

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali



Tesi di Laurea Magistrale

Nuove ghise as-cast ad alte prestazioni con alto silicio

Relatore:

Prof. Mario Rosso

Correlatori:

Dr. Ildiko Peter

Ing. Manuele Daniele

Candidato:

Tella Maffo Jaures

I. Sommario

I.	Introduzione	7
II.	Ghise	9
III.	Ghise sferoidali	12
1.	Composizioni chimiche delle ghise sferoidali	14
2.	Standardized grades – Ghise sferoidali	17
IV.	Processo produttivo	18
1.	Fusione della ghisa sferoidale di base e trattamento del metallo	19
A.	Fusione in cubilotto	19
B.	Fusione elettrica	22
C.	Preparazione del metallo base	22
2.	Sferoidizzazione e inoculazione	24
A.	Sferoidizzazione	24
B.	Inoculazione	25
V.	Solution strengthened Ferritic Ductile iron – SSFs	27
1.	Proprietà meccanica	29
2.	Influenza dell'alto tenore del silicio sulle proprietà meccaniche	34
3.	Chunky grafite	36
4.	Segregazione elementi di lega	38
VI.	Rinforzamento soluzione solida	39
VII.	Effetto della composizione chimica	41
VIII.	Presentazione dei campioni per analisi e prove meccaniche per ghise SSF referenza alla UNI_EN_1563_2012	43
1.	Dimensione del campione	44
A.	Frequenza e numero di test	44
2.	Tipi di campioni	45
A.	Separately cast sample	45
B.	Side-by-side cast samples	45
C.	Cast-on samples	45
D.	Test pieces machined from cast samples	45
E.	Samples cut from a casting	45
3.	Prove meccaniche	46
A.	Test di trazione	46
B.	Prova d'urto	46

C.	Prova di durezza	46
D.	Osservazione della struttura della grafite	46
4.	Presentazione norma UNI_EN_1563_2011 specificazione delle ghise SSF.....	47
A.	Test pieces machined from cast samples.....	47
B.	Test pieces machined from samples cut from a casting	47
C.	Specificazione durezza	48
D.	Composizione chimica.....	49
E.	Struttura della grafite e della matrice	49
F.	Nodalità	49
IX.	Alcuni risultati di caratterizzazione e descrizione dei parametri usati.....	50
1.	Risultati di caratterizzazione	51
A.	Prova I-1:	51
B.	Prova I-2:	52
C.	Prova II-1:	53
D.	Prova II-2:	54
E.	Prova III-1:	56
F.	Prova III-2:	57
G.	Prova IV-1:	59
H.	Prova IV-2:	60
2.	Descrizione dei parametri osservati durante le prove	62
A.	Studio metallografica (Microstruttura)	62
B.	L'inoculazione.....	63
C.	Procedura d'inoculazione.....	65
D.	Interpretazione della solidificazione secondo le curve di raffreddamento	68
3.	Confronto fra risultati delle prove e la Normativa UNI_EN_1563	70
A.	Relazione Microstruttura – sferoidizzazione e inoculazione – caratteristiche meccaniche... 73	
4.	Discussione passo inoculazione.....	76
X.	Conclusione	77
XI.	Riferimenti bibliografici	78

