



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'INNIVAZIONE DEL PRODOTTO**

Tesi di Laurea

**Studio della possibilità di riparazione di getti in ghisa sferoidale ad alto silicio
mediante saldatura ossiacetilenica**

Relatore: Prof. Bonollo Franco

Correlatore: Ing. Borsato Thomas

Laureando: Frigo Luca

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

INDICE

Introduzione	9
1. Le Ghise	11
1.1 Ghisa Bianca.....	11
1.2 Ghisa Grigia	11
1.3 Ghisa Sferoidale	12
1.4 Ghisa a grafite compatta.....	13
1.5 Ghisa Malleabile.....	13
1.6 Ghisa Sferoidale Austemperata	14
2. Ghisa Sferoidale ad alto Silicio	17
2.1 Composizione.....	17
2.2 Effetto del silicio	18
2.3 Processo.....	19
2.3.1 Fusione.....	19
2.3.2 Solidificazione	20
2.4 Applicazioni industriali	21
2.5 Limiti e problematiche	22
2.6 Mercato globale.....	23
3 Saldabilità	25
3.1 Introduzione.....	25
3.2 Aspetti critici	25
3.2.1 Raffreddamento	25
3.2.2 Preriscaldamento	26
3.2.3 Scelta del materiale d'apporto	26
3.3 Difetti di saldatura	27

3.4 Le zone della saldatura	29
3.4.1 Zona fusa	29
3.4.2 Zona parzialmente fusa	30
3.4.3 Zona termicamente alterata	30
3.5 Trattamento termico post-saldatura	31
3.6 Tecniche di saldatura	31
3.6.1 Introduzione	31
3.6.2 Saldatura ossiacetilenica	32
3.6.3 Saldatura ad arco	35
4 Indagine Sperimentale	39
4.1 Introduzione	39
4.2 Preparazione provini	39
4.3 Indagini micrografiche.....	41
4.3.1 Preparazione provini metallografici	41
4.3.2 Indagine microstrutturale: noduli di grafite	43
4.3.3 Indagine microstrutturale: matrice	44
4.3.4 Campione A ed E	45
4.3.5 Campioni B e D.....	49
4.3.6 Campione C.....	54
4.4 Prova di trazione	58
4.4.1 Preparazione provini	58
4.4.2 Risultati prova di trazione	59
4.4.3 Discussione risultati prova di trazione	66
4.4.4 Analisi superfici frattura.....	67
4.4.5 Prova di durezza.....	75
5 Conclusioni.....	79
Bibliografia.....	83

Elenco delle figure

FIGURA 1 MICROGRAFIA GHISA BIANCA [2]	11
FIGURA 2 MICROGRAFIA GHISA GRIGIA [2]	12
FIGURA 3 MICROGRAFIA GHISA SFEROIDALE [2].....	12
FIGURA 4 MICROGRAFIA GHISA A GRAFITE COMPATTA [3]	13
FIGURA 5 MICROGRAFIA GHISA MALLEABILE [2].....	14
FIGURA 6 GHISA SFEROIDALE AUSTEMPERATA [2].....	14
FIGURA 7 EFFETTO DEL SILICIO SULLE TEMPERATURE DI EUTETTICO STABILE E METASTABILE [12].....	21
FIGURA 8 MERCATI DESTINAZIONE GETTI IN GHISA.....	24
FIGURA 9 ZONE SALDATURA [18].....	29
FIGURA 10 PROVINO CON INTAGLIO A V	40
FIGURA 11 PROVINO FINALE A SEGUITO DI TRATTAMENTO TERMICO E POST SALDATURA	41
FIGURA 12 SEZIONE PROVINO DEL PROFILO SALDATURA E RELATIVI STACCHI CAMPIONI	42
FIGURA 13 CAMPIONE A INGLOBATO E LUCIDATO	42
FIGURA 14 MICROGRAFIE UNITE 50X CAMPIONE A-MATERIALE BASE	45
FIGURA 15 MICROGRAFIA CAMPIONE E- MATERIALE BASE.....	45
FIGURA 16 CAMPIONE A.....	45
FIGURA 17 CAMPIONE E	45
FIGURA 18 CLASSE DIMENSIONALE NODULI CAMPIONI A ED E	46
FIGURA 19 CLASSE DI FORMA NODULI CAMPIONI A ED E.....	46
FIGURA 20 GRANI EVIDENZIATI PER CLASSE CAMPIONE E.....	48
FIGURA 21 DISTRIBUZIONE DIMENSIONE GRANO	48
FIGURA 22 MICROGRAFIA CAMPIONE B-ZONA FUSA (BLU), PARZIALMENTE FUSA (GIALLA) E TERMICAMENTE ALTERATA (ROSSA)	49
FIGURA 23 MICROGRAFIA CAMPIONE D- ZONA TERMICAMENTE ALTERATA (ROSSA), PARZIALMENTE FUSA (GIALLA) E FUSA (BLU).....	49
FIGURA 24 MICROGRAFIA CAMPIONE B-ZONA DI TRANSIZIONE.....	49
FIGURA 25 CAMPIONE B.....	50
FIGURA 26 CLASSE DI FORMA NODULI CAMPIONI B E D HAZ	51
FIGURA 27 CLASSE DIMENSIONALE NODULI CAMPIONI B E D HAZ	51
FIGURA 28 GRANI EVIDENZIATI PER CLASSE CAMPIONE B	52
FIGURA 29 DISTRIBUZIONE DIMENSIONE GRANO HAZ.....	53
FIGURA 30 IMMAGINE 1 CARBURI ZONA DI TRANSIZIONE.....	53

FIGURA 31 IMMAGINE 2 CARBURI ZONA DI TRANSIZIONE.....	53
FIGURA 32 MICROGRAFIA CAMPIONE C-ZONA FUSA.....	54
FIGURA 33 MICROGRAFIA ANALISI NODULI.....	54
FIGURA 34 CLASSE DI FORMA NODULI CAMPIONE C	55
FIGURA 35 CLASSE DIMENSIONALE NODULI CAMPIONE C	55
FIGURA 36 GRANI EVIDENZIATI PER CLASSE CAMPIONE C.....	56
FIGURA 37 DISTRIBUZIONE DIMENSIONALE GRANO CAMPIONE C.....	57
FIGURA 38 SEZIONE 1 PROVINO.....	58
FIGURA 39 SEZIONE 2 PROVINO CON CORDONE (DELIMITATO DA LINEE NERE)	58
FIGURA 40 PROVINO DI TRAZIONE.....	58
FIGURA 41 CURVE INGEGNERISTICA E REALE DEL MATERIALE BASE.	59
FIGURA 42 CURVA INGEGNERISTICA DI TRAZIONE PROVA 1.....	60
FIGURA 43 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 1	60
FIGURA 44 CURVA INGEGNERISTICA DI TRAZIONE PROVA 2.....	61
FIGURA 45 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 2	61
FIGURA 46 CURVA INGEGNERISTICA DI TRAZIONE PROVA 3.....	62
FIGURA 47 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 3	62
FIGURA 48 CURVA INGEGNERISTICA PROVA DI TRAZIONE 4.....	63
FIGURA 49 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 4	63
FIGURA 50 CURVA INGEGNERISTICA PROVA DI TRAZIONE 5.....	64
FIGURA 51 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 5	64
FIGURA 52 CURVA INGEGNERISTICA PROVA DI TRAZIONE 6.....	65
FIGURA 53 IMMAGINE MICROSCOPIO ZONA FRATTURA CON SOFFIATURE PROVA 6	65
FIGURA 54 SUPERFICIE DI FRATTURA PROVINO PROVA 5.....	68
FIGURA 55 MICROGRAFIA SEM CON ELETTRONI RETRO DIFFUSI PROVA 5.....	68
FIGURA 56 ZONE FRATTURA DUTTILE FRAGILE PROVA 5	69
FIGURA 57 ZONA FRATTURA DUTTILE FRAGILE PROVINO 5.....	70
FIGURA 58 SUPERFICIE DI FRATTURA PROVINO PROVA 6.....	71
FIGURA 59 MICROGRAFIA SEM CON ELETTRONI RETRO DIFFUSI PROVA 6.....	71
FIGURA 60 ZONA FRATTURA E RADICE DEL CORDONE DI SALDATURA PROVA 6	72
FIGURA 61 ZONA DI TRANSIZIONE TRA MATERIALE BASE E CORDONE PROVA 6.....	73
FIGURA 62 IMMAGINE CON PROFILI DI DUREZZA.....	75
FIGURA 63 GRAFICO PROFILI DUREZZE MICRO VICKERS.....	75
FIGURA 64 PROFILI DUREZZA VICKERS.....	77

Elenco delle Tabelle

TABELLA 1 TABELLA RIASSUNTIVA DIFETTI DI SALDATURA (ELABORAZIONE DA [17]).....	27
TABELLA 2 SCHEDA TECNICA 1, VALORI MINIMI [24].....	39
TABELLA 3 SCEDA TECNICA 2, VALORI MINIMI [24]	39
TABELLA 4 RANGE DI COMPOSIZIONE CHIMICA DELLA GHISA BASE FORNITI DA VDP	39
TABELLA 5 DATI MICROGRAFIA NODULI CAMPIONE A ED E	46
TABELLA 6 TABELLA RIASSUNTIVA MICROGRAFIA GRANO CAMPIONI A ED E.....	47
TABELLA 7 DATI MICROGRAFIA NODULI CAMPIONE B E D ZONA TERMICAMENTE ALTERATA.....	50
TABELLA 8 TABELLA RIASSUNTIVA MICROGRAFIA GRANO CAMPIONI B E D ZONA TERMICAMENTE ALTERATA.....	52
TABELLA 9 DATI MICROGRAFIA CAMPIONE C.....	54
TABELLA 10 TABELLA RIASSUNTIVA MICROGRAFIA GRANO CAMPIONE C.....	56
TABELLA 21 DUREZZE MICRO VICKERS	75
TABELLA 22 PROVE MACRO-VICKERS PROVINO B	77
TABELLA 24 PROVA MACRO-VICKERS CAMPIONE E	77
TABELLA 23 PROVA MACRO-VICKERS CAMPIONE C	77

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con l'azienda VDP Group s.p.a. (Schio-Vi).

Fondata nel 1992, l'azienda ad oggi conta tre stabilimenti produttivi e si inserisce come uno dei maggiori produttori a livello europeo di getti di ghisa sferoidale e grigia.

L'azienda conta ad oggi circa 400 dipendenti e ha una forte predisposizione all'innovazione tecnologica, introducendo tecnologie all'avanguardia come un sistema di movimentazione delle siviere completamente automatizzato così come le linee di formatura. In totale, per l'intero gruppo, sono presenti ben 14 forni fusori elettrici.

VDP Group è in grado di creare getti del peso di pochi kg fino a 100.000 kg e grazie a questa varietà riesce a soddisfare un'ampia gamma di mercati: navale, movimento terra, macchine utensili, eolico, idroelettrico e molto altro. [1]

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di analizzare il comportamento microstrutturale e meccanico di una ghisa sferoidale ad alto contenuto di silicio sottoposta a processo di saldatura di riparazione ossiacetilenica e successivo trattamento termico di distensione.

In particolare, l'attenzione è rivolta allo studio delle modifiche indotte dal ciclo termico di saldatura sul materiale base, sulla zona termicamente alterata (HAZ) e sul cordone di saldatura, con riferimento all'evoluzione della microstruttura ferritica, alla morfologia e distribuzione dei noduli di grafite e alle proprietà meccaniche risultanti.

L'analisi sperimentale è stata condotta mediante osservazioni micrografiche, prove di trazione e analisi frattografica tramite microscopio elettronico a scansione (SEM), prove di durezza micro e macro Vickers, al fine di correlare le caratteristiche microstrutturali ai meccanismi di deformazione e frattura del materiale.

Lo studio si propone inoltre di valutare l'influenza di eventuali difetti di saldatura, quali soffiature e porosità, sul comportamento meccanico del giunto, fornendo un quadro

complessivo della saldabilità della ghisa sferoidale ad alto silicio e delle criticità connesse al processo adottato.

1. Le Ghise

La ghisa è una lega Ferro-Carbonio che presenta un contenuto di Carbonio superiore al 2%.

È possibile classificare le diverse tipologie di ghisa in famiglie a seconda della microstruttura che le costituiscono. In particolare si distinguono per la forma che assume la grafite e per il tipo di matrice.

1.1 Ghisa Bianca

In questa tipologia di ghisa, il carbonio non precipita come grafite, bensì si presenta unitamente al ferro sotto forma di Cementite (Fe_3C). La matrice può presentarsi in forma perlitica o martensitica a seconda della velocità di raffreddamento. Le ghise bianche si contraddistinguono per l'elevata durezza e vengono solitamente utilizzate dove è richiesta resistenza all'abrasione.

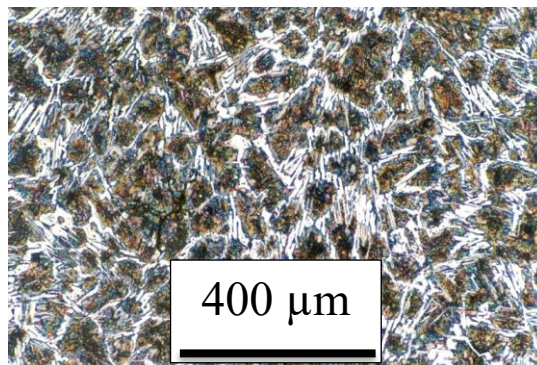


Figura 1 Micrografia Ghisa Bianca [2]

1.2 Ghisa Grigia

La ghisa grigia presenta una struttura eterogenea. La grafite si esibisce in forma lamellare con una matrice solitamente perlitica ma con un lento raffreddamento è possibile ottenere anche matrici ferritiche. Le caratteristiche tipiche di questa ghisa riguardano la facile lavorabilità e il buono smorzamento delle vibrazioni.

Nonostante il costo ridotto, le limitate proprietà meccaniche, in particolare una ridotta duttilità, ne limita fortemente gli utilizzi commerciali.

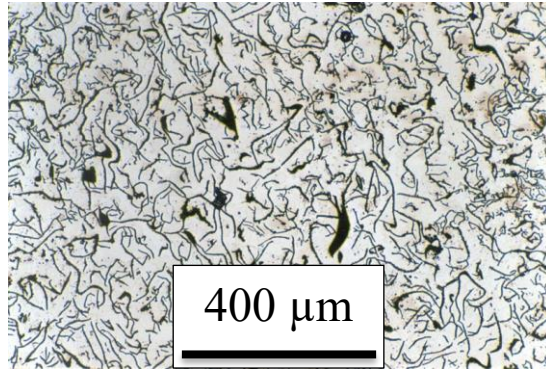


Figura 2 Micrografia Ghisa Grigia [2]

1.3 Ghisa Sferoidale

L'aggiunta di Magnesio in frazioni tra lo 0,03 e lo 0,08%, permette alla grafite di assumere una forma di tipo sferico. Questa caratteristica migliora notevolmente le proprietà meccaniche, donando maggior duttilità e resistenza a trazione. A seconda delle caratteristiche da valorizzare, la matrice può presentarsi in forma: ferritica, perlitica, ferritico-perlitica. Grazie alle sue notevoli caratteristiche è utilizzata in molteplici contesti.

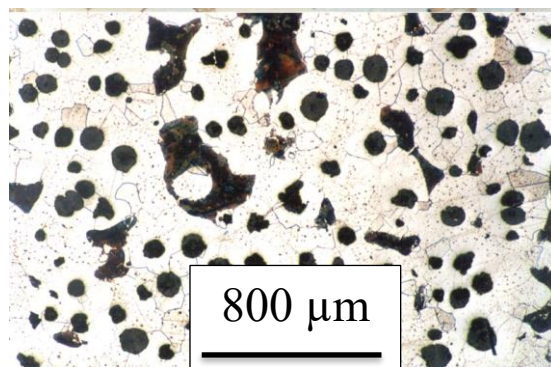


Figura 3 Micrografia Ghisa Sferoidale [2]

1.4 Ghisa a grafite compatta

La ghisa a grafite compatta, si ottiene con l'aggiunta di magnesio, in percentuali tra lo 0,01 e lo 0,03%, conferendo così la tipica forma che la caratterizza. Questa struttura attribuisce al materiale buona resistenza meccanica, rigidità e conduttività termica, rendendola particolarmente adatta a componenti soggetti a stress e calore. Rispetto alla ghisa grigia presenta una miglior tenacità, ma comunque risulta meno duttile rispetto alla ghisa sferoidale. La sua produzione richiede un controllo preciso della composizione chimica e del processo di raffreddamento al fine di ottenere la struttura desiderata della grafite.

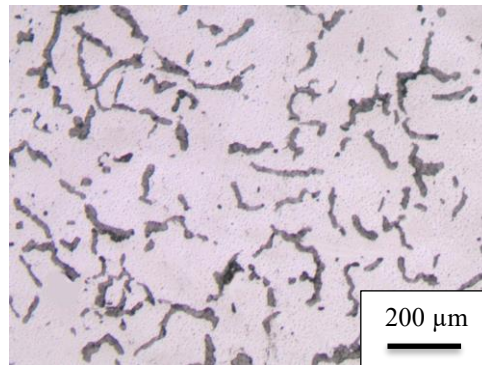


Figura 4 Micrografia Ghisa a grafite compatta [3]

1.5 Ghisa Malleabile

La ghisa malleabile viene ottenuta a partire dalla ghisa bianca tramite un processo di ricottura in forno del getto. Portando il componente a temperature superiori a 1000°C , la cementite si decompone in ferro e grafite, la quale precipita con una forma irregolare. La matrice risulta generalmente ferritica o perlitica. Riesce a garantire maggiore duttilità e resistenza agli urti rispetto alla ghisa di partenza, ma presenta comunque proprietà inferiori della ghisa sferoidale.

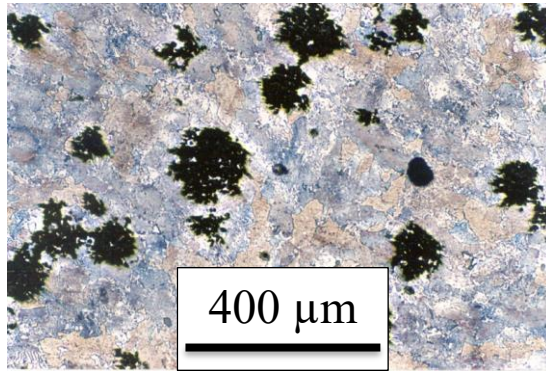


Figura 5 Micrografia Ghisa Malleabile [2]

1.6 Ghisa Sferoidale Austemperata

Questa tipologia di ghisa viene ottenuta a partire da una ghisa sferoidale sottoposta ad un trattamento termico, modificando così la matrice di partenza. Il componente, preferibilmente caratterizzato con una matrice perlitica, viene portato in campo austenitico. Segue poi un rapido raffreddamento che viene interrotto prima della temperatura di formazione della martensite. Si crea così la microstruttura caratteristica, denominata ausferritica, costituita da lamelle di ferrite e austenite residua che garantiscono buone caratteristiche di resistenza, tenacità e fatica.

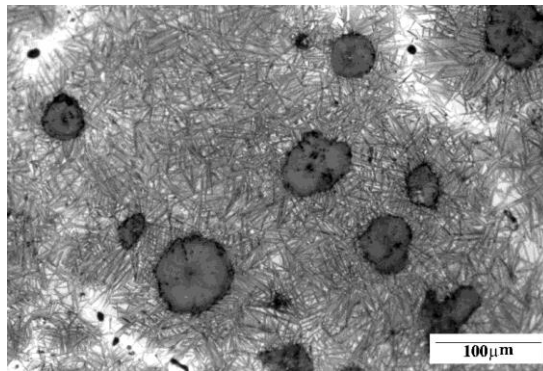


Figura 6 Ghisa Sferoidale Austemperata [2]

Quella appena presentata è una classificazione generale e commerciale delle ghise, che può quindi variare a seconda di esigenze particolari. Sono inoltre presenti in commercio

delle ghise speciali, che rispondono a esigenze specifiche, come una miglior resistenza all'usura e al calore, ottenute con un maggior uso di elementi in lega [4] [5]

2. Ghisa Sferoidale ad alto Silicio

2.1 Composizione

La struttura tipica della ghisa sferoidale ad alto silicio viene ottenuta aggiungendo al metallo fuso diversi elementi e composti, puri o sottoforma di lega, a discrezione della fonderia. La matrice che caratterizza questa tipologia di ghisa speciale è totalmente ferritica. Per ottenerla è fondamentale un controllo sulla composizione chimica adeguata. In particolare gli elementi in lega tipicamente presenti sono:

- Carbonio (C), tra il 3,5 e il 3,9%, viene considerato unitamente al Silicio e al Fosforo nel calcolo del CE (Carbonio equivalente).
- Silicio (Si), tra il 3% e il 4,5% favorisce una struttura ferritica garantendo un buon compromesso tra resistenza meccanica e duttilità. Con tenori di Si superiori al 4,5% si può avere una degradazione della grafite sferoidale; a percentuali più elevate (fino al 6%) si migliorano invece la resistenza al calore, le proprietà meccaniche e la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura.
- Magnesio (Mg) tra lo 0,03 allo 0,08%, principale elemento responsabile della forma sferica della grafite. Il suo effetto è fortemente ridotto dalla presenza di Zolfo e Ossigeno.
- Rame (Cu), elemento grafitizzante e promotore di una matrice perlitica, nelle ghise in questione le percentuali variano tra lo 0,03 e lo 0,15%.
- Manganese (Mn), tra lo 0,15 allo 0,35% elemento promotore di matrice perlitica. Porta a segregazioni di carburi a bordo grano.

