



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TESI DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI E DEI MATERIALI**

(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Materiali)

**EFFETTO DELLA TIPOLOGIA DI INOCULANTE SULLA MICROSTRUTTURA E SULLA
FORMAZIONE DI DIFETTI IN GETTI DI GHISA SFEROIDALE DI GROSSE DIMENSIONI**

Relatore: Prof. FRANCO BONOLLO

Correlatore: Ing. RICCARDO CERVO

Candidato: GIOVANNI DALLA COSTA

matr: 591662

Anno Accademico 2011/2012

A Rosa

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	GETTI IN GHISA SFEROIDALE E LORO PRINCIPALI DIFETTI.....	3
2.1	La ghisa sferoidale.....	3
2.2	Inclusioni di ossidi.....	5
2.3	Il dross.....	5
2.4	Le degenerazioni della grafite.....	7
2.5	Il processo di fonderia.....	9
2.5.1	Progettazione e realizzazione del modello.....	9
2.5.2	La formatura.....	10
2.5.3	Fusione, trattamento e colata del metallo.....	11
2.5.4	Distaffaggio e controlli finali.....	13
3	PROGETTAZIONE DELL'ESPERIMENTO E SIMULAZIONE.....	15
3.1	Realizzazione dei provini.....	15
3.2	Simulazione numerica.....	18
4	ANALISI PRELIMINARE DEI GETTI.....	21
4.1	Premesse.....	21
4.2	Analisi termica.....	21
4.2.1	Premesse.....	21
4.2.2	Risultati.....	23
4.3	Analisi dello zolfo.....	24
4.3.1	Premesse.....	24
4.3.2	Risultati.....	25
4.4	Analisi macroscopica.....	26
4.4.1	Confronto della superficie esterna.....	26
4.4.2	Confronto dei provini dopo sezionatura.....	27
4.5	Analisi agli ultrasuoni.....	29

5 ANALISI MICROSCOPICHE	31
5.1 Premesse.....	31
5.2 Caratterizzazione della grafite.....	31
5.3 Andamento dei difetti sotto la superficie.....	35
6 CONCLUSIONI	39
7 BIBLIOGRAFIA	41

CAPITOLO 1

Introduzione

Il recente incremento nell'utilizzo di energie rinnovabili ha accelerato la ricerca di materiali che possano fornire caratteristiche eccellenti in modo da favorire la resa degli impianti produttivi.

Nel caso della produzione di energia elettrica tramite impianti a pale eoliche è stato necessario cercare materiali più leggeri e che mantenessero buone proprietà meccaniche anche in condizioni di bassa temperatura. Per i componenti strutturali dell'impianto la scelta è caduta sulla ghisa sferoidale che presenta proprietà simili all'acciaio ma è più leggera e performante a basse temperature.

Tuttavia per ottenere le proprietà richieste sono state definite delle condizioni sui difetti microstrutturali piuttosto restrittive[1]. È nata quindi da parte delle fonderie di ghisa l'esigenza di migliorare il processo produttivo al fine di ottenere getti che rispondessero a queste specifiche.

Tra i difetti più dannosi per queste applicazioni compaiono la grafite chunky e il dross; la loro presenza causa un abbassamento delle proprietà meccaniche. La comparsa di questi difetti è più frequente con l'aumentare delle dimensioni del getto, ciò aumenta l'attenzione delle fonderie nei loro confronti poiché se anche pochi pezzi vengono considerati da scartare vi è comunque una notevole perdita economica.

Lo scopo di questo lavoro è di ricercare un metodo di produzione che permetta di minimizzare i difetti nei getti di ghisa sferoidale con la prospettiva di soddisfare le severe caratteristiche richieste dall'industria eolica.

Per fare ciò sono stati analizzati dei getti prodotti con quattro tipologie di inoculazione diverse allo scopo di correlarle con i difetti presenti. Sono stati colati in sabbia quattro campioni di 300 kg ciascuno e sono state eseguite le seguenti analisi:

- Analisi termica del metallo fuso
- Analisi visiva della superficie del getto
- Analisi dello zolfo in superficie
- Analisi delle inclusioni agli ultrasuoni
- Analisi micrografia dei difetti superficiali
- Analisi della morfologia e della numerosità dei noduli di grafite

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con la fonderia VDP s.p.a.. (Schio-Vi)

La fonderia VDP è una fonderia di ghisa sferoidale e ghisa grigia, è nata all'inizio degli anni novanta dall'unione di altre aziende minori e attualmente conta quasi 200 dipendenti. Il suo impianto produttivo è costituito da cinque forni elettrici a crogiolo, tre linee di formatura (automatico, a motte e a mano), un impianto di verniciatura per pezzi di medie dimensioni e un impianto di prototipazione rapida. La tipologia di manufatti prodotta varia da getti di 1 kg fino a getti di 120 Ton per un'ampia gamma di mercati a partire da quello delle macchine movimento terra, delle macchine utensili, di pompe e compressori, fino a quello dell'industria eolica.

La progettazione e la realizzazione dei provini, l'analisi termica, il controllo macroscopico e agli ultrasuoni e l'analisi dello zolfo sono state svolte all'interno dell'azienda, mentre le analisi micrografiche sono state svolte nel laboratorio di metallurgia del DTG dell'Università di Padova.

CAPITOLO 2

I getti in ghisa sferoidale e loro principali difetti

2.1 La ghisa sferoidale

La ghisa sferoidale, chiamata anche ghisa duttile o, brevemente, SGI, è un materiale relativamente recente: solo nel 1949 si riesce a metterne a punto un metodo di produzione efficace[2]. La ghisa sferoidale è nata dalla necessità di creare un compromesso tra la facilità di produzione di manufatti in ghisa e le eccellenti proprietà meccaniche dell'acciaio. Queste sue eccezionali caratteristiche derivano dal processo di solidificazione in cui, a differenza della ghisa grigia, la grafite precipita sotto forma di noduli tondeggianti, come si può vedere in figura 2.1; in questo modo i noduli di grafite non rappresentano degli innesti per l'insorgenza di cricche e, anzi, ne bloccano l'avanzamento.



Figura 2.1: Morfologia tipica di una ghisa sferoidale

Il procedimento per ottenere la solidificazione di grafite in forma sferoidale è costituito principalmente dall'aggiunta nel metallo fuso di determinanti elementi per favorirne la precipitazione e la crescita in noduli sferoidali. Questi elementi, chiamati rispettivamente inoculanti e sferoidizzanti, possono variare in base all'esperienza di ogni singola fonderia e vengono aggiunti sotto forma di lega; spesso in queste leghe sono presenti elementi che singolarmente non danno grossi benefici alla crescita dei noduli di grafite ma contrastano il fenomeno di evanescenza che inevitabilmente porta alla perdita di efficacia di inoculanti e sferoidizzanti. Tra gli elementi sferoidizzanti il più comune è il Mg per il suo basso costo, per il suo ampio campo di applicazione e per la sua buona efficacia; altri elementi utilizzati sono Ca e RE, ma raramente vengono utilizzati da soli.

Le leghe inoculanti sono spesso a base di Fe-Si e la loro efficacia dipende da elementi presenti in tracce quali Al, Ba, Ca, Sr, Zr.[2]

Il processo di precipitazione della grafite è costituito da due fasi: nucleazione e crescita. La nucleazione è un fenomeno complesso che prevede la formazione di un substrato favorevole alla precipitazione di carbonio e la presenza di un locale eccesso di carbonio nel fuso, diverse teorie cercano di spiegare il fenomeno analizzando le inclusioni presenti al centro dei noduli di grafite.[2] Una volta avvenuta la nucleazione di una particella di carbonio la crescita avviene lungo il piano cristallografico che presenta minore energia superficiale. Quindi secondo la teoria la crescita dovrebbe avvenire lungo i piani basali in quanto piani a maggiore densità, in realtà la presenza nel bagno di impurità come O e S abbassa l'energia dei piani prismatici e la crescita avviene lungo questi ultimi. Questo è ciò che accade nella ghisa grigia: la grafite precipita e cresce lungo i piani prismatici dando luogo a delle lamelle. La presenza di elementi affini con O e S come il Mg abbassa la concentrazione di queste impurità e permette alla grafite di crescere lungo i piani basali e quindi di dare luogo a grafite sferoidale.

Bisogna precisare che l'elevata purezza del fuso non è un fattore positivo a livello industriale poiché oltre ad aumentare i costi di produzione può essere deleteria per quanto riguarda l'inoculazione. Infatti la presenza di S, in quantità ridotta, fornisce dei siti di nucleazione per la grafite.

Come appena visto il fenomeno della precipitazione di noduli di grafite si basa sulla presenza di elementi nucleanti e sferoidizzanti e sulla presenza di locali disomogeneità. Un aspetto da tenere sotto controllo durante la produzione è l'evanescenza, infatti se il metallo resta troppo tempo fuso ad alte temperature gli elementi aggiunti reagiscono e quindi non sono più disponibili per la precipitazione della grafite. Per questo l'aggiunta di inoculanti avviene sempre nelle fasi finali del processo a ridosso della colata. Nei manufatti di grandi dimensioni è anche possibile che vi siano grosse disomogeneità e che l'inoculante non riesca a raggiungere tutto il volume del getto creando zone con grafite non sferoidale.

L'aggiunta di altri elementi in lega come Cu, Ni, Mn serve per modificare le proprietà della matrice, che può essere ferritica o perlitica e per favorire eventuali trattamenti termici successivi alla fusione

Per eseguire dei getti in SGI sani ed esenti da difetti che ne compromettano le proprietà è necessario una adeguata progettazione dei sistemi di colata e delle materozze e un controllo accurato in ogni fase di processo, soprattutto per quanto riguarda l'aggiunta di

inoculanti e sferoidizzanti.

I difetti che principalmente causano lo scarto di getti in SGI sono presenza di ossidi e di grafite degenerata, che può essere di tipo esplosa, compatta, chunky e spiky.

Nei prossimi paragrafi verranno descritti le principali tipologie di difetti che si possono riscontrare in getti di ghisa.

2.2 Inclusioni di ossidi

Il problema delle inclusioni di ossidi è molto sentito nel campo della fusione dei metalli in quanto alle alte temperature le reazioni di ossidazione avvengono molto più rapidamente di come avvengono a temperatura ambiente. Queste reazioni portano solo alla produzione di ossido non solo nel forno ma anche durante la colata e la solidificazione. Vengono distinti quindi due tipi di ossidi: scoria e dross.

La scoria è principalmente formata da ossido di silicio e viene volontariamente prodotta durante la fusione sia per proteggere il metallo fuso sia per eliminare impurità come O e S presenti in eccesso infatti essa è più leggera del ferro e durante la permanenza in forno sale in superficie e galleggia sul metallo. Prima di spillare il metallo fuso dal forno è necessario descorificare il bagno togliendo lo strato di scoria, ciò avviene per via meccanica. Un adeguato controllo della scoria è essenziale poiché scorie con alte percentuali di FeO (maggiore di 15%) hanno un basso punto di fusione e sono difficili da eliminare, inoltre durante la colata è molto più probabile che la scoria resti intrappolata nel getto. Al contrario scorie ricche di SiO₂ hanno un punto di fusione più elevato che favorisce la descorificazione.[3] Le inclusioni di scoria si presentano come dei blocchi compatti e per il loro minor peso si trovano nella parte superiore del getto. Spesso queste inclusioni sono presenti appena sotto la superficie superiore del getto e sono dovute ad un'errata descorificazione e al riempimento della forma in regime turbolento.

2.3 Il dross

Il dross viene definito come un'inclusione non metallica endogena che si presenta con un aspetto filamentoso e allungato, i cui principali componenti sono MgO, SiO₂ assieme ad ossidi e silicati complessi, si trova nella parte superiore dei getti o nei sottosquadri a causa della flottazione e spesso è accompagnato da zone di grafite degenerata.[3,4,5,6]

In figura 2.2 si può vedere la tipica conformazione del dross all'interno della ghisa sferoidale.

