

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Leghe di Alluminio per Applicazioni navali:  
caratterizzazione di giunti saldati con diverse  
tecniche**

Relatore:  
Prof. Franco Bonollo

Candidato:  
Marco Ballarin

13 dicembre 2023

# INDICE

<b>CAPITOLO 1</b> .....	4
<b>1)Alluminio</b> .....	4
1.1 Alluminio primario.....	4
1.2 Alluminio secondario.....	8
<b>2)Leghe di Alluminio</b> .....	11
2.1 Classificazione delle leghe.....	12
2.2 Vantaggi delle leghe di alluminio.....	17
2.3 Criticità dell'alluminio.....	17
<b>CAPITOLO 2</b> .....	19
<b>Obiettivi tesi</b> .....	19
<b>CAPITOLO 3</b> .....	20
<b>1)Metodologie di Saldatura</b> .....	20
<b>2) Saldature effettuate</b> .....	23
1.1 Saldatura a Tig.....	24
1.2 Saldatura a Mig.....	26
1.3 Saldatura a Friction stir welding.....	28
<b>CAPITOLO 4</b> .....	29
<b>1) Indagini sperimentali dal punto di vista teorico</b> .....	29
1.1 Prova di Trazione.....	29

1.2	Prova di durezza.....	31
1.3	Prova di resilienza.....	34
2)	Indagini sperimentali dal punto di vista pratico.....	36
2.1	Controllo radiografico.....	36
2.2	Prova di trazione.....	39
2.3	Indagini metallografiche.....	48
2.4	Attacco chimico.....	52
2.5	Durezza.....	55
2.6	Corrosione.....	61
<b>CAPITOLO 5</b>	.....	<b>67</b>
	Conclusioni.....	67
	Bibliografia.....	68
	Ringraziamenti.....	69

# CAPITOLO 1

## 1. ALLUMINIO

### INTRODUZIONE

L'alluminio è un metallo leggero con una densità circa un terzo di quella dell'acciaio, ma possiede una notevole resistenza meccanica. È ampiamente utilizzato in una vasta gamma di settori industriali, come l'aerospaziale, l'automobilistico, l'elettronico, l'edilizia, il navale e molti altri. Le sue proprietà uniche, come la resistenza alla corrosione, la buona conducibilità termica ed elettrica e la capacità di essere riciclato, lo rendono un materiale altamente versatile.

L' alluminio è molto abbondante in natura e si presenta nella forma minerale della bauxite ovvero un ossido idrato di alluminio ( $Al_2O_3$ ) impuro in quanto presente silice ( $SiO_2$ ), ossido di ferro ( $Fe_2O_3$ ) e ossido di titanio ( $TiO_2$ ).

La produzione dell'alluminio si divide in due percorsi:

- Percorso primario (si parte dal minerale ovvero bauxite)
- Percorso secondario (si parte dal recupero del rottame e dal riciclo)

### 1.1 ALLUMINIO PRIMARIO

Il processo di produzione dell'alluminio primario parte dal minerale bauxite e arriva all'alluminio finale.

Il primo passaggio consiste nell'Estrazione della bauxite, e a livello di approvvigionamento la bauxite non crea particolari problemi infatti:

- 54% proviene dall'Australia
- 20% proviene dal Sud America (in particolare Brasile, Argentina e Cile)
- 16% proviene dall'Africa
- 10% proviene da Caraibi e Asia

Per l'estrazione esistono procedimenti chimici ed elettrochimici e nella pratica è impiegato quasi esclusivamente il processo chimico di Bayer detto anche affinazione.

La bauxite viene frantumata e macinata ad umido e quindi immessa in un mescolatore assieme ad una soluzione di soda caustica, la sospensione così ottenuta viene caricata in autoclavi e trattata a 180-200°C ad una pressione di 15-25 atmosfere, dove si forma alluminato sodico, mentre le impurezze restano insolubili. La lisciva impura viene portata in altri recipienti per essere prima diluita e poi decantata e filtrata ottenendo la soluzione purificata di alluminato sodico, che viene inviata ai decompositori mentre le impurezze (fanghi rossi) finiscono in discarica.

Nei decompositori ha luogo la precipitazione dell'idrato d'alluminio, che viene separato per filtrazione e poi calcinato in forni rotativi a 1200°C, per ottenere allumina di alta purezza ( $Al_2O_3$ ) > 99,5%). La lisciva sodica residua viene concentrata e torna in ciclo.

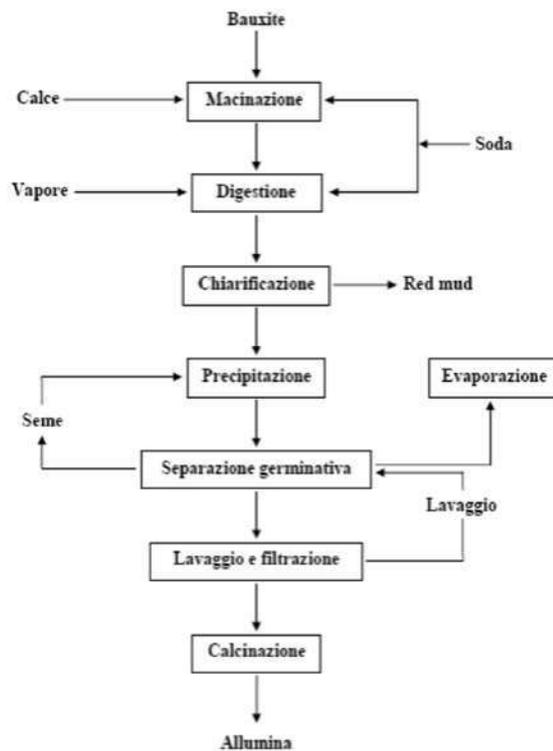


FIGURA 1 PROCESSO DI BAYER

Da 4 tonnellate di bauxite si ottengono 2 tonnellate di allumina.

Il procedimento impiegato per ricavare l'alluminio dall'allumina è la riduzione elettrolitica di Hall-Héroult, in quanto i processi carbotermici per le alte temperature di lavoro (2000°C) non hanno trovato un'applicazione industriale.

Il processo consiste nel portare l'allumina  $Al_2O_3$  allo stato liquido, il legame sarà sempre un legame covalente quindi per analogia ci sarà una qualche forma di equilibrio per cui si avrà:



Il mio sistema è dotato di due poli uno positivo di grafite (anodo) e uno negativo (catodo).

In questo modo gli ioni positivi  $Al^{+++}$  migrano verso il catodo e gli ioni negativi  $O^-$  migrano verso l'anodo.

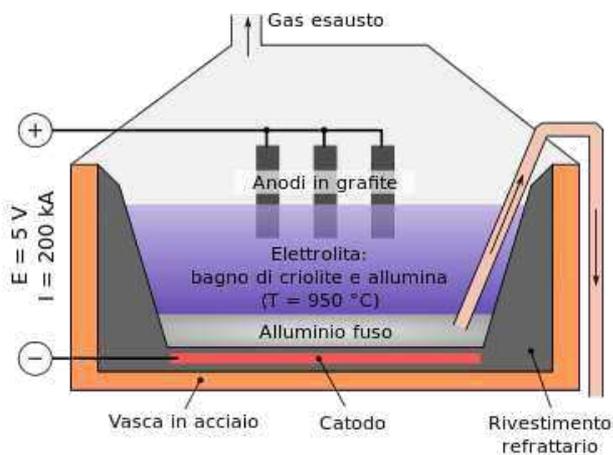
In particolare:

- Gli ioni  $O^{2-}$  reagiscono con il carbonio formando  $CO$  e  $CO_2$  e se ne vanno. Il sistema, quindi, non può far altro che reagire formando ancora ossigeno e  $Al^{3+}$
- Gli ioni  $Al^{3+}$  trovano elettroni e passano allo stato metallico (neutro)

Otteniamo quindi Alluminio liquido (puro al 100%).

Il problema di questa reazione è che l'allumina è un ossido refrattario molto stabile; perciò, non è facile portarlo allo stato liquido (fonde a  $2200^{\circ}C$ ).

L'allumina viene quindi mescolata con un sale contenente sodio e fluoro, detto criolite ( $Na_3AlF_6$ ), si forma quindi un eutettico di allumina e criolite che fonde ad una temperatura di circa  $950^{\circ}$



**FIGURA 2 - RIDUZIONE ELETTRICA DI HALL-HÉROULT**

L'alluminio puro è suscettibile a qualsiasi lavorazione e non è induribile per trattamento termico, ma soltanto per deformazione plastica a freddo (incrudimento) quindi il suo utilizzo è limitato solamente ad alcuni casi specifici, per la maggior parte delle applicazioni si utilizzano leghe di alluminio. In questa fase, quindi, vengono aggiunti elementi in lega (sempre allo stato liquido) in modo da migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Una volta aggiunti gli elementi desiderati si passa alla solidificazione e a seconda della destinazione finale verrà solidificato sotto forma di:

- LINGOTTI (15-20 Kg) per processi da fonderia
- BILLETTE (diametro 20-40 cm e lunghezza 6-10m) per processi di estrusione
- PLACCHE (spessore 50-60cm, larghezza 2m e lunghezza 8-10m) per processi di laminazione.

## CICLO DI VITA DELL'ALLUMINIO

Dall'immagine sottostante possiamo analizzare il ciclo di vita completo dell'alluminio che parte dall'estrazione della bauxite e arriva fino al fine vita.

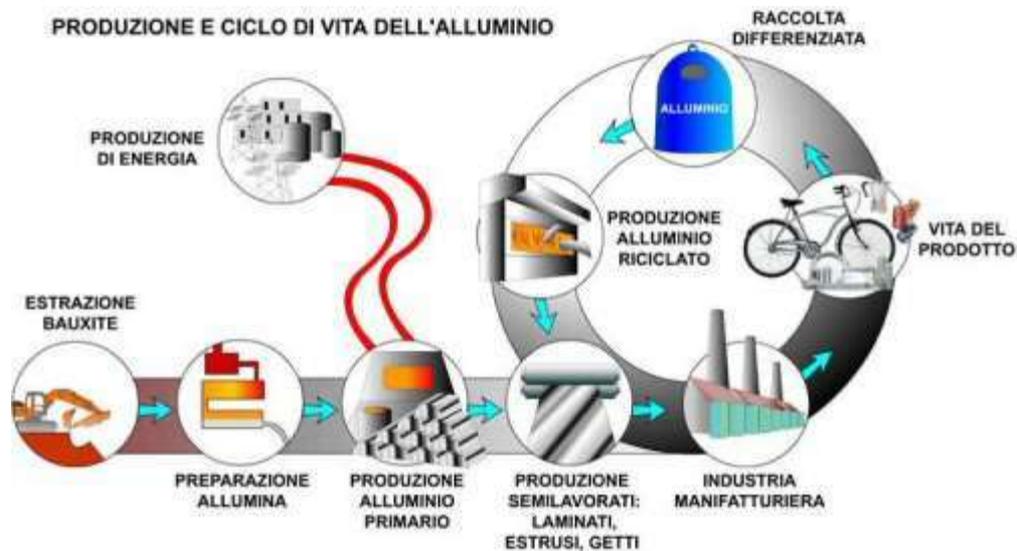


FIGURA 3 CICLO DI VITA

Una volta giunti al fine vita l'alluminio non viene buttato ma si ottiene rottame che viene raccolto e riciclato per produrre nuovo alluminio.

Nel settore automobilistico almeno il 95% dei componenti di alluminio viene riciclato.

Nei settori dell'edilizia e dell'aeronautica si hanno valori tra il 92% e il 98%.

Nel settore del packaging a causa della poca sensibilità al tema del riciclaggio si hanno valori del 50%.

## IMPATTO AMBIENTALE PRODUZIONE ALLUMINIO PRIMARIO

Valutiamo l'impatto in termini di CO<sub>2</sub> equivalente emessa.

Per ogni tonnellata di alluminio prodotto vengono emesse 9,7 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente che derivano da:

- 0,2% deriva dalla fase estrattiva
- 11% deriva dal processo di Bayer
- 2% deriva dalla produzione degli anodi di grafite
- 17% deriva dalla gestione termica del processo elettrolitico
- 55% deriva dall'energia fornita per la reazione elettrolitica
- 1% deriva dalle operazioni di colata
- 5% deriva dal trasporto
- 8% deriva dai processi di trasformazione dei semilavorati
- 0,8% deriva dal riciclaggio

La fase di riduzione elettrolitica è quella che impatta di più dal punto di vista ambientale.

Nel processo primario, inoltre, la produzione di 1 ton di alluminio richiede 2 ton di allumina, ricavate a sua volta da 4 ton di bauxite.

## 1.2 ALLUMINIO SECONDARIO

Processo che parte dal rottame di alluminio e ottiene alluminio secondario.

L'alluminio di rifusione è molto più economico da produrre dal punto di vista energetico, richiede infatti soltanto il 5% del fabbisogno di energia per l'alluminio primario.

CLASSIFICAZIONE ROTTAME:

- Rottame nuovo: scarto industriale
- Rottame vecchio: rottame che deriva dalla fine di un ciclo di vita di un prodotto (generalmente inquinato da altri elementi)

### PRETRATTAMENTI

- Selezione e separazione delle diverse tipologie di costituenti (componente ferrosa, componente inerte, altre leghe...)
- Frantumazione o macinazione
- Essiccazione
- Confezionamento

Obiettivo del processo è quello di ottenere la materia prima con la più alta percentuale di resa possibile per poter essere rifiuta.

Il primo passaggio è quello di sezione e separazione del rottame, settore dove c'è il massimo livello di automazione ed innovazione (proprio perché il rottame acquista valore quanto più è pulito).

L'obiettivo è quello di individuare la tipologia di appartenenza dei rottami, separando l'alluminio da:

- Materiale inerte (utilizzando metodi di flottazione gravitazionale o sistema di correnti indotte)
- Ferro/acciaio (Tramite magneti o sistema di correnti indotte)
- Altre leghe come Zn, Mg e Cu (Separazione visiva in base al colore o controllo chimico al campionamento)

Una volta sezionato il rottame si passa alla frantumazione cioè un pretrattamento meccanico che consente di ottenere la pezzatura più fine possibile, facilitando poi la separazione dell'alluminio da altri elementi.

Gli impianti adibiti sono generalmente costituiti da diverse macchine (frantoi, vagli rotanti, mulini, magneti) disposte in serie.



**FIGURA 4 - PROCESSO DI FRANTUMAZIONE**

Una volta che il materiale è stato frantumato si passa all'essiccazione, detta anche pirolisi e ha come obiettivo quello di rimuovere vernici, stampe o altre sostanze aderenti.

Una volta essiccato si passa al confezionamento per poi, solo in pochissimi casi essere subito venduto.

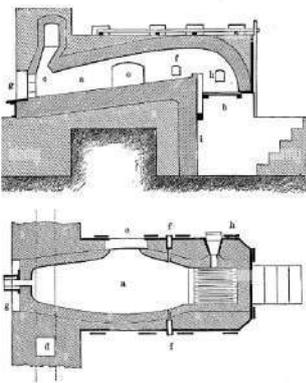
Una volta che il rottame ha eseguito il pretrattamento si passa alla rifusione e, la scelta del metodo di rifusione si ricollega alla tipologia di rottame che, dopo i pretrattamenti abbiamo a disposizione:

- FORNI A RIVERBERO (Rottame pulito, non verniciato e a composizione stabile)
- FORNI ROTATIVI CON FLUSSI DI COPERTURA (Rottame inquinato e di bassa qualità)
- FORNI SLOPING HEARTH (Rottame inquinato con altri metalli)

## FORNO A RIVERBERO

Forno alimentato a metano, dei bruciatori riscaldano il materiale refrattario che a sua volta diventa incandescente e per irraggiamento porta a fusione l'alluminio posto nella volta inferiore del forno.

Si possono inoltre aggiungere dei sistemi elettromagnetici che vanno a rimescolare l'alluminio e garantiscono l'omogeneità di composizione e temperatura.



**FIGURA 5 - FORNO A RIVERBERO**

## **FORNO ROTATIVO CON FLUSSI DI COPERTURA**

Si usa nella maggior parte dei casi ovvero nel caso in cui abbiamo un rottame molto indifferenziato.

È dotato sempre di un sistema di bruciatori che riscaldano la volta e per irraggiamento portano a fusione il rottame, ha la possibilità di ruotare rispetto al suo asse, quindi, garantisce omogeneità di composizione e temperatura.

Possiamo aggiungere il rottame con dei flussi (Sali) che servono per intercettare alcuni inquinanti presenti nel rottame come Ca e Na.

A fine processo si fa una colata tenendo separati i flussi dell'alluminio.

## **FORNO SLOPING HEARTH**

È un forno a riverbero con suola inclinata. Si utilizza per rottami voluminosi in cui è presente anche una componente di acciaio/ghisa (alluminio fonde a 660°C mentre ghisa 1150°C).

Da una porta laterale carico rottame misto, con dei bruciatori riscaldo la parte superficiale del forno, arrivati a circa 660°C l'alluminio fonde mentre la ghisa resta solida. Essendo la suola inclinata facciamo scorrere l'alluminio liquido nella vasca di raccolta e lasciamo ferma la ghisa ancora allo stato solido.

## **IMPATTO AMBIENTALE PRODUZIONE ALLUMINIO SECONDARIO**

La produzione di 1 ton di alluminio secondario può portare al risparmio di:

- 1300 kg di bauxite
- 15000 l di acqua (per il raffreddamento)
- 860 l di acqua (per il processo)
- 2000Kg di CO<sub>2</sub>
- 11Kg di SO<sub>2</sub>

## 2. LEGHE DI ALLUMINIO

Sono pochi gli elementi in natura che si prestano a costituire un numero così elevato di leghe come nel caso dell'alluminio. Per migliorare le caratteristiche dell'alluminio, infatti, si aggiungono in lega una certa quantità di elementi alliganti che, se l'alluminio allo stato puro si presenta duttile e tenero grazie a questi alliganti cambia radicalmente le sue proprietà.

Le peculiarità simili per tutte le leghe metalliche formate dall'alluminio sono:

- Bassa temperatura di fusione (compresa tra i 510 ed i 650°C)
- Basso peso specifico (tra 2,66 e 2,85 g/cm<sup>3</sup>)
- Elevatissima conducibilità elettrica e termica
- Contenuto di alluminio maggiore del 95%.

Le leghe di alluminio appartengono a quella categoria di materiali che sono conosciuti come leghe leggere in virtù del loro basso peso specifico. Esse nascono allo scopo di aumentare le proprietà meccaniche del metallo base, cioè l'alluminio, anche se esso già possiede intrinsecamente una buona duttilità ed una buona resistenza alla corrosione.

A differenza delle leghe ferro-carbonio, le leghe di alluminio richiedono una bassa spesa energetica per poter essere prodotte.

I principali elementi metallici che vengono legati con l'alluminio sono:

- Zinco
- Rame
- Manganese
- Magnesio
- Silicio

Zinco e Rame sono gli elementi principali quando voglio avere elevata resistenza meccanica in quanto conseguenza della precipitazione di composti intermetallici che causano indurimento infatti:

- **zinco:** aumenta in modo considerevole la resistenza meccanica della lega e favorisce l'indurimento per precipitazione a caldo o a freddo, ma come effetto negativo presenta in alcuni casi un aumento della sensibilità a stress corrosion cracking;

- **rame:** aumenta la resistenza meccanica e consente l'indurimento per precipitazione a freddo, tuttavia riduce la resistenza a corrosione, la saldabilità e la duttilità;

Manganese, Magnesio, Silicio vengono aggiunti quando voglio trovare un giusto compromesso tra resistenza, duttilità, tenacità e salinità.