- Zolfo (S) riduce l'efficacia della sferoidizzazione, poiché ha un'ottima affinità con il Magnesio. Le concentrazioni sono limitate allo 0.015%.
- Fosforo (P) è un elemento infragilente. Le concentrazioni sono inferiori allo 0.05%.

Oltre a questi principali elementi si aggiungono generalmente dei composti inoculanti, che favoriscono la formazione di grafite omogenea [6] [7] [8].

2.2 Effetto del silicio

Il Silicio, oltre ad essere il principale elemento promuovente la formazione di grafite a discapito della cementite (si veda in capitolo 2.3.2), se presente con percentuali al di sopra del 3%, viene considerato un vero e proprio elemento in lega capace di trasformare la matrice rendendola totalmente ferritica.

L'aggiunta di Silicio, porta a molteplici aspetti positivi.

In primo luogo, vengono migliorate le proprietà meccaniche, come la resistenza a trazione, l'allungamento a rottura, la durezza e la resistenza a fatica. Inoltre la promozione di una matrice uniforme porta ad avere una minor usura degli utensili in fase di lavorazione e quindi un minor costo dell'intero processo di fabbricazione di getti.

Questo miglioramento generale delle caratteristiche è dovuto ad un rafforzamento della fase solida per precipitazione. Gli atomi di silicio rimpiazzano gli atomi di ferro nella struttura cristallina e, poiché vi è una differenza dimensionale tra i due atomi, la struttura viene distorta. Tale distorsione ostacola il movimento di eventuali dislocazioni richiedendo un maggior sforzo per deformare il materiale.

Con percentuali in massa superiori al 4,3%, si può presentare una degradazione della forma della grafite sferica, perdendo così le proprietà di allungamento e duttilità.

Per tenori di silicio maggiori, fino ad un 6%, ed eventualmente unitamente al molibdeno (2.5–5.5% Si e 0.2–2.0% Mo), si migliorano la resistenza al calore, le proprietà meccaniche, la resistenza all'ossidazione e alla corrosione alle alte temperature [8] [9] [10].

2.3 Processo

2.3.1 Fusione

Il processo di creazione di un oggetto in ghisa parte con la fusione del materiale base in un forno fino a liquefazione. Risulta prassi comune per le fonderie utilizzare, oltre ai pani di ghisa da altoforno, anche rottami di acciaio e ritorni di fonderia. Le percentuali in peso di ciascun materiale grezzo possono variare per tipologia di ghisa da produrre, economicità o disponibilità di materiale.

La ghisa in pani viene aggiunta solitamente con percentuali tra il 20 e il 40%. Seppur materiale più costoso, viene utilizzato poiché riesce a portare un notevole contributo nel controllo della chimica della ghisa base, assicurando così dei contenuti di Zolfo molto ridotti.

Il rottame di acciaio arriva intorno a quote del 40%. Viene generalmente utilizzato quello basso legato, in particolare gli scarti di produzione di acciaio da stampaggio, dato il ridotto contenuto di elementi in lega, che poi andrebbero successivamente rimossi, aumentando il tempo e costo del processo di creazione dei getti.

Non manca l'aggiunta di ghisa sferoidale da ritorni di fonderia, come canali di colata, materozze ed eventuali pezzi scartati. L'aggiunta di questa tipologia di materiale permette di ridurre l'aggiunta di elementi in lega data la loro presenza, poiché aggiunti in infornate precedenti per la creazione dei getti precedenti. L'impiego varia tra il 30 e il 40%.

Vengono inoltre aggiunti, se mancanti, i principali elementi in lega sopracitati, oltre che eventuale grafite pura, così da correggere la chimica del metallo fuso e ottenere così la giusta composizione. Risulta fondamentale anche un controllo accurato sulla

temperatura della ghisa liquida; è infatti necessario mantenere una temperatura abbastanza elevata tale da permettere una buona colabilità del materiale riempiendo completamente lo stampo. Allo stesso tempo la temperatura non può essere troppo elevata, per un motivo legato all'economicità del processo [6].

Risultano fondamentali due fasi per la creazione di getti in ghisa sferoidale di buona qualità:

- **SFEROIDIZZAZIONE:** attraverso l'aggiunta di magnesio al metallo fuso, come accennato precedentemente, viene favorita la formazione di grafite di forma sferica. L'aggiunta di magnesio è una fase critica per il processo di fonderia. Risulta importante mantenere un controllo accurato sulla sua percentuale, poiché con concentrazioni inferiori allo 0,03% in soluzione, si otterrebbero ghise di tipo compatto. Questo elemento viene aggiunto al bagno di fusione sottoforma di lega, generalmente con leghe Fe-Si-Mg, così da ridurre la violenza della reazione con la ghisa liquida e limitare l'evanescenza dello stesso, data la sua forte affinità con l'ossigeno. Proprio per questo motivo è preferibile aggiungerlo nelle ultime fasi di fusione [11].
- **INOCULAZIONE:** altro passaggio cruciale risulta l'aggiunta di inoculanti che favoriscono una migliore omogeneità della grafite all'interno del prodotto, permettendo di aumentare i siti di nucleazione della grafite eutettica. L'aggiunta di questi elementi facilita inoltre l'eliminazione di cementite durante la solidificazione; anche in questo caso è presente un forte rischio di evanescenza degli inoculanti. Per questo motivo vengono aggiunti appena prima, o durante, la fase di colata direttamente nella corrente di ghisa. [6] [11].

2.3.2 Solidificazione

La solidificazione della ghisa sferoidale è intrinsecamente legata a processi termodinamici e cinetici. Prendendo come riferimento una ghisa eutettica, il processo di solidificazione inizia con il raffreddamento del metallo fuso. L'aggiunta di silicio in soluzione aumenta la separazione tra il diagramma metastabile, riferito alla formazione

di cementite, e il diagramma stabile, riferito alla formazione di grafite. In particolare l'aggiunta di silicio permette di creare una finestra di temperatura tale da consentire la formazione di grafite a discapito della cementite.

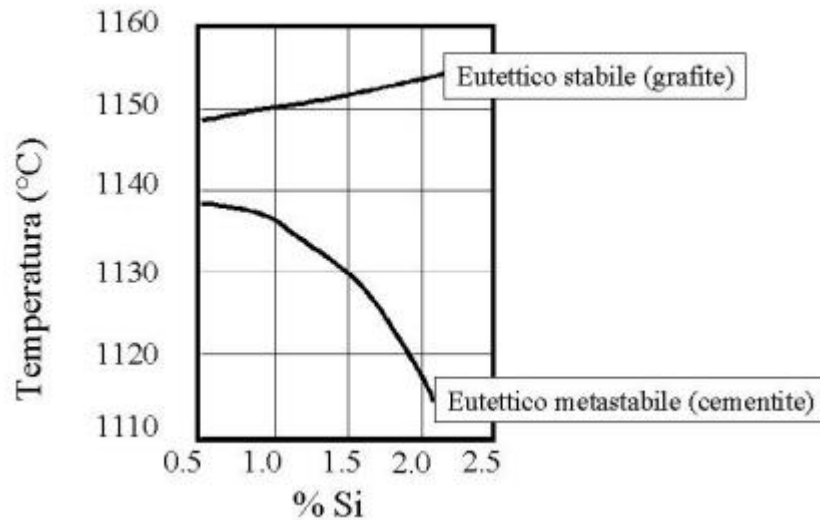


Figura 7 Effetto del silicio sulle temperature di eutettico stabile e metastabile [12]

Viene così permessa la formazione di nuclei eterogeneamente dispersi, favorita dall'aggiunta di inoculanti. Una volta formati i primi piccoli nuclei di grafite, il processo di solidificazione continua con l'accrescimento divorziato: il nucleo di grafite immerso in metallo liquido, e avvolto da un nucleo di austenite, si accresce; l'austenite impoverendosi di carbonio darà luogo successivamente alla ferrite.

2.4 Applicazioni industriali

La ghisa sferoidale ad alto silicio, come detto precedentemente, ha notevoli proprietà meccaniche, come un'ottima resistenza alla trazione, allungamento e duttilità. Rappresenta oggi una soluzione adottata in diversi settori industriali ad alte prestazioni, tra cui quello automobilistico, energetico e meccanico. Come detto nel capitolo 2.2,

questa tipologia di materiale conserva rilevanti proprietà meccaniche ad alte temperature, così come una buona resistenza all'ossidazione.

Dal punto di vista produttivo, la ghisa sferoidale ad alto silicio mantiene i vantaggi tipici del processo di fonderia, in particolare la lavorazione near net shape, consente di ottenere componenti con geometrie prossime a quelle finali, riducendo gli scarti e le successive lavorazioni meccaniche. La possibilità di realizzare forme complesse e di integrare più funzioni in un unico getto garantisce notevole libertà progettuale rispetto ai materiali metallici convenzionali, come l'acciaio, riducendo i costi e migliorando le prestazioni. Inoltre, le temperature di fusione relativamente basse, unite all'ottima colabilità, migliorano l'efficienza energetica del processo.

La densità inferiore rispetto all'acciaio contribuisce alla riduzione dei pesi e all'ottimizzazione delle prestazioni complessive dei componenti [8] [13].

2.5 Limiti e problematiche

Nonostante le numerose proprietà che rendono la ghisa sferoidale un materiale competitivo in diversi ambiti industriali, è opportuno evidenziare anche i limiti che ne condizionano l'impiego in specifiche applicazioni.

La ghisa presenta una densità relativamente elevata (circa 7–7,3 g/cm³), di poco inferiore a quella degli acciai e nettamente superiore a quella delle leghe di alluminio (circa 2,7 g/cm³); ciò la rende penalizzante nei contesti in cui la riduzione del peso è un requisito fondamentale.

È importante considerare che l'elevato tenore di silicio, pur migliorando la resistenza all'ossidazione e la stabilità della matrice ferritica, comporta una minore tenacità che ne limita l'impiego in applicazioni soggette a impatti o carichi dinamici elevati.

L'elevata concentrazione del silicio incrementa il rischio di creazione di grafite Chunky, con una conseguente riduzione dell'allungamento.

Un ulteriore aspetto critico riguarda la saldabilità: la ghisa sferoidale richiede tecniche specifiche e controlli accurati per evitare la formazione di cricche o difetti, rendendo più complessa la riparazione o la modifica dei componenti [8] [9] [14].

2.6 Mercato globale

Nel periodo 2020-2024 l'andamento del mercato internazionale ha mostrato un andamento distinto per le due principali tipologie di ghisa: grigia e duttile (sferoidale e malleabile). La ghisa grigia occupa una porzione dominante, pari al 66,6%, la ghisa duttile il 33,4%. I settori di destinazione nel 2024 si dividono in:

- Meccanica: principale settore, con una porzione importante del mercato totale, pari al 46%. Include prodotti rivolti a macchine utensili, macchine agricole, lavorazione del suolo, movimento terra ed energia.
- Mezzi di trasporto: altra rilevante fetta del mercato, pari al 32%. Include il campo automotive e il settore ferroviario.
- Edilizia: presenta una quota del 7,4%. Il settore produce prodotti come chiusini e griglie stradali, tubi e raccordi e altri elementi di arredo urbano.
- Siderurgia: piccola fetta pari al 4,2%, mercato rivolto a specifici mercati.
- Altri impieghi: porzione del 10,4%, riguarda la produzione di getti in materiale innovativo, creati per il mercato energetico o per la sostituzione in ghisa di altri materiali per riduzione del costo [15].

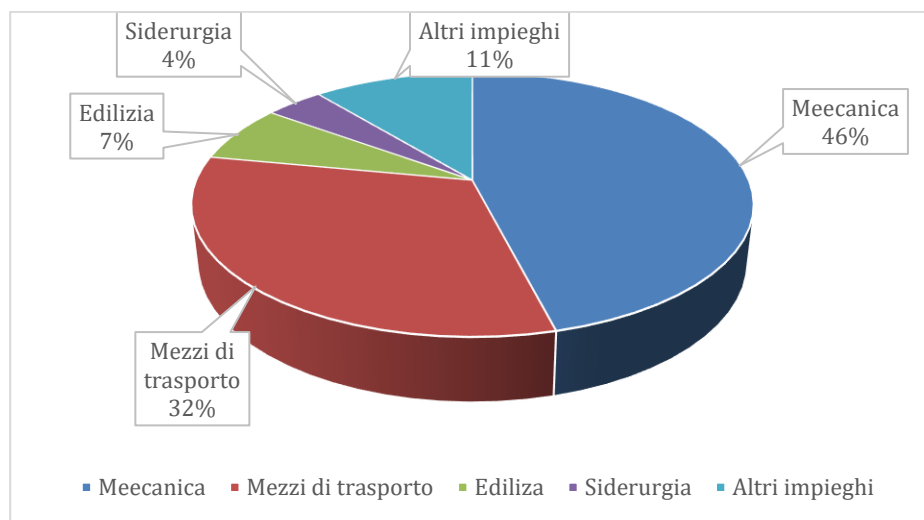


Figura 8 Mercati destinazione getti in ghisa

3 Saldabilità

3.1 Introduzione

La saldatura è un processo metallurgico basato sulla fusione del materiale base ed eventuale materiale d'apporto. L'impiego di questa tecnica su getti in ghisa consente di:

- Riparare un componente danneggiato o rotto, ripristinando così la sua funzionalità originale.
- Riempire le soffiature e ritiri superficiali in getti di grandi dimensioni, permettendo così di essere ugualmente utilizzati evitandone lo scarto.
- Realizzare giunzioni con altri materiali.

3.2 Aspetti critici

La saldatura della ghisa risulta essere una delle operazioni più critiche nell'ambito metallurgico a causa delle elevate sollecitazioni termiche e delle trasformazioni microstrutturali che insorgono durante il processo. A differenza di altri materiali ferrosi, la ghisa richiede procedure dedicate che comprendono generalmente il controllo del raffreddamento, un attento preriscaldamento e la selezione di materiali d'apporto adeguati.

3.2.1 Raffreddamento

Il raffreddamento della zona saldata è un aspetto critico legato all'alto contenuto di carbonio in soluzione della ghisa. Dato il processo di saldatura localizzato e poco esteso, è certo un rapido raffreddamento della zona saldata per conducibilità dello stesso getto. Un raffreddamento eccessivamente veloce favorisce la formazione di strutture fragili nella zona del materiale interessata dalla saldatura, andando così a modificare le caratteristiche meccaniche del componente. Per ridurre la formazione di suddetti composti risulta complicato intervenire sul processo tecnologico di saldatura poiché intrinsecamente legato alla formazione di difetti ed è quindi necessario trovare altre soluzioni. La strategia più diffusa è quindi cercare di diminuire la velocità di

raffreddamento della zona saldata. A tal proposito esistono svariati metodi che permettono di ottenere risultati più che soddisfacenti. In funzione delle caratteristiche geometriche e dimensionali del pezzo, dopo l'operazione di saldatura è possibile isolare la zona interessata mediante l'impiego di panni specifici o sabbia, i quali permettono di ridurre lo scambio termico con l'ambiente circostante. Qualora le dimensioni del getto lo consentano è prassi consolidata riporre il componente in forno, al fine di ottenere un raffreddamento più controllato e uniforme. [6] [14]

3.2.2 Preriscaldamento

Un altro metodo che consente di diminuire la velocità di raffreddamento delle zone adiacenti alla saldatura, consiste nel diminuire la differenza della temperatura tra il materiale base e la zona saldata preriscaldando il getto. Il riscaldamento dovrebbe essere graduale e coinvolgere tutta la dimensione del componente così da limitare eventuali distorsioni. Il risultato di questo approccio permette così di ridurre la formazione di strutture fragili nelle zone adiacenti al cordone di saldatura. Un altro aspetto positivo del preriscaldamento è legato alla minor probabilità della formazione di cricche nelle zone circostanti. Tale fenomeno è attribuibile all'elevato gradiente termico sviluppato durante il processo di saldatura e alla ridotta duttilità di alcune tipologie di ghisa. Un aspetto negativo legato al preriscaldamento, ed in particolare all'eccessiva temperatura di lavoro, è quello facilitare la formazione di carburi i quali tendono a diffondere con maggior facilità e in modo più continuo. [14] [16]

3.2.3 Scelta del materiale d'apporto

La scelta del materiale d'apporto riveste un ruolo determinante per il processo di saldatura. I principali aspetti che determinano la scelta di un materiale piuttosto che un altro sono diversi: la compatibilità con il materiale base, la tecnica di saldatura adottata e le caratteristiche meccaniche finali richieste. Alcuni materiali d'apporto non sono del tutto compatibili con il materiale base e rischiano così di favorire la formazione di

microstrutture dure, aumentando la fragilità della zona saldata. Certi materiali, più di altri riescono meglio accomodare le distorsioni che si creano durante e dopo il processo di saldatura data la loro maggiore duttilità, garantendo così l'integrità della saldatura. La scelta ottimale dipende quindi dall'equilibrio tra compatibilità metallurgica, tecnica di saldatura e prestazioni richieste al componente.

3.3 Difetti di saldatura

La saldatura è un processo intrinsecamente esposto alla formazione di difetti. I difetti che insorgono durante il processo di saldatura vengono classificati in due categorie a seconda della loro posizione, esterna o interna. Nel primo caso i difetti si presentano sulla superficie e sono quindi visibili ad un occhio attento. Nel caso invece i difetti siano del secondo tipo, risulta impossibile identificare la loro presenza a meno dell'utilizzo di strumenti adeguati. Di seguito vengono presentati i principali difetti che affliggono la zona saldata, indipendentemente dal tipo di tecnica utilizzata [17]:

Tabella 1 Tabella riassuntiva difetti di saldatura (elaborazione da [17])

TIPO DI DIFETTO	DESCRIZIONE	CAUSE	EFFETTI
Arc Strike	Fusione e riscaldamento localizzato del materiale base.	L'arco elettrico colpisce il metallo base per una tecnica di saldatura incorretta, presenza di contaminanti o inadeguato gas di protezione.	Alterazione della zona termicamente alterata, cambiamento della microstruttura, introduzione di distorsioni. Maggior tendenza alla corrosione.
Porosità superficiale	Cavità o tasche di gas presenti sulla superficie di saldatura.	Parametri di saldatura incorretti, flusso di protezione non ottimale e contaminazione del materiale base o d'apporto.	Maggior suscettibilità alla formazione di cricche. Riduzione della resistenza a fatica e maggior sensibilità alla corrosione.

Eccessiva penetrazione	L'area di saldatura viene attraversata sovrabbondantemente.	Corrente di saldatura o calore troppo elevati, velocità di avanzamento ridotta.	Indebolimento della zona saldata, distorsioni e stress residui.
Riempimento non completo	Penetrazione o fusione non completa del materiale d'apporto al materiale base.	Apporto di calore insufficiente, velocità di avanzamento troppo rapida, angolazione errata.	Riduzione delle proprietà meccaniche, maggiore suscettibilità alle concentrazioni di stress e tensioni.
Cricche superficiali	Spaccatura della zona saldata in modo longitudinale, trasversale o coinvolgendo anche il materiale base.	Stress residui pregressi del componente base, nessun preriscaldamento, alto contenuto di zolfo.	Maggior concentrazione di stress, riduzione della vita a fatica, peggior resistenza alla corrosione.
DIFETTI INTERNI			
Mancata penetrazione	Incompleta fusione tra il materiale base e materiale d'apporto.	Tecnica impropria, velocità elevata, bassa corrente o temperatura.	Riduzione resistenza strutturale e a fatica, maggior rischio di ingresso di contaminanti.
Porosità interna	Cavità o vuoti interni al materiale.	Contaminazione del materiale, protezione inadeguata, presenza di umidità.	Riduzione delle proprietà meccaniche, diminuzione resistenza alla corrosione, diminuzione della resistenza a fatica.
Soffiature interne	Cavità riempite di gas formatesi con la solidificazione.	Contaminazione del materiale, protezione inadeguata, presenza di umidità, velocità di saldatura troppo elevata.	Aumento concentrazione di stress, scarse proprietà meccaniche del prodotto, aumento rischio di corrosione.
Inclusione di scoria	Intrappolamento di materiale non metallico nel cordone di saldatura.	Pulizia non approfondita, angolo saldatura incorretto, rapido raffreddamento del bagno di fusione.	Riduzione di resistenza, della duttilità e tenacità. Aumento rischio corrosione.

