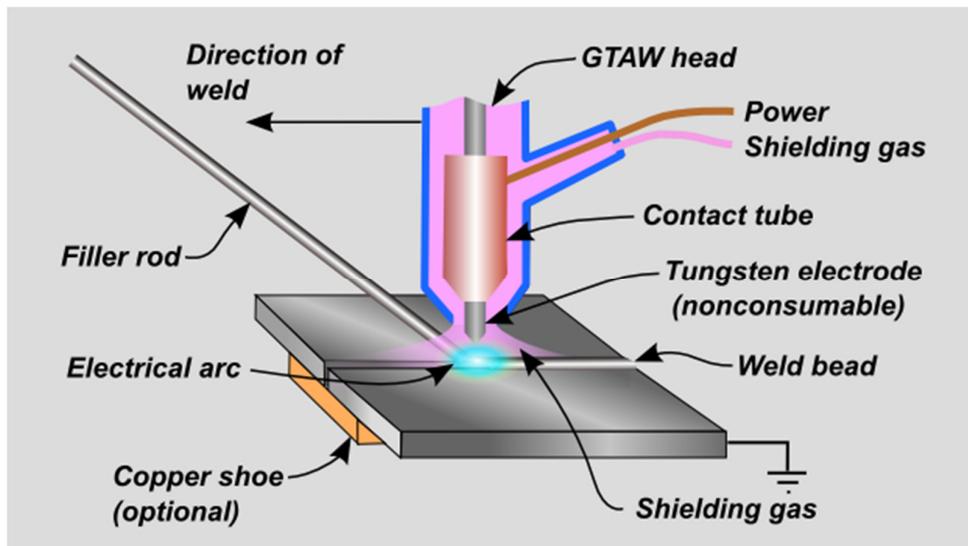
I fumi e le radiazioni generate durante la saldatura possono nuocere la salute dell'operatore. Schizzi, materiale fuso e arco elettrico possono causare bruciate ed innescare incendi, l'uso stesso di attrezzatura ad alto voltaggio

costituisce un pericolo per il lavoratore. A causa di tutti questi rischi durante l'operazione di saldatura è di fondamentale importanza che supervisori e operatori prestino grande attenzione a tali pericoli. Alcuni punti salienti sono riportati di seguito:

- assicurarsi che la ventilazione sia adeguata e che il sistema di eliminazione dei fumi sia correttamente funzionante;
- se si salda in spazi ristretti, utilizzare attrezzatura adeguata per proteggere le vie aeree;
- usare sempre attrezzatura di protezione per corpo, mani e occhi (schermo protettivo, grembiule, guanti);
- tenere l'area di lavoro pulita e asciutta;
- controllare periodicamente che gli equipaggiamenti siano in buone condizioni;
- dove possibile, ricoprire elementi conduttori di elettricità.

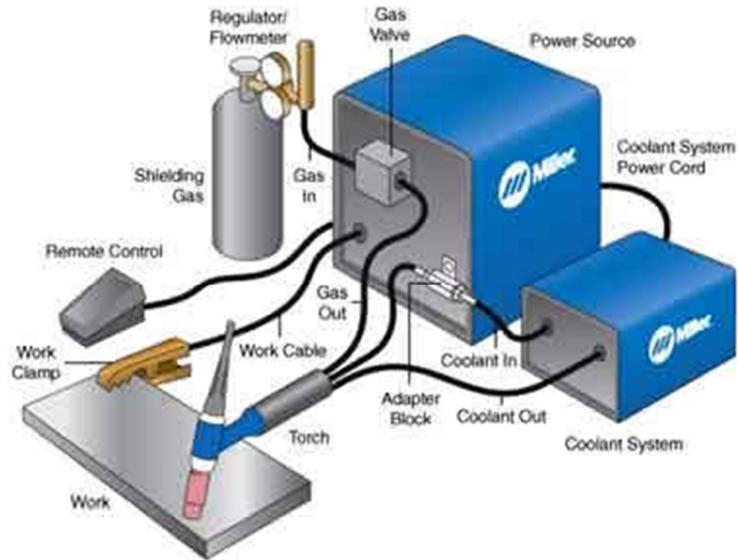
3.4 Procedimento di saldatura TIG

La saldatura con elettrodo non consumabile di tipo TIG (Tungsten Inert Gas), conosciuta anche come GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), è caratterizzata da un'elevata qualità del metallo depositato, ottima precisione ed eccellente penetrazione e regolarità nella prima passata. Per questi motivi tale procedimento di saldatura trova largo impiego nella saldatura di tubazioni già da spessori di 0.3mm. Di seguito vengono indicate le principali caratteristiche del processo TIG.



3.4.1 Apparecchiatura

La saldatura TIG è eseguita con generatori a corrente costante, con circuiti ausiliari ad alta frequenza per l'accensione dell'arco. Il processo va eseguito in corrente continua, polarità diretta (CCPD), con elettrodo al negativo. L'uso di polarità inversa (CCPI) porterebbe al deterioramento dell'elettrodo.



L'elettrodo deve essere di tungsteno toriato al 2 %. Il controllo dell'arco è favorito dall'affilatura conica della punta dell'elettrodo con angolo del cono da 30° a 60° e con l'estremità della punta appiattita. Il cui diametro dell'ugello varia solitamente tra 1.0 e 4.8mm.

3.4.2 Materiale d'apporto

Per la saldatura dell'acciaio superduplex è necessario usare bacchette di materiale d'apporto in superduplex o iperduplex, al fine di avere una struttura più omogenea possibile ed evitare difetti nella saldatura. Il tenore di azoto è in genere leggermente inferiore nel materiale d'apporto rispetto al materiale base. I diametri più usati per i consumabili sono 1,6 - 2,4 - 3,2 mm (1/16", 3/32" e 1/8"). Come già detto, questi devono essere puliti ed asciutti, e conservati in un recipiente adeguato sino all'utilizzo.

3.4.3 Gas protettivo

Nella saldatura TIG è essenziale che il bagno di fusione sia protetto dall'ossidazione e dalla contaminazione atmosferica. Di norma, tale protezione può essere ottenuta con argon puro al 99,998%, oppure con argon miscelato con un 2% di azoto, allo scopo di incrementare la resistenza a corrosione. E'

importante che il circuito del gas sia pulito, asciutto e privo di perdite, e che il gas possa scorrere in modo regolare per proteggere adeguatamente il bagno, senza creare turbolenze o aspirare aria nel gas di protezione.

Il flusso di gas deve iniziare alcuni secondi prima dell'accensione dell'arco e deve essere mantenuto alcuni secondi dopo il suo spegnimento, per un tempo tale da consentire alla zona fusa ed alla ZTA di raffreddarsi al di sotto dell'intervallo di ossidazione dell'acciaio inossidabile.



Per la protezione dell'elettrodo, sono suggerite portate di 12–18 l/min usando un comune diffusore di gas o con valori ridotti alla metà in caso di semplici ugelli. Le portate del gas di protezione al rovescio (a sua volta argon puro) dipendono dalle dimensioni della tubazione, ma devono essere adeguate ad assicurare la completa rimozione dell'aria e la completa protezione del giunto. Dato che l'argon è più pesante dell'aria, l'alimentazione deve avvenire dal basso verso l'alto del volume interessato e la misurazione della presenza di ossigeno va effettuata dall'alto.

3.4.4 Apporto termico

L'apporto termico da utilizzare va scelto in relazione all'intervallo di spessore del materiale base, alla geometria del giunto ed ai parametri di saldatura. Di norma è compreso nell'intervallo tra 0,7 kJ/mm e 1,4 kJ/mm, come calcolato con la relazione precedentemente descritta. E' raccomandato un apporto termico molto inferiore nella seconda e terza passata rispetto alla prima, per evitare formazione di precipitati alla radice.

3.5 Metodi di controllo non distruttivi

Si definisce controllo non distruttivo, in gergo NDC (Non Destructive Test), l'insieme di esami, controlli e rilievi svolti utilizzando metodi che non modificano e alterano la struttura in esame. Tali controlli sono un requisito fondamentale al fine di poter garantire l'osservanza dei requisiti progettuali. Sugli acciai superduplex possono essere impiegati un'ampia gamma di NDC, di seguito sono elencati quelli necessari per l'ispezione della linea da 18" della piattaforma West franklin.