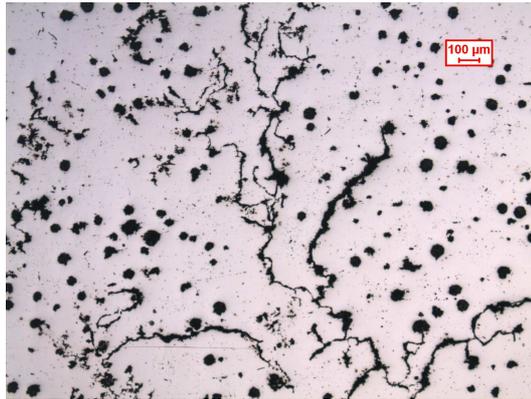


Figura 2.2: Dross nella ghisa sferoidale

Il dross è un prodotto di reazione tra l'ossigeno e gli elementi presenti in lega. La necessità di inserire nella ghisa sferoidale Mg e Si per ottenere la grafite desiderata fa sì che questo materiale sia molto sensibile alle reazioni di ossidazione. Il controllo di queste reazioni non è così semplice in quanto esse avvengono con continuità sulla superficie di contatto tra metallo fuso e atmosfera oppure con l'ossigeno presente negli ossidi dei materiali utilizzati per la carica. Per questo la formazione di ossidi di questo tipo avviene in ogni fase del processo: durante il trattamento in siviera, durante la colata e durante la solidificazione.

La causa principale di questi difetti è sicuramente la presenza dei reagenti: O, Mg, Si.

Limitando la presenza di questi elementi nel bagno fuso si contrasta efficacemente l'insorgenza di dross, purtroppo Mg e Si sono essenziali per la precipitazione di noduli di grafite. La loro quantità non può essere diminuita oltre certi valori per non compromettere la qualità della ghisa. Alcuni autori riportano che già con percentuali di Mg e Si inferiori a 0,033% e 2,19% rispettivamente la formazione di dross è efficacemente contrastata.[4]

Il controllo dell'ossigeno è quindi lo strumento principale per controllare l'insorgenza di dross. Per abbassare il tenore di ossigeno nel bagno fuso è necessario innanzitutto scegliere dei materiali di carica poco ossidati e adoperare un adeguato trattamento di deossidazione con Si, Ca e Mn. Nelle fasi successive le fonti primarie di ossigeno sono l'aria. Il fuso deve restare per meno tempo possibile a contatto con l'atmosfera e soprattutto deve venire colato con un regime meno turbolento possibile perché la turbolenza che si crea durante il riempimento della forma favorisce l'assorbimento di O e l'inclusione di film di ossido.[7]

Un altro fattore che regola la formazione di dross è la temperatura. La temperatura è

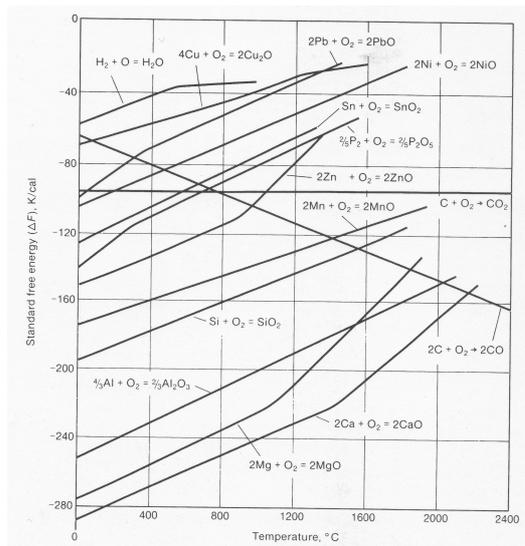


Figura 2.3: Potenziali delle reazioni di ossidazione[8]

infatti una variabile che regola i potenziali chimici delle reazioni di ossidazione e come si vede da figura 2.3 l'innalzarsi della temperatura abbassa la spinta termodinamica delle reazioni tra Mg, Si e O. Lo stazionamento del metallo a basse temperature (minori di 1350°C[3]) e basse temperature di colata (minori di 1320) favoriscono la formazione di ossidi. Alcuni studiosi simulando l'equilibrio nel bagno fuso con un calcolatore [4] sostengono che l'aumento di temperatura contrasta la formazione di dross solo in presenza di elevate percentuali di O (maggiori di 500ppm).

Un utile strumento per prevenire la presenza di ossidi nei getti è quello di progettare i canali di colata con delle trappole e con il posizionamenti di filtri prima dell'ingresso del metallo nel getto. Il filtro compie un duplice scopo: intrappola la scoria e le impurità presenti nel fuso e permette al metallo di riempire la forma con un regime molto meno turbolento.

2.4 Le degenerazioni della grafite

La grafite degenerata è presente nel getto quando la grafite non precipita sottoforma di noduli, questo difetto è principalmente dovuto al non corretto funzionamento dell'inoculazione.

La grafite chunky o CHG viene definita come larghi grani di grafite ramificata e interconnessa tra le celle di eutettico[9], è spesso associata a getti di grosse dimensioni ma in determinate condizioni è presente anche per spessori dell'ordine di 10mm[10]. La grafite di questo tipo solidifica frequentemente nel centro termico del getto ed è

associata a velocità di raffreddamento lente[9,10].

In figura 2.4 si può vedere la differenza di morfologia tra la grafite sferoidale e la grafite chunky all'interno dello stesso getto.

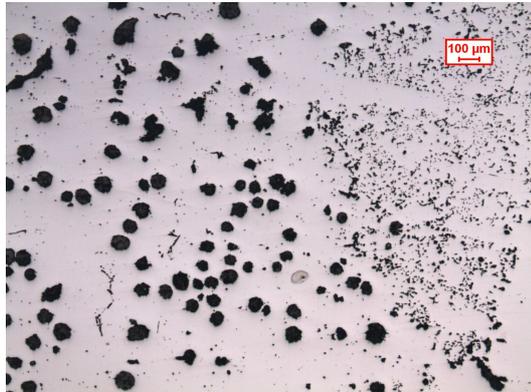


Figura 2.4: Grafite sferoidale a destra e grafite chunky a sinistra

La presenza di CHG nei getti provoca un deterioramento delle proprietà meccaniche: resistenza a rottura e allungamento diminuiscono del 30% e del 80% rispettivamente mentre durezza e carico di snervamento restano invariati.[10,11]

Il meccanismo di crescita di CHG viene descritto da vari autori [12,13]: dopo la precipitazione dei primi noduli di grafite si forma attorno ad essi una guaina di Fe- γ . Se vi fosse un perfetto trasporto di C in Fe- γ la diminuzione di temperatura porterebbe il C ad accumularsi sui noduli già esistenti o a formarne di nuovi. Elementi come Si e Ni presenti in soluzione diminuiscono la solubilità di C e inoltre ne diminuiscono il coefficiente di trasporto. Si crea quindi un eccesso di C che precipita sotto forma di CHG. Il fenomeno è accentuato dall'evanescenza del Mg. Durante la solidificazione dei grani di CHG vi è la segregazione da parte del fronte di solidificazione del Mg e quando questo torna ad avere concentrazioni sufficienti per far precipitare altri noduli di grafite vi è la solidificazione finale di SGI.

La composizione chimica del bagno ha una notevole influenza sulla formazione di CHG, la sua presenza è favorita da un alto CE e dalla presenza in lega di elementi come Si, Ni, Cu, Ce, Ca e Al, mentre è ostacolata da Sn, Sb, Bi, Pb e B[10,11,12].

Dall'analisi termica di campioni contenenti CHG si è visto come la sua formazione è accompagnata da un lento raffreddamento [10,12,13]. Una soluzione per evitare la formazione di CHG è quindi di creare le condizioni per un raffreddamento più rapido e uniforme mediante l'utilizzo di conchiglie metalliche nella forma. Tuttavia questo rimedio produce effetti solo per alcune decine di mm dalla conchiglia.[9,13]

2.5 Il processo di fonderia

2.5.1 Progettazione e realizzazione del modello

Il procedimento che porta alla realizzazione di manufatti tramite colata di metallo fuso è un processo sicuramente economico ma che necessita di una buona pianificazione e progettazione.

Nei paragrafi seguenti non verranno presi in considerazione tutti i possibili procedimenti tecnologici che si possono adottare in una fonderia ma solamente quelli che sono stati utilizzati per realizzare i provini necessari all'analisi in oggetto.

La prima fase, la più importante, è quella della progettazione del modello partendo dalle specifiche del pezzo finale. Non si tratta solo della semplice riproduzione in negativo del manufatto ma comprende anche la scelta del sistema di alimentazione, delle materozze, delle anime e di trovare un equilibrio di questi fattori per ottenere il minor numero di difetti nel prodotto finale al minor costo. Per essere sicuri di ottenere pezzi privi di difetti si potrebbe prevedere l'utilizzo di numerose materozze, di trappole e filtri per la scoria ma queste accortezze incidono notevolmente sul costo finale.

Una volta in possesso del disegno del pezzo va progettato il modello e cioè l'oggetto che lascerà l'impronta nella sabbia dove verrà colato il metallo. Per progettarlo si parte dalla forma dell'oggetto finale. Le dimensioni del modello devono poi essere aumentate rispetto alle dimensioni del manufatto finale per poter compensare il ritiro nel materiale durante la trasformazione ed evitare di ottenere pezzi le cui dimensioni siano minori di quelle richieste.

Il modello viene ulteriormente ingrandito nelle zone dove è necessaria una buona finitura superficiale. Il getto grezzo infatti non possiede una bassa rugosità e per ottenerla viene eseguita una lavorazione meccanica; è quindi necessario predisporre un sovrametallo nelle zone che subiranno una lavorazione.

Il modello così dimensionato viene diviso in due parti e per facilitare l'operazione di formatura non deve presentare sottosquadri e deve essere previsto un adeguato angolo di sforno.

Nel getto finale sono sempre da evitare spigoli vivi e ampie variazioni di sezione poiché durante la solidificazione queste causano l'insorgenza di tensioni residue e cricche.

È opportuno prima di costruire il modello progettare il sistema di alimentazione. I canali di alimentazione vanno progettati in funzione della portata di metallo fuso e quindi del

tempo di riempimento della forma che cambia in funzione di materiale da colare e impianto utilizzato.

Se nel manufatto finale devono essere presenti fori o sottosquadri che impediscono una corretta formatura viene inserita nella forma la cosiddetta anima, un elemento solido pieno che impedisce al metallo liquido di riempire la parte di volume che occupa. Per sostenere l'anima durante il riempimento della forma è necessario progettare nel modello le portate d'anima e cioè delle parti che andranno a formare nella sabbia le sedi per l'anima. Le anime vengono costruite in sabbia e resina e se è presente il rischio che si rompano sotto l'effetto della spinta metallostatica al loro interno viene posta un armatura metallica.

Quando si sono ben progettati tutti questi elementi il modello viene messo in placca, cioè viene costruito materialmente. La placca non è altro che una lastra piana, generalmente dello stesso materiale del modello, su cui viene fissato il modello e tutti gli elementi necessari a formare nella sabbia le parti accessorie. Come già detto il modello viene diviso in due parti e ogni parte viene fissata su una placca, vengono così create la placca inferiore e la placca superiore. Sulla placca vengono anche inseriti dei riferimenti per centrare la staffa e per accoppiare la forma inferiore e la forma superiore. Le placche e i modelli possono essere realizzati in diversi materiali: legno, plastica o alluminio; la decisione di quale materiale sia più adatto varia in funzione del numero di pezzi da produrre e del costo del manufatto finale. Il legno si usura più facilmente ma è anche meno costoso dell'alluminio, per produzioni di piccola serie è conveniente utilizzare il legno, mentre per produzioni di grande serie il costo di sistemazione del modello a causa dell'usura può superare il costo di costruzione in materiale più pregiato. La plastica assume valori di resistenza all'usura e di costi intermedi fra legno e alluminio.