- **magnesio:** diminuisce la temperatura di fusione fino a 451°C (pertanto è spesso usato nelle leghe come materiale d'apporto nelle saldature), conferisce resistenza alla corrosione in ambiente marino ed aumenta la capacità della lega di incrudirsi a freddo;

- **silicio:** aumenta la resistenza meccanica e la duttilità, ed in combinazione con il magnesio permette di diminuire la temperatura di fusione e contemporaneamente favorisce indurimento per precipitazione;

Ad essi vengono aggiunti spesso degli additivi quali nichel, ferro, cobalto, zirconio, titanio e cromo che forniscono determinate proprietà alla lega come:

- **nichel:** può aumentare la resistenza meccanica a caldo;
- **titanio:** è un promotore dell'affinamento del grano cristallino
- **zirconio:** è uno stabilizzatore
- **cromo:** riduce la tendenza alla stress corrosion cracking ed alla corrosione intergranulare.
- **ferro:** nell'alluminio puro (serie 1xxx), se presente in piccole quantità, permette di aumentare la resistenza meccanica alla trazione.

## 2.1 CLASSIFICAZIONE DELLE LEGHE

Le leghe di alluminio possono essere distinte in base alla capacità o meno di sostenere un trattamento termico. Infatti, si distinguono in:

- leghe da incrudimento
- leghe da trattamento termico

Nelle **leghe da incrudimento** rientrano quei materiali come l'alluminio puro (serie 1xxx) o Al-Mn (serie 3xxx), Al-Mg (serie 5xxx), Al-Mg-Si (serie 6xxx). Per queste leghe, l'aumento delle proprietà meccaniche è ottenuto per mezzo di incrudimento a freddo.

Esso viene impresso al materiale o per laminazione a freddo, come nel caso delle lamiere, o per imposizione forzata attraverso una sezione, come nel caso dei profilati. L'effetto che si ottiene è un aumento della resistenza, accompagnato da una riduzione della duttilità. Ad una temperatura di circa 350°C, questo effetto scompare, portando il materiale ad uno stato ricotto. Si può quindi dedurre che il processo di saldatura causa una riduzione della resistenza meccanica nelle zone influenzate dal calore sviluppato dall'arco.

Delle **leghe da trattamento termico** fanno invece parte le *Al-Mg-Si*, *Al-Zn-Mg-(Cu)*, *Al-Cu-Mg*. Il trattamento termico per questo tipo di leghe consente loro di migliorare considerevolmente le proprie caratteristiche meccaniche attraverso questa serie di operazioni:

- riscaldamento del materiale in soluzione ad una temperatura variabile a seconda del tipo di lega (di solito compresa tra i 450°C ed i 530°C).
- tempra per getto d'aria o in acqua.
- invecchiamento naturale a temperatura ambiente.
- invecchiamento artificiale a temperature comprese tra i 150°C ed i 180°C. Gli effetti legati a questo tipo di trattamento scompaiono parzialmente o totalmente a seguito di un riscaldamento variabile da 200°C ad oltre i 350°C. Pertanto, durante il processo di saldatura,

l'apporto termico dovuto al fenomeno stesso fa decadere le caratteristiche meccaniche a valori intermedi fra quelli del metallo trattato e quello allo stato ricotto. Le leghe di *Al-Zn-Mg* recuperano una gran parte della loro precedente resistenza meccanica grazie ad un fenomeno di invecchiamento naturale che si manifesta dopo la saldatura.

In relazione alle modalità di produzione dalle quali sono ottenute, le leghe di alluminio possono essere classificate in:

- leghe da fonderia
- leghe da deformazione plastica

le prime destinate a getti o ad essere rifuse, mentre le seconde sono destinate a subire una serie di trasformazioni per deformazione meccanica a caldo o a freddo.

Le **leghe di alluminio per deformazione plastica** vengono classificate in relazione ai principali elementi che contengono. La classificazione utilizza quattro cifre: la prima identifica la classe della lega, ossia gli elementi in lega che la costituiscono, la seconda indica la modifica rispetto alla lega originale della classe, la terza e la quarta identificano la lega di alluminio. Fanno eccezione a questa classificazione le leghe appartenenti alla classe 1xxx. In queste, la seconda cifra indica i limiti per le impurezze e le ultime due cifre specificano la purezza dell'alluminio.

Queste leghe a sua volta possono essere suddivise in:

- Leghe che non possono essere trattate termicamente:  
si tratta di materiali che non possono essere soggette ad indurimento per precipitazione ma, per aumentare la loro resistenza, possono essere solo deformate a freddo. Di questa categoria fanno parte le classi 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx.
- Leghe da trattamento termico:  
riguarda materiali che possono essere induriti per precipitazione mediante trattamento termico. Ad esse appartengono le classi 2xxx, 6xxx, 7xxx e 8xxx.

## CARATTERISTICHE DELLE LEGHE DA DEFORMAZIONE PLASTICA

Le leghe di alluminio da deformazione plastica vengono suddivise in classi in base ai vari elementi di alligazione presenti. Questi, inseriti nella lega in determinate e ben definite quantità, conferiscono al materiale proprietà caratteristiche, che lo rendono adatto per essere utilizzato nei più svariati campi di applicazione.

1XXX	Alluminio con purezza minima 99.00%
2XXX	Leghe Al-Cu
3XXX	Leghe Al-Mn
4XXX	Leghe Al-Si
5XXX	Leghe Al-Mg
6XXX	Leghe Al-Mg-Si
7XXX	Leghe Al-Zn
8XXX	Leghe Al con altri elementi
9XXX	serie riservata per impieghi futuri

FIGURA 6 CLASSIFICAZIONE ALLUMINIO DA DEFORMAZIONE PLASTICA

**Leghe serie 1xxx:** il numero 1 indica alluminio con titolo superiore al 99%, mentre la terza e la quarta cifra indicano la percentuale in alluminio oltre il 99% ad esempio, per la lega 1050, il contenuto in alluminio è pari al 99,5%. La seconda cifra è zero se non si è proceduto al controllo delle impurità quali ferro silicio e rame, mentre può variare da 1 a 9 secondo determinate specifiche e vincoli imposti per il contenuto delle impurità stesse.

Le leghe di questa famiglia presentano eccellente resistenza alla corrosione, elevata conducibilità termica ed elettrica, buona lavorabilità ma hanno proprietà meccaniche relativamente basse.

Sono comunemente utilizzate in applicazioni che richiedono una buona resistenza alla corrosione, come conduttori elettrici e tubazioni.

**Leghe Serie 2xxx:** il principale elemento in lega è il rame, anche se alla maggior parte di esse è aggiunto anche il magnesio ed il manganese. Sono leghe da trattamento termico, cioè richiedono un trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento per sviluppare le caratteristiche meccaniche di impiego. La loro resistenza alla corrosione è piuttosto bassa, tanto da richiedere opportuni metodi di protezione (ad esempio l'alclad) per quelle applicazioni ritenute critiche.

Sono molto utilizzate per parti e strutture che richiedono elevati rapporti resistenza/peso (strutture aeronautiche, sospensioni automobilistiche) per temperature di impiego fino a 150°C.

Presentano inoltre un'eccellente lavorabilità alle macchine utensili e limitata saldabilità per fusione e l'indurimento di queste leghe avviene per precipitazione.

Possiedono delle ottime proprietà meccaniche e buona resistenza al creep. Sono utilizzate per applicazioni strutturali aeronautiche ed in generale in tutte quelle condizioni di esercizio in cui sono richieste buone caratteristiche meccaniche ed elevata leggerezza.

**Leghe Serie 3xxx:** Queste leghe contengono manganese come elemento di lega principale. Hanno una buona resistenza alla corrosione e una buona lavorabilità, ma la loro resistenza meccanica è relativamente bassa. Le leghe della serie 3xxx sono comunemente utilizzate in applicazioni che richiedono resistenza alla corrosione, come scambiatori di calore, rivestimenti per edifici e parti automobilistiche.

**Leghe serie 4xxx:** Queste leghe contengono silicio come elemento di lega principale. Esso conferisce un aumento di fluidità e riduzione del coefficiente di dilatazione termica, proprietà che risultano essere molto utili nella tecnologia della produzione di getti da fonderia e nelle saldature. La durezza delle particelle di silicio conferisce alla lega una buona resistenza ad usura, spesso utilizzate come materiali di riempimento per la saldatura di leghe di alluminio. Le leghe della serie 4xxx sono adatte per applicazioni che richiedono buone proprietà di saldatura, come componenti automobilistici e serbatoi.

**Leghe serie 5xxx:** Queste leghe contengono magnesio come elemento di lega principale. Hanno una buona resistenza alla corrosione, soprattutto in ambienti marini, e una buona resistenza meccanica.

Il magnesio presenta una buona solubilità nell'alluminio (meglio del magnesio solo lo zinco) e, per questo motivo, leghe con concentrazioni inferiori al 7% non mostrano una significativa precipitazione, anche se è comunque possibile ottenere un discreto effetto indurente tramite lavorazione a freddo poiché il magnesio è capace di conservare un'ottima duttilità. Si tratta infatti di leghe da incrudimento le cui caratteristiche meccaniche possono essere aumentate mediante laminazione a freddo mentre non si possono aumentare mediante trattamento termico. Le proprietà meccaniche in generale sono buone ma tuttavia inferiori alle leghe della serie 2xxx.

Le leghe della serie 5xxx sono ampiamente utilizzate nei cantieri navali per la costruzione di scafi, sovrastrutture, ponti e altre parti esposte all'acqua di mare.

**Leghe serie 6xxx:** Queste leghe contengono magnesio e silicio come elementi di lega principali.

Essi si combinano assieme formando un composto intermetallico ( $Mg_2Si$ ) che causa indurimento per precipitazione e che conferisce buone proprietà meccaniche alla lega, rendendola molto adatta per le applicazioni strutturali

Hanno una buona resistenza alla corrosione, lavorabilità e resistenza meccanica.

Le leghe della serie 6xxx sono comunemente utilizzate in applicazioni di estrusione, come profili e componenti strutturali.

**Leghe serie 7xxx:** il principale elemento in lega è lo zinco, al quale molto spesso viene aggiunto sia il magnesio che il rame. Lo zinco aumenta la resistenza e la durezza, oltre a favorire l'auto-temprabilità della lega.

Sono leghe alto-prestazionali grazie all'intermetallico  $MgZn_2$  il quale, grazie anche alla presenza di altri precipitati formatisi a causa della solubilità relativamente alta data dallo zinco e dal magnesio nell'alluminio, consentono di raggiungere valori di resistenza tra i più alti. Le leghe appartenenti alla serie 7xxx e contenenti anche magnesio, se trattate termicamente, hanno la più alta resistenza a trazione tra tutte le leghe di alluminio.

Le leghe della serie 7xxx sono comunemente utilizzate in applicazioni che richiedono elevate prestazioni strutturali, come parti di aeromobili e applicazioni ad alta resistenza.

**Leghe serie 8xxx:** questa lega non presenta un elemento in lega predominante, ma comprende vari tipi di leghe quali *Al-Li*, *Al-Ni-Fe*, *Al-Sn*, e tante altre. Per molti aspetti, sono leghe ancora in via di sviluppo e piuttosto sperimentali. Sono leghe speciali utilizzate per applicazioni specifiche, come contatti elettrici o applicazioni a elevate temperature.

## CARATTERISTICHE DELLE LEGHE DA FONDERIA

**Le leghe di Alluminio per fonderia** sono designate in base ai principali elementi di lega, usando una notazione a cinque cifre. I principali costituenti di lega aggiunti sono: il rame per le 2xxxx, il silicio con aggiunta di rame e/o manganese per le 3xxxx, il magnesio per le 5xxxx, lo zinco per le 7xxxx e lo stagno per le 8xxxx.

Le leghe appartenenti alla classe 9xxxx contengono altri elementi di lega e le 1xxxx presentano una percentuale di alluminio maggiore al 99%.

Nella classe 1xxxx, la seconda e la terza cifra indicano la minima percentuale di alluminio (ad esempio 150x indica una composizione contenente un minimo di 99.50% di alluminio). L'ultima cifra, che si trova a destra del punto decimale, indica la forma prodotta con 0 o 1 a seconda che si tratti di prodotto quasi finito o di lingotto.

Nella classe di leghe 2xxxx e 8xxxx, la seconda e la terza cifra non hanno significato individuale, ma servono per identificare le differenti leghe nel gruppo. L'ultima cifra indica, anche in questo caso come nel precedente, la forma prodotta: 0 indica il prodotto quasi finito, 1 il lingotto standard e 2 individua i lingotti aventi un più stretto campo di composizione, ma compresi in quello dei lingotti standard. Modificazioni della lega sono identificate da una lettera maiuscola che precede la designazione numerica.

Le proprietà delle leghe di alluminio, oltre che dipendere dalla composizione chimica, sono fortemente influenzate anche dal tipo di trattamento termico al quale sono sottoposte.

Esiste un ente, l'Aluminium Association che ha messo a punto una designazione particolare a seconda del tipo di trattamento eseguito:

## 2.2 VANTAGGI DELLE LEGHE DI ALLUMINIO

- **Leggerezza:** L'alluminio ha una densità inferiore rispetto ad altri materiali, rendendolo una scelta ideale per applicazioni in cui il peso è un fattore critico, come nel settore dell'aerospaziale e dell'automotive.
- **Resistenza alla corrosione:** L'alluminio forma uno strato protettivo di ossido sulla sua superficie, che fornisce una buona resistenza alla corrosione in diverse condizioni ambientali.
- **Buone proprietà termiche ed elettriche:** L'alluminio ha una buona conduttività termica ed elettrica, che lo rende adatto per applicazioni che richiedono dissipazione del calore o conduzione elettrica efficiente.
- **Formabilità:** L'alluminio è facilmente lavorabile e può essere formato in diverse forme complesse attraverso processi come la laminazione, l'estrusione e la pressatura.
- **Riciclabilità:** L'alluminio è completamente riciclabile senza perdita di qualità, riducendo l'impatto ambientale e promuovendo la sostenibilità.

## 2.3 CRITICITÀ DELL' ALLUMINIO

Nonostante le numerose qualità e vantaggi dell'alluminio, ci sono anche alcune criticità da considerare. Ecco alcune delle principali criticità associate all'utilizzo dell'alluminio:

1. **Costo:** L'alluminio è generalmente più costoso rispetto ad altri materiali comunemente utilizzati, come l'acciaio. Ciò è principalmente dovuto ai costi di estrazione e produzione dell'alluminio stesso, nonché alle specifiche procedure di lavorazione richieste per lavorarlo.
2. **Deformazione termica:** L'alluminio ha un coefficiente di dilatazione termica più elevato rispetto all'acciaio, il che significa che si espande e si contrae più rapidamente quando viene riscaldato o raffreddato. Questa caratteristica può causare deformazioni termiche durante i processi di saldatura o altri processi termici, richiedendo un'attenta gestione delle temperature per evitare problemi strutturali.
3. **Resistenza meccanica inferiore:** Sebbene l'alluminio offra una buona resistenza specifica, in termini di resistenza per unità di peso, rispetto ad altri materiali come l'acciaio, ha una resistenza meccanica intrinsecamente inferiore. Pertanto, può essere necessario utilizzare sezioni più grandi o leghe specifiche per ottenere la resistenza richiesta in applicazioni ad alta sollecitazione.
4. **Proprietà anisotrope:** L'alluminio può mostrare una tendenza all'anisotropia, il che significa che le sue proprietà meccaniche possono variare in base all'orientamento dei cristalli nel

materiale. Ciò può richiedere un'attenzione particolare nella progettazione e nella lavorazione dell'alluminio per garantire che vengano sfruttate al meglio le proprietà meccaniche desiderate.

5. Reattività chimica: L'alluminio è reattivo all'ossigeno e forma rapidamente uno strato di ossido sulla sua superficie quando esposto all'aria. Questo strato protettivo di ossido può essere vantaggioso per la resistenza alla corrosione, ma può anche complicare i processi di saldatura o richiedere una preparazione accurata delle superfici prima di applicare rivestimenti o adesivi.
6. Difetti di saldatura: La saldatura dell'alluminio può essere più complessa rispetto ad altri materiali, a causa delle sue proprietà termiche e reattive. Durante la saldatura, possono verificarsi difetti come la formazione di porosità, inclusioni di ossido o cricche. La corretta preparazione delle superfici, l'utilizzo di gas di protezione adeguati e il controllo accurato dei parametri di saldatura sono cruciali per evitare tali difetti.
7. Fragilità a basse temperature: L'alluminio può diventare fragile a temperature molto basse, specialmente quando è sottoposto a sollecitazioni. Questo aspetto deve essere considerato nella progettazione di applicazioni che potrebbero essere esposte a temperature estremamente fredde.

È importante considerare queste criticità e adottare le misure adeguate durante la progettazione, la lavorazione e l'utilizzo dell'alluminio per garantire un utilizzo sicuro ed efficace. Con le corrette precauzioni e competenze, queste criticità possono essere affrontate in modo appropriato, consentendo di sfruttare i numerosi vantaggi dell'alluminio come materiale di scelta.

# CAPITOLO 2

## OBIETTIVO TESI

L'alluminio è il terzo elemento più diffuso sulla crosta terrestre dopo l'ossigeno e il Silicio ed è noto soprattutto per la sua morbidezza, per la sua leggerezza e per la sua resistenza all'ossidazione, caratteristiche che lo hanno reso uno dei materiali più importanti per l'economia mondiale. Impiegato in molti settori industriali per la fabbricazione di numerosissimi prodotti, l'alluminio è di fondamentale importanza per l'industria aerospaziale, per l'industria dei trasporti e per il settore delle costruzioni/ navale, ambiti nei quali leggerezza, resistenza e durata sono proprietà essenziali.

L'utilizzo dell'alluminio nella maggior parte dei casi viene accompagnato dalla saldatura, fondamentale per quasi ogni tipo di applicazione in quanto è in grado di legare in maniera molto resistente piastre di alluminio e creare quasi ogni tipo di forma.

Lo scopo della mia tesi è quello di stabilire a parità di materiale quale sia la miglior tecnica di saldatura in base ai parametri resistenza, corrosione e duttilità. Mi concentrerò nel settore navale in quanto settore dove attualmente sto lavorando.

Farò quindi saldare delle piastre di alluminio della lega 5083 H321 (lega principale utilizzata nel settore nautico) in MIG e TIG in quanto sono le tecniche di saldatura maggiormente utilizzate ed infine farò saldare le medesime piastre in friction stir welding in quanto da varie ricerche analizzate è considerata la miglior tecnica di saldatura. Saremo così in grado di analizzare le differenze sostanziali dalle tecniche utilizzate tutti i giorni nella maggior parte dei casi alla tecnica utilizzata raramente e solo per particolari e costose applicazioni.

Le principali prove che faremo per analizzare i campioni sono:

- **Controllo radiografico** per vedere se le saldature effettuate sono idonee o presentano troppi difetti
- **prova di trazione** per analizzare il comportamento meccanico
- **prova di durezza** per comparare l'impronta ottenuta tramite penetratore nei vari campioni
- **le indagini metallografiche** per analizzare nel dettaglio la zona di saldatura e osservare inoltre la zona termicamente alterata
- **Corrosione** per analizzare il comportamento a corrosione, molto importante nel settore nautico

I risultati che mi aspetto sono Mig e Tig molto simili tra loro mentre la FSW dovrebbe avere caratteristiche meccaniche molto più elevate visto che comunque a differenza di Mig e Tig la saldatura verrà effettuata a macchina e secondo gli studi dovrebbe avere caratteristiche quasi identiche al materiale base.