3.5.1 Controllo visivo (VT - Visual Test)

Ispezione del prodotto saldato con appositi strumenti quali calibri di saldatura, lenti o endoscopi a basso ingrandimento, che ne attestano la conformità alle norme applicabili. Può essere di tipo informale, se operato dal saldatore o da un ispettore dell'azienda, o formale, nel caso in cui ad effettuarlo è un ispettore della qualità qualificato.

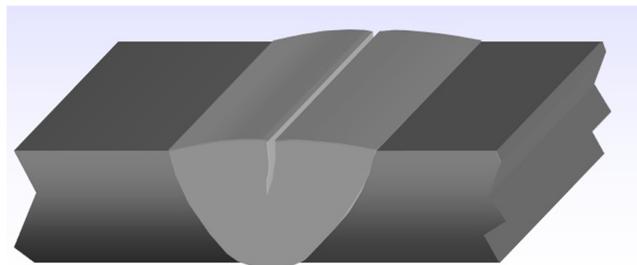


Tale controllo può essere fatto: prima di saldare, dopo la saldatura o durante la saldatura e deve essere sempre certificato.

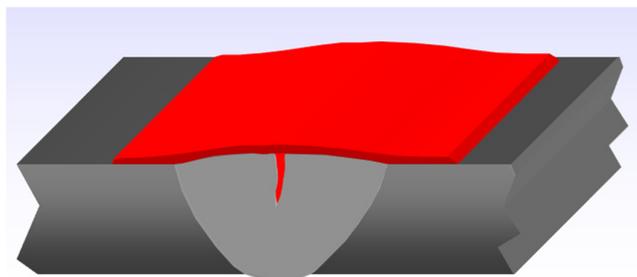
3.5.2 Ispezione con liquidi penetranti (PT - Penetrant Test)

L'esame con i liquidi penetranti sfrutta la capacità di alcuni liquidi colorati penetranti di introdursi, per capillarità, all'interno dei difetti superficiali. La procedura può essere riassunta in 5 fasi principali di seguito elencate.

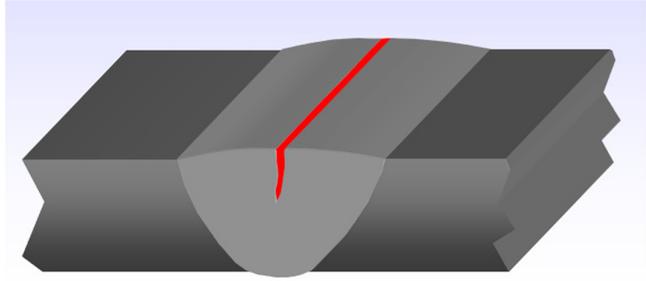
- 1) Pulizia della superficie della saldatura mediante solventi.



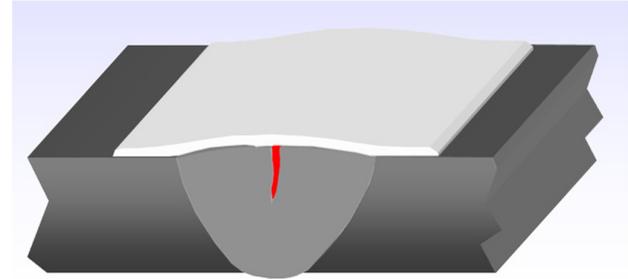
- 2) Applicazione del liquido penetrante sulla superficie del pezzo e attesa di circa 15min per consentire allo stesso di infiltrarsi per capillarità in tutte le eventuali fessure presenti sul cordone di saldatura.



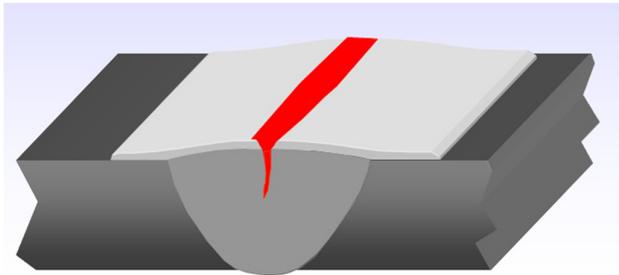
- 3) Rimozione del liquido penetrante rimasto in superficie, avendo cura di non rimuoverlo anche dai difetti presenti.



- 4) Applicazione di un sottile strato di sviluppatore. Tale liquido in forte Contrasto con i penetranti, innesca una reazione di capillarità inversa che fa fuoriuscire piano piano il liquido penetrante dalle cavità.



- 5) Dopo l'azione dello sviluppatore è possibile effettuare un'ispezione della superficie nella quale viene evidenziata l'eventuale presenza di difetti, con evidenti zone del colore del penetrante. Segue un'attenta pulizia del pezzo per rimuovere ogni residuo del processo.

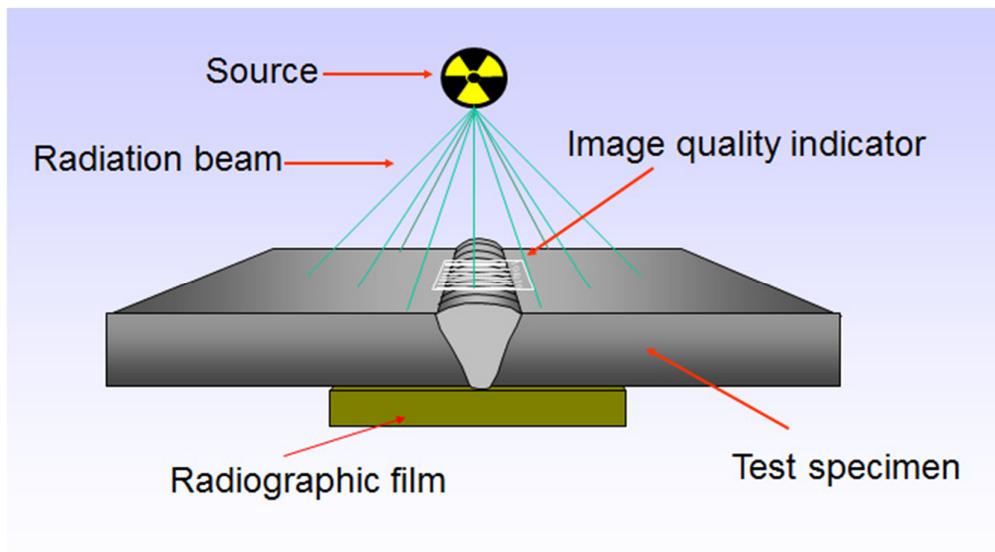


Il metodo dei liquidi penetranti risulta di semplice impiego, economico e rapido ma il suo svantaggio maggiore è che in grado di evidenziare solo difetti superficiali, con un'indefinita indicazione della loro profondità.

3.5.3 Ispezione radiografica (RT - Radiographic Test)

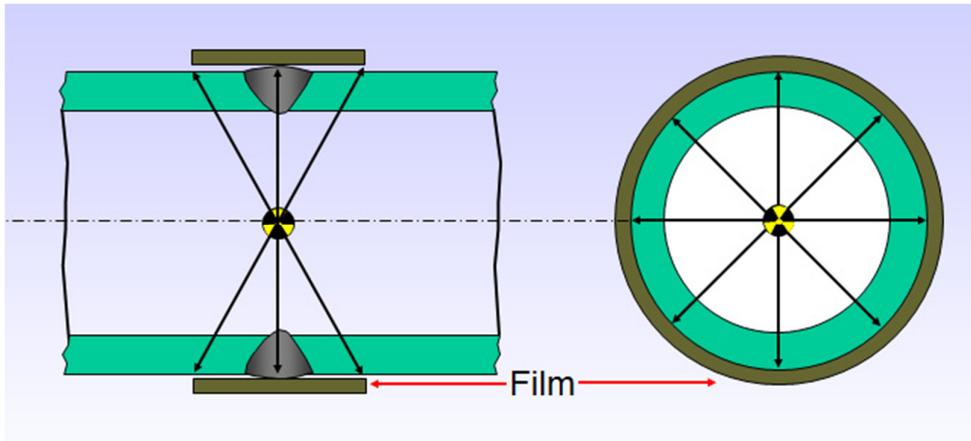
Questo tipo di ispezione si basa sull'uso di raggi x, generati elettricamente, e gamma γ , generati dal decadimento di un atomo instabile. Queste sono radiazioni in grado di penetrare i corpi e gli oggetti e imprimere la pellicola in modo differente in funzione delle caratteristiche fisiche e della densità del materiale attraversato.