2.5.2 La formatura

Con le due placche complete si procede alla formatura. La placca viene appoggiata con la faccia contenente il modello rivolta verso l'alto e vi viene posto sopra un contenitore senza fondo chiamato staffa la cui funzione principale è quella di contenere la sabbia refrattaria. Se non sono presenti nella placca, in questa fase vengono posizionati degli elementi per ricavare il bastone o i canali di colata. La forma viene quindi riempita di sabbia e resina e viene fatta vibrare in modo che la sabbia riempia bene lo spazio

disponibile. La sabbia in eccesso viene tolta livellando la parte superiore della staffa con un'asta. In figura 2.5 si possono distinguere la placca superiore in colore rosso, la staffa che sarà riempita, le materozze e i bastoni di colata prima che venga versata la sabbia.



Figura 2.5: Placca e staffa prima del riempimento con la sabbia

Appena prima di riempire la staffa la sabbia viene mescolata con una resina furanica e con un catalizzatore acido, inizia quindi una reazione di polimerizzazione, la resina indurisce e permette alla sabbia di mantenere la forma ricevuta. Si procede quindi all'estrazione del modello e della staffa. La forma priva di staffa viene chiamata motta. La motta viene quindi verniciata nella parte concava con una vernice refrattaria a base di acqua e posta in forno ad asciugare.

Quando la motta è asciutta viene appoggiata nel verso opposto a quando è stata formata per permettere l'alloggiamento di anime, filtri e maniche esotermiche, questa operazione prende il nome di rammolaggio.

La due motte vengono unite ottenendo così la forma completa su cui colare il metallo.

L'accoppiamento fra le motte è garantito da un perno di centraggio.

2.5.3 Fusione, trattamento e colata del metallo

Il metallo può venire fuso in forni elettrici, a gas o a cubilotto. Qualunque sia la tecnica utilizzata bisogna controllare adeguatamente il metallo in carica per evitare che nel manufatto finale siano presenti impurità.

La carica del forno viene effettuata con pani di ghisa, con scarti dalla lavorazione della lamiera di acciaio, con pani di grafite per compensare la bassa percentuale di carbonio nell'acciaio e con ritorni.

Il riutilizzo dei ritorni è un passaggio che permette un notevole risparmio economico alla fonderia. Infatti solo una parte della ghisa che viene colata nella forma va a costituire il manufatto finale, tutte le parti necessarie all'alimentazione e le materozze costituiscono uno scarto il cui impatto sul costo finale viene ridotto reinserendo queste parti nel ciclo produttivo.

Prima di spillare il metallo dal forno viene effettuato un controllo della composizione colando una pastiglia dalle dimensioni di qualche decina di mm e analizzandola con il quantometro. Successivamente vengono effettuate delle aggiunte per regolare la composizione.

Spesso mentre il metallo è in forno viene effettuato un trattamento di preconditionamento con un inoculante per aumentare l'efficacia del successivo trattamento di sferoidizzazione.

Il metallo viene spillato in una siviera di trattamento, qui subisce il trattamento di sferoidizzazione. Tra i vari metodi possibili quello utilizzato in questo lavoro è il metodo sandwich. Prima di spillare il metallo nella siviera di trattamento viene posto sul fondo della siviera la lega sferoidizzante coperta da uno strato di lega FeSi come si può vedere in figura 2.6. In questo modo la lega inoculante entra in contatto lentamente con la ghisa liquida aumentando l'efficienza del trattamento.

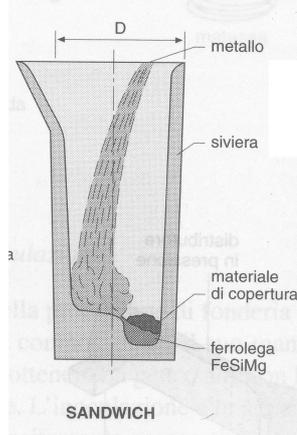


Figura 2.6: Inoculazione a sandwich[14]

La ghisa liquida dopo il trattamento viene travasata nella siviera di colata, durante questo passaggio è possibile compiere un altro trattamento di inoculazione versando durante il travaso della lega inoculante nella seconda siviera. La siviera viene trasportata con un carro ponte nei pressi della forma e avviene la colata. Il versamento del metallo liquido deve avvenire in maniera più costante possibile per evitare la formazione di turbolenze e la formazione di difetti.

Durante la colata avviene l'ultimo trattamento di post-inoculazione: con un imbuto viene

versata assieme alla ghisa la lega inoculante ancora allo stato solido che a contatto con il metallo fuso fonde ed entra a far parte della fase liquida.

2.5.4 Distaffaggio e controlli finali

Una volta solidificato il metallo, la forma viene mandata ad una macchina dotata di un piano vibrante che sgretola la sabbia e permette l'estrazione del manufatto. Questo viene sabbiato per eliminare ogni residuo presente sulla superficie.

Al getto ottenuto vengono tolti i canali di alimentazione e le materozze e vengono eliminate le bave che si formano nella giunzione tra le due motte o tra le motte e le anime tramite un'operazione di smerigliatura.

L'ultima fase del processo è quella del controllo: vengono eseguite delle prove di durezza sulla superficie, delle analisi ultrasonore e magnetoscopiche per escludere la presenza di difetti.

CAPITOLO 3

Progettazione dell'esperimento e simulazione

3.1 Realizzazione dei provini

Per studiare l'influenza della tipologia dell'inoculante sulla microstruttura e sulla formazione di difetti sono stati colati quattro provini cilindrici con diametro 300 mm, altezza 520 mm e modulo 6,5 cm, figura 3.1. Sono state realizzate due forme contenenti due provini ciascuna con i canali di colata separati per ogni provino. In questo modo si è riusciti ad inoculare in maniera diversa due provini nella stessa forma.

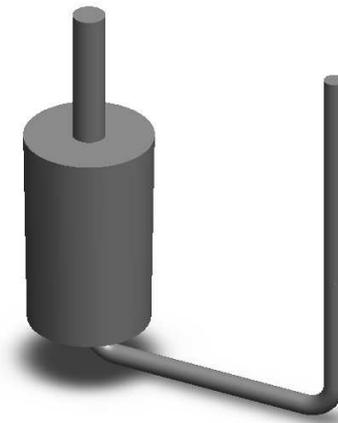


Figura 3.1: Cilindro con canale di colata e materozza

Nella fase di progettazione non è stato previsto l'inserimento di alcun filtro o manica esotermica sia per facilitare il processo di formatura sia per assicurare nel getto finale la presenza di difetti da analizzare. Per completare la progettazione del getto è stata eseguita una simulazione numerica della colata e del raffreddamento.

La formatura è avvenuta con sabbia e resina furanica e i canali di colata sono stati ricavati con dei canali commerciali in chamotte. Ogni provino è stato identificato con la lettera P affiancata da un numero progressivo nell'ordine con cui sono stati colati.

Nel tentativo di eliminare nel risultato finale l'influenza di variabili che non si vuole studiare, i quattro provini sono stati colati con metallo spillato dallo stesso forno e alla stessa temperatura. In questo modo la differenza tra i quattro getti finali non è soggetta all'influenza dei materiali di carica e dallo stato del forno fusorio. Le percentuali di carica del forno sono riassunte nella tabella 3.1

Peso totale [kg]	Lamierini di acciaio [%]	Pani ghisa [%]	Ritorni [%]	Grafite [kg]	FeSi [kg]	SiC [kg]	I_D [%]
13600	41	31	25	225	6,8	50	0,2

Tabella 3.1: Composizione della carica del forno, le percentuali sono riferite al peso totale.

Il trattamento di sferoidizzazione è avvenuto in una siviera dedicata in cui è stato posto sul fondo la lega FeSiMg e come copertura la lega inoculante. Il metallo è stato poi travasato nella siviera di colata. In questa fase è iniziata la differenziazione fra i provini: i provini P1 e P2 sono stati ricavati con la sola inoculazione in siviera, mentre P3 e P4 sono stati inoculati sia in siviera che in travaso. Successivamente è stato effettuato un ulteriore trattamento di post inoculazione sul flusso: è stato versato l'inoculante nella bocca di colata assieme al metallo liquido. Le modalità di inoculazione utilizzate per i quattro provini sono riassunte in tabella 3.2.

Id provino	Inoculante in siviera % sul metallo in siviera	Inoculante in travaso % sul metallo in siviera	Inoculante sul flusso % sul peso del getto
P1	I_C-0,40%+ I_E-0,20%		I_A-0,10%
P2			I_B-0,10%
P3	I_D-0,20%	I_C-0,40%	I_A-0,10%
P4			I_B-0,10%

Tabella 3.2: Modalità di inoculazione dei provini

I diversi inoculanti utilizzati sono degli inoculanti commerciali la cui composizione e granulometria è riassunta in tabella 3.3, ad ogni inoculante è stata assegnata una sigla I_x dove "x" è una lettera compresa tra A e E. La quantità di Fe contenuta è tale da arrivare al 100%. In tabella 3.3 è riassunta la composizione della lega sferoidizzante

	Granulometria [mm]	Si [%]	Al [%]	Ba [%]	Ca [%]	Mn[%]	RE[%]	Zr [%]	Bi [%]	Fe [%]
I_A	0,2-0,5	70-75	0,7-1,4		1,0-2,0		0,4-0,7		0,8-1,3	Bilanciato
I_B	0,2-0,7	62-69	0,5-1,3	0,3-0,7	0,6-1,9	2,8-4,5		3,0-5,0		
I_C	2 – 6	73-78	1,0-1,5		2,0-2,5			1,3-1,8		
I_D	0,5-7	60-67	0,7-1,7	9 – 11	0,4-1,7					
I_E		75								

Tabella 3.3 : Composizione degli inoculanti

	Granulometria [mm]	Mg [%]	Si [%]	Al [%]	Ca [%]	RE [%]	Fe [%]
Lega FeSiMg	1 – 10	5,75-6,25	44-48	0-0,80	1,05-1,45	0-0,10	Bilanciato

Tabella 3.4: Composizione della lega sferoidizzante

Sono state poi effettuate delle analisi termiche utilizzando delle coppette standard, del metallo in forno, in siviera e nel getto. L'analisi termica viene effettuata con una

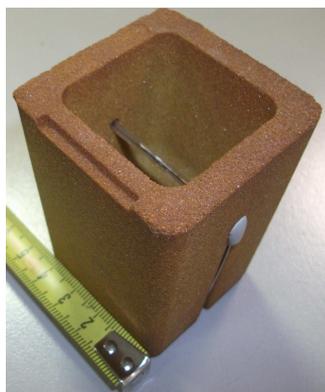


Figura 3.2: Coppetta utilizzata per l'analisi termica

coppetta come quella in figura 3.2 interfacciata al pc. Il metallo fuso viene versato nella coppetta e il software rileva la temperatura interna alla coppetta durante la solidificazione. Nel caso dello studio del metallo nel getto per ottenere all'interno della coppetta la stessa composizione dei getti è stata messa sul fondo della coppetta la quantità di inoculante corrispondente alla percentuale in peso ed è poi stato colato il metallo da inoculare. Questa analisi non fornisce un perfetto riscontro di cosa accade all'interno della forma, in quanto le condizioni di raffreddamento sono differenti, ma permette comunque di confrontare l'effetto dei quattro tipi di inoculante sulla solidificazione della ghisa.

Prima di effettuare la colata è stata fatta un'analisi della composizione colando una pastiglia per ogni siviera. La tabella 3.5 riassume i risultati.

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Sn	Al	Pb	Sb	Mg	Zn	Ce	Nb	La	C.E.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
P_1	3,56	2,53	0,0083	0,0217	0,2	0,0184	0,0292	0,0016	0,0200	0,17	0,0169	0,0034	0,0092	0,0001	0,0001	0,0441	0,0001	0,0031	0,0056	0,0001	4,41
P_2	3,56	2,53	0,0083	0,0217	0,2	0,0184	0,0292	0,0016	0,0200	0,17	0,0169	0,0034	0,0092	0,0001	0,0001	0,0441	0,0001	0,0031	0,0056	0,0001	4,41
P_3	3,59	2,51	0,0094	0,0216	0,2	0,0185	0,0290	0,0015	0,0150	0,16	0,0171	0,0032	0,0103	0,0001	0,0001	0,0467	0,0001	0,0027	0,0053	0,0001	4,43
P_4	3,59	2,51	0,0094	0,0216	0,2	0,0185	0,0290	0,0015	0,0150	0,16	0,0171	0,0032	0,0103	0,0001	0,0001	0,0467	0,0001	0,0027	0,0053	0,0001	4,43

Tabella 3.5: Analisi chimica dei provini.

