



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Tesi di laurea

“Saldabilità degli acciai Dual Phase”
(Weldability of dual-phase steels)

Relatori:

Prof. Paolo Ferro

Ing. Riccardo Cervo

Candidato:

Daniele Caliori

Matricola: 575185-IG

Anno accademico 2010/2011

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il prof. Paolo Ferro per la sua disponibilità e per avermi offerto come incarico la redazione di questo lavoro sperimentale.

Ringrazio l'ing. Riccardo Cervo per sua la preziosa assistenza, disponibilità e cortesia.

Un ringraziamento particolare va allo staff del laboratorio metallurgico del DTG di Vicenza, in particolare al sig. Giacomo Mazzacavallo che con la sua disponibilità e competenza mi ha dato un aiuto indispensabile nel condurre le analisi di laboratorio.

Ringrazio la mia famiglia, che mi ha sostenuto negli anni degli studi, e i miei amici compagni di corso senza i quali la mia vita universitaria non sarebbe stata così piacevole e divertente.

Vicenza, luglio 2011

Daniele Caliarì

INDICE

1 INTRODUZIONE	5
2 ACCIAI DUAL PHASE	7
2.1.Caratteristiche principali e applicazioni	7
2.2.Proprietà meccaniche	10
2.3.Come ottenere un acciaio Dual Phase	12
3 TECNOLOGIA DI SALDATURA ANALIZZATE	16
3.1.Saldatura dei material metallici e concetto di saldabilità	16
3.2.Morfologia generale dei giunti saldati.....	18
3.3.Apporto termico di saldatura (Heat Input).....	19
3.4.Gas Tungsten Arc Welding.....	20
3.4.1.Caratteristiche.....	20
3.4.2.Vantaggi.....	23
3.4.3.Svantaggi.....	23
3.5. Plasma Arc Welding.....	24
3.5.1.Caratteristiche.....	24
3.5.2.Vantaggi.....	26
3.5.2.Svantaggi.....	26
3.6.Electron Beam Welding.....	27
3.6.1.Caratteristiche.....	27
3.6.2.Vantaggi.....	30
3.6.3.Svantaggi.....	31
4 ANALISI METALLOGRAFICA GIUNTI SALDATI	32
4.1.Acciaio materiale base.....	32
4.1.1. Caratteristiche chimiche, meccaniche, termiche.....	32
4.1.2.Analisi micrografica.....	33
4.2.Caratteristiche dei giunti.....	35
4.2.1.Descrizione talloni saldati.....	35
4.2.2.Parametri di saldatura giunti	37
4.3.Analisi preliminare ai raggi X cordoni di saldatura	38
4.4.Analisi allo stereoscopio dei giunti saldati.....	41
4.5.Analisi micrografica.....	46

4.5.1.Premesse.....	46
4.5.2.Analisi dimensione grano.....	46
4.5.3.Analisi distribuzione fasi e micro costituenti.....	49
4.5.3.1.Analisi micrografica saldatura GTAW.....	50
4.5.3.2.Analisi micrografica saldatura PAW.....	53
4.5.3.3.Analisi micrografica saldatura EBW.....	55
4.5.3.4.Confronto micrografie	57
5 PROVE MECCANICHE.....	60
5.1.Prove di microdurezza.....	60
5.1.1.Premesse e condizioni di prova.....	60
5.1.2. Profili di microdurezza rilevati.....	62
5.2.Prove di trazione.....	64
5.2.1.Premesse e condizioni di prova.....	64
5.2.2.Risultati.....	65
6 CONCLUSIONI.....	70
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	71

CAPITOLO 1

Introduzione

Buona parte del moderno progresso tecnologico e industriale è caratterizzata da una ricerca finalizzata all'ottenimento di materiali sempre più resistenti e, soprattutto, sempre più leggeri.

La tendenza alla riduzione di peso dei componenti si traduce in risparmio di materiale e, nel caso del settore automotive, risparmio di consumi con effetti benefici sulle prestazioni. Infatti, nel settore della produzione di mezzi di trasporto è particolarmente sentita l'esigenza di realizzare veicoli che consumino il meno possibile, ma che siano in grado di garantire comunque adeguate prestazioni; chiaramente la via più efficace per ottenere simultaneamente questi due scopi è quella di realizzare telai e scocche sempre più leggeri.

La riduzione del peso dei veicoli rappresenta una sfida importante dell'industria, particolarmente sentita negli ultimi anni, a partire dalla tristemente famosa crisi petrolifera degli anni '70 [1].

Ma non è solo un discorso di consumi e prestazioni, ma anche di inquinamento: la riduzione di peso dei veicoli si traduce in minor energia sprecata a soli effetti inerziali della struttura, e, quindi, minor inquinamento atmosferico.

Queste esigenze hanno spinto produttori e ricercatori a sviluppare nuove leghe metalliche in grado di manifestare adeguate proprietà meccaniche di resistenza con l'impiego di quantità minori di materiale e quindi minor peso.

Tra gli acciai che hanno destato maggior interesse da questo punto di vista vi sono gli AHSS, ovvero "Advanced High Strength Steels", categoria di acciai molto recente che possiede interessanti caratteristiche in grado di soddisfare le nuove esigenze industriali [2].

Tra questi, vi sono gli acciai Dual Phase, che possiedono interessanti caratteristiche di formabilità (che li rendono adatti a essere formati con le più efficienti tecnologie industriali) e di resistenza (proprietà che permette di risparmiare materiale rispetto agli acciai convenzionali, e quindi peso); tutto questo grazie alla loro microstruttura bifasica costituita da ferrite e martensite.

La produzione e l'impiego di questi nuovi materiali devono essere concretizzabili dal punto di vista industriale, ovvero devono essere realizzabili in modo efficiente su larga scala per permettere vantaggi in termini di economia e produttività.

Occorre quindi porre attenzione non solo sullo sviluppo in sé di questi materiali, ma anche sulle complicazioni di natura tecnologica che sorgono nell'applicare a questi materiali lavorazioni necessarie all'ottenimento del prodotto finale, come nel caso della saldatura; non si può quindi pensare all'impiego di nuovi materiali metallici senza indagare sulle loro caratteristiche di saldabilità con varie tecnologie di saldatura a disposizione dell'industria.

Gli scopi di questa tesi sono quelli di illustrare sommariamente le caratteristiche degli acciai DP e delle tecnologie di saldatura prese in esame su questo tipo di acciaio, e di fare alcune indagini sulle caratteristiche di saldabilità di un acciaio Dual Phase, il DP600, in relazione a tre tecnologie di saldatura diffuse nell'industria: GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), PAW (Plasma Arc Welding), EBW (Electron Beam Welding).

In particolare, sono stati analizzati 6 giunti saldati; di questi, 3 sono stati saldati rispettivamente con tecnologia GTAW, PAW, EBW su acciaio DP600 su cui è stata effettuata, prima della saldatura, una zincatura superficiale; gli altri 3, saldati rispettivamente con GTAW, PAW, EBW, sempre su acciaio DP600 ma da cui è stato tolto, prima della saldatura, lo strato superficiale di zincatura; è stata mantenuta questa distinzione per verificare eventuali influenze apprezzabili dello strato zincato sui singoli processi di saldatura.

Per valutare le caratteristiche di saldabilità del materiale secondo ognuno dei 3 processi considerati, con particolare attenzione sulle alterazioni delle proprietà metallurgiche e meccaniche, sono state effettuate 2 categorie di analisi: analisi metallografiche e prove meccaniche.

Tra le analisi metallografiche che sono state condotte vi sono:

- analisi ai raggi X dei cordoni di saldatura: per individuare campioni necessari alle successive analisi privi di evidenti difetti di saldatura, che condurrebbero a conclusioni fuorvianti;
- analisi allo stereoscopio: per individuare le zone di alterazione termica dei giunti saldati, con indicazioni d'ordine di grandezza sulla dimensione di queste e della zona fusa;
- Analisi micrografica: per individuare con maggior precisione le dimensioni delle zone di alterazione, le microstrutture presenti e le dimensioni del grano cristallino.

Tra le prove meccaniche che sono state condotte vi sono:

- prove di microdurezza;
- prove di trazione.

CAPITOLO 2

Acciai dual-phase

2.1. Caratteristiche principali e applicazioni

La necessità di ottenere acciai in grado di manifestare un elevato grado di resistenza, ma che mantenessero allo stesso tempo una buona formabilità, ha portato allo sviluppo degli acciai Dual Phase; questa particolare tipologia di acciai ha ricevuto, a partire dagli anni Settanta, molte attenzioni per le loro ottime caratteristiche meccaniche, soprattutto nel settore automobilistico.

Questi acciai rappresentano una classe degli acciai basso-legati ad alto limite di snervamento denominati “High Strength Low Alloyed” (HSLA), letteralmente “acciai debolmente legati ad alta resistenza”, con carico di snervamento YS superiore a 350 MPa; contengono quindi solo piccole quantità di carbonio e di altri elementi (generalmente micro-aggiunte di niobio, vanadio, titanio) [1], introdotte per incrementare la resistenza fino a valori di YS di 500 MPa e oltre.

Questi acciai risultano generalmente più economici dei normali acciai legati per l'esigua presenza di elementi in lega; per conferire loro una sufficiente resistenza meccanica devono essere prodotti con particolari procedure.

Lo sviluppo di acciai debolmente legati è stato anche richiesto dalla necessità di aumentare la saldabilità dei materiali, caratteristica che migliora con il diminuire del tenore di carbonio.

Gli acciai HSLA tradizionali sono dotati di buona duttilità, anche se comunque cominciano a perdere la loro formabilità non appena inizia la deformazione; sono inoltre caratterizzati da un alto limite di snervamento e elevata resistenza meccanica, in particolare se sono ottenuti con una microstruttura a grano fine, e presentano una buona resistenza alla fatica e all'impatto.

Queste caratteristiche meccaniche positive li rendono idonei a molteplici tipi di lavorazione; generalmente, però, l'attitudine allo stampaggio diminuisce con l'aumentare della resistenza meccanica: questo è uno dei problemi che la metallurgia ha cercato di risolvere con lo sviluppo degli acciai Dual Phase.

Gli acciai Dual Phase fanno parte degli acciai detti “Advanced High Strength Steels (AHSS) [2], letteralmente “acciai avanzati ad alto limite di snervamento”; questi presentano generalmente una tensione di snervamento superiore a 550 MPa.

Una classificazione degli acciai dual phase può essere individuata sulla base del contenuto di carbonio: i DP a basso Carbonio ($C < 0.15\%$), e i DP a medio Carbonio ($C = 0.4\%$) [1].

I primi presentano una prevalente struttura ferritica, mentre i secondi una prevalente struttura martensitica e generalmente un più elevato contenuto di Silicio [1]; all'aumentare della percentuale di carbonio aumenta la frazione di fase martensitica che si forma nell'acciaio durante i trattamenti termici del suo processo produttivo.

I DP a basso contenuto di carbonio presentano migliori caratteristiche di saldabilità rispetto a quelli a medio contenuto di carbonio; questo grazie a una più bassa temprabilità del materiale dovuta alla minore percentuale di carbonio: in genere, infatti, un maggior grado di temprabilità dell'acciaio comporta strutture più fragili in seguito a processi di saldatura; quindi la minor temprabilità unita alle comunque buone proprietà meccaniche hanno reso i DP a basso contenuto di carbonio più utilizzabili e sfruttabili rispetto a quelli a medio contenuto di carbonio, pur mostrando una resistenza più bassa.

La denominazione Dual Phase (letteralmente "Fase Duale") è dovuta alle due fasi presenti nella microstruttura di questi acciai: una matrice continua di ferrite fine, che con le sue doti di duttilità conferisce al materiale una buona formabilità, in cui sono disperse isole di martensite, che costituiscono la fase dura e contribuiscono a incrementare le proprietà di resistenza e durezza del materiale [2,3].

La frazione volumetrica di martensite, uniformemente dispersa nella matrice ferritica, è variabile tra il 20 e il 70% a seconda della resistenza richiesta al materiale; infatti il livello di resistenza dipende dalla quantità di martensite presente nella ferrite: in particolare, all'aumentare della percentuale di martensite aumenta la resistenza, ma nel contempo diminuisce la duttilità.

E' stato appurato che una percentuale di ferrite del 10-20% in un acciaio con tenore di carbonio dello 0,1% rappresenta un buon compromesso tra resistenza e duttilità [1].

In figura 2.1 è mostrata la struttura metallurgica tipica di un acciaio dual phase.

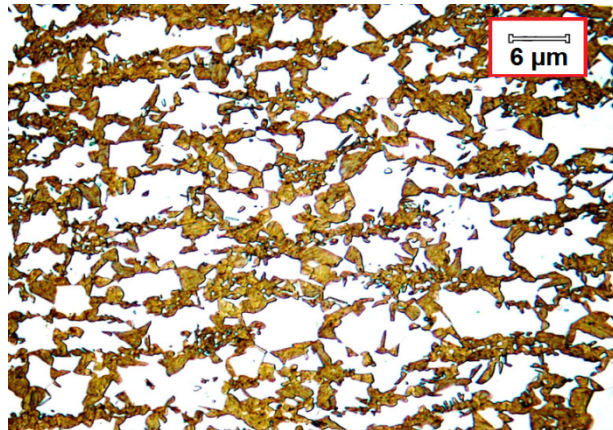


Figura 2.1.: struttura metallurgica tipica di un acciaio dual phase [4]

Gli acciai Dual Phase riescono così a combinare una resistenza elevata, grazie alla presenza di una frazione volumetrica di martensite, con una grande capacità di deformazione, dovuta a una rilevante percentuale di ferrite che influisce positivamente sull'attitudine allo stampaggio del materiale; queste proprietà consentono di ottenere elevate caratteristiche meccaniche sui pezzi stampati, e rendono questi acciai idonei a stampaggio e deformazione a freddo.

Manifestano inoltre un buon comportamento nei confronti delle sollecitazioni a fatica, e dimostrano una buona capacità di assorbimento di energia, con caratteristiche tipiche degli acciai HSLA.

Il notevole incrudimento a deformazione e la buona capacità deformativa rendono gli acciai DP utilizzabili anche come armatura e rinforzo nelle strutture in calcestruzzo [1]; questo impiego è incoraggiato anche dalle maggiori doti di resistenza a corrosione che questi acciai presentano rispetto agli acciai tradizionali [1].

Nel settore automobilistico sono particolarmente richieste agli elementi strutturali che costituiscono le scocche buone caratteristiche di leggerezza oltre che di resistenza; la tendenza a costruire mezzi di trasporto sempre più leggeri deriva dalla necessità di ridurre i consumi di carburante: questo soprattutto a partire dalla prima metà degli anni '70, anni in cui si è manifestata la crisi petrolifera mondiale. Da ciò si deduce che in questo ambito era, ed è tuttora, fondamentale coniugare buone caratteristiche di resistenza e tenacità con pesi ridotti e una buona formabilità del materiale: tutte proprietà che gli acciai tradizionali non erano in grado di offrire simultaneamente in modo soddisfacente; questi ultimi, soprattutto, non manifestavano una sufficiente duttilità per garantire una buona formabilità allo stampaggio.

Considerando che l'utilizzo del Dual Phase laminato a caldo in certi pezzi può generare una riduzione dello spessore dal 10% al 20% a parità di resistenza meccanica rispetto

ad acciai tradizionali, si intuisce il contributo positivo dell'utilizzo dei DP alla diminuzione di peso degli elementi strutturali [3].

Da qui l'impulso allo sviluppo e alla produzione su larga scala degli acciai DP.

La produzione di questi acciai non necessita di ferro-leghe pregiate, aspetto che influisce positivamente sull'economicità di questi materiali.

Tra le applicazioni più usuali, quindi, vi sono le seguenti:

- ruote, parti resistenti delle scocche, strutture di sicurezza come rinforzo dei sedili o barre laterali di protezione (applicazioni automotive);
- armatura e rinforzo strutture in calcestruzzo;
- costruzioni metalliche in genere ...

2.2. Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche principali che generalmente risultano superiori negli acciai Dual Phase rispetto agli acciai basso legati convenzionali sono le seguenti [5]:

- velocità e coefficiente di incrudimento più elevati;
- snervamento continuo;
- elevata deformazione uniforme;
- basso rapporto YS/TS;
- alta resistenza a fatica (doppia rispetto ai convenzionali);
- maggiore duttilità.

Rispetto agli acciai HSLA, che perdono gran parte della loro formabilità non appena inizia la deformazione, gli acciai DP mantengono la loro formabilità più a lungo in seguito a deformazione; questo perché, quando l'acciaio DP viene lavorato, la deformazione si concentra, almeno inizialmente, nella matrice più tenera costituita da ferrite: a questo è dovuta una iniziale buona capacità di deformazione, che assicura una buona distribuzione delle deformazioni, accompagnata da un elevato incrudimento di deformazione, detto anche "strain hardening".

Questo comportamento degli acciai DP è rispecchiato da un basso YS/TS, ovvero il rapporto tra tensione di snervamento e tensione di rottura: questo grazie alla duttilità della matrice ferritica in cui si concentrano le deformazioni iniziali che determina il basso valore di YS rispetto a TS, e all'alto coefficiente di incrudimento che determina un carico

di rottura più elevato rispetto ad acciai convenzionali caratterizzati da analogo limite di snervamento [6].

Da dati sperimentali, generalmente gli acciai DP hanno dimostrato un rapporto $YS/TS \cong 0.6 \div 0.65$, contro un $YS/TS \cong 0.7 \div 0.8$ riscontrabile negli HSLA [5].

Come già anticipato, il livello di resistenza dipende dalla quantità di martensite presente nella ferrite, e all'aumentare della percentuale di martensite aumenta la resistenza e diminuisce la duttilità, ovvero varia il rapporto YS/TS : occorre quindi ottenere un buon compromesso tra le due proprietà regolando le percentuali a seconda dell'uso a cui è destinato l'acciaio.

Le buone capacità di deformazione iniziale, di distribuzione delle deformazioni e di consolidazione per l'elevato coefficiente di incrudimento rendono gli acciai DP particolarmente adatti a essere formati per stampaggio: possono essere modellati con sforzi relativamente contenuti e presentano dopo lo stampaggio buone doti di resistenza meccanica con spessori più sottili, e quindi pesi più contenuti, rispetto ai tradizionali acciai basso legati.

Per quanto riguarda la duttilità degli acciai DP, molti studi hanno riscontrato una diminuzione dell'allungamento ultimo all'aumentare della percentuale di martensite [1].

Altra caratteristica che influisce sul livello di duttilità, e sulle proprietà meccaniche in generale del materiale, è la dimensione del grano cristallino: microstrutture più fini garantiscono maggiori doti di duttilità; in particolare, è particolarmente influente su questo aspetto la granulometria della fase dura, cioè della martensite, che si forma nella ferrite durante il processo produttivo: per conferire buone doti di duttilità e tenacità, occorre ottenere una microstruttura a grana molto fine (non solo della martensite) e con una distribuzione il più uniforme possibile delle due fasi.

Le caratteristiche di duttilità di un acciaio DP sono inoltre principalmente condizionate dalle proprietà della matrice ferritica; infatti risultano superiori a quelle di un tradizionale acciaio HSLA per diverse cause, tra cui l'inferiore contenuto di carbonio nella ferrite, diretta conseguenza anche della modalità di permanenza in campo austenitico dell'acciaio durante il processo produttivo [1].

Tra i fattori che influiscono sensibilmente sulla duttilità del materiale vi è anche la quantità di austenite presente a temperatura ambiente, a causa delle modalità con cui questa si trasforma sotto deformazioni plastiche a temperatura ambiente [1].

Un'altra caratteristica riscontrata da un confronto delle curve sforzo-deformazione di acciai DP con quelle di acciai HSLA di pari resistenza, e dal confronto dei relativi comportamenti a lavorazione, è uno snervamento continuo che si manifesta con una superficie meno rugosa e più regolare dopo la deformazione; dalle prove è generalmente risultata cioè la presenza di una curva true stress - true strain continua

anche nel tratto interessato dallo snervamento. Negli acciai DP quindi sono assenti (entro certe tolleranze) il fenomeno dello snervamento discontinuo e le bande di Luders, ovvero non si manifestano (o si manifestano con trascurabile entità) bande di deformazione in zone di concentrazione degli sforzi che causerebbero oscillazioni e quindi irregolarità di andamento della curva sforzo-deformazione nel tratto dell'allungamento di snervamento [1].

Una spiegazione teorica allo snervamento continuo manifestato dagli acciai DP è riconducibile alle dinamiche delle dislocazioni presenti nel reticolo cristallino.

Infatti, in questi acciai la presenza di una seconda fase nella matrice principale, ovvero la presenza di celle di martensite nella ferrite, comporta elevate tensioni residue, accentuate da lavorazioni meccaniche eseguite sul materiale durante il processo produttivo (come la laminazione) e accompagnate da una notevole densità di dislocazioni che comportano distorsioni del reticolo cristallino.

Questa notevole densità di dislocazioni si crea in seguito alla trasformazione dell'austenite in martensite, che avviene durante i trattamenti termici del processo produttivo, in seguito a un rapido raffreddamento dal campo intercritico: è l'incremento di volume conseguito a questa trasformazione che crea distorsioni attorno alla fase martensitica.

Queste distorsioni conferiscono agli atomi posizionati attorno alle dislocazioni una energia maggiore rispetto a quella posseduta dagli atomi in posizione di equilibrio, perché sono sottoposti a sforzi meccanici di varia natura (trazione, compressione, taglio): quindi l'edificio cristallino risulta più debole e con uno sforzo critico di taglio inferiore, cioè in seguito a bassi livelli deformativi macroscopici del materiale si manifesta facilmente un flusso plastico dovuto al movimento di una grande quantità di dislocazioni; da qui la facilità con cui il materiale presenta uno snervamento continuo [1].

2.3.Come ottenere un acciaio Dual Phase

La formazione di isole di martensite disperse nella matrice ferritica avviene per raffreddamento da temperature superiori ad A_{c1} . Fattori importanti che influiscono su questo processo sono non solo la durata della fase di parziale austenizzazione e la velocità di raffreddamento, ma anche e soprattutto la composizione chimica dell'acciaio di partenza da cui si vuole ottenere un DP; in particolare, le percentuali degli elementi presenti influenzano il grado di raffreddamento critico per la formazione di martensite.

Il carbonio è ovviamente l'elemento che influenza di più la morfologia e la durezza della fase martensitica, essendo il principale agente temprante di un acciaio.

Occorre ricordare che gli acciai Dual Phase rappresentano una categoria degli acciai basso legati, quindi le percentuali di ogni elemento non superano in ogni caso il 5% del volume totale di materiale.