Criccature interne	Rotture interne alla saldatura.	Tecnica impropria di saldatura, materiali non corretti	Riduzione dell'integrità strutturale e delle proprietà meccaniche. Diminuzione della resistenza alla corrosione
--------------------	---------------------------------	--	---

3.4 Le zone della saldatura

In una sezione di saldatura si possono distinguere tre aree principali: zona fusa, zona parzialmente fusa e zona termicamente alterata. L'estensione della zona parzialmente fusa e termicamente alterata è correlata al gradiente di temperatura, il quale deriva a sua volta dall'apporto di calore e dalla velocità di raffreddamento. Le zone fusa e parzialmente fusa superano la temperatura eutettica, mentre la zona termicamente alterata permane nel campo austenitico e cementite.

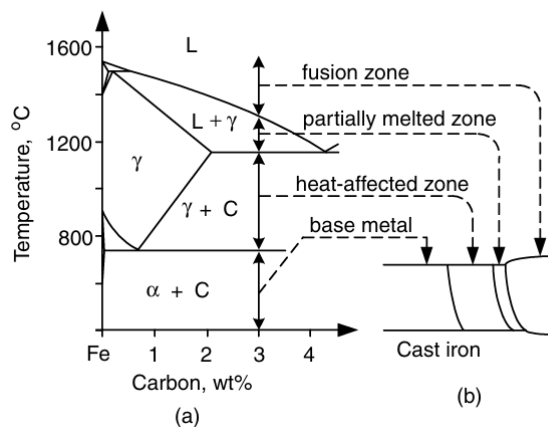


Figura 9 Zone saldatura [18]

3.4.1 Zona fusa

In questa zona il materiale base e d'apporto raggiungono la completa liquefazione. La microstruttura e le caratteristiche meccaniche del materiale creatosi nella zona di fusione dipendono dal materiale d'apporto scelto e dal grado di diluizione che esso subisce con il materiale base. Il materiale d'apporto scelto influenza la composizione chimica del giunto: ad esempio, l'utilizzo di leghe a base di nichel favorisce la

formazione di strutture più duttili e tenaci, mentre l'impiego di materiali ferrosi può portare alla creazione di microstrutture più fragili. Il grado di diluizione, ossia la proporzione tra materiale base e materiale d'apporto che si mescolano nel bagno di fusione, risulta cruciale nella saldatura di ghisa per il suo alto contenuto di carbonio. Una diluizione elevata aumenta il tenore di carbonio disciolto nella zona fusa proveniente dal materiale base e alle alte temperature questo si solubilizza nel bagno liquido. Con un rapido raffreddamento il carbonio potrebbe precipitare formando carburi o microstrutture fragili che influenzano negativamente le caratteristiche del prodotto. [14] [19] [20].

3.4.2 Zona parzialmente fusa

La zona parzialmente fusa è l'area situata immediatamente a ridosso della linea di fusione. In questa regione, una parte del materiale raggiunge la liquefazione, mentre l'altra rimane allo stato solido. Le temperature raggiunte sono comunque sufficientemente elevate tali da superare il punto eutettico. Essendo a diretto contatto con il materiale base, questa zona dipende in maggior misura dalla velocità di raffreddamento rispetto alla zona fusa. A seconda della velocità di raffreddamento più o meno rapida, si possono formare: grafite, cementite, ferrite, perlite e martensite con la presenza di eventuali precipitazioni di carburi secondari. La combinazione di queste fasi rende la zona parzialmente fusa la più critica dell'intero giunto. Questo spiega la sua tendenza a diventare il punto critico dove possono originarsi cricche o rotture premature. [19] [21].

3.4.3 Zona termicamente alterata

La zona termicamente alterata è una porzione di materiale base adiacente alla saldatura che subisce una variazione microstrutturale a seguito del raggiungimento delle elevate temperature del processo di saldatura. In questa zona le temperature raggiunte sono al di sotto del punto eutettico e perciò non è presente alcuna liquefazione del materiale. Le criticità legate a questa zona, sono legate principalmente all'ingrossamento del grano, dovuto alle elevate temperature raggiunte durante la fase di saldatura, così come la formazione di cementite. A seconda poi della rapidità del raffreddamento vi è un

rischio ulteriore nella formazione di perlite. L'estensione della zona termicamente alterata può variare a seconda della tecnica di saldatura utilizzata. [19] [22].

3.5 Trattamento termico post-saldatura

Le strutture formatesi durante il processo di saldatura possono essere modificate mediante un opportuno trattamento termico. Il processo consiste nel portare il componente nella zona austenitica, così da favorire la trasformazione e il riequilibrio della microstruttura. A seconda della struttura di partenza, della temperatura raggiunta, del tempo di mantenimento in forno e della velocità di raffreddamento, sarà possibile ottenere materiali con strutture più o meno uniformi. Questa procedura influenza le zone interessate dalla saldatura, oltre che l'intero pezzo ed è quindi necessario tenere in considerazione il cambiamento delle caratteristiche dell'intero componente [19] [22].

3.6 Tecniche di saldatura

3.6.1 Introduzione

Esistono svariati metodi di saldatura che consentono la riparazione di getti in ghisa. La scelta di un metodo rispetto ad un altro, così come la scelta del materiale d'apporto, è legata a molteplici aspetti tra cui: il costo del processo, le proprietà meccaniche finali da garantire, la facilità di lavorazione, la resistenza al colore e l'apporto termico massimo somministrato. Un ruolo fondamentale è svolto dalla tipologia ghisa: una ghisa grigia, con caratteristiche fragili e quindi meno incline ad accogliere deformazioni termiche sarà più complicata da saldare e comunque il risultato potrebbe portare a improvvise rotture. Al contrario, una ghisa sferoidale con proprietà più duttili invece riesce meglio a rispondere alle sollecitazioni termiche legate al processo di saldatura.

Le tecniche di saldatura si possono suddividere in tre categorie, a seconda che ci sia un maggiore o minore apporto di calore [6]:

- **SALDATURA CON LIMITATO PRERISCALDO:** l'obiettivo di questa tipologia di saldatura è di limitare l'apporto di calore trasmesso al materiale base. Il processo a freddo consente infatti di avere la minima variazione della struttura del materiale base, con corrispondente estensione minima della zona termicamente alterata. Il processo si svolge con la deposizione di cordoni poco estesi e con penetrazione ridotta. In funzione della ghisa base, è possibile effettuare un preriscaldamento, fino a temperature intorno ai 300 °C.
- **SALDATURA CON ELEVATO PRERISCALDO:** In questo caso, la saldatura è necessariamente preceduta da un preriscaldamento intorno ai 600-800°C, temperatura alla quale il componente deve essere mantenuto per l'intera durata del processo. In questo caso l'apporto di calore è maggiore, con un conseguente zona di lavoro più ampia. Il cordone di saldatura risulta perciò più esteso e il bagno di fusione maggiormente fluido. I getti, necessitano di successivo raffreddamento lento, per i motivi precedentemente riportati.
- **SALDATURA A REGIME INTERMEDIO:** risulta una via di mezzo dei due precedenti metodi, con temperature di preriscaldamento tra i 300 e 500°C.

3.6.2 Saldatura ossiacetilenica

La saldatura ossiacetilenica è un metodo di saldatura che prevede l'uso di una fiamma viva composta da una miscela di ossigeno e acetilene. La torcia viene posizionata nella zona da riparare, così da fondere parzialmente il letto di ghisa e il relativo materiale d'apporto che viene aggiunto manualmente. Questa tecnica procura una ridotta penetrazione e diluizione del materiale d'apporto con il materiale base. Essendo il calore della fiamma ossiacetilenica non concentrato, la zona termicamente alterata risulta molto ampia se confrontata con altri metodi di saldatura. Il punto della fiamma ove si raggiungono le temperature più alte corrisponde al dardo, il quale non deve essere immerso nel bagno di fusione o direttamente a contatto al componente, ma ad una distanza tra i 5 e i 10 mm. Tra i vari articoli presenti in letteratura, è preferibile adottare una fiamma leggermente riducente, in modo da limitare l'ossidazione della ghisa base e del metallo d'apporto, limitando così l'evanescenza di silicio, magnesio e

carbonio. Qualora l'obiettivo finale sia quello di ottenere un comportamento duttile, risulta necessario effettuare un trattamento di ricottura. [6] [14] [20]

GHISA GRIGIA

Sono presenti in letteratura pochi articoli che fanno riferimento alla saldatura attraverso fiamma ossiacetilenica di ghisa grigia. La ghisa grigia infatti non si presta bene ad essere saldata con il metodo ossiacetilenico proprio per la forte escursione termica derivata dal processo e alle scarse caratteristiche meccaniche della ghisa, come una ridottissima duttilità, che limita la capacità del materiale di adeguarsi alle deformazioni termiche. Un preriscaldamento non adeguato, tensioni residue interne pregresse nel materiale e un raffreddamento troppo veloce, potrebbero portare ad una rottura del getto da riparare. Risulta consuetudine preriscaldare le zone interessate dalla saldatura con temperature intorno ai 650°C e successivamente fondere in modo locale il materiale. Piccole quantità di carburi potrebbero formarsi nella zona parzialmente fusa, anche con velocità di raffreddamento basse, ma poiché la ghisa grigia possiede proprietà meccaniche intrinsecamente limitate e le sollecitazioni richieste in esercizio sono generalmente limitate, anche una riparazione con caratteristiche meccaniche ridotte può risultare del tutto adeguata all'impiego del componente.

- Bacchette in ghisa grigia: viene utilizzata solitamente la stessa composizione della ghisa base. La presenza di cementite sulla superficie esterna della bacchetta influisce negativamente nel processo di saldatura. Una matrice ferritica con grafite finemente dispersa aumenta la fluidità di deposizione. Durante il processo di saldatura parte del silicio e carbonio presenti in soluzione si ossidano, riducendo così la loro quantità in soluzione. La presenza di silicio migliora la fluidità del metallo fuso, ma a concentrazioni troppo elevate porta alla formazione di carburi e ad eventuali porosità. Quest'ultima può essere limitata con temperature più alte e tempi di saldatura prolungati. La scelta di bacchette di ghisa grigia, favorisce anche il colour matching con il materiale di base.

GHISA SFEROIDALE

La tecnica di saldatura per la ghisa sferoidale risulta essere equivalente a quella utilizzata per la ghisa grigia. Ampio preriscaldamento, fino a temperature prossime ai 600°C e fusione localizzata nel punto di interesse. In questo caso però la ghisa sferoidale riesce meglio ad accomodare lo sforzo termico impresso dal processo di saldatura, ed il rischio di formazione di cricche è fortemente ridotto. Dato quindi il più basso rischio di rottura, esistono in letteratura diversi articoli che hanno approfondito il tema ed hanno portato all'uso di diversi materiali e composizioni. Anche con questo materiale vi è il rischio della formazione di carburi nella zona parzialmente fusa o di martensite a seconda della matrice di partenza e della velocità di raffreddamento.

Tra i materiali d'apporto che vengono utilizzati troviamo:

- Bacchette di ghisa arricchite di magnesio: a causa della forte evanescenza del magnesio il cordone di saldatura presenta una morfologia a grafite di tipo lamellare, non coerente con il materiale base. Per questo motivo le caratteristiche meccaniche del giunto non sono soddisfacenti. L'impiego di un flussante migliora le caratteristiche di fusibilità e scorrevolezza del bagno di fusione, tali da limitare porosità e soffiature. L'aggiunta in soluzione di Nickel fino al 5% diminuisce la tendenza alla formazione di carburi primari.
- Bacchette di ghisa arricchite di cerio: l'aggiunta di cerio in soluzione, altro elemento sferoidizzante, ma meno volatile del magnesio, limita la formazione di strutture lamellari. Contemporaneamente il cerio riduce le proprietà di scorrevolezza del bagno di fusione, rendendolo molto viscoso e favorendo la formazione di porosità o soffiature seppur in minor quantità rispetto alle bacchette ghisa-magnesio. Anche in questo caso la presenza di carburi viene ampiamente limitata.
- Bacchette di ghisa ad elevato contenuto di nickel: l'aggiunta di nickel migliora la duttilità del cordone di saldatura, limitando la formazione di cricche. Con una sua concentrazione troppo alta, vi è un rischio di creare carburi di FeNiC_3 nelle

zone adiacenti al bagno di fusione. In qualsiasi caso, l'utilizzo del Nickel è limitato dalle alte temperature di fusione.

- Bacchette di ghisa ad alto silicio: Il silicio facilita la deposizione del materiale fuso, diminuendo la viscosità della pozza di fusione. Per compensare la perdita per ossidazione, le bacchette di ghisa presentano un contenuto di silicio più alto, fino al 30% in più rispetto alla ghisa base. Un altro aspetto positivo ricade nella formazione di perlite e grafite durante il raffreddamento a discapito di cementite. Una quantità di silicio troppo elevata riduce però le proprietà meccaniche della saldatura.

3.6.3 Saldatura ad arco

La saldatura ad arco è eseguita con l'utilizzo di corrente elettrica ed un elettrodo che viene consumato sul pezzo da saldare e se confrontata con la saldatura ossiacetilenica, garantisce una miglior penetrazione. L'apporto di calore al getto risulta maggiormente concentrato con la conseguenza di una minor estensione della zona termicamente alterata. Una concentrazione di calore più ristretta, con un rapido raffreddamento, può favorire la formazione di carburi nella zona parzialmente fusa e la formazione di martensite nella zona termicamente alterata, soprattutto nel caso di una struttura della ghisa base perlitica, data la maggior concentrazione di carbonio. Eseguendo un trattamento termico post saldatura è possibile modificare la struttura e disciogliere i suddetti composti fragili. Questa tecnica, se confrontata con la saldatura ossiacetilenica, risulta maggiormente suscettibile alla formazione di cricche, motivo per cui è fondamentale garantire un raffreddamento lento e controllato. Il materiale d'apporto è ricoperto da un rivestimento che ha molteplici funzioni: facilitare l'accensione dell'arco, fornire al bagno metallico eventuali elementi in lega, agire come materiale fondente e scorificante per l'eliminazione degli ossidi. Ricopre infine bagno di fusione con scoria calda e quindi rallenta il processo di raffreddamento. [6] [14] [20] [23]

GHISA GRIGIA

In letteratura sono presenti svariati articoli riguardanti la riparazione di getti in ghisa grigia attraverso l'utilizzo di archi elettrici. Solitamente viene utilizzata la corrente alternata, mentre con l'utilizzo di corrente continua è consigliata l'inversione di polarità che permette di migliorare la stabilità dell'arco. Indipendentemente dal tipo di corrente impiegata, l'intensità dovrebbe essere mantenuta la più bassa possibile. È inoltre opportuno adottare una tecnica a skip, al fine di ridurre al minimo l'apporto di calore al materiale base.

- Elettrodi in acciaio dolce: Questi elettrodi sono economici e facilmente reperibili sul mercato. Tuttavia il loro utilizzo genera forti gradienti di temperatura con il materiale base, generando un aumento di stress da contrazione ed espansione con il rischio di formazione di cricche, poiché l'acciaio presenta ritiri molto più pronunciati della ghisa. La rapida velocità di raffreddamento unita alla ridotta diluizione del materiale base con il materiale d'apporto, favorisce la formazione di perlite e cementite nel cordone di saldatura. Nella zona parzialmente fusa riesce invece a precipitare anche della grafite. A seguito della saldatura, viene eseguito un trattamento termico per rendere la zona saldata facilmente lavorabile. Un ulteriore aspetto da considerare è legato alla riduzione della resistenza a corrosione.
- Acciaio legato: l'elevata presenza di cromo negli elettrodi unita alla concentrazione di carbonio elevata nel getto, favorisce la creazione di carburi infragilenti nella zona parzialmente fusa, indebolendo la zona saldata e ottenendo perciò scarsi risultati meccanici. Anche la zona termicamente alterata, seppur ridotta, viene interessata da un infragilimento diffuso. Anche in questo caso, vi è una riduzione della resistenza a corrosione delle zone interessate dalla saldatura.
- Elettrodi di ghisa grigia: sono elettrodi estremamente complicati da utilizzare poiché durante la saldatura le basse temperature localizzate possono favorire la formazione di ghisa bianca, estremamente fragile e soggetta a rottura.

- Elettrodi Nickel ferro 60/40: questa tipologia di elettrodi migliora la resistenza alla frattura a caldo, assicurando buone proprietà meccaniche. L'utilizzo di questo materiale favorisce la precipitazione del carbonio sottoforma di grafite nelle zone parzialmente fusa, creando una soluzione solida con all'interno noduli di grafite. La fragilità di questa tipologia di giunti risiede in punti dove gli aggregati di grafite predominano.

GHISA SFEROIDALE

La matrice di partenza svolge un ruolo determinante per le caratteristiche meccaniche finali del componente. Una matrice perlitica, al raggiungimento del campo austenitico, favorisce la formazione di austenite ricca di carbonio che, in presenza di un veloce raffreddamento, porta alla formazione di martensite. Al contrario, una matrice di partenza prevalentemente ferritica genera, dopo saldatura, microstrutture complessivamente più duttili e con una durezza finale significativamente inferiore, riducendo il rischio di formazione di fasi fragili. In letteratura sono presenti svariati articoli che interessano la possibilità di riparare getti in ghisa sferoidale con l'utilizzo di elettrodi di diversa composizione.

- Elettrodi in ghisa sferoidale: vengono utilizzati principalmente per congiungere materiali della stessa composizione. Di norma sono rivestiti così da limitare il rilascio di fumi e la formazione di bruciature. Se il processo di saldatura viene eseguito con una velocità troppo elevata, nell'intorno della zona di saldatura si potrebbero manifestare delle cricche. La fusione del materiale avviene tramite trasferimento di gocce, rilascio di una notevole quantità di fumi e con una marcata formazione di spruzzi.
- Elettrodi di acciaio: l'utilizzo di questa tipologia di elettrodi risulta, come per la ghisa grigia, un materiale complicato da utilizzare. I risultati ottenuti sono infatti di scarsa qualità e sono dovuti a molteplici aspetti come: il ritiro del materiale molto diverso tra acciaio e ghisa, con conseguenti distorsioni o cricche, la formazione di strutture fragili nella zona parzialmente fusa.

- Elettrodi a base Nickel: buoni risultati sono stati ottenuti con elettrodi a base Nichel, i quali si adattano meglio alle deformazioni termiche accomodando contrazioni e dilatazioni. L'aggiunta di questo elemento migliora la resistenza alla corrosione e ossidazione alle elevate temperature e aumenta le caratteristiche meccaniche refinendo il grano. È necessario un attento controllo sulla composizione della ghisa base, in particolare devono essere limitati zolfo e fosforo.
- Elettrodi Nickel Rame: presentano una ridotta penetrazione e una conseguente ridotta diluizione del metallo. Sono raramente usati, poiché è presente un forte rischio di cricatura delle zone parzialmente fuse e termicamente alterata.
- Elettrodi Nickel Ferro (ENiFe): Questa tipologia di elettrodi permettono di ottenere delle ottime proprietà meccaniche, garantendo notevoli risultati anche con la giunzione con altre tipologie di materiale. L'aggiunta di nickel migliora infatti la resistenza e duttilità. Il carbonio mancante viene recuperato dal rivestimento dell'elettrodo, che precipita come grafite nel materiale fuso. Tuttavia, questi elettrodi presentano un limite significativo: le proprietà meccaniche ottenute mostrano spesso una notevole variabilità, rendendo il processo meno stabile e ripetibile.
- Elettrodi alluminio-bronzo: Questa tipologia di materiale non si appresta alla riparazione o giunzione del componente, bensì vengono utilizzati solamente come rivestimento della ghisa.

4 Indagine Sperimentale

4.1 Introduzione

La ghisa sferoidale interessata dallo studio è una ghisa duttile, a matrice ferritica, nota come ghisa ad alto silicio, con designazione EN GJS 600-10. La scheda tecnica, con le informazioni delle caratteristiche meccaniche e chimiche è riportata qui di seguito:

Reference	R _{p0,2%} [N/mm ²]			R _m [N/mm ²]			A ₅ [%]			Range di durezza Brinell	
Spessore di riferimento [mm]	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$	$t \leq 60$	$60 < t \leq 100$
GJS 600/10	470	450	Da definire	600	580	Da definire	10	8	Da definire	200-230	190-220

Tabella 2 Scheda Tecnica 1, Valori minimi [24]

Reference	K 23 [J]			K 20 [J]			K 40 [J]		
Spessore di riferimento [mm]	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$	$t \leq 30$	$30 < t \leq 60$	$60 < t \leq 100$
GJS 600/10	19	17	16	12	9	7	9	7	6

Tabella 3 Scheda Tecnica 2, Valori minimi [24]

Composizione chimica- range					
C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Cu [%]	Mg [%]
3-3,20	4-4,20	0,10-0,20	0,02-0,07	0,05-0,15	0,03-0,06

Tabella 4 Range di composizione chimica della ghisa base forniti da VDP

4.2 Preparazione provini

Sono state preparate due distinte tipologie di provini partendo da un saggio ad Y, secondo la normativa UNI EN 1563:2018, per un totale di 7 provini. La prima tipologia presenta un intaglio a V di profondità 30 [mm] ed angolo 60° al vertice inferiore, come riportato in Figura 10. Si è optato per questa configurazione così da assicurarsi la presenza della zona saldata all'interno del provino di trazione e replicando riempiture

di cavità di dimensione paragonabile. La seconda tipologia di provino, creando un cianfrino di profondità pari a 20 [mm] e sempre di angolo 60° al vertice inferiore.