Una volta colati e raffreddati, i getti sono stati distaffati e sono stati tolti i canali di colata e sono stati sabbiati. Sono state poi effettuate Le analisi necessarie per caratterizzare l'entità dei difetti nei quattro getti.

3.2 Simulazione numerica

Prima di procedere alla realizzazione fisica dei provini è stata fatta una simulazione del processo di colata e solidificazione con il software Magma5. I risultati si possono osservare in figura 3.3: dall'analisi del modulo termico (A) e del fronte di solidificazione (B) si nota che il centro termico del getto è proprio il centro geometrico del cilindro; è quindi molto probabile che questa zona costituisca un sito preferenziale per la formazione di difetti, soprattutto di porosità da ritiro. L'ultima porzione di liquido che solidifica è ricca di elementi segregati dal fronte di solidificazione e la fase solida che si crea è ricca di inclusioni. Inoltre essendo la porzione più calda del getto, è anche quella più duttile e, a causa del ritiro dimensionale che inevitabilmente avviene durante il raffreddamento, è la parte più ricca di porosità.

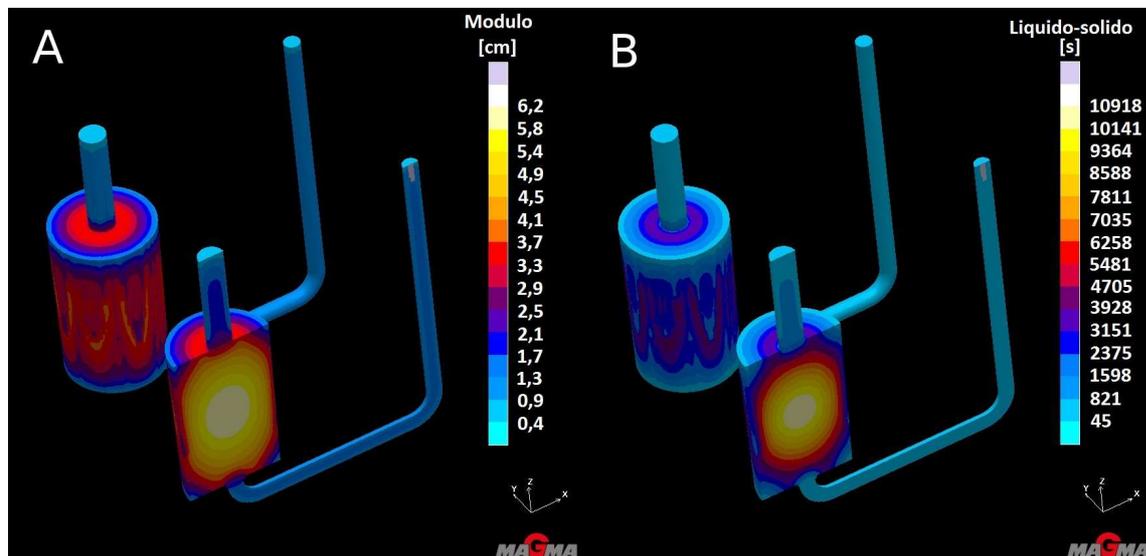


Figura 3.3 Risultati della simulazione numerica; A: Modulo termico, B: Andamento del fronte di solidificazione.

Da un punto di vista produttivo la progettazione sarebbe da rivedere in quanto quando il centro termico è situato in quel punto il rischio di ottenere porosità e inclusioni interni al getto è troppo elevato. Mediante l'eventuale applicazione di una manica isoterma che avvolge la materozza è possibile risolvere il problema e spostare il centro termico sulla materozza, che poi andrà rimossa.

Dato che tra gli obiettivi del presente studio vi è l'analisi di difetti che comunemente si trovano nei getti di ghisa sferoidale, viene volutamente tralasciata la fase di progettazione rivolta alla messa in produzione del getto al fine di aumentare la presenza di difetti e facilitarne l'analisi.

Grazie al software di simulazione, è stata inoltre ricavata la curva teorica di

raffreddamento in tre punti distinti del getto visibili in figura 3.4 (A). I tre punti scelti sono situati rispettivamente (B):

1. A ridosso dello spigolo tra a faccia superiore e la superficie laterale;
2. A metà dell'altezza a ridosso della superficie laterale;
3. Nel centro del cilindro.

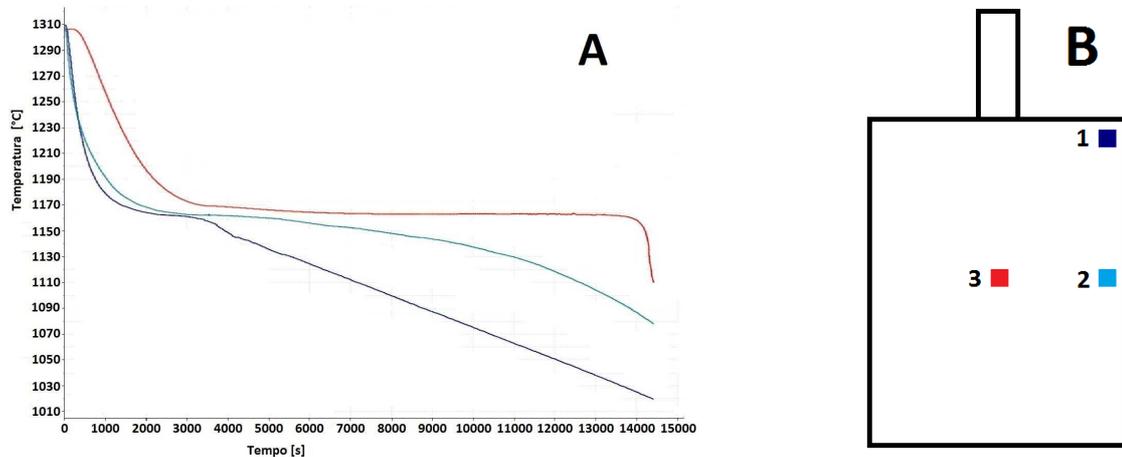


Figura 3.4 Andamento della temperatura in tre punti del getto; A: Curve ottenute con la simulazione, B: Mappatura dei punti in cui sono state ricavate le curve.

Per la simulazione del raffreddamento sono stati utilizzati dei valori delle temperature di riferimento tipici per getti in ghisa sferoidale, in quanto non erano ancora noti i valori reali della ghisa utilizzata. I dati relativi alle temperature sono riassunti in tabella 3.6.

T liquidus [°C]	1164
T solidus [°C]	1090
T di colata [°C]	1320

Tabella 3.6: Parametri di temperatura utilizzati nella simulazione

Dal grafico si vede come il raffreddamento nel punto 1 avvenga in maniera più rapida che negli altri punti; si nota un rapido raffreddamento iniziale fino a T solidus. Avvicinandosi a T solidus la curva subisce un rallentamento fino a diventare orizzontale. Quando è avvenuta la solidificazione il successivo raffreddamento avviene in maniera lineare. Nel punto 2 il raffreddamento iniziale fino a T solidus è molto simile al punto 1 ma successivamente non è presente nessun tratto lineare e la temperatura diminuisce in maniera più lenta. Anche se i punti 1 e 2 sono dei punti esterni il loro raffreddamento è diverso perchè il punto 2 è maggiormente influenzato dal raffreddamento del punto 3. Nel punto 3, interno al pezzo vi è un raffreddamento iniziale più lento rispetto agli altri due punti ed è presente con un lungo plateau a temperatura di poco superiore alla temperatura di solidus. La completa solidificazione avviene solo dopo circa 4 ore, quando termina il tratto costante della curva nel punto 3 e la temperatura scende sotto

Tsolidus.

Si presume che nelle zone soggette ad un gradiente termico più elevato si possa presentare una struttura tipica di getti di piccole dimensioni, con alto numero di noduli, mentre nelle zone più interne, dove il metallo resta a temperature elevate per molto tempo, vi possa essere una maggiore evanescenza dell'inoculante e vi possa essere una struttura con grafite degenerata e di altri difetti quali porosità e inclusioni.

CAPITOLO 4

Analisi preliminari dei getti

4.1 Premesse

In questo capitolo verranno esposte le analisi eseguite sul metallo fuso e sui getti prima di effettuare l'analisi microscopica per definire la morfologia interna dei getti.

Le analisi effettuate sono svolte comunemente nelle aziende per controllare il risultato del processo di fusione senza dover ricavare dei campioni metallografici, operazione che necessita di un tempo di preparazione abbastanza lungo.

Verranno descritte nei paragrafi seguenti:

- analisi della curva termica di raffreddamento del metallo;
- analisi della percentuale di zolfo presente nel metallo solidificato;
- confronto della superficie esterna dei provini;
- confronto di due superfici di sezione dei provini

4.2 Analisi termica

4.2.1 Premesse

Nella fonderia VDP, l'analisi termica del metallo fuso è un'analisi che viene sempre svolta prima di effettuare la colata come controllo di processo. È uno strumento utile per conoscere le caratteristiche del metallo analizzandone le temperature caratteristiche di solidificazione, e si riesce ad ottenere in linea generale il comportamento del metallo nella forma e la presenza di anomalie.

L'analisi viene svolta colando una piccola quantità di metallo in una coppetta refrattaria contenente una termocoppia, figura 3.2, e, tramite questa, creando un grafico temperatura-tempo, utilizzando il software ITACA. Lo studio del grafico e soprattutto della sua derivata prima fornisce alcuni valori di temperatura caratteristici del metallo analizzato, tra questi valori troviamo:

- Tliquidus: temperatura a cui precipita la prima fase solida, è individuata dal primo massimo nella derivata, cioè dal rallentamento della curva di solidificazione;

•TeStart: temperatura di inizio della solidificazione della fase eutettica, è individuata dal minimo nella derivata dopo Tliquidus, corrisponde al cambio di concavità della curva di solidificazione;

•TeMin: temperatura minima raggiunta durante la solidificazione eutettica, è individuata dal punto in cui la derivata è nulla, TeMin è un parametro importante in quanto stabilisce se il metallo solidifica in campo stabile con precipitazione di grafite oppure in campo metastabile con precipitazione di cementite. Se TeMin è molto inferiore a TeStart la ghisa solidificherà in campo metastabile e il getto risulterà composto da ghisa bianca. Questo parametro è un valido indicatore della bontà dell'inoculazione.

•TeMax: temperatura massima raggiunta durante la solidificazione della fase eutettica, è individuata dal secondo passaggio della derivata prima a zero e corrisponde ad un massimo nella curva di raffreddamento. Questo parametro è connesso con la generazione del calore latente di solidificazione;

•Tsolidus : temperatura alla quale il metallo è completamente solidificato, corrisponde all'ultimo minimo della derivata prima.

•PAE: è un indicatore dell'efficienza della precipitazione di austenite eutettica e si misura in secondi. Valori ottimali per la ghisa sferoidale sono compresi fra 90-100 s. Per valori inferiori aumenta il rischio di avere ritiri mentre per valori superiori si presenta il fenomeno della flottazione della grafite.

•VPS: è la misura dell'angolo che forma la derivata prima in corrispondenza della zona di Tsolidus. è un indicatore della velocità di passaggio dallo stato semisolido allo stato solido, valori ottimali per la ghisa sferoidale sono compresi tra 35-55. per valori superiori a questo intervallo vi è una solidificazione molto rapida che aumenta il rischio di ritiri, mentre per valori inferiori vi è rischio di ottenere grafite degenerata.

I parametri elencati sopra sono facilmente individuabili in figura 4.1, che riporta il confronto fra i grafici di raffreddamento dei quattro provini.