Da un lato dell'oggetto da radiografare si pone una fonte radiogena, cioè un apparecchio munito di una sorgente che se estratta emette raggi x o γ , dall'altro lato (e possibilmente a contatto con esso) invece viene posizionata una lastra radiografica, che verrà impressa in maniera proporzionale alla quantità di radiazione da cui viene colpita. A parità di radiazione ricevuta, ogni zona della pellicola si presenterebbe con lo stesso annerimento. In realtà i Rx e Ry vengono attenuati di meno in quelle zone delle saldature dove sono presenti imperfezioni e che pertanto hanno una densità minore della lega metallica di cui sono composte, con il risultato di apportare alla pellicola radiografica una quantità maggiore d'energia con l'effetto di un maggior annerimento in quella sua specifica zona interessata dall'area della discontinuità o del difetto. Viceversa nel caso contrario di densità maggiore, come accade per le inclusioni di tungsteno nelle saldature realizzate in TIG, l'annerimento sarebbe inferiore.

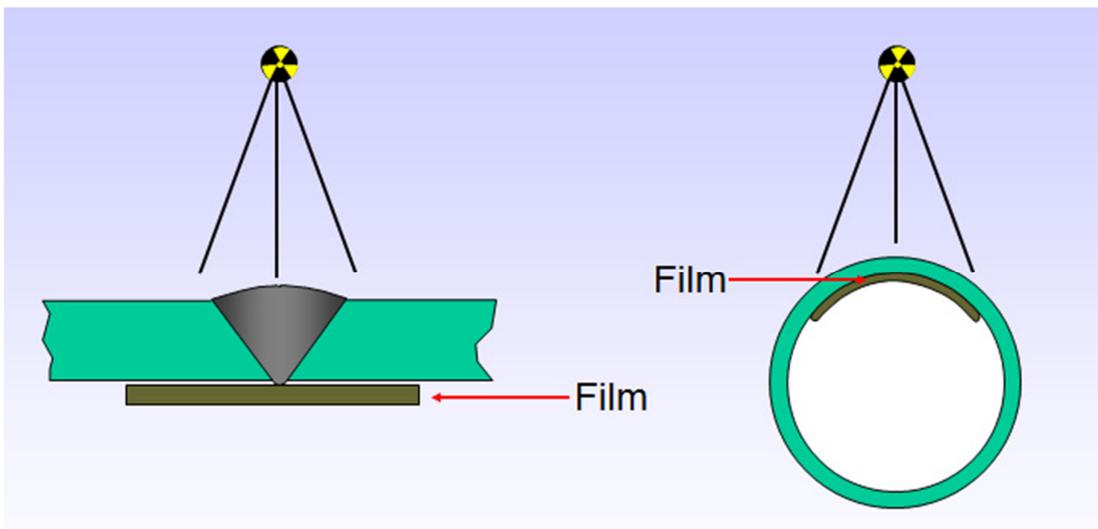


I metodi impiegati nell'ispezione delle tubazioni da 18'' e 75mm di spessore sono principalmente i due illustrati di seguito.

- *Singola superficie, singola immagine* - pellicola all'interno del tubo e sorgente all'esterno.



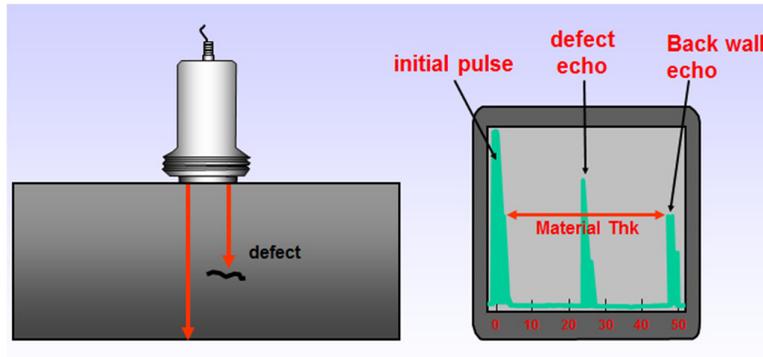
- *Singola superficie, singola immagine panoramica* - pellicola all'esterno del tubo e sorgente all'interno.



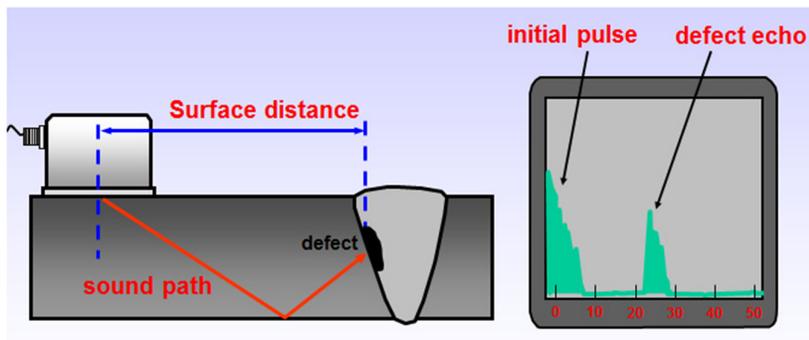
I vantaggi dell'ispezione radiografica sono la possibilità di conservare gli esiti nel tempo, grazie all'uso di lastre, l'identificazione dei difetti e l'ampio range di spessori a cui può essere applicata. I principali svantaggi sono, invece, l'elevato costo dell'attrezzatura, l'emissione di radiazioni nocive per l'uomo e un'imprecisa intificazione della profondità del difetto.

3.5.4 Ultrasuoni (UT - Ultrasonic Test)

Il metodo sfrutta la proprietà del suono di propagarsi nei corpi mediante la vibrazione elastica degli atomi delle molecole che lo compongono ad una velocità dipendente dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato.



La presenza di imperfezioni o disomogeneità nel metallo provoca la dispersione delle onde, fenomeno che si può manifestare con la presenza di eco spurie, riverberi e, in generale, attenuazioni dell'onda sonora. La peculiarità di questo tipo di ispezione è che consente un'ispezione sia sopra che sotto la superficie della saldatura.



Per fare questo viene impiegata una sonda contenente un cristallo piezoelettrico che trasmette e riceve, a frequenze di circa 2 MHz, pulsazioni ultrasonore e mostra a video il segnale rilevato.

Tra il pezzo e la sonda viene interposto un liquido un modo da lubrificare l'accoppiamento e consentire una propagazione delle onde ottimale.



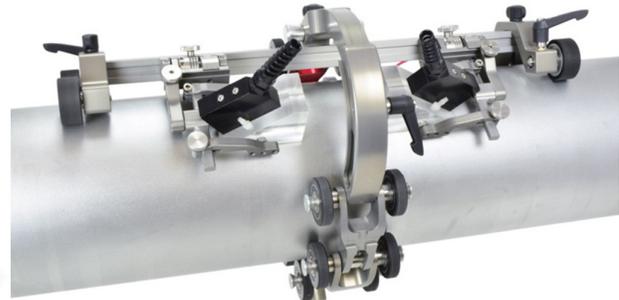
Dove possibile viene impiegato il phased array (PA). Tale metodo consiste in un controllo ad ultrasuoni effettuato facendo scorrere la sonda su di una guida che avvolge il giunto saldato, in modo da avere un'immagine completa di tutto il giunto. Al termine dell'ispezione, a differenza del controllo ad ultrasuoni convenzionale, è possibile salvare l'ispezione su disco o su di un supporto rigido, in modo da avere una prova del controllo duratura nel tempo.



UT CONVENZIONALI



UT CONVENZIONALI CON PA



I vantaggi dell'uso di ispezioni mediante ultrasuoni sono la rapidità e la completezza dei controlli, sia superficiali che interni, la capacità di individuare la profondità del difetto e l'impiego di un'attrezzatura portatile. Gli svantaggi sono la necessità di un personale altamente qualificato e di una superficie adeguatamente rifinita, e, nel caso dei metodi convenzionali, l'assenza di una prova duratura nel tempo, in quanto i risultati vengono mostrati a video e l'operatore li interpreta individuando entità e profondità de difetti, svantaggio non presente se si utilizza il phased array.