Essendo necessarie buone doti di saldabilità dell'acciaio, in genere sono impiegati maggiormente acciai Dual Phase a basso contenuto iniziale di carbonio: una percentuale di carbonio del 0,1% comporta mediamente una frazione volumetrica finale di martensite del 20%, con un'efficace ripartizione tra austenite e ferrite durante la permanenza a temperature di transizione tra le 2 fasi (sopra Ac1, sotto Ac3, ovvero in campo intercritico in cui avviene parziale austenizzazione).

La formazione della fase martensitica all'interno della matrice di ferrite è l'aspetto più critico e delicato nel processo produttivo degli acciai DP; tale microstruttura è in genere ottenuta attraverso un trattamento termico, che parte con il riscaldamento del materiale a una temperatura di equilibrio tra la fase austenitica (γ) e la fase ferritica (α).

La temperatura di coesistenza fase α + fase γ oscilla nell'intervallo tra 640°C (Ac1) e 860°C (Ac3) per un acciaio con lo 0,1% di carbonio.

Come conseguenza del riscaldamento del materiale e del mantenimento della sua temperatura in questo campo intercritico, avviene la nucleazione di austenite nella fase ferritica con un contenuto di carbonio più elevato rispetto a quello nominale; non avviene completa austenizzazione, perché non viene superata Ac3, ma una coesistenza con la fase α e una continua diffusione tra le 2 fasi.

In seguito, dopo un certo tempo di permanenza a queste temperature (in genere di 30-60 minuti se temperature di poco superiori ad Ac1 [1]), il materiale viene raffreddato (con raffreddamento continuo) a una velocità sufficientemente elevata (uguale o superiore a quella critica di tempra) affinché l'austenite che si è formata si trasformi quasi completamente in martensite.

In caso di raffreddamento più lento, come eventuale tempra ad olio, potrebbe non avvenire completa trasformazione dell'austenite, che permanerebbe così in parte a temperatura ambiente sotto forma di piccole particelle disperse; questa permanenza di austenite a temperatura ambiente influenza le proprietà meccaniche dell'acciaio, in quanto, essendo una fase di non equilibrio a temperatura ambiente, si trasforma in seguito a deformazioni plastiche del materiale e influisce così direttamente sul comportamento a deformazione.

Molto importante è la scelta della temperatura a cui riscaldare il materiale per consentire una parziale austenizzazione: da questa, oltre che dalla composizione iniziale dell'acciaio di partenza, dipende la composizione chimica dell'austenite soprattutto in termini di percentuale di carbonio.

La composizione chimica della martensite che successivamente si forma per rapido raffreddamento è praticamente uguale a quella dell'austenite che si è formata, perché il processo di tempra che porta alla formazione di martensite avviene senza fenomeni diffusivi, né di nucleazione e accrescimento.

Ne consegue che la scelta della temperatura di riscaldamento ha dirette conseguenze anche sulla temprabilità del materiale: aumenta all'aumentare della percentuale di carbonio nell'austenite, ovvero al diminuire della temperatura di mantenimento nel campo intercritico.

La ragione per cui il materiale non viene portato a completa austenizzazione, ovvero non viene riscaldato a temperature superiori a A_{c3} , sta nell'ottenere sufficienti caratteristiche di temprabilità dell'austenite, ovvero sufficienti concentrazioni di carbonio in essa che non sarebbero raggiungibili con una completa austenizzazione (a partire da un dato tenore di carbonio dell'acciaio di partenza): infatti, la solubilità del carbonio nella ferrite è inferiore nella regione di coesistenza tra fase α e γ , ciò comporta un grano austenitico con concentrazioni più elevate di carbonio e quindi con maggiori proprietà di temprabilità.

Un'altra ragione del non superare temperature corrispondenti ad A_{c3} consiste nell'evitare un eccessivo accrescimento di dimensione del grano austenitico, fatto che comporterebbe un peggioramento delle proprietà meccaniche del materiale; la granulometria della microstruttura dipende anche dalla temperatura che raggiunge il materiale in campo intercritico e dalla durata di questa permanenza: a permanenze maggiori e temperature maggiori corrisponde una granulometria meno fine.

La percentuale di martensite che si forma in seguito al trattamento termico è condizionata anche dalla morfologia del materiale di partenza: microstrutture normalizzate comportano una maggiore quantità di martensite dopo il trattamento termico, a parità di temperature e velocità di raffreddamento, rispetto a microstrutture temprate; questo fenomeno è dovuto a una più contenuta formazione di austenite nelle strutture temprate a causa della maggiore dispersione del carbonio nella matrice [1].

In definitiva, per ottenere le volute proprietà meccaniche da un acciaio DP, ovviamente nei limiti delle possibilità offerte da questo tipo di acciaio, occorre porre attenzione ai parametri del ciclo produttivo in modo da regolare i seguenti aspetti:

- morfologia delle fasi presenti e relative percentuali volumetriche: dipendono dalla percentuale di elementi in lega aggiunti presenti nel materiale di partenza, dalle temperature raggiunte durante il riscaldamento del materiale e dal tempo di permanenza dello stesso a queste temperature, dalla velocità di

raffreddamento dal campo intercritico; inoltre, un ruolo altrettanto importante è giocato dalla microstruttura di partenza, a seconda che sia temprata o normalizzata, e da lavorazioni meccaniche eseguite in precedenza e durante il processo produttivo (come laminazioni, che alterano la morfologia delle microstrutture);

- dimensioni medie dei grani: dipendono dalla dimensione grani del materiale di partenza e dal tempo di permanenza in campo austenitico durante il riscaldamento sopra A_{c1} (a tempi maggiori corrispondono dimensioni grani maggiori e quindi peggiori proprietà meccaniche).

Considerando i processi tecnologici che realizzano nella pratica le operazioni necessarie a ottenere un acciaio DP, questi consistono spesso in una laminazione a caldo a temperature comprese nel campo intercritico $\alpha + \gamma$, seguita da un lento raffreddamento sempre in campo intercritico a cui segue un raffreddamento più o meno brusco a seconda del fluido che viene utilizzato.

Un procedimento più semplice, ma poco impiegato su larga scala, sarebbe quello di eseguire un riscaldamento nel campo intercritico, seguito da un mantenimento della temperatura in questo campo per il tempo necessario alla ripartizione del carbonio tra ferrite e austenite, e una successiva tempra in acqua.

Il motivo per cui viene praticata una laminazione a caldo sta anche nell'ottenimento di migliori proprietà meccaniche nel pezzo finito. Infatti si è osservato che la laminazione a caldo comporta un allungamento e un affinamento delle celle di austenite, a tutto vantaggio della granulometria sia della martensite che della ferrite che in tal modo risultano più fini; la microstruttura finale dell'acciaio presenta così delle tessiture di laminazione dovute a una disposizione a bande della martensite, morfologia che garantisce una migliore distribuzione delle tensioni all'interfaccia delle 2 fasi e quindi una migliore resistenza meccanica dell'acciaio.

CAPITOLO 3

Tecnologie di saldatura analizzate

3.1.Saldatura dei material metallici e concetto di saldabilità

La saldatura è un procedimento con il quale si effettua un'unione permanente e rigida tra parti solide, in modo da realizzare una continuità del materiale dove è realizzata.

Può essere applicata con o senza materiale d'apporto, e nella sua accezione più comune avviene con l'apporto di calore localizzato in grado di portare a fusione il materiale.

Il materiale d'apporto, quando viene utilizzato, è il metallo che viene introdotto sotto forma di fili, bacchette o nastri, e che viene depositato allo stato fuso tra i lembi da unire.

La saldatura per antonomasia è quella che coinvolge materiali metallici; a seconda che avvenga con o senza materiale d'apporto si distingue in:

- *saldatura eterogena o brasatura*: si porta a fusione un materiale apportato estraneo alle parti che è necessario saldare, eventualmente con parziale fusione dei pezzi da giuntare;
- *saldatura autogena*: viene portato a fusione solo il materiale componente le parti stesse che vengono unite, senza apporto di materiale estraneo.

A differenza di altri tipi di collegamento permanenti, come la chiodatura o la incollatura, la saldatura realizza la continuità del materiale.

Esistono diversi procedimenti di saldatura che si distinguono tra loro in base alle modalità con cui viene effettuata la giunzione, ai materiali d'apporto utilizzati, alle attrezzature necessarie e, in particolare, in base al tipo di energia che viene impiegata.

Rispetto ad altri tipi di collegamento permanente, come chiodatura e incollatura, i vantaggi della saldatura sono [7]:

- resistenza alla corrosione dei giunti;
- risparmio di materiale;
- riduzione di peso;
- rapidità di esecuzione;
- minor costo in generale.

Tra i maggiori svantaggi della saldatura sull'acciaio rispetto ad altri tipi di collegamenti permanenti, vi sono gli effetti che l'apporto termico, necessario per portare a fusione il materiale, comportano nel materiale base adiacente al materiale fuso; in particolare, si verificano aumenti di temperatura localizzati che portano a:

- alterazioni del materiale base: fenomeni di tempra in seguito a raffreddamenti più o meno bruschi, rinvenimento e coalescenza del grano cristallino che comportano alterazioni delle proprietà meccaniche dei pezzi;
- tensioni interne;
- deformazioni.

Non sempre nei vari casi reali tutti gli svantaggi elencati rappresentano un danno, anzi a volte alcuni effetti sono desiderabili; ma ciò dipende dalla specifica applicazione della saldatura, e comunque generalmente non sono desiderabili alterazioni del materiale rispetto alle sue caratteristiche meccaniche nominali.

In particolare, fenomeni di coalescenza del grano cristallino comportano un peggioramento delle proprietà meccaniche di resistenza dei pezzi, e fenomeni di tempra e rinvenimento comportano talvolta brusche alterazioni microstrutturali tali da compromettere gravemente l'integrità meccanica dei materiali giuntati.

Considerando che non basta soddisfare al solo requisito della continuità fisica tra i pezzi, ma occorre anche che le proprietà meccaniche del giunto siano idonee alle condizioni di servizio, si evince che occorre studiare e tenere bene in considerazione le caratteristiche di saldabilità degli acciai su cui occorre realizzare giunture saldate permanenti.

La *saldabilità* di un materiale è la proprietà di poter essere unito con un altro materiale senza che avvengano rotture o screpolature [8]; è anche definita, in termini generali, come "l'attitudine con cui un materiale si presta alla realizzazione di costruzioni nelle quali sia garantita la continuità strutturale con caratteristiche e qualità desiderate" [9].

Buone caratteristiche di saldabilità presuppongono il poter applicare la saldatura senza particolari necessità di trattamenti termici post-saldatura [10].

La saldabilità è una proprietà che varia da materiale a materiale, ma dipende anche da quale specifica tecnologia di saldatura viene eseguita sul materiale, in quanto ogni tipologia di saldatura può essere più o meno adatta a un particolare tipo di metallo: ecco quindi che la saldabilità di un materiale deve essere riferita al processo di saldatura applicato; per esempio, le leghe di alluminio non possono essere saldate con fiamma ossiacetilenica, mentre sono bene saldabili con le tecniche MIG o TIG [9].

Studiare le caratteristiche di saldabilità di un acciaio non si limita solo a verificare che un determinato processo di saldatura su quel materiale non comporta rotture o

screpolature, ma presuppone anche un'analisi più approfondita che cerca di valutare il grado di alterazione di proprietà microstrutturali e meccaniche che il materiale ha subito in seguito alla saldatura.

Nel valutare la saldabilità devono essere presi in considerazione diversi fattori, tra cui [9]:

- temperatura di fusione del materiale base;
- eventuale necessità di protezione gassosa per prevenire fenomeni di ossidazione, che influirebbero negativamente sulla qualità di una saldatura;
- sensibilità del metallo ai cicli termici che si verificano durante il processo;
- sensibilità alle cricche a caldo;
- possibile comparse di porosità;
- conduttività termica ed elettrica del materiale da saldare; conoscere il valore di conduttività termica permette di stabilire se sul materiale in questione è possibile eseguire efficacemente processi ad arco voltaico;
- entità fenomeni di ritiro;
- preparazione necessaria ai lembi su cui effettuare saldatura.

3.2.Morfologia generale dei giunti saldati

La maggior parte dei giunti saldati presenta in linea generale, anche se realizzati con diverse tecnologie di saldatura, la stessa morfologia di base visualizzata in figura 3.1, in proporzioni diverse a seconda del tipo di saldatura e dei parametri del processo specifico. All'interno di un giunto saldato è possibile individuare le seguenti zone:

- *CORDONE DI SALDATURA*: è costituito dal metallo base e da quello d'apporto (se presente), solidificati per raffreddamento dopo la fusione; talvolta è indicato con "ZF", ovvero "Zona Fusa", oppure "bagno di fusione" per indicare la porzione di metallo che si trova allo stato fuso durante il processo di saldatura;
- *METALLO BASE*: è il materiale di cui sono costituiti i pezzi da saldare tra loro; le proprietà meccaniche del materiale base sono prese come riferimento per determinare il loro grado di alterazione in seguito alla saldatura.

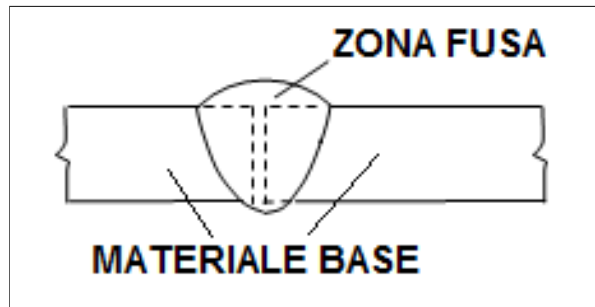


Figura 3.1: morfologia di un giunto saldato

3.3.Apporto termico di saldatura (Heat Input)

Un parametro di estrema importanza da considerare in un processo di saldatura è l'apporto termico specifico Q (detto anche "Heat Input"), che si misura in [kJ/mm].

La relazione 3.1 esprime Q in funzione del voltaggio (V), dell'intensità di corrente (I) e della velocità di avanzamento (v).

$$Q \text{ [kJ/mm]} = \eta \frac{V[V] \times I[A]}{v[\text{mm/s}] \times 1000} \quad (3.1) [2]$$

η viene definita "efficienza termica", ed è un parametro empirico che viene determinato sperimentalmente per ogni singolo processo.

Il valore di Q determina la quantità di calore che il processo di saldatura apporta per unità di lunghezza del giunto.

Indirettamente, il valore di Q può essere un indice del livello di alterazioni termiche che uno specifico processo comporta sul materiale: a maggiori valori di Q corrispondono generalmente maggiori alterazioni del materiale.

Comunque non è il solo valore di Q a determinare la severità dei cicli termici a cui è sottoposto il materiale durante la saldatura, ma anche lo spessore dei pezzi ed eventuali preriscaldamenti degli stessi.

Eventuali preriscaldamenti vengono effettuati per diminuire le velocità di raffreddamento e quindi prevenire fenomeni di tempra e cricche del materiale.

In base ai valori di apporto termico, è possibile suddividere le tecnologie di saldatura in 2 classi [7]:

- Processi *ad elevata densità di energia (tipo LBW)*: viene apportata una grande quantità di calore ma in una zona molto limitata, quindi con un basso valore complessivo di Q; questi processi sono caratterizzati da una zona di alterazione termica relativamente piccola;
- Processi *ad elevato apporto energetico*: si apporta una grande quantità di calore ma più diffusa rispetto ai processi tipo LBW; questi processi sono caratterizzati da un surriscaldamento su una zona più estesa dei lembi, e ciò comporta zone termicamente alterate più ampie.

3.4. Gas Tungsten Arc Welding

3.4.1. Caratteristiche

La saldatura GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) o TIG (*Tungsten Inert Gas*) è un tipo di saldatura che impiega l'arco elettrico come sorgente termica, realizzato con un elettrodo infusibile di tungsteno sotto protezione di gas inerte [11]; quindi il calore necessario per fondere il metallo è sviluppato tramite un arco voltaico che scocca tra l'elettrodo e i pezzi da saldare. La temperatura dell'arco supera i 3200 °C.

Questa tecnologia fa parte dei processi *ad elevato apporto energetico*.

Il tungsteno, materiale di cui è costituito l'elettrodo, oltre a manifestare eccellenti caratteristiche termiche e meccaniche in termini di resistenza, ha un elevato potere termoelettrico, ovvero ha una buona capacità di emettere elettroni ad elevata temperatura, caratteristica che stabilizza l'arco [11].

Può essere realizzata con o senza materiale d'apporto; essendo l'elettrodo infusibile, assolve solo alla funzione di alimentare l'arco: quindi il materiale d'apporto, ove richiesto, deve essere fornito tramite una bacchetta separata.

Questa saldatura può essere eseguita con un gas protettivo espulso da una "torcia" (schema in figura 3.2), apparecchiatura in cui è anche inserita un'estremità dell'elettrodo di tungsteno [12]; questo gas protettivo viene spesso immesso su entrambe le facce del giunto (naturalmente se questo è accessibile su entrambi i lati): dalla parte dove si trova il bagno è proveniente dalla torcia, mentre sull'altra faccia viene opportunamente insufflato in condizioni controllate, in modo da proteggere dall'ossidazione anche la radice della saldatura.

I gas usati più comunemente sono l'argon o l'elio, puri o talvolta in miscele di argon e idrogeno.

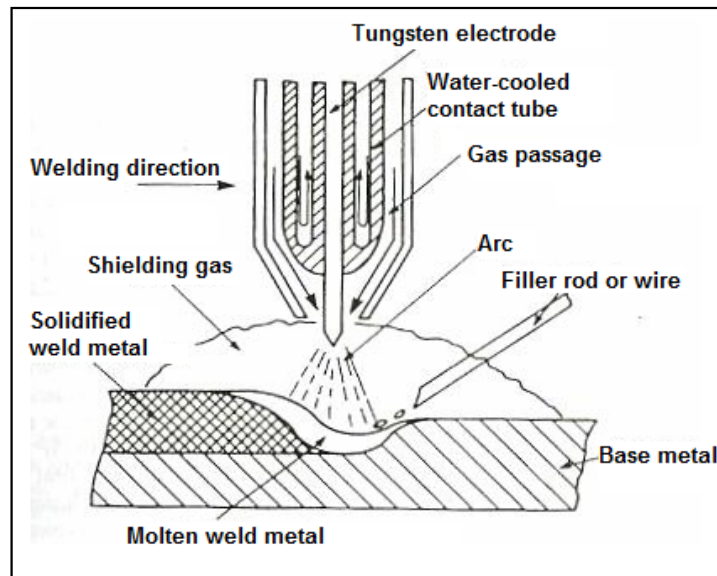


Figura 3.2.: schema della torcia e del principio di funzionamento nella saldatura GTAW [12]

Anche il rivestimento stesso dell'elettrodo emette, durante la fusione, dei gas che proteggono il bagno di fusione dall'aria atmosferica; infatti, quando l'arco elettrico viene innescato, la temperatura che si determina provoca la contemporanea fusione e volatilizzazione del rivestimento.

I compiti che deve svolgere il rivestimento dell'elettrodo sono [7]:

- fornire elementi fortemente termoionici in grado di facilitare l'innescò dell'arco e stabilizzarlo;
- impedire il più possibile il contatto del tungsteno con il materiale da saldare;
- formare un'atmosfera protettiva che sostituisca l'aria intorno all'arco ed al bagno fuso, in modo da limitare il più possibile fenomeni di ossidazione e di nitrurazione del metallo;
- aggiungere al bagno elementi particolari per migliorare le caratteristiche del giunto;
- formare una scoria che galleggi allo stato fuso sul cordone di saldatura, allo scopo di proseguire l'azione protettiva dagli agenti atmosferici durante la solidificazione del materiale e di rallentare il raffreddamento del bagno. La scoria deve essere facilmente eliminabile per scalpellatura, e in essa si raccolgono tutte le impurità presenti nel bagno;
- fornire elementi disossidanti (Si, Mn) e depuratori del bagno fuso.

L'apparecchiatura per la saldatura ad elettrodo è costituita da un generatore e da due pinze: una per la massa e l'altra per il porta-elettrodo; in figura 3.3 è rappresentata schematicamente l'attrezzatura necessaria.

I fattori più importanti che influenzano la sezione e la qualità del cordone di saldatura, ovvero della zona fusa, sono:

- intensità di corrente di saldatura e tipo di corrente (se continua, la sua polarità);
- tensione di saldatura;
- velocità di saldatura.

La *corrente di saldatura* determina la velocità di fusione del materiale (*velocità di deposito*) e la penetrazione; nel caso si adotti la corrente continua, nel procedimento GTAW è richiesta la polarità diretta con il polo negativo collegato all'elettrodo, in modo da non surriscaldare l'elettrodo di tungsteno che non deve essere fuso.

La *tensione di saldatura* influenza la larghezza del bagno fuso, mentre la *velocità di saldatura* influisce sulle dimensioni del bagno di fusione in modo inversamente proporzionale.

La velocità di saldatura influisce anche sull'aspetto superficiale del cordone: in particolare, alte velocità di saldatura determinano superfici molto irregolari con onde a spina di pesce, con possibilità di formazione di cricche, porosità e incisioni marginali.

L'arco viene attivato tra il pezzo ed un elettrodo che è mosso a mano o meccanicamente lungo il giunto per effettuare la passata; in alcuni casi l'elettrodo rimane fermo, mentre è il pezzo che viene movimentato.

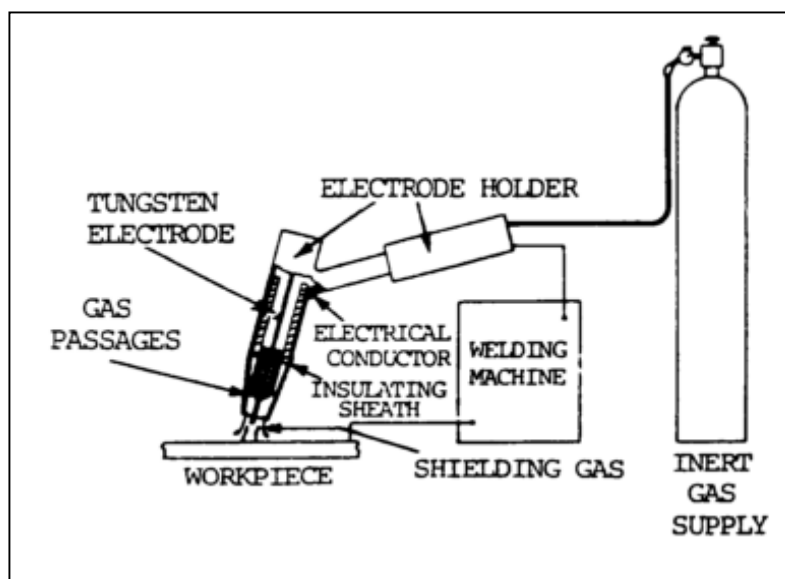


Figura 3.3.: schema attrezzatura per saldatura GTAW [13]

3.4.2.Vantaggi

Attualmente la saldatura TIG a elettrodo rivestito è uno dei metodi più diffusi, tanto nelle costruzioni meccaniche quanto in carpenteria metallica; si tratta di un procedimento molto versatile, che ben si presta alla saldatura in tutte le posizioni.