Figura 1 : Classification of cast irons - Cooling rates and microstructures ²	10
Figura 2 : forme di grafite ⁴	10
Figura 3 : distribuzione tipichi di grafite ⁴	11
Figura 4 : Noduli di grafite in una ghisa duttile ⁵	12
Figura 5 : Interazione tra cricca e grafite ⁵	12
Figura 6 : Typical microstructure of nodular cast iron ⁶	13
Figura 7 : Influenza della morfologia della grafite sulle curve tensione-deformazione di diverse ghise ⁷	14
Figura 8 : Ghise grigie senza aggiunto di Mg e Ce	16
Figura 9 : Ghise sferoidale con aggiunto di Mg e Ce per la sferoidizzazione della grafite	16
Figura 10 : Schema a blocchi del processo produttivo di fonderia ⁹	19
Figura 11 : Forno al cubilotto	20
Figura 12 : Forno a cubilotto con recupero dei gas di scarico ⁹	21
Figura 13 : Esempio di grafite esplosa ⁹	21
Figura 14 : Forno ad induzione a bassa frequenza con nucleo magnetico ⁹	22
Figura 15 : Forno ad induzione a media frequenza senza nucleo magnetico, circondato da spira induttrice. ⁹	22
Figura 16 : processo di sferoidizzazione ⁷	24
Figura 17 Forma grafite in funzione del magnesium residuale ⁷	26
Figura 18 : Metodo con siviera presenza di lega madre al fondo (Opened Ladle-Sandwich Process) e Metodo Tundish cover (Tundish Ladle Process) automatico ⁹	27
Figura 19 : (a) Ghise sferoidale 600-3 al 60% perlite (b) Ghisa sferoidale 600-10 ad alto silicio. La.....	28
Figura 20 : Ratio 0.2% proof strength /tensile strength ¹	29
Figura 21 : Elongation vs 0.2% proof strength ¹	30
Figura 22 : Hardness variation in ferritic-perlitic grade vs SSF grade ¹¹	31
Figura 23 : Influence of matrix on surface roughness. EN-GJS-500-7 vs EN-GJS-500-14 ¹¹	31
Figura 24 : (left). Relation between Brinell hardness and 0.2% proof strength (Right) hardness and tensile strength ¹	32
Figura 25 : Comparable fatigue results for ferritic-perlitic and SSF grade ¹¹	33
Figura 26 : Influence of high silicon on mechanical properties of SSFs tensile strength and 0.2% proof stress ¹¹	34
Figura 27 : Influence of high silicon on mechanical properties of SSFs breaking elongation ¹¹	35
Figura 28 : Curva trazione sforzo deformazione funzione dell'alto tenore silicio ¹⁰	35
Figura 29 : Deviation in graphite shape in SSF, chain of small nodules ¹¹	38
Figura 30 : Effect of silicon on fracture pattern of DI: (a) dimple fracture (2.9Si); (b) dimple and cleavage (4.0Si); (c) cleavage (4.3Si) ¹³	39
Figura 31 : Silicon segregation- Decohesion between nodules and ferrite matrix ¹⁴	39
Figura 32 : Effect of Solute content on solid solution strengthening ⁶	40
Figura 33 : microstruttura GJS-600-3 spessore differente ¹⁰	41
Figura 34 : Microstruttura GJS-600-10 Spessore differente ¹⁰	42
Figura 35 : Diagramma Fe-C per livelli di silicio: 0; 2.05 ⁷	42

Figura 36 : Procedura preparazione compioni metallografico.....	63
Figura 37 : Microstruttura di un pezzo spesso in ghisa sferoidale ferritica mostrando una nodularità imperfetta causata da una inoculazione non adeguata ²⁵	67
Figura 38 : Microstruttura di un pezzo spesso in ghisa sferoidale ferritica mostrando un numero di nodule e una nodularità adeguata ²⁵	67
Figura 39 : Step dell'inoculazione delle ghise sferoidale	67
Figura 40 : Siviera di trattamento di sferoidizzazione e di pre-inoculazione	75
Figura 41 : Lega inoculante.....	75

Sommario

Le proprietà meccaniche e le proprietà di lavorabilità sono essenziali in molte applicazioni industriali. Le ghise duttili si prestano in modo più economico, rispetto ad altri materiali, per la produzione dei componenti metallici strutturali. Per i getti in cui è richiesta una resistenza intermedia e una duttilità, è comune sapere che le ghise sferoidali ferritici-perlitici tradizionali come ISO 1083 / 500-7 mostrano grandi variazioni di durezza. Questi sono principalmente causati dal contenuto di perlite notevolmente diverso, sia in posizioni diverse all'interno di una parte che tra parti diverse in uno stesso pezzo o in diversi lotti. Le variazioni della velocità di raffreddamento a causa dello spessore della parete e della posizione nello stampo, nonché la variazione della quantità di elementi che stabilizzano la perlite, contribuiscono a cambiamenti dannosi della durezza. Il primo rimedio è quello di evitare la formazione di perlite e, invece, ottenere le necessarie proprietà meccaniche mediante il rinforzamento della soluzione solida ferritica della matrice aumentando il contenuto di silicio nell'intervallo di 3,7wt% -3,8wt%. Durante gli anni ci sono stati diversi sviluppi nel capitolo delle standardizzazioni. 1998 standardizzazione nazionale come SS 140725, seguita nel 2004 da ISO 1083 / JS / 500-10. Indexator AB 2005 specificazione JS / 500-10 per tutte le nuove ghise duttili e con alto tenore di silicio. I miglioramenti includono la riduzione del 75% nelle variazioni della durezza e l'aumento del 30% nella vita dell'utensile di taglio, combinata con costanti miglioramenti delle proprietà meccaniche. Tuttavia, la produzione di queste ghise duttili ad alto tenore di silicio riscontra alcune difficoltà a raggiungere proprietà meccanica e caratteristiche microstrutturali che siano adeguate alla descrizione della Norma Europea UNI EN 1563. Queste sono dovute alle pratiche di fonderia e di metallurgia e soprattutto riguarda il controllo dei parametri più importanti del processo, come la composizione chimica, la sferoidizzazione, l'inoculazione e la colata associata alla velocità di raffreddamento. La formazione della grafite chunky, lo sviluppo delle porosità e delle segregazioni di elementi di lega sono da considerare come cause principali che portano all'alterazione delle caratteristiche meccaniche. Questa Tesi di Laurea si colloca all'interno di una collaborazione tra il Politecnico di Torino e O/Cava Meccanica il cui obiettivo principale è lo studio e l'ottimizzazione di ghise sferoidali ad alto tenore di Si. In particolare, la ricerca si è focalizzata in un primo luogo a individuare le cause che portano allo sviluppo della grafite chunky, responsabile del peggioramento delle caratteristiche meccaniche, e in un secondo tempo a proporre delle soluzioni di ottimizzazione per il processo produttivo. Il lavoro è stato svolto utilizzando, per la maggior parte, dati ottenuti in azienda durante il processo di produzione in periodi diversi.