## CAPITOLO 3

### 1 METODOLOGIE DI SALDATURA

Con saldatura si intende l'unione di due pezzi mediante una fonte di calore che porta a fusione il materiale d'apporto inserito nella zona di contatto tra i due pezzi.

La saldatura è un deposito di metallo liquido all'interno dell'intaglio

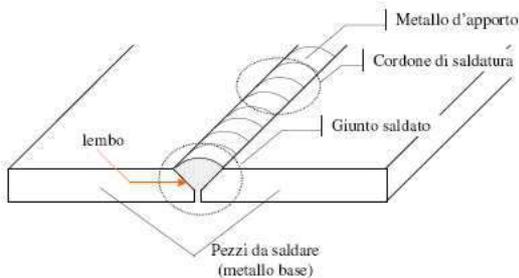


FIGURA 7 SALDATURA

Tecnologie di saldature più utilizzate:

1. TIG (Tungsten Inert Gas): La saldatura TIG, conosciuta anche come GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), è una delle tecniche più comuni per saldare l'alluminio. In questa tecnica, un elettrodo di tungsteno non consumabile viene utilizzato per generare un arco elettrico tra l'elettrodo e il pezzo di lavoro. Un gas inerte, come l'argon, viene utilizzato per proteggere la zona di saldatura da contaminazioni atmosferiche. Durante la saldatura TIG dell'alluminio, viene utilizzato anche un materiale d'apporto, come una lega di alluminio. Questa tecnica consente un elevato controllo del processo di saldatura, producendo saldature pulite, di alta qualità e con basso livello di difetti come porosità o inclusioni. La saldatura TIG è particolarmente adatta per saldature sottili o di precisione, come quelle utilizzate nell'industria aerospaziale o nella produzione di serbatoi.

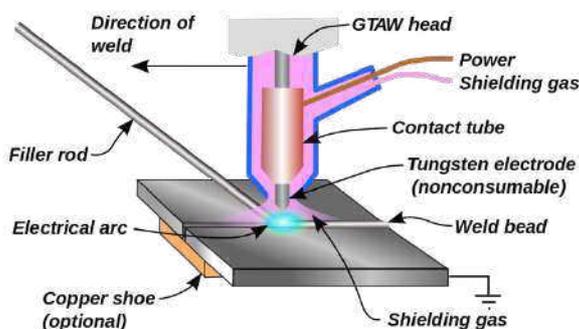


FIGURA 8 TIG

2. Saldatura MIG (Metal Inert Gas): La saldatura MIG, conosciuta anche come GMAW (Gas Metal Arc Welding), è un metodo di saldatura in cui un arco elettrico viene generato tra un filo di materiale d'apporto e il pezzo di lavoro in alluminio. Durante il processo, un gas inerte, come l'argon, viene utilizzato per proteggere la zona di saldatura da contaminazioni. La saldatura MIG è spesso utilizzata per saldature in cui è richiesta una maggiore produttività, come nella produzione di carrozzerie di autoveicoli o nella lavorazione di componenti di grandi dimensioni. Rispetto alla saldatura TIG, la saldatura MIG è più rapida, ma può essere meno precisa e richiede una maggior pulizia della superficie di saldatura per evitare la formazione di porosità o inclusioni.

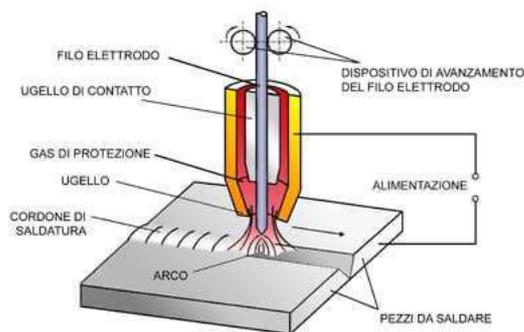


FIGURA 9 MIG

3. Saldatura ad arco sommerso: La saldatura ad arco sommerso è una tecnica che prevede l'utilizzo di un elettrodo di materiale d'apporto continuo e un letto di granuli di flusso. L'arco elettrico viene generato tra l'elettrodo e la giunzione da saldare, mentre il flusso granulare fonde e copre la zona di saldatura. La saldatura ad arco sommerso può essere utilizzata per saldature di grandi dimensioni o per applicazioni in cui è richiesta una maggiore velocità di saldatura. Tuttavia, questa tecnica può richiedere un'adeguata preparazione delle superfici e una maggiore cura nella pulizia dei granuli di flusso residui.

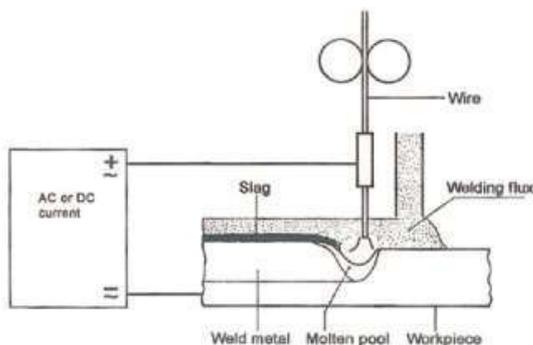


FIGURA 10 ARCO SOMMERSO

4. Saldatura ad ultrasuoni: La saldatura ad ultrasuoni è una tecnica utilizzata per saldare parti in alluminio tramite vibrazioni ad alta frequenza. Durante il processo, le due parti da saldare vengono tenute insieme sotto pressione e sottoposte a vibrazioni ultrasoniche ad alta frequenza. Le vibrazioni generano calore a causa dell'attrito tra le parti, che fonde l'alluminio e crea una saldatura solida. Questa tecnica è spesso utilizzata per saldare parti di alluminio di piccole dimensioni o componenti elettronici.
5. Saldatura a resistenza: La saldatura a resistenza, o saldatura a punti, è una tecnica di saldatura in cui la corrente elettrica viene fatta passare attraverso i pezzi di alluminio da saldare per generarne il calore. I pezzi vengono quindi tenuti insieme sotto pressione finché non si raggiunge la temperatura di saldatura desiderata, creando una saldatura a punti o una saldatura continua. Questa tecnica è spesso utilizzata per saldare lamiere sottili di alluminio o componenti automobilistici.
6. Saldatura a friction stir welding: La saldatura a friction stir welding è una tecnica che coinvolge la rotazione di uno dei pezzi di alluminio da saldare e l'applicazione di una pressione sufficiente per generare calore per la saldatura. A causa dell'attrito tra le superfici in rotazione, le parti si riscaldano e, quando viene raggiunta la temperatura di saldatura, vengono unite sotto pressione. Questa tecnica è utilizzata principalmente per saldature ad alta resistenza o saldature di materiali dissimili in cui la fusione del materiale è evitata.

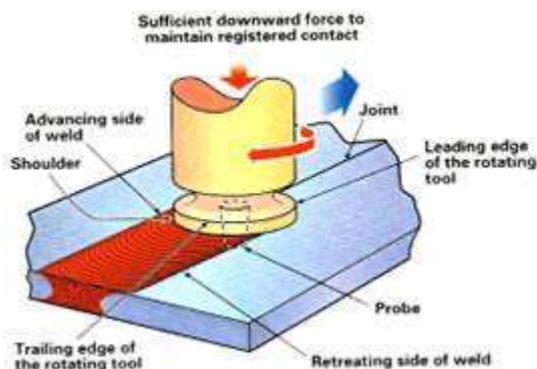


FIGURA 11 FRICTION STIR WELDING

È importante notare che la scelta della tecnica di saldatura dipenderà dalle specifiche esigenze dell'applicazione, dalla dimensione e dallo spessore dei materiali da saldare, dalle tolleranze richieste, dai costi, dalle capacità di produzione e da altre considerazioni specifiche del progetto. Inoltre, è importante seguire le procedure di saldatura appropriate, utilizzare i parametri corretti e garantire una pulizia adeguata delle superfici di saldatura per ottenere saldature di alta qualità.

## 2. SALDATURE EFFETTUATE

In collaborazione con l'azienda Fusina products S.r.l abbiamo intrapreso un progetto di comparazione di vari tipi di saldatura, Tig e Mig in quanto sono le saldature maggiormente utilizzate per l'alluminio e friction stir welding in quanto secondo molti studi rappresenta il tipo di saldatura migliore in assoluto.

Abbiamo scelto come materiale due lamiere di alluminio 5083 H321 di spessore 8mm ovvero il tipo di alluminio più utilizzato nella costruzione di navi.

Una volta recuperato il materiale abbiamo iniziato con le saldature Tig e Mig e abbiamo scelto di farlo in due aziende diverse ovvero Adriatic Shipyard Srl cantiere navale specializzato nella costruzione e riparazione di grandi navi e Buson Srl azienda specializzata nelle lavorazioni meccaniche. In questo modo, possiamo analizzare come al variare delle tecniche, parametri e operatori varino le caratteristiche delle saldature e quindi il loro comportamento meccanico.

Come prima cosa abbiamo studiato il tipo di cianfrino seguendo la normativa UNI EN ISO 9692 e come possiamo vedere nella tabella sottostante per spessori di 8mm il più adatto è il cianfrino a V.

### Forme cianfrini

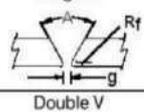
TIPO DI GIUNTO	SPESSORE	Acciai al Carbonio Acciai Inossidabili	ALLUMINIO
SEZIONE QUADRA 	Fino a 6mm	Distanza tra le lamiere 50% della misura dello spessore della lamiera	Distanza tra le lamiere 50% della misura dello spessore della lamiera
Single V 	da 6mm a 18mm	A= 60° Rf= 1,5mm MAX g = nil	A= 65-70° Rf= 1,5mm MAX g = 1,5mm MAX
Double V 	Sopra a 18mm	A= 50° Rf= da 1 a 2mm g = nil	A= 80-90° Rf= 1,5mm MAX g = 1,0mm MAX

FIGURA 12 FORME CIANFRINI

Una volta ottenuto il cianfrino abbiamo proceduto alla molatura ovvero un processo indispensabile nella saldatura dell'alluminio. La molatura consiste infatti nel togliere lo strato di allumina presente nella superficie del materiale, senza questo passaggio sarebbe impossibile saldare il materiale in quanto l'allumina fonde a circa 2000°C contro i 660 ° dell'alluminio. È inoltre molto importante pulire il cianfrino prima di effettuare la saldatura in quanto le particelle di allumina possono rimanere inglobate nel giunto causando difetti come inclusioni dure e fragili che abbassano la tenacità del giunto e causano l'insacco di cricche.

Come ultimo step prima della saldatura abbiamo preriscaldato con una torcia il materiale fino a 110°C. Questo passaggio è fondamentale per evitare che a causa della sua elevata conducibilità termica causi fusioni non regolari e quindi difetti.

## 2.1 SALDATURA A TIG

Abbiamo iniziato con la saldatura a Tig in azienda Buson S.r.l. utilizzando una bacchetta Al-Mg di diametro 1,6mm e come gas abbiamo utilizzato l'Argon. Abbiamo applicato cinque passate più la ripresa sul retro e per ogni passata abbiamo cambiato i valori di amperaggio e voltaggio e cronometrato il tempo necessario per compiere la passata in modo da poterci ricavare la velocità.

n. Passata	Amperaggio (A)	Velocità (mm/sec)
1	150	1,56
2	160	1,88
3	190	1,92
4	190	1,95
5	190	1,97
Ripresa	190	2,4

Possiamo notare come maggiore è l'amperaggio maggiore è la velocità di saldatura.

Risultato finale:



FIGURA 13 SALDATURA A TIG

Possiamo notare come la saldatura sia pressoché uniforme ed omogenea e all'apparenza non risultino evidenti difetti.

Per la stessa saldatura effettuata nell'azienda Adriatic Shipyard S.r.l abbiamo utilizzato una bacchetta Al-Mg di diametro 1,6mm e come gas abbiamo utilizzato sempre l'Argon. Abbiamo applicato tre passate più la ripresa sul retro mantenendo però in questo caso costanti i valori di amperaggio e cronometrato il tempo necessario per compiere la passata completa in modo da poter calcolare la velocità di saldatura.

n. Passata	Amperaggio (A)	Velocità (mm/sec)
1	174	1,95
2	174	2,46
3	174	2,46
Ripresa	174	3,26

A differenza della prima saldatura possiamo notare come in questo caso il valore di amperaggio sia rimasto il medesimo e in media più basso. La velocità di saldatura invece è maggiore ciò probabilmente dovuto ad una maggior capacità da parte dell'operatore.

Risultato finale:



FIGURA 14 SECONDA SALDATURA A TIG

A differenza del primo campione presenta un aspetto meno regolare e si può notare a destra come ci sia uno stop più una successiva ripresa della saldatura.

## 2.2 SALDATURA A MIG

Abbiamo ora proceduto con la saldatura a Mig presso l'azienda Buson S.r.l utilizzando un filo pieno Al- Mg di 1mm e come gas sempre l'Argon.

Abbiamo applicato due passate più ripresa sul retro ottenendo il seguente risultato:

n. Passata	Amperaggio (A)	Velocità (mm/sec)
1	130	7
2	130	6,08
Ripresa	130	7,44

Possiamo subito notare come la saldatura a Mig sia molto più veloce di quella a Tig ed inoltre richiede un amperaggio minore.

Risultato ottenuto:



FIGURA 15 SALDATURA A MIG

Anche per quanto riguarda il Mig possiamo notare come la saldatura sia pressoché uniforme ed omogenea e all'apparenza non risultino evidenti difetti.

Nell'azienda Adriatic Shipyard S.r.l abbiamo utilizzato un filo pieno Al- Mg di 1,2mm, come gas sempre l'Argon e a differenza dell'azienda Buson Srl abbiamo utilizzato il supporto ceramico che si applica al rovescio del giunto da saldare mediante nastro in Al autoadesivo e permette di realizzare giunti perfetti a piena penetrazione senza necessità di ripresa al rovescio. Il supporto ceramico è

molto utilizzato perché permette di operare in maniera molto più veloce e consumando meno energia.

Abbiamo applicato quindi solo due passate ottenendo i seguenti risultati:

n. Passata	Amperaggio (A)	Velocità (mm/sec)
1	110	8,17
2	110	6,94

Notiamo come anche in questo caso le saldature sono state eseguite con una velocità maggiore ciò probabilmente dovuta al fatto che gli operatori di quest'azienda sono abituati ad eseguire molti metri di saldatura al giorno ed è quindi la velocità il loro punto forte.

Risultato ottenuto:



FIGURA 16 SECONDA SALDATURA A MIG

Possiamo notare come la saldatura si presenti uniforme e senza particolari difetti.

## 2.3 SALDATURA A FRICTION STIR WELDING

Per questo tipo di saldatura non essendo molto comune ed inoltre essendo molto costosa non è stato facile riuscire a trovare un'azienda in grado di farla. Dopo varie ricerche abbiamo trovato l'azienda francese TRA-C Industrie azienda specializzata in questo tipo di saldatura.

Abbiamo fatto saldare due campioni, il primo con direzione di passata longitudinale alla laminazione il secondo invece trasversale.

I parametri che hanno utilizzato sono stati i seguenti:

- rotazione = 700 giri/minuto
- Velocità di saldatura= 4,17 mm/sec
- Forza= 18,5KN
- Inclinazione = 2°

Risultato ottenuto:

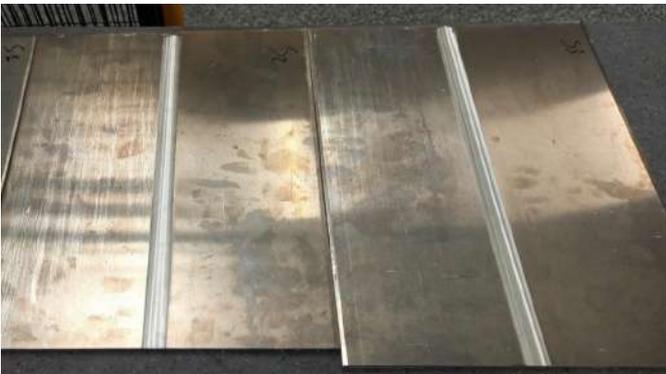


FIGURA 17 SALDATURA A FRICTION STIR WELDING

Possiamo notare come già all'apparenza risulta nettamente migliore di Mig e Tig.

# CAPITOLO 4

## 2. INDAGINI SPERIMENTALI DAL PUNTO DI VISTA TEORICO

Una volta saldati i campioni abbiamo proceduto alle prove sperimentali in modo da poter analizzare gli eventuali difetti ed inoltre stabilire il miglior metodo di saldatura.

Analizziamo ora teoricamente le varie prove meccaniche:

### 1.1 PROVA DI TRAZIONE

La prova meccanica a trazione è un test meccanico che viene effettuato sul materiale sottoposto a delle sollecitazioni a trazione. Il carico applicato è monodirezionale, con versi opposti. Questa prova si fa solitamente alla fine dei processi di produzione. Si parla di prove di trazione statiche, quindi il tempo è una variabile indipendente.

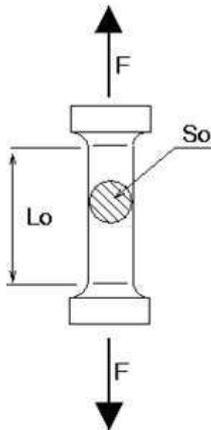


FIGURA 18 PROVINO PROVA DI TRAZIONE

La provetta utilizzata per la prova è composta da tre parti:

- **Zona degli afferraggi**, dove viene agganciata alla macchina di trazione
- **Zona del tratto utile** con lunghezza iniziale  $L_0$  e sezione iniziale  $A_0$
- **Zona dei raccordi**, zona che raccorda il tratto utile con gli afferraggi

La lunghezza del tratto utile deve essere proporzionale alla radice della sezione trasversale del tratto utile:

$$L_0 = K \sqrt{A_0}$$

La provetta si romperà sul tratto utile, perché la sezione è più fina. La tensione è massima dove la sezione resistente è più piccola.

La macchina misura la forza resistente opposta della provetta tramite dei sensori dette celle di carico. Durante la prova al tempo  $t_0$  è importante misurare la sezione iniziale del provino, e durante il test con la cella di carico si va a misurare la forza opposta della provetta, definendo ad ogni istante del test la tensione ingegneristica come la forza applicata sulla provetta sulla superficie resistente.