Inoltre, questa metodologia di saldatura è realizzabile con apparecchiature semplici e versatili, rendendone facile l'impiego in molte situazioni, anche in cantiere o in spazi limitati.

Tutte queste ragioni spiegano l'enorme diffusione di questa tecnica, che riveste quindi una grande importanza rispetto agli altri metodi di saldatura; è indicata per la saldatura di quasi tutte le leghe metalliche ferrose e non ferrose, fatta eccezione delle leghe di alluminio.

3.4.3.Svantaggi

Difetto tipico di questa tecnologia, non riscontrabile in tecnologie che non sfruttano l'arco voltaico, è rappresentato da possibili inclusioni di tungsteno nel bagno fuso: può infatti succedere che, per un motivo qualsiasi, l'elettrodo venga a contatto con il bagno (cosa che non dovrebbe accadere), causando la frammentazione dell'elettrodo stesso con conseguente rilascio nel bagno di schegge di tungsteno ($\varnothing < 1$ mm); queste schegge di solito hanno una forma prismatica a spigoli vivi, quindi sono facili inneschi per rotture fragili nella struttura del materiale saldato [11]. Per evitare questi difetti è necessario un accurato addestramento del saldatore.

Un altro difetto relativamente frequente nelle saldature TIG è la mancanza di protezione dovuta a non perfetta copertura da parte del gas protettivo, e quindi contatto con l'aria atmosferica; questa mancanza si manifesta con quelle che in gergo sono chiamate "*fiorette*", cioè con spot circolari ossidati sul materiale [11].

Altri difetti riscontrabili in queste saldature sono porosità, mancanze di fusione o cricche, tutti difetti determinati da imperfetta esecuzione da parte dell'operatore o della macchina automatica che esegue la saldatura.

Tra gli svantaggi della saldatura GTAW, si rileva anche una scarsa produttività: infatti, l'elettrodo ha una lunghezza ridotta e deve quindi essere frequentemente sostituito. Inoltre, il tungsteno è un materiale molto fragile, e una caduta accidentale dalla mano dell'operatore può provocare una rottura dell'elettrodo in più pezzi.

L'operatore deve essere ben addestrato per eseguire questa saldatura.

3.5. Plasma Arc Welding

3.5.1. Caratteristiche

La saldatura al plasma (PAW = Plasma Arc Welding) è un miglioramento del procedimento TIG che consente di ottenere maggiori benefici in termini di produttività.

Fa parte dei processi *ad elevato apporto energetico*.

Questa tecnologia quindi, come nella saldatura TIG, impiega l'arco elettrico come sorgente termica, realizzato con un elettrodo che, nella maggior parte dei casi, è infusibile e fatto di tungsteno sinterizzato.

Diversamente dal TIG, vi sono diversi afflussi indipendenti di gas [14]:

- un flusso di gas avvolge l'elettrodo di tungsteno, e in presenza del campo elettrico presente internamente o esternamente alla torcia diventa plasma, cioè gas fortemente ionizzato (da qui il nome "gas plasmogenico"); passa tra elettrodo e l'ugello della torcia, favorisce l'innesco dell'arco pilota e protegge l'arco plasma tra l'elettrodo e il pezzo da saldare; normalmente viene utilizzato l'argon;
- un secondo flusso di gas ha il compito di proteggere il bagno di saldatura e la zona termicamente alterata; arriva tramite un ugello esterno e circonda il raggio plasma; a seconda del tipo di materiale da saldare, e a seconda delle condizioni di saldatura richieste in termini di concentrazione arco, questo gas può essere formato da miscele di argon/elio per saldare metalli non ferrosi, oppure di argon/idrogeno per acciai inossidabili; questi gas sono utilizzati per prevenire soffiature nella parte saldata: avendo infatti solubilità praticamente nulla anche ad alte temperature, impediscono all'aria atmosferica di penetrare nel bagno del metallo fuso;
- in molti casi viene utilizzato anche un flusso di gas per la protezione del rovescio per prevenire ossidazioni; normalmente vengono utilizzati argon, azoto, oppure loro miscele con l'idrogeno.

Rispetto al TIG, viene sviluppato un arco concentrato con maggior intensità energetica grazie alla ionizzazione del gas, creandosi un raggio plasma stabile verso il pezzo da saldare anche con basse correnti di lavoro. Il plasma deve arrivare in forma concentrata sul pezzo da saldare: ciò è possibile mantenendo un'opportuna distanza dal pezzo e una velocità di fuoriuscita del gas elevata, prossima alla velocità del suono [15].

In queste applicazioni vengono raggiunte temperature varianti tra 5500 °C e 50000 °C, e questa elevata temperatura permette un'alta precisione e velocità di realizzazione dei giunti saldati.

Tra i metalli su cui è indicata la saldatura PAW, vi sono:

- acciaio inox;
- leghe di alluminio;
- acciai a base di nichel;
- acciai per costruzioni;
- titanio;
- materiali in rame.

La saldatura al plasma viene utilizzata prevalentemente su micro-applicazioni, solitamente fino ai 3 mm di spessore, ma non mancano le applicazioni su spessori superiori, facilitate dall'elevata profondità di passata che permette grazie al flusso del plasma [16].

Questa tecnologia oggi è largamente usata nell'industria chimica, siderurgica, meccanica e per giunti di alta qualità nell'industria aeronautica, spaziale e chimica; è impiegata, per esempio, in costruzioni di impianti, container, macchine, profilati, in costruzioni di veicoli speciali e su rotaia, nell'industria dell'auto e indotto [16].

In figura 3.4 è rappresentato uno schema del principio di funzionamento della saldatura PAW, e in figura 3.5 è visualizzato un esempio di torcia per saldatura PAW.

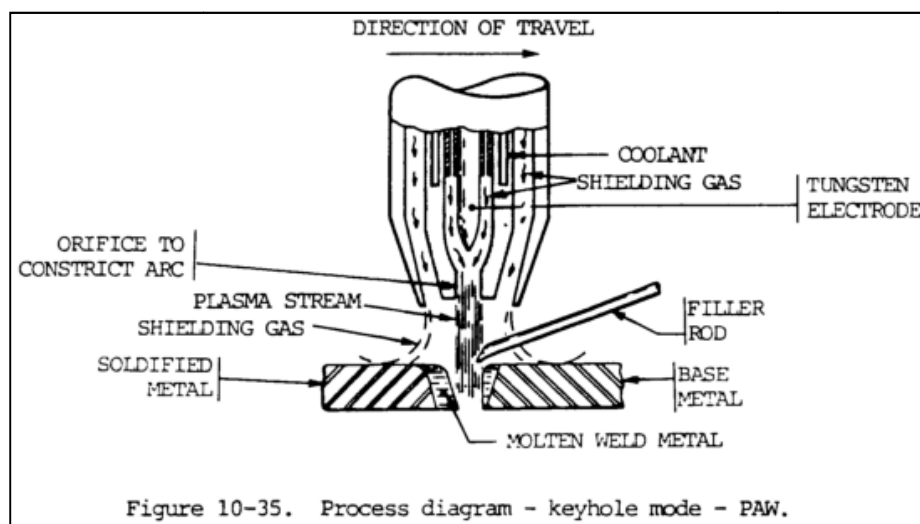


Figura 3.4.: schema principio di funzionamento saldatura PAW [17]

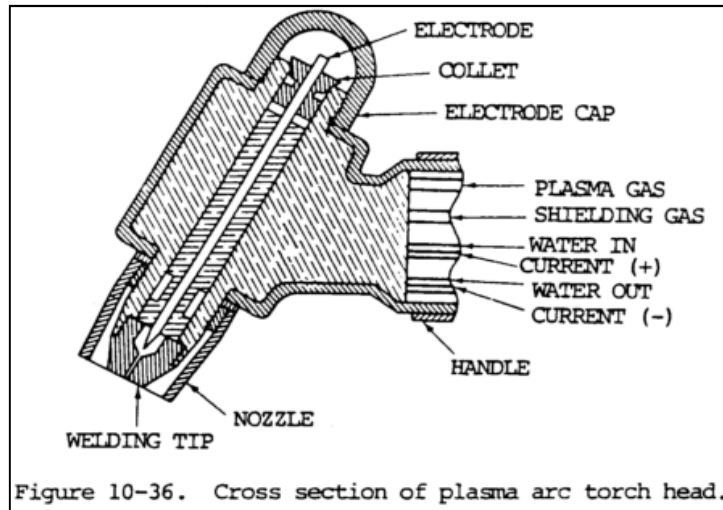


Figura 3.5.: esempio di torcia utilizzata nella saldatura PAW [17]

3.5.2.Vantaggi

Tra i vantaggi presentati dalla saldatura PAW, vi sono [16]:

- stabilità d'arco e penetrazione uniforme;
- rispetto a saldatura TIG, maggior penetrazione grazie al getto del plasma che attraversa lo spessore di materiale nei giunti testa a testa;
- cordoni più stretti rispetto alla saldatura TIG;
- minore rischio di inclusioni di tungsteno rispetto al TIG;
- maggiore direzionalità dell'arco rispetto al TIG;
- eccellente estetica del cordone, aspetto desiderabile nel caso le saldature siano visibili;
- processo rapido, deformazioni e sovrappessore limitati: quindi è necessario un numero molto limitato di lavorazioni per ripristinare la geometria iniziale dei pezzi e spesso non sono necessarie operazioni di molatura, a tutto vantaggio dei tempi di lavorazione; il tempo di saldatura risulta generalmente ridotto fino a 4 o 5 volte rispetto al tradizionale TIG;
- permette saldature di ottima qualità.

3.5.3.Svantaggi

I svantaggi principali che la saldatura PAW presenta rispetto a quella TIG sono i seguenti:

- attrezzature più costose e complesse, richiedono una maggior conoscenza da parte dell'operatore che effettua la saldatura; inoltre sono necessarie forze più pesanti;
- durante il processo di saldatura vengono emesse radiazioni infrarosse e ultraviolette che richiedono speciali dispositivi di protezione per l'operatore;
- durante il processo vengono emessi rumori fastidiosi che richiedono adeguate protezioni all'apparato uditivo dell'operatore;
- maggiori rischi di shock elettrici;
- per saldature di testa, il processo è limitato a spessori del metallo non superiori a 25mm;
- elevato consumo di gas inerti.

3.6. Electron Beam Welding

3.6.1. Caratteristiche

La saldatura a fascio elettronico EBW (Electron Beam Welding) è un processo di fusione ad alta densità di energia, che impiega un fascio di elettroni strettamente focalizzato ad alta velocità come sorgente termica; quindi fa parte dei processi ad *elevata densità di energia* (tipo LBW).

E' una tecnologia nata negli anni '50 in ambito nucleare, campo in cui sono necessarie saldature di componenti reattive e refrattarie, e in generale di metalli molto difficili da saldare per la loro affinità con l'ossigeno e l'azoto presenti nell'aria atmosferica.

Il fascio di elettroni viene generato, all'interno di un cannone elettronico, per effetto termoionico da un catodo di tungsteno riscaldato a temperature dell'ordine dei 2400 °C; dopo la loro emissione, gli elettroni vengono accelerati per mezzo di un campo elettrico e focalizzati sui pezzi da giuntare in un ambiente sottovuoto, realizzato all'interno di una camera di saldatura; la velocità assunta dagli elettroni varia dal 30% al 70% della velocità della luce.

I pezzi su cui viene focalizzato il fascio fondono per effetto dell'energia cinetica che si trasforma in calore per impatto degli elettroni che bersagliano il materiale.

La saldatura EBW può essere realizzata con o senza materiale d'apporto, anche se in quasi tutti i casi pratici non è necessario: in questo modo le caratteristiche della saldatura finita dipendono esclusivamente dal materiale di base, considerato anche che non sono necessari elettrodi consumabili.

Risulta necessario eseguire il processo EBW all'interno di una camera in cui è stato praticato il vuoto per evitare che gli elettroni impattino con le molecole pesanti dell'aria atmosferica, fatto che causerebbe la perdita di energia, di potenza e di focalizzazione.

Nell'esecuzione della saldatura si verifica il fenomeno del "key-hole welding" [18,19]: il fascio elettronico fonde istantaneamente lo strato superficiale di metallo e vaporizza una piccola quantità di materiale, così viene rimossa una parte di materiale fuso; il materiale solido sottostante, su cui si verifica una depressione per compressione del materiale fuso, viene investito dal fascio, e il processo continua fino a formare una ristretta apertura (detta appunto "key-hole") in profondità nel pezzo, con al centro vapore circondato da un involuppo di metallo fuso [19].

La profondità di penetrazione che è possibile raggiungere con questa tecnologia è anche dovuta alla parziale vaporizzazione del materiale, in quanto il fascio di elettroni può viaggiare molto più facilmente attraverso questi vapori che non attraverso il metallo allo stato solido: ciò agevola l'ulteriore penetrazione degli elettroni nel metallo stesso.

I parametri di saldatura che influiscono sull'apporto termico e che quindi occorre controllare e regolare in questo tipo di processo sono i seguenti:

- tensione di accelerazione (25 ÷ 500 kV) [18];
- corrente ai catodi (50 ÷ 1000 mA) [18];
- la velocità degli elettroni al momento dell'impatto (accelerating potential);
- il numero degli elettroni che colpiscono il pezzo al secondo (beam current);
- velocità di avanzamento;
- diametro del fascio a contatto con il pezzo (beam spot size);

La corrente e la velocità di avanzamento influiscono sulla penetrazione e sull'apporto termico, mentre la tensione influisce sulla profondità di penetrazione.

Il "key-hole" rimane continuamente aperto, così consente il trasferimento di energia attraverso lo spessore del pezzo, e avanza con il procedere della saldatura lasciando solidificare il materiale dietro di sé.

L'attrezzatura necessaria per eseguire questo processo di saldatura, di cui è visualizzato un esempio in figura 3.6, è composta da [18]:

- un *cannone elettronico*: ha la funzione di generare, accelerare e controllare il fascio di elettroni, focalizzandone il flusso sulla superficie da saldare;
- un *generatore di potenza*: deve riscaldare il filamento di tungsteno, accelerare gli elettroni e focalizzarne il fascio;
- un *sistema per il vuoto*: è necessario creare condizioni di vuoto per ridurre e prevenire fenomeni di ossidazione, per evitare la formazione di archi voltaici e

facilitare la propagazione del fascio; il vuoto può essere realizzato in diversi gradi, da condizioni prossime a quelle atmosferiche a vuoto più spinto dell'ordine di $10^{-7} \div 10^{-9}$ atm; all'aumentare del grado di vuoto il processo è sempre più portato a penetrazioni maggiori con migliori risultati; inoltre il vuoto prolunga la durata del filamento catodico.

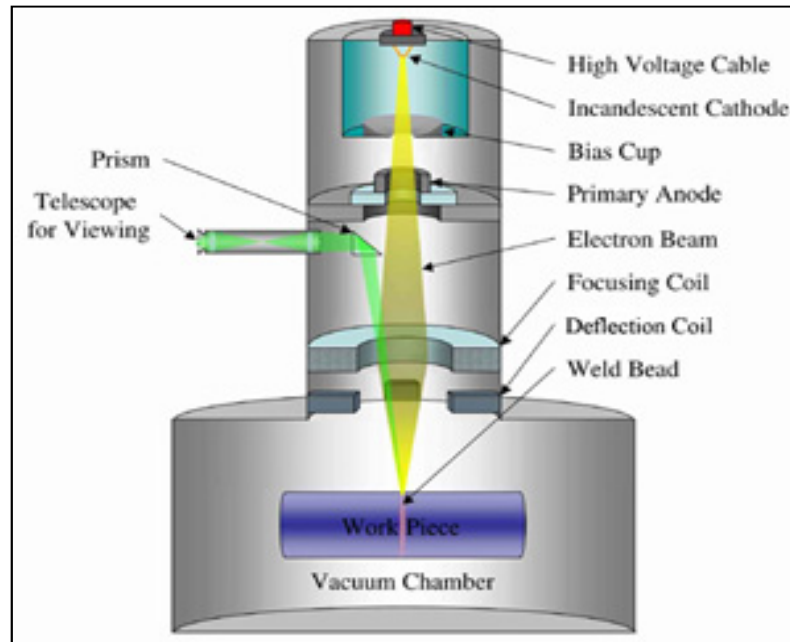


Figura 3.6.: esempio di attrezzatura per saldatura EBW [18]

La tecnologia EBW è utilizzata per applicazioni molto particolari, dove è molto importante la qualità della saldatura e i costi da sostenere sono giustificati dalla necessità di un alto grado qualitativo.

Attualmente questa tecnologia è impiegata anche in ambito aerospaziale, nucleare, automobilistico e nell'industria elettronica.

In particolare, è utilizzata in ambito nucleare perché consente di saldare recipienti di spessore elevato in lega leggera realizzati, per esempio, per lo stoccaggio di scorie nucleari.

Tutti i materiali metallici possono essere fusi con il fascio di elettroni: quindi con questa tecnologia può essere saldata la maggior parte dei metalli puri e delle leghe purché il materiale sia un buon conduttore elettrico.

3.6.2. Vantaggi

Il processo EBW permette elevati rendimenti, ed è in grado di realizzare giunti saldati con caratteristiche meccaniche superiori a quelle ottenibili con altre metodologie di saldatura.

Questo è in parte dovuto alla minore alterazione termica cui è soggetto il metallo base circostante alla zona di bagno fuso; questo processo consente infatti di realizzare giunti con zone fuse e termicamente alterate di dimensioni ridotte.

Inoltre il fascio di elettroni possiede peculiari caratteristiche di penetrazione, associate a un apporto termico molto basso; come conseguenza la zona termicamente alterata del materiale saldato che si ottiene è molto più piccola di quelle che si ottengono con altri processi di saldatura: questo quindi comporta minori alterazioni del materiale, a tutto vantaggio delle caratteristiche meccaniche del giunto, e risultano minimizzate anche le distorsioni.

La velocità di raffreddamento è molto più elevata rispetto agli altri processi: questo può essere vantaggioso per molti metalli, in quanto porta a microstrutture del giunto caratterizzate da elevata durezza, ma per altri metalli può essere svantaggioso (come per gli acciai ad alto contenuto di carbonio, perché questo può comportare cricche).

Altri vantaggi sono:

- consumi energetici inferiori rispetto a tecnologie TIG e PAW;
- riduzione o eliminazione delle lavorazioni necessarie post-saldatura;
- condizioni di lavoro migliori e più qualificate;
- possibilità di saldare giunti con limitato accesso al rovescio;
- economia di fabbricazione;
- possibilità di impiego per un largo range di spessori (spessore di penetrazione variabile da pochi decimi di mm, a 100mm per l'acciaio);
- possibilità di saldare materiali tra loro eterogenei, anche quando presentano notevoli differenze nella temperatura di fusione;
- non sono necessari gas di protezione, grazie alle condizioni di vuoto create attorno ai pezzi.

3.6.3.Svantaggi

Nonostante la flessibilità di impiego per quanto riguarda la varietà di spessori di materiale saldabili, la necessità delle condizioni di vuoto è il maggiore problema della tecnologia EBW: il problema è tanto più marcato quanto più grandi sono le dimensioni del pezzo, in quanto è necessaria una camera di vuoto tanto più grande e quindi più costosa, e occorre spendere energia e tempi maggiori per realizzare il vuoto (che tra l'altro dovrebbe essere piuttosto spinto per garantire ottime prestazioni del processo); chiaramente, meno è spinto il vuoto, minori sono i costi di realizzazione, ma contemporaneamente è minore la qualità della saldatura in termini di penetrazione.

Un altro problema è rappresentato dalla generazione di raggi X durante il processo, fatto che richiede adeguate protezioni.

Inoltre, le attrezzature necessarie per questa tecnologia sono generalmente costose.

CAPITOLO 4

Analisi metallografica giunti saldati

4.1. Acciaio materiale base

4.1.1. Caratteristiche chimiche, meccaniche, termiche

Le giunture saldate oggetto di questa analisi sono state effettuate su lamiere di acciaio DP600, ovvero acciaio Dual-Phase Ferritico-Martensitico appartenente alla classe degli acciai alto resistenziali ad elevata formabilità (AHSS).

Nella tabella 4.1 sono riassunte le caratteristiche chimiche rilevate con analisi allo spettrometro ad emissione ottica realizzata presso il Laboratorio di Metallurgia del DTG - Università di Padova sede di Vicenza, confermate dalle caratteristiche nominali dichiarate dal produttore.

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
0,081%	0,199%	1,690%	0,016%	<0,001%	0,012%	0,455%	0,047%
Cu	Mo	Al	Nb	V	Ti	B	
0,005%	0,001%	0,037%	0,003%	0,020%	0,002%	<0,001%	

Tabella 4.1.: percentuali degli elementi chimici presenti nel materiale base

In particolare, il materiale è stato zincato a caldo (zincatura a circa 450°C), con uno spessore dello strato zincato superficiale che risulta mediamente di 9 µm (figura 4.1).

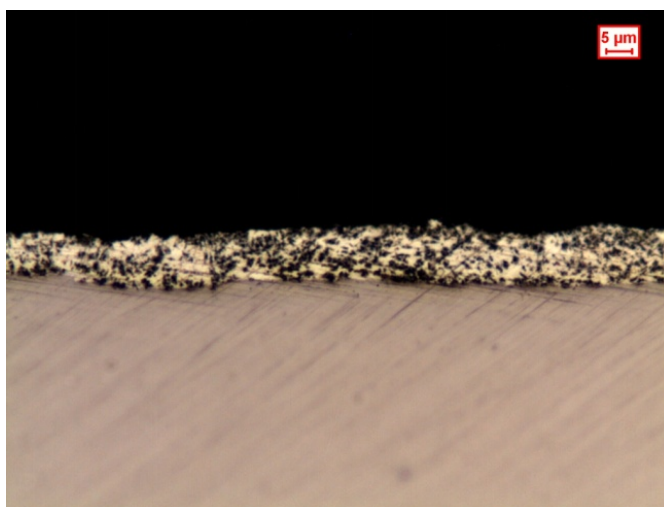


Figura 4.1.: particolare dello strato zincato

Le caratteristiche meccaniche e termiche nominali del materiale base sono riportate nella tabella 4.2.

TENSIONE DI SNERVAMENTO [MPa]	430
TENSIONE DI ROTTURA [MPa]	645
ALLUNGAMENTO PERCENTUALE A TRAZIONE	20%
MODULO ELASTICO [GPa]	200
AC1 [°C]	735
AC3 [°C]	860
Temperatura fusione [°C]	1450

*Tabella 4.2.: caratteristiche meccaniche e termiche acciaio DP600 analizzato
(metallo base su cui sono state effettuate tutte le saldature)*

Da prove di microdurezza eseguite sul materiale base, sono stati rilevati valori compresi tra 180 e 220 HV.