3.5.6 Contenuto di ferrite

Per effettuare tale controllo si utilizza un ferritoscopio. Tale strumento emette un campo magnetico e fornisce una misura accurata del contenuto di ferrite all'interno del materiale.



3.6 Metodi di controllo distruttivi

I controlli distruttivi su giunti saldati sono solitamente effettuati con lo scopo di approvare la procedura di saldatura, approvare i saldatori, effettuare i controlli di qualità sulle saldature. Resistenza e durezza vengono determinati usando campioni di materiale appositamente preparati sottoposti a forze di varia entità in modo da determinare i limiti del materiale stesso.

Le caratteristiche del materiale interessate da questo tipo di test sono:

- **Malleabilità** – capacità di deformazione del materiale quando sottoposto a forte carico di compressione;
- **Duttilità** – capacità di deformazione del materiale se sottoposto a sforzo assiale;
- **Resistenza** – capacità del materiale di piegarsi senza rompersi;
- **Durezza** – misura della resistenza a indentazione del materiale.

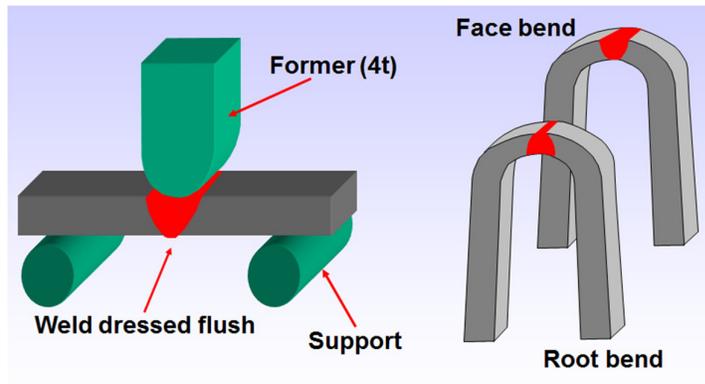
I controlli distruttivi previsti sui giunti della linea da 18" sono i descritti di seguito.

3.6.1 Prova di piegatura

Obiettivo di questo test è stabilire la validità della zona saldata e dare una stima della duttilità della stessa. Solitamente vengono impiegati tre tipi di test:

- piegatura della faccia;
- piegatura della prima passata;
- piegatura del lato.





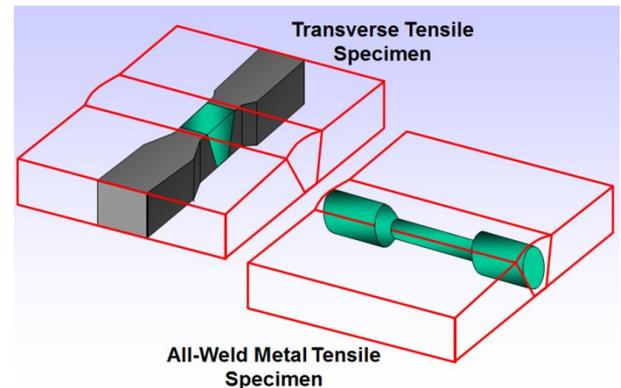
La prova da come risultati:

- spessore e dimensioni del provino;
- direzione di piegatura (una delle sopraelencate);
- angolo di piegatura (90°, 120°, 180°);
- diametro del deformatore;
- descrizione del giunto dopo la prova, tipo e posizione di ogni difetto.

3.6.2 Prova di trazione

Tale prova viene impiegata per stabilire carico di snervamento (yield strength), carico di rottura (ultimate tensile strength) e allungamento percentuale (duttilità) della zona saldata. Questa può essere di due tipi:

- trazione trasversale (perpendicolare al cordone di saldatura);
- trazione sul cordone di saldatura (solo zona saldata).



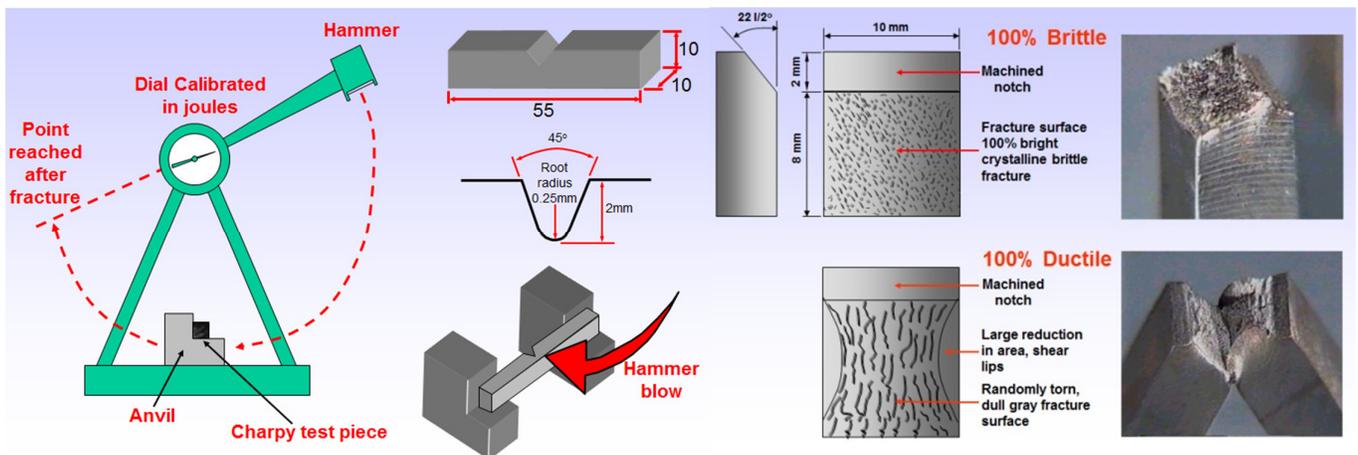
Il massimo carico applicabile è di circa 220 kN e la sezione minima del provino è di 25x12mm (300mm²). La resistenza è definita come il carico applicato in un certo istante di tempo diviso l'area del provino al medesimo istante.

I risultati della prova sono:

- tipo e dimensioni del provino;
- grafico dell'allungamento del provino in funzione del carico applicato;
- resistenza del provino (differente a seconda dell'istante preso in considerazione);
- allungamento percentuale;
- posizione della frattura;
- tipo e dimensione di eventuali difetti.

3.6.3 Prova di resilienza (Charpy)

Questo tipo di prova serve per misurare l'energia necessaria per rompere un provino di dimensioni prestabilite. Per fare questo si usa un pendolo che, una volta alzato ad una determinata quota e rilasciato, impatta sul provino e in base all'altezza che raggiunge viene calcolata l'energia persa nell'urto. In questo tipo di prova ha grande importanza la temperatura del provino, stabilita in base alle procedure di riferimento.



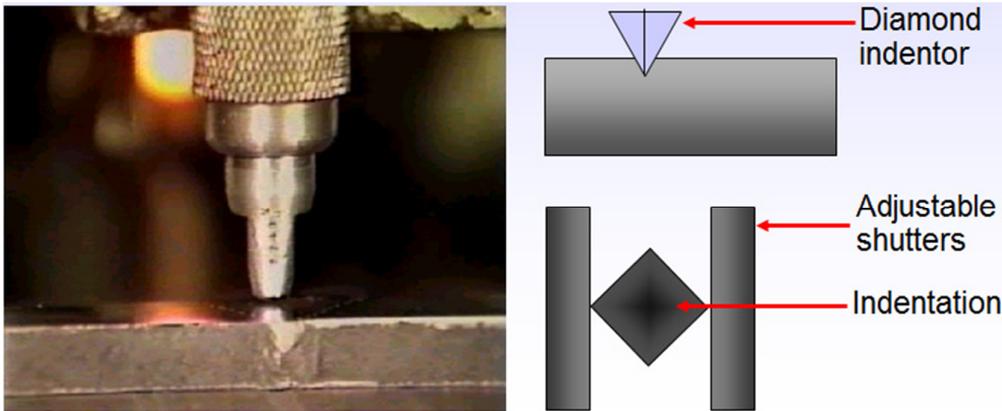
La prova da come risultati:

- dimensioni del provino;
- posizione e orientamento dell'intaglio ricavato sul provino;
- temperatura del test;
- energia assorbita;
- descrizione della frattura;
- descrizione di altri eventuali difetti riscontrati.