La tecnica di saldatura utilizzata per il riempimento della cavità, corrisponde a una saldatura a caldo ossiacetilenica con bacchette di materiale d'apporto della stessa composizione del materiale base. La scelta di questa tipologia di tecnica è ricaduta sulla necessità di mantenere l'uniformità chimica del getto.

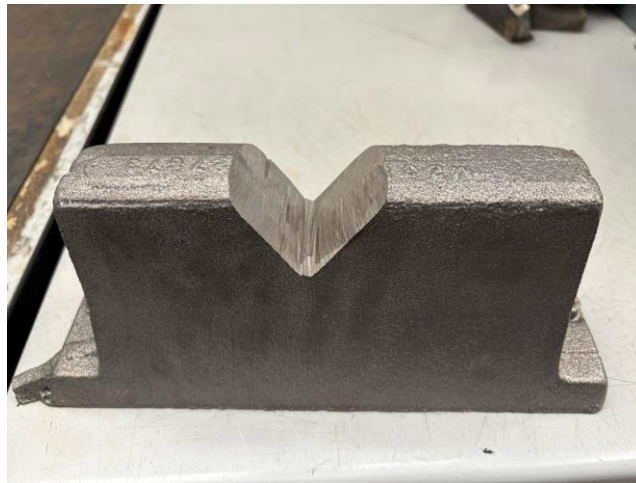


Figura 10 Provino con intaglio a V

Il provino è stato riscaldato interamente mediante l'utilizzo di torce a metano fino alla temperatura di 800°C +/-20[°C].

In seguito, con la torcia ossiacetilenica, si sono portate a parziale fusione le superfici dell'intaglio partendo dal vertice inferiore. Contemporaneamente è stata portata a fusione la bacchetta di ghisa.

Una volta finito il riempimento del cianfrino, il provino è stato racchiuso utilizzando del materiale isolante, per rallentare così il raffreddamento, riducendo il rischio di eventuali cricature per il ritiro del materiale e la formazione di strutture fragili.

Successivamente il provino è stato trattato termicamente, raggiungendo una temperatura intorno agli 800[°C] per tre 3 ore.



Figura 11 Provino finale a seguito di trattamento termico e post saldatura

4.3 Indagini micrografiche

4.3.1 Preparazione provini metallografici

Da una sezione del provino con cianfrino di profondità pari a 30 [mm], sono stati ricavati cinque campioni (A, B, C, D, E) per le analisi micrografiche, come è possibile osservare in Figura 12.

L'obiettivo di questa fase del lavoro è osservare la microstruttura nelle tre zone peculiari generate dal processo di saldatura: zona fusa, zona parzialmente fusa e zona termicamente alterata, confrontandole con il materiale base. L'analisi è finalizzata alla valutazione della morfologia della grafite, alla matrice del materiale ed evidenziando la presenza di eventuali precipitati.

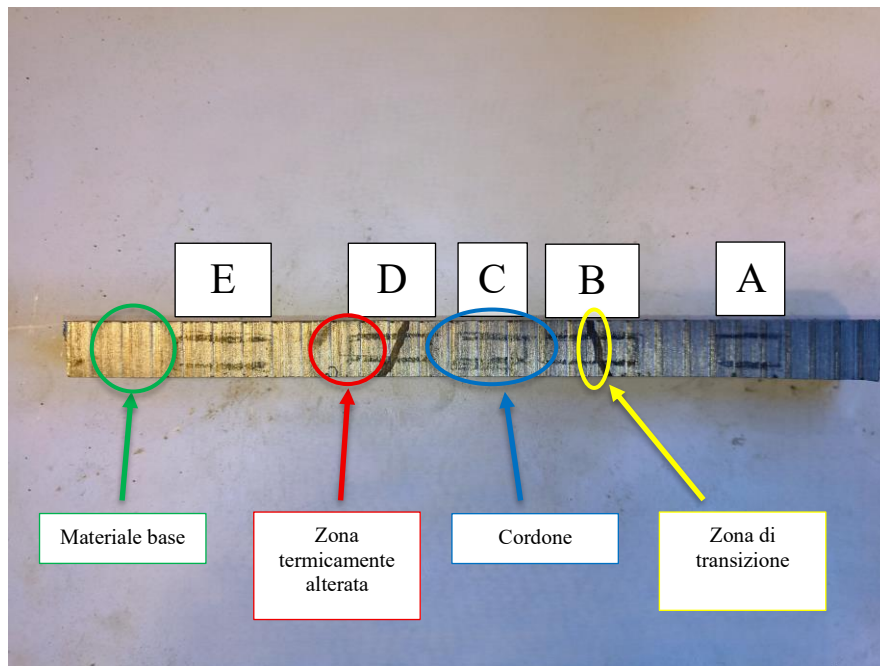


Figura 12 Sezione provino del profilo saldatura e relativi stacchi campioni

Una volta sezionato il provino, i campioni sono stati inglobati con resina e successivamente lucidati e attaccati con acido Nital 3.

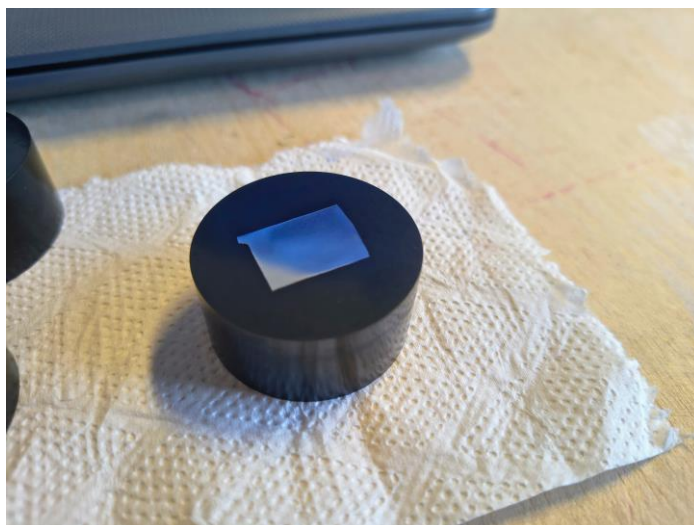


Figura 13 Campione A inglobato e lucidato

4.3.2 Indagine microstrutturale: noduli di grafite

Un importante parametro per definire la qualità della ghisa è la morfologia della grafite che precipita durante la solidificazione. Si possono ottenere getti che nominalmente hanno la stessa composizione, ma che possiedono proprietà meccaniche diverse a causa della diversa morfologia della grafite. La condizione ottimale che massimizza le prestazioni del materiale è legata ad un elevato numero di noduli di forma sferica di piccole dimensioni. Questo risultato è ottenibile solo in getti di dimensioni ridotte in quanto l'efficacia dell'inoculante è più elevata data la minore evanescenza e il raffreddamento più rapido e costante. Al contrario, in getti di grosse dimensioni l'evanescenza e il lento raffreddamento riducono i siti di nucleazione della grafite.

I parametri fondamentali per l'analisi della microstruttura di una ghisa sferoidale sono:

- Numero di noduli: numero di particelle di grafite per millimetro quadrato;
- Dimensione media dei noduli: corrisponde alla grandezza dei noduli di grafite ed è un parametro legato al numero di noduli. Un'elevata densità corrisponde a dimensioni dei noduli ridotte, mentre per un numero di noduli precipitati basso, la dimensione degli stessi è maggiore;
- Rotondità: indice rappresentante la forma dei noduli di grafite. Risulta un parametro importante in quanto una ghisa con noduli non sferoidali presenta proprietà meccaniche minori di una ghisa a grafite perfettamente sferoidale;
- Area %: è la percentuale dell'area esaminata occupata da noduli di grafite.

Per una classificazione oggettiva della microstruttura della ghisa, la forma e la dimensione della grafite vengono associate a delle classi secondo le normative ISO 945-1 e ISO 945-4. Nel caso della forma della grafite le classi sono organizzate tramite numeri romani: I (lamellare) a VI (sferica). Per la classe dimensionale vengono invece utilizzati i numeri arabi che rappresentano la mediana del diametro dei noduli.

4.3.3 Indagine microstrutturale: matrice

Un ulteriore parametro microstrutturale per valutare la qualità della ghisa risulta l'analisi della matrice che circonda i noduli di grafite. A seconda del processo è possibile ritrovare matrici ferritiche, perlitiche od un misto tra le due. A seconda della tipologia di matrice, le proprietà meccaniche della ghisa variano. Nel caso in esame, e quindi di una matrice totalmente ferritica, il parametro che modifica le proprietà meccaniche risulta la dimensione del grano: grani più fini e piccoli tenderanno a garantire una migliore resistenza meccanica rispetto ai grani di dimensione maggiore. È possibile modificare la struttura agendo sul ciclo termico del materiale. Modificando quindi la velocità di raffreddamento, effettuando dei trattamenti termici o come in questo caso apportando del calore localizzato è possibile modificare l'intera struttura.

Per l'analisi della matrice, la norma di riferimento adottata è la ASTM E112 che prevede la valutazione del grano secondo il metodo delle intercette su linee sovrapposte.

4.3.4 Campione A ed E

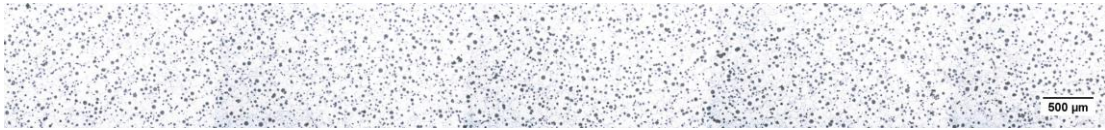


Figura 14 Micrografie unite 50x Campione A-Materiale base

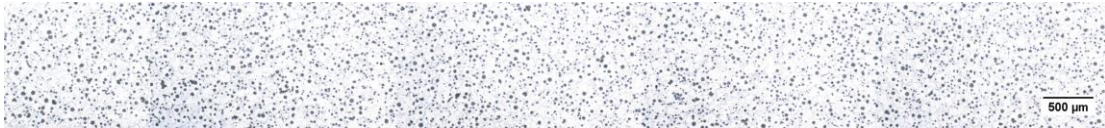


Figura 15 Micrografia Campione E- Materiale base

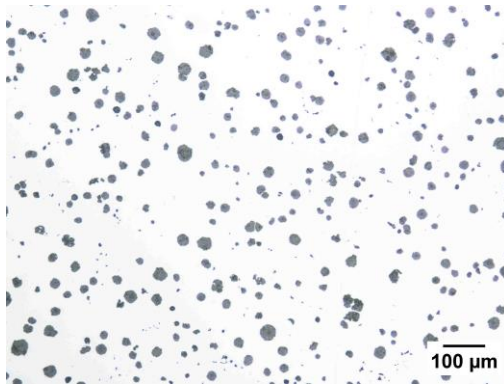


Figura 16 Campione A

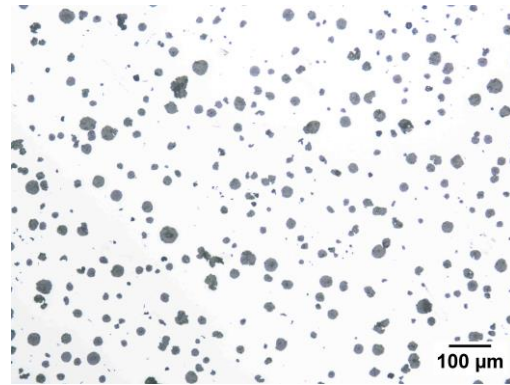


Figura 17 Campione E

I campioni A ed E corrispondono a sezioni di materiale base del provino. L'analisi micrografica è stata svolta con acquisizioni a 100x e barra di scala 100 [μm] prima dell'attacco con acido. Come è possibile evincere dalle figure 16 e 17, oltre che dai dati riportati in tabella 5, la forma assunta dalla grafite nel materiale base è quasi totalmente sferica. Viene confermato dunque che il processo di sferoidizzazione della grafite è stato effettuato correttamente.

Tabella 5 Dati micrografia noduli campione A ed E

Parametro	Campione A	Campione E
N° [noduli/mm ²]	289	273
Nodularità [%]	97,6	99,3
Dimensione (da 0,015 a 0,03 mm)	7	7
Forma	VI	VI
Area Grafite [%]	10,6	9,1

In entrambi i campioni si osserva una distribuzione omogenea dei noduli, con una densità dell'ordine di 270–290 [noduli/mm²]. La nodularità risulta molto elevata, prossima al 100 [%]. Questi risultati indicando una morfologia prevalentemente sferoidale della grafite. Come è possibile visualizzare dalle figure 18 e 19, la dimensione dei noduli risulta prevalentemente distribuita in una classe dimensionale pari a 7 (da 0,015 a 0,03 mm) e una classe di forma pari a VI, confermando la buona qualità del trattamento di sferoidizzazione. La percentuale di area occupata dalla grafite risulta compresa tra circa 9 e 11 [%], valore coerente con una ghisa sferoidale ferritica ad alto silicio.

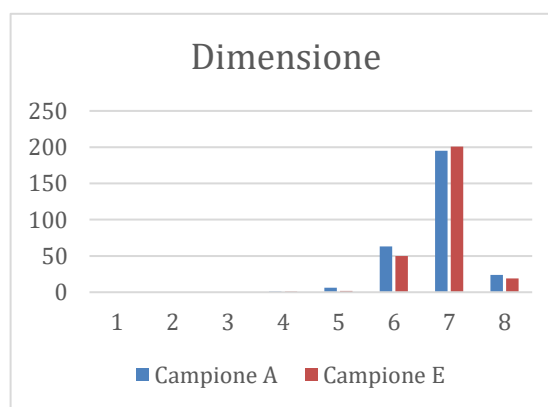
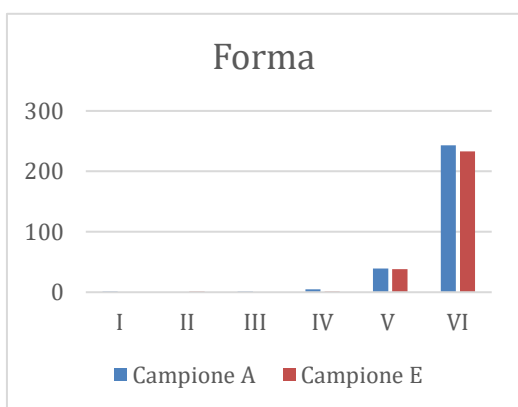


Figura 19 Classe di forma noduli campioni A ed E

Figura 18 Classe dimensionale noduli campioni A ed E

A seguito dell'analisi dei noduli di grafite, sempre con immagini a 100x e barra di scala 100 [μm], è stata valutata la dimensione media del grano ferritico, che compone la totalità della matrice del materiale. L'analisi del grano esclude le dimensioni di ordine superiore a 14, ovvero grani ferritici con un diametro equivalente minore a 2,5 micrometri. Questi grani sono troppo piccoli per essere adeguatamente individuati e quindi non è possibile garantire l'effettiva presenza del grano. Anche in questo caso l'analisi è stata effettuata su entrambi i campioni.

Tabella 6 Tabella riassuntiva micrografia grano campioni A ed E

Parametro	Campione A	Campione E
Diametro medio [μm]	23,48	20,63
Dev. Stand	15,80	16,28
Classe (ASTM E112)	9,05	10,16
Dev. Stand	2,50	2,70

In entrambi i casi la matrice risulta completamente ferritica, in accordo con la composizione chimica del materiale. La dimensione media del grano ferritico è dell'ordine di 20–25 [μm], corrispondente a una classe, secondo ASTM E112, compresa tra 9 e 10, indicativa di una grana medio-fine. I valori medi ottenuti sui due campioni risultano coerenti e suggeriscono una buona uniformità microstrutturale.

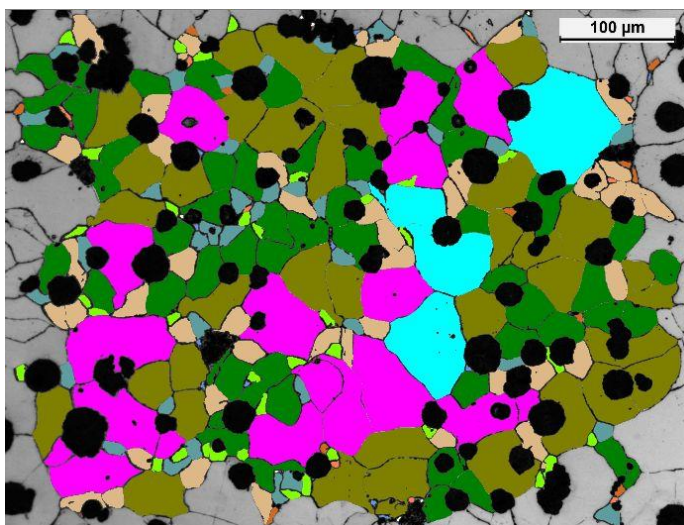


Figura 20 Grani evidenziati per classe campione E

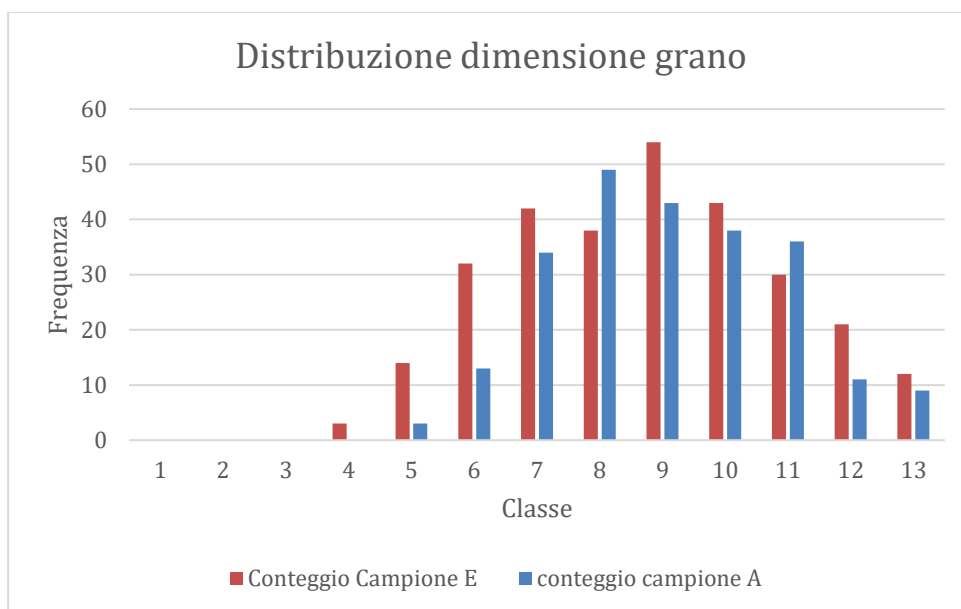


Figura 21 Distribuzione dimensione grano

4.3.5 Campioni B e D

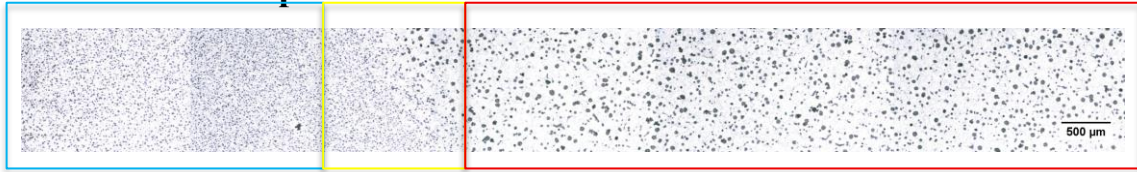


Figura 22 Micrografia Campione B-Zona fusa (Blu), parzialmente fusa (Gialla) e termicamente alterata (Rossa)

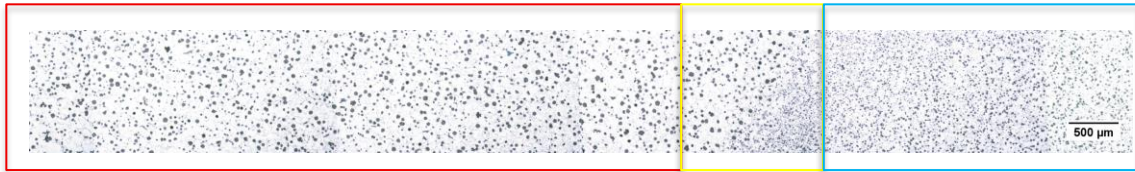


Figura 23 Micrografia Campione D- Zona termicamente alterata (Rossa), parzialmente fusa (Gialla) e fusa (Blu)



Figura 24 Micrografia campione B-zona di transizione

I campioni B e D mostrano tutte le zone caratterizzanti la saldatura ed è quindi possibile notare una differenza netta tra la zona fusa corrispondente al cordone di saldatura e la zona termicamente alterata. In particolare è possibile rilevare nella zona fusa, una dimensione di noduli di grafite minore, accompagnata da una densità di sferoidi inferiore.