I. Introduzione

Lo sviluppo della metallurgia risponde alle richieste sempre più crescenti delle caratteristiche dei materiali strutturali. È indispensabile che materiali avanzati siano continuamente studiati e sviluppati per soddisfare le esigenze richieste. Trovare queste soluzioni a costi relativamente bassi e brevi tempi di esecuzione sono parti essenziali dell'innovazione nello sviluppo del processo per tali materiali di ingegneria, senza compromettere la loro integrità strutturale e le proprietà meccaniche. Nel campo della metallurgia ci sono gli acciai (acciai duri, dolce, non legati, legati, inossidabile ect..) , le leghe leggere, le superleghe e le ghise. Per le ghise, il casting come processo di produzione e lo sviluppo dei nuovi tipi di ghise offrono opzioni promettenti in questo settore. Fra queste ghise di interesse particolare è quella della ghisa sferoidale (o anche duttile). La ghisa sferoidale prende il nome dalla forma della grafite, che all'esame micrografico appare sotto forma di sferoidi o noduli, e non di lamelle come per la ghisa grigia. Effettuando il processo di produzione della ghisa in maniera corretta, le proprietà del materiale vengono dunque sfruttate al meglio. La formazione dei noduli avviene all'interno di una matrice metallica, di struttura dipendente da svariati fattori, quali velocità di raffreddamento del getto, eventuali trattamenti termici successivi alla produzione, inoculazione ed ovviamente la composizione chimica della ghisa. Sin dai primi impieghi in ambito industriale, risalenti al 1948, questo tipo di ghisa si è proposto come una valida alternativa all'utilizzo di acciaio e delle altre ghise, garantendo buone prestazioni ad un costo contenuto. Oggi, la ghisa sferoidale è utilizzata dovunque nel mondo e in ogni campo ingegneristico, potendo spesso garantire, rispetto agli altri materiali, vantaggi in termini di prestazioni e di costo di produzione. Come anticipato, effettuando un controllo adeguato sulla composizione chimica, sui parametri di colata e sulle modalità di raffreddamento della ghisa, è infatti possibile ottenere diverse combinazioni di resistenza alla trazione, all'usura, di limite di fatica, tenacità, duttilità e così via: si può quindi scegliere, ad esempio, se privilegiare un alto valore di resistenza a trazione (come per la GS-900-2) oppure l'allungamento alla rottura (come ad esempio con la GS-350-22). Questo sviluppo della ricerca e dell'innovazione nel settore delle ghise ci ha permesso di passare dalla ghisa sferoidale convenzionale o anche di prima generazione composto dalla ghisa sferoidale ferritica, ghise sferoidale perlitica, ghisa sferoidale ferro-perlitico ecc. alla ghisa di seconda generazione "Solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast iron DIN EN 1563" (SSF). Questa ghisa sferoidale di seconda generazione comporta una matrice ferretica con nulla o trascurabile percento di perlite. Il rafforzamento avviene attraverso soluzione solida sostituzionale. Oggi, alcune fonderie hanno incorporato questi gradi standardizzati recente (ad esempio EN GJS 500-14 o EN GJS 600-10 secondo lo standard europeo EN 1563: 2011)¹ per sostituire alcuni gradi convenzionali che contengono sia ferrite che perlite.