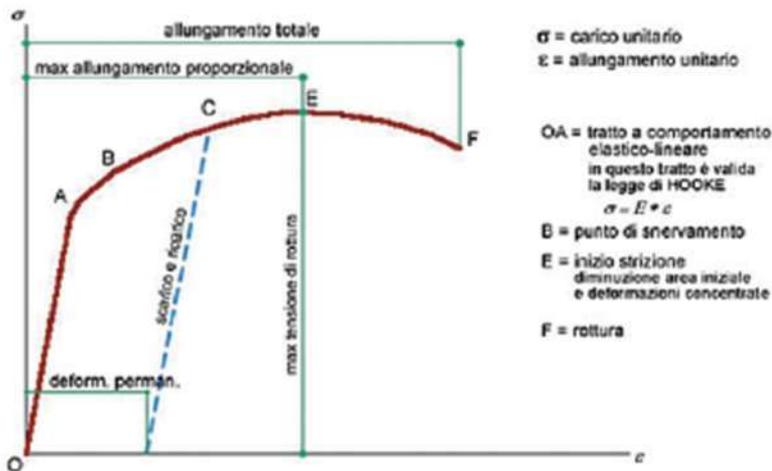


FIGURA 19 GRAFICO DI TRAZIONE

- Dal punto 0 al punto A: Tratto elastico, dove il carico applicato è inizialmente piccolo e lasciato il carico il materiale torna al suo stato iniziale. Si può regolare la pendenza della curva tramite la formula:  $\sigma = E * \epsilon$ , detta legge di Hooke dove E è la costante di proporzionalità elastica.
- Dal punto A al punto C: zona di deformazione plastica uniforme del materiale, qui avvengono due fenomeni:
  1. INCRUDIMENTO: È un fenomeno di tipo metallurgico per cui il materiale metallico, mentre viene deformato plasticamente a freddo si rafforza. La deformazione aumenta in modo più che proporzionale rispetto al carico applicato dalla macchina per portare a rottura il materiale. È un fenomeno associato ai difetti nei reticoli cristallini.
  2. STRIZIONE: È il fenomeno per cui viene conservato il volume del materiale: Il materiale viene tirato si allunga e si contrae lateralmente in modo uniforme nel tratto da A ad R.
- Dal punto C al punto E: zona di deformazione plastica localizzata, si ha un'instabilità alla deformazione plastica dove la trazione esercitata dalle ganasce della macchina si concentra tutta sulla zona più debole e sottile, provocando la più comunemente nota: forma a clessidra. Nel punto E, punto di rottura avviene la strizione localizzata, cioè in questo istante il materiale mostra un'instabilità alla deformazione. Se prima infatti si deformava in maniera uniforme lungo tutto il tratto utile ora la deformazione si concentra in un'unica zona. Lo stato delle forze in questo passaggio è triassiale e il punto E per noi infatti rappresenta il punto di massima resistenza del materiale. Dopo il punto E la curva  $\sigma \epsilon$  tende a diminuire, questa diminuzione continua fino al punto F, in cui le tensioni si concentrano sempre di più nella zona di strizione localizzata, fino a far cedere la provetta.

## DEFORMAZIONI PLASTICHE ALLA ROTTURA

Misurare di quanto si è deformato il materiale al cedimento, dopo che è avvenuta la frattura totale. La deformazione plastica alla rottura del materiale viene misurata come  $A_n$  % cioè come la lunghezza finale della provetta meno la sua lunghezza iniziale, fratto la sezione iniziale della provetta, in particolare la lunghezza finale del tratto utile meno la lunghezza iniziale del tratto utile diviso la lunghezza iniziale del tratto utile.

$$A_n\% = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

Alla rottura bisogna tenere conto anche del ritorno elastico del materiale, anche se molto piccolo.

È possibile distinguere ora due famiglie di materiali:

- Duttili: Ovvero quei materiali che presentano una deformazione plastica alla rottura, maggiore del 5%
- Fragili: Ovvero quei materiali che presentano una deformazione plastica alla rottura inferiore al 5%

## 1.2 PROVA DI DUREZZA

Possiamo intendere la durezza di un materiale come la resistenza che esso offre alla penetrazione di un altro corpo più duro.

È una prova veloce, semplice e di tipo non distruttivo, utile per il controllo della struttura, controllo della produzione e qualità del prodotto.

Alta durezza significa resistenza alla deformazione plastica e alla rottura in compressione, migliore resistenza ad usura e maggiore fragilità.

Se il carico è costante si riesce subito a discriminare materiali di durezza maggiore da materiali di durezza minore, a causa dell'impronta che viene lasciata sul materiale stesso. Se l'impronta è grande, vuol dire che il materiale penetrante è più duro, se invece è più piccola è meno duro, cioè si lascia penetrare più facilmente. Ci sono diversi indici per la durezza, poiché dipende dai metodi di prova che vengono utilizzati.

### DUREZZA DI BRINELL

La durezza di un materiale si può verificare prendendo un corpo di durezza maggiore, applicando tramite questo corpo il carico in maniera statica e perpendicolare alla superficie del materiale da analizzare.

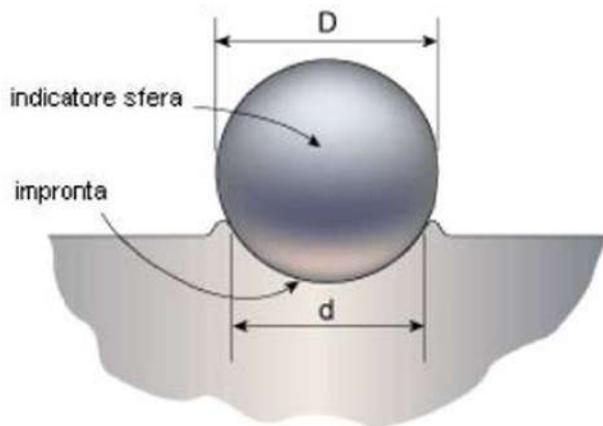


FIGURA 20 DUREZZA BRINELL

Come penetratore qui viene utilizzata una sfera in acciaio temprato. Attraverso questa sfera viene applicato un carico che varia da 1-2Kg fino in alcuni casi a 250-500Kg. Sul materiale è lasciata un'impronta circolare.

Indice di durezza Brinell (BHN):

$$\text{BHN} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi * D * p} = \frac{F}{\pi * \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Il primo problema è utilizzare questa metodologia con l'acciaio temprato, poiché i due materiali non possono essere di uguale durezza. Il penetratore non deve mai essere più tenero del materiale, pena la rottura del penetratore.

Il concetto di durezza è direttamente correlabile con il concetto di tensione di rottura del materiale; infatti, esiste una formulazione di tipo empirico per cui la durezza Brinell può essere espressa come tre volte la tensione di rottura misurata con la prova statica a trazione:

$$\text{BH} = 3 * \sigma_r = 3R \quad \text{dove } \sigma_r = \text{tensione alla rottura} \left( \frac{\text{MPa}}{\text{mm}^2} \right)$$

L'unità di misura della durezza Brinell è il  $\frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2}$

## DUREZZA VICKERS

La durezza Vickers utilizza come penetratore una piramide a base quadrata in diamante, con un angolo al vertice della piramide di 136°. Il carico che può esservi applicato varia da 1 a 120Kg e va determinato in base alla durezza del materiale. L'impronta che viene lasciata sul materiale è quadrata e la superficie è piramidale.

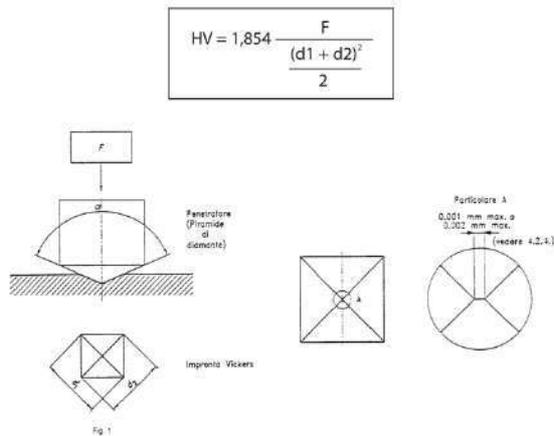


FIGURA 21 DUREZZA VICKERS

Formula dell'indice di Vickers:

$$VHN = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

L'unità di misura della durezza Vickers è il  $\frac{Kg}{mm^2}$

Il vantaggio di questa prova è che utilizzando un penetratore in diamante, andrà bene per ogni tipo di materiale, quindi, non c'è bisogno di cambiare penetratore a seconda del tipo di materiale utilizzato.

## DUREZZA ROCKWELL

Questa è la prova di gran lunga più eseguita. È facile e rapida da eseguire, ha un'elevata capacità di diversificare acciai con durezza di poco differente, l'impronta ha piccole dimensioni, è possibile automatizzare il tutto e c'è un'assenza di misure ottiche. Si misura la profondità di permutazione attraverso uno strumento chiamato comparatore.

## 1.3 PROVA DI RESILIENZA

Nel 1912 si iniziò a capire che i materiali metallici hanno comportamenti meccanici diversi a seconda della temperatura, in particolare, i materiali metallici che venivano utilizzati all'epoca nelle fredde acque dell'atlantico si comportavano in maniera estremamente fragile.

Lo studio della resilienza iniziò durante la Seconda guerra mondiale, quando furono costruite numerose navi da trasporto. Erano circa 4000 navi mercantili che servivano per il trasporto degli alleati per aggirare i sommergibili tedeschi. Di queste 4000 navi, nel mare Atlantico del nord, 24 ebbero delle serie cricche, mentre 12 si ruppero a metà nelle fredde acque del nord Atlantico.

Una delle principali cause fu l'utilizzo di materiali metallici non adatti a quel tipo di clima e inoltre un altro problema fondamentale per il quale molte si ruppero era che i vari pezzi erano imbullonati tra loro, senza nessun altro isolante. Con gli anni si passò da questa poco efficace tecnica alla saldatura, la quale permetteva di fondere le due parti della nave ottenendo così un solo pezzo di acciaio.

Si iniziò inoltre a studiare quella che era la resilienza del materiale, cioè la capacità del materiale di resistere in condizioni di sollecitazione dinamica impulsiva. Così nacque la meccanica della frattura, ovvero quella scienza che si occupa di studiare come si propagano le fratture all'interno del materiale e quali sono le condizioni al contorno che favoriscono la propagazione della frattura.

Da questi studi si capì che il comportamento a rottura del materiale dipendeva da diversi fattori, come:

- **Lo stato tensionale triassiale**, che incide sulla duttilità del materiale.
- **La temperatura**, condizione ambientale. La bassa temperatura aumenta quella che è la fragilità del materiale.
- **Velocità di deformazione**, La deformazione delle caratteristiche di un materiale dipendono dalla velocità con il quale si sollecitano, più velocemente si sollecitano e più velocemente si crea una deformazione e più il materiale tende a comportarsi in maniera fragile, come il vetro.

Misurate queste grandezze in maniera semi quantitativa è possibile determinare la temperatura di transizione, cioè la temperatura minima al di sopra del quale un materiale metallico si comporta in modo plastico e al di sotto, invece, in modo prettamente fragile.

L'intervallo di transizione dipende da:

1. Forma e dimensione dell'intaglio
2. Dimensioni del provino
3. Velocità dell'urto
4. Criterio adottato per rilevare la curva di transizione

Un'altra variabile che influenza la temperatura di transizione sono gli elementi alleganti. Tendenzialmente, i materiali puri sono poco utilizzati per via delle loro scarse caratteristiche naturali, ma vengono utilizzati per esaltare le caratteristiche di conducibilità termica ed elettrica.

La temperatura duttile-fragile e la tenacità del materiale è influenzata inoltre dal grano cristallino, infatti, ad ogni grano cristallino è associato un reticolo cristallino. Ogni grano cristallino è formato da

atomi disposti in forma regolare con una loro orientazione. La cosa fondamentale è che più fino è il grano cristallino migliore è la tenacità del materiale sia statica che dinamica e più bassa è la temperatura di transizione duttile – fragile.

## CARATTERISTICHE DELLA PROVA DI CHARPY

Per cercare di comprendere tutte e tre le variabili della meccanica della frattura sopra elencate, si utilizza una prova detta prova di Charpy, la quale comprende l'utilizzo di un pendolo.

Si monta inizialmente una cella di carico sulla mazza battente e si misura la forza come con la prova a trazione. Si aggiunge inoltre un cronometro in modo da osservare la variazione della forza durante il test in funzione del tempo, la curva carico-tempo che si ottiene è la seguente:



FIGURA 22 GRAFICO PROVA DI CHARPY STRUMENTATA

Dal grafico sovrastante possiamo osservare come il tratto iniziale rappresenta l'elasticità del materiale, poi c'è il punto di snervamento fino ad un punto di tensione massima fino al punto di innesco della frattura, in cui il carico decade subito verticalmente, indicando così che in quell'istante si è innescata la frattura ed è diminuita vertiginosamente la sezione resistente della provetta in un tempo infinitesimo.

## 2) INDAGINI SPERIMENTALI DAL PUNTO DI VISTA PRATICO

Andremo ora ad analizzare le indagini sperimentali che abbiamo effettuato per valutare la miglior tecnica di saldatura.

### 2.1 CONTROLLO RADIOGRAFICO

Una volta ricavate le saldature, presso il laboratorio dell'Università di Padova abbiamo proceduto con il controllo radiografico, si tratta di un test non distruttivo che si basa sui fotoni ad alta energia che si trasmettono attraverso un metallo verso un rivelatore posizionato sul lato opposto. Qualunque irregolarità all'interno del componente, nella saldatura, nel materiale di base o nell'interfaccia, viene rilevata dal rivelatore come area più chiara o scura.

Per il controllo radiografico abbiamo utilizzato le linee guida presenti nella normativa ISO 17636 mentre per la valutazione del giunto saldato abbiamo utilizzato la ISO 10675.

Per effettuare al meglio la prova e scansionare tutto il giunto saldato abbiamo diviso la sezione in 3 parti da circa 17 cm ciascuna. Abbiamo quindi nominato le 3 zone con 1, 2, 3 e successivamente abbiamo incollato nella lamiera con nastro biadesivo appositi piombi a forma di numero 1,2,3. Il piombo infatti è in grado di schermare i fotoni ad alta energia che vengono trasmessi e ci fa apparire nello schermo del computer del macchinario la sua forma nitida. Senza di esso sarebbe stato impossibile capire dallo schermo in che parte del giunto di saldatura ci trovavamo.

Esempio preparazione:

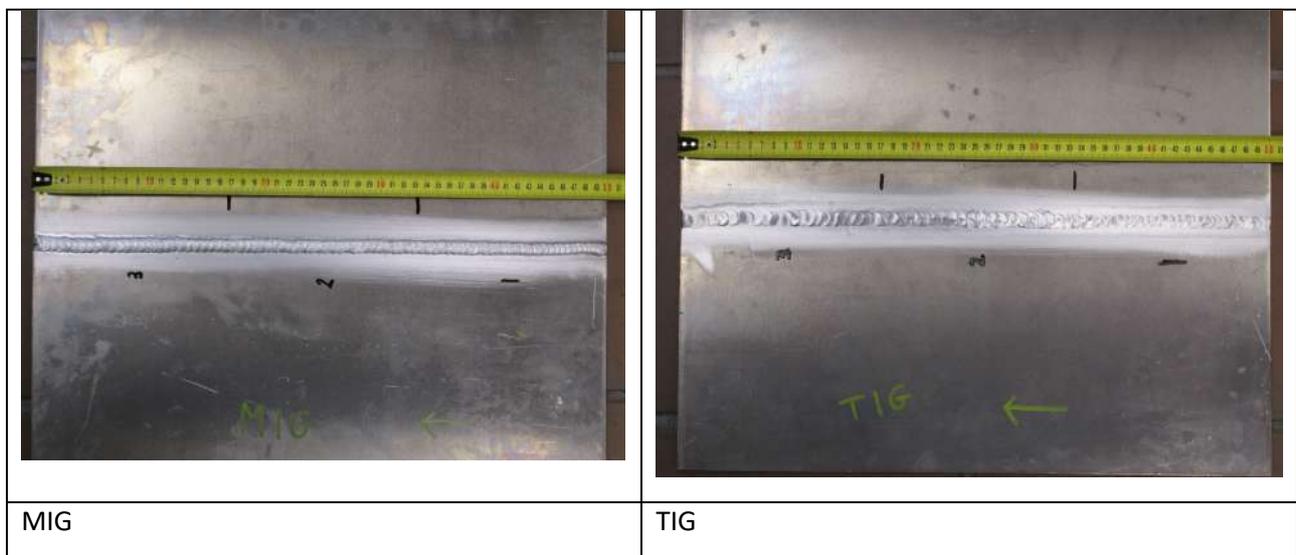
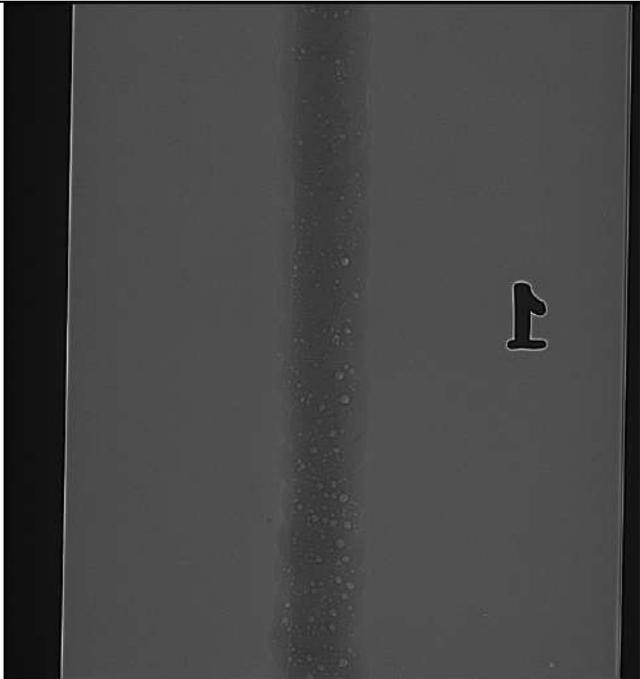


FIGURA 23A E 23B PREPARAZIONE CON I PIOMBI

## ANALISI RISULTATI OTTENUTI

Per comodità ci soffermeremo solo in particolari zone e non in tutte e tre le sezioni e chiameremo MIG A e TIG A le saldature effettuate nel cantiere Adriatic Shipyard Srl mentre con MIG B e TIG B le saldature effettuate da Buson Srl.

	
MIG B	MIG A
<p>Possiamo notare immediatamente come la saldatura di destra presenti molte più porosità (probabilmente porosità gassose) e impurezze rispetto a quella di sinistra che invece all'apparenza risulta con pochissimi difetti. Le cause della formazione delle porosità sono l'assorbimento di ossigeno o idrogeno nel bagno di fusione, i gas vengono rilasciati in fase di solidificazione e rimangono intrappolati nel metallo saldato, questo è probabilmente dovuto ad una scarsa schermatura del gas protettivo (Argon) e inoltre accentuata dal fatto che le saldature sono state eseguite in un capannone industriale con presenza di polveri e lavorazioni di altri materiali diversi nelle vicinanze. Possiamo comunque notare che le porosità presenti non sono di grandi dimensioni e tra loro sono pressoché uniformi.</p>	

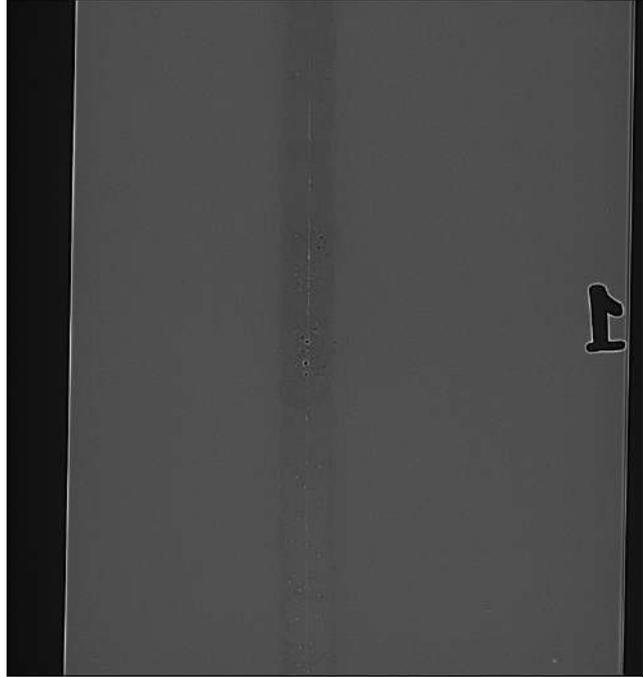
	
<p>TIG B</p>	<p>TIG A</p>
<p>Anche in questo caso possiamo notare come la saldatura di sinistra all'apparenza sia nettamente migliore. Nella saldatura di destra possiamo notare qualche porosità gassosa (in maniera molto minore rispetto al mig) ma soprattutto una zona centrale con parecchi difetti, dovuti principalmente al fatto di uno stop e successiva ripresa della saldatura.</p>	
	
<p>FRICION STIR WELDING TRASVERSALE</p>	<p>FRICION STIR WELDING LONGITUDINALE</p>
<p>Analizzando la Friction Stir welding possiamo subito notare come sia priva di alcun tipo di difetto e infatti ci aspetteremo caratteristiche molto simili al materiale base</p>	

FIGURE 24A, 24B, 25A, 25B, 26A, 26B CONTROLLI RADIOGRAFICI

## CONFRONTO RADIOGRAFIE

Dalle radiografie possiamo notare come la FSW sia nettamente migliore di Mig e Tig cosa che effettivamente ci aspettavamo visto che è stata eseguita da una macchina e non da operatori.