La presenza di noduli più piccoli nella zona fusa è dovuta in primo luogo all'utilizzo di bacchette di ghisa con una morfologia di partenza caratterizzata da una dimensione dei noduli minore, poiché nella fase di creazione, le bacchette si sono raffreddate più

rapidamente rispetto al provino base. In secondo luogo, come spiegato precedentemente, il cordone di saldatura e zone limitrofe sono soggette a una velocità di raffreddamento ben più rapida rispetto a quelle subite dal materiale base durante la sua creazione. Viene così sfavorito l'accrescimento dei noduli, che si presentano perciò con una densità maggiore, ma in dimensione minore.

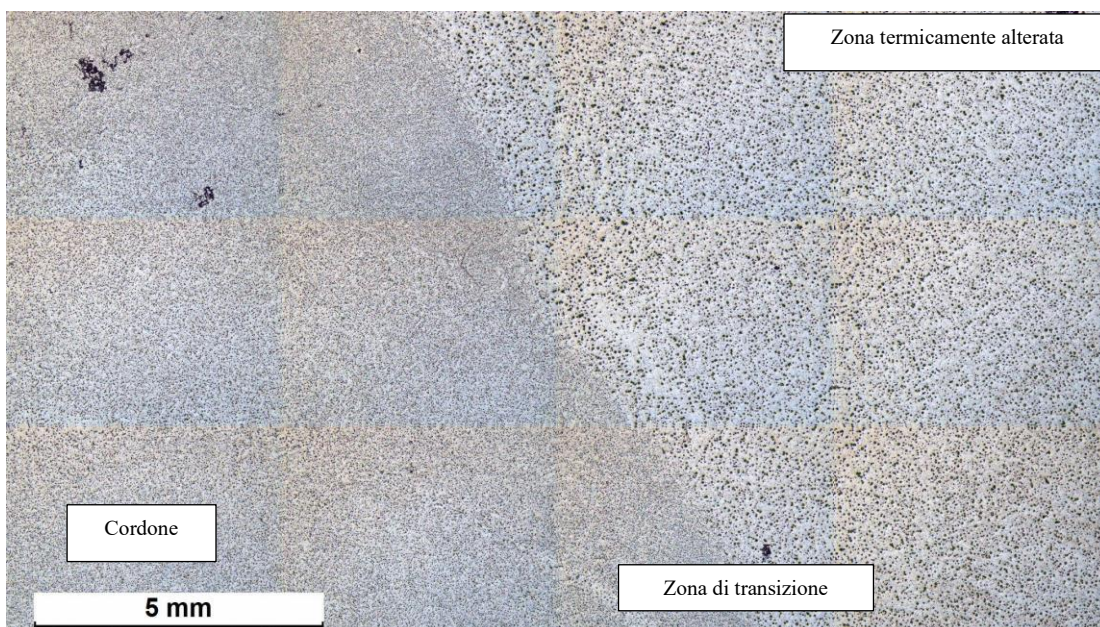


Figura 25 Campione B

L'analisi micrografica dei noduli di grafite, per la zona termicamente alterata, ha portato ai seguenti risultati:

Tabella 7 Dati micrografia noduli campione B e D zona termicamente alterata

Parametro	Campione B	Campione D
N° [noduli/mm²]	182	186
Nodularità [%]	98,9	98,9
Dimensione (da 0,015 a 0,03 mm)	7	7
Forma	VI	VI
Area Grafite [%]	8,8	10,4

In entrambi i campioni la grafite mantiene una morfologia prevalentemente sferoidale, con una nodularità pari al 98,9%. Il ciclo termico di saldatura non ha compromesso in modo significativo la sferoidizzazione. La densità dei noduli risulta dell'ordine di 180–190 [noduli/mm²], inferiore rispetto a quella del materiale base, ma coerente tra i due campioni B e D, confermando una microstruttura grafitica localmente uniforme all'interno della HAZ. La distribuzione della dimensione e della forma dei noduli appartengono prevalentemente a una classe 7 (da 0,015 a 0,03 mm) e VI in entrambi i casi. La percentuale di area occupata dalla grafite risulta compresa tra circa 9 e 10%, valore compatibile con una parziale coalescenza o crescita dei noduli indotta dal ciclo termico.

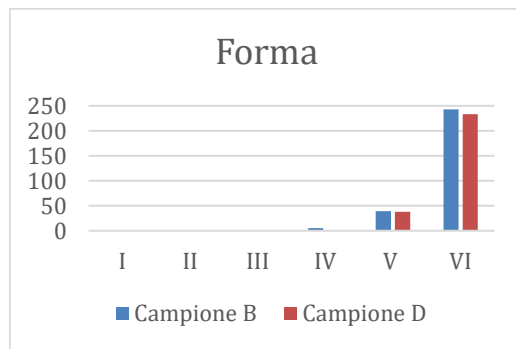


Figura 26 Classe di forma noduli campioni B e D HAZ

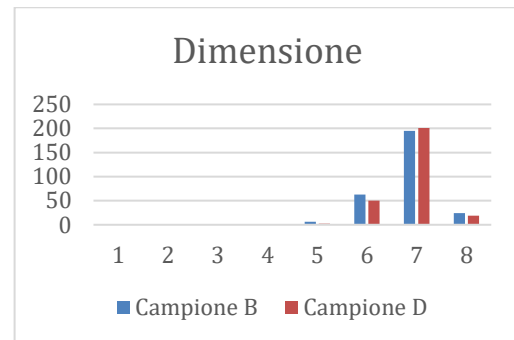


Figura 27 Classe dimensionale noduli campioni B e D HAZ

Successivamente, l'interesse è stato spostato sull'analisi del grano ferritico, eseguita con immagini 100x e barra di scala 100 [μm]. Come descritto precedentemente, sono stati eliminati i dati di dimensione del grano di ordine superiore a 14.

Tabella 8 Tabella riassuntiva micrografia grano campioni B e D zona termicamente alterata

Parametro	Campione B	Campione D
Diametro medio [μm]	18,07	17,45
Dev. Stand	9,99	7,71
Classe (ASTM E112)	9,78	10,5
Dev. Stand	2,15	3,2

Nella zona termicamente alterata la matrice risulta completamente ferritica, in continuità con quanto osservato nei campioni A e D, corrispondenti al materiale base. Il diametro medio del grano ferritico nella HAZ è compreso tra circa 17 e 18 [μm], corrispondente a una classe, secondo ASTM E112, tra 9,8 e 10,5, indicativa di una grana mediamente fine, ma più grande rispetto a quella analizzate per il materiale base nei campioni A ed E.

Nel complesso quindi, la microstruttura ferritica della HAZ risulta coerente con quella del materiale base, pur mostrando le modifiche indotte dalla riformazione del grano a seguito del processo di saldatura.

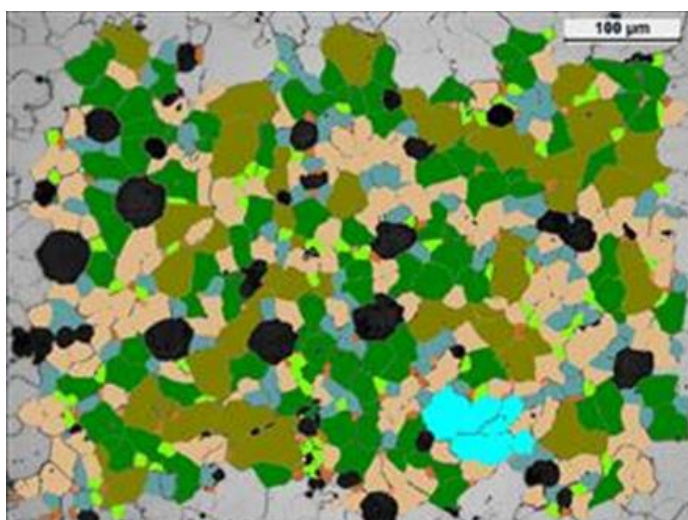


Figura 28 Grani evidenziati per classe campione B

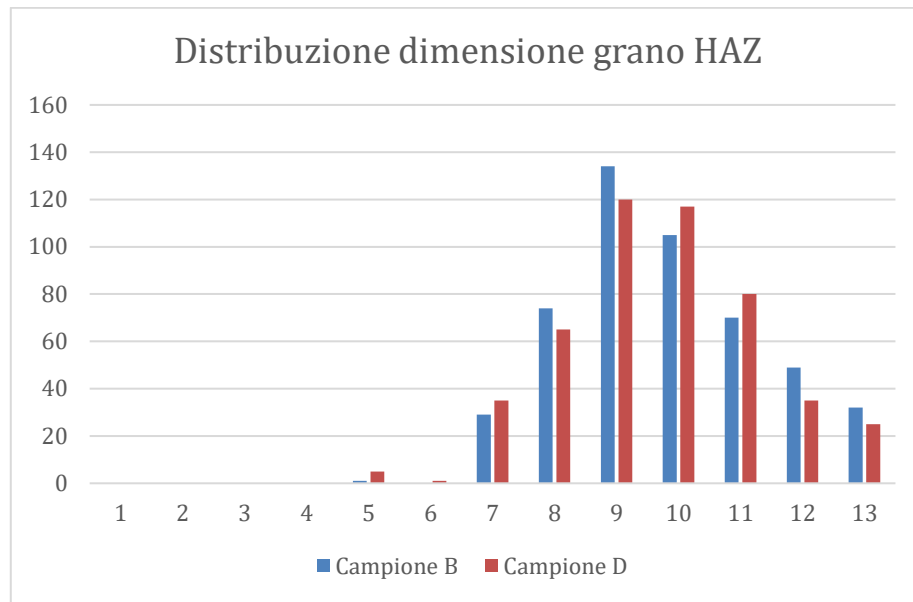


Figura 29 Distribuzione dimensione grano HAZ

Nella zona di transizione, tra il cordone di saldatura e la zona termicamente alterata, è possibile riscontrare inoltre la presenza di carburi come si evince dalle figure sottostanti. La presenza di carburi è stata ampiamente discussa nei capitoli precedenti come eventualità del processo di saldatura. In questo caso, grazie al post trattamento termico, l'estensione di questi composti intermetallici duri è confinata a piccolissime zone, così come la loro numerosità.

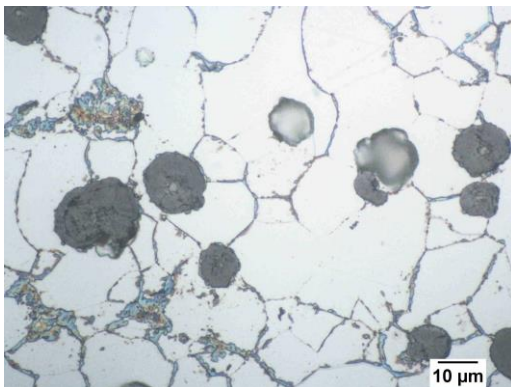


Figura 30 Immagine 1 carburi zona di transizione

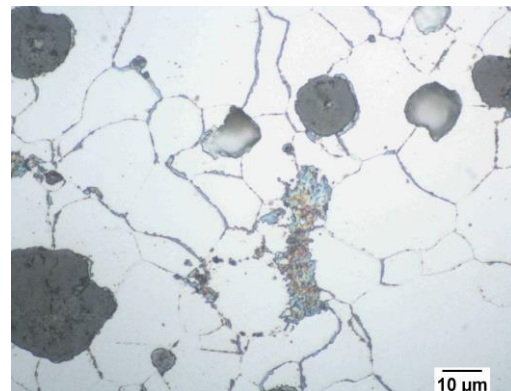


Figura 31 Immagine 2 carburi zona di transizione

4.3.6 Campione C

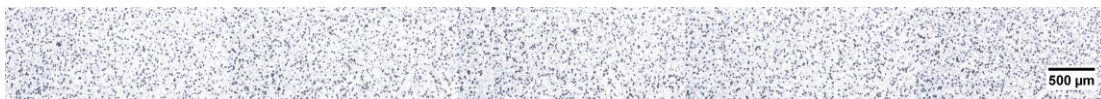


Figura 32 Micrografia Campione C-Zona fusa

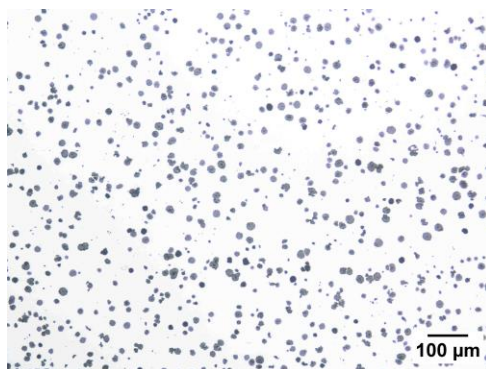


Figura 33 Micrografia analisi noduli

Per quanto riguarda l'analisi del cordone di saldatura, come precedentemente accennato, il numero di noduli in questa zona risulta notevolmente maggiore, accompagnato da una densità di noduli più alta. Qui di seguito l'analisi micrografica dei noduli. L'analisi è stata effettuata utilizzando ingrandimenti 100x e barra di scala 100 [μm].

Tabella 9 Dati micrografia campione C

Parametro	Campione C1	Campione C2
N° [noduli/mm²]	500	480
Nodularità [%]	98	99,2
Dimensione (inferiore a 0,015 mm)	8	8
Forma	VI	VI
Area Grafite [%]	9,8	8,3

In entrambi i campioni la grafite presenta una morfologia prevalentemente sferoidale, con valori di nodularità prossimi al 99%. Questo valore indica che il ciclo termico di saldatura non ha determinato una degradazione significativa della forma dei noduli. Come spiegato precedentemente, il rapido raffreddamento e un materiale d'apporto con morfologia di noduli finemente dispersi hanno portato ad un'elevata densità di noduli compresa tra circa 500 e 480 [noduli/mm²]. La dimensione dei noduli corrisponde ad un valore pari a 8 (inferiore a 0,015 mm) e la forma è classificata come VI in entrambi i campioni, confermando una morfologia regolare. La percentuale di area occupata dalla grafite risulta relativamente contenuta, con valori compresi tra circa 5 e 8%, indicativi di noduli di piccole dimensioni e ben distribuiti. Nel complesso, i risultati evidenziano una microstruttura grafitica fine e omogenea a scala locale nella zona saldata.

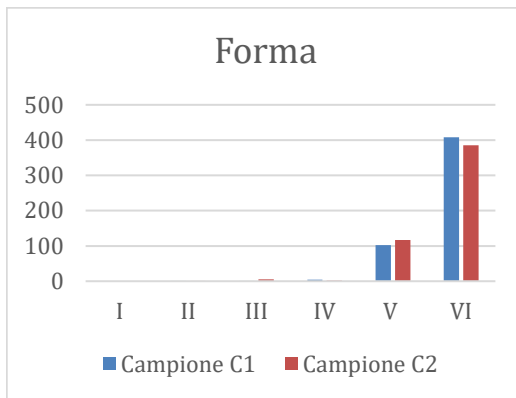


Figura 34 Classe di forma noduli campione C

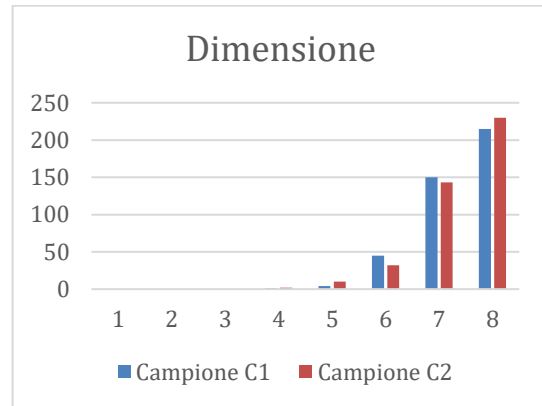


Figura 35 Classe dimensionale noduli campione C

Come per i campioni precedenti, successivamente, è stata analizzata la matrice. I risultati ottenuti sono:

Tabella 10 Tabella riassuntiva micrografia grano campione C

Parametro cordone	Campione C1	Campione C2
Diametro medio [μm]	13,0	14,0
Dev. Stand	7,7	7,4
Classe (ASTM E112)	10,61	10,53
Dev. Stand	3,24	3,55

La matrice risulta completamente ferritica, in accordo con la composizione ad alto contenuto di silicio del materiale e con il trattamento termico post-saldatura adottato. La microstruttura del cordone è caratterizzata da grani ferritici mediamente più fini rispetto a quelli valutati per il materiale base e per la zona termicamente alterata. Il diametro medio del grano è compreso tra circa 13 e 14 [μm], corrispondente a una classe, secondo ASTM E112, pari a circa 10,5–10,6, indicativa di una grana fine.

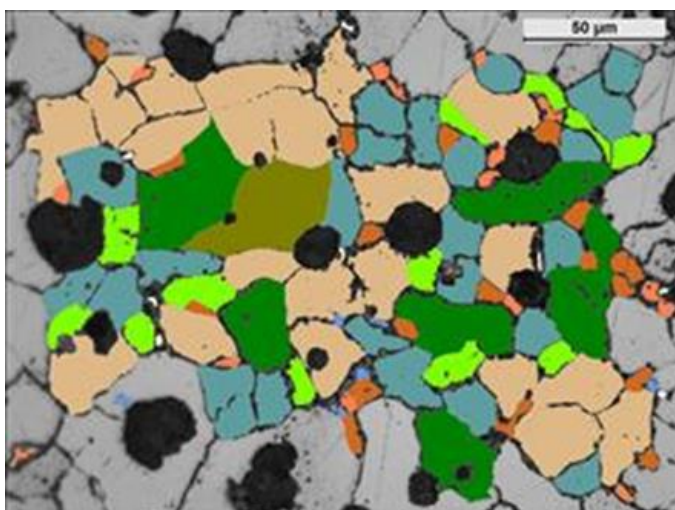


Figura 36 Grani evidenziati per classe campione C

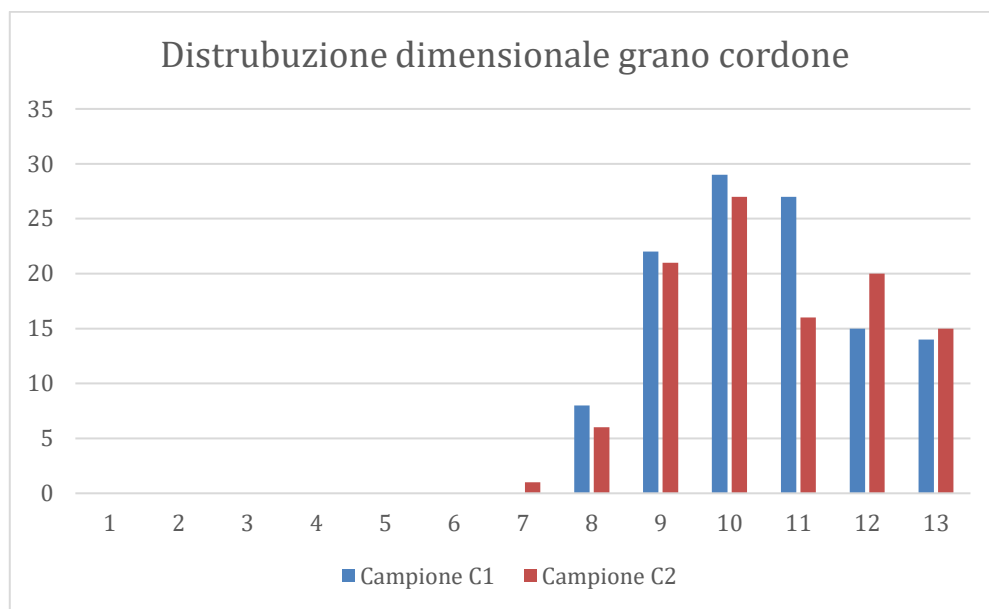


Figura 37 Distribuzione dimensionale grano campione C

4.4 Prova di trazione

4.4.1 Preparazione provini

I provini per la prova di trazione sono stati ricavati utilizzando una sega a nastro ed un tornio a controllo numerico, seguendo la normativa EN ISO 6892-1: 2009. Come detto precedentemente l'obiettivo è osservare il comportamento della zona saldata che è stata mantenuta centralmente al provino di trazione. I provini 1-4 sono stati ricavati dai saggi con cianfrino con profondità 30 [mm], mentre i provini 5 e 6 con profondità 20 [mm].