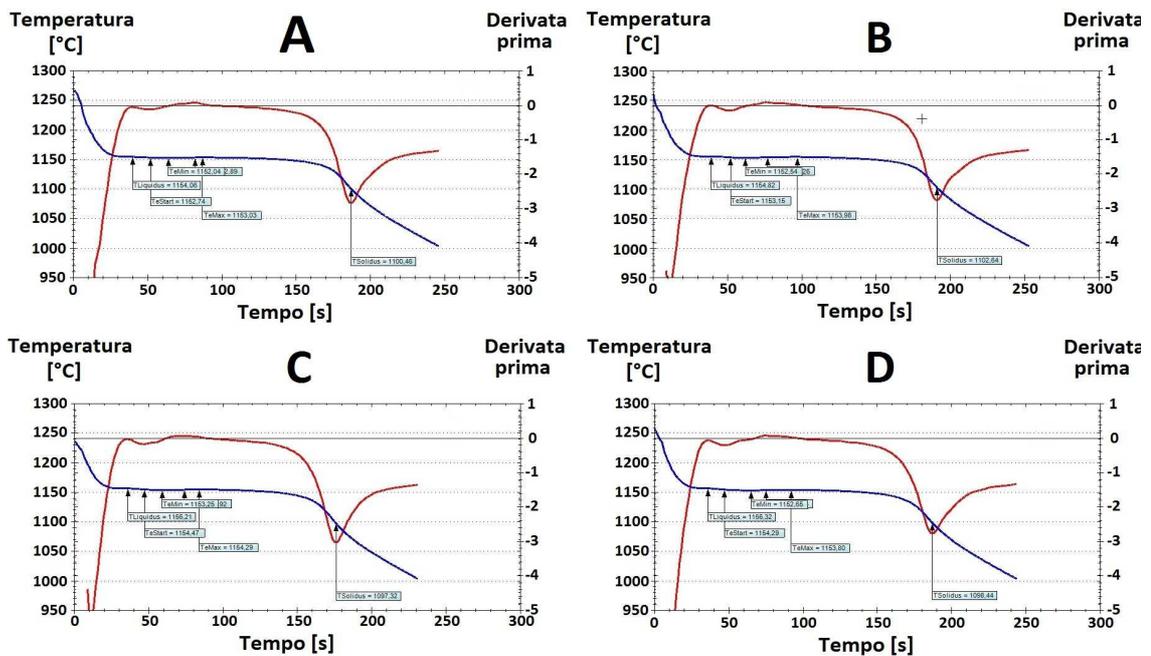


Figura 4.1: Andamento del raffreddamento per il metallo dei privini. A: P1; B: P2; C:P3; D:P4.

4.2.2 Risultati

È stata effettuata una prova di analisi termica del metallo colato in ognuno dei quattro provini e per il metallo contenuto nelle due siviere prima della post inoculazione. Le temperature caratteristiche e le curve di raffreddamento sono riportate rispettivamente in tabella 4.1 e in figura 4.1

	TLiquidus [°C]	TeStart [°C]	TeMin [°C]	TeMax [°C]	Tsolidus [°C]	PAE [s]	VPS
Siviera_1	1153,8	1147,3	1129,7	1136,5	1088,4	53	50
P1	1154,1	1152,7	1152	1153	1100,5	83	87
P2	1154,8	1153,2	1152,5	1154	1102,6	78	46
Siviera_2	1155,7	1148,5	1145,4	1149,5	1096,3	63	50
P3	1156,2	1154,5	1153,3	1154,3	1097,3	74	56
P4	1156,3	1154,3	1152,7	1153,8	1098,4	76	117

Tabella 4.1: Risultati dell'analisi termica

Si nota innanzitutto che la post inoculazione provoca un innalzamento di tutti i punti della curva e che nel caso della post inoculazione con l'inoculante I_B questo effetto è accentuato. Si può dire quindi che in tutti i provini l'inoculazione ha abbassato il sottoraffreddamento necessario alla nucleazione. Si vede inoltre che l'inoculazione della

siviera_2 è migliore di quella della siviera_1, infatti presenta una TeMin nettamente superiore (di circa 15°C). Dopo la post inoculazione TeMin assume valori pressoché uguali per ogni provino dato che la post inoculazione tende a sopperire la mancanza di inoculazione in siviera. Il procedimento utilizzato in siviera_2 è più adatto ad un utilizzo industriale perchè fornisce alla post inoculazione una base di partenza migliore.

TeMin e TeMax tra il provino P3 e P4 non seguono l'andamento generale della tabella, segno che l'inoculante I_A ha prestazioni migliori con l'inoculazione della siviera_2.

Si nota che prima della post inoculazione il parametro PAE assume valori abbastanza bassi rispetto a quelli ottimali per una ghisa sferoidale e, dopo la post inoculazione, il parametro PAE aumenta ma non raggiunge i valori ottimali. Si nota che l'inoculazione in siviera_2 è migliore di quella in siviera_1 perchè il PAE di siviera_2 è maggiore di quello in siviera_1. Si nota che la post inoculazione con l'inoculante I_A Fornisce un valore di PAE maggiore se affiancato all'inoculazione in siviera_1 rispetto alla siviera_2. Il VPS segue lo stesso andamento del PAE. È da sottolineare come i provini P1 e P4 presentino un valore di VPS decisamente superiore, quasi il doppio, ai provini 2 e 3. Ci si aspetta quindi che nei getti 1 e 4 sia presente una maggiore quantità di porosità.

Per scegliere la miglior inoculazione sulla base dei risultati dell'analisi termica è necessario scegliere quale parametro considerare; infatti, per quanto riguarda l'efficienza dell'inoculazione nel ridurre i sottoraffreddamenti la miglior soluzione è quella relativa al provino P3 perchè TeMin del provino P3 è la maggiore di tutti i provini. Mentre se la scelta viene basata sui fattori PAE e VPS, che regolano le porosità, la soluzione migliore è quella relativa al provino P2, perchè presenta il minor valore di VPS e un valore di PAE elevato.

4.3 Analisi dello zolfo

4.3.1 Premesse

Come si è detto nel cap. 1, lo zolfo è un elemento particolarmente dannoso nella ghisa che causa una notevole quantità di inclusioni. Se però è presente in quantità inferiori a 0,015% può dar luogo ad una scarsa inoculazione.

Lo studio effettuato focalizza l'attenzione sull'aumento di S sulla superficie dei getti causato da reazioni del metallo fuso con la sabbia della forma. Il raffreddamento lento tipico dei getti di grosse dimensioni favorisce le reazioni tra il metallo fuso e la forma.

Queste reazioni agiscono sulla composizione locale del metallo solidificato in quanto la successiva solidificazione impedisce la diffusione nel liquido di elementi in tracce che restano raggruppati formando inclusioni.

Uno fra gli elementi più dannosi per la ghisa sferoidale è appunto lo S perchè è molto affine con Mg e Si e la sua combinazione con questi elementi può provocare una diminuzione della precipitazione di sferoidi di grafite.

L'analisi della percentuale di zolfo nel metallo è stata effettuata con un apparecchio Leco300 considerando per ogni provino dei campioni a 15, 25, 260 mm dalla faccia superiore del cilindro. Ad ognuna delle tre distanze è stata ricavato un pezzetto di 100 mm² di area e 5 mm di spessore che poi è stato sezionato in pezzi più piccoli con un martello.

L'analisi è stata effettuata su tutti i pezzetti e con i dati ottenuti è stato ricavato un valore medio della percentuale di zolfo presente nella zona di prelievo.

4.3.2 Risultati

Con i valori medi della percentuale di zolfo nel getto è stato costruito il grafico in figura 4.2.

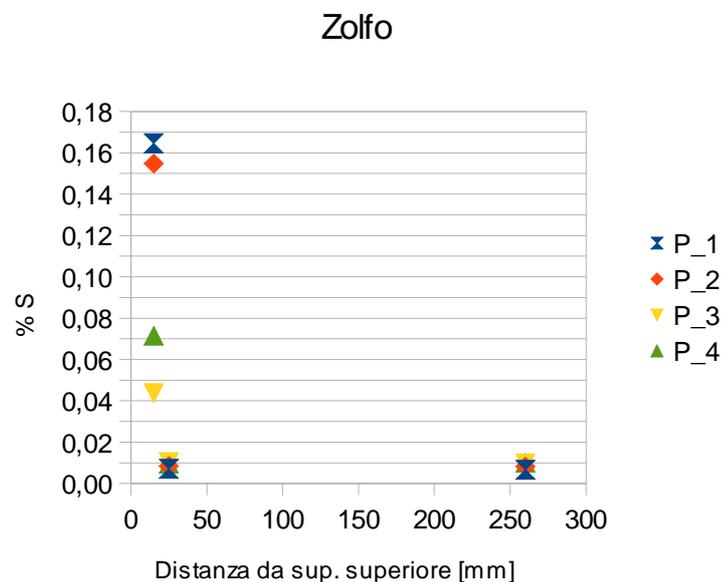


Figura 4.2: Andamento del contenuto di zolfo

Si vede che il contenuto dello zolfo a cuore è inferiore allo 0,01% per tutti e quattro i provini e si può dedurre che la carica del forno fosse pulita e non contenesse impurità.

I valori di zolfo nei primi 25 mm sono molto diversi, a 25 mm lo zolfo è presente in

quantità maggiori che a cuore ma sempre minori di 0,015%, mentre a 10 mm dalla superficie esterna vi è un aumento della percentuale di zolfo. Si può dedurre dal grafico che la quantità di zolfo nella ghisa solidificata resti pressoché costante in quasi tutto il getto e aumenti solo nel guscio esterno.

Confrontando i diversi getti si vede nettamente l'effetto dell'inoculazione in siviera: i getti P1 e P2 presentano delle percentuali di zolfo in superficie fino a tre volte maggiori rispetto ai provini P3 e P4.

L'inoculazione utilizzata nella seconda siviera diminuisce la tendenza del metallo fuso a reagire con la sabbia della forma e fa sì che vi sia una minore quantità di difetti superficiali.

4.4 Analisi macroscopiche

4.4.1 Confronto della superficie esterna

Dopo aver realizzato i provini si è visto come la loro superficie esterna fosse ricca di difetti superficiali. Sono state analizzate le differenze fra le superfici dei provini. Sono state confrontate tre zone dei provini per definire quale fosse quello migliore, le zone osservate sono state la faccia superiore, la superficie laterale in prossimità della faccia superiore e la superficie laterale in prossimità della faccia inferiore. Le figure 4.3, 4.4, 4.5 riassumono i risultati.

Come si può vedere soprattutto dalla figura 4.5 il provino caratterizzato da maggior numero di difetti superficiali è P1, mentre il provino P3 presenta il minor numero di difetti. Sulla superficie superiore vi è una zona circolare attorno alla materozza, distinguibile in maniera netta, in cui la superficie è completamente coperta da difetti.