4.1.2. Analisi micrografica

Per quanto riguarda la dimensione del grano cristallino del materiale base, sono state effettuate misure del diametro equivalente grano su campioni prelevati dalle lamiere in più punti; da queste non sono emerse differenze significative tra i vari campioni, e il diametro equivalente medio misurato si aggira sui 3 μm .

Si può quindi affermare che la dimensione del grano nelle diverse zone dei giunti saldati, rilevata tramite analisi micrografica, non è influenzata da sensibili disomogeneità di grano del materiale base: questo facilita la valutazione delle alterazioni di diametro equivalente grano verificatesi durante ogni singolo processo di saldatura, permettendo un'analisi priva di influenze dovute a differenze nel materiale base.

L'analisi microstrutturale ha evidenziato una disomogenea distribuzione della martensite (microcostituente secondario) all'interno della matrice ferritica (microcostituente primario) attraverso lo spessore delle lamiere, visibile in figura 4.2.

In particolare, è stata rilevata una maggiore concentrazione di martensite nella zona di cuore della lamiera rispetto alle zone più superficiali; nella zona di cuore di un campione è stata rilevata una concentrazione media di costituente secondario del 21,4%, mentre nelle zone di bordo una concentrazione media del 17%.

Questa caratteristica disomogeneità, riscontrata nel materiale base di tutti i campioni analizzati, ha influenzato le modalità di prelievo delle micrografie e di esecuzione delle prove di microdurezza: infatti, non essendo oggetto di questa tesi la caratterizzazione del materiale base, ma essendo richiesto un confronto tra le varie tecnologie di



Figura 4.2.: materiale base, ingrandimento 50x

saldatura, sono necessarie analisi sui diversi giunti saldati che siano il più possibile esenti da influenze dovute a disomogeneità del materiale base.

Quindi, le micrografie di tutti i campioni e di ogni zona dei giunti saldati sono state prelevate in una fascia adiacente alla zona di cuore della lamiera, longitudinalmente lungo spessore della lamiera.

Con l'eccezione della zona di cuore, la martensite appare dispersa uniformemente in ogni zona.

In figura 4.3 è inoltre possibile notare la disposizione "a strisce orizzontali" della martensite con aspetto fibroso, dovuto alle tessiture di laminazione formatesi durante il processo produttivo del materiale.

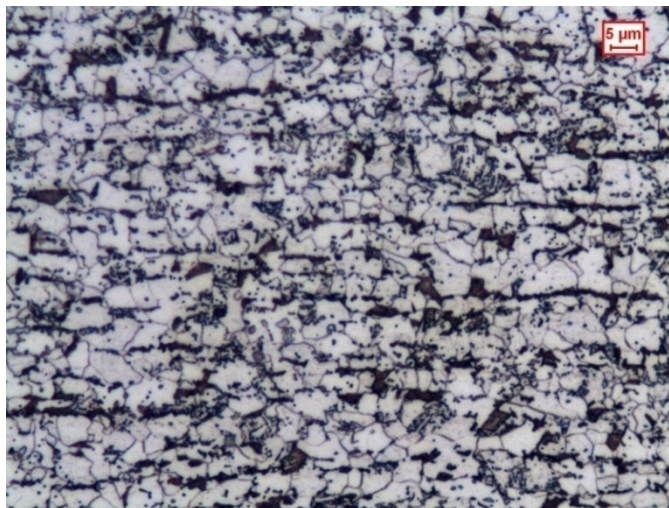


Figura 4.3.: tessiture di laminazione, ingrandimento 500x

Il materiale base è un acciaio contenente una percentuale di carbonio inferiore allo 0,6% (0,1%): quindi la martensite presente è presumibilmente di tipo aciculare.

4.2. Caratteristiche dei giunti

4.2.1. Descrizione talloni saldati

Tutte le lamiere di acciaio DP600 giuntate oggetto di questa analisi erano, prima della saldatura, zincate su entrambi i lati.

Per poter valutare le differenze tra le tecnologie di saldatura considerate sia in assenza che in presenza di uno strato zincato, e per rilevare eventuali influenze dello zinco sul processo di saldatura, su alcuni talloni è stato preventivamente tolto lo strato zincato prima della saldatura.

In questo modo si sono resi a disposizione 6 talloni di acciaio su cui sono stati effettuati giunti saldati, 3 con zincatura e 3 senza, ovvero: saldatura a fascio elettronico (EBW) su acciaio zincato e non zincato, saldatura al plasma (PAW) su acciaio zincato e non, saldatura ad arco (GTAW) su acciaio zincato e non.

Nelle figure 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 sono visualizzati tutti i talloni giuntati da cui sono stati prelevati i campioni analizzati.



Figura 4.4.: saldatura GTAW su acciaio non zincato

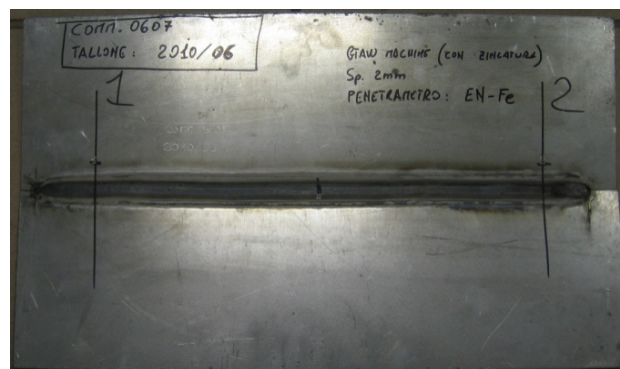


Figura 4.5.: saldatura GTAW su acciaio zincato

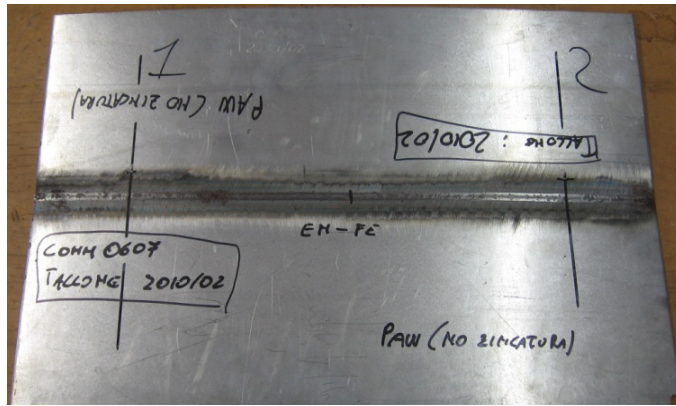


Figura 4.6.: saldatura PAW su acciaio non zincato

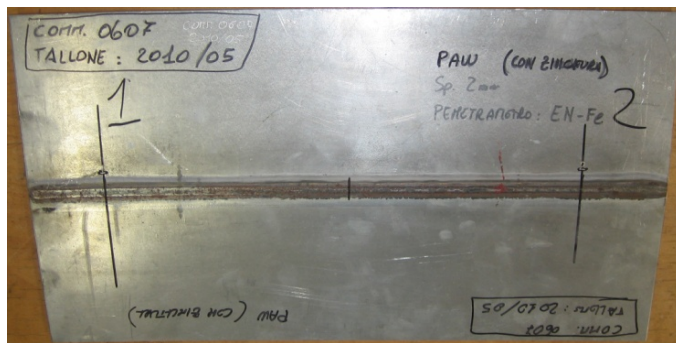


Figura 4.7.: saldatura PAW su acciaio zincato



Figura 4.8.: saldatura EBW su acciaio non zincato



Figura 4.9.: saldatura EBW su acciaio zincato

4.2.2. Parametri di saldatura giunti

In tabella 4.3 sono indicati i principali parametri di processo con cui sono state eseguite le saldature analizzate.

SALDATURA GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)						
Gas di copertura	Corrente		Vtaggio [V]	Velocità di passata [mm/s]	Efficienza η	Apporto termico [kJ/mm]
	Tipo di corrente e polarità	Intensità corrente [A]				
ARGON 99,99%	DC-SP	100	9,1	1,83	0,66	0,328
SALDATURA PAW (Plasma Arc Welding)						
Gas di copertura	Corrente		Vtaggio [V]	Velocità di passata [mm/s]	Efficienza η	Apporto termico [kJ/mm]
	Tipo di corrente e polarità	Intensità corrente [A]				
ARGON 99,99%	DC-SP	120	24,5	4,66	0,33	0,208
SALDATURA EBW (Electron Beam Welding)						
Gas di copertura	Alto vtaggio [kV]	Corrente di fascio [mA]	Focusing current [mA]	Velocità di passata [mm/s]	Efficienza η	Apporto termico [kJ/mm]
-	150 ± 2%	7,5 ± 5%	367 ± 2%	9	0,78	0,0975

Tabella 4.3.: parametri di esecuzione dei processi di saldatura analizzati

4.3. Analisi preliminare ai raggi X cordoni di saldatura

L'analisi ai raggi X (controllo radiografico) dei giunti saldati è una tecnica di controllo non distruttivo. Lo scopo di questo tipo di analisi è quello di controllare l'integrità del giunto saldato senza alterarne la struttura; inoltre permette di rilevare preliminarmente la presenza di eventuali difetti, soprattutto in prossimità del cordone saldato, come porosità, cricche o altro.

Il risultato finale di questa analisi è la selezione di alcune zone dei talloni saldati privi di significativi difetti, i quali potrebbero alterare i risultati delle prove meccaniche da condurre successivamente.

Oltre a individuare zone prive di difetti, una visione delle immagini ai raggi X permette anche di individuare le parti del cordone in cui la saldatura risulta apprezzabilmente omogenea, in modo da scartare eventuali zone in cui il processo di saldatura è stato effettuato in condizioni non ottimali con conseguente saldatura irregolare. L'individuazione di zone prive di questi difetti porta successivamente a tagliare opportunamente i talloni per selezionare i campioni su cui effettuare le analisi dovute.

L'analisi visiva delle immagini rilevate ai raggi X esclude le zone adiacenti ai confini destro e sinistro del cordone di saldatura, per circa 50mm, in quanto in questi punti il processo di saldatura probabilmente non presenta parametri ben assestati.

Nelle figure 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 sono visualizzate le immagini rilevate tramite radiografie dei talloni saldati.

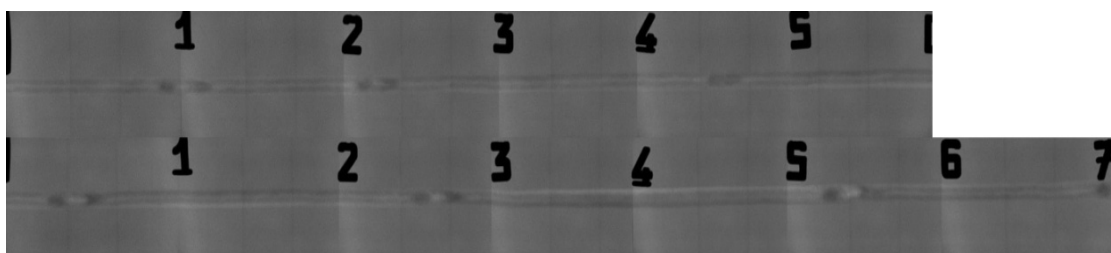


Figura 4.10.: immagine ai raggi X cordone saldatura GTAW su acciaio non zincato

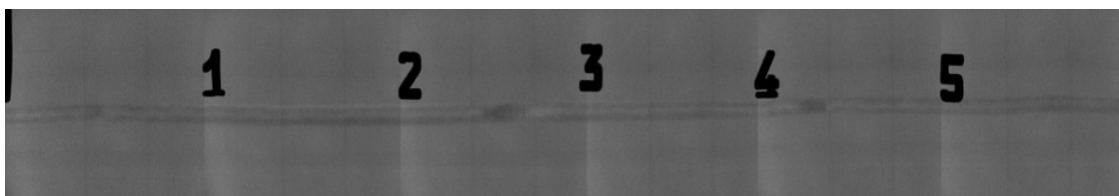


Figura 4.11.: immagine ai raggi X cordone saldatura GTAW su acciaio zincato



Figura 4.12.: immagini ai raggi X cordone saldatura PAW su acciaio non zincato

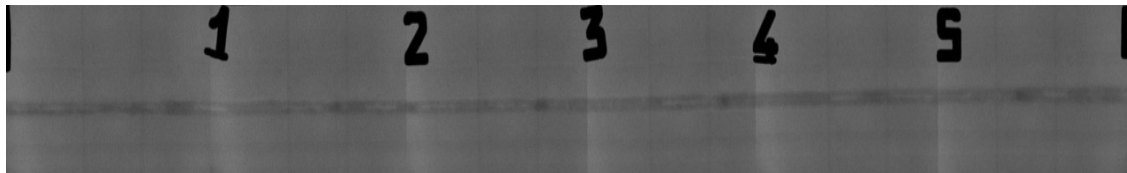


Figura 4.13.: immagini ai raggi X cordone saldatura PAW su acciaio zincato

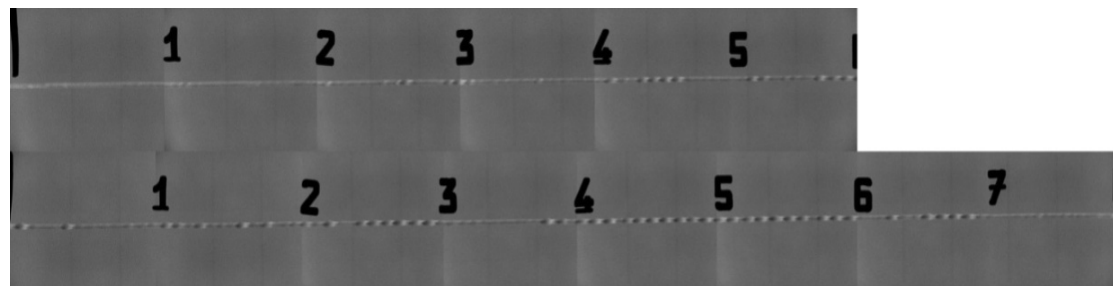


Figura 4.14.: immagini ai raggi X cordone saldatura EBW su acciaio non zincato

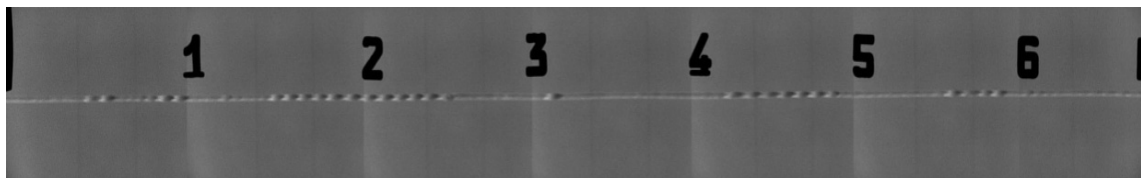


Figura 4.15.: immagine ai raggi X cordone saldatura EBW su acciaio zincato

La presenza di macchie più chiare rispetto alle zone circostanti indica una riduzione di spessore del materiale. Come è possibile notare in tutte le immagini (figure 4.10 – 4.15), le superfici attorno ai cordoni di saldatura appaiono molto omogenee, quindi lo spessore del materiale base è pressoché costante in tutte le zone delle lamiere, senza evidenti difetti come porosità.

Macchie più chiare, indicanti riduzioni di spessore, in corrispondenza dei cordoni possono essere indice di processi di saldatura non ottimali, in particolare di scarsa penetrazione della saldatura che potrebbe essere dovuta a:

- scarsa potenza dispositivo di saldatura;
- velocità di saldatura troppo elevata;

- accostamento imperfetto delle estremità della lamiera.

Oppure, ancora, irregolari riduzioni di spessore del cordone di saldatura potrebbero essere porosità dovute a uno o più dei seguenti motivi:

- inclusioni di gas inerte di copertura (argon in questo caso, ove previsto);
- mancata copertura con gas inerte;
- inclusioni di ossigeno;
- estremità della lamiera preparate male prima della saldatura.

Dall'osservazione delle immagini (figure 4.10 - 4.15), non si rilevano difetti come inclusioni o porosità, né nel materiale base, né nei cordoni di saldatura.

Nei cordoni di saldatura eseguiti a fascio elettronico (figure 4.14 – 4.15), si nota una più marcata disomogeneità di spessore rispetto ai cordoni saldati a GTAW e PAW (figure 4.10 – 4.13). Comunque, la forma delle macchie chiare nel cordone a fascio elettronico (figure 4.14 – 4.15) non indica difetti come inclusioni, ma solo differenze di spessore per disomogeneo accumulo di materiale: infatti presentano la tipica forma “ad archetto”, rivolta verso la direzione di saldatura, mentre eventuali porosità avrebbero forme più regolari (forma circolare, ...).

Anche nei cordoni di saldatura eseguiti con tecnologie GTAW e PAW (figure 4.10 – 4.13) non sono individuabili porosità o inclusioni.

L'individuazione di queste differenze non permette di fare un confronto efficace tra le diverse tipologie di saldatura, ma permette di escludere influenze dovute a presenza di difetti come porosità o inclusioni, i quali potrebbero eventualmente avere una significativa influenza sui risultati di prove meccaniche eseguite sui campioni.

Inoltre, questa osservazione permette di individuare zone in cui i cordoni presentano spessori apprezzabilmente costanti, sulle quali verranno eseguite le analisi metallografiche e meccaniche.

Nel caso dei cordoni saldati a EBW (figura 4.14 – 4.15), vista l'evidente disomogeneità di spessore, è stato scelto di prelevare campioni da analizzare sia in zone con spessore più omogeneo, sia in zone con spessore più disomogeneo.

Inoltre, non sono individuabili differenze apprezzabili tra le saldature eseguite su acciai zincati (figure 4.11, 4.13, 4.15) e le saldature eseguite su acciai non zincati (4.10, 4.12, 4.14), che potrebbero essere ipotizzabili per possibili reazioni con lo zinco durante il processo di saldatura.

4.4. Analisi allo stereoscopio dei giunti saldati

L'analisi grafica allo stereoscopio è stata eseguita con ingrandimenti compresi tra 6.3x e 10x, ed è stata condotta allo scopo di determinare le dimensioni dei cordoni di saldatura e individuare le varie zone di alterazione termica adiacenti al cordone, con indicazioni d'ordine di grandezza sulla loro estensione: infatti occorrono altre analisi per verificare l'esatta estensione delle zone di alterazione.

Per confrontare le diverse tecnologie di saldatura, è importante conoscere, per ogni tipo di giunto saldato, l'estensione della zona fusa e della Zona Termicamente Alterata (ZTA), in quanto sono effetti diretti del valore di apporto termico specifico di ogni processo di saldatura; in particolare, l'estensione della zona fusa e della zona termicamente alterata sono direttamente proporzionali all'apporto termico.

A sua volta, l'estensione della zona termicamente alterata è indice del grado delle alterazioni subite dal materiale giuntato: estensioni maggiori indicano cicli termici più severi a cui è stato sottoposto il materiale, e di conseguenza maggiori alterazioni microstrutturali; inoltre, l'estensione stessa della ZTA indica la quantità di materiale base che ha subito un'alterazione delle proprietà.

Essendo generalmente desiderabili, almeno nella maggior parte delle applicazioni reali, alterazioni il più possibile contenute del materiale, si intuisce già come l'estensione delle zone alterate possa essere un indice di preferibilità di un processo di saldatura rispetto ad altri: in questo senso, risultano preferibili giunti saldati che presentano la minore estensione di zona fusa e termicamente alterata.

Nelle figure 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 sono riportate le immagini rilevate allo stereoscopio dei vari campioni di giunti saldati.