Per quanto riguarda il confronto di Mig e Tig possiamo notare come entrambe le saldature presentino dei difetti ma il Tig sembrerebbe avere una minor concentrazione di essi in entrambe le aziende.

Nel Tig A però abbiamo il difetto della ripresa di saldatura zona, dunque, con parecchia contaminazione e questo potrebbe compromettere notevolmente le sue caratteristiche meccaniche.

Abbiamo riscontrato molto interessante il fatto che la maggior parte dei difetti era interessato nelle aree vicino al bordo quindi aree iniziali e finali di saldatura.

## 2.2 PROVA DI TRAZIONE

Con questa prova andremo a confrontare il comportamento meccanico delle varie saldature andando a determinare:

- Carico rottura (RM) di un materiale cioè, il carico massimo che esso può sopportare senza rompersi.
- Deformabilità (Allungamento), cioè la capacità di deformarsi sotto l'applicazione di un carico
- Carico di snervamento  $R_p$ , rappresenta lo sforzo massimo che il materiale può sopportare senza subire una deformazione permanente. In altre parole, è il punto sul grafico deformazione – carico dove il materiale inizia a deviare linearmente dalla sua risposta elastica e comincia a subire una deformazione permanente.

## GEOMETRIA

Come prima cosa dobbiamo ricavarci i provini andandone a determinare la forma.

Provini di forma diversa portano a curve di trazione diverse, per questo motivo si è regolamentata la forma dei provini. I provini sono provvisti di due estremità che servono per l'afferraggio della macchina e la sua forma è studiata in modo da avere la rottura nella zona centrale in quanto vicino alle ganasce non si ha una forza uniassiale ma entrano in gioco anche le forze applicate alle ganasce che fissano il provino. Nella zona centrale del provino, l'area della sezione è minore di quella della zona più larga, ciò consente a parità di forza applicata uno sforzo maggiore.

Abbiamo quindi calcolato la geometria secondo le norme descritte nella normativa ISO 4136 per test di trazione su materiali saldati.

BS EN ISO 4136:2012  
 ISO 4136:2012(E)

For the test specimen machined from pipe, flattening of the gripped ends may be necessary; however, this flattening and the possible resulting variation in thickness shall not affect the parallel length,  $L_c$ .

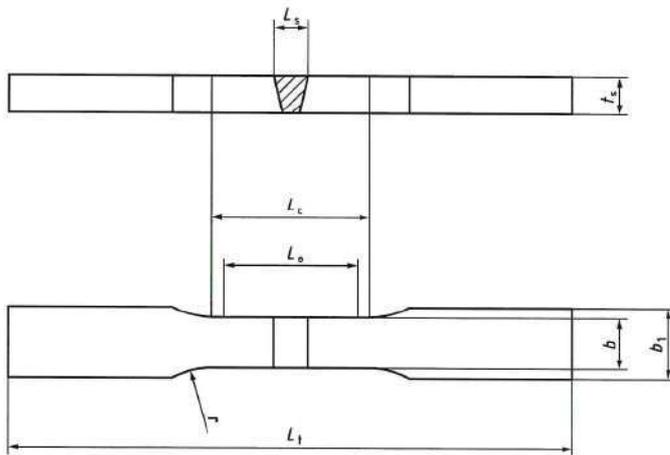
Table 2 — Dimensions for plates and pipes

Dimensions in millimetres

Denomination	Symbol	Dimensions
Total length of the test specimen	$L_t$	to suit particular testing machine
Width of shoulder	$b_1$	$b + 12$
Width of the parallel length	plates	12 for $t_s \leq 2$ 25 for $t_s > 2$
	pipes	6 for $D \leq 50$ 12 for $50 < D \leq 168,3$ 25 for $D > 168,3$
Parallel length <sup>a b</sup>	$L_c$	$\geq L_s + 60$
Radius at shoulder	$r$	$\geq 25$

<sup>a</sup> For pressure welding and beam welding (process groups 2, 4, and 5 in accordance with ISO 4063:2009),  $L_c = 0$ .

<sup>b</sup> For some other metallic materials (e.g. aluminium, copper and their alloys)  $L_c \geq L_s + 100$  may be necessary.



a) Test specimen for plates

FIGURA 27 GEOMETRIA NELLA PROVA DI TRAZIONE

Dal calcolo della geometria abbiamo ottenuto i seguenti valori

Come dati di partenza abbiamo:

Spessore lamiera=8mm, spessore giunto massimo (Tig A) = 17mm , Lcordone= 500mm, H lamiera= 400mm

$b = 25\text{mm}$  (Larghezza tratto centrale)

$b_1 = b + 12 = 25 + 12 = 37\text{mm}$  (Larghezza)

$R = 30$  (raggio) Normativa diceva  $>$  di 25 noi abbiamo scelto 30 per sicurezza.

$L_c$  (lunghezza centrale) =  $L_s$  (giunto) + 60 = 17 + 60 = 77 quindi per sicurezza 80mm

$L_{tot} = 216\text{mm}$  lunghezza perfetta per il macchinario utilizzato.

Successivamente abbiamo disegnato su Autocad il provino con le dimensioni ricavate e fatto tagliare tramite la tecnica waterjet la lamiera.

<p>FSW TRASVERALE</p>	<p>FSW LONGITUDINALE</p>
<p>MIG</p>	<p>TIG</p>

FIGURE 28A, 28B, 29A, 29B RICAVO PROVINI PER PROVA DI TRAZIONE

## PROVA PRATICA

Per la prova di trazione abbiamo seguito le procedure descritte nella normativa ISO 6892 – 1 che misura le proprietà a trazione dei materiali metallici a temperatura ambiente ovvero 23 gradi Celsius, più o meno 5 gradi.

Abbiamo fissato il provino tra due morsetti in posizione verticale (in modo tale che la forza di gravità non influisse sulla prova), successivamente abbiamo impostato una velocità costante a una delle due ganasce e quindi applicato uno sforzo costante al provino fino a portarlo a rottura. Abbiamo ripetuto il processo per tutti i provini applicando gli stessi parametri.

La macchina registra gli allungamenti del provino in relazione ai carichi e ci fornisce dei valori che implementandoli su Excel riusciamo a ricavarci il grafico nella quale possiamo valutare:

- Allungamenti percentuali
- carico snervamento
- carico unitario di rottura.

Snervamento indica il fenomeno che ha luogo nel materiale a un certo livello di sforzo (carico di snervamento), caratterizzato dallo sviluppo di elevate deformazioni irreversibili (plastiche), il punto di snervamento indica infatti quel punto che sta nel confine tra la zona elastica e quella di deformazione plastica uniforme.

In corrispondenza del carico di snervamento, si osserva sperimentalmente un significativo allungamento irreversibile del provino a carico pressoché costante (con piccole oscillazioni intorno a un valore di poco inferiore a quello di snervamento). Lo snervamento è conseguente a scorrimenti del materiale lungo piani obliqui dovuti principalmente a tensioni tangenziali; nella parte centrale del provino, con lo snervamento si inizia a osservare la contrazione trasversale della sezione trasversale che, all'aumentare dell'allungamento, si localizza sempre di più in una zona ristretta (strizione) finché non si raggiunge la rottura.

Il carico di snervamento si calcola graficamente considerando come carico di snervamento convenzionale il carico che produce una deformazione permanente dello 0.2%, tale carico si determina graficamente dall'intersezione della curva tensione-deformazione con la retta parallela al tratto iniziale elastico lineare tracciata a partire dalla deformazione dello 0.2%.

Il carico di rottura di un materiale è il carico massimo che esso può sopportare senza rompersi. Pezzi di materiali duttili, testati con prove di trazione, di solito sviluppano una strizione localizzata e il carico diminuisce prima che essi si rompano.

Si calcola graficamente andando ad individuare il punto in cui il grafico inizia a cedere.

Il macchinario utilizzato per la prova di trazione è accessoriatato di una cella di carico per rilevare la resistenza del materiale. Nel nostro caso solo la pinza inferiore tende ad allungare il pezzo, mentre quella superiore sta ferma.

Un altro strumento di misura è l'estensimetro che ci aiuta a valutare l'allungamento/deformazione in base al carico impresso. L'estensimetro riesce a valutare attraverso un ponte di Whetton la tensione elettrica di un materiale che varia all'aumentare dell'allungamento.



FIGURE 30A E 30B MACCHINARIO PER ESEGUIRE IL TEST DI TRAZIONE

Il comportamento dei materiali alla sollecitazione di trazione dipende da vari fattori:

- 1) Proprietà dei componenti strutturali, cioè dalla composizione chimica (in questo caso non conta essendo tutti i provini dello stesso materiale)
- 2) Dimensioni dei cristalli: cristalli piccoli (grana fine) offrono maggiore resistenza e si deformano di meno a causa dell'azione dei giunti e delle interazioni tra i cristalli.
- 3) Distribuzione delle fasi: Cristalli semplici che portano miscugli ed eutettici, composti chimici e soluzioni solide, la segregazione ecc. influenzano la resistenza dei materiali. Le soluzioni solide offrono le migliori caratteristiche.
- 4) Stato del materiale: Lavorazioni meccaniche a freddo, che determinano deformazioni dei reticoli cristallini e, quindi, incrudimento, aumentano la resistenza del materiale alle deformazioni, la sua durezza e fragilità con conseguente rottura all'aumentare della sollecitazione (materiale H321 incrudito).
- 5) Temperatura: Al diminuire della temperatura diminuisce la mobilità degli atomi ed aumenta quindi la resistenza alla deformazione con conseguente aumento dei valori dei carichi unitari di snervamento e di rottura (anche in questo caso non conta infatti la temperatura è uguale in tutte le prove)

## RISULTATI OTTENUTI

	Spessore	Larghezza	R <sub>p0,2%</sub>	R <sub>m</sub>	At
	mm	mm	Mpa	Mpa	%
<b>MATERIALE BASE</b>					
	8	24,8	244	332	22,5
<b>TIG B</b>					
Tig1	7,94	24,8	130	255	6
Tig2	7,94	24,8	130	250	5,2
Tig3	7,94	24,8	125	225	4
Media			128,3	243,3	5,06
Dev std			2,9	16,1	1,0
Possiamo notare come il Tig nella sezione 1 presenti caratteristiche meccaniche migliori delle altre due mentre la sezione 3 risulti la peggiore. Ne terremo conto quando andremo ad analizzare le sezioni metallografiche per individuarne il motivo.					
<b>TIG A</b>					
Tig 1	7,85	24,7	115	160	2,5
Tig 2	7,85	24,7	110	140	1,7
Tig 3	7,85	24,7	120	165	2,5
Media			115	155	2,23
Dev std			5	13,2	0,5
Possiamo analizzare come questa saldatura presenti caratteristiche peggiori in tutti i casi rispetto al Tig B. Per questo motivo possiamo dire che la saldatura non è stata eseguita in modo consono e probabilmente la causa principale è stato un amperaggio troppo basso e un insufficiente preriscaldamento.					

MIG A					
Mig1	7,95	24,85	140	256	12,1
Mig2	7,95	24,85	165	301	10,2
Mig3	7,95	24,85	165	297	9,8
Media			156,67	284,67	10,7
Dev std			14,4	24,9	1,2
<p>Possiamo notare come in questa saldatura non è possibile individuare la sezione migliore in assoluto in quanto la 2 e la 3 presentano caratteristiche di snervamento e di resistenza a rottura maggiori della 1 ma la 1 presenta un allungamento molto maggiore.</p> <p>Ciò significa che il materiale è più duttile nella sezione 1 probabilmente dovuto al fatto che presenti grani di dimensioni leggermente maggiori.</p>					
MIG B					
Mig1	7,95	28,8	195	293	4,8
Mig2	7,95	28,8	157	221	4,49
Mig3	7,95	28,8	145	224	3,7
Media			165,67	246	4,33
Dev std			26,1	40,7	0,6
<p>Possiamo subito notare come a differenza del primo mig esso presenti caratteristiche meccaniche differenti, in particolare, lo snervamento risulta maggiore ma solo grazie alla zona 1 mentre rottura e allungamenti peggiori.</p> <p>Possiamo dunque affermare che il Mig A in questo caso sia migliore in quanto più omogeneo e con caratteristiche meccaniche migliori.</p> <p>Questo risultato evidenzia il fatto che non sono solo le porosità ad influire sulle caratteristiche meccaniche, infatti, dovendo guardare solo le radiografie il Mig A risultava con caratteristiche molto peggiori del B.</p> <p>Questo risultato è caratterizzato probabilmente dal fatto che nel Mig B ci siano delle giunzioni fredde in cui il materiale non si sia fuso bene al 100% e ciò provoca un comportamento più fragile, cosa che comunque verificheremo con le indagini metallografiche.</p>					

FSW L					
1L	8	24,8	166	318	20,57
2L	8	24,8	170	322	22,4
3L	8	24,8	172	322	22,03
Media			169,3	320,67	21,67
Dev std			3,1	2,3	1
Come ci aspettavamo questo tipo di saldatura presenta caratteristiche molto simili al materiale base e nettamente migliori di Mig e Tig.					
FSW T					
1T	7,98	24,85	177	345	22,16
2T	7,98	24,85	173	329	18,37
Media			175	337	20,27
Dev std			2,8	11,3	2,7
Come ci aspettavamo questo tipo di saldatura presenta caratteristiche molto simili al materiale base e nettamente migliori di Mig e Tig e a differenza della FSW longitudinali presenta caratteristiche più fragili, infatti, è maggiore lo snervamento e la resistenza a rottura mentre è inferiore l'allungamento. Questo è dovuto probabilmente al fatto che presenti una grana leggermente inferiore della saldatura longitudinale.					

## CONFRONTO GRAFICO

Confrontiamo ora graficamente i risultati migliori di ogni saldatura:

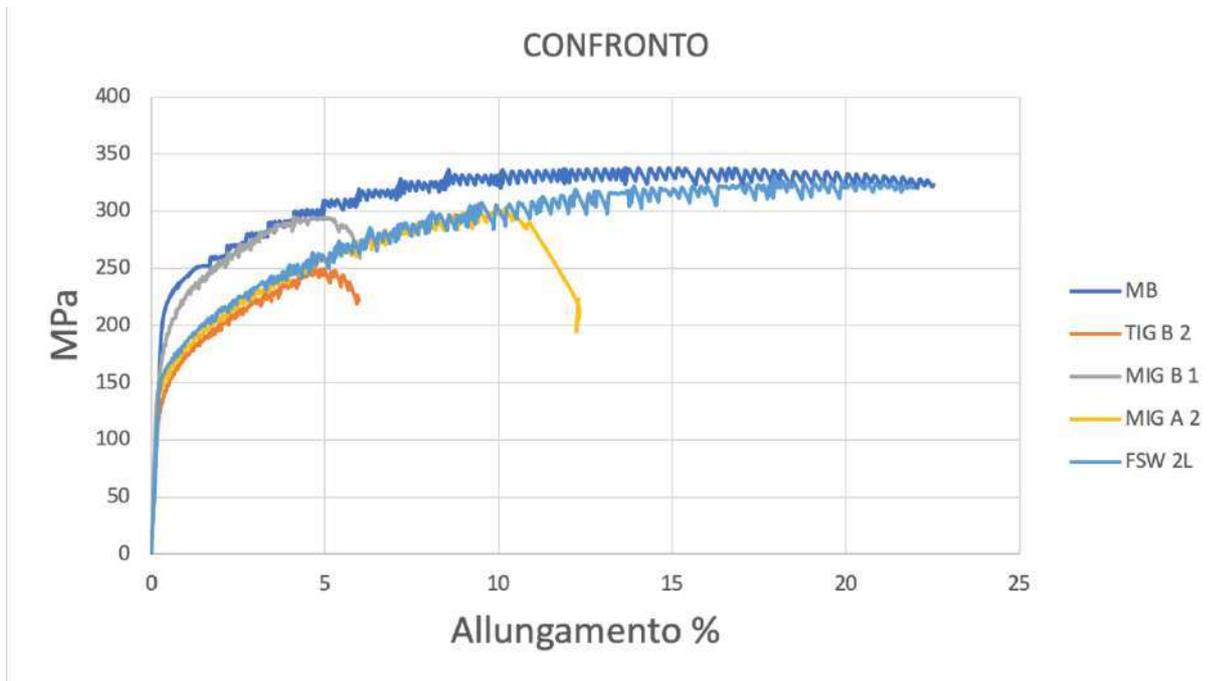


FIGURA 31 CONFRONTO GRAFICO TRAZIONE

Dalla tabella sovrastante possiamo notare come la FSW presenti caratteristiche nettamente migliori di Tig e Mig e paragonabili al materiale base.

Confrontando invece il Mig A e il Tig B ovvero il miglior Mig e miglior Tig possiamo notare chiaramente come il Mig abbia caratteristiche meccaniche nettamente migliori in tutti e tre i parametri.

Confrontando Mig A e Mig B notiamo inoltre come il Mig B presenti uno snervamento molto maggiore del Mig A questo probabilmente dovuto al fatto che presenti una grana più piccola del Mig A. Grana piccola, infatti, aumenta lo snervamento ma peggiora la duttilità ed infatti possiamo notare come il Mig A sia molto più duttile del B.

In questo grafico non prendiamo in considerazione il Tig A in quanto avendo molti difetti presenta valori troppo bassi e non avrebbe senso farci dei paragoni.

Possiamo quindi concludere questa prova dicendo che sicuramente tra Mig e Tig il migliore è il Mig sia per velocità nella saldatura sia per le caratteristiche meccaniche. Paragonando FSW e Mig invece la FSW ovviamente presenta caratteristiche meccaniche migliori ma in condizioni normali conviene usare Mig sia per il costo (notevolmente inferiore) sia per la praticità (FSW molto difficile da eseguire). La FSW risulta interessante quando ci troviamo di fronte a componenti molto costosi in cui richiedano un'elevatissima resistenza meccanica.

## 2.3 INDAGINI METALLOGRAFICHE

### PROCEDIMENTO

#### 1. OTTENIMENTO CAMPIONE TRAMITE TRONCATRICE METALLOGRAFICA

Come prima cosa con la troncatrice metallografica ci siamo ricavati 8 provini ( 2 per il tig , 2 per il mig ,2 FSWT e 2 FSWL) nelle zone che avevamo individuato dal controllo micrografico con maggiori quantità di difetti.

La troncatrice metallografica utilizza lame a carburo di silicio e con l'apporto di un liquido refrigerante ( acqua + olio emulsionato) riesce a tagliare in maniera precisa il nostro campione senza provocare una alterazione termica.