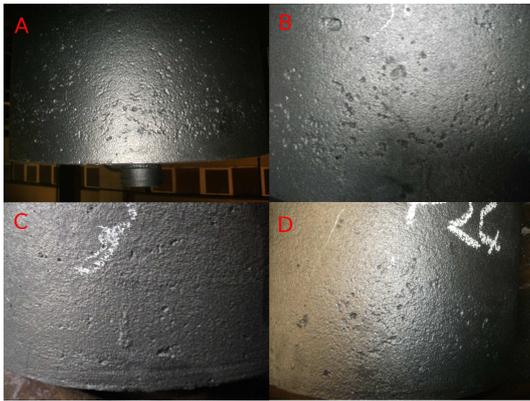


Figura 4.3: Superfici laterali inferiori, A:provino 1,B:provino 2, C:provino3,D:provino4

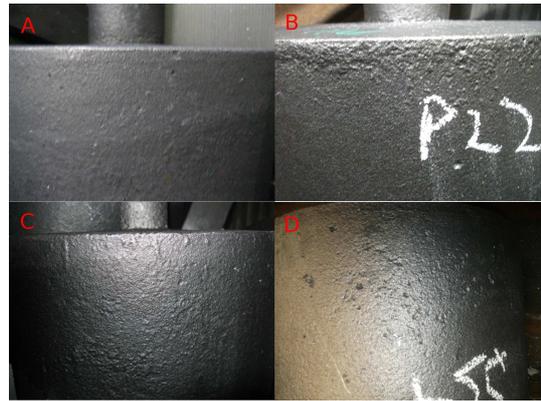


Figura 4.4: Superfici laterali superiori, A:provino 1,B:provino 2, C:provino3,D:provino4

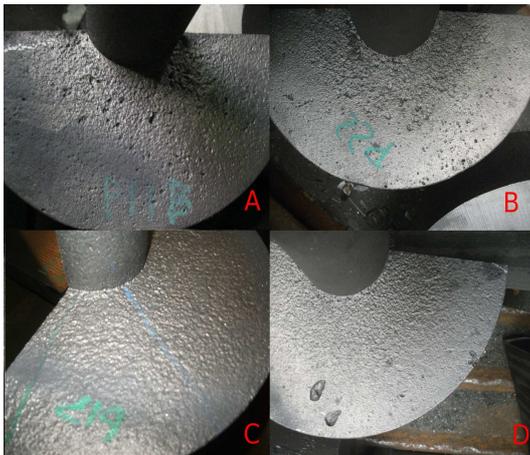


Figura 4.5: Facce superiori, A:provino 1,B:provino 2, C:provino3,D:provino4



Figura 4.6: Lavorazione meccanica del provino 1: A:Diametro 310 mm, B:diametro 306 mm, C:diametro302 mm, D:diametro297mm

Nella parte inferiore è il provino P1 a presentare le condizioni peggiori, in questa zona la presenza di difetti superficiali è sicuramente da attribuire a reazione metallo-forma. Dal momento che i difetti riscontrati nella parte inferiore dei provini 1 e 2 risultano piuttosto anomali per il procedimento produttivo utilizzato è stata effettuata una tornitura della parte inferiore del provino P1 per verificare la profondità a cui si estendono tali difetti. Il risultato è visibile in figura 4.6 : già ad un diametro di 297mm il difetto è completamente scomparso. Questo difetto è quindi un difetto superficiale che occupa uno spessore di una decina di millimetri e pregiudica la conformità dei getti che per non essere scartati devono subire una lavorazione meccanica.

Dei quattro provini solo P3 possiede la superficie esterna povera di difetti.

4.4.2 Confronto dei provini dopo sezionatura

Successivamente i provini sono stati sezionati con una sega a nastro lungo due piani:

prima su un piano parallelo alle facce del cilindro posizionato a metà dell'altezza, identificando parte inferiore e superiore, e poi lungo un piano diametrale. Le sezioni ottenute sono state denominate rispettivamente sezione A e sezione B, figura 4.7. Durante il sezionamento della parte superiore è stato deciso di non rimuovere la materozza per avere una completa mappatura dei difetti.

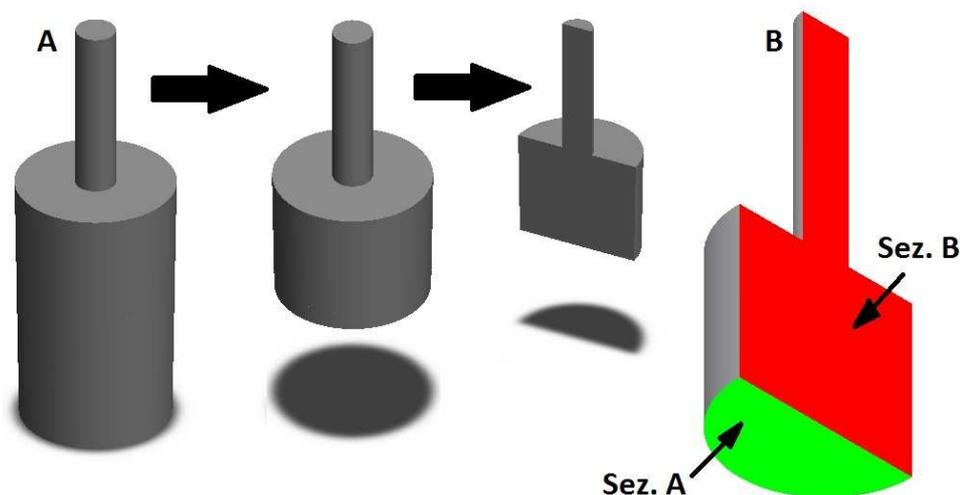


Figura 4.7: A: Sequenza di sezionatura; B: Identificazione sezioni.

Dalle figure 4.8 e 4.9 si vede come i getti P1 e P3 appaiono apparentemente privi di difetti e di porosità da ritiro. I getti P2 e P4 invece presentano un'ampia zona di grafite chunky, visibile come un'ombreggiatura scura, che si estende per un volume superiore al 60% del volume della parte superiore del cilindro. Dei getti con un difetto di tale entità sono inaccettabili a livello industriale.

Come si vede in figura 4.8 il provino P4 è l'unico a presentare un ritiro di notevoli dimensioni nella zona di attacco della materozza, questo conferma quanto detto dall'analisi termica nel cap3, e cioè che il getto P4 è notevolmente più sensibile ai ritiri degli altri tre provini.



Figura 4.8: Sezione B, A:provino 1, B:provino 2, C:provino3, D:provino4

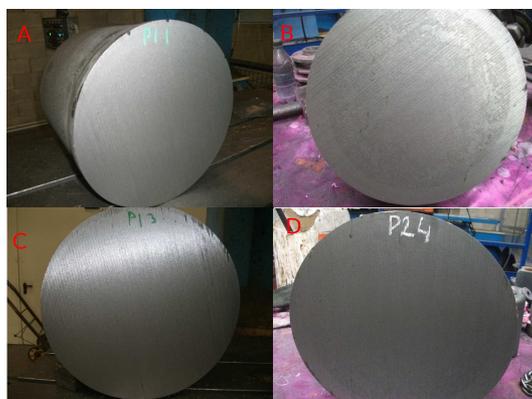


Figura 4.9: Sezione A, A:provino 1, B:provino 2, C:provino3, D:provino4

4.5 Analisi agli ultrasuoni

Il controllo dei getti con gli ultrasuoni è un controllo non distruttivo comune nei processi di fonderia che permette di verificare velocemente la presenza di difetti interni senza dover sezionare i getti. L'analisi agli ultrasuoni fa parte della categoria dei controlli non distruttivi cioè che non compromettono il campione, inoltre è un esame che non necessita di una grossa preparazione del campione nè di attrezzature complesse. L'analisi è stata effettuata con un apparecchio portatile e con una sonda da 2MHz.

È stato effettuato questo controllo dopo la sezionatura del campione perchè è stata presa come superficie di riferimento la sezione A della parte superiore del cilindro; non sarebbe stato conveniente effettuarlo prima di tagliare il provino in quanto con la sonda utilizzata l'onda sonora non sarebbe riuscita a superare lo spessore di 520 mm.

Il principale obiettivo di questa analisi è stato quello di rilevare difetti in prossimità della faccia superiore del cilindro, in particolare di individuare la presenza di dross, grafite chunky e ritiri. È stato possibile individuare posizione, profondità e diametro equivalente del difetto, quest'ultimo parametro è un indice delle dimensioni del difetto ed è misurato in mm.

	Velocità [m/s]	Profondità media [mm]	Diametro medio [mm]	Profondità max [mm]	Diametro Max [mm]
P1	5622	16,7	7,6	21	9,2
P2	5656	25,5	5,3	28	6,6
P3	5622	17	3,1	25	3,5
P4	5656	13	5,6	15	6,5

Tabella 4.2: Difetti riscontrati con l'analisi ultrasonora

Come mostrato in tabella 4.2 si vede che vi sono delle differenze nella velocità dell'onda sonora, queste differenze sono dovute alla microstruttura del materiale. I provini P1 e P3 hanno velocità uguale tra loro ma diversa dai provini P2 e P4. Questo risultato è in accordo con quanto detto nel cap3.1 infatti i provini P1 e P3 non rivelano al loro interno zone caratterizzate da grafite chunky.

Dalla tabella 4.2 si deduce che i provini P1 e P2 sono caratterizzati da difetti più estesi e profondi rispetto agli altri due provini, segno che l'inoculazione utilizzata in siviera_1 produce più difetti rispetto a quella utilizzata in siviera_2. Confrontando i provini P3 e P4 si vede che il provino P4 presenta difetti meno profondi rispetto al provino P3 ma

con dimensioni maggiori.

L'esame agli ultrasuoni ha evidenziato che la distribuzione dei difetti nella parte superiore del getto non sia uniforme, e che i difetti riscontrati si concentrano tutti su una zona ristretta della superficie superiore

Questa analisi non è servita solo per definire l'entità dei difetti ma anche per individuare la zona in cui la concentrazione di dross è più elevata in modo da poter effettuare al meglio la seconda sezionatura del provino e poter compiere un'analisi micrografica su una sezione rappresentativa.

CAPITOLO 5

Analisi microscopiche

5.1 Premesse

L'analisi microscopica, assieme allo studio delle proprietà meccaniche, è lo strumento più importante per definire le caratteristiche del materiale che costituisce i getti.

In questo lavoro è stata focalizzata l'attenzione sullo studio della morfologia della grafite e sulla presenza di inclusioni in prossimità della superficie ma la gamma di analisi che si possono effettuare è molto più vasta. Tra le altre analisi le principali sono lo studio del tipo di matrice e della presenza di carburi.

In questo capitolo si cercherà di individuare l'inoculante che da risultati migliori dal punto di vista microstrutturale

5.2 Caratterizzazione dei noduli di grafite

Un parametro importante per definire la qualità della ghisa è la morfologia della grafite che si è formata. Si possono ottenere getti che nominalmente hanno la stessa composizione ma che possiedono proprietà meccaniche diverse a causa della diversa morfologia della grafite. La soluzione ottimale sarebbe quella di avere un elevato numero di noduli di piccole dimensioni, ma questo risultato è raggiungibile solo in getti di piccole dimensioni in quanto l'efficacia dell'inoculante è più elevata a causa della minore evanescenza e il raffreddamento è più rapido e costante. In getti di grosse dimensioni l'evanescenza e il lento raffreddamento fanno sì che vi siano pochi siti di nucleazione della grafite e questo provoca un abbassamento delle proprietà meccaniche. La tipologia di grafite solidificata è fortemente influenzata dal tipo di inoculante utilizzato.

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

- numero di noduli: cioè il numero di particelle di grafite per millimetro quadrato;
- dimensione dei noduli: cioè la dimensione media dei noduli di grafite, è un parametro legato al numero di noduli infatti se precipitano numerosi noduli questi saranno di dimensioni ridotte mentre se precipitano pochi noduli questi

avranno dimensioni maggiori;

- rotondità: la rotondità è un indice di forma dei noduli di grafite, è un parametro importante in quanto una grafite 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 effettuare il conteggio sono stati prelevati quattro campioni per ogni provino sulla sezione B, in figura 5.1 è possibile vedere la mappatura del prelievo. Ad ogni campione è stato assegnato un nome Pn_m dove Pn indica il provino dal quale sono stati ricavati e m è la posizione all'interno del provino. Il campione denominato con la lettera L è stato utilizzato per analizzare l'andamento della microstruttura in superficie come descritto nel capitolo 4.2.

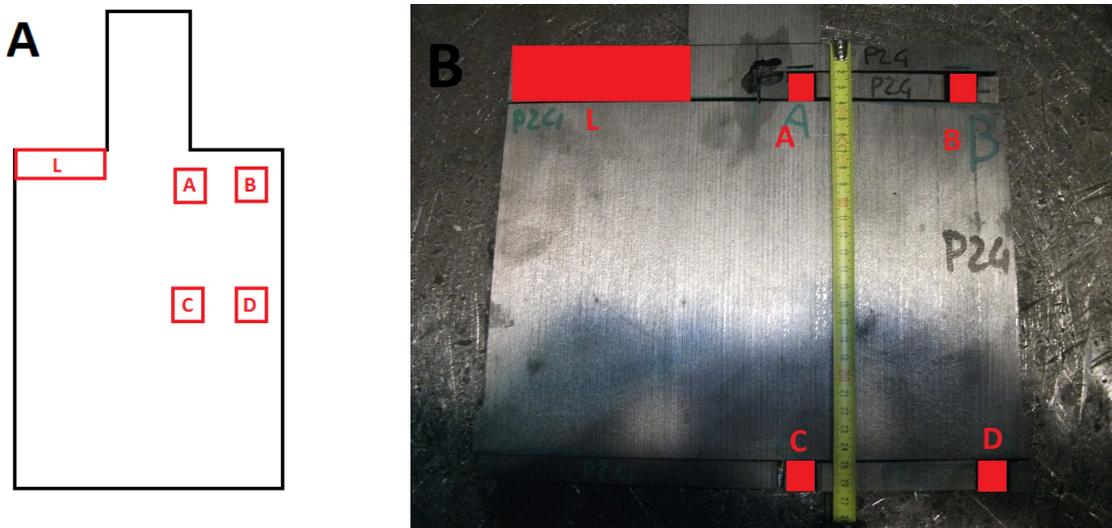


Figura 5.1: Disegno(A) e Foto(B) del prelievo dei campioni metallografici.