3.6.4 Prova di durezza Vickers

Con questo tipo di prova si misura la durezza del materiale mediante indentazione. Tale operazione viene eseguita utilizzando un penetratore che viene appoggiato al pezzo e sottoposto ad un certo carico, lasciando un'impronta in base alla quale potrà essere stimata la durezza del materiale. I parametri che definiscono la prova sono:

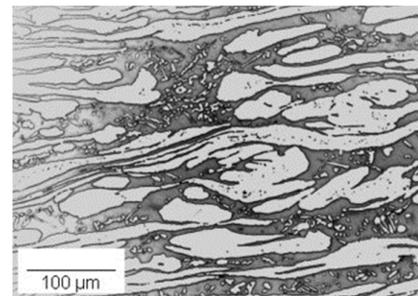
- carico applicato;
- come viene applicato il carico;
- tipo di penetratore usato.



Nella prova Vickers viene impiegato un penetratore piramidale a base quadrata, applicando un carico tra 1 e 100kg per 15 secondi. Finita la prova, viene misurata la diagonale dell'impronta lasciata usando un apposito microscopio che mostra la macrografia della zona del pezzo interessata.

3.6.5 Contenuto di ferrite

Tale prova viene eseguita in fase di qualifica per controllare il quantitativo di ferrite all'interno del materiale.



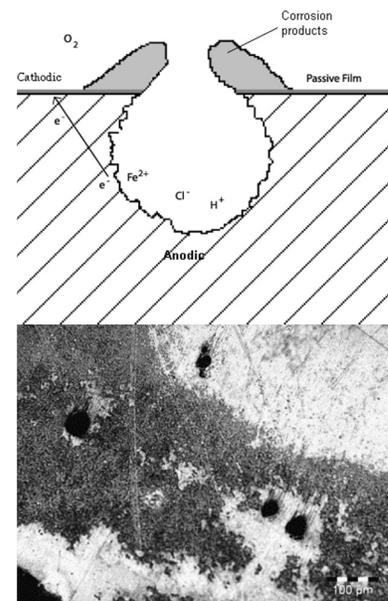
A seconda del processo di saldatura impiegato e dei parametri utilizzati, il tipo di struttura può subire ampie variazioni, per questo è necessario controllarlo sia in fase preliminare attraverso di particolari micrografie effettuate su campioni prelevati da vari punti del giunto di prova saldato.

3.6.6 Controllo metallografico

Per assicurarsi che la struttura finale del materiale sia conforme alle specifiche richieste, è necessario effettuare diverse micrografie e macrografie in diversi punti della saldatura. Particolare attenzione va alle caratteristiche di ferrite e austenite e alla presenza di precipitati o impurità.

3.6.7 Resistenza a corrosione da crepe e pitting

Questo tipo di test viene condotto per identificare ed esaminare la suscettibilità a corrosione del materiale in ambienti aggressivi, in modo da poter stimare la vita del materiale. La corrosione con pitting consiste in una formazione sul materiale di piccoli fori che solitamente tendono a formare vere e proprie cavità al di sotto della superficie della saldatura. La corrosione con crepe consiste, invece, nell'innesco della corrosione nelle fessure e nei difetti presenti sulla saldatura. Tutti i parametri e le norme relative sono contenute nella normativa ASTM G48.

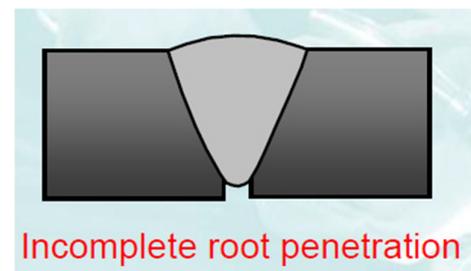


3.7 Difetti saldatura

Le imperfezioni possono compromettere la funzionalità della saldatura. Con tale termine si indicano tutte le irregolarità e le discontinuità riscontrate durante i controlli sulla saldatura. Un difetto è un tipo di imperfezione che ha impatto negativo sull'uso e sulla funzione dell'elemento saldato. I livelli di accettabilità per i vari tipi di imperfezione sono descritti in apposite specifiche internazionali. Nel caso in cui il cliente richiedesse tolleranze più strette, queste saranno contenute in apposite specifiche emesse dall'ente stesso. Di seguito verranno esaminati alcuni dei più comuni difetti che si possono riscontrare durante la saldatura di tubazioni in acciaio superduplex, mostrano anche le possibili cause che li hanno provocati.

3.7.1 Mancata penetrazione

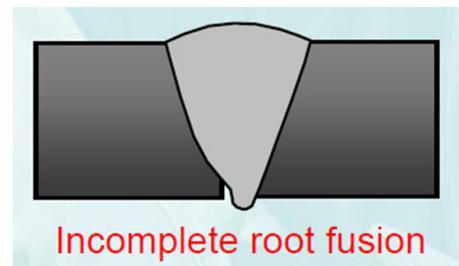
Grave imperfezione non accettabile, facilmente rilevabile da test visivi, a ultrasuoni e radiografici. Tale fenomeno è solitamente dovuto ad un bagno di fusione troppo largo o



ad una velocità di avanzamento talmente alta che non consente il deposito del materiale fuso. Nel caso si presenti, è necessario tagliare il giunto, ripreparare i lembi e ricominciare da capo la saldatura.

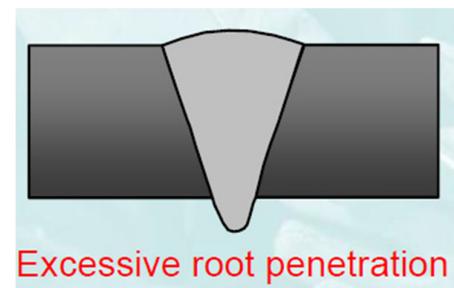
3.7.2 Incompleta penetrazione

Una completa penetrazione è essenziale per l'integrità strutturale del giunto e per ottenere le giuste proprietà meccaniche e di resistenza a corrosione. Il fenomeno può essere individuato tramite ispezione visiva, liquidi penetranti, radiografia o ultrasuoni. Spesso è causata da un'eccessiva distanza tra i giunti, diametri del consumabile troppo grandi ed errati parametri di saldatura (insufficiente corrente, eccessivo voltaggio). Se si presenta tale difetto la è necessario tagliare il giunto, preparare i lembi e rifare la saldatura da capo.



3.7.3 Eccessiva penetrazione

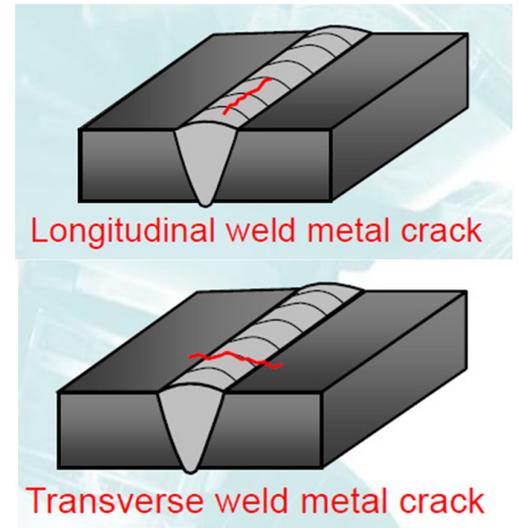
Tale fenomeno può formare punti di concentrazione delle tensioni ed influenzare la resistenza a fatica e a corrosione. E' facilmente individuabile da con ispezioni visive ed è causato da inadeguati parametri di saldatura, che vanno adeguatamente corretti, e da una bassa velocità di avanzamento, che può addirittura fare colare il materiale sotto il bagno.



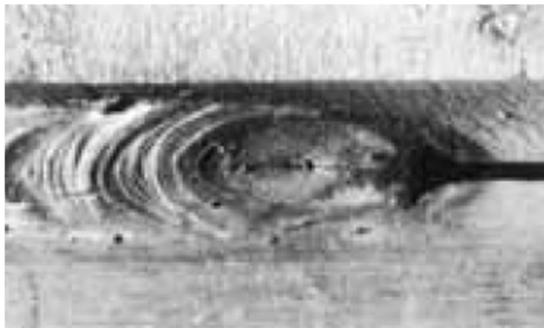
3.7.4 Rottura a caldo

Una rottura a caldo, ha effetti negativi sulla resistenza a corrosione del materiale e sull'integrità strutturale del giunto.