Figura 38 Sezione 1 provino

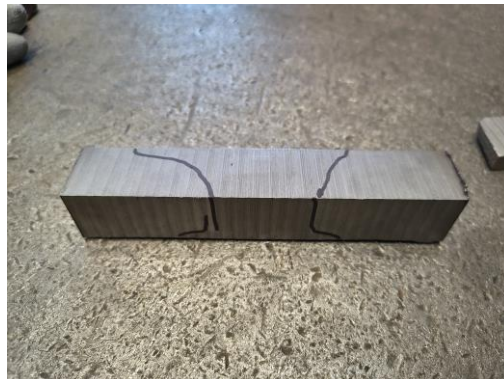


Figura 39 Sezione 2 provino con cordone
(delimitato da linee nere)

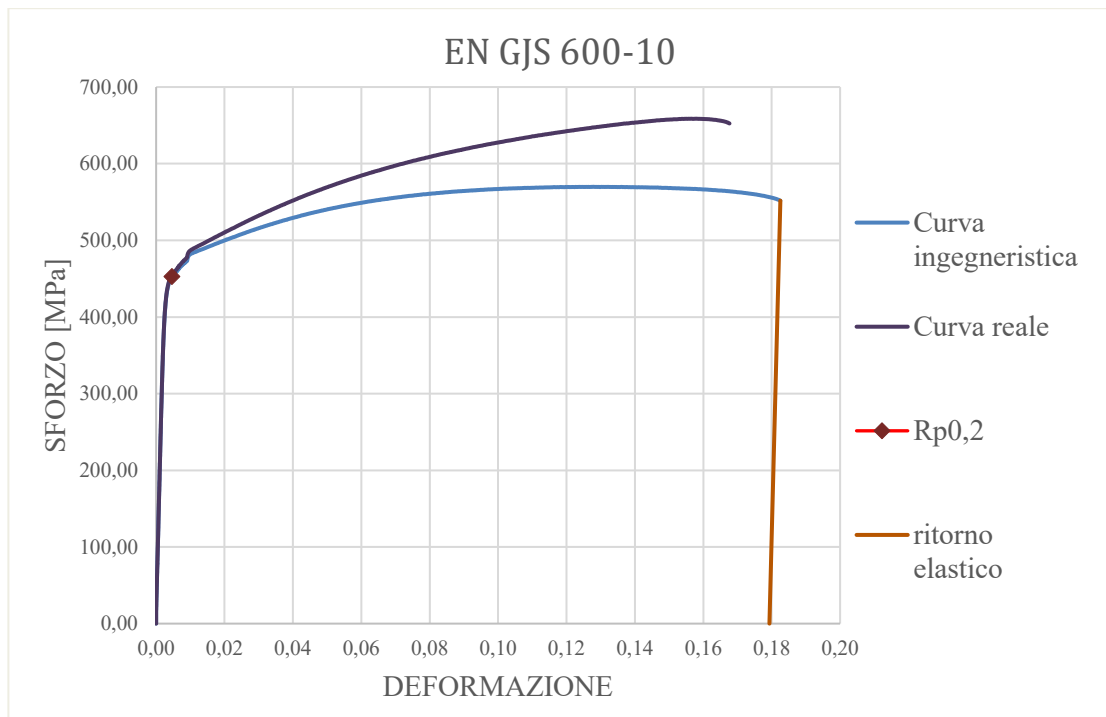


Figura 40 Provino di trazione

4.4.2 Risultati prova di trazione

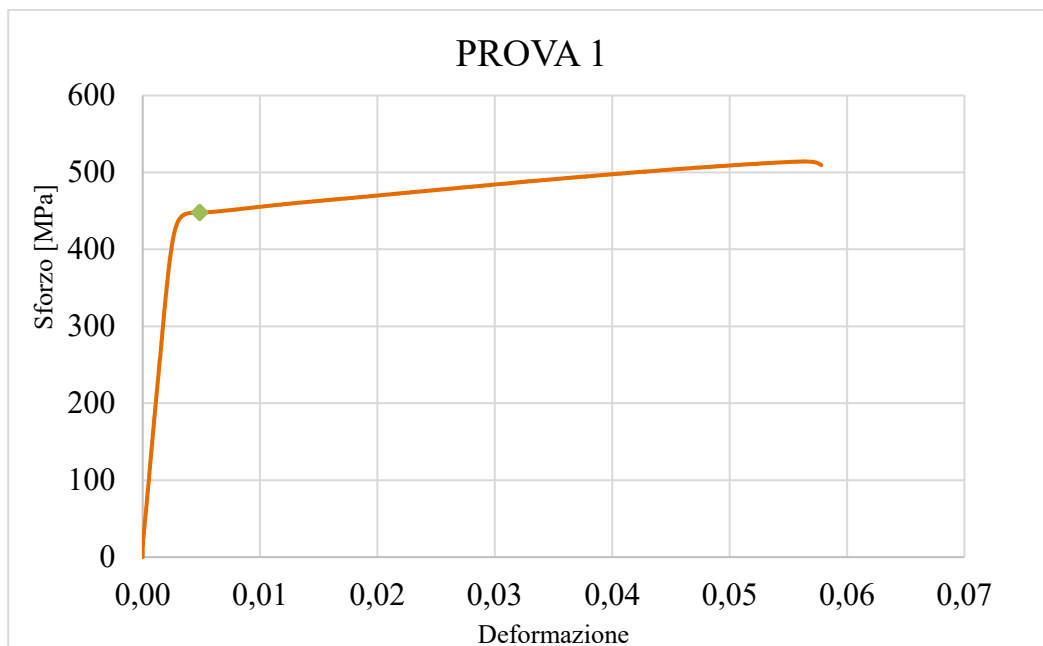
La prova di trazione è stata eseguita secondo la norma EN ISO 6892-1: 2009.

Per la misurazione, l'estensimetro è stato mantenuto per tutta la durata della prova fino a rottura. Di seguito vengono riportate tutte le prove eseguite, a partire da una prova del materiale base.



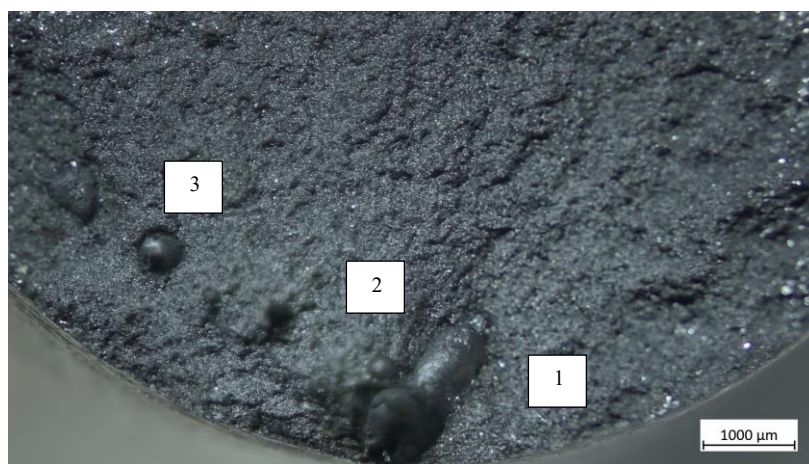
E [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
172689	453	570	17,9

Figura 41 Curve ingegneristica e reale del materiale base.



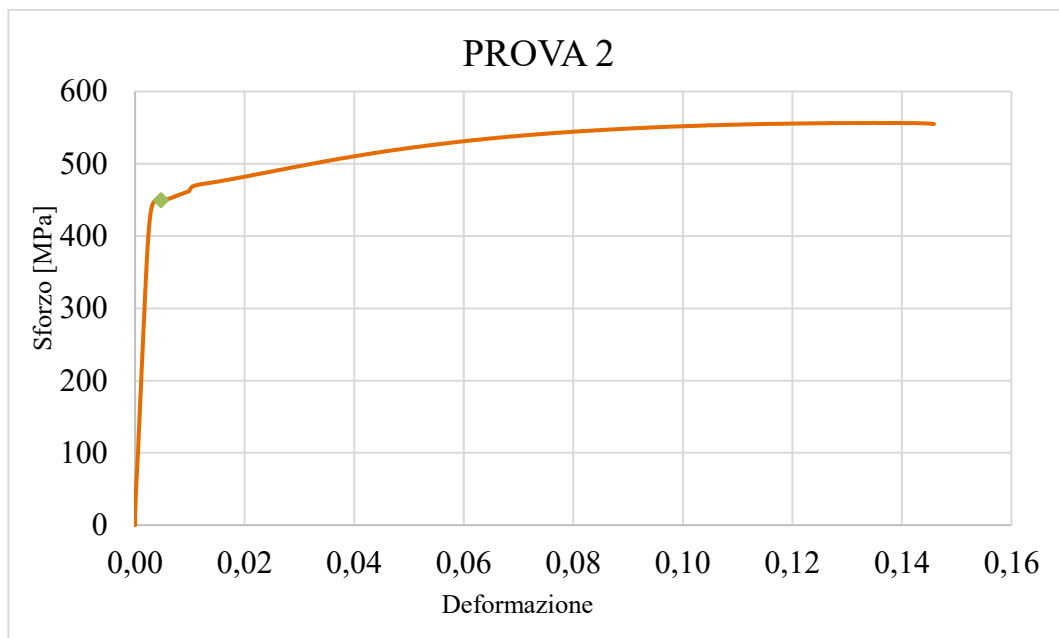
E [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
173787	448	514,30	5,2

Figura 42 Curva ingegneristica di trazione prova 1



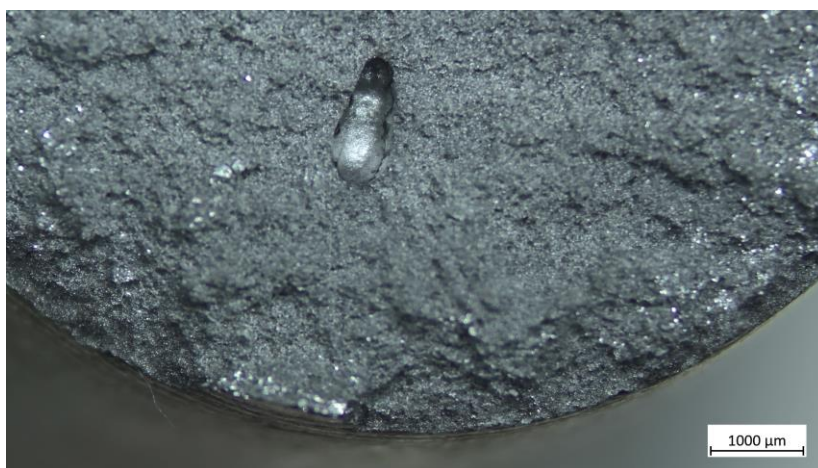
	Soffiatura 1	Soffiatura 2	Soffiatura 3
Area [μm ²]	1160022	67108	178519
Distanza minima dal bordo [μm]	65	973	1040

Figura 43 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 1



E [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
164523	450	557	14,24

Figura 44 Curva ingegneristica di trazione prova 2



	Soffiatura
Area [μm ²]	691719
Distanza minima dal bordo [μm]	2432

Figura 45 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 2

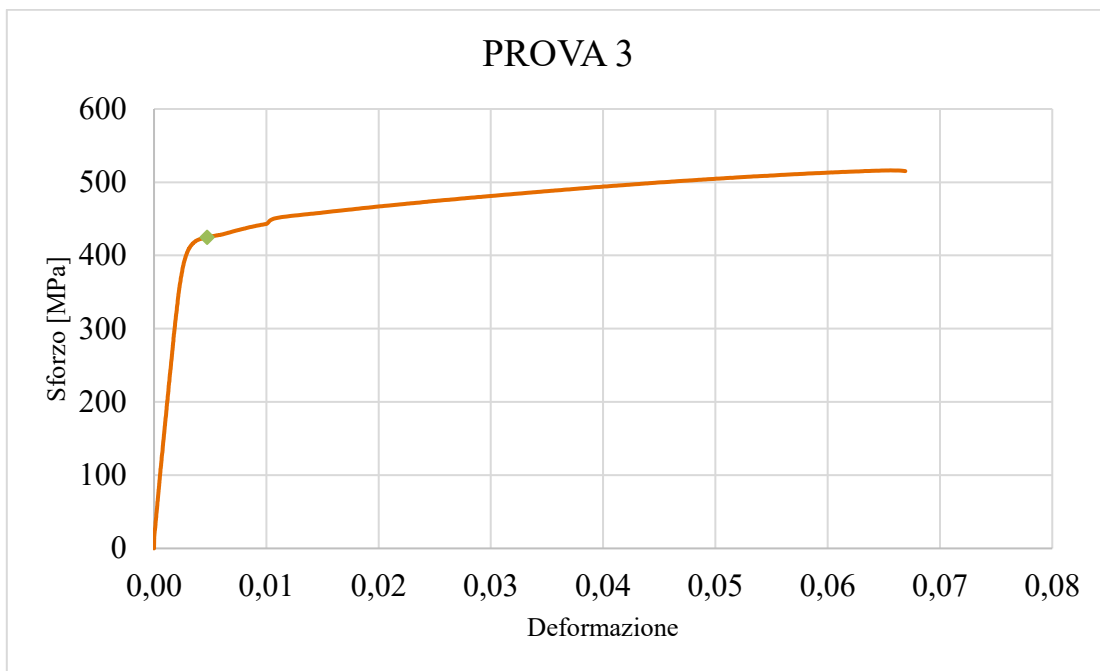
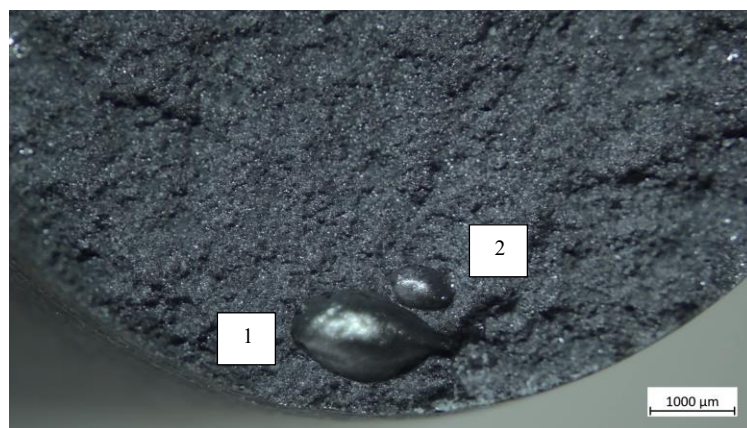
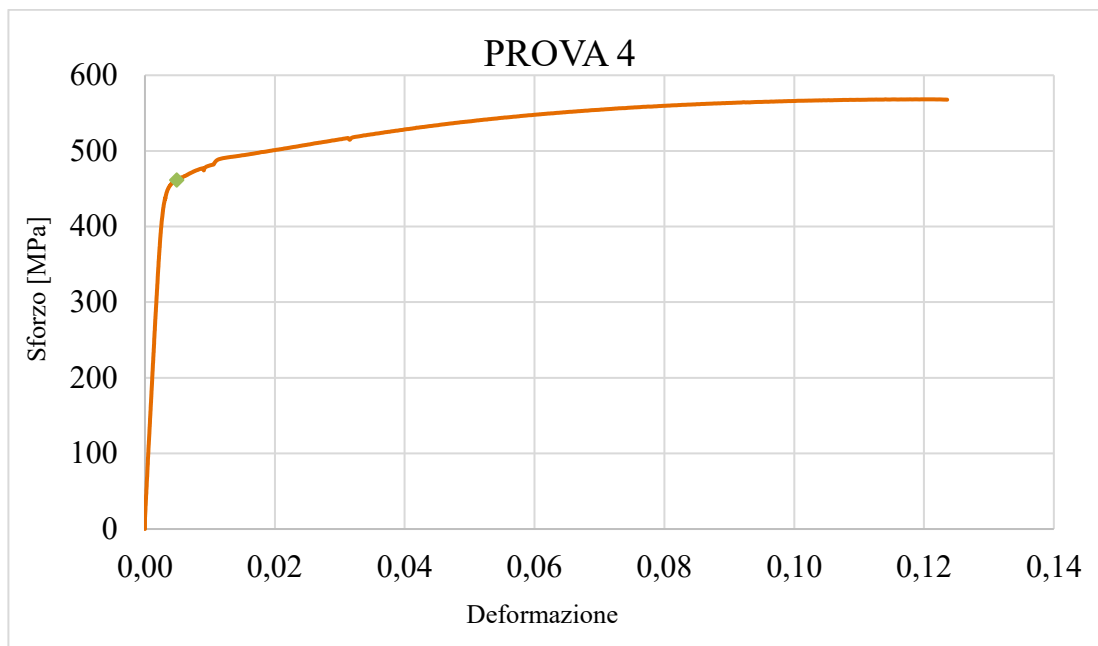


Figura 46 Curva ingegneristica di trazione prova 3



	Soffiatura 1	Soffiatura 2
Area [μm ²]	1441572	313850
Distanza minima dal bordo [μm]	353	1174

Figura 47 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 3



E [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
162679	462	568	12

Figura 48 Curva ingegneristica prova di trazione 4



	Soffiatura
Area [μm ²]	263160
Distanza minima dal bordo [μm]	668

Figura 49 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 4

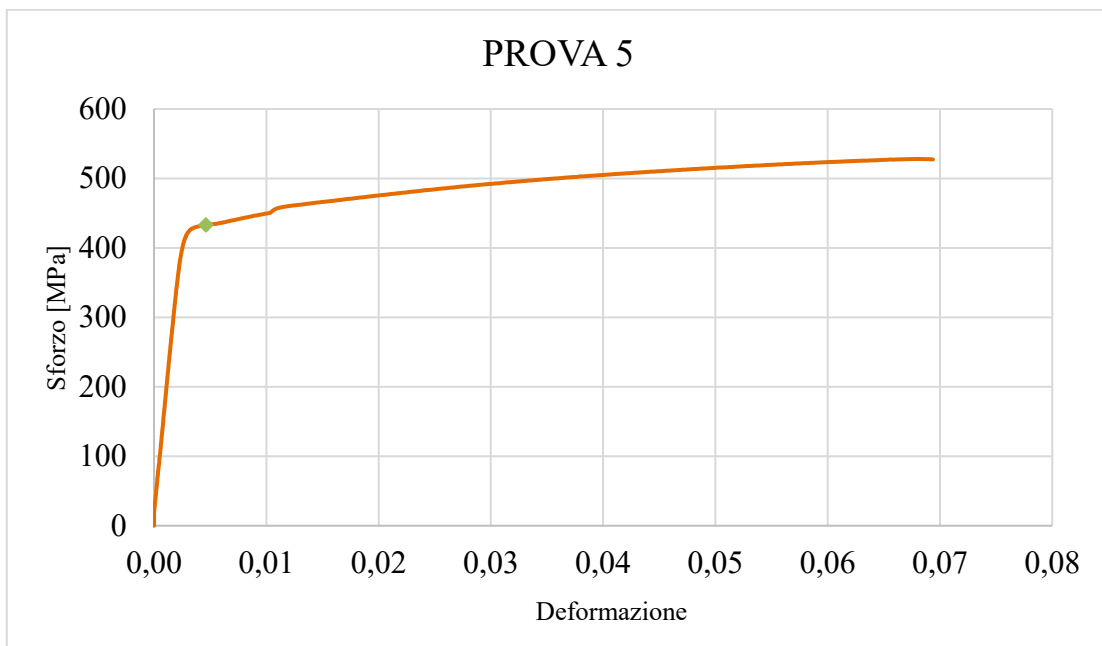
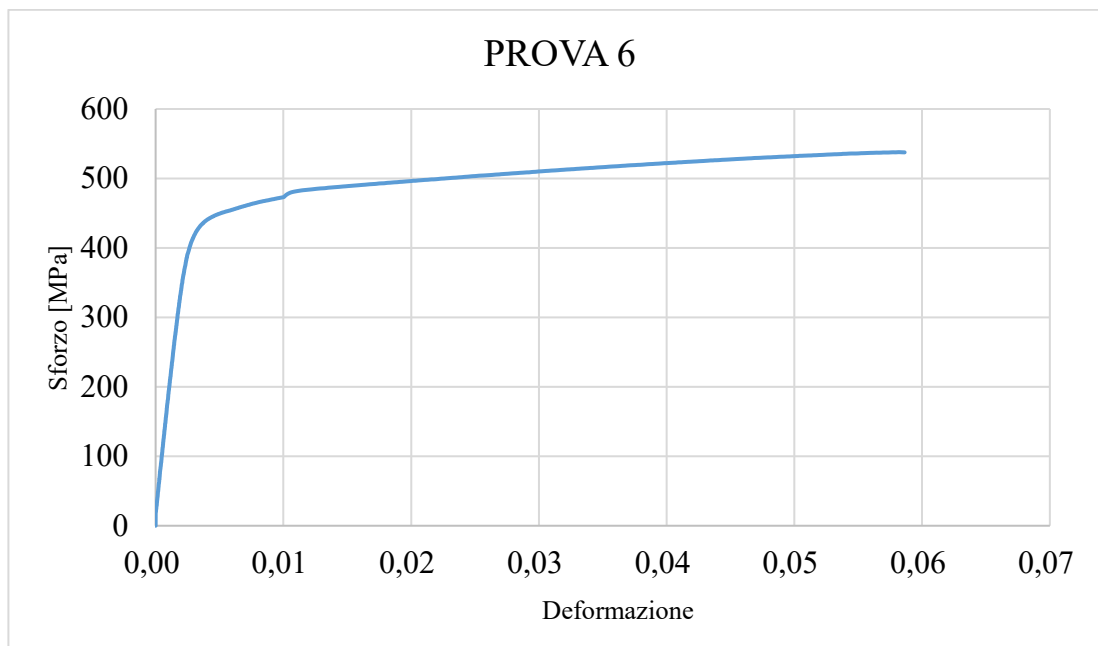