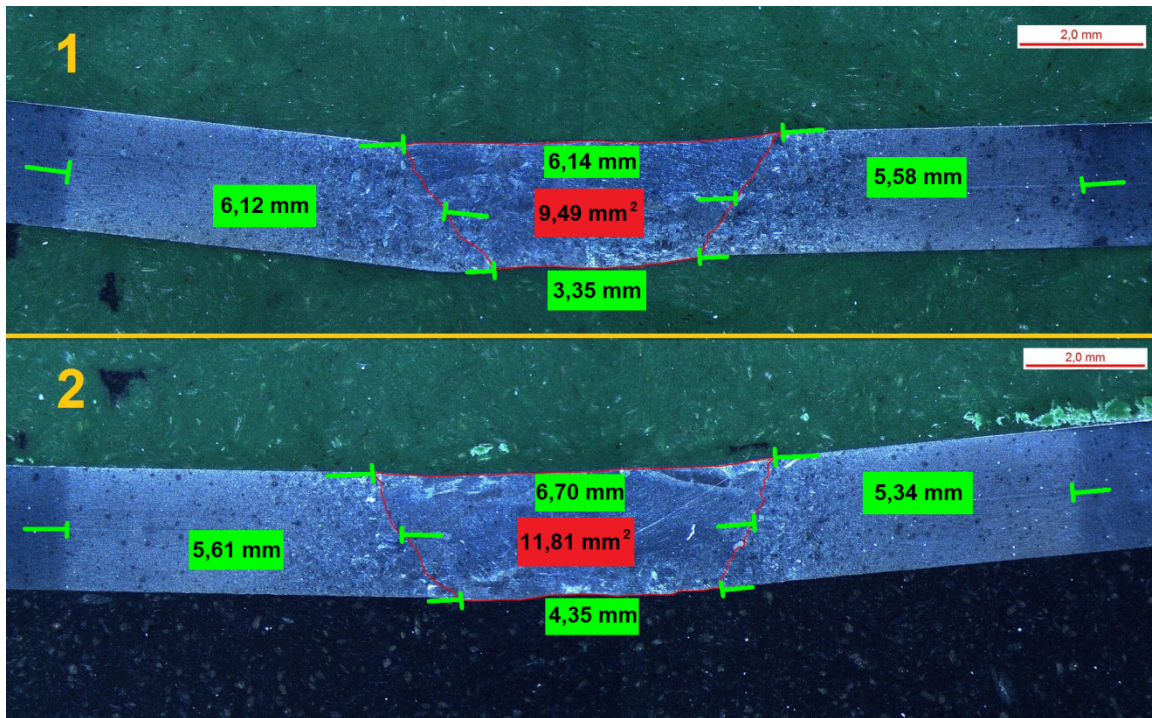


Figura 4.16.: immagini da stereoscopio cordoni saldati a GTAW su acciaio non zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x

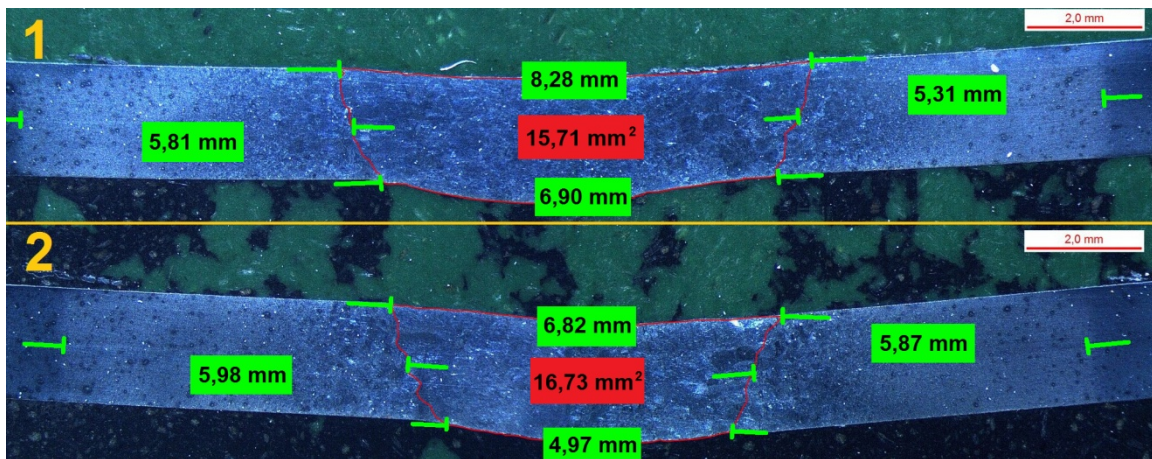


Figura 4.17.: immagini da stereoscopio cordoni saldati a GTAW su acciaio zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x

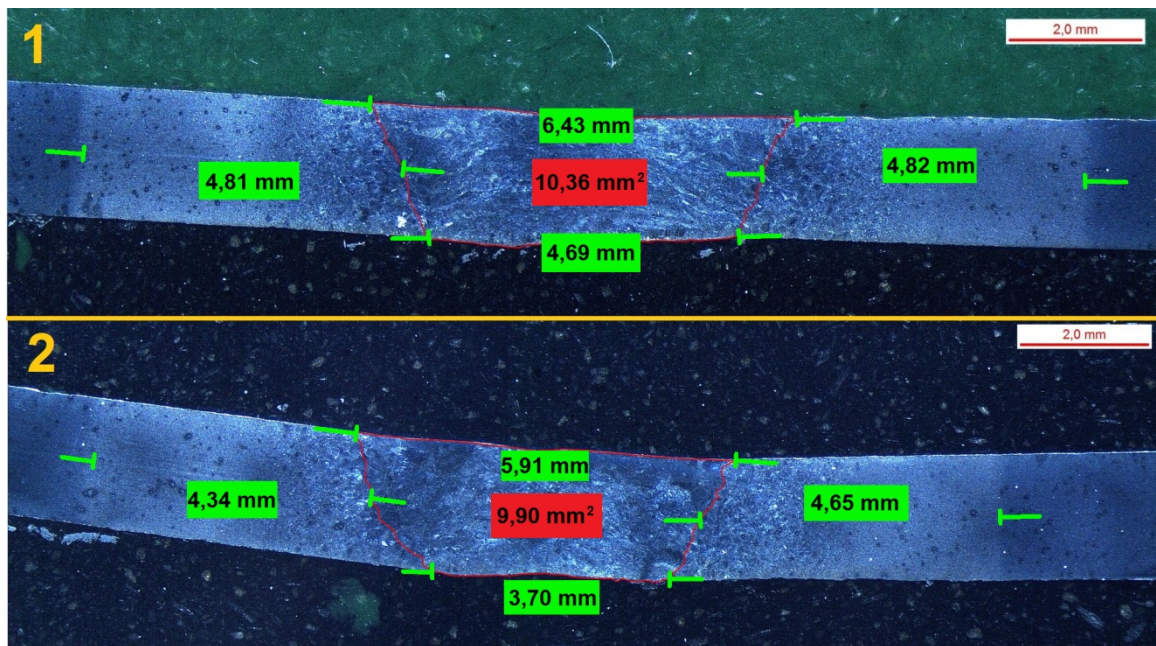
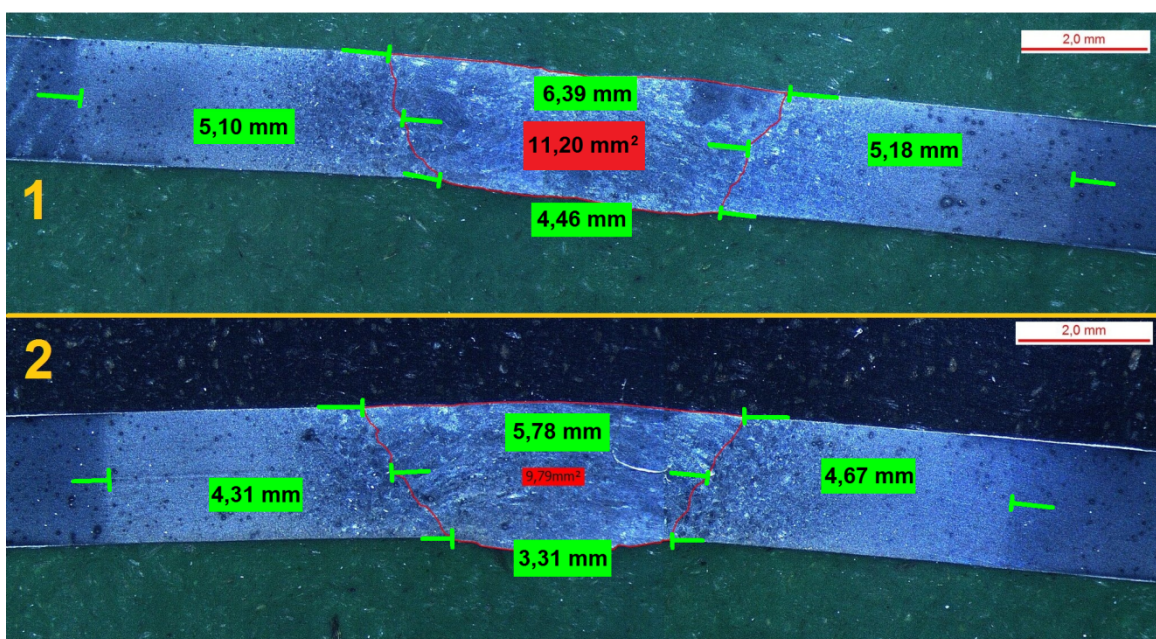


Figura 4.18.: immagini da stereoscopio cordoni saldati tramite PAW su acciaio non zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x



Figuri 4.19.: immagini da stereoscopio cordoni saldati tramite PAW su acciaio zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x

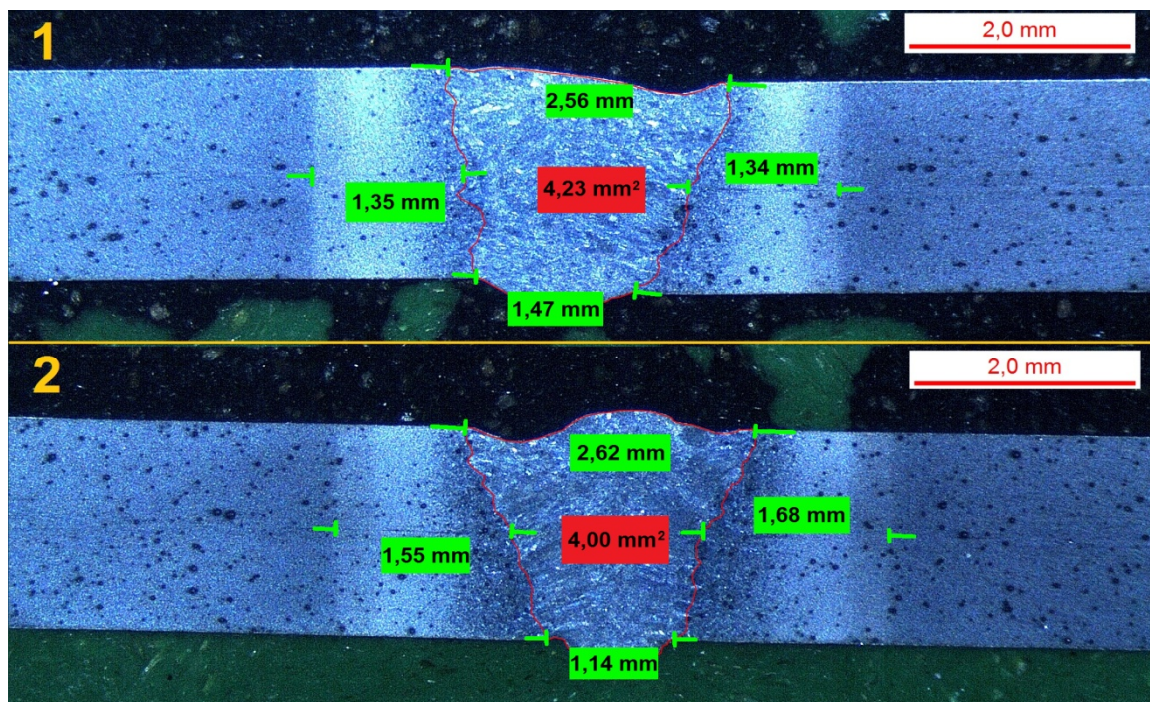


Figura 4.20.: immagini da stereoscopio cordoni saldati tramite EBW su acciaio non zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x

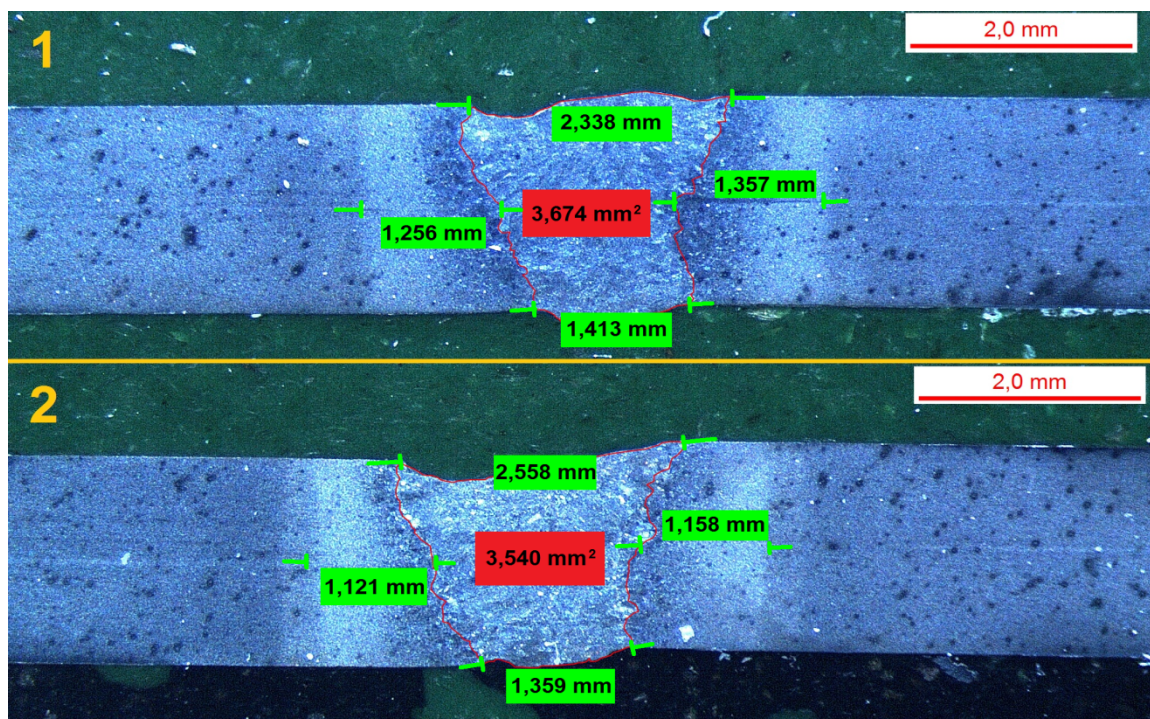


Figura 4.21.: immagini da stereoscopio cordoni saldati tramite EBW su acciaio zincato, campione 1 e 2, ingrandimento 6.3x

Non sono riscontrabili differenze d'estensione del cordone e delle zone termicamente alterate, per ogni tecnologia di saldatura, dovute alla presenza o assenza dello strato zincato, il quale da questo punto di vista ha avuto una influenza praticamente

trascurabile (eventuali differenze dovute più a eventi aleatori e al posizionamento del campione in un punto più o meno lontano dall'inizio del cordone di saldatura).

Nella tabella 4.4 sono visualizzate le dimensioni medie del cordone e della zona termicamente alterata, per ogni tecnologia di saldatura, riscontrabili visivamente dalle immagini allo stereoscopio.

Tecnologia di saldatura	Area media cordone [mm ²]	Larghezza media cordone [mm]	estensione media zona termicamente alterata, a partire dal confine con il cordone [mm]	Apporto termico calcolato [kJ/mm]
GTAW	≅ 13	≅ 6	≅ 6	0,3280
PAW	≅ 10	≅ 5	≅ 5	0,2080
EBW	≅ 4	≅ 2	1 ÷ 2	0,0975

Tabella 4.4.. proporzioni e dimensioni di zona fusa e ZTA dei giunti saldati per ogni tecnologia di saldatura

Osservando i dati della tabella 4.4 e le immagini allo stereoscopio, risulta evidente che i campioni saldati con tecnologia EBW presentano dimensioni del cordone e un'estensione della zona termicamente alterata significativamente inferiori rispetto ai campioni saldati con PAW e GTAW. Inoltre, stessa considerazione riguarda l'apporto termico calcolato per le diverse tecnologie, che risulta inferiore nel caso EBW rispetto alle altre tecnologie.

Apporto termico e estensione della zona termicamente alterata sono correlati tra loro in modo direttamente proporzionale, in quanto all'aumentare dell'apporto termico aumenta l'energia (termica) fornita al materiale, e quindi aumentano le zone del materiale che subiscono alterazioni termiche poiché resta costante la capacità di dissipazione del calore da parte della lamiera.

Tra i giunti saldati tramite GTAW e quelli con PAW, invece, le differenze non sono così marcate come nel confronto con saldatura EBW.

Queste osservazioni consentono di elaborare una prima plausibile classifica riguardo la tecnologia di saldatura preferibile su questo tipo di acciaio; la tecnologia EBW sarebbe al primo posto di questa classifica: infatti dimostra di comportare una minore estensione delle zone termicamente alterate, e quindi, presumibilmente, una minore alterazione delle proprietà meccaniche della lamiera; ciò verrà approfondito con specifiche prove meccaniche.

Visivamente è anche possibile notare le zone in cui la dimensione del grano è alterata, in particolare le zone di ingrossamento grano che sono molto più marcate nel caso della saldatura GTAW rispetto alle altre. Ma per dati più attendibili sulla dimensione grano occorre svolgere analisi micrografica.

4.5. Analisi micrografica

4.5.1. Premesse

L'analisi metallografica al microscopio ottico è stata eseguita con ingrandimenti compresi tra 100x e 1000x, ed è stata condotta allo scopo di osservare la microstruttura, individuare i microcostituenti e le fasi principali, rilevare le dimensioni del grano cristallino nella zona fusa, nelle zone termicamente alterate e nel materiale base di ciascun giunto saldato.

Considerate le disomogeneità microstrutturali del materiale base rilevate, in particolare la maggiore concentrazione di martensite nella zona di cuore, e considerando che lo scopo dell'analisi è quello di valutare le differenze tra le diverse tipologie di saldatura e non la caratterizzazione del materiale base, le immagini ai vari ingrandimenti sono state prelevate evitando la zona di cuore del materiale, a sufficiente distanza dai bordi esterni della lamiera.

Nell'analisi micrografica è stata trascurata la differenziazione del materiale tra zincato e non zincato, considerato che le micrografie non sono state eseguite in prossimità del bordo, e quindi la presenza o assenza di uno strato zincato non costituisce un elemento discriminante nella valutazione delle saldature.

In ogni caso, da una prima visione al microscopio delle zone di bordo in prossimità dello strato zincato, ove presente, non sono emerse influenze significative di questo strato sulla microstruttura dei giunti saldati.

4.5.2. Analisi dimensione grano

La dimensione del grano cristallino è un elemento che influenza direttamente le proprietà meccaniche di un metallo.

La determinazione della dimensione grano nel cordone e nelle zone termicamente alterate dei giunti saldati consente di dare una misura delle alterazioni del materiale avvenute durante il processo di saldatura.

In genere strutture caratterizzate da cristalli grossi sono da evitare, e quindi è desiderabile che il processo di saldatura alteri il meno possibile in aumento la dimensione grano del materiale base: questo perché acciai caratterizzati da strutture a grani grossi presentano tendenzialmente un comportamento poco duttile e poco tenace.

La struttura finale di un acciaio è caratterizzata da cristalli le cui dimensioni indicano le vicende subite dall'acciaio stesso durante la sua permanenza in campo austenitico, oltre che durante il suo raffreddamento. Durante il processo di saldatura, parte del materiale fonde (zona interna al cordone), mentre la parte adiacente raggiunge temperature di

austenizzazione. Ne consegue che la dimensione del grano in prossimità del cordone e della ZTA dipende, oltre che dalla dimensione grano che il materiale aveva prima della saldatura (ovvero dimensione grano del materiale base, nel caso della ZTA), anche dai cicli termici a cui il materiale è stato sottoposto durante la saldatura come conseguenza dell'apporto termico del processo.

Infatti, partendo da un materiale base con una determinata dimensione grano, se viene riscaldato e mantenuto in campo austenitico per un tempo sensibile, i cristalli subiscono un fenomeno di coalescenza per cui accrescono le proprie dimensioni: ne risulta così una struttura a grani ingrossati che si mantiene anche nelle successive trasformazioni durante il raffreddamento.

Nella teoria, il tempo di permanenza in campo austenitico delle zone adiacenti al cordone, le temperature raggiunte e l'estensione di queste zone dipendono dal valore dell'apporto termico (H.I.) raggiunto durante il processo di saldatura: crescono all'aumentare di H.I., e a valori più elevati corrisponde un più accentuato ed esteso fenomeno di ingrossamento grano per coalescenza.

Ovviamente è desiderabile che, durante il processo di saldatura, questo fenomeno sia il più limitato possibile, ovvero che la minor quantità possibile di materiale subisca un aumento di dimensione grano rispetto a quella del materiale base; dovrebbe cioè essere contenuta entro valori bassi l'estensione delle zone in cui il materiale è mantenuto per lungo tempo a temperature di austenizzazione.

Da ciò consegue che i processi di saldatura in grado di realizzare giunti saldati con caratteristiche soddisfacenti presentando un minor valore di apporto termico sono teoricamente preferibili: da questo punto di vista la tecnologia EBW sarebbe preferibile rispetto alle tecnologie GTAW e PAW; questo dovrà essere verificato con prove meccaniche.

GTAW	GTAW	PAW	PAW	EBW	EBW
distanza dall'asse del cordone [μm]	diametro equivalente grano [μm]	distanza dall'asse del cordone [μm]	diametro equivalente grano [μm]	distanza dall'asse del cordone [μm]	diametro equivalente grano [μm]
0	17,08	0	10,8	0	7
2000	18,74	2410	12,14	800	7,7
2600	17,3	3010	6,41	1200	7,2
3000	17,27	3410	5,83	1600	2,8
3400	16,14	5810	3,17	2000	2,95
5400	4,7	9000	3	2500	3,1
9000	3			8000	3

Tabella 4.5.: diametro equivalente grano in funzione della distanza dall'asse della zona fusa in 3 provini rispettivamente saldati a GTAW, PAW, EBW

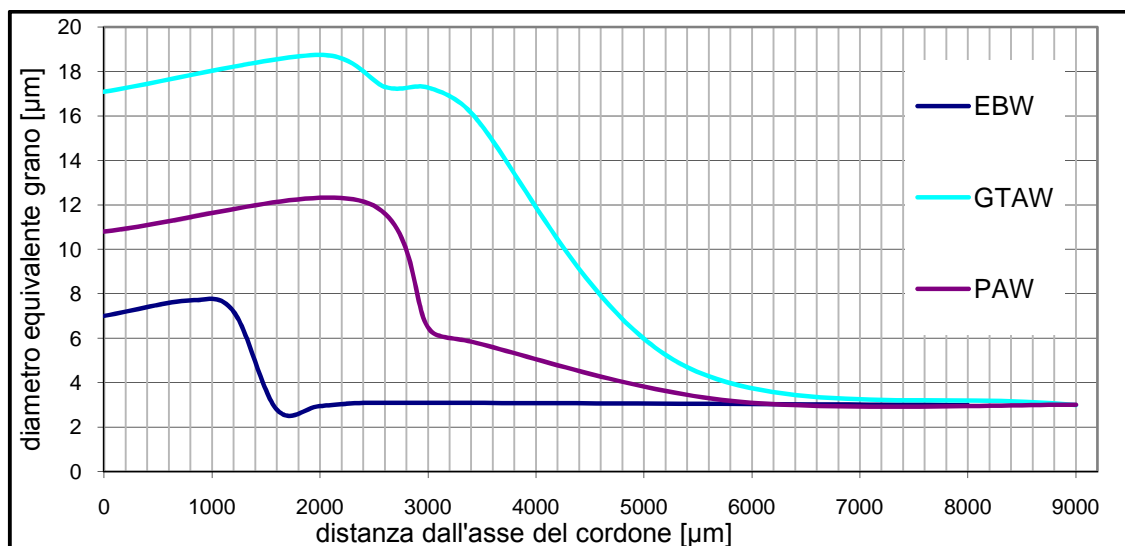


Grafico 4.1.: diametro equivalente grano in funzione della distanza dall'asse della zona fusa, per campioni saldati tramite GTAW, PAW, EBW

Nella tabella 4.5 e nel grafico 4.1 è indicato il diametro equivalente del grano in funzione della distanza dall'asse della zona fusa per ogni tecnologia di saldatura, ovvero GTAW, PAW, EBW; i dati sono rilevati dai 3 campioni più rappresentativi.

Osservando i dati rilevati, si potrebbe elaborare una classifica in base all'entità delle alterazioni dimensione grano e alla loro estensione lungo il profilo del giunto saldato, confermando quanto ipotizzato nel confronto dei valori di apporto termico.

Il giunto saldato con tecnologia GTAW presenta una maggiore alterazione di dimensione grano, sia per quanto riguarda valore diametro equivalente, sia per quanto riguarda l'estensione delle zone in cui risulta alterato, rispetto ai giunti saldati con le altre tecnologie: quindi risulta una saldatura meno preferibile rispetto alle altre perché questo è indice di una maggiore alterazione delle proprietà meccaniche del materiale.