Fondata nel 1964, la O/Cava Meccanica fin dalle sue origini ha focalizzato le proprie risorse sulla produzione di componenti. Oggi l'azienda integra uno dei più avanzati e sofisticati impianti europei di fonderia di ghisa nodulare, ed un moderno reparto di lavorazione meccanica e pre-assemblaggio, allo scopo di offrire un prodotto finito ad alto contenuto tecnologico e valore aggiunto, pronto per l'assemblaggio sul veicolo in perfetta filosofia just-in-time. O/Cava Meccanica è fra le imprese di metallurgia che hanno inserito nel loro processo produttivo le nuove ghise sferoidale con alto silicio

(EN GJS 500-14 o EN GJS 600-10 secondo lo Standard Europeo EN 1563: 2011)¹. Il lavoro di questa tesi è stato svolto in collaborazione con O/Cava meccanica. Durante il processo produttivo dalla ghisa sferoidale con alto tenore di silicio è stato notato una tendenza alla segregazione di grafite degenerata anche chiamato grafite chunky e alla porosità. Come è stato esposto precedentemente, l'obiettivo principale della mia tesi è

- 1- trovare motivazione scientifiche alla segregazione della grafite chunky durante la colata dei getti,
- 2- studiare la sua influenza sulle caratteristiche meccaniche, nonché individuare, soluzioni da includere nel processo produttivo per annullare o ridurre al minimo la segregazione della grafite chunky nel getto prodotto.

Affrontare la problematica della tesi richiede un approccio sistematico alla soluzione con un'ampia ricerca, e una revisione della letteratura riguardante gli studi esistenti sul grado standardizzato della ghisa duttile. La struttura di ripartizione del lavoro e la soluzione per la problematica della tesi inizia con uno sfondo teorico dettagliato che si familiarizza con i concetti di sviluppo dietro i titoli standardizzati, con particolare attenzione ai gradi ferritico-perlitico e SSF seguito dallo studio dei parametri di colata delle ghise sferoidale ad alto contenuto di silicio. Esaminando questi parametri sarà possibile spiegare l'insorgenza della grafite chunky e così la non conformità del getto alle specificazioni della Norma Standard Europeo EN 1563¹. Nella tesi si focalizzerà sulle ghise SSF, studiando il ruolo delle fasi costituenti della microstruttura, l'inoculazione e la sferoidizzazione e loro il loro effetto sulle caratteristiche meccaniche. La tesi sarà sviluppata in questa sequenza:

- 1- Analisi della letteratura scientifica sull'argomento
- 2- Usando dati bibliografici precedente, avera lo studio e la messa in evidenza della non conformità alle specificazioni EN UNI 1563 dei getti prodotti in fonderia (proprietà meccanica microstruttura ecc..) attraverso l'esaminazione delle diverse composizione chimiche, degli inoculanti e i risultati di test di trazione svolti sui campioni estratti dai getti nonché loro microstruttura.
- 3- Studio delle cause della non conformità dei getti prodotti
- 4- Studio di una possibile implementazione del processo produttivo dei getti che rispettino le specifiche relative alle caratteristiche meccaniche e alle microstrutture imposte dalla normativa EN UNI 1563.
- 5- Discussione dei risultati ottenuti e individuazione di processi o metodi per l'ottimizzazione.

II. Ghise

Le ghise sono dei materiali con contenuto di carbonio sopra il 2.14wt (% peso)². In pratica, le ghise in realtà contengono 3 - 4.5 (% peso) carbonio secondo l'applicazione, e l'inclusione di altri elementi di lega pertinenti in particolare il silicio. La concentrazione di carbonio riduce al minimo la temperatura di fusione del punto eutettico 1150°C – 1300°C che è significativamente inferiore a quello dell'acciaio e con questa fluidità, rendendo la colabilità relativamente facile. L'aggiunta di altri elementi di lega nella produzione di ghisa può tuttavia influenzare la massima solubilità del carbonio in austenite, nel qual caso si possono ottenere strutture eutettiche con meno di 2% di carbonio in tali leghe^{2,3}. La microstruttura delle ghise formate sono largamente dipendente dalla composizione chimica che a sua volta determina le proprietà meccaniche e le caratteristiche generali della ghisa. Le ghise possono essere classificate in quattro gruppi comuni seconda delle loro metallurgiche come illustrato in figura 1.

Classificazione delle ghise:

- Ghise Nere: ipereutettiche con alti contenuti di C
- Ghise Grigie: lamellari con un contenuto medio di C
- Ghise Bianche: ottenute con raffreddamento veloce ed elementi stabilizzanti dei carburi.
- Ghise sferoidali: ottenute tramite processi di inoculazione e sferoidizzazione, con matrice ferritico o perlitico, sono le ghise di maggior interesse per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche.
- Ghise legate: tale classe include ghise al silicio, al cromo e al nichel, e qualsiasi altra ghisa prodotta per soddisfare particolari esigenze.
- Ghise vermicolari: la grafite in questo caso non è sferoidale neanche lamellare, ma assume forma che può essere considerata ibrida tra le due forme già viste.