Figura 50 Curva ingegneristica prova di trazione 5



	Soffiatura
Area [μm ²]	3421599
Distanza minima dal bordo [μm]	1901

Figura 51 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 5



E [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
165509	446	538	5,54

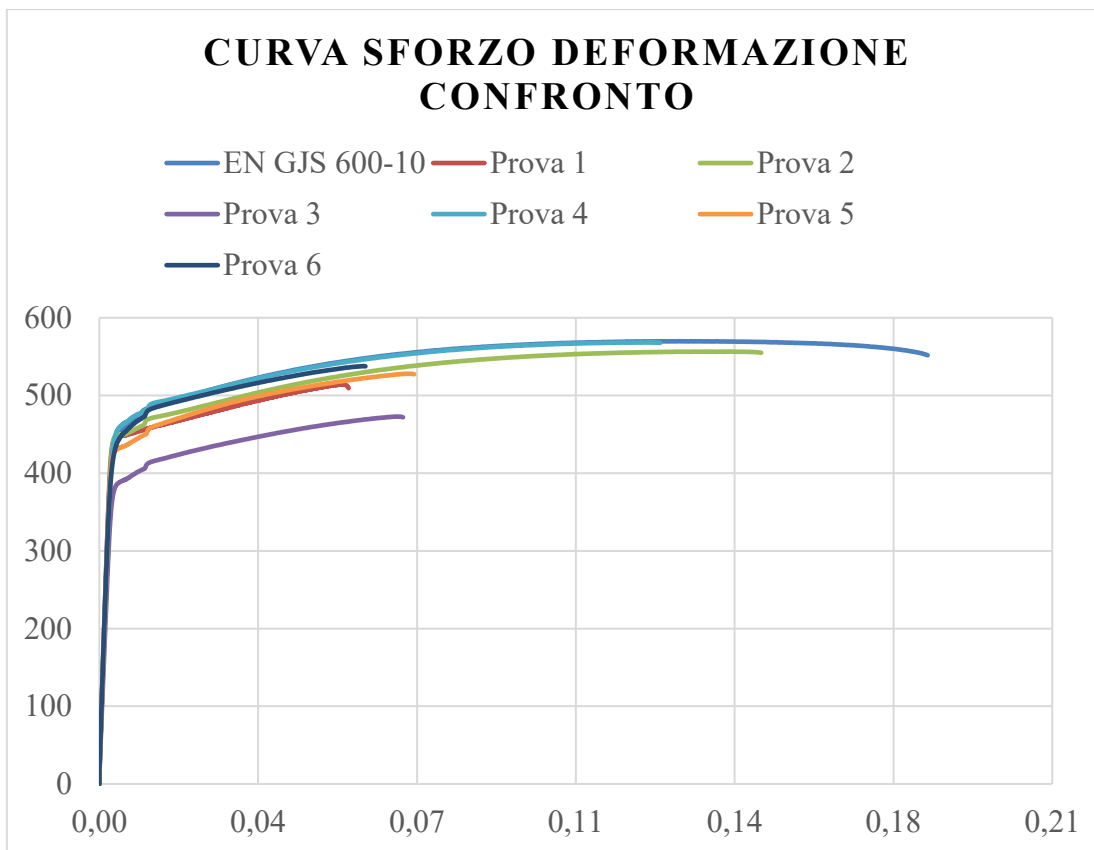
Figura 52 Curva ingegneristica prova di trazione 6



	Soffiatura
Area [μm ²]	202975
Distanza minima dal bordo [μm]	1029

Figura 53 Immagine microscopio zona frattura con soffiature prova 6

4.4.3 Discussione risultati prova di trazione



Le prove di trazione eseguite sui diversi provini hanno portato a risultati piuttosto eterogenei. Tutti i provini presentano la rottura nella fascia del cordone di saldatura, confermando questa zona la più delicata dell'intero provino. Dalle prove è possibile evidenziare infatti come la presenza di soffiature comprometta i risultati delle prove di trazione, determinando una riduzione sia della tensione massima sopportabile sia dell'allungamento a rottura. Il comportamento elastico iniziale risulta invece pressoché equivalente al materiale originale, indicando come le soffiature non influiscono sulla risposta elastica del materiale. La presenza di cavità, oltre a diminuire la sezione utile circolare, favorisce la rottura del provino a carichi minori comportandosi da iniziatore di cricca.

Analizzando nel dettaglio le diverse prove è possibile notare come, a meno della prova 3, i cui risultati sono nettamente inferiori a causa di una cavità di dimensioni notevoli, i risultati di tensione di snervamento risultino confrontabili con quelli del materiale base. In tali casi, la riduzione del limite di snervamento risulta contenuta di poche decine di MPa, a conferma del fatto che la risposta elastica iniziale del materiale non è significativamente influenzata dalla presenza di difetti.

Al contrario, il carico di rottura e gli allungamenti sono nettamente inferiori per le prove 1, 5 e 6. In questi casi i valori di deformazione a rottura risultano limitati, attestandosi a valori vicini al 6% e le tensioni massime intorno ai 500-530 [MPa].

Al contrario, le prove 2 e 4 mostrano risultati complessivamente confrontabili con quelli del materiale base di riferimento. L'analisi delle superfici di frattura di tali provini evidenzia infatti la presenza di cavità di dimensioni contenute e prevalentemente di forma sferica, che risultano meno critiche dal punto di vista meccanico. La geometria regolare e la limitata dimensione di tali difetti contribuiscono a ridurre l'intensità delle concentrazioni di tensione locali, consentendo al materiale di esprimere un comportamento meccanico più vicino a quello atteso per una ghisa sferoidale priva di difetti macroscopici.

4.4.4 Analisi superfici frattura

Al fine di approfondire i meccanismi di frattura responsabili del comportamento meccanico osservato durante le prove di trazione, è stata condotta un'analisi delle superfici di frattura dei provini mediante microscopia elettronica a scansione (SEM), utilizzando sia elettroni secondari (SE) sia elettroni retro diffusi (BSE).

L'analisi è stata condotta su due provini rappresentativi di differenti condizioni di difettosità del cordone di saldatura. In particolare, un primo provino presenta una cavità di dimensioni significative in corrispondenza della zona di frattura, mentre il secondo provino risulta privo di cavità macroscopiche evidenti, pur mostrando al suo interno la presenza della radice della saldatura.

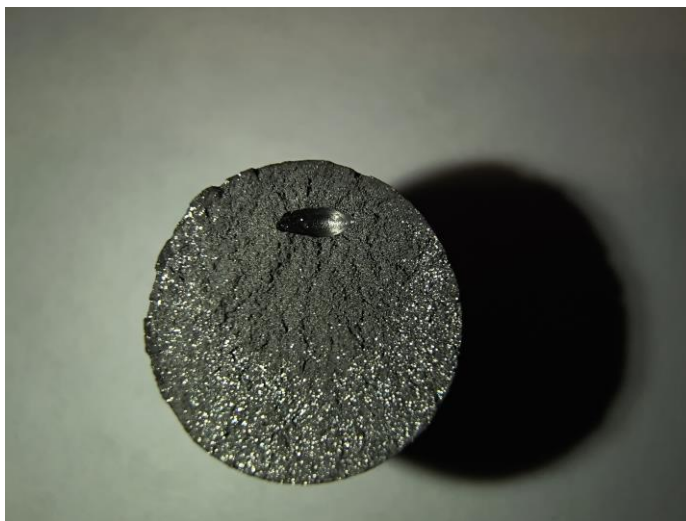


Figura 54 Superficie di frattura provino prova 5

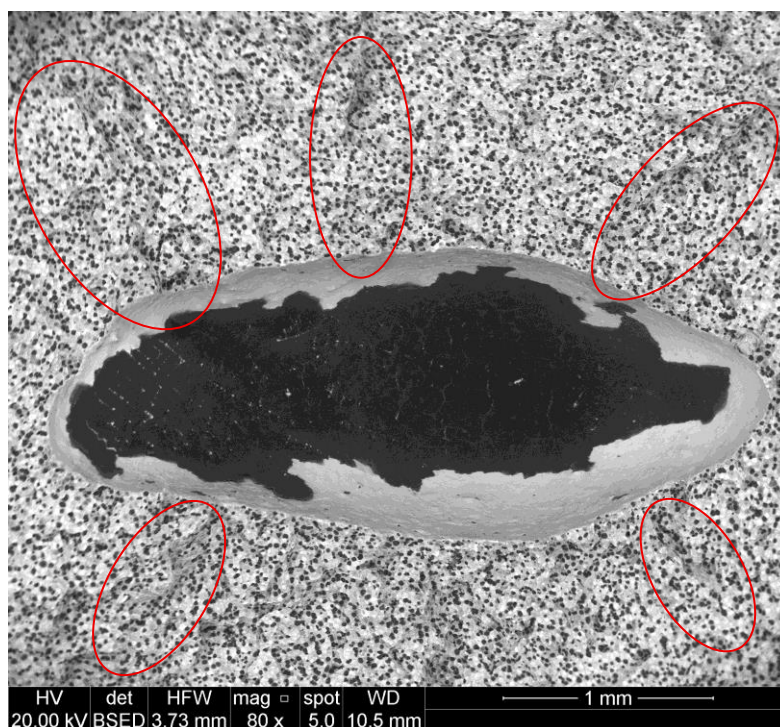


Figura 55 Micrografia SEM con elettroni retro diffusi prova 5

Dalle immagini sopra riportate è possibile individuare due modalità di rottura distinte sulla superficie di frattura: una di tipo duttile, caratterizzata da un contrasto più scuro, e una di tipo fragile, riconoscibile per il contrasto più chiaro. Nella seconda figura è possibile notare le linee di frattura originate dalla soffiatura che si sono propagate durante la rottura del provino, confermando il difetto interno come innesco di rottura.

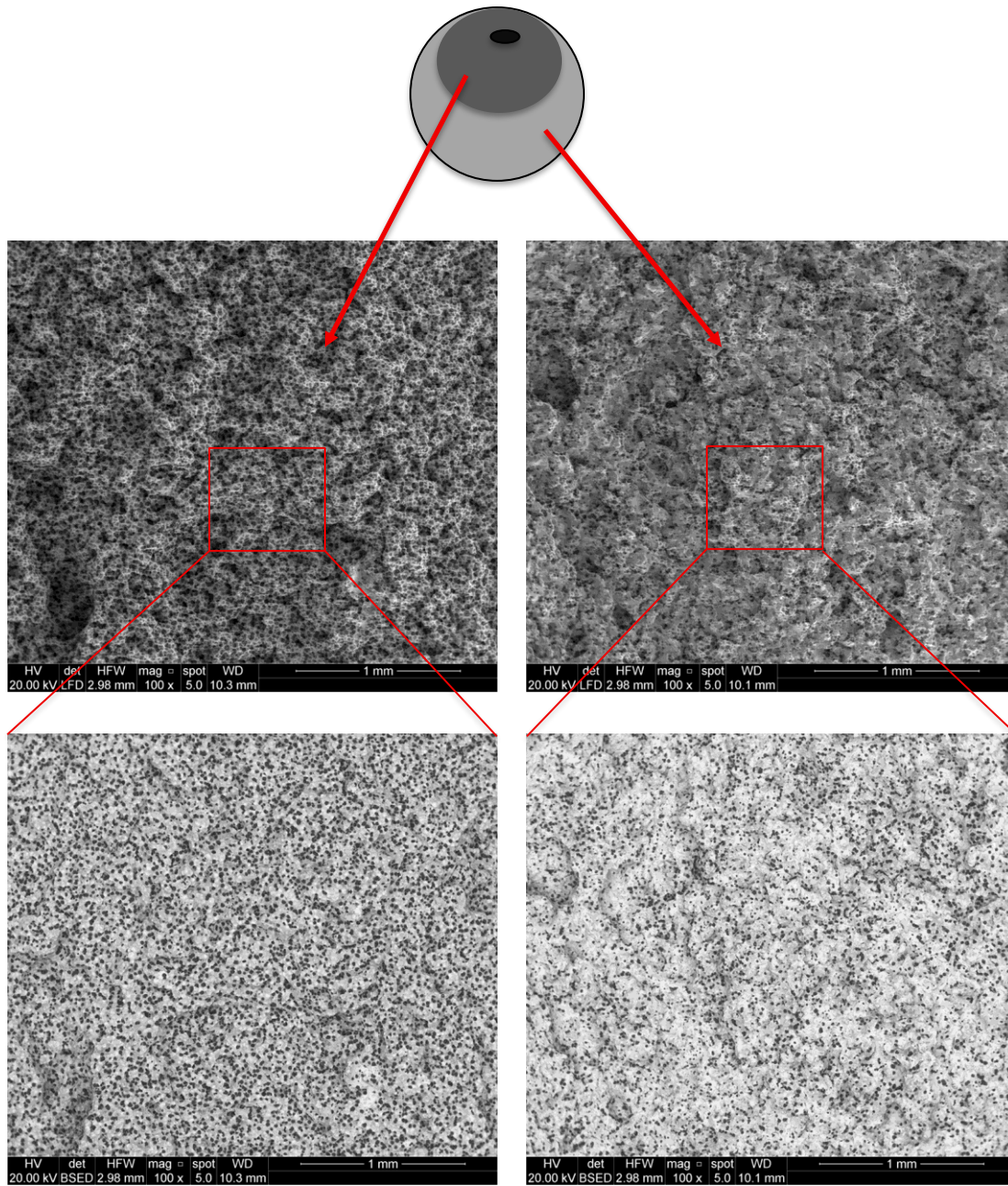


Figura 56 Zone frattura duttile fragile prova 5

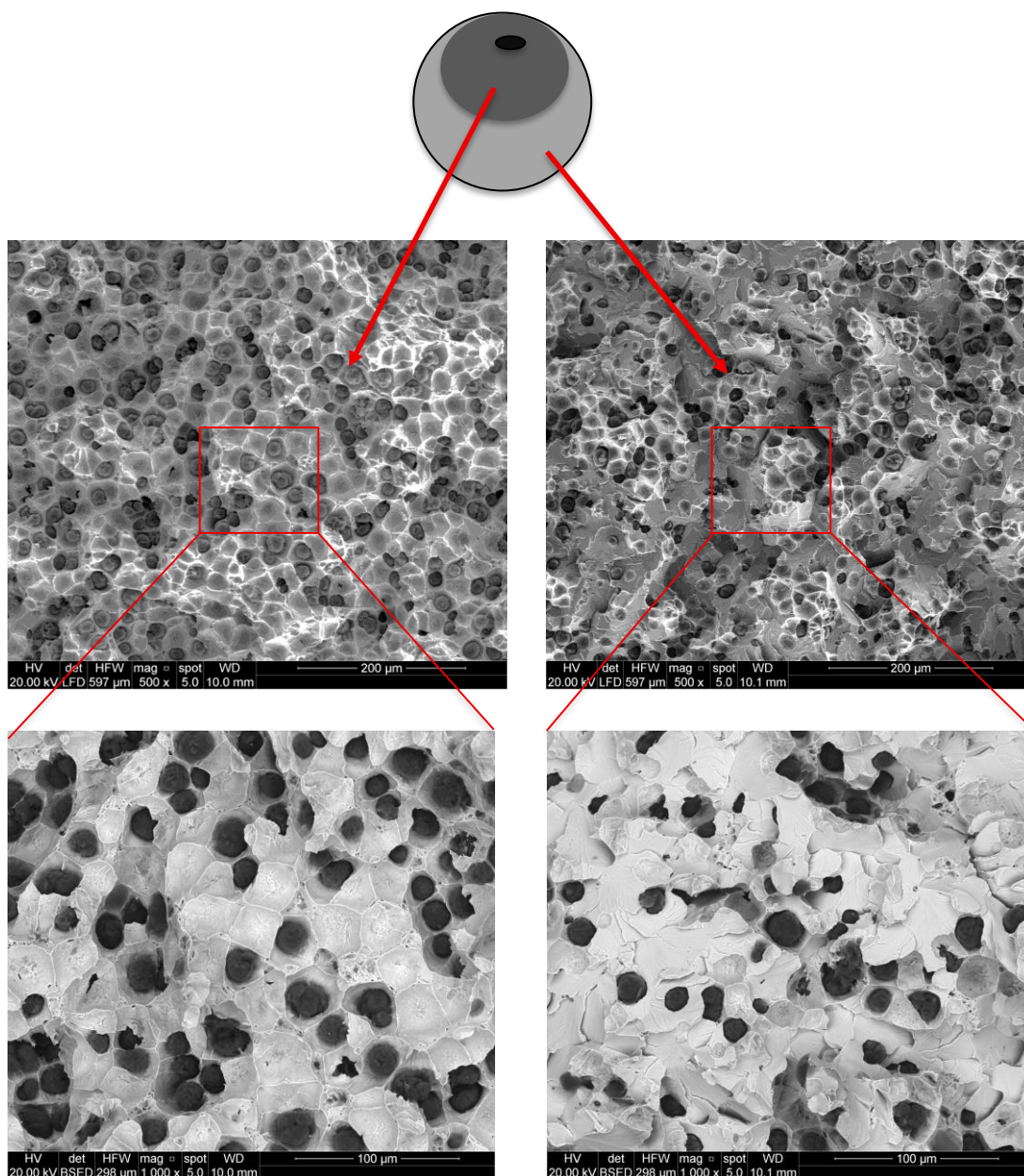


Figura 57 Zona frattura duttile fragile provino 5

Dalle micrografie sopra riportate è possibile visualizzare la zona duttile a sinistra, ove la matrice ferritica si deforma plasticamente presentando una morfologia tridimensionale caratterizzata da superfici irregolari e la zona di frattura fragile caratterizzata invece da una superficie relativamente piana. La frattura duttile, coinvolgendo più piani, intercetta un numero di noduli maggiore, mentre nella zona

fragile la propagazione della cricca avviene lungo percorsi preferenziali, con un minore coinvolgimento volumetrico della matrice. Da qui la differenza nella densità di noduli delle micrografie.



Figura 58 Superficie di frattura provino prova 6

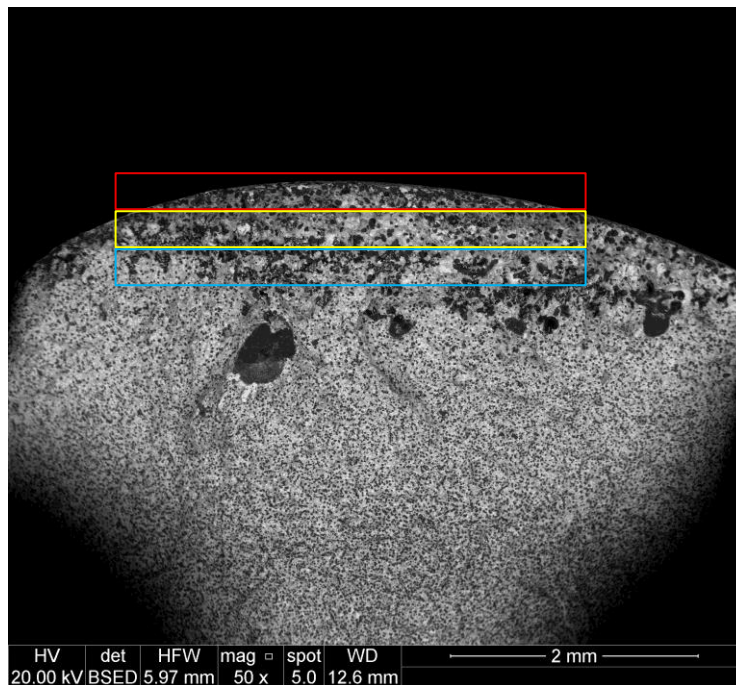


Figura 59 Micrografia SEM con elettroni retro diffusi prova 6

Anche in questo caso è possibile individuare le due modalità di rottura distinte che hanno caratterizzato tutti i provini analizzati. In questo caso particolare, il provino

analizzato presenta la radice del cordone di saldatura. Quindi sono presenti nel riquadro rosso la parte di materiale base, nel riquadro giallo, si osserva la transizione tra materiale base e cordone, mentre nel riquadro blu, invece è presente il cordone di saldatura.