Il campione saldato con tecnologia PAW, osservando questi dati, mostra caratteristiche intermedie tra le altre 2 tecnologie; a ogni modo, dal punto di vista delle alterazioni dimensione grano, risulterebbe con ogni probabilità preferibile su questo tipo di acciaio la tecnologia EBW.

Confrontando i dati di tabella 4.4 con quelli di tabella 4.5, viene confermata l'ipotizzata correlazione diretta tra alterazione dimensione grano (costituita da aumento dimensione grano rispetto al materiale base, e estensione della zona in cui questa alterazione si manifesta) e il valore dell'apporto termico specifico di ogni tecnologia di saldatura.

4.5.3. Analisi distribuzione fasi e microcostituenti

L'apporto termico specifico in saldatura determina non solo il raggiungimento di determinate temperature durante il processo, ma anche la velocità di raffreddamento del materiale saldato, e quindi le trasformazioni di fase subite dal materiale nel corso del raffreddamento. Questo comporta che conoscere la distribuzione delle fasi e dei microcostituenti presenti, non solo nel cordone di saldatura ma anche nella zona termicamente alterata, permette di fare ulteriori considerazioni sull'entità delle alterazioni del materiale che ogni specifico processo di saldatura comporta; da ciò conseguirà un ulteriore confronto tra le diverse tecnologie di saldatura su questo tipo di acciaio, presumibilmente coerente con quanto già ipotizzato nella valutazione dimensione grano ed estensione zona termicamente alterata (ZTA).

Dall'osservazione delle micrografie sono state identificate, per ogni tipologia di giunto saldato, 4 diverse zone:

- ZONA DI FUSIONE, corrispondente all'area del cordone di saldatura in cui il materiale base e il materiale d'apporto hanno raggiunto temperature di fusione;
- ZONA TERMICAMENTE ALTERATA (ZTA), una zona diversa dal materiale base originario ai due lati della zona fusa, in cui non è avvenuta fusione ma è stata riscaldata ad una temperatura che ha comportato un cambiamento della struttura; questa zona può essere suddivisa in altre 2 parti: una prima parte, immediatamente adiacente alla zona fusa, in cui il materiale ha raggiunto durante il processo di saldatura temperature di austenizzazione (superiori ad Ac1), e una seconda parte, consecutiva alla prima e adiacente al materiale base non alterato, in cui il materiale ha raggiunto temperature inferiori a quella di austenizzazione. Non è possibile, senza simulazioni termiche, stabilire l'esatto confine tra queste due zone; ma la loro suddivisione è confermata dalle micrografie in quanto mostrano chiaramente una zona di rinvenimento del materiale base che costituisce la seconda parte della ZTA;
- MATERIALE BASE NON ALTERATO (MB), in cui la microstruttura dell'acciaio base non ha subito alterazioni termiche e quindi presenta una morfologia uguale a quella di partenza.

Nella figura 4.22 sono indicate qualitativamente le zone identificabili tramite macrografia allo stereoscopio per ogni tecnologia di saldatura analizzata; le misure sono

representative dell'ordine di grandezza delle varie zone, in quanto per stabilire l'esatta estensione delle zone di alterazione occorre un'analisi più dettagliata delle micrografie.

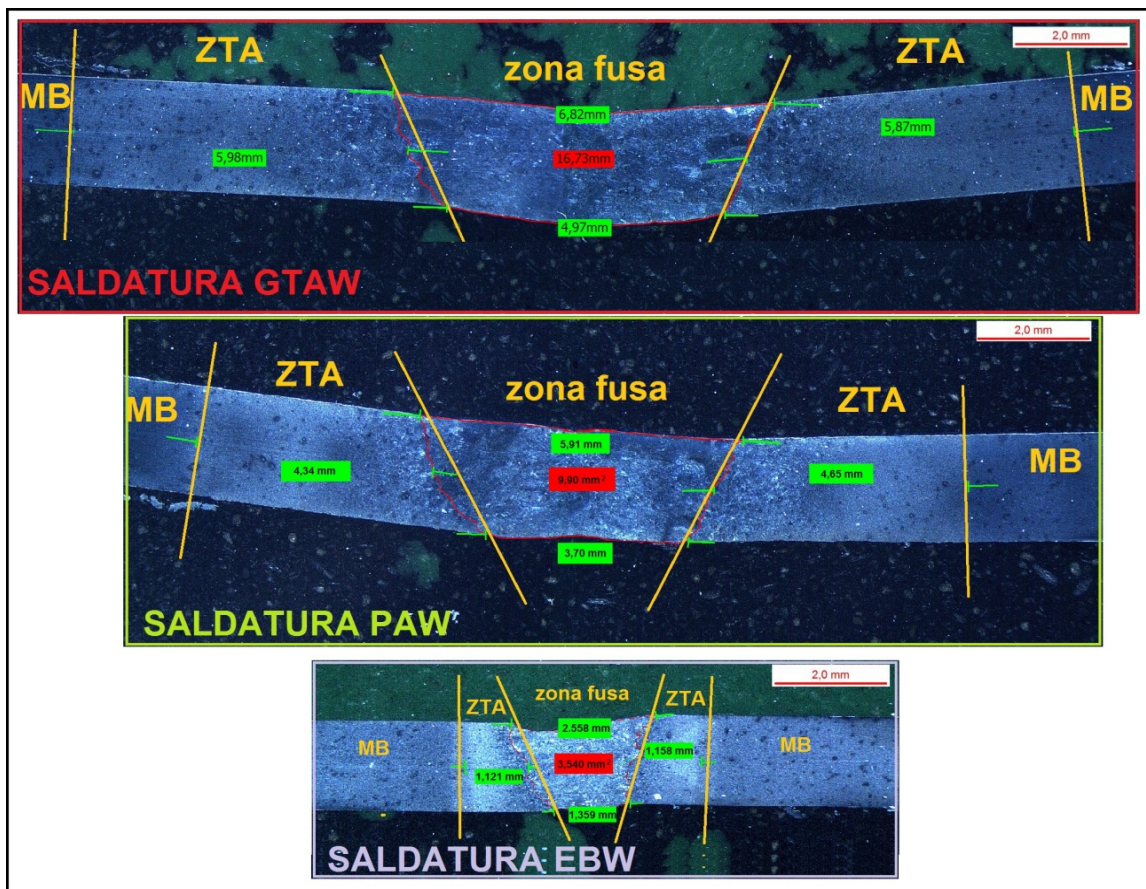


Figura 4.22.: suddivisione zone di alterazione termica di giunti saldati con tecnologie GTAW, PAW, EBW.

4.5.3.1. Analisi micrografica saldatura GTAW

La morfologia della ZONA FUSA è riportata nelle figure 4.23 e 4.24.

Essa presenta presumibilmente una struttura composta da bainite, ferrite allotriomorfa e ferrite aciculare; quest'ultima è identificabile per la struttura chiamata in letteratura "struttura a cestino", e in genere la sua nucleazione all'interno del grano austenitico è dovuta alla presenza di inclusioni.

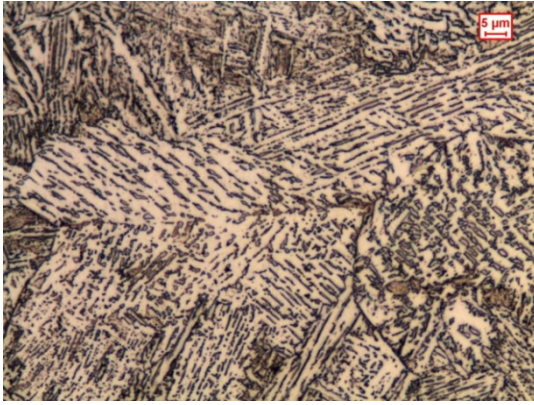


Figura 4.23.: asse zona fusa saldatura gtaw, ingrandimento 500x

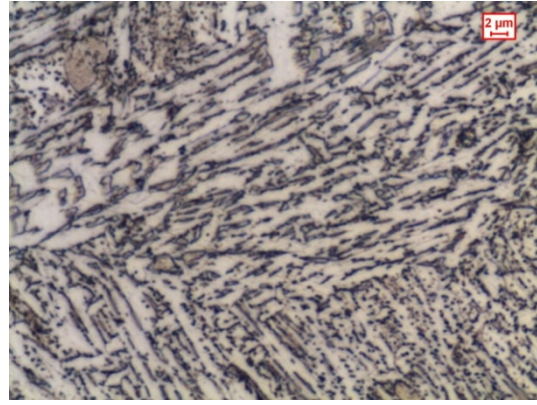


Figura 4.24.: asse zona fusa saldatura gtaw, ingrandimento 1000x

Grosso modo si ritrova la stessa microstruttura, costituita presumibilmente da ferrite aciculare e bainite, anche nel confine tra zona fusa e ZTA, che in questo giunto si trova a 2900÷3000 μm dall'asse del cordone (figure 4.25 e 4.26).

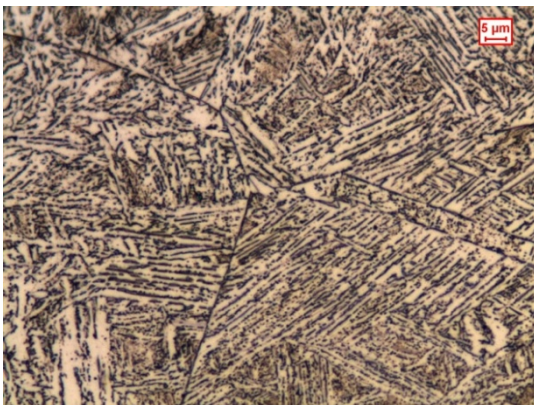


Figura 4.25.: confine cordone-ZTA, 3000 μm dall'asse cordone, saldatura gtaw, ingrandimento 500x

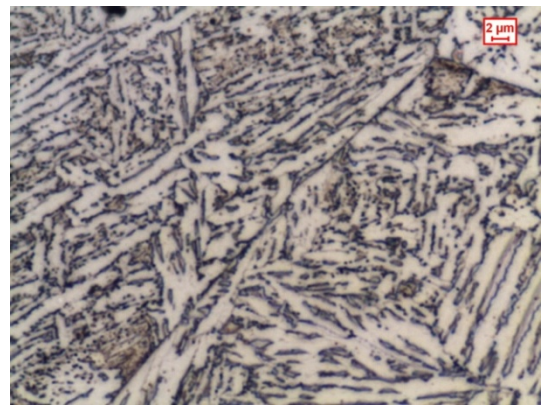


Figura 4.26.: confine cordone-ZTA, 3000 μm dall'asse cordone, saldatura gtaw, ingrandimento 1000x

All'aumentare della distanza dalla zona fusa, si nota una progressiva diminuzione di costituente secondario, e quindi un aumento in percentuale di matrice ferritica verso composizioni che si avvicinano a quella del materiale base: questo fino a circa 7000 μm dall'asse del cordone, ovvero in ZTA (figura 4.27), in cui appare una morfologia molto simile a quella del metallo base non alterato.

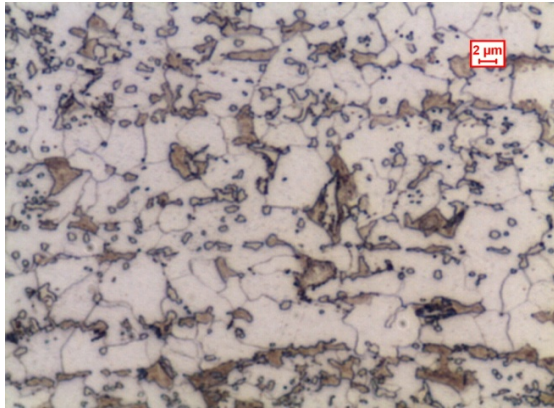


Figura 4.27.:ZTA saldatura gtaw, 7000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

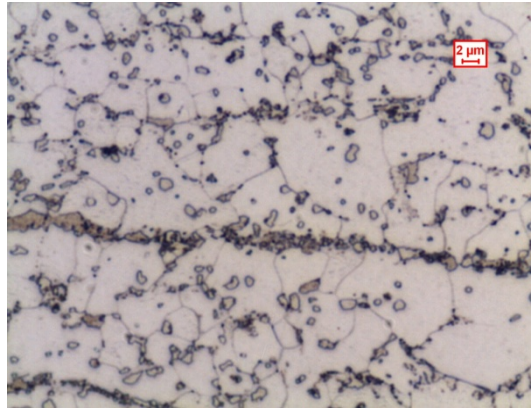


Figura 4.28.: ZTA saldatura gtaw,9000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

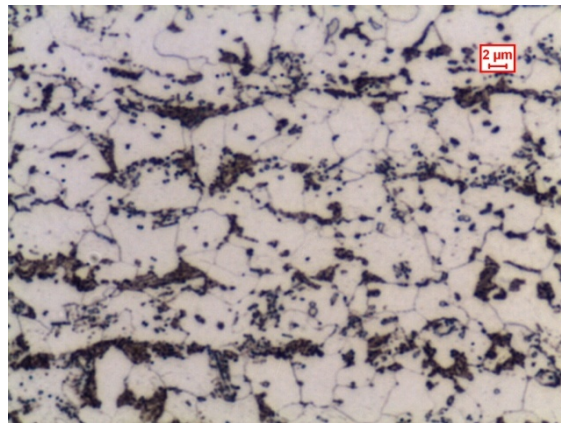


Figura 4.29.:ZTA saldatura gtaw, 11000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

Da circa 9000 μm dall'asse del cordone a circa 11000 μm (figura 4.28 e 4.29) la microstruttura appare trasformata, sia rispetto a quella riscontrabile a 6000÷7000 μm di distanza dal cordone nella ZTA, sia rispetto a quella del materiale base.

In particolare, compare una concentrazione minore di martensite, che potrebbe indicare una parziale trasformazione di struttura della martensite da aciculare a placche (non ben distinguibile a 1000 ingrandimenti), mista a una morfologia presumibilmente sorbitica.

Questo indica che in questa zona è avvenuto un rinvenimento della martensite: cioè con ogni probabilità il materiale qui, durante il processo di saldatura, ha raggiunto temperature inferiori a quelle di austenizzazione (ovvero inferiori a Ac1), ipotesi avvalorata dalla dimensione grano riscontrata in questa zona (tabella 4.5) che si assesta su valori simili a quelli riscontrati nel materiale base (3 μm), e quindi non risulta alterata.

A 7000 μm dall'asse del cordone (figura 4.27), la microstruttura non appare trasformata rispetto al materiale base come invece appare a 9000 \div 11000 μm : quindi questo potrebbe indicare che in questa zona il materiale ha probabilmente raggiunto, durante il processo di saldatura, temperature superiori ad A_{c1} , per cui, per raffreddamento sufficientemente rapido, si è riformata martensite con morfologia simile a quella del materiale base.

4.5.3.2. Analisi micrografica saldatura PAW

Per quanto riguarda la morfologia microstrutturale riscontrata nel giunto saldato con tecnologia PAW, essa ricalca grosso modo la distribuzione di fasi e costituenti già trovati nel giunto saldato con GTAW, ma con differenze in estensione e posizionamento delle microstrutture riscontrate in accordo con quanto rilevato allo stereoscopio (figura 4.22).

In particolare, come diretta conseguenza del diverso valore di apporto termico (inferiore per la saldatura PAW rispetto a quella GTAW analizzate, tabella 4.4), le zone di alterazione nel giunto saldato a PAW risultano essere meno estese e a distanze dal cordone inferiori rispetto al giunto saldato a GTAW.

In particolare, viene rilevata una microstruttura presumibilmente composta da bainite, ferrite allotriomorfa e ferrite aciculare nella zona fusa (figure 4.30, 4.31); una morfologia simile si ripresenta, seppur in proporzioni diverse, nella zona di confine tra zona fusa e ZTA (figure 4.32, 4.33), che in questo giunto saldato si trova a 2400 μm dall'asse del cordone.

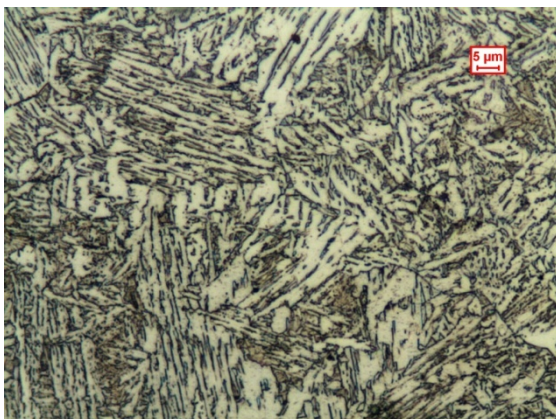


Figura 4.30.: zona fusa saldatura paw, ingrandimento 500x

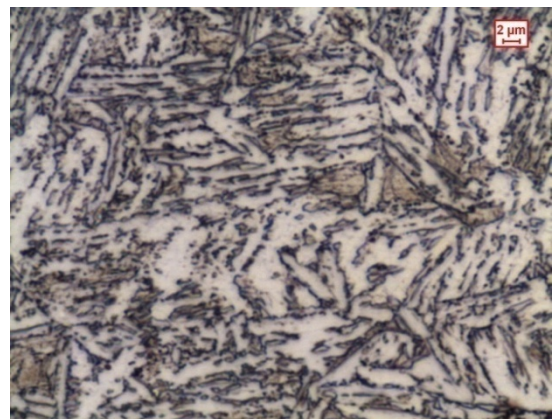


Figura 4.31.: zona fusa saldatura paw, ingrandimento 1000x

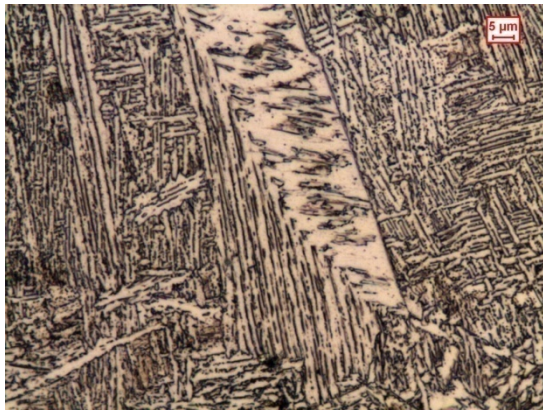


Figura 4.32.: confine cordone-ZTA, 2400 μm dall'asse cordone, saldatura paw, ingrandimento 500x

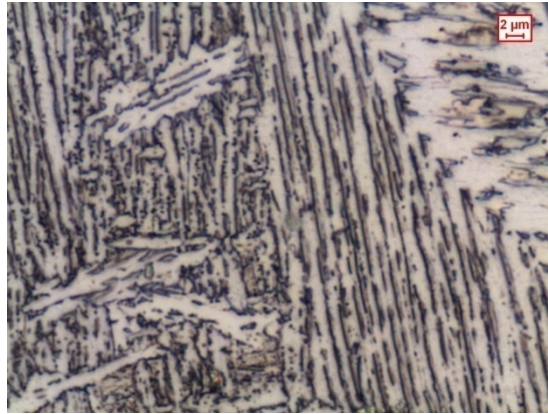


Figura 4.33.: confine cordone-ZTA, 2400 μm dall'asse cordone, saldatura paw, ingrandimento 1000x

All'aumentare della distanza dalla zona fusa, si nota una progressiva diminuzione di costituente secondario, e quindi un aumento in percentuale di matrice ferritica verso strutture e composizioni che si avvicinano a quella del materiale base, ovvero martensite presumibilmente aciculare: questo fino a circa 6000 μm dall'asse del cordone, ovvero in zona ZTA (figura 4.34), in cui appare una morfologia molto simile a quella del metallo non alterato (visibile in figura 4.36).

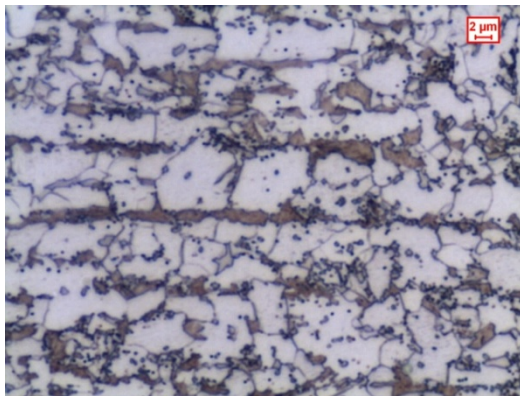


Figura 4.34.: ZTA, 6000 μm dall'asse cordone, saldatura paw, ingrandimento 1000x

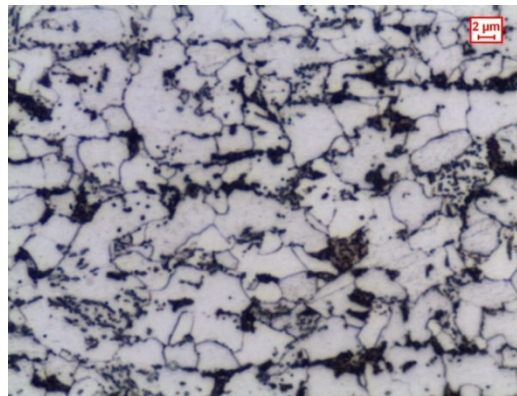


Figura 4.35.: ZTA, 8000 μm dall'asse cordone, saldatura paw, ingrandimento 1000x

Nella zona a 8000 μm dall'asse del cordone (figura 4.35), si nota che il costituente secondario ha parzialmente assunto una struttura presumibilmente sorbitica mista a martensite a placche: ciò indica che in questa zona il materiale probabilmente non ha raggiunto temperature di austenizzazione durante il processo di saldatura, raggiunte invece nella zona a 6000 μm in cui è probabilmente presente martensite aciculare non rinvenuta ma formata per austenizzazione e rapido raffreddamento.

Quindi a 8000 μm il materiale base è stato interessato da un processo di rinvenimento della martensite, e l'ipotesi di mancata austenizzazione è avvalorata dalla dimensione grano riscontrata in questa zona (tabella 4.5), che si assesta su valori simili a quelli riscontrati nel materiale base (3 μm).

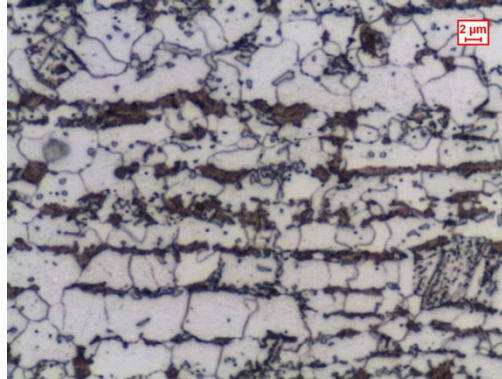


Figura 4.36.: MB, 14000 μm dall'asse del cordone, saldatura paw, ingrandimento 1000x

4.5.3.3. Analisi micrografica saldatura EBW

Sostanzialmente, anche per il giunto saldato con tecnologia EBW si può ripetere quanto già dedotto dall'analisi micrografia della saldatura PAW: la distribuzione di fasi e microcostituenti rilevata nelle varie zone del giunto saldato è grosso modo analoga a quella riscontrata negli altri giunti, ma a differenti distanze dall'asse del cordone e con differenti estensioni (minori nel caso della saldatura EBW rispetto a GTAW e PAW).