Le ghise grigie sono caratterizzate da grafiti lamellari in entrambe matrice perlitica o ferritica. La ghisa sferoidale ottenuta con l'aggiunta di magnesio, cerio o ittrio in un processo noto come "nodularisation" produce ghisa duttile, con grafite sferoidale in entrambi matrice perlitica o ferritica. La grafite in ghisa grigia agisce come concentratori di stress rendendo estremamente suscettibile il fallimento fragile rispetto alla grafite sferica in ghisa duttile. Gli altri tipi sono ghise bianche che sono ancora più fragili a causa di carbonio esistenti principalmente come cementite nella sua microstruttura. Le ghise malleabili sono le ghise bianche trattate termicamente mentre l'ultima classe sono ghise vermicolari o compattati-grafite che combinano le proprietà microstrutturali sia delle ghise grigie e sferoidali con grafite a forma vermiforme o vermicolare.

Analizziamo ora la struttura della grafite nella ghisa, la quale influenza enormemente le caratteristiche principali della ghisa stessa. Possiamo classificare diverse forme e distribuzioni della grafite. Distinguiamo tra 6 diverse forme caratteristiche. Fig 1

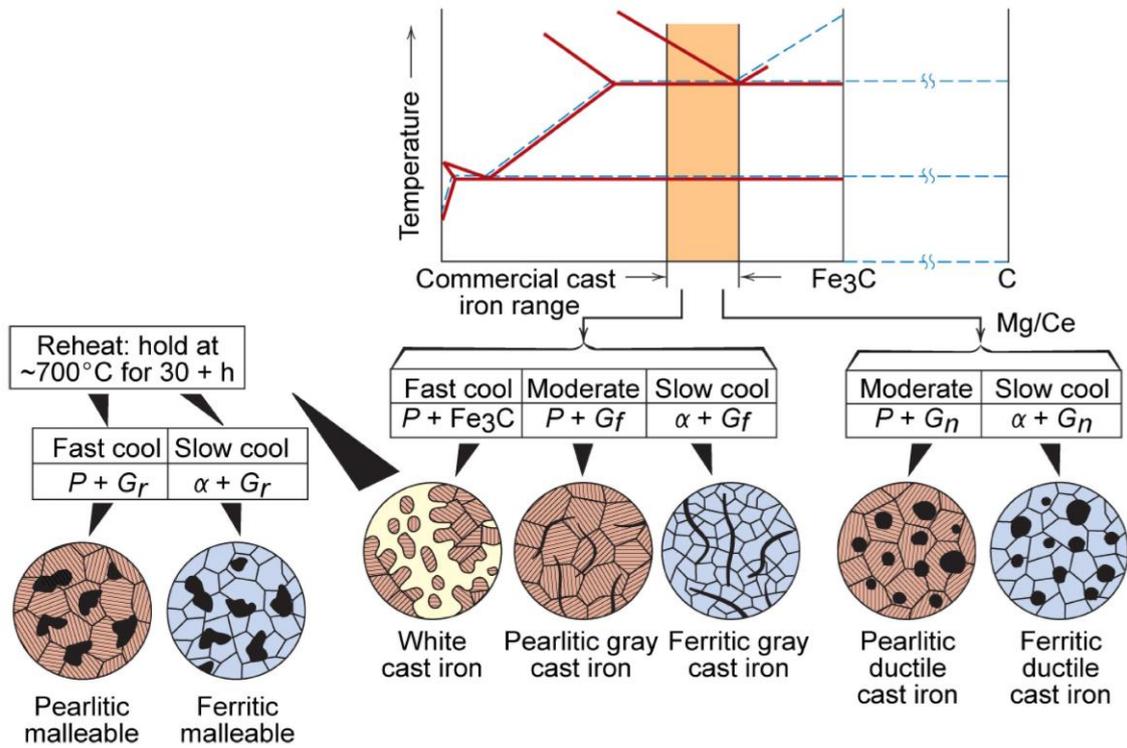


Figura 1 : Classification of cast irons - Cooling rates and microstructures²

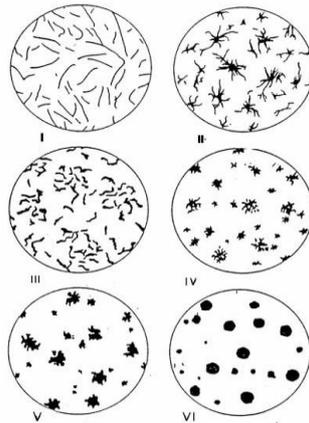


Figura 2 : forme di grafite⁴

- I) Lamelle sottile con punte aguzze
- II) Noduli con accentuate ramificazione di mole
- III) Lamelle spesse con punte arrotondate
- IV) Flocculi frastagliati
- V) Flocculi compatti
- VI) Sferoidi

Distinguiamo 5 tipi di distribuzione principale della grafite (Fig 2):

- a) lamelle sottili distribuite uniformemente senza orientamento preferenziale
- b) Lamelle raggruppate in rosette senza orientamento preferenziale; risultato di una inoculazione insufficiente.
- c) Lamelle spesse e diritte senza orientamento preferenziale, raggruppate nelle zone interdendritiche; tipica di una ghisa ipereutettica autoinoculante.
- d) Lamelle molto piccole senza orientamento preferenziale, raggruppate nelle zone interdendritiche; causata da basse velocità di raffreddamento.
- e) Lamelle piccole con orientamento preferenziale, raggruppate nelle zone interdendritiche, tipica di alte velocità di raffreddamento.