Il conteggio dei noduli è stato effettuato al microscopio ottico con una routine di 15 campi ad un ingrandimento di 50x sui campioni A,B,C,D di ogni provino. La routine è l'esecuzione automatica da parte del microscopio delle operazioni per ottenere il risultato finale. Tramite il tavolino motorizzato il software è in grado di gestire anche i movimenti del campione. In questo caso è stato scelto di eseguire un'analisi su 15 campi distribuiti in tre righe e cinque colonne.

Nella tabella 5.1 si possono vedere i risultati ottenuti, il fattore di rotondità è un fattore misurato dal software utilizzato per analizzare le immagini e vale 1 quando una particella è completamente rotonda mentre è maggiore di uno se la particella considerata non lo è. Meno la particella è rotonda più il valore di rotondità si allontana da 1.

Dalla tabella 5.1 si vede una disomogeneità prevedibile tra i quattro campioni di uno stesso provino, questo perché vi è una inevitabile variazione di configurazione dovuta al

	Area grafite [%]	Diametro equivalente [µm]	Rotioidità	Numero Noduli/mm
1_A	13,9	48,7	1,51	69
1_B	12,16	34,5	1,8	116
1_C	8,5	39,5	1,89	64
1_D	12,1	49,3	1,62	57
2_A	12,9	57,2	1,44	46
2_B	11,16	38,2	1,87	87
2_C	10,2	38,5	1,95	82
2_D	8,85	55,6	1,86	32
3_A	13	51,1	1,56	59
3_B	11,19	44,9	1,62	64
3_C	13,67	52	1,71	57
3_D	12,16	58,5	1,78	39
4_A	10,87	47,1	1,73	57
4_B	10,49	49,5	1,57	50
4_C	11,5	37,3	2,29	96
4_D	9,65	61	1,99	28

Tabella 5.1: Risultati analisi della grafite tramite routine

diverso raffreddamento nei quattro punti considerati.

È stato pensato quindi di compiere il conteggio in un singolo campo più ampio (a 25x) ma che non avesse al suo interno zone contenenti grafite degenerata. Nella tabella 5.2 si possono vedere i risultati ottenuti.

Da questa analisi appare che l'inoculazione migliore sia quella del provino P1.

	Area grafite [%]	Diametro equivalente [μm]	Rotondità	Numero Nodulimm ^{^2}
1A	13	49,4	1,46	65
1B	12	40,1	1,41	89
1C	5,4	35,4	1,65	53
1D	14	55,2	1,5	56
2A	15,3	58,4	1,27	54
2B	9,7	45,4	1,2	59
2C	8,7	44	1,27	54
2D	9	55,2	1,28	35
3A	11	52,1	1,57	49
3B	11	48,7	1,35	56
3C	11,9	44,8	1,32	72
3D	11,9	60	1,57	41
4A	10,7	56,3	1,43	41
4B	10,9	53	1,42	47
4C	10,1	58	1,24	37
4D	9,5	65,4	1,86	27

Tabella 5.2: Risultati conteggio noduli con singolo campo

Tutti e quattro i provini presentano una microstruttura molto variabile: si alternano zone ricche di difetti a zone pressoché perfette. Questo rende difficile la classificazione poiché ogni micrografia analizzata non è rappresentativa dell'intera microstruttura. Una soluzione a questo problema potrebbe essere prendere un elevato numero di campioni e fare un'analisi statistica su una maggiore popolazione.

In figura 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 si possono vedere delle micrografie caratteristiche di questo fenomeno, le micrografie sono state ricavate dal campione PnC.

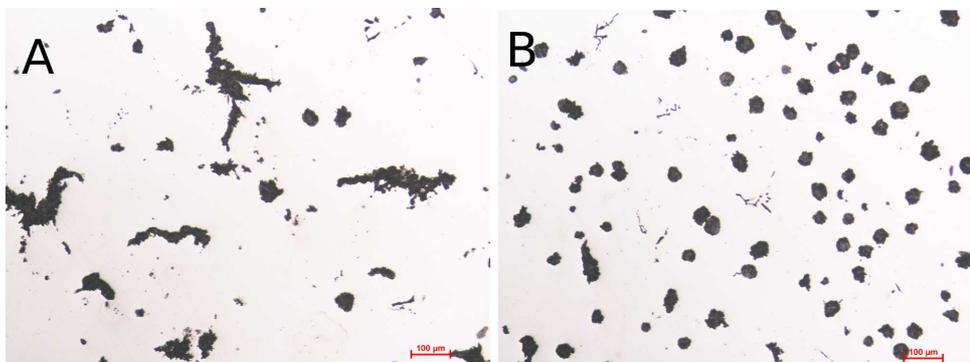


Figura 5.2: Campione PnC

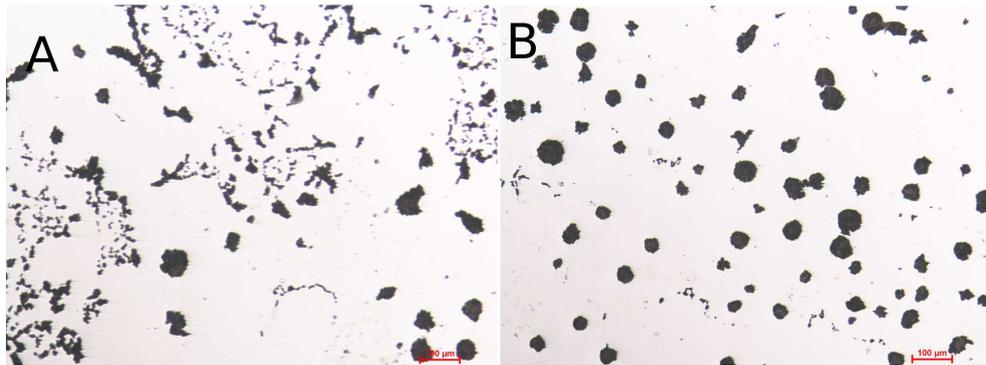


Figura 5.3: Campione P2C

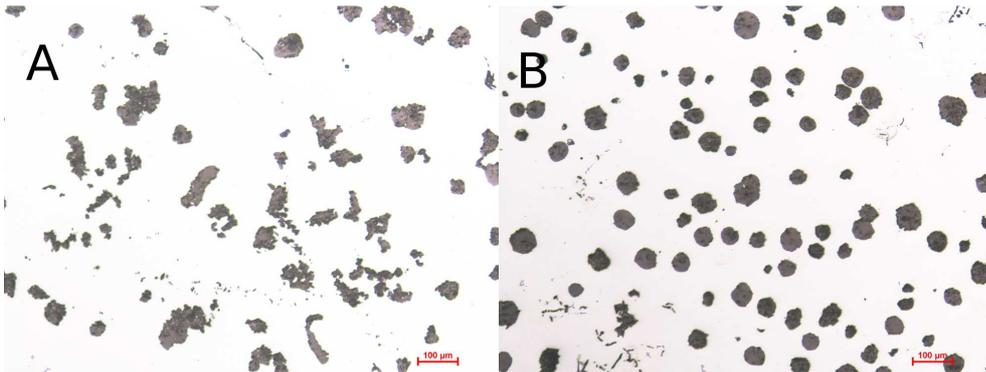


Figura 5.4: Campione P3C

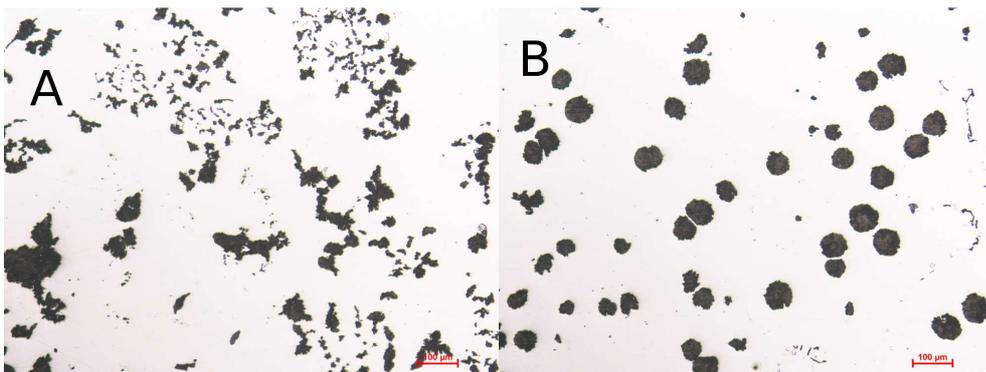


Figura 5.5: Campione P4C

5.3 Andamento dei difetti sulla superficie del getto

Con il campione Denominato L è stato svolto uno studio sulla variazione di morfologia in funzione della distanza dalla faccia superiore.

Nel tentativo di cercare un metodo rapido per misurare la profondità di difetti i campioni L sono stati lucidati ed è stato effettuato l'attacco con il NITAL, cioè una soluzione al 3% di acido nitrico in alcol etilico, per verificare se la presenza di difetti causasse una diversa colorazione.

Ciò che è emerso si può notare in figura 5.6: su tutti i provini è presente una fascia di colore scuro situata nella parte corrispondente alla faccia superiore del provino. I numeri scritti sui campioni sono la misura in mm dello spessore della zona con con colorazione scura.

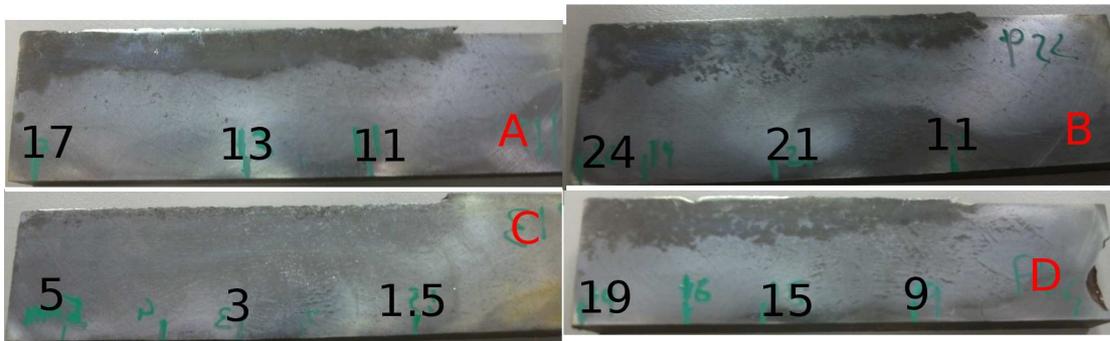


Figura 5.6: Provini PnL dopo attacco chimico

In questo caso il provino P3 è quello con lo spessore minore del difetto.

Per verificare se vi fosse una effettiva relazione tra la differenza di colorazione e la presenza di difetti sono stati prelevati tre campioni denominati PnX, PnY e PnZ, dove Pn è il nome del provino da cui sono stati ricavati, e sono stati esaminati al microscopio.

La mappatura dei campioni è visibile in figura 5.7.