La morfologia della ZONA FUSA è riportata nelle figure 4.37 e 4.38.

Essa è presumibilmente una struttura composta da bainite, ferrite allotriomorfa, ferrite aciculare e martensite.

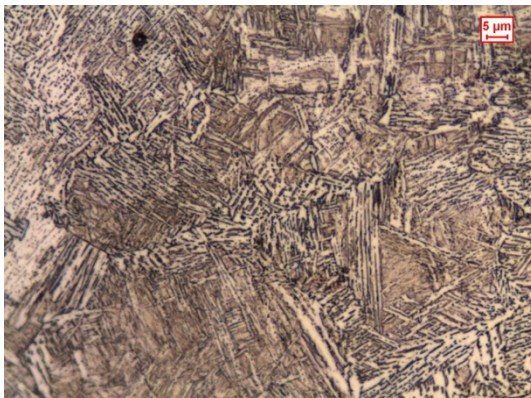


Figura 4.37.: zona fusa, saldatura ebw, ingrandimento 500x

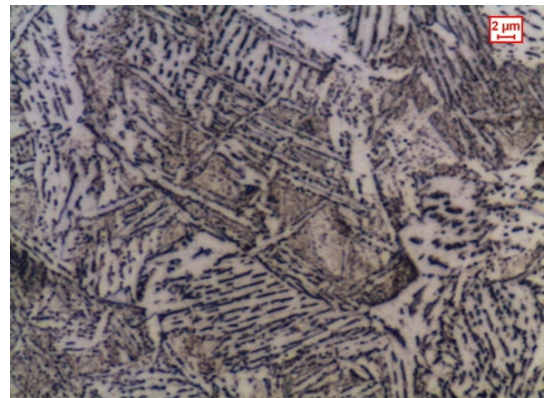


Figura 4.38.: zona fusa, saldatura ebw, ingrandimento 1000x

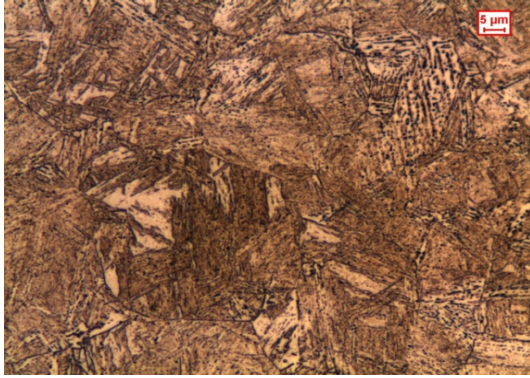


Figura 4.39.: confine cordone-ZTA, saldatura ebw, 1000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 500x

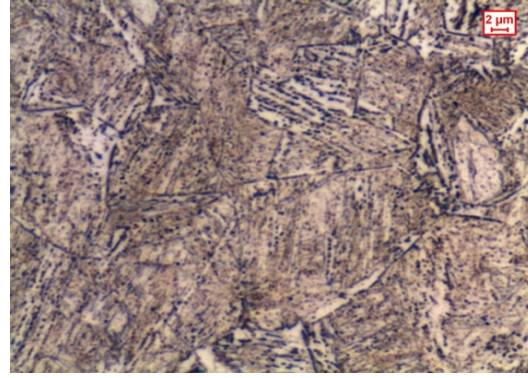


Figura 4.40.: confine cordone-ZTA, saldatura ebw, 1000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

Il confine tra la zona fusa e la ZTA (figure 4.39 e 4.40) si trova a 900-1000 μm dall'asse del cordone; in questa zona è verosimilmente presente una struttura prevalentemente bainitica.

Come negli altri giunti saldati analizzati (GTAW e PAW), si nota una progressiva diminuzione di costituente secondario e un aumento in percentuale di matrice ferritica all'aumentare della distanza dalla zona fusa, fino a raggiungere una morfologia con martensite presumibilmente aciculare a circa 2000 μm dall'asse del cordone (figura 4.41); in questa zona si osserva una microstruttura simile a quella del materiale base non alterato, che in questo giunto saldato inizia a presentarsi già a 3500 μm dall'asse della zona fusa (figura 4.43): però a 2000 μm di distanza il materiale è stato alterato, e probabilmente qui sono state raggiunte e superate dal materiale temperature di austenizzazione.

A circa 2500 μm dall'asse della zona fusa (figura 4.42) probabilmente il materiale, durante il processo di saldatura, non ha raggiunto temperature di austenizzazione, in quanto la dimensione grano riscontrata in questa zona (tabella 4.5) si assesta sui valori riscontrati nel materiale base non alterato (3 μm); sembrerebbe presente in questa zona una struttura sorbitica mista a martensite in parte ancora aciculare e in parte rinvenuta: quindi si tratta della zona di rinvenimento.

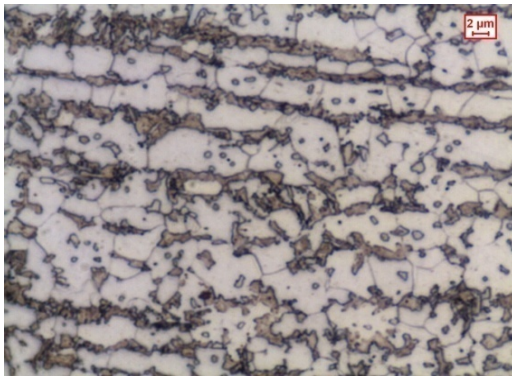


Figura 4.41.: ZTA, saldatura ebw, 2000 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

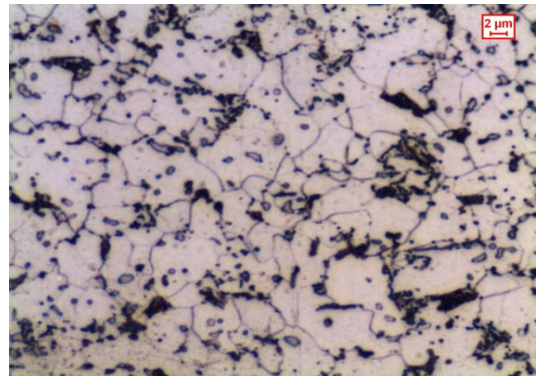


Figura 4.42.: ZTA, saldatura ebw, 2500 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

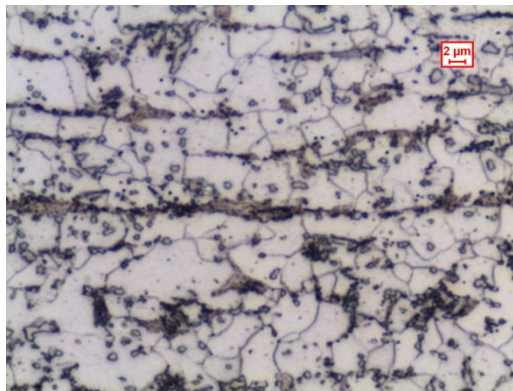


Figura 4.43.: MB, saldatura ebw, 3500 μm dall'asse cordone, ingrandimento 1000x

4.5.3.4. Confronto micrografie

Come già visto, la microstruttura del materiale base è costituita da una matrice ferritica al cui interno è disperso il costituente secondario, formato prevalentemente da martensite (figura 4.3 nel paragrafo 4.1).

Considerando i giunti saldati, per quanto riguarda la distribuzione dei costituenti strutturali e delle fasi la differenza principale tra le tre tecnologie è la diversa estensione delle zone in cui sono presenti, con una diretta proporzionalità con l'apporto termico di saldatura: ad apporto termico maggiore corrispondono maggiori estensioni di ciascuna zona.

Il costituente secondario assume diverse configurazioni microstrutturali in funzione della distanza dall'asse del cordone: da martensite presumibilmente aciculare (nel materiale base), a martensite rinvenuta, sorbite, martensite di nuovo aciculare e infine bainite avvicinandosi all'asse del cordone; in prossimità del cordone le microstrutture

assunte dal costituente secondario si sono formate sicuramente per austenizzazione e raffreddamento sufficientemente rapido.

La ferrite aciculare è una ferrite fortemente sub-strutturata, con caratteristica struttura “a cestino”, che si forma a seguito di un raffreddamento continuativo ad una temperatura leggermente superiore all'intervallo di formazione di bainite superiore; la sua formazione è comunque dipendente dalla temprabilità dell'austenite di partenza. Questa microstruttura è molto caotica e ha una elevata capacità a deflettere l'avanzamento delle fratture: questo la rende particolarmente interessante e desiderabile per l'incremento delle proprietà di resistenza meccanica del materiale.

La ferrite aciculare nuclea all'interno del grano austenitico, e non a bordo grano: questo tipo di nucleazione intragranulare è indotto da inclusioni non metalliche presenti nell'acciaio fuso, talvolta non rilevabili tramite micrografie.

La formazione all'interno del grano austenitico e la caratteristica struttura a cestino permettono di distinguere la ferrite aciculare dalla bainite nell'osservazione delle micrografie

La concentrazione percentuale di costituente secondario, individuata nelle micrografie, diminuisce all'aumentare della distanza dalla zona fusa, come conseguenza delle trasformazioni di fase subite dal materiale durante il processo di saldatura.

In tabella 4.6 sono indicati i valori percentuali di costituente secondario in funzione della distanza dall'asse della zona fusa, mentre nel grafico 4.2 sono rappresentati i rispettivi andamenti; in particolare, è possibile osservare ancora una volta la minore estensione delle zone di alterazione di costituente secondario nel giunto saldato a EBW rispetto ai giunti saldati a GTAW e PAW.

Di particolare interesse è l'estensione delle zone in cui, in tutti e 3 i tipi di giunti saldati, il materiale presenta una percentuale di costituente secondario inferiore rispetto a quella del materiale base, zone in cui le curve del grafico 4.2 presentano una caratteristica forma a “ginocchio”; nel caso del giunto saldato a EBW, questo ginocchio appare molto più netto e accentuato perché si manifesta in una zona molto più ristretta.

In queste zone (indicate con “ZTA – MB” nella tabella 4.6) probabilmente si è verificato un rinvenimento della martensite, che da aciculare si è trasformata a placche, mista a struttura sorbitica.

GTAW			PAW			EBW		
distanza dall'asse [μm]	zona corrispondente	% Costituente Secondario	distanza dall'asse [μm]	zona corrispondente	% Costituente Secondario	distanza dall'asse [μm]	zona corrispondente	% Costituente Secondario
4600	ZTA	36,90%	5000	ZTA	26,20%	1890	ZTA	41,04%
5000	ZTA	26,98%	5430	ZTA	26,30%	1930	ZTA	33,48%
6000	ZTA	25,52%	6000	ZTA	23,42%	1970	ZTA	33,11%
7000	ZTA	22,30%						
8000	ZTA	17,33%						
9000	ZTA - MB	15,78%	8000	ZTA-MB	16,84%	2490	ZTA - MB	17,99%
10000	ZTA - MB	18,05%				2530	ZTA - MB	19,49%
11000	ZTA - MB	18,44%				2570	ZTA - MB	16,92%
						3000	ZTA - MB	20,00%
14000	MB	21%	11000	MB	19,27%	3500	MB	19,10%
			14000	MB	20,27%	4000	MB	21,31%
						4500	MB	21,70%
						5000	MB	22,56%
						9500	MB	21,70%

Tabella 4.6.: percentuale costituente secondario in funzione della distanza dall'asse della zona fusa per giunti saldati con tecnologia gtaw, paw, ebw

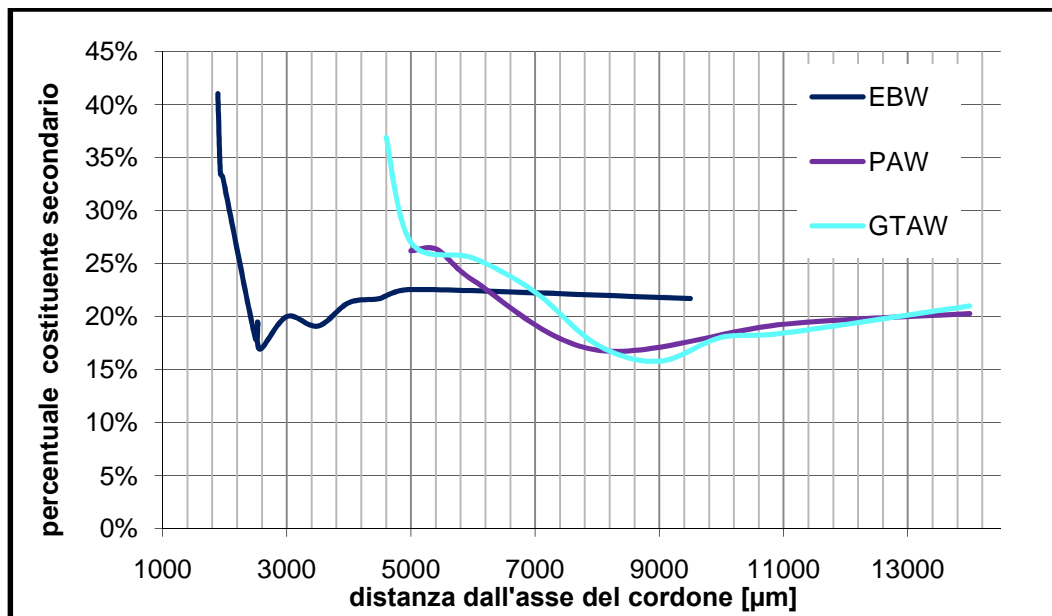


Grafico 4.2.: percentuale costituente secondario in funzione della distanza dall'asse della zona fusa in giunti saldati con tecnologia gtaw, paw, ebw

Nel caso della saldatura EBW, questo abbassamento di percentuale si manifesta in una zona molto meno estesa (estensione di circa 500 μm) rispetto alle altre saldature, manifestando un caratteristico “ginocchio” che indica una zona di alterazione (ovvero rinvenimento) del materiale base di dimensioni inferiori rispetto ai giunti saldati a GTAW (circa 2000 μm in estensione) e PAW.

Probabilmente questo è indice di una minor alterazione delle proprietà meccaniche, caratteristica che renderebbe preferibile la saldatura EBW rispetto alle altre.

CAPITOLO 5

Prove meccaniche

5.1. Prove di microdurezza

5.1.1. Premesse e condizioni di prova

La durezza è un valore numerico che indica le caratteristiche di deformabilità plastica di un materiale; è anche definita come la resistenza a deformazione permanente.

Le prove di durezza, che sono prove di tipo non distruttivo (a meno delle trascurabili impronte che vengono lasciate sulla superficie del materiale), determinano la resistenza offerta da un materiale a lasciarsi penetrare da un altro (*penetratore*).

L'esecuzione di prove di durezza sui giunti saldati permette non solo di ricavare, insieme alle micrografie, ulteriori indicazioni su quali microstrutture sono presenti alle varie distanze dall'asse della zona fusa, ma permette soprattutto di dare un'idea sulle alterazioni delle proprietà meccaniche subite dal materiale.

Un'elevata durezza indica:

- elevata resistenza alla deformazione plastica o alla rottura in compressione;
- migliore resistenza ad usura.

I valori di microdurezza rilevati sui campioni sono stati misurati secondo la scala Vickers; nella prova Vickers il penetratore di diamante è costituito da una piramide retta a base quadrata con un angolo di $\theta=136^\circ$, e quello che viene misurato è il rapporto fra il carico applicato e la superficie dell'impronta.

Per effettuare le prove è stato applicato al penetratore del microduremetro un carico di 100 g.

Per quanto riguarda la scelta delle zone su cui imprimere le impronte, sono stati applicati gli stessi criteri seguiti per la rilevazione delle immagini al microscopio: alla luce delle disomogeneità microstrutturali del materiale base rilevate, in particolare la maggiore percentuale di martensite presente nella zona di cuore del materiale base attraverso lo spessore della lamiera, sono state effettuate e rilevate impronte evitando la zona di cuore del materiale, a sufficiente distanza dai bordi della lamiera, per ottenere dati in grado di mostrare le differenze tra le diverse tecnologia di saldatura analizzate con la minor influenza possibile dovuta a disomogeneità del materiale base.

Le prove di microdurezza sono state effettuate a temperatura ambiente.

5.1.2. Profili di microdurezza rilevati

Nel grafico 5.1 sono riportati i valori in Vickers di microdurezza, rilevati a varie distanze dall'asse della zona fusa, per ognuno dei 3 giunti saldati rispettivamente con tecnologia GTAW, PAW, EBW.

Tramite le prove di microdurezza effettuate, eseguite su sezioni perpendicolari al cordone e a sufficiente distanza dai bordi della lamiera, non è possibile rilevare differenze dovute alla presenza o assenza dello strato zincato superficiale: per questo motivo non sono prese in considerazione distinzioni tra materiale zincato e non zincato, ma soltanto le differenze tra le diverse tecnologie di saldatura.

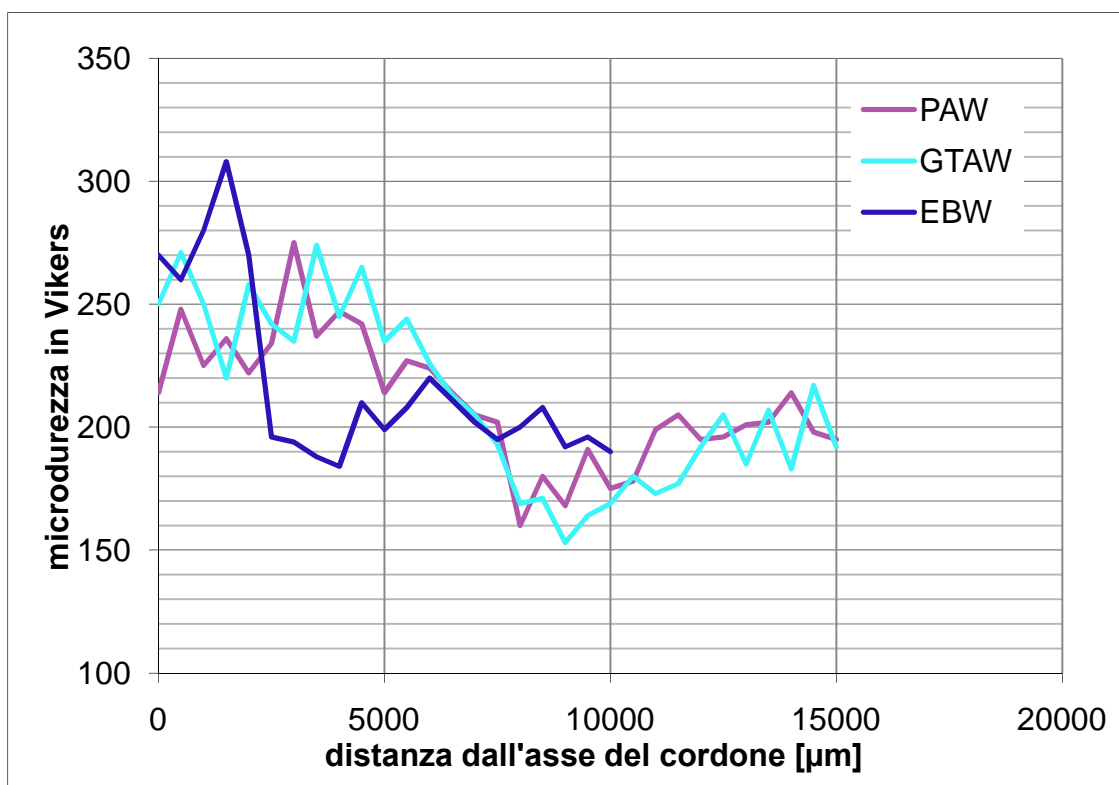


Grafico 5.1.: profili di microdurezza in funzione della distanza dall'asse della zona fusa di giunti saldati con Gtaw, Paw, Ebw

I profili di micro durezza rilevati avvalorano la composizione microstrutturale ipotizzata nell'osservazione delle micrografie, soprattutto per quanto riguarda la relative estensioni e distanze dall'asse della zona fusa.

In particolare, i massimi valori di microdurezza (275÷310 HV) si riscontrano in corrispondenza del confine tra zona fusa e ZTA in ogni tipo di giunto, confermando presumibilmente la presenza di bainite; inoltre, questo valore massimo di microdurezza è dovuto, oltre alla microstruttura presente, anche alla probabile

presenza di tensioni residue nel materiale formatesi durante il processo di solidificazione e raffreddamento della zona fusa.

Bisogna tenere presente infatti che questa zona, durante il processo di solidificazione e raffreddamento, è stata una zona di confine tra metallo allo stato liquido e metallo allo stato solido: pertanto le differenze di temperature e di fasi esistenti hanno comportato complessi fenomeni di smaltimento di calore con differenti meccanismi di raffreddamento tra le due zone, e questo spiega il picco massimo di microdurezza dovuto a tensioni residue nel materiale.

L'abbassamento di microdurezza che si verifica all'aumentare della distanza dall'asse della zona fusa indica un aumento di percentuale di ferrite in accordo con quanto visualizzato nelle micrografie: questo conferma un cambiamento progressivo di microstruttura verso composizioni e microdurezze tipiche del metallo base (180÷220 HV), come conseguenza delle trasformazioni di fase subite dal materiale durante il processo di saldatura.

Le proporzioni dei profili visualizzati nel grafico 5.1 confermano la correlazione di proporzionalità diretta tra estensione delle zone alterate e valore di apporto termico tipico di ogni processo di saldatura.

I valori minimi di microdurezza si riscontrano, per ogni tipologia di giunto saldato, nella seconda parte della ZTA: questi dati avvalorano ulteriormente il posizionamento della zona di confine tra la parte del giunto in cui sono state raggiunte e superate temperature di austenizzazione durante la saldatura (tra zona fusa e questi punti), e la parte in cui non sono state raggiunte (da questi punti in poi, verso il materiale base). Infatti, a fine ZTA (ovvero a circa 9000÷11000 µm dall'asse della zona fusa per saldatura GTAW, 8000 µm per PAW, 2500÷3000 µm nel caso EBW), il materiale mostra una microdurezza inferiore a quella del metallo base, indice di rinvenimento del materiale non austenizzato in quanto a distanze inferiori non è avvenuto rinvenimento ma formazione di microstrutture più o meno ferritiche per raffreddamento dal campo austenitico.