Le strutture delle distribuzioni hanno un'incidenza sulle caratteristiche meccaniche ottenibile. La grafite tende spontaneamente a segregare in lamelle grafitiche nelle zone interdendritiche durante il raffreddamento del liquido, tale microstruttura è da evitare, poiché le lamelle così distribuite causano spiacevoli effetti di intaglio nella struttura cristallina della ghisa, portando ad un crollo della performance del materiale; è da preferire invece una distribuzione casuale delle lamelle grafitiche con una buona omogeneità nella distribuzione, al fine di limitare gli effetti di intaglio. A questo punto, è preferenziale avere della grafite lamellare con una distribuzione di tipo (a

Figura 3.11
Distribuzioni tipiche della grafite.

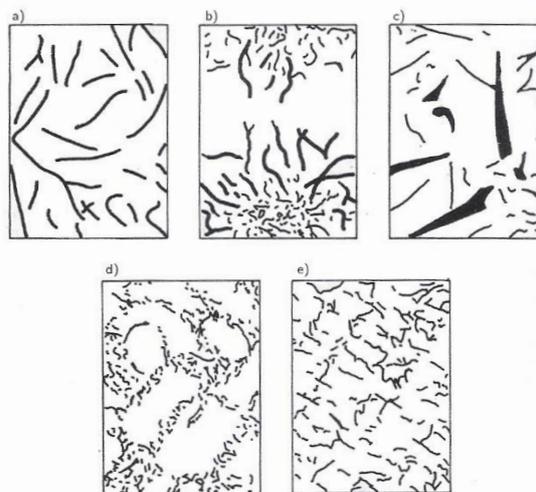


Figura 3 : distribuzione tipichi di grafite ⁴

III. Ghise sferoidali

Una ghisa duttile (detta anche ghisa sferoidale o ghisa a grafite sferoidale o ghisa nodulare- in inglese ductile iron) è una ghisa in cui la grafite, anziché sotto forma di lamelle, si presenta in noduli a forma di sferoidi (fig 4). I noduli si trovano in una matrice metallica la cui struttura è funzione della composizione chimica del tipo specifico di ghisa, della velocità di raffreddamento al momento della solidificazione e degli eventuali trattamenti termici successivi. La forma sferoidale della grafite produce una minore concentrazione di tensione rispetto a quella lamellare (fig 5); inoltre la forma sferica è quella che a parità di volume presenta la minore superficie e la matrice risulta perciò meno danneggiata riuscendo così a sfruttarne meglio le caratteristiche.

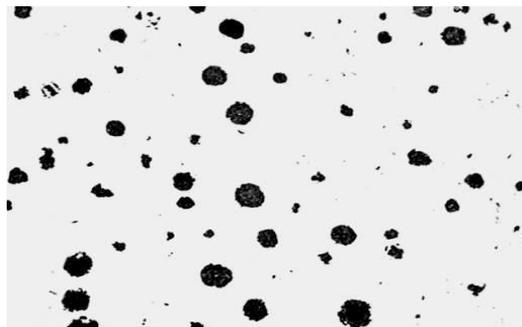


Figura 4 : Noduli di grafite in una ghisa duttile⁵

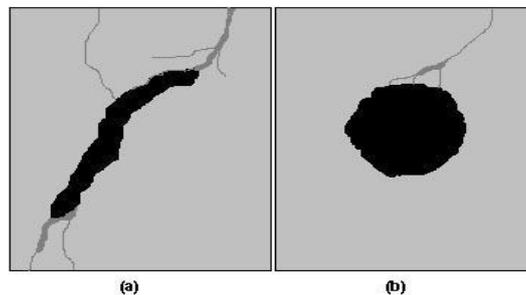


Figura 5 : Interazione tra cricca e grafite⁵

Esistono tre tipologie di ghise duttili che costituiscono le ghise duttili “convenzionali”, sono in genere non legate e la struttura della matrice è ottenuta direttamente in fonderia (il trattamento di ricottura sulle ghise duttili ferritiche si esegue per migliorarne la duttilità e non per modificarne la struttura) ci sono