Nel peggiore dei casi è persino in grado innescare una rottura dell'intero componente. Essa è solitamente causata da eventuali tensioni residue e saldature ripetute con formazione di fasi diverse. Questo tipo di difetti sono facilmente individuabili con ispezioni mediante liquidi penetranti (se superficiali) o con ultrasuoni e radiografie (se interni). Nella linea da 18'' in esame tali difetti non sono mai tollerati, se presenti è necessario riparare la saldatura e ricontrollarla.



3.7.5 Rottura a cratere

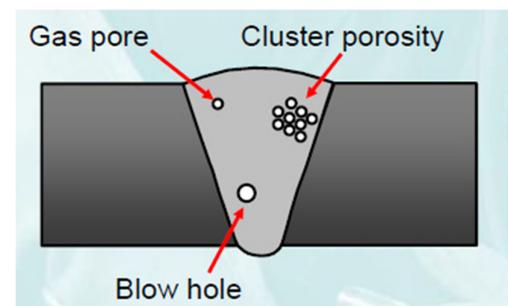


Tale difetto può avere effetti determinanti sull'integrità strutturale e sulla resistenza a corrosione. Può risultare molto dannoso nel caso in cui il pezzo sia soggetto a fatica. La rottura a cratere è facilmente individuabile da ispezione visiva, liquidi penetranti, radiografie e ultrasuoni, ed è dovuta principalmente ad una scorretta estinzione dell'arco.

Se si presentasse in prima passata il difetto non è accettabile, mentre nelle successive solitamente è possibile riparare la saldatura, scavando la parte interessata e risaldando in modo da colmare il volume rimosso.

3.7.6 Porosità

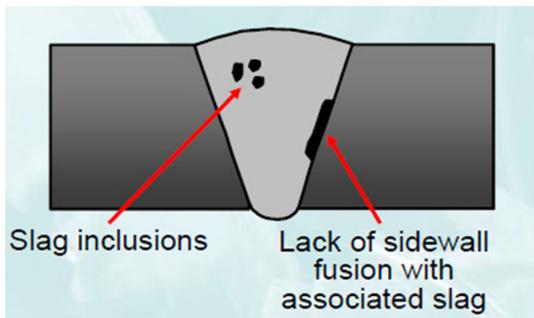
La porosità è un difetto critico per la funzionalità di una saldatura, soprattutto se presenta anche una superficie frammentata. Tale fenomeno è per lo più causato dalla presenza di umidità o impurità sul pezzo o sul consumabile e da un'inappropriata protezione del bagno. Può essere individuata con radiografie ed ultrasuoni, se superficiale è sufficiente anche solo un'ispezione visiva.



Per evitare questo tipo di difetto è necessario preservare correttamente le bacchette di consumabile, prestare attenzione se si salda in ambienti esterni, pulire adeguatamente la superficie prima della saldatura e controllare adeguatamente l'attrezzatura.

3.7.7 Inclusione di scorie

Tale difetto se di piccole dimensioni può anche essere accettato in certi casi, ma per la saldatura della tubazione da 18" non è tollerato in quanto può comunque innescare cricche e altri effetti che compromettono l'integrità del giunto.



Individuabili mediante ultrasuoni o radiografie, le inclusioni sono spesso dovute a scorie della precedente passata, incorretti parametri di saldatura e inappropriata rimozione dei distanziali di sostegno. Per porvi rimedio è necessario mantenere un arco elettrico ottimale, evitare di saldare giunti troppo vicini o troppo lontani e cercare di fare un cordone di saldatura con forma appropriata.

3.7.8 Schizzi

Gli schizzi che aderiscono alla superficie possono essere punti di innesco per la processi di corrosione , per tale motivo è necessario rimuoverli per preservare le proprietà del giunto. Facilmente individuabili da ispezioni visive, tali difetti possono essere causati da un inappropriato impiego del gas protettivo, parametri di saldatura non ottimali, presenza di grasso, contaminazione con sporcizia, olio o grasso.

Per fare in modo che non siano presenti schizzi sulla superficie è quindi necessario mettere a punto in modo corretto i parametri di saldatura, impiegare correttamente il gas di protezione, pulire bene la zona di saldatura e non usare mai elettrodi sporchi o contaminati da agenti nocivi.

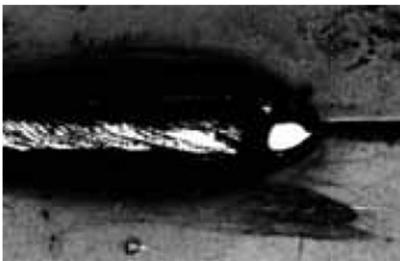


3.7.9 Erosione



Questo tipo di difetto può essere un punto di concentrazione delle tensioni, in grado di ridurre la resistenza a fatica del pezzo, e di innesco per la corrosione. E' facilmente visibile con un'ispezione visiva ed è solitamente causato da un bagno con fusione non ottimale, alte velocità e correnti di saldatura, eccessivi diametri del consumabile e arco elettrico non adeguato. Per rimediare a tali difetti solitamente è sufficiente aggiustare o rivedere i parametri di saldatura impiegati, e, nel caso in cui si presentino, è possibile ripararli facilmente.

3.7.10 Sfondamento

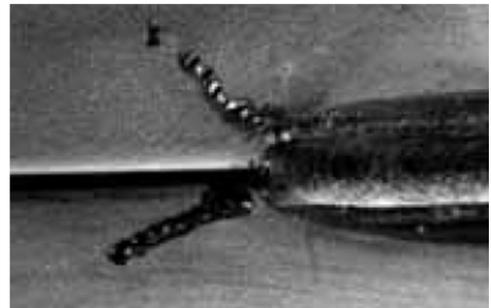


Tale difetto viene riscontrato solitamente nelle prime passate quando lo spessore di materiale del giunto è minimo, all'occorrenza è necessario tagliare il giunto, ripreparare i lembi e rifare la saldatura poiché la saldatura sarebbe interamente compromessa.

E' individuabile con ispezione visiva ed è causato da voltaggi e/o correnti troppo elevati, bacchette con diametri troppo grandi, basse velocità di avanzamento ed eccessiva larghezza del giunto.

3.7.11 Inneschi dell'arco elettrico

Fenomeno in grado di provocare punti di innesco per la corrosione superficiale e pericolose cricche. E' facilmente visibile con ispezioni visive e solitamente è causato da un'impropria manipolazione della torcia. Tale difetto può essere evitato se si innesca l'arco all'interno del bagno di saldatura.



CAPITOLO 4

Procedimento di qualifica tubazione di diametro 18”

4.1 Introduzione

La qualifica del procedimento è una fase essenziale nella costruzione. Essa deve avvenire con congruo anticipo rispetto alla tempistica di inizio di fabbricazione per permettere di adeguare la strategia di costruzione ai risultati ottenuti e per permettere di individuare problematiche legate non solo alla saldatura ma anche alla fornitura di componenti e materiali base, mettendo in pratica azioni di rimedio.

Di seguito verrà esaminata la qualifica della saldatura per la linea in superduplex 18" di 75mm di spessore.

4.2 Requisiti delle specifiche

Alla linea in esame sono applicate diverse specifiche contenute nel contratto e diverse normative di saldatura e controlli non distruttivi, quali:

- *Normative standard:*
 - ATSM G 48 – contenente test di resistenza a corrosione e pitting, criteri di resistenza degli acciai inossidabili in soluzioni con cloruro di ferro;
 - ATSM E 562 – standard per il controllo del volume di ferrite e austenite all'interno del materiale;
 - ISO15156 – materiali utilizzati in ambienti con H₂S nel settore oil and gas;
 - EN 287 – test per l'approvazione di saldatori e saldature;
 - EN ISO 15614 – descrizione, qualificazione e test delle procedure di saldatura su materiali metallici;
 - EN 473 – principi generali per qualificazione e certificazione del personale addetto ai controlli non distruttivi;
- *Codici di riferimento:*
 - ASME section IX (process piping) – contiene regolamenti relativi alle procedure di saldatura ed alla qualifica dei saldatori e dati relativi ai parametri di saldatura essenziali e aggiuntivi;
 - ASME section VIII – costruzione boiler e serbatoi in pressione;
 - ASME section V – definizione dei metodi di controllo non distruttivi;
 - ASME B31.3 – contiene i requisiti necessari per costruzione, progettazione, assemblaggio, certificazione e controllo di tubazioni (piping) all'interno del settore oil and gas e descrive, inoltre, i materiali e le tecniche impiegati;

- Specifica del cliente numero 614 – contenente indicazioni riguardanti la realizzazione, il controllo e la certificazione delle saldature su tubi in acciaio duplex e superduplex.