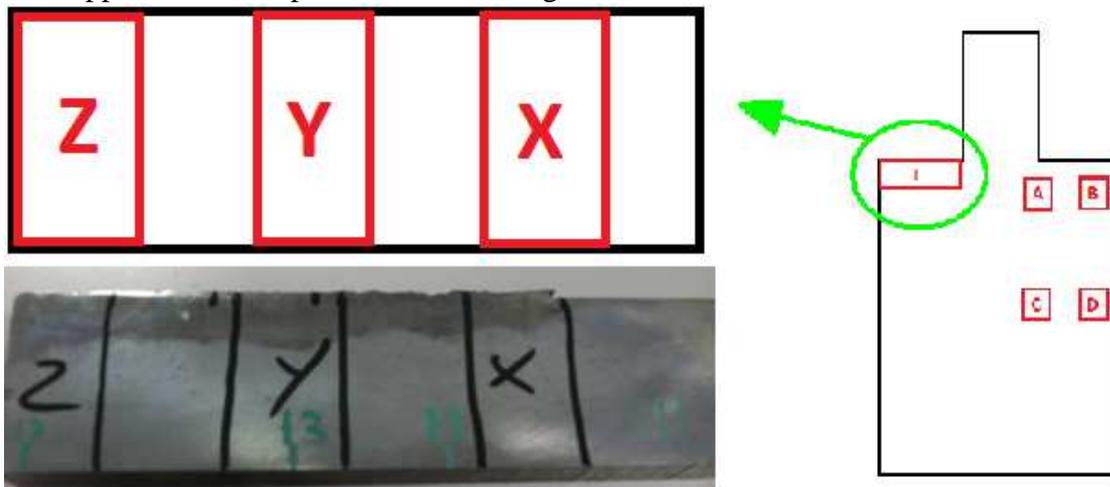


Figura 5.7: Mappatura prelievo campioni PnX, PnY, Pnz

Il campione PnX è il campione più interno più vicino alla materozza mentre il campione PnZ è il campione a ridosso della superficie laterale.

Dei campioni X, Y e Z è stato inizialmente individuato il difetto più lontano dalla faccia superiore e successivamente sono state effettuate delle micrografie lungo una immaginaria linea perpendicolare alla faccia in modo da poter vedere l'evoluzione della microstruttura partendo dalla superficie e andando verso il centro del provino.

I risultati ottenuti sono visibili in figura 5.8, si nota che la microstruttura cambia non

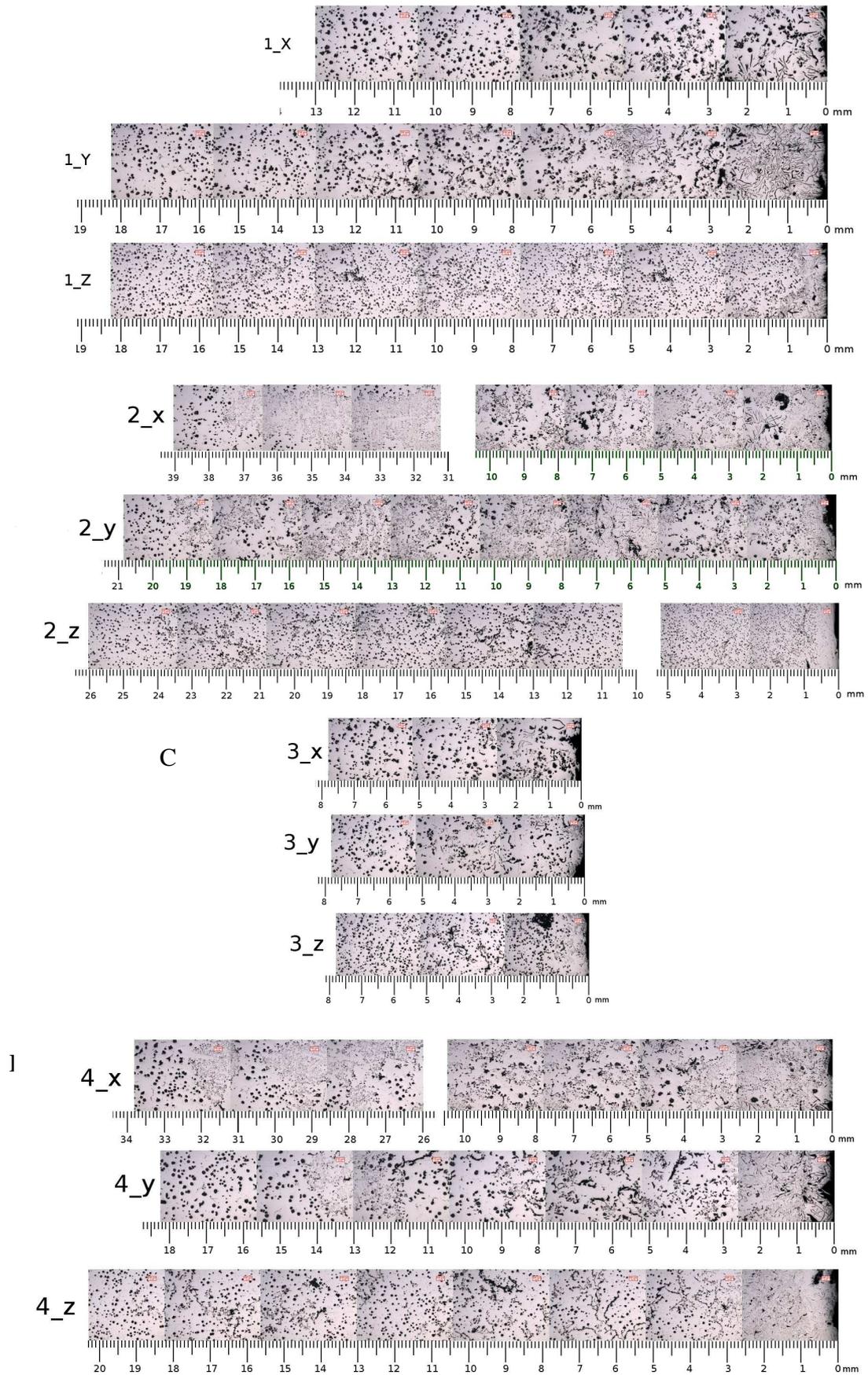


Figura 5.8: Andamento della microstruttura con la profondità; A: P1; B:P2; C:P3; D:P5.

solo con l'allontanarsi dalla faccia superiore ma anche allontanandosi dalla superficie laterale passando da una struttura fine ad una struttura grossolana.

Nelle zone dove la stessa microstruttura si ripete per molte micrografie la scala si interrompe per non inserire delle immagini ridondanti.

Nei provini P2 e P4 è presente della grafite chunky che si estende fino ad una distanza di 30 mm dalla faccia superiore. È evidente la differenza tra la profondità di difetti dei provini P1, P2, P4 e il provino P3. Quest'ultimo provino presenta già a profondità di 8 mm una microstruttura priva di difetti.

E stata anche misurata la profondità del dross, i risultati sono visibili in tabella 5.3.

	x	y	z
P1	5(11)	12(13)	13(17)
P2	8(11)	18(21)	16(24)
P3	4(1,5)	5(3)	4(5)
P4	6(9)	14(15)	18(19)

Tabella 5.3 Profondità massima del dross in mm

Accanto alla misura della profondità del dross fra parentesi è scritto il valore di profondità dell'alone scuro ottenuto dopo l'attacco acido. I due valori non sono esattamente gli stessi ma, ad eccezione del campione P2Z, lo spessore dell'alone segue l'andamento dello spessore di dross. Si può ipotizzare quindi che i due fenomeni siano collegati tra loro, ma per avere una completa conoscenza della relazione tra il dross e la differenza di colorazione della zona superficiale dopo l'attacco chimico sono necessarie ulteriori analisi; una strada percorribile potrebbe essere quella di analizzare la composizione chimica al SEM.

Si vede che il provino che presenta le condizioni migliori per quanto riguarda i difetti superficiali è il provino P3. Viene confermata l'efficienza dell'inoculante I_A sia per contrastare l'insorgenza di grafite chunky sia per prevenire la formazione di dross e inclusioni.

CAPITOLO 6

Conclusioni

L'analisi dei diversi tipi di inoculazione effettuata ha mostrato che l'inoculazione utilizzata per produrre il provino P3 è la più valida per essere applicata a livello industriale, in quanto il provino P3 presenta il minor numero di difetti rispetto agli altri provini.

L'analisi termica ha mostrato che questo tipo di inoculazione porta i migliori vantaggi a livello di riduzione dei sottoraffreddamenti necessari alla nucleazione e che quindi il rischio di ritiri e flottazione di grafite è ridotto.

Dall'analisi della superficie esterna il getto P3 è l'unico ad avere una superficie esente da reazioni metallo-forma ed è l'unico ad avere una superficie complessivamente uniforme. L'analisi ultrasonora della profondità dei difetti mostra che il provino P3 possiede una minor quantità di dross distribuita sulla superficie anche se il provino con la minore profondità di dross è il provino P4.

Le sezioni dei campioni hanno mostrato che i provini P2 e P4 hanno al loro interno una notevole quantità di grafite chunky, questi due metodi di inoculazione non sono da considerare validi per un'applicazione industriale in quanto la grafite chunky provoca una diminuzione di resistenza a trazione e di allungamento a rottura.

L'analisi del conteggio dei noduli mostra che il provino P1 presenta delle condizioni finali di solidificazione della grafite migliori rispetto al provino P3 ma analizzando la profondità di difetti sotto la superficie il provino P3 risulta quello migliore.

La scelta dell'inoculante migliore ricade quindi sulla soluzione adottata per il provino P3.

Un possibile implemento dello studio sulla migliore inoculazione è lo studio delle proprietà meccaniche del materiale. Sicuramente dopo un esame delle proprietà meccaniche si potrà definire con certezza quale dei quattro provini sia il migliore anche se ci si aspetta che i provini P2 e P4 abbiano delle proprietà meccaniche inferiori agli altri due provini a causa della presenza di grafite chunky.

Bibliografia

- 1.H. Roedter, M. Gagnè, "Ductile iron for heavy section wind mill castings: a European experience", Rio tinto iron & titanium inc, 2003;
- 2.A.Zambon, "Appunti della lezione *Struttura dei getti di leghe a base ferro*", 2001;
- 3.J. Alva, "L'origine di gravi difetti dross nei getti di ghisa sferoidale", Fonderia pressofusione, Marzo 2010, pp 38-43;
- 4.M. Gagnè, M.P. Paquin, P.M. Cabanne,"Dross in ductile iron: source, formation and explanation",Indian foundry journal,Vol 57, N°9, Settembre 2011, pp 39-44;
- 5.H. Roedter; "Dross in ductile iron", Rio tinto iron & titanium;
- 6.G.M. Goodrich, "Cast iron microstructure anomalies and their causes", AFS Transactions;
- 7.J. Campbell, "Castings",2. ed., Elsevier Butterworth Heinemann, 2003;
- 8.D. M. Stefanescu...[et al.], 15: Casting - 9. ed. - , Metals park : ASM international,1988;
- 9.I. Asenjo, P. Larranaga, J. Sertucha, R. Suarez, J.M- Gomez, I. Ferrer, J. Lacaze, "Effect of mould inoculation on formation of chunky graphite in heavy section spheroidal graphite cast iron parts", International journal of cast metal research, vol 20, n°6, 2007;
- 10.R. Kallbom, K. Hamberg, M.Wessen, L.E. Bjorkegren, "On the solidification of ductile iron castings containing Chunky graphite", Material science and engineering, 2005;
- 11.A. Mourujarvi, K. Widell, T. Saukkonen, H. Hannin, "Influence of chunky graphite on mechanical and fatigue properties of heavy-section cast iron", Fatigue & fracture of engineering material & structures, vol 32, 2009, pp 379-390;
- 12.H. Nakae, S. Jung, H.-C. Shin, "Formation mechanism of chunky graphite and its preventive measures", Journal of material science technologies, vol24, n°3, 2008;
13. J. sertucha, R. Suarez, I. Asenjo, P. Larranga, J. Lacaze, I. Ferrer, S. Armendariz, "Thermal analysis of the formation of chunky graphite during solidification of heavy-section spheroidal graphite iron parts", ISIJ international, Vol49, N°2, 2009, pp220-228;
- 14.Luca Iuliano, Manuale della fonderia, Edizioni Tecniche nuove, 2003.