L'abbassamento di microdurezza, con valori inferiori a quelli del materiale base non alterato, dovuto al rinvenimento della martensite presente nel materiale in questa zona è indicato con il nome di "effetto softening", e da' luogo a un profilo di microdurezza che presenta un caratteristico "ginocchio". Questi valori (che si aggirano sui 150÷190 vickers) avvalorano l'ipotesi della presenza di una struttura prevalentemente sorbitica mista a martensite rinvenuta all'interno della matrice ferritica a fine ZTA di ogni giunto saldato.

Quello che è interessante osservare per confrontare i 3 tipi di saldatura è appunto l'estensione e le proporzioni dei profili di microdurezza.

Considerando le alterazioni delle proprietà meccaniche deducibili dal valore di microdurezza, il giunto che mostra una minore estensione delle zone alterate è quello saldato con tecnologia EBW; questo giunto dimostra un picco massimo più elevato di microdurezza rispetto agli altri giunti, posizionato in corrispondenza del confine tra zona fusa e ZTA: questi valori massimi di microdurezza, riscontrati comunque in una zona più ristretta rispetto ai giunti saldati con le altre tecnologie, possono essere spiegati considerando che la saldatura EBW è un processo più veloce e con un minor apporto termico, il che comporta un raffreddamento più rapido della lamiera perché meno calda rispetto alle altre saldature, con conseguente formazione di microstrutture più fini (martensite o bainite) con microdurezza più elevata.

Quindi nel giunto EBW le zone in cui il materiale base ha subito alterazioni di proprietà meccaniche sono sensibilmente più ristrette rispetto alle dimensioni riscontrate nelle saldature GTAW e PAW, in accordo con le differenze microstrutturali riscontrate nell'analisi micrografica e con le possibili deduzioni che da esse è stato possibile ricavare.

Per quanto riguarda invece i valori minimi di microdurezza e l'estensione della zona in cui si è verificato l'effetto softening, nel caso delle saldature GTAW e PAW si manifesta un abbassamento di durezza molto più pronunciato come estensione e come valori minimi (inferiori a quelli del metallo base non alterato) rispetto al giunto saldato con EBW.

L'estensione di questa zona è proporzionale all'apporto termico di saldatura, maggiore appunto nel caso di GTAW e PAW rispetto a EBW, e indica una maggiore alterazione delle proprietà meccaniche rispetto alla saldatura EBW.

Anche le prove di microdurezza quindi confermano le ipotesi già formulate nell'analisi micrografica riguardo la preferibilità della tecnologia di saldatura EBW rispetto a quelle ad arco (GTAW e PAW) su questo tipo di acciaio.

5.2. Prove di trazione

5.2.1. Premesse e condizioni di prova

La prova di trazione (tensile test) è una prova statica che consiste nel sottoporre un provino a deformazione a velocità costante, sotto l'azione di un carico di trazione unidirezionale applicato ortogonalmente alla sezione del provino.

Durante la prova vengono misurati, a regolari intervalli di tempo, i valori del carico e della lunghezza del provino tramite una cella di carico e un estensimetro, che vengono poi diagrammati nel diagramma sforzo-deformazione.

Per queste prove è stato utilizzato un apparecchio per prove di trazione completamente computerizzato.

Dalle prove di trazione eseguite su ciascun provino, è possibile determinare alcune proprietà meccaniche del materiale che lo costituisce; in particolare:

- tensione di snervamento: valore della tensione in corrispondenza della quale il materiale inizia a deformarsi plasticamente, e passa da un comportamento elastico reversibile ad un comportamento plastico irreversibile; corrisponde al valore della tensione associato ad una deformazione plastica irreversibile del 0,2%, ricavata dalla curva tensione-deformazione relativa ad una prova effettuata su un provino di forma normata;
- tensione di rottura: valore limite della tensione oltre al quale il materiale del provino inizia a strizionare e risulta pertanto definitivamente inservibile dal punto di vista della resistenza; corrisponde al valore della tensione associato al massimo valore raggiunto dalla curva sforzo-deformazione;
- allungamento percentuale: inteso come variazione di lunghezza del tratto utile, dopo la rottura, rispetto alla lunghezza iniziale; questo dato è un importante indicatore della duttilità del materiale;

Le prove di trazione sono state eseguite su provini contenenti una porzione di giunto saldato, per ogni tipologia di saldatura: quindi le proprietà meccaniche analizzate sono riferite ai giunti saldati comprendenti cordone di saldatura, ZTA e materiale base.

Tali provini sono stati ricavati dal taglio dei talloni giuntati in modo da ottenere la conformazione schematizzata in figura 5.1, in cui sono visualizzate le dimensioni e la conformazione di partenza dei provini prima di essere sottoposti alla prova; dimensioni e morfologie dei provini di partenza, normate secondo gli Standard UNI EN 895, sono uguali per tutti i provini in modo da poter fare un confronto diretto dei

comportamenti a trazione e proprietà meccaniche dei giunti saldati con ognuno dei tre tipi di saldatura.

Le prove di trazione sono state eseguite a temperatura ambiente.

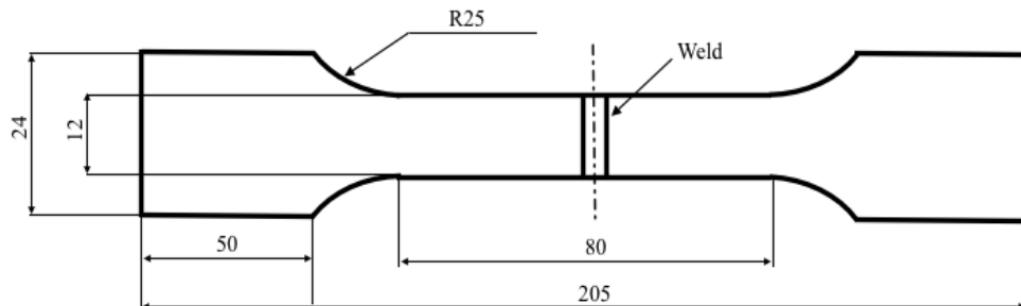


Figura 5.1.: conformazione e dimensioni in mm dei provini sottoposti a prove di trazione [2]

5.2.2. Risultati

I risultati di queste prove non sembrano essere influenzati apprezzabilmente dalla presenza o assenza dello strato zincato: per cui il confronto è stato limitato alla comparazione tra le 3 tecnologie di saldatura oggetto di studio.

Nelle figure 5.2, 5.3, 5.4 sono riportati i provini sottoposti a prove di trazione, fotografati dopo che è avvenuta la rottura.

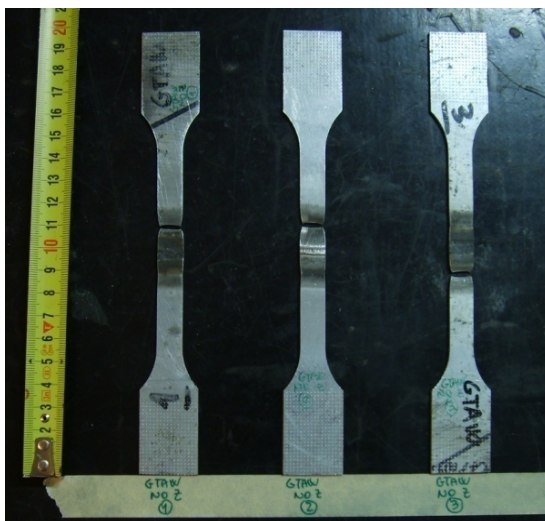


Figura 5.2.: provini giunti saldati con tecnologia GTAW dopo rottura a trazione

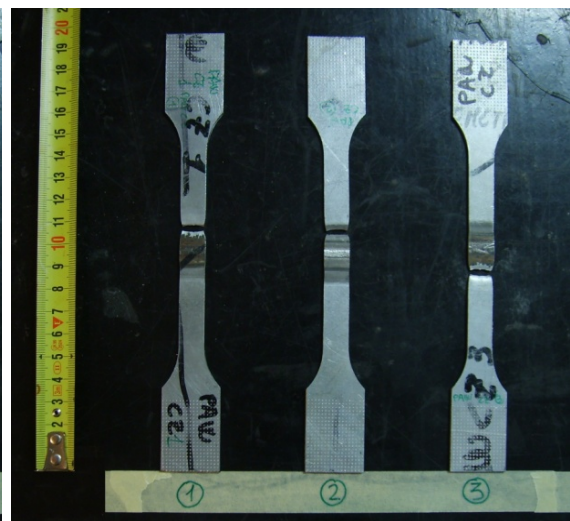


Figura 5.3.: provini giunti saldati con tecnologia PAW dopo rottura a trazione

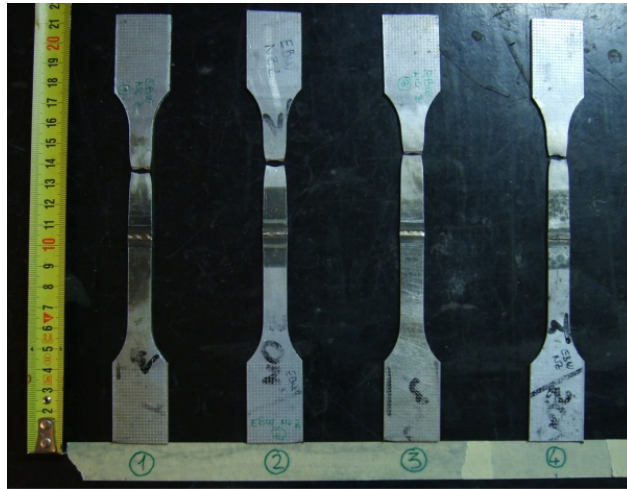


Figura 5.2.: provini giunti saldati con tecnologia Ebw dopo rottura a trazione

Nel diagramma 5.2 sono riportate le curve sforzo-deformazione medie riassuntive dei provini per ogni tipologia di saldatura, confrontate con la curva rilevata da provini composti da solo materiale base.

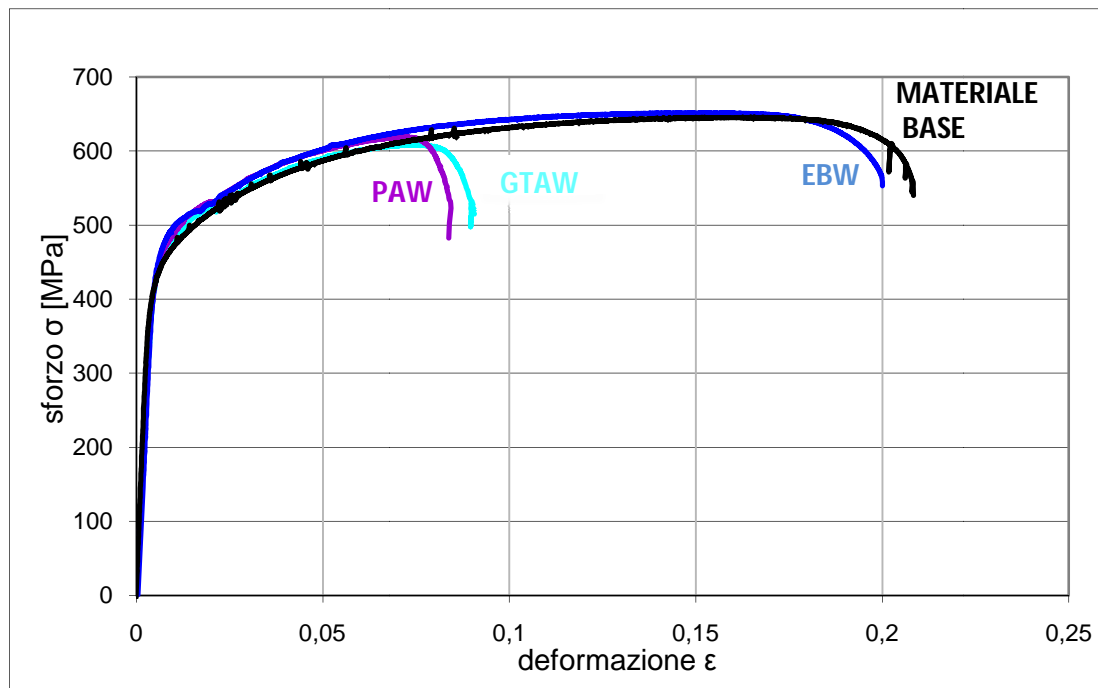


Diagramma 5.2.: curva sforzo-deformazione provini giunti saldati con gtaw, paw, ebw e provino materiale base

In tabella 5.1 sono riportati i valori di alcune proprietà meccaniche deducibili dalla curva sforzo-deformazione dei provini.

	GTAW	PAW	EBW	MATERIALE BASE
TENSIONE DI SNERVAMENTO [MPa]	450	460	465	430
TENSIONE DI ROTTURA [MPa]	608	619	652	645
ALLUNGAMENTO PERCENTUALE	8%	8%	19%	20%

Tabella 5.1.: proprietà meccaniche deducibili dalla curva sforzo-deformazione dei provini saldature GTAW, PAW, EBW e provini materiale base

Osservando e confrontando tra loro le figure 5.2, 5.3 e 5.4, la peculiarità alla quale occorre dedicare più attenzione è la posizione della frattura: nei provini di giunti saldati con tecnologia EBW la rottura a trazione del materiale si è verificata nel materiale base, ovvero esternamente alla ZTA nel metallo non alterato; in tutti gli altri provini di giunti, saldati con tecnologia GTAW e PAW, le fratture si sono localizzate nella zona termicamente alterata della saldatura, presumibilmente a fine ZTA in cui si è verificato il rinvenimento della martensite presente nel materiale.

Questo dato permette un confronto immediato tra le diverse tecnologie di saldatura, in quanto dimostra una superiorità della saldatura EBW rispetto a GTAW e PAW: il cordone giuntato con EBW infatti possiede proprietà meccaniche di resistenza a trazione non inferiori a quelle del metallo base, ovvero l'alterazione termica nel cordone e nella ZTA, verificatasi durante il processo di saldatura, non ha comportato un peggioramento della resistenza a trazione rispetto a quella manifestata dal metallo base non alterato; mentre, nel caso delle saldature GTAW e PAW, il fatto che tutti i provini si siano rotti in corrispondenza della ZTA indica un peggioramento delle proprietà meccaniche di resistenza a trazione del materiale, localizzato in questa zona, rispetto al materiale base, dovuto presumibilmente a un apporto termico di saldatura troppo elevato.

Osservando il diagramma 5.2 e la tabella 5.1, si può notare che i giunti saldati con EBW dimostrano caratteristiche meccaniche superiori rispetto a GTAW e PAW.

Questo confronto non si basa tanto sulla tensione di snervamento o su quella di rottura, ma soprattutto sull'allungamento percentuale dimostrato dai provini.

Infatti, per quanto riguarda tensione di snervamento e rottura le differenze rilevate tra le varie tipologie di saldatura, e rispetto al materiale base, sono dell'ordine di poche

decine di MPa: differenze non sufficienti a denunciare proprietà superiori di un tipo di saldatura rispetto a un altro.

Il dato più caratteristico che permette di fare un importante confronto è appunto l'allungamento percentuale: infatti si può notare un allungamento percentuale del provino con saldatura EBW più che doppio rispetto a provini saldati con GTAW e PAW, e che si avvicina di più, rispetto a questi ultimi, all'allungamento percentuale dimostrato dal provino di materiale base.

Questa superiore capacità di allungamento prima della rottura indica una duttilità del giunto saldato a EBW di gran lunga superiore rispetto ai giunti saldati con GTAW e PAW; questa caratteristica, a parità di carico di rottura (in quanto resta comunque primaria la necessità di elevati carichi di rottura), rende preferibile la giuntura a EBW. Oltre a una maggiore duttilità, il giunto saldato a EBW dimostra una maggiore tenacità rispetto agli altri giunti, rappresentata dall'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione.

In un giunto saldato in genere è desiderabile non solo un alto valore di duttilità, ma anche un elevato valore di tenacità, proprietà che indica la capacità del materiale di assorbire energia d'urto. Essendo gli acciai dual-phase molto utilizzati, per esempio, nella produzione di scocche automobilistiche, si capisce come una sufficiente duttilità e tenacità del giunto saldato siano desiderabili per conferire sufficiente elasticità, duttilità, tenacità e resistenza agli elementi strutturali in cui sono impiegati.

E' inoltre interessante notare il posizionamento delle fratture nei provini giuntati tramite GTAW e PAW, ovvero a fine ZTA dove è stato riscontrato un abbassamento di microdurezza verso valori inferiori a quelli del metallo base, dovuto all'effetto softening.

Come già visto nelle micrografie, in queste zone è stato rilevato un rinvenimento della martensite presente nel materiale, significativo sia come estensione sia come entità. E' quindi probabilmente dovuto a questo effetto un indebolimento del materiale sufficiente da far avvenire lo strizionamento e la rottura a trazione del materiale in questa zona.

L'estensione della zona interessata dall'effetto softening, come già visto, è direttamente proporzionale all'apporto termico di saldatura (minimo nel caso di saldatura EBW): infatti, nel giunto saldato con EBW questa zona presenta un'estensione sensibilmente inferiore rispetto agli altri giunti e con differenze meno marcate rispetto al materiale base non alterato, quindi l'effetto softening in questo giunto non è stato sufficiente a causare eccessiva alterazione delle proprietà

meccaniche del materiale base; come conseguenza di ciò, nei provini saldati con EBW la frattura non è avvenuta in ZTA ma nel materiale base.

Osservando i valori di apporto termico (tabella 4.4 paragrafo 4.4) calcolati per ognuna delle 3 tecnologie di saldatura, e alla luce delle proprietà meccaniche rilevate con le prove di trazione, è possibile notare un peggioramento delle proprietà meccaniche del materiale giuntato proporzionale al valore di apporto termico calcolato: ciò è coerente con quanto ipotizzato sia in questa sede, sia in letteratura, e questo riscontro conferma l'influenza del valore di apporto termico sulle proprietà meccaniche del giunto.

Anche dalle prove a trazione quindi la saldatura EBW dimostra di assicurare caratteristiche e proprietà migliori ai giunti rispetto alle saldature GTAW e PAW.

CAPITOLO 6

Conclusioni

Dalle analisi sulle caratteristiche di saldabilità dell'acciaio Dual Phase DP600 con tecnologie saldatura GTAW, PAW ed EBW, è emerso che la saldatura a fascio elettronico risulta tra le tre la più adatta su questo tipo di acciaio.

Questa classifica, confermata da tutte le prove sperimentali eseguite in questa sede, è dovuta alla constatazione dei diversi gradi di alterazione delle proprietà metallurgiche e meccaniche che le varie tecnologie di saldatura hanno comportato, e conferma quanto ipotizzato a livello teorico: la tecnologia di saldatura che comporta minori alterazioni delle proprietà meccaniche è quella che presenta il minor valore di apporto termico, in questo caso la tecnologia EBW.

Osservando le immagini allo stereoscopio, è emersa una minore estensione delle zone termicamente alterate nei giunti saldati a EBW rispetto a quelli saldati con GTAW e PAW; questi dati sono stati poi confermati da analisi micrografica, in cui è stata rilevata nei giunti saldati a fascio elettronico la minore alterazione di dimensione grano sia per quanto riguarda diametro equivalente sia per quanto riguarda l'estensione delle zone in cui risulta alterato, e la minore estensione delle zone di alterazione di costituente secondario.

L'ipotesi di minor alterazione delle proprietà meccaniche manifestata dal giunto saldato a EBW rispetto agli altri è stata confermata dalle prove meccaniche.

I profili di microdurezza dimostrano che nel giunto saldato a EBW le zone in cui il materiale base ha subito alterazioni di proprietà meccaniche sono sensibilmente più ristrette rispetto a quelle riscontrate nelle saldature GTAW e PAW.

Le prove di trazione, infine, dimostrano palesemente le superiori proprietà meccaniche dimostrate dai giunti saldati a EBW rispetto alle altre due tecnologie: nei primi infatti la rottura a trazione del materiale si è verificata nel materiale base, mentre in tutti gli altri la frattura è avvenuta in ZTA, e questo indica che le giunture effettuate con GTAW e PAW manifestano proprietà di resistenza a trazione peggiori rispetto al materiale base, cosa che invece non viene rilevata nelle giunture a fascio elettronico.

Non sono invece state riscontrate influenze dello stato zincato sui singoli processi di saldatura: a parità di tecnologia di saldatura, i giunti effettuati sull'acciaio zincato hanno dimostrato stessi comportamenti di quelli effettuati su materiale non zincato.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] B. MAFFEI, F. CAFARELLA, R. VALENTINI, W. SALVATORE, G. BURATTI, "L'impiego dell'acciaio Dual Phase nelle strutture in c.a. in zona sismica", tesi di laurea in ingegneria civile, 2003/2004;
- [2] A. TIZIANI, P. FERRO, R. CERVO, M. DURANTE, "Effects of different welding technologies on metallurgical and mechanical properties of DP600 steel welded joints", *La metallurgia italiana*, 1 (2011), pp. 1 - 3;
- [3] <http://www.arcelormittal.com/sestao/pdf/IT%20-%20DUAL%2PHASE.pdf>, 2 luglio 2011;
- [4] <http://core.materials.ac.uk/search/detail.php?id=1766>, 2 luglio 2011;
- [5] <http://static.gest.unipd.it>, 2 luglio 2011;
- [6] http://www.siderurgicamodenese.com/prodotti/prodotti_particolari/51.aspx; 29 giugno 2011;
- [7] <http://www.tuttowebitalia.com/tecnologia-meccanica/saldatura.html>; 29 giugno 2011;
- [8] <http://it.wikipedia.org/wiki/Saldabilit%C3%A0>; 29 giugno 2011;
- [9] www.ing.unitn.it/~colombo/Saldatura%20per%20frizione/Capitolo%201.5.htm; 2 luglio 2011;
- [10] W. NICODEMI, 1996, "Introduzione agli acciai inossidabili", Monza, Associazione Italiana di Metallurgia;
- [11] http://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura_TIG; 28 giugno 2011;
- [12] <http://taryza.wordpress.com/>; 28 giugno 2011;
- [13] http://it.wikipedia.org/wiki/File:GTAW_setup.png; 29 giugno 2011;
- [14] www.linde-gas.it/international/web/lg/it/like35lgit.nsf/docbyalias/ind_mv_licht, 2 luglio 2011;
- [15] <http://www.bertozziimpiantisaldature.com/80/processi.htm>, 2 luglio 2011;
- [16] <http://www.fro.it/file/otherelement/pj/plasma-tig-au109n5782.pdf>, 2 luglio 2011;
- [17] <http://www.weldguru.com/plasma-welding.html>, 2 luglio 2011;
- [18] <http://www.iwportal.it/tecnologie.php?locale=&id=14>, 2 luglio 2011;
- [19] ISTITUTO ITALIANO DELLA SALDATURA, 1996, "Saldatura per fusione; 2; Metallurgia e saldabilità dei materiali metallici; Qualità e controllo dei giunti saldati", Milano, HOEPLI.