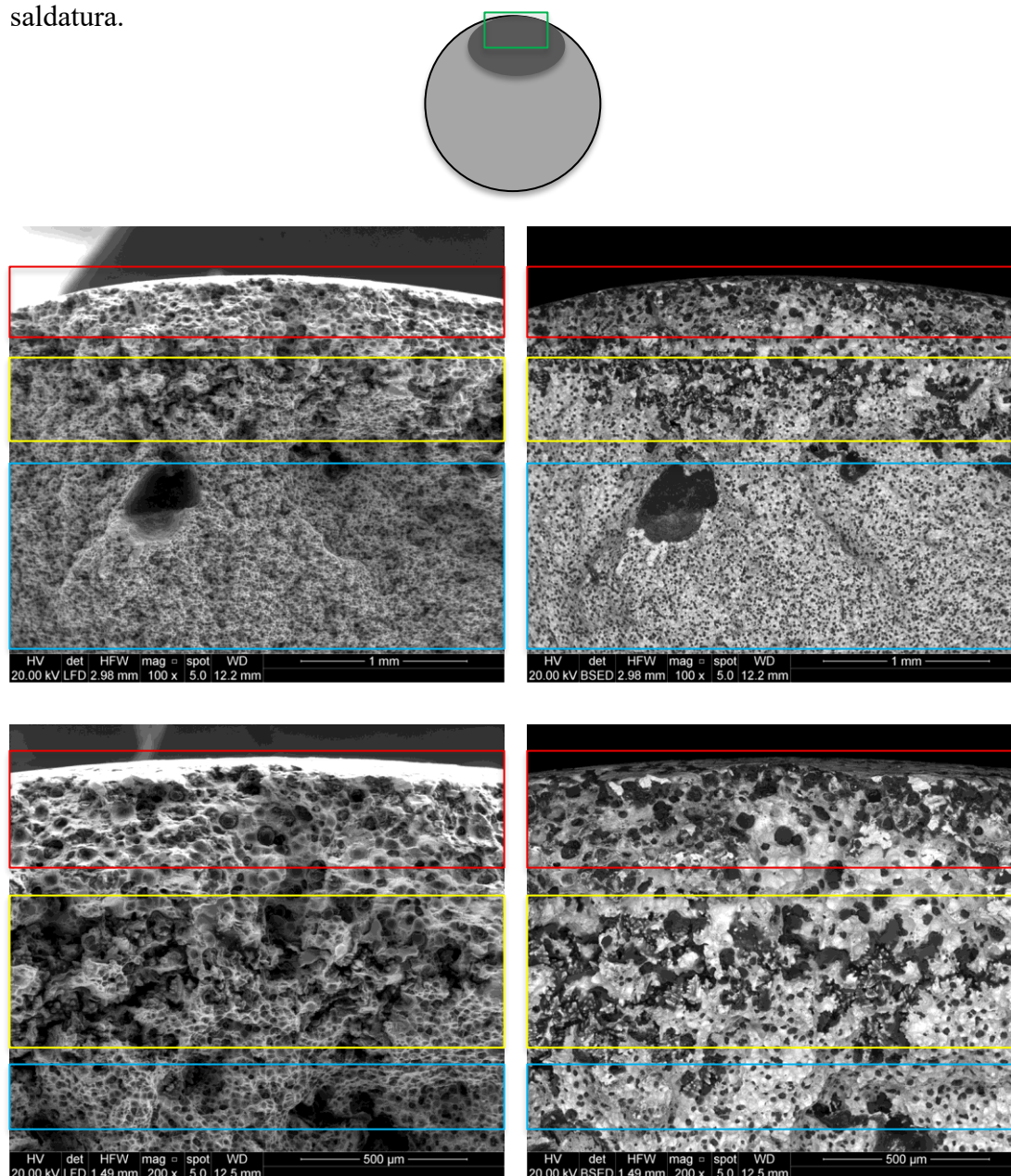


Figura 60 Zona frattura e radice del cordone di saldatura prova 6

Come si può notare dalle micrografie soprastanti, è presente una netta distinzione, già riscontrata nelle precedenti micrografie (capitolo 4.3), in termini di dimensione dei noduli di grafite, che distingue il cordone di saldatura dal materiale base. Nella zona

rossa infatti si possono indentificare dei noduli di dimensione maggiore, rispetto al cordone di saldatura, dove si riscontra una grandezza di noduli minore.

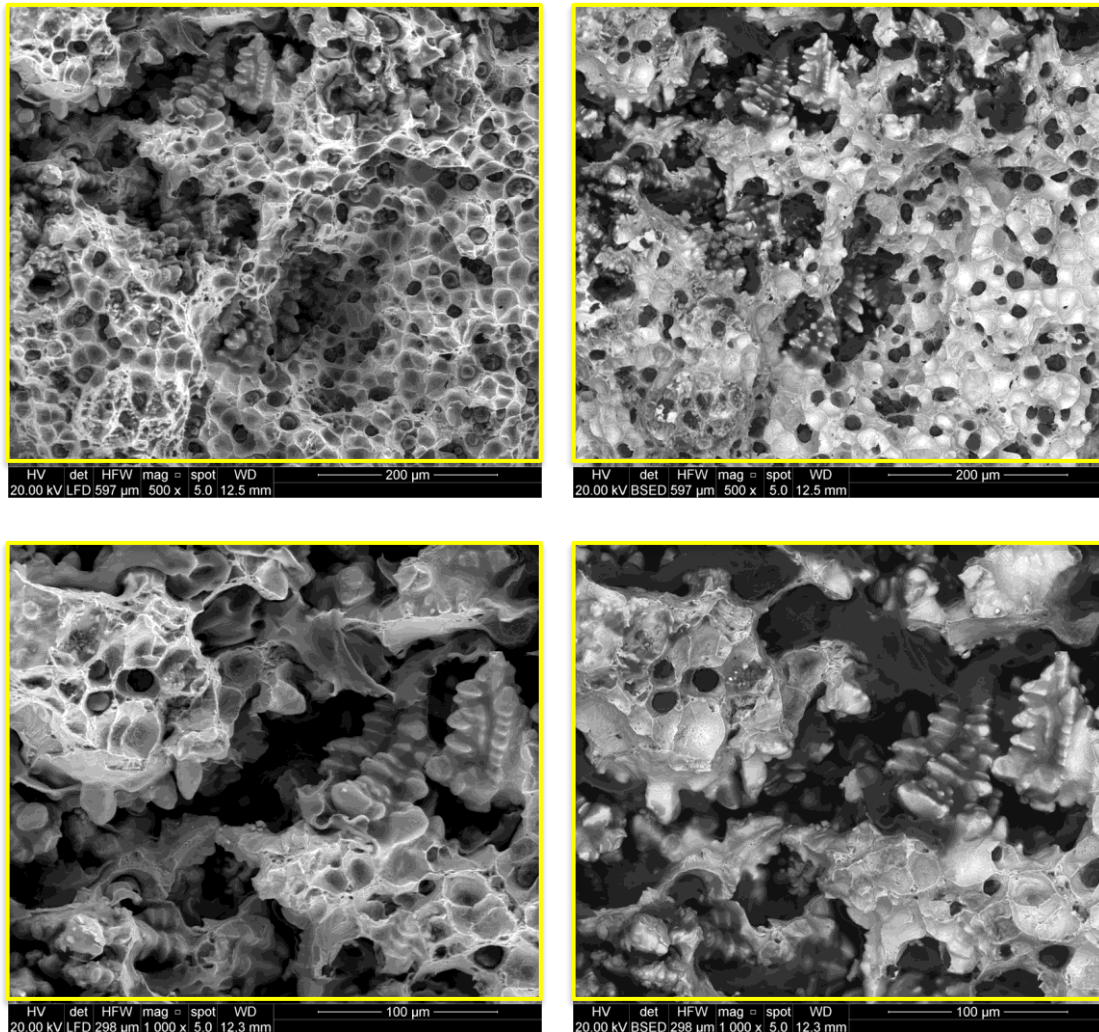


Figura 61 Zona di transizione tra materiale base e cordone prova 6

Ingrandendo la zona di transizione, evidenziata in giallo, tra il cordone di saldatura e materiale base, si possono identificare delle strutture di tipo dendritico accompagnate da porosità. Tale conformazione microstrutturale può essere ricondotta a molteplici cause tra cui una concentrazione di calore eccessiva dovuta a ripetute passate

concentrate nella zona ristretta del vertice del cianfrino, nonché alla turbolenza del bagno di fusione originata dalla fiamma ossiacetilenica.

4.4.5 Prova di durezza

La prova di durezza è stata eseguita secondo la norma UNI EN ISO 9015-1, utilizzando il metodo Vickers in accordo con la UNI EN ISO 6507. Le impronte sono distribuite trasversalmente tra: zona termicamente alterata, zona di transizione e cordone di saldatura. Il campione analizzato nella prima fase corrisponde al campione B, che include tutte le zone caratteristiche la saldatura. Sono stati analizzati due profili di durezza distinti attraverso prove micro-Vickers con carico di 0,5 [kg]. La distanza tenuta tra una prova e l'altra a 1 [mm] nella zona del cordone e termicamente alterata, mentre nell'intorno della zona di transizione le prove sono ad una distanza di 0,5 [mm].

Tabella 11 Durezze micro Vickers

MICRO VICKERS Provino B			
Passo	Profilo 1	Passo	Profilo 2
	HV0.5		HV0.5
0	201	0	188
1000	197	1000	200
2000	195	2000	202
3000	200	3000	192
4000	193	4000	199
5000	199	5000	201
6000	198	6000	203
7000	202	7000	200
8000	207	7500	214
9000	192	8000	198
10000	199	8500	185
11000	208	9000	197
11500	201	9500	175
12000	191	10000	194
12500	200	11000	218
13000	200	12000	224
14000	195	13000	214
15000	215	14000	212
16000	218	15000	212
17000	213	16000	207
18000	217	17000	214

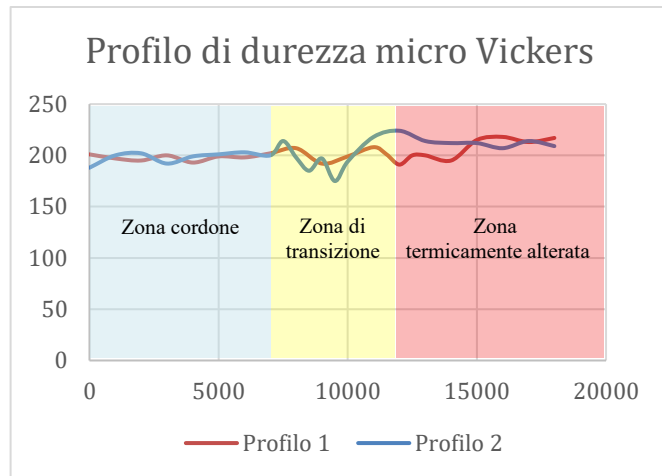


Figura 63 Grafico profili durezze micro Vickers

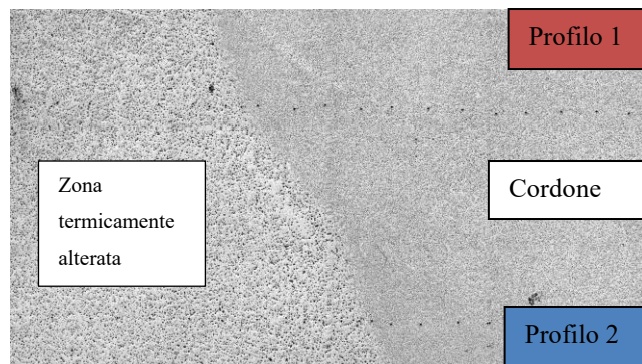


Figura 62 Immagine con profili di durezza

L'andamento delle prove di micro durezza risulta più che regolare sia nella zona del cordone, così come nella zona termicamente alterata. I risultati mostrano dei valori di durezza inferiori nella zona del cordone, che si attestano intorno a 190-200 HV, mentre nella zona termicamente alterata sono mediamente più alti, con valori tra 200-220HV. Nella zona di transizione tra cordone e HAZ sono presenti oscillazioni locali dei valori di micro-durezza, riconducibili al forte gradiente termico e alla conseguente eterogeneità microstrutturale. Tali variazioni si possono quindi attribuire alla presenza localizzata di carburi intermetallici, a differenze locali nella dimensione del grano ferritico e alla distribuzione dei noduli di grafite, che influenzano la risposta meccanica misurata dalla prova micro-Vickers.

Successivamente, al fine di valutare la macrodurezza del materiale e ottenere una caratterizzazione complessiva delle diverse zone del giunto saldato, è stata condotta una seconda analisi mediante prove di durezza macro-Vickers, applicando un carico pari a 100 kg. Le prove sono state eseguite su diversi campioni rappresentativi delle principali regioni del giunto: oltre al campione B e le zone sopracitate, sono stati analizzati i campioni E e C, rappresentativi rispettivamente del materiale base e del cordone di saldatura. Nel caso del provino C si sono eseguite 4 prove di durezza valutando le distinte passate di saldatura. Tale scelta ha permesso di confrontare i valori di durezza ottenuti nelle differenti condizioni microstrutturali, riducendo l'influenza delle variazioni locali e fornendo una valutazione più globale del comportamento meccanico del materiale.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove di macrodurezza, che consentono di evidenziare le differenze di durezza tra le diverse zone analizzate e di metterle in relazione con le modifiche microstrutturali indotte dal ciclo termico di saldatura e dal successivo trattamento termico.

Tabella 12 Prove Macro-Vickers provino B

Provino B								
Cordone			Zona di transizione			Zona termicamente alterata		
D1	D2	HV100	D1	D2	HV100	D1	D2	HV100
1,00	1,10	183	1,00	1,00	185	0,97	0,97	197
1,00	1,00	185	1,00	1,00	185	0,98	0,99	191
0,90	1,00	184	1,00	1,00	185	0,98	0,98	193
Valore medio		184	Valore medio		185	Valore medio		194

Tabella 14 Prova macro-Vickers campione E

Campione E		
D1	D2	HV100
0,96	0,96	201
0,96	0,95	203
0,96	0,95	203
Valore medio		202

Tabella 13 Prova macro-Vickers campione C

Campione C		
D1	D2	HV100
Passata 1		
1,00	0,99	187
1,00	1,00	185
Valore medio		186
Passata 2		
1,00	0,99	187
0,99	0,99	189
Valore medio		188
Valore medio totale		187



Figura 64 Profili durezza Vickers

Le prove di macro durezza eseguita nel campione B hanno confermato i risultati ottenuti nelle precedenti prove di micro durezza, ribadendo una durezza complessiva maggiore per la zona termicamente alterata rispetto al cordone di saldatura.

L'analisi del campione C, denota un leggero aumento dei valori di durezza complessivi rispetto al campione B della parte di cordone. Tale differenza può essere attribuita a una maggiore omogeneità del materiale analizzato e alla ridotta influenza delle zone di transizione, pur rimanendo i valori pienamente coerenti con quanto osservato nei profili di micro-durezza. Inoltre, non sono presenti evidenti differenze tra la prima e seconda passata di saldatura.

Per il campione E si rilevano dei valori di durezza mediamente maggiori, in concordanza con i risultati di micro durezza ottenuti nella prima prova e della struttura microstruttura rilevata nelle analisi precedenti

I risultati ottenuti dalle prove di durezza, sia micro- che macro-Vickers, risultano pienamente coerenti con le osservazioni micrografiche condotte sulle diverse zone del giunto saldato. In particolare, i valori di durezza più elevati rilevati nella zona termicamente alterata sono compatibili con le modifiche microstrutturali osservate in tale regione, caratterizzata da una riformazione della matrice ferritica e da una diversa distribuzione dimensionale del grano rispetto al cordone di saldatura. Al contrario, i valori di durezza inferiori misurati nel cordone di saldatura sono in accordo con la presenza di una microstruttura ferritica più grossolana, conseguente al ciclo termico di rifusione e al successivo trattamento termico.

Seppur coerenti, i risultati non rispettano anche in questo caso, come per le prove di trazione, i requisiti minimi richiesti dalla normativa

5 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha analizzato il comportamento microstrutturale e meccanico di una ghisa sferoidale ad alto contenuto di silicio sottoposta a saldatura ossiacetilenica e successivo trattamento termico a 800 °C, con particolare attenzione alle differenze tra materiale base, zona termicamente alterata e cordone di saldatura.

Le analisi micrografiche hanno evidenziato una microstruttura completamente ferritica in tutte le zone analizzate, con variazioni significative nella dimensione del grano e nella morfologia dei noduli di grafite. In particolare, la zona HAZ mostra un affinamento del grano ferritico e un aumento del numero di grani rispetto al materiale base, effetto attribuibile al ciclo termico di saldatura e al trattamento termico post-saldatura. Il cordone di saldatura presenta invece noduli di grafite di dimensioni inferiori, coerenti con le diverse condizioni di solidificazione del bagno fuso.

Le prove di micro e macro durezza hanno mostrato un andamento coerente con le osservazioni microstrutturali, evidenziando valori di durezza maggiori nella zona termicamente alterata e inferiori nel cordone di saldatura. Tali risultati confermano la stretta correlazione tra dimensione del grano ferritico, distribuzione dei noduli di grafite e proprietà meccaniche locali.

Le prove di trazione hanno evidenziato una significativa dispersione dei risultati, fortemente influenzata dalla presenza di difetti di saldatura, in particolare soffiature e porosità. Sebbene il comportamento elastico risulti comparabile a quello del materiale base, il carico di rottura e l'allungamento a frattura risultano sensibilmente ridotti nei provini che presentano difetti volumetrici, i quali agiscono da siti di innesco della cricca e riducono la sezione resistente.

L'analisi frattografica mediante SEM ha confermato tali osservazioni, mostrando superfici di frattura caratterizzate dalla coesistenza di zone a comportamento duttile e fragile. Nei provini contenenti soffiature, la frattura si innesca preferenzialmente in corrispondenza dei difetti, propagandosi successivamente nel materiale circostante.

In conclusione, i risultati ottenuti dimostrano come la saldatura di ghise sferoidali ad alto silicio sia fortemente sensibile al controllo dell'apporto termico e alla qualità del bagno di fusione. Una corretta gestione del processo di saldatura e del trattamento termico post-saldatura risulta quindi fondamentale per limitare la formazione di difetti e garantire prestazioni meccaniche adeguate del giunto saldato.

Ringraziamenti

Innanzitutto, desidero rivolgere un sentito ringraziamento alla mia famiglia. In primo luogo ai miei genitori, che hanno reso possibile questo percorso. Mi hanno sempre supportato in ogni scelta, facendomi sentire accolto e mai inadeguato. La loro presenza costante e il loro incoraggiamento sono stati fondamentali, e a loro devo tanto, forse tutto. Un pensiero speciale va a mio fratello, che nonostante la distanza fisica ha sempre trovato il modo di spronarmi, incoraggiandomi a credere in me stesso e a proseguire con determinazione. Se oggi posso essere fiero della persona che sono diventato, lo devo in gran parte a loro. Mi ritengo estremamente fortunato ad aver avuto una famiglia che mi ha sempre sostenuto, e mi auguro che ognuno possa avere nella propria vita un supporto simile. Un ringraziamento dovuto è rivolto anche a VDP Group ed in particolare a Thomas Borsato e a tutto il gruppo del laboratorio di metallurgia per avermi aiutato nella stesura di questa ultima fase del mio percorso accademico. Infine, ma non per importanza, desidero ringraziare i miei amici. Non sono mai stato particolarmente abile nell'esprimere le mie emozioni, e credo che ormai loro lo sappiano bene. Tuttavia, ci tengo profondamente a far sapere quanto siano stati fondamentali per il mio percorso. È anche grazie al loro supporto e alla loro vicinanza che sono arrivato dove sono oggi. Con loro ho potuto scherzare, condividere pensieri, affrontare discussioni costruttive e crescere. La possibilità di essere sempre me stesso in loro compagnia è qualcosa che non darò mai per scontato, e per questo li ringrazio con tutto il cuore.

Grazie a tutti!!

Bibliografia

- [1] <https://www.vdp.it/>.
- [2] S. University, «Micrograph Library».
- [3] F. Palmieri.
- [4] S. Genculu, «Cast Irons; Types, Properties, Applications & Weldability,» 2015 .
- [5] D. M. Stefanescu, «Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron,» in *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990, pp. 3-11.
- [6] Assofond, La metallurgia delle ghise - Volume III - ghisa malleabile e ghisa sferoidale.
- [7] C. L. M. Gagnè, «Ravier ductile iron: fifty years of continuous development,» 1998.
- [8] E. G. H. a. E. O. C. Hartung, «Research on Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron (SSFDI),» *International Journal of Metalcasting*, vol. 14, pp. 1195-1209, 2020.
- [9] A. S. A. S. Z. Glavas, «The Properties of Silicon Alloyed Ferritic Ductile Irons,» 2016.
- [10] S. S. D. A. E. S. I. S. & M. C. Iulian Riposan, «Structure Characteristics of High-Si Ductile Cast Irons,» *International Journal of Metalcasting*, vol. 17, pp. 2389-2412, 2023.
- [11] K. RUNDMAN, Metal Casting, 2000.

- [12] F. B. -. A.Tiziani, «La solidificazione delle ghise».
- [13] RTZ Iron & Titanium, «A design engineer's digest of ductile iron».
- [14] C. Cottrell, Welding cast iron, 1985.
- [15] M. Pisanu, «Il 2024 segna una battuta d'arresto per la produzione di getti in ghisa,» *In Fonderia*, pp. 18-25, 2025.
- [16] ESAB, Repair and Maintenance welding handbook - second edition.
- [17] P. D. A. N. ÖZKER, «5TH International Black Sea Modern Scientific Reserch Congress,» Rize, 2023.
- [18] S. Kou, «Welding metallurgy,» p. 318.
- [19] B. Mina, «Cast iron welding».
- [20] American Welding Society, Welding of Cast Iron a selection of paper, 1985.
- [21] S. Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [22] A. W. Society, Guide for Welding Iron Castings, 1988.
- [23] M. P. J. M. J. v. d. M. Caroline Mphela, «Filler materials used to weld ductile cast iron - A review,» Johannesburg, 2000.
- [24] <https://zanardifonderie.com/it/>.
- [27] H. R. a. M. Gagné, «Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings:,» 2003.