#### 2. INGLOBATURA

Effettuiamo l'inglobatura a freddo con resina liquida ( resina poliestere + 2/3% di catalizzatore).

Scopo è quello di attorniare sezione prelevata all'interno di un area più grande e inoltre garantire la planarità della superficie della sezione ( se non facessimo l'inglobatura vedrei i bordi smussati quindi non avrei perfetta planarità). Facilita inoltre la manipolazione.

Si procede versando quindi la resina poliestere in un bicchiere e successivamente aggiungiamo un 2/3% di catalizzatore. Successivamente posizioniamo il nostro campione su uno stampo rettangolare leggermente più grande di esso ed infine versiamo sopra il composto liquido. Si aspetta qualche ora finchè non si solidifica, si toglie quindi dallo stampo e si procede con la terza fase.

#### 3. LAPPATURA

Lo scopo di questa fase è quello di portare la superficie del materiale a specchio in modo da poter vedere al microscopio ottico la struttura e gli eventuali difetti.

Si procede dunque alla lucidatura con l'utilizzo di carta a carburo di silicio e acqua. Utilizziamo carta con granulometria sempre più fine iniziando dunque con una carta a granulometria 180 poi 600 poi 1200 ed infine 2400. Il secondo passaggio è la pulitura con pasta diamantata che serve a togliere le striature ed infine si utilizza l'ossido di silicio colloidale per portare a specchio il materiale.

A questo punto si passa al microscopio ottico dove possiamo analizzare il campione.

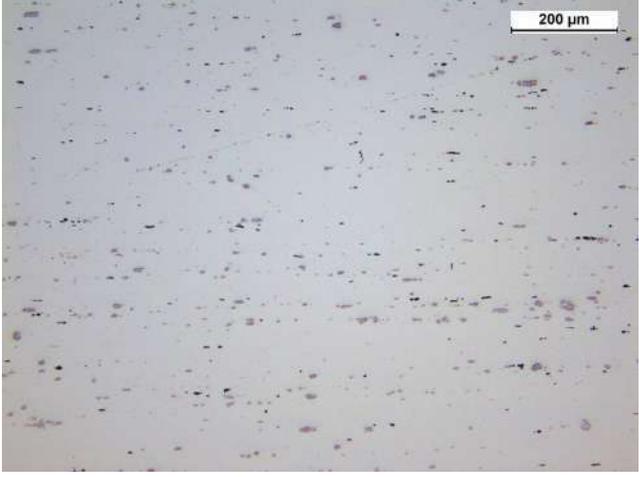
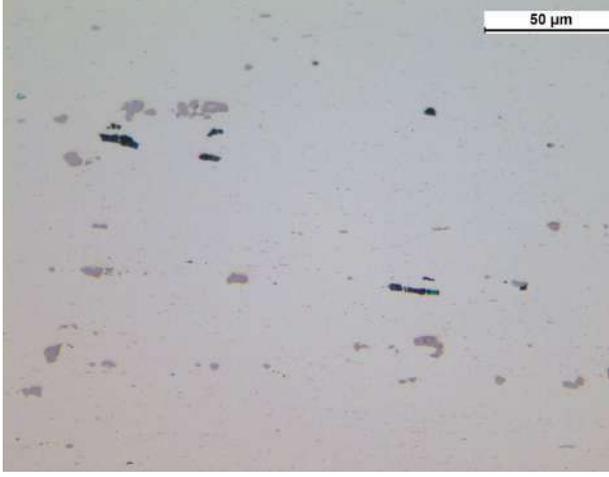
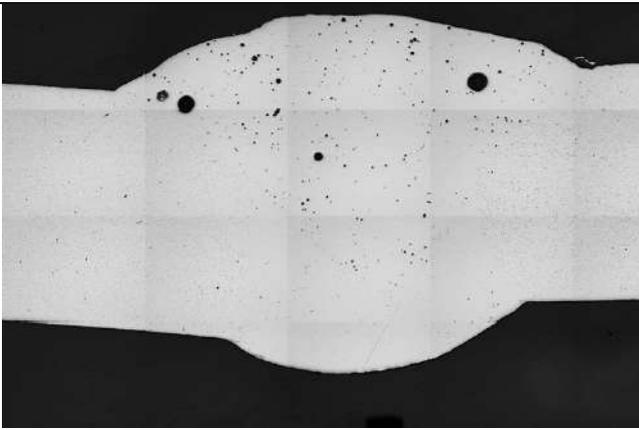
### MICROSCOPIO OTTICO

Il microscopio ottico è un tipo di microscopio che sfrutta la luce con lunghezza d'onda dal vicino infrarosso all'ultravioletto, coprendo tutto lo spettrovisibile.

Microscopio ottico lavora per riflessione, la luce emessa da una fonte luminosa (una lampada o il sole) viene riflessa sull'oggetto da osservare attraverso uno specchio, la luce attraversa l'oggetto posto sul vetrino e la sua immagine viene ingrandita dalle lenti e la lente obiettivo (la lente più vicina all'oggetto) restituisce un'immagine ingrandita, che può essere ulteriormente ingrandita da una o più lenti dette oculari (le lenti più vicine all'occhio).

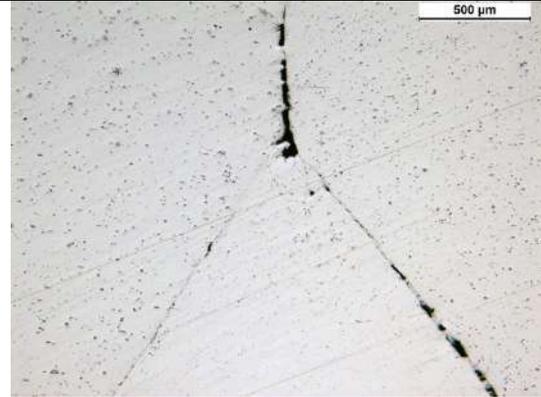
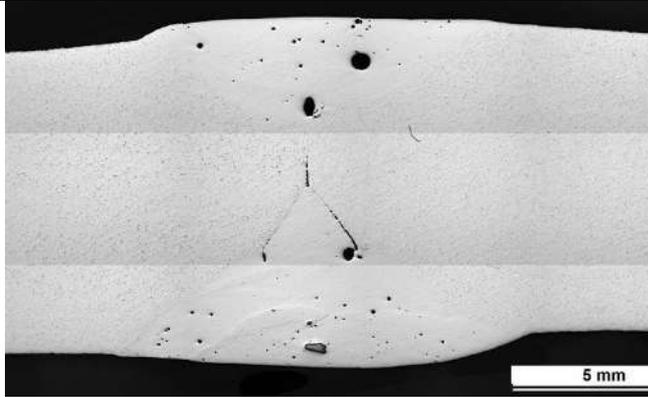
Tramite il Software Las Core riusciamo a vedere l'immagine trasmessa dal microscopio ottico nel computer e catturare le immagini riflesse.

### ANALISI IMMAGINI RICAVATE

	
<p>MB 50X</p>	<p>MB 250X</p>
<p><b>ANALISI CHIMICA MATERIALE BASE:</b></p> <p>I principali elementi presenti nell'alluminio 5083 includono:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alluminio (Al): Dal 90,7 al 94,7%, questo è l'elemento principale e costituisce la maggior parte della lega</li> <li>2. Magnesio (Mg): Dal 4,0 al 4,9% contribuisce alla resistenza e alla lavorabilità della lega</li> <li>3. Manganese (Mn): Dal 0,4 al '1%, anche lui contribuisce alla resistenza e alla lavorabilità</li> <li>4. Cromo (Cr): Dallo 0,05 al 0,25% fornisce resistenza alla corrosione</li> <li>5. Ferro (Fe): massimo 0,5% influenza le proprietà meccaniche</li> </ol> <p>Dalle immagini sovrastanti possiamo notare chiaramente gli intermetallici. Gli intermetallici più scuri sono ricchi di Magnesio mentre i più chiari/grigi sono ricchi in ferro.</p>	
	
<p>MIG A PANORAMICA</p>	<p>MIG A PARTICOLARE INTERMETALLICI</p>

Possiamo notare come nella parte superiore ci sia la presenza di porosità gassose ma per il resto la saldatura non presenta difetti importanti ed è confermata inoltre dal fatto che presenti buone caratteristiche meccaniche.

Nell'immagine di destra possiamo analizzare gli intermetallici e possiamo notare come i precipitati più scuri siano ricchi di Magnesio mentre quelli più grigi ricchi di ferro.

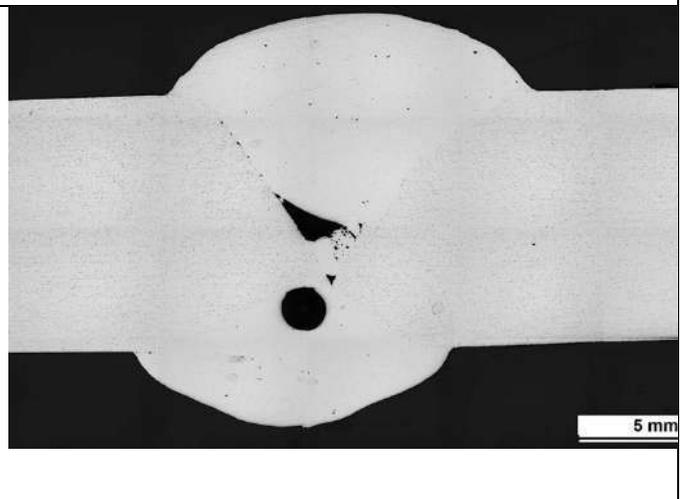
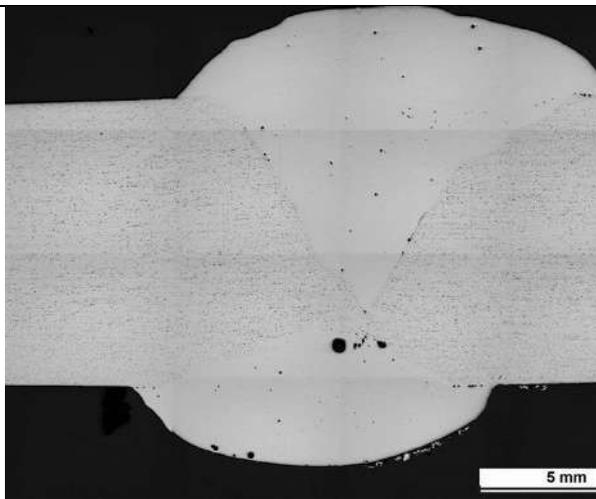


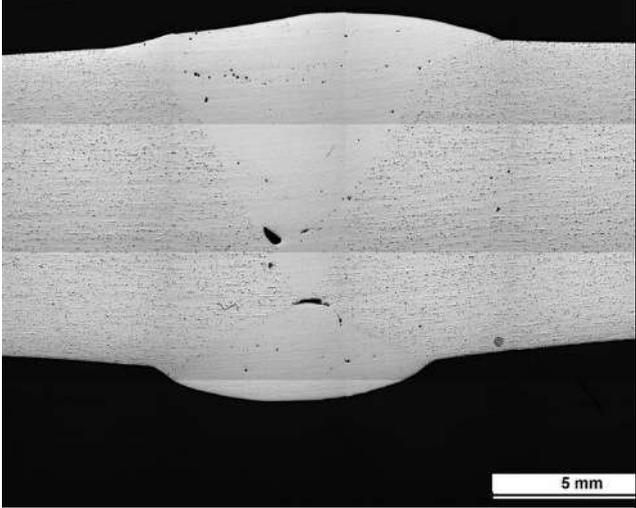
TIG A PANORAMICA

TIG A PARTICOLARE DI MANCATA GIUNZIONE IN MEZZERIA

Guardando le immagini sovrastanti possiamo notare quello che abbiamo confermato in precedenza ovvero che questa saldatura non sia stata eseguita in modo consono. Possiamo infatti notare due grosse porosità gassose nella parte superiore, nella parte inferiore possiamo notare come si veda chiaramente lo stop e la ripresa della saldatura. Nella parte centrale e ingrandito nell'immagine di destra possiamo vedere il difetto più importante ovvero la mancata giunzione del materiale ovvero mancata unione tra il metallo d'apporto e il metallo base.

È proprio a causa di questo difetto che questa saldatura presenti caratteristiche meccaniche molto scarse e non accettabili ed è dovuta probabilmente al fatto di un utilizzo dell'ampereggio troppo basso a un preriscaldamento del materiale non adeguato ed inoltre a un non adeguato trattamento di pulizia del cianfrino prima della saldatura.



MIG B sez. 1	MG B sez. 3
<p>In questo caso analizziamo le sezioni 1 e 3 in quanto durante la prova di trazione presentavano caratteristiche molto diverse.</p> <p>Possiamo notare immediatamente come la saldatura nella sezione 1 presenti una quantità di difetti molto minore.</p> <p>Nella sezione 3 infatti possiamo notare subito due grosse porosità gassose nel centro/zona inferiore del cordone mentre la sezione 1 presenta comunque delle porosità gassose ma molto più piccole.</p> <p>Possiamo comunque notare un difetto di giunzione fredda in entrambe le sezioni ed è per questo motivo che questa saldatura a Mig presenta caratteristiche meccaniche inferiori rispetto all'altra.</p>	
	
TIG B PANORAMICA	TIG B INFERIORE PIU ALTI INGRANDIMENTI
<p>Possiamo subito notare come rispetto al Tig A presenti molti meno difetti. Possiamo infatti osservare alcuni precipitati di colore scuro quindi ricchi di magnesio sparsi su quasi tutto il cordone e in particolare, nella parte superiore.</p> <p>Il difetto più grande è però la giunzione fredda presente nella parte inferiore ovvero una mancata fusione del materiale, la causa di questo difetto è dovuta probabilmente ad un utilizzo di corrente troppo bassa.</p> <p>È proprio per questo motivo che presenta caratteristiche meccaniche inferiori rispetto al Mig A dato che questo difetto comporta un indebolimento del giunto.</p>	

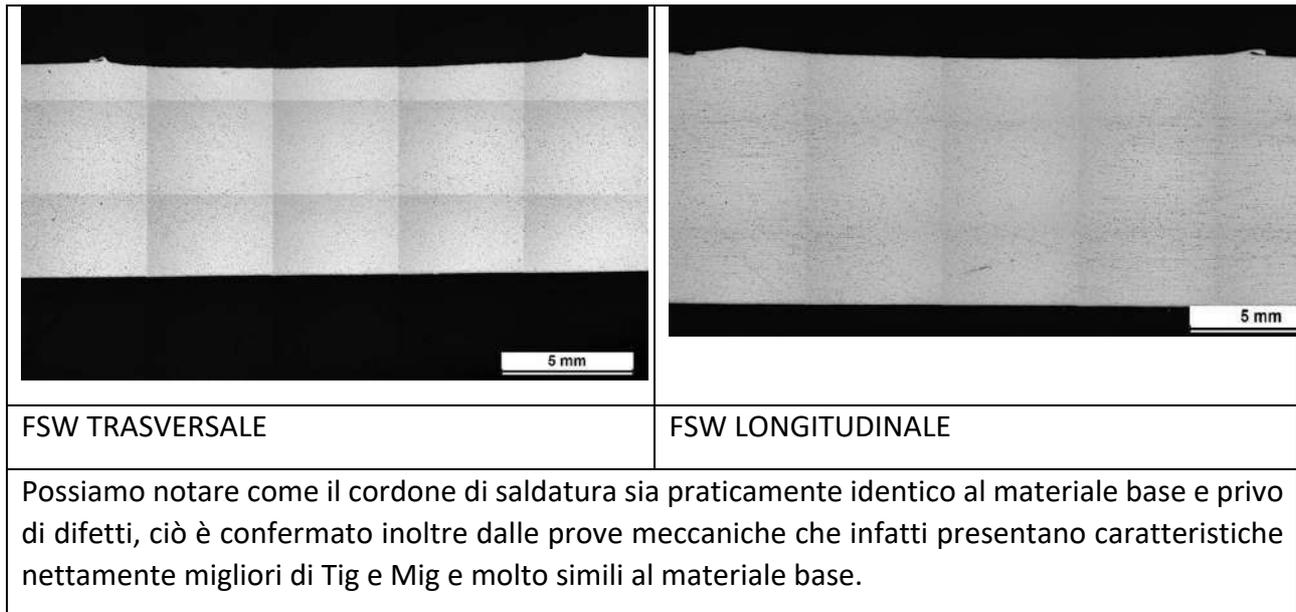


FIGURE 32A, 32B, 33A,33B,34A,34B,35A,35B,36A,36B,37A,37B INDAGINE METALLOGRAFICA

Possiamo dunque confermare ciò che abbiamo riscontrato dalla prova di trazione, infatti, le sezioni che presentano difetti maggiori e più importanti sono quelle che hanno avuto un comportamento meccanico peggiore nella prova di trazione.

## 2.4 ATTACCO CHIMICO (ETCHING)

L'ultima fase della sezione metallografica è l'attacco chimico che permette di evidenziare la struttura cristallina per effetto della corrosione selettiva operata dai reattivi sulle zone superficiali dotate di maggiore energia. Si può inoltre analizzare come si dilaga la ZTA ( zona termicamente alterata) ovvero il punto più fragile in cui il materiale si rompe.

L'estensione della zona termicamente alterata è funzione del ciclo termico al quale il materiale è stato sottoposto, e quindi da parametri come:

- Il calore sviluppato da quella determinata tecnica di saldatura
- La velocità di deposizione
- Geometria, spessore e composizione della lega.