- **Ghise duttili ferritiche:** sono costituite da noduli di grafite in una matrice completamente ferritica, che conferisce alla ghisa una buona duttilità e resistenza all'impatto, resistenza a trazione e carico di snervamento equivalenti a quelli di un acciaio non legato. Le ghise duttili ferritiche possono essere prodotte direttamente in fonderia, ma per conferire duttilità e tenacità al getto si esegue in genere un trattamento di ricottura.
- **Ghise duttili ferritico-perlitiche:** hanno una matrice mista costituita da ferrite e perlite. Questa è la forma più frequente con la quale si presentano le ghise duttili, e si ottiene

direttamente alla solidificazione del getto. Hanno proprietà intermedie tra quelle ferritiche e quelle perlitiche, con buona lavorabilità e bassi costi di produzione.

- **Ghise duttili perlitiche:** la matrice è quasi completamente perlitica, con piccole quantità di ferrite presente intorno ai noduli di grafite. Sono dotate di elevata resistenza a trazione, buona resistenza all'usura e moderata duttilità. A parità di resistenza hanno lavorabilità superiore a quella degli acciai. Si esegue a volte un trattamento di normalizzazione del getto uscito dalla fonderia per migliorare la matrice perlitica.

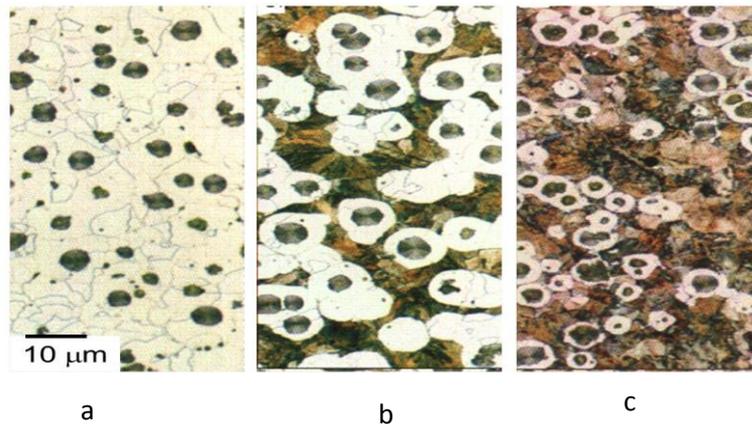


Figura 6 : Typical microstructure of nodular cast iron ⁶

(a) Fully ferritic matrix, (b) ferritic-perlitic matrix, (c) fully perlitic matrix.

Le ghise duttili possono anche avere zone dove la segregazione promuove la formazione di carburi intercellulari, essere legate e/o trattate termicamente per estenderne il campo di proprietà e di applicazioni.

Ghise duttili martensitiche: utilizzando sufficienti quantità di elementi di lega che prevengono la formazione della perlite, e applicando al getto un trattamento di tempra, si ottiene una matrice costituita da martensite che conferisce elevata resistenza e durezza, ma duttilità e tenacità molto basse.

Ghise duttili austenitiche: in queste ghise l'austenite è resa stabile a temperatura ambiente grazie alla presenza del nickel come elemento di lega in percentuali tra il 18 ed il 36%. La matrice austenitica conferisce ottima resistenza alla corrosione ed ossidazione, buona resistenza e stabilità dimensionale a temperature alte.

Ghise duttili austemperate (ADI): le ghise ADI (Austempered Ductile Iron) sono le ultime nate nella famiglia delle ghise duttili, sono prodotte mediante trattamento termico di austempering delle ghise duttili convenzionali. La loro matrice è costituita da una combinazione di ferrite aciculare ed austenite satura di carbonio. Le proprietà delle ghise ADI possono variare significativamente in funzione della composizione della ghisa e dei parametri del trattamento.

Per la ghisa duttile, la microstruttura comprende microcostituenti che descrivono il conteggio dei noduli, la struttura della matrice e la "nodularità" che hanno un'influenza significativa sulle proprietà della ghisa, singolarmente o in combinazione. Le linee guida per la nodularità delle

ghise sono designate nella classe EN-ISO 945-1 che divide i noduli nelle categorie da I a VI (figura 2), la forma V e VI sono i più ottimali. La nodularità è solidale alle proprietà meccaniche come durezza, l'allungamento a rottura, la tenacità e c'è spesso una forte correlazione tra il deterioramento delle proprietà e deviazione dei noduli dalla forma consigliabile V, VI. elevato numero di nodulo è anche molto auspicabile per alcune proprietà meccaniche (resistenza a trazione Figura 7) ed è uno dei vantaggi di inoculazione efficace nella produzione di DI.