Considerati i codici e le normative citati e le caratteristiche di pressione e temperatura a cui è soggetta la linea, si trovano alcuni valori tabulati da incontrare durante le prove di laboratorio quali:

- trazione a temperatura ambiente (20°C):
R_{P0.2 min}= 550 MPa R_{m min}= 750 MPa;
- trazione a caldo ad una temperatura di 190°C:
R_{P0.2 min}= 435 MPa R_{m min}= 670 MPa;
- resilienza minima a -46°C: 40 J;
- durezza: HV 10;
- resistenza a corrosione con pitting test a 40°C per 24h:
perdita di peso massima = 4 g/m²;
- bilanciamento delle fasi: contenuto di ferrite= 35-65%;
- assenza di composti intermetallici.

Nei codici applicabili sono indicate anche una serie di limitazioni e regolamentazioni per la qualifica del procedimento che influenzano il grado del materiale (nella linea esistono tre gradi diversi di superduplex e vanno tutti testati), la dimensione geometrica del giunto di prova su cui effettuare la PQR. Per effettuare una qualifica sul 18"x75 è stato necessario adoperare una prova di saldatura proprio del medesimo spessore e diametro.

Nelle specifiche del Cliente sono contenute anche una serie di raccomandazioni e imposizione di costruzione derivanti da standard applicati dal cliente finale, che spaziano dalla preparazione e l'accoppiamento, fino ai valori delle caratteristiche da incontrare nelle prove di laboratorio.

Un'altra importante conseguenza delle specifiche applicabili è la limitazione sui processi di saldatura: gli unici processi di saldatura ammessi per questo tipo di tubazione sono il TIG e arco sommerso.

4.3 Problemi riscontrati in qualifica

Durante la fase di sperimentazione iniziale, la versatilità del TIG , impiegato sia in prefabbricazione che al montaggio di giunti di installazione, e la scarsa affidabilità della saldatura ad arco sommerso per questi materiali (eccessivamente sensibile all'umidità, alla formazione di porosità) hanno spinto a scegliere il TIG come processo per la qualifica e la produzione.

La problematica del TIG è che si tratta di un metodo che può essere adoperato solo con operatori molto esperti e di manualità molto qualificata. Se eseguito correttamente però tale processo garantisce il massimo livello di qualità dal punto di vista della saldabilità del superduplex.

Durante la fase di qualifica i problemi principali sorti sono riconducibili alla tenacità alla radice quando viene testata a -46°C e la resistenza a corrosione. La problematica probabilmente è riconducibile allo stato di fornitura del materiale. Il piping infatti viene fornito allo stato solubilizzato, il trattamento termico importante perché restituisce al materiale le sue proprietà prima degli stress meccanici e termici ricevuti durante la produzione. Tale processo risulta però molto complesso se implementato su tubazioni di questa dimensione: la parte esterna del tubo risulta solubilizzata molto bene, mentre sulla superficie interna l'efficacia del trattamento è minima. Ne consegue che la tenacità di partenza del materiale è molto buona verso la superficie esterna e deperisce mano a mano che si va a rilevarla nello spessore verso la superficie interna, mostrando anche differenze superiori al 70% tra le due superfici.

Questa difficoltà si ripercuote in modo drastico ed inevitabile anche sulla saldatura, che è un processo che genera una zona termicamente alterata in cui le proprietà di resilienza sono spesso inferiori a quelle in zona fusa ed in zona termicamente alterata.

Ne risente anche la capacità di resistenza alla corrosione: i test di pitting eseguiti sulle prove di saldatura dei primi campioni di tubo mostravano problemi in zona termicamente alterata alla radice, cioè nella zona che ha beneficiato meno degli effetti della solubilizzazione. Oltre alle proprietà meccaniche inferiori, in tale zona veniva anche riscontrata una presenza eccessiva di precipitati e fasi intermetalliche.

4.4 Controlli effettuati ed esiti riscontrati

La micrografia e l'analisi della struttura del materiale sono stati test fondamentali per comprendere la problematica dovuta allo stato di fornitura dei tubi. La micrografia permette infatti di capire in che stato è il materiale prima e dopo la saldatura e come questo reagisca agli acidi in sede di corrosione.

Altro importante test adottato a campione su tutti i tubi della linea da 18" è il test di resilienza a -46°C, con prelievi nella superficie interna. Questo test permette di capire quali barre di tubo sono accettabili per la qualifica e la produzione e quali invece sono da considerare materiale non conforme, da trattare quindi con una procedura per risanarlo o sostituirlo.

4.5 Soluzioni adottate

La soluzione principale consiste nel ripetere la solubilizzazione alle parti di tubo dove il livello del trattamento iniziale non ha dato esiti soddisfacenti.

Sono stati individuate situazioni da evitare, come difetti geometrici che in condizioni "normali" sarebbero stati considerati trascurabili. Sono risultati di grande importanza:

- la finitura del cordone;
- il raccordo con il materiale base;
- corretto apporto termico da adoperare durante la saldatura.

Un apporto termico troppo basso, infatti, spesso non è preferibile in quanto non permette un adeguato bilanciamento delle due fasi ferrite ed austenite, mentre apporti troppo elevati vanno esclusi perché generano la formazione di precipitati e composti intermetallici pericolosi come la fase σ (sigma) e quindi fragilità alla corrosione e perdita di tenacità.

Altro fattore importante, scoperto per via sperimentale è l'importanza dell'Azoto nel processo. Tale elemento viene impiegato nel gas di protezione al rovescio (in uscita dalla torcia) in miscela al 2% con l'Argon, e usato soprattutto per la saldatura del primo strato, permettendo così un notevole incremento della resistenza a corrosione ed una leggera spinta verso la fase austenitica del bilanciamento.

CAPITOLO 5

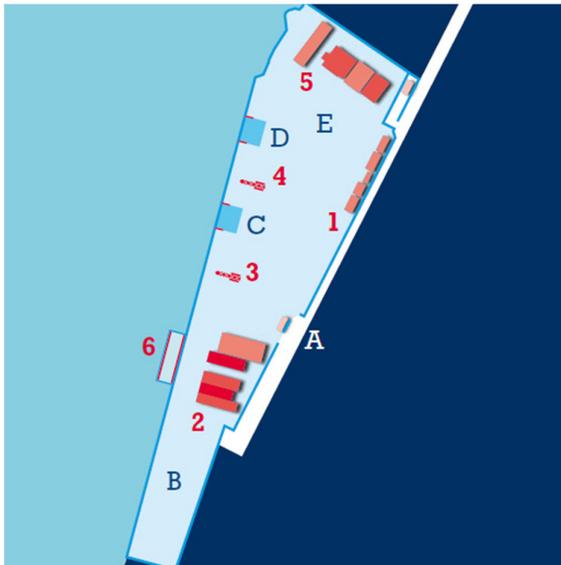
Applicazione in fase costruttiva

5.1 Organizzazione operazioni in cantiere

La costruzione e il montaggio della linea da 18" in acciaio superduplex avvengono all'interno del cantiere Piomboni. Situato a Marina di Ravenna nei pressi del porto, esso comprende un'area di 103000m² con una banchina lunga 450m in grado di ospitare navi da lavoro e chiatte da trasporto, progettata per sopportare carichi molto elevati.