La composizione chimica che utilizziamo per l'attacco chimico consiste in:

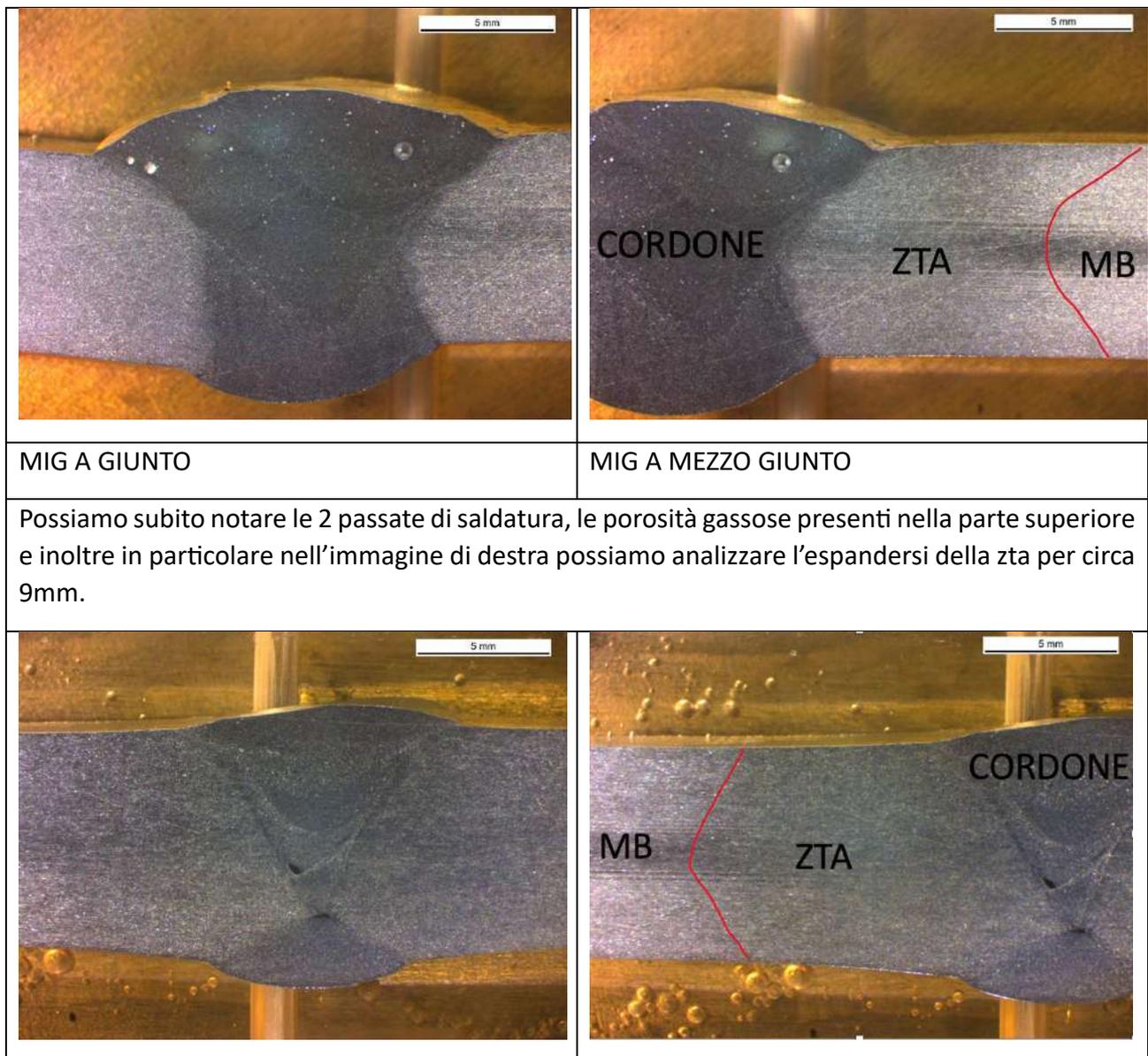
- 60 ml di HCl ( acido cloridrico)
- 30ml di HNO<sub>3</sub> ( acido nitrico)
- 5 ml di HF ( acido fluoridrico)
- 5 ml di H<sub>2</sub>O ( acqua)

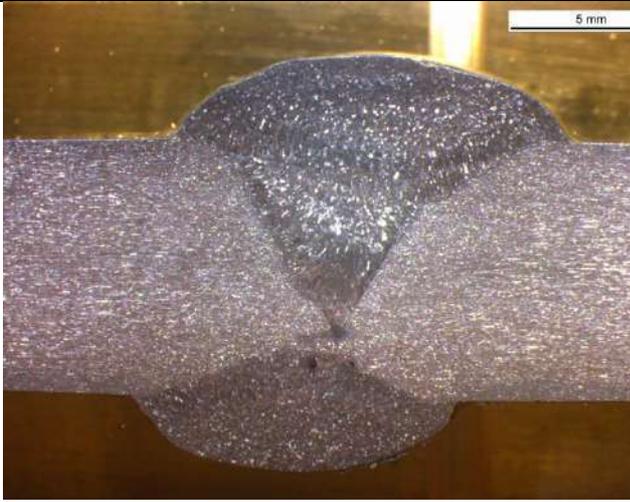
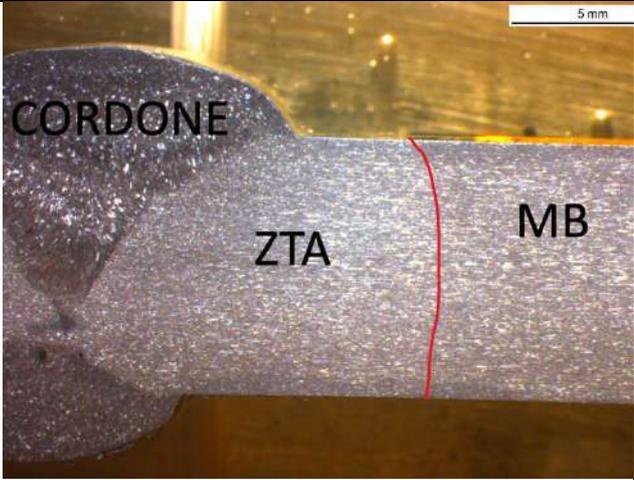
Utilizziamo come strumento lo stereoscopio ovvero uno strumento ottico che consente di osservare oggetti a bassi ingrandimenti e di poterne valutare anche la profondità.

L'osservazione avviene in luce riflessa la quale produce un'immagine tridimensionale come la visione diretta, eliminando l'effetto di appiattimento tipico degli altri tipi di microscopi. È dotato di un sistema di prismi ottici per il raddrizzamento dell'immagine, e quindi l'eventuale manipolazione corretta del campione, senza le consuete inversioni destra-sinistra tipiche dei microscopi composti.

Lo stereoscopio possiede le caratteristiche che lo rendono adatto a questo tipo di situazioni ovvero dove sono richieste accurate valutazioni ed osservazioni dimensionali dei campioni in modo tale da poter interpretare correttamente la struttura dell'oggetto in esame.

**RISULTATI OTTENUTI:**



TIG A	TIG A MEZZO GIUNTO
<p>Zta si dilaga molto in questa saldatura ed inoltre notiamo nella parte inferiore il punto di mancata giunzione.</p>	
	
MIG B	MIG B MEZZO GIUNTO
<p>Possiamo notare subito chiaramente la giunzione fredda nella parte inferiore del cordone, difetto che determina il peggioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale. Possiamo notare inoltre la zta che si espande per circa 8mm</p>	
	<p>TIG B</p> <p>Possiamo notare immediatamente la giunzione fredda nella parte inferiore zona in cui materiale perde le sue caratteristiche meccaniche.</p>

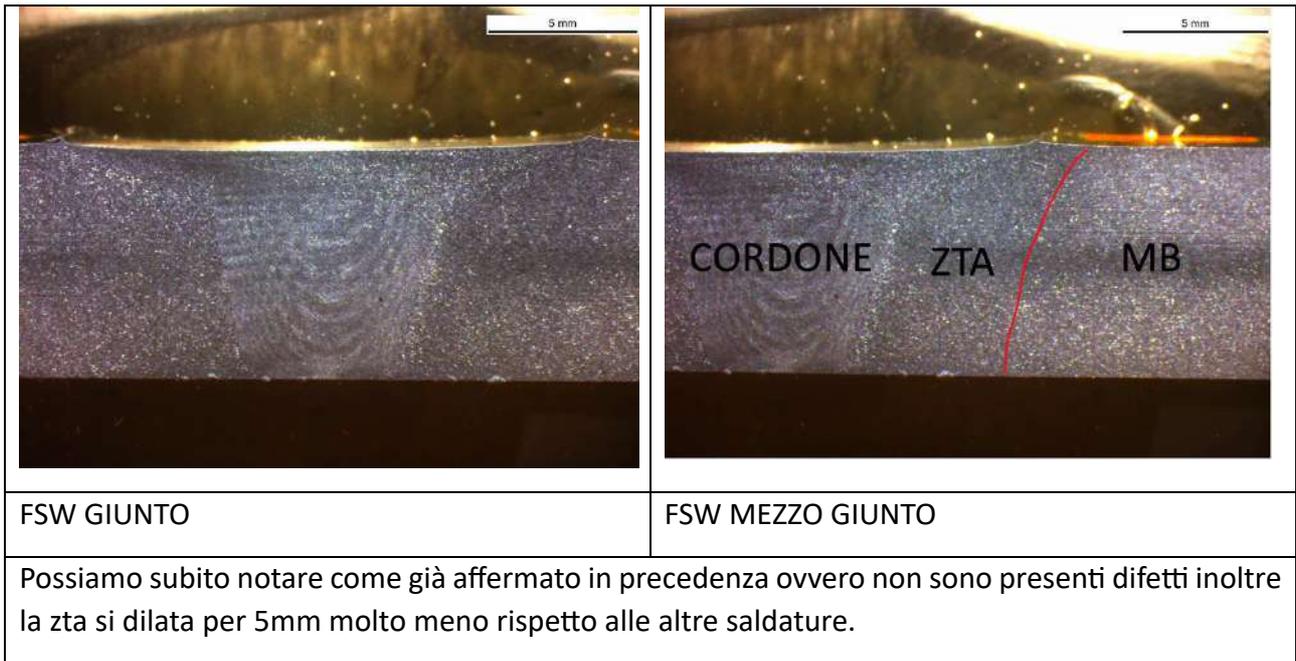


FIGURE 38A, 38B, 39A,39B,40A,40B,41,42A,42B ATTACCO CHIMICO

## 2.5 DUREZZA

Procediamo ora con le prove di durezza in modo da poter confrontare la resistenza alla penetrazione dei vari tipi di saldatura. In particolare, ci focalizzeremo sulla durezza Vickers.

La durezza Vickers utilizza come penetratore una piramide a base quadrata in diamante, con un angolo al vertice della piramide di 136°.

L'impronta che viene lasciata sul materiale è quadrata e la superficie è piramidale. Abbiamo applicato un carico di 0,2 kg.

Formula dell'indice di Vickers:

$$VHN = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad \text{dove:} \quad F = \text{carico applicato (0,2Kg nel nostro caso)}$$

$$d^2 = \text{Area impronta}$$

## CARATTERISTICHE PROVA DUREZZA VICKERS

Per questo tipo di prova abbiamo seguito la normativa ISO 6507.

Il vantaggio di questa prova rispetto le altre è che il penetratore andrà bene per qualsiasi materiale essendo il diamante il materiale più duro.

La qualità della superficie del provino deve essere però molto buona in quanto l'indentazione viene misurata otticamente. Ciò significa che il punto di prova deve essere preparato (levigato e lucidato), altrimenti la valutazione precisa è difficile. Fortunatamente nel nostro caso i campioni erano già stati lucidati per poter eseguire la sezione metallografica.

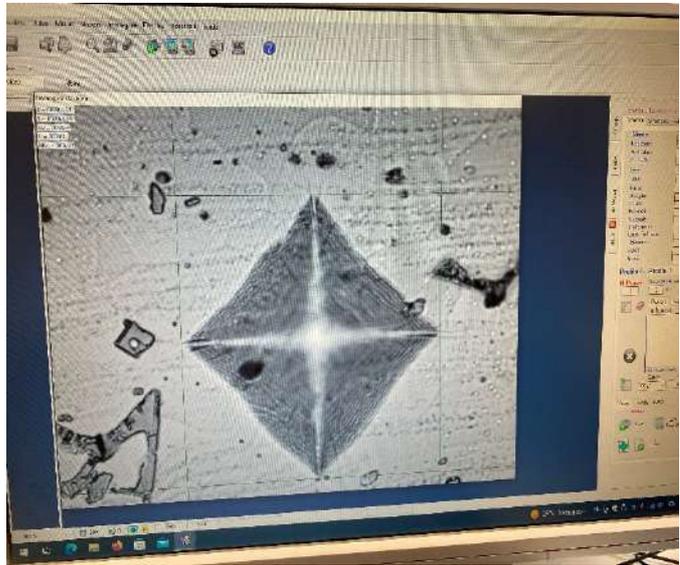
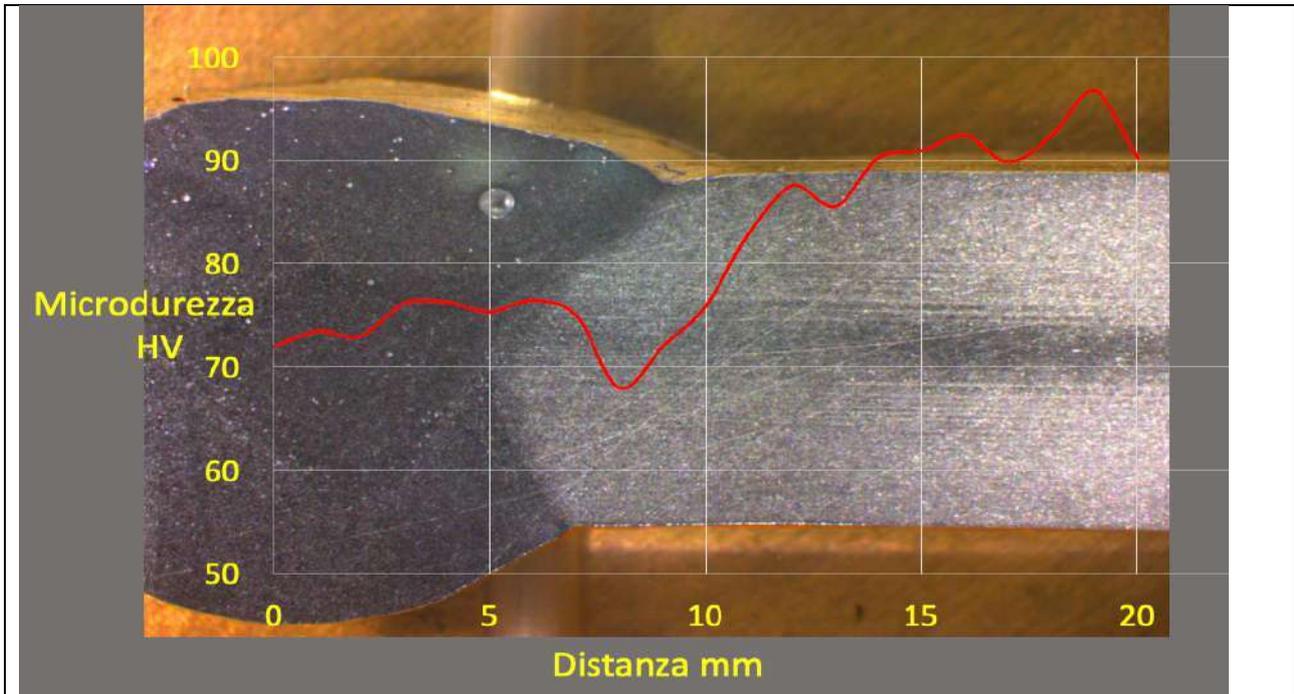


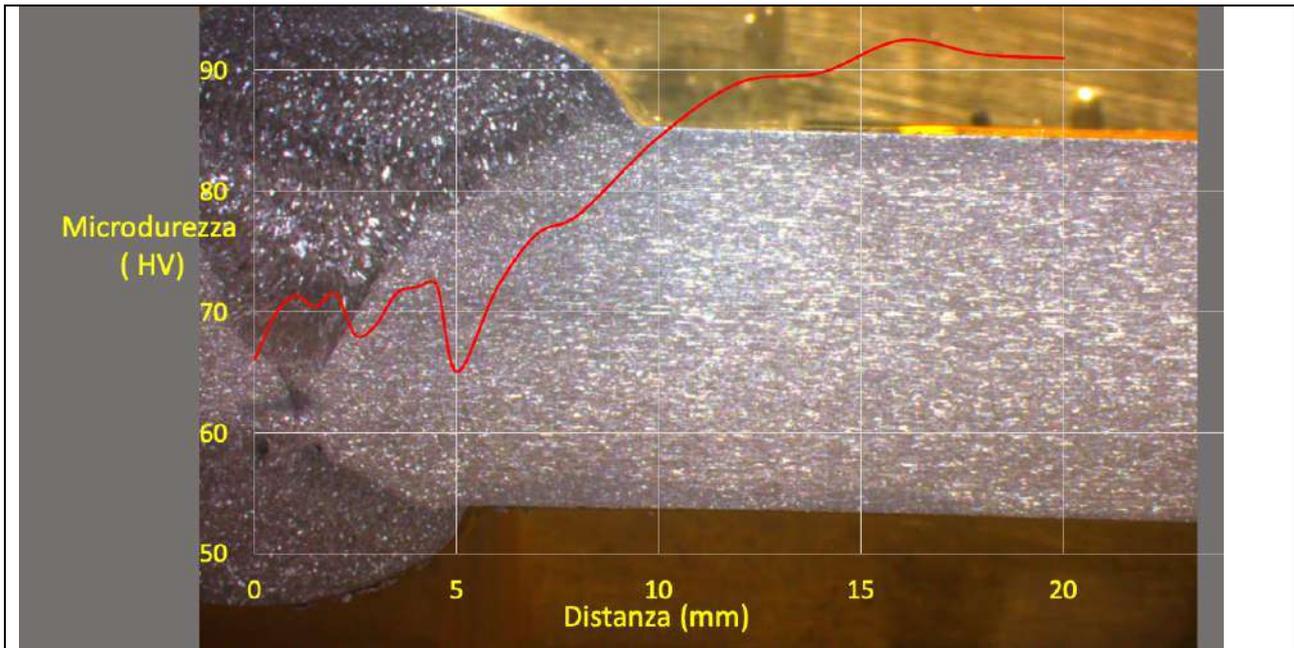
FIGURE 43A, 43B MICRODUROMETRO ED ESEMPIO IMPRONTA

## RISULTATI OTTENUTI:

**MIG A**

Abbiamo posizionato la provetta nel micro-durometro e applicato nella parte superiore di essa un carico di 0,2 kg partendo dal centro del cordone per poi spostarsi di 1mm fino ad arrivare a 20 misurazioni (20 mm) in modo da poter analizzare la durezza sia nel cordone che nello ZTA e infine nel metallo base.

Possiamo notare come nel cordone il valore di durezza va da 72 a 77 HV per poi diminuire bruscamente nello ZTA fino a 68HV e per poi aumentare progressivamente andando verso il materiale base fino a 97HV.

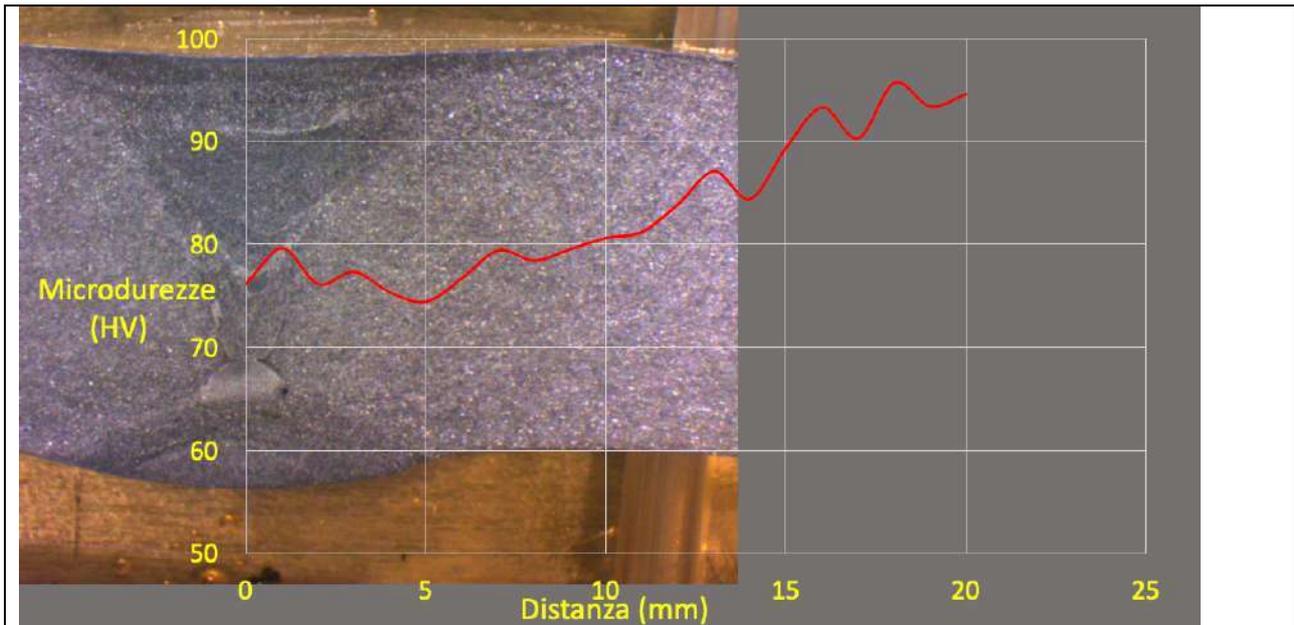


## MIG B

Come per il MIG A abbiamo posizionato la provetta nel micro-durometro e applicato nella parte superiore di essa un carico di 0,2 kg partendo dal centro del cordone per poi spostarsi di 1mm fino ad arrivare a 20 misurazioni (20 mm) in modo da poter analizzare la durezza sia nel cordone che nello ZTA e infine nel metallo base.