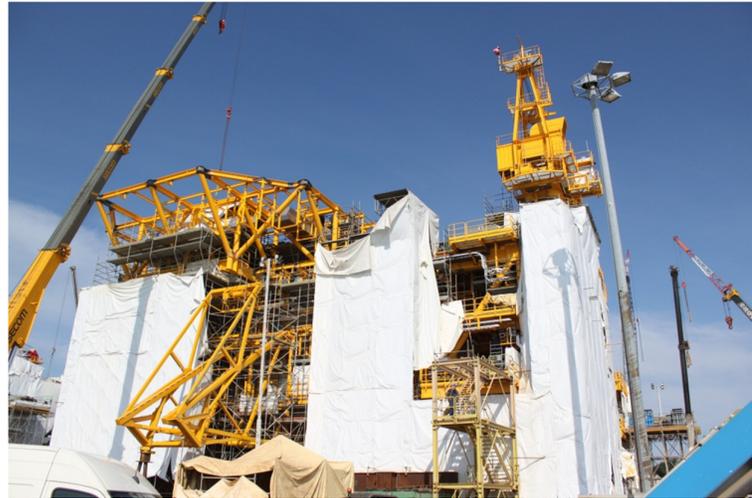


Il cantiere viene usato per la realizzazione e il carico su nave dei progetti destinati al mercato offshore acquisiti dall'azienda, per questo al suo interno operano molte aziende che collaborano con Rosetti, ognuna specializzata in una determinata fase della costruzione.



- A- Ingresso e parcheggio
- B- Area magazzino
- C- Zona costruzione jacket
- D- Zona costruzione moduli
- E- Zona assemblaggio
- 1- Uffici
- 2- Officine e capannoni
- 3- Gru da 350t
- 4- Gru da 210t
- 5- Area sabbiatura e verniciatura
- 6- Ormeggio pontoni

All'interno di ogni commessa è presente un team di ingegneri gestionali che ha il compito di organizzare le attività di realizzazione del progetto all'interno del cantiere, a partire dall'ingegneria fino al il carico su nave.



La tubazione da 18'' in acciaio superduplex viene prima assemblata in cosiddette aree bianche e poi montata sul modulo e unita al resto della linea. Di seguito questi due passaggi verranno trattati più dettagliatamente.

5.2 Prefabbricazione in aree bianche

Ogni linea all'interno della piattaforma West Franklin è suddivisa in varie parti dette sketch (10m) , composte da spool (2-5m). Questi ultimi vengono assemblati e saldati all'interno di aree bianche: ambienti dove polveri, temperatura e umidità sono continuamente monitorate e dove ogni attrezzo o supporto usato è compatibile con l'acciaio superduplex, in modo da evitare ogni possibile contaminazione del materiale. Gli spool una volta arrivati in cantiere vengono conservati all'interno di una zona preposta dell'area bianca fino al loro utilizzo.

Durante l'esecuzione delle giunzioni ogni saldatura è seguita da un foglio di produzione contenente il disegno con la sua locazione, i saldatori che eseguiranno il giunto, la WPS relativa alla saldatura, lo spessore e il diametro del tubo. Il tutto dovrà essere firmato passo per passo da un ispettore della saldatura (welding inspector).



Le attività svolte sono elencate di seguito.

1) Allineamento degli spool

Gli spool vengono spostati nella zona di saldatura e accuratamente allineati e posti alla giusta distanza l'uno dall'altro, controllando ogni dettaglio sui dimensionali, disegni di ogni sketch contenenti tutti i dati relativi alla geometria finale della tubazione. I lembi sono già stati lavorati e sono quindi pronti per la saldatura. Un saldatore qualificato procede quindi a saldare i distanziali che manterranno il giunto in posizione durante la saldatura.

2) Fit-up

Un ispettore delle saldature viene chiamato per controllare che le operazioni di allineamento e fissaggio siano state eseguite correttamente, se questi da l'autorizzazione è possibile procedere con la saldatura del giunto.

3) Saldatura e controllo del giunto

Comincia la saldatura TIG del giunto, la quale viene eseguita in tre step:

- 5mm – controllo radiografico;
- 10mm – controllo radiografico;
- 35mm – controllo radiografico;
- 75mm – esecuzione di tutti i controlli non distruttivi.

Alla fine di ogni step la saldatura viene molata per eliminare ogni residuo di ossidi o impurità dei precedenti cordoni di saldatura. I controlli vengono organizzati dall'ufficio qualità seguendo il foglio di produzione relativo al giunto in fase di realizzazione.

4) Imballaggio

Se tutti i controlli hanno dato esito positivo ed il giunto ha le giuste qualità, l'ufficio qualità rilascia l'autorizzazione a procedere al montaggio. Lo sketch viene quindi imballato, per evitare contaminazioni, e trasportato sulla piattaforma.

5.3 Montaggio sulla piattaforma

Una volta sulla piattaforma la tubazione viene poggiata nei pressi della zona dove deve essere montata. In seguito viene issata e messa in posizione utilizzando dei montacarichi a catena. Per verificare che l'ubicazione sia corretta vengono effettuati dei rilievi topografici, i cui dati verranno confrontati con i disegni della struttura. Se il posizionamento risulta corretto si procede con il fissaggio dei giunti e la copertura della zona, in modo da creare degli ambienti chiusi il più possibile puliti e controllati. A questo punto si può procedere con la saldatura.



Il collegamento dei tubi della linea da 18" può anche essere effettuato con delle flange. In tal caso le operazioni verranno eseguite da un'azienda esterna che provvederà a montaggio, controllo di tenuta e serraggio e in infine alla certificazione dei collegamenti flangiati.



CAPITOLO 6

Conclusioni e ringraziamenti

Conclusioni

Da questo trattato di tesi si possono trarre le seguenti conclusioni:

- 1) Lo scopo di riuscire a ottenere saldature su tubazioni ad alta pressione e temperatura in acciaio inossidabile superduplex, con spessori importanti (75mm) e soggetto a un servizio severo di corrosione, è stato raggiunto con risultati soddisfacenti.
- 2) Il procedimento di saldatura TIG impiegato è un processo di saldatura che può garantire altissimi standard di qualità, però ha come inconveniente una bassa produttività. Essendo un processo manuale, risulta molto legato anche al livello di qualità del personale, che deve essere molto esperto e scrupoloso nell'esecuzione della saldatura ed adeguatamente supervisionato.
- 3) La certificazione di PQR e la realizzazione di WPS e procedure dedicate e precise anche nei dettagli ha permesso di rendere ripetibile il risultato delle prove sperimentali e incorporare le migliori collezionate dalla prima fase di sperimentazione, risolvendo i problemi e le criticità legate alla tenacità a basse temperature ed alla resistenza a corrosione.
- 4) La parte di ispezione di questi giunti è di fondamentale importanza per capire e correggere eventuali problematiche in corso d'opera, per cui prove come PT, RT, UT e ferrite test danno indicazioni che devono essere valutate e analizzate periodicamente durante la costruzione attraverso dei database. Essendo il processo ricco di variabili e sensibile a molteplici fattori è stata di fondamentale importanza l'attività di monitoraggio svolta durante la produzione con un target preciso di elementi da rilevare e registrare. Tale attività è mirata al controllo del processo durante la sua esecuzione e alla prevenzione di problematiche dovute a modifiche indotte da errore umano o da contingenze particolari.

Ringraziamenti

Prima di tutto ringrazio gli ispettori della saldatura Abdul Karim Khalifa e Alberto Ottoboni che mi hanno seguito durante tutto il percorso della preparazione alla tesi.

Ringrazio la Rosetti Marino s.p.a. per avermi dato l'opportunità di cimentarmi in questa esperienza che mi ha appassionato fin dal primo giorno e che ritengo sia stata molto utile per la mia crescita professionale e personale. Ringrazio inoltre l'Ing. Gabriele Franco e Giovanni Semeraro per avermi seguito durante tutto il periodo di tirocinio in azienda, e tutti i colleghi che mi hanno aiutato nello sviluppo e nella comprensione dei tanti aspetti di questo argomento.

Ringrazio il Professor Giorgio Olmi per avermi seguito durante il tirocinio e la tesi.

In fine, un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che in questi anni mi ha sostenuto in ogni momento, dandomi la forza di superare le molte difficoltà incontrate lungo il percorso, e ai miei amici, che mi hanno accompagnato in questi anni e senza i quali non so se sarei riuscito ad arrivare fin qui.

Bibliografia

- [1] Linee Guida pratiche per la lavorazione di acciai inossidabili austeno – ferritici, International Molybdenum Association (IMOA).
- [2] How to weld duplex stainless steels, Avesta welding.
- [3] Avesta welding manual – practice and droducts for stainless steel welding, Avesta welding.
- [4] Total, <http://www.uk.total.com/>.
- [5] Sandvik Materials Technology, <http://www.smt.sandvik.com/en/>.