Notiamo un andamento simile al Mig A, infatti, nel cordone la durezza va da 66 a 73 HV per poi diminuire bruscamente nello ZTA fino a 65HV per poi aumentare progressivamente fino a 93HV nel metallo base.

Paragonando i due Mig possiamo vedere come anche per la durezza il Mig A presenti un comportamento migliore in quanto presenta valori più alti in tutte e tre le zone ed inoltre valori più uniformi ciò determinato dal fatto che presenta un numero minore di difetti.



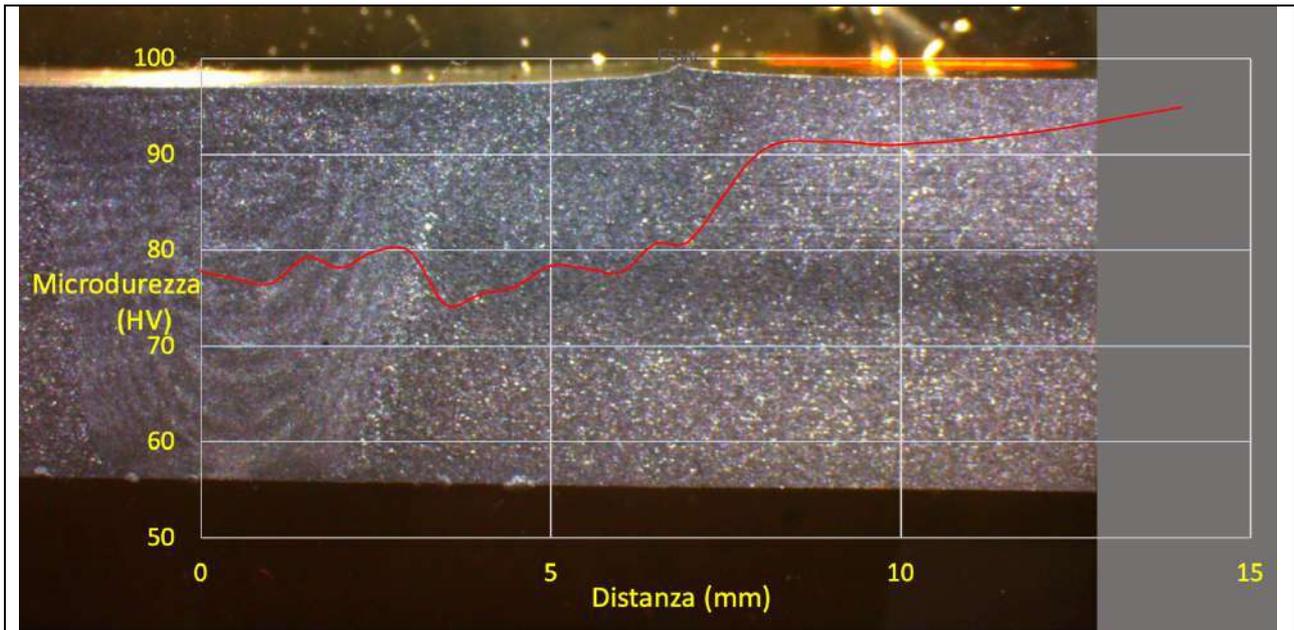
### TIG B

Come per il MIG abbiamo posizionato la provetta nel micro-durometro e applicato nella parte superiore di essa un carico di 0,2 kg partendo dal centro del cordone per poi spostarsi di 1mm fino ad arrivare a 20 misurazioni (20 mm) in modo da poter analizzare la durezza sia nel cordone che nello ZTA e infine nel metallo base.

Notiamo come presenti le solite caratteristiche ovvero da 75/80 HV nel cordone poi scende nello ZTA ed infine risale progressivamente fino a toccare valori di 95HV nello ZTA.

Paragonandolo con il Mig A possiamo confermare che anche in questo caso il Mig presenti caratteristiche migliori in quanto i valori sono leggermente più alti ma soprattutto più uniformi.

Abbiamo deciso di non considerare il Tig A in questa prova in quanto presenta un numero troppo elevato di difetti e caratteristiche meccaniche pessime.



### FSW:

Come per Mig e Tig abbiamo posizionato il penetratore al centro del cordone e misurato 20 misurazioni spostandosi di 0,5 mm nel cordone e successivamente di 1/2mm per ognuna di esse in modo da poter calcolare la durezza nel cordone di saldatura, nella ZTA ed infine nel materiale di base. Possiamo notare come la durezza ha valori di 77/80 HV all'interno del cordone per poi diminuire bruscamente appena incontriamo lo ZTA fino ad un valore di 74HV per poi aumentare progressivamente fino a valori di 90/95 nel materiale base.

FIGURE 44,45,46,47 RISULTATI PROVE DUREZZA

### CONFRONTO

Dai grafici sovrastanti possiamo notare come il grafico di FSW sia molto più regolare e presenti valori in media più alti in tutte e tre le zone, ciò determinato dal fatto che il cordone di saldatura e metallo base sono molto simili tra loro ed inoltre anche la ZTA non è così evidente come invece lo è per Mig e Tig e quindi anche per questa prova la FSW si rivela la migliore.

Come già descritto in precedenza invece per quanto riguarda Mig e Tig il Mig ha un comportamento migliore.

## 2.6 CORROSIONE

Per quanto riguarda la corrosione abbiamo seguito le procedure descritte nella norma ASTM B928 (High Magnesium Aluminum-Alloy Products for Marine Service and Similar Environments) e ci siamo focalizzati sulla valutazione a Pitting ed Esfoliazione.

Si tratta dei metodi di prova per il materiale base a prescindere dalla protezione con vernice.

Effettueremo la valutazione con il metodo G66 con due campioni prelevati come mostrato nelle immagini sottostanti (uno a cavallo del giunto e uno tutto spostato) in modo da avere una prima idea di come eventualmente la ZTA influenzi il comportamento alla corrosione.

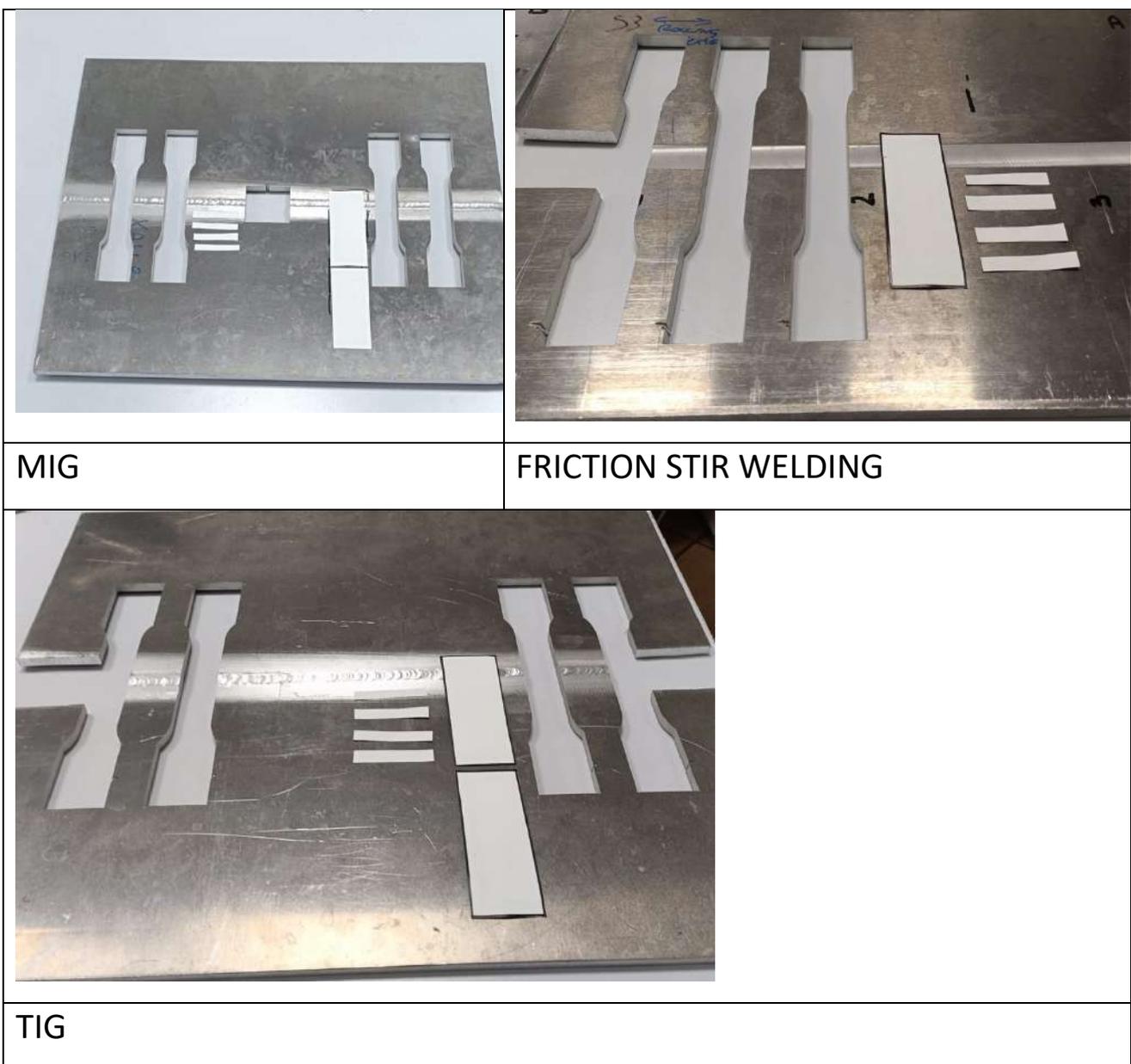


FIGURE 48,49,49 POSIZIONE DI PRELIEVO

## PROVA

Come prima cosa prepariamo la soluzione che deve avere la seguente composizione:

- $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Cloruro di ammonio)
- $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (Nitrato di ammonio)
- $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$  (tatrato di ammonio)
- $\text{H}_2\text{O}_2$  (perossido di idrogeno)

Sciogliamo quindi 53,5 g di cloruro di ammonio, 20 g di nitrato di ammonio, 1,8 g di tatrato di ammonio e 10 ml di soluzione madre al 30% di perossido di idrogeno, in una piccola quantità d'acqua. Una volta che i componenti si sono dissolti regoliamo la soluzione finale fino ad arrivare a 1L.

Questa soluzione avrà un PH compreso tra 5,2 e 5,4 e la temperatura della soluzione deve essere mantenuta a  $65 \pm 1$  °C.

Una volta preparata la soluzione ci concentriamo sui campioni.

Sebbene in questa prova possiamo utilizzare campioni di qualsiasi dimensione è preferibile utilizzare campioni da 40 x 100mm.

Una volta ricavate le dimensioni i provini devono essere fresati almeno al 10% in modo da ridurre al minimo l'introduzione di tensioni residue sui bordi durante la preparazione dei provini.

Una volta ricavate le dimensioni i campioni non possono essere subito immersi ma dobbiamo prima sgrassarli con un solvente adatto. Successivamente immergiamo i campioni per 1 minuto in una soluzione di idrossido di sodio ad una temperatura di 80°C, risciacquiamo successivamente in acqua e infine immergiamo per 30 secondi in acido nitrico a temperatura ambiente. Risciacquiamo in acqua distillata e asciughiamo con aria secca.

A questo punto immergiamo il nostro campione verticalmente nella soluzione preparata in precedenza per 24 h insieme però ad un campione denominato 'testimone'. Si tratta infatti di un campione di Al-Mg lavorato in modo da essere suscettibile alla corrosione ed infatti dopo le 24 h deve essere completamente corrosivo.

Esso è molto importante perché se ad esempio dopo le 24h ci accorgiamo che non si è corrosivo vuol dire che abbiamo sbagliato la nostra soluzione e dobbiamo ripetere la prova, se non ci fosse non avremmo la certezza al 100% che la prova sia stata eseguita in maniera corretta.

Al termine delle 24 ore estraiamo i campioni e li sciacquiamo delicatamente in acqua corrente, li immergiamo nuovamente in acido nitrico per pulirli ed infine li risciacquiamo in acqua nuovamente.

## VALUTAZIONE RISULTATI OTTENUTI

Utilizziamo i seguenti codici di classificazione:

- N (nessun attacco apprezzabile)
- P (Pitting)
- E (Esfoliazione)

### Pitting

L'attacco provocherebbe la formazione di bolle ed un leggero scompensamento della superficie. Si possono notare buchi e vesciche con vari gradi di gravità.

Ad esempio:



FIGURA 50 ESEMPIO PITTING

### Esfoliazione

Sollevamento visibile della superficie del campione che da origine ad un aspetto stratificato.

Ad esempio:



FIGURA 51 ESEMPIO ESFOIAZIONE

RISULTATI OTTENUTI:



TIG

Possiamo notare come il nostro materiale non è soggetto a corrosione in nessuna zona infatti presenta classificazione 'N' sia nel cordone, sia nella ZTA ed inoltre nel materiale base.



MIG

Possiamo notare anche in questo caso come il nostro materiale non è soggetto a corrosione in nessuna zona infatti presenta classificazione 'N' sia nel cordone, sia nella ZTA ed inoltre nel materiale base.



**FSW**

Possiamo notare anche per la Friction stir welding come il nostro materiale non è soggetto a corrosione in nessuna zona infatti presenta classificazione 'N' sia nel cordone, sia nella ZTA ed inoltre nel materiale base.



Da quest'immagine possiamo osservare i nostri campioni di saldatura confrontati con il campione denominato 'testimone' che presenta un alto grado di corrosione.

Il testimone, infatti, è un campione di Al-Mg che ha subito processi di trattamento termico e reso molto affine alla corrosione.

Si utilizza sia come confronto visivo sia per essere sicuri che la prova sia efficace e corretta.

FIGURE 52,53,54,55 PROVA DI CORROSIONE

Confrontando dunque i nostri campioni con il campione corrosivo possiamo confermare che questo tipo di materiale allo stato incrudito (5083 H321) è perfetto per utilizzi in ambienti marini perché molto resistente alla corrosione ed è per questo motivo, infatti, che si tratta dell'alluminio più utilizzato nella costruzione di imbarcazioni.

# **CAPITOLO 5**

## **CONCLUSIONI**

L'obiettivo della tesi era quello di valutare partendo dallo stesso materiale qual è il miglior tipo di saldatura tra Mig, Tig e friction stir welding tenendo in considerazione non solo le proprietà meccaniche ma anche la velocità di esecuzione e il costo.

Analizzando le prove meccaniche (prova di trazione e durezza) senza dubbio la FSW ha avuto un comportamento migliore e paragonabile al materiale base. Ciò significa che qualora servisse un tipo di saldatura resistente al 100% privo di difetti senza dubbio la scelta deve ricadere sulla FSW ed infatti i suoi utilizzi maggiori sono in campo aeronautico e spaziale dove anche un minimo difetto potrebbe causare danni catastrofici.

D'altro canto, però la Friction stir welding è un tipo di saldatura molto costosa ed inoltre molto difficile da eseguire quindi nel 99% delle applicazioni la scongiurerei e mi focalizzerei su Mig e Tig.

Paragonando dunque Mig e Tig, due tipi di saldatura utilizzati in quasi tutte le applicazioni, il Mig ha presentato caratteristiche meccaniche migliori sia nella prova di trazione che nella prova di durezza. La saldatura a Mig è stata inoltre molto più semplice e veloce da eseguire e presenta anche costi inferiori, il Tig, infatti, ha richiesto un amperaggio e un numero di passate maggiore.

In conclusione, possiamo dunque affermare che sicuramente la miglior saldatura è la Friction stir welding ma, per la maggior parte delle applicazioni la saldatura da preferire è il Mig.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) F. Bonollo, P.Ferro, G. Timelli Dispense di Materiali Metallici
- 2) F.Capelli, V. Boneschi. I fenomeni corrosivi più comuni nei giunti saldati
- 3) G.Ubertalli. L'alluminio e le sue leghe
- 4) Matteo Meggiolaro. La saldatura: procedimenti e qualifiche di laboratorio
- 5) J.L.Song, S.B. Lin, C.L. Yang, C.L. Fan, G.C. Ma. Analysis of intermetallic layer in dissimilar TIG welding-brazing butt joint of aluminium alloy to stainless steel. 213-218.
- 6) U.Kruger, S. Lehr: 'Weldability', TALAT, European Aluminium Association (1994)
- 7) U.Kruger, S. Lehr: 'Weld imperfections', TALAT, European Aluminium Assocation (1994)
- 8) U.Kruger, S. Lehr: 'Arc Welding Process: TIG, Plasma Arc, MIG', TALAT, European Aluminium Association (1994)
- 9) UNI EN ISO 9692: Saldatura e procedimenti connessi – Tipologie di preparazione dei giunti- Parte 1 (2014)
- 10) UNI EN ISO 17636: Prove non distruttive delle saldature- Controllo radiografico- Parte 1: Tecniche a raggi-X e gamma con rivelatore digitale (2022)
- 11) UNI EN ISO 10675: Controlli non distruttivi delle saldature-Livelli di accettazione per il controllo radiografico- Parte 2: Alluminio e sue leghe
- 12) BS EN ISO 4136: Destructive test on welds in metallic materials- Transverse tensile test (2012)
- 13) UNI EN ISO 6892 – 1: Materiali metallici-Prova di trazione -Parte 1: Metodo di prova a temperatura ambiente (2020)
- 14) UNI EN ISO 6507: Materiali metallici- Prova di durezza Vickers- Parte 1: Metodo di prova (2018)
- 15) ASTM B928 (High Magnesium Aluminum-Alloy Products for Marine Service and Similar Environments)
- 16) Standard Test Method for Visual Assessment of Exfoliation Corrosion Susceptibility of 5XXX Series Aluminum Alloys (ASSET TEST) (2018)

## RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo progetto e della mia carriera universitaria ringrazio coloro che mi hanno sostenuto nel corso di questo lungo percorso di formazione.

Dico grazie alla mia famiglia che mi ha sostenuto nella realizzazione di tutto ciò con l'aiuto sia morale che economico, soprattutto mia madre che dal primo giorno mi ha spinto ad incamminarmi su questa lunga scalata.

Ringrazio chi giorno per giorno mi ha dato consigli utili al raggiungimento dei miei obiettivi, chi mi ha risollevato nei periodi difficili come quelli delle sessioni universitarie.

Riguardo questo progetto un caloroso grazie va all'Ing. Marco Iovane dell'azienda Fusina products Srl che ha reso possibile tutto questo, al tecnico di laboratorio Giacomo Mazzacavallo che mi ha supportato durante tutte le prove dandomi lezioni sull'utilizzo degli strumenti di laboratorio ed infine al professor Franco Bonollo per avermi dato fiducia.