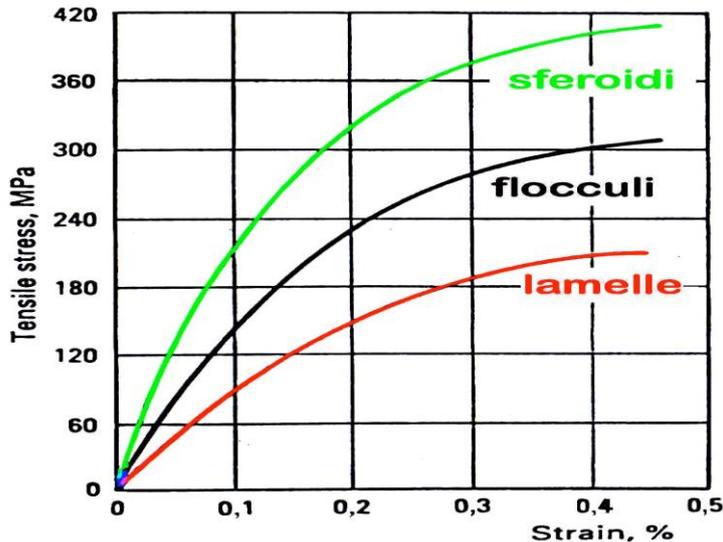


Figura 7 : Influenza della morfologia della grafite sulle curve tensione-deformazione di diverse ghise⁷

1. Composizioni chimiche delle ghise sferoidali

Le ghise duttili sono utilizzati in molte applicazioni dove qualità combinati di resistenza e duttilità sono essenziali. In contrasto alla ghisa grigia per esempio, la resistenza in ghisa sferoidale è raddoppiata e l'allungamento aumenta². Queste proprietà sono attribuite alla composizione chimica primario della ghisa duttile che potrebbe ovviamente variare secondo la fonderia poiché è influenzata dal grado di purezza dei rottami metallici utilizzati nella carica fusa durante i getti. La composizione tipica delle ghise duttili è costituita da cinque elementi principali: carbonio (C), silicio (Si), manganese (Mn), fosforo (P) e zolfo (S), spesso costituiscono il gruppo di leghe noto come composizione di base delle ghise duttili. L'inserimento di altri elementi per la composizione dipende dai requisiti del cliente, la microstruttura desiderata e probabilmente le pratiche individuali di fonderia. Ognuno di questi elementi nella composizione base ha il suo vantaggio individuale e combinato con altri elementi della carica. Un attento controllo della composizione è tuttavia necessario perché possano essere soddisfatti precisi requisiti strutturali come:

- assenza di carburi;
- corretta forma e distribuzione della grafite;
- struttura della matrice desiderata.

Pertanto, in base alla composizione finale, la solidificazione può essere ipoeutettica, ipereutettiche o eutettico ciò è descritto dal carbonio equivalente (CE). Anche se a volte variando in base alla composizione o scopo di studio, la formula più comune di calcolo del carbonio equivalente è:

$$C.E = \%C + (\%Si + \%P) / 3$$

Un valore di CE intorno a 4,3 è sufficiente a garantire assenza di carburi ed una buona qualità degli sferoidi di grafite. Valori troppo bassi di CE riducono il potenziale grafitizzazione e possono dar luogo ad eccessivo ritiro durante la solidificazione, valori troppo alti producono degenerazione dei noduli di grafite. Degli elementi principali, Si è un'aggiunta essenziale perché è un forte promotore di ferrite, aumenta la durezza e la resistenza alla trazione ma riduce la resistenza all'urto. Il Silicio diminuisce la solubilità del carbonio in austenite, migliora la precipitazione della grafite e aumenta la temperatura di transizione duttile-fragile. Il magnesio è il più efficace e sperimentato nodulizzante, anche se, quando è aggiunto allo stato puro, presenta inconvenienti come brusche reazioni ed esplosioni gassose. Per il suo alto potere termogeno è impiegato in leghe con nichel, rame, litio, ferro-silicio. Altri elementi aggiunti per avere la sferoidizzazione della grafite sono il cerio, il calcio, il litio, il sodio ed il bario; tuttavia solo magnesio e cerio hanno assunto importanza commerciale. Quest'ultimo quasi mai è impiegato da solo dato il suo migliore effetto se unito al magnesio. Dato che lo zolfo è uno degli elementi a più elevato potere antigrafitizzante, è necessario eliminarlo o ridurlo il più possibile; una desolfurazione spinta è indispensabile anche perché lo zolfo, combinandosi col magnesio, potrebbe neutralizzare l'effetto sferoidizzante di quest'ultimo. È ovviamente da evitare o limitare la presenza di elementi promotori di carburi quali cromo, vanadio e boro. Il magnesio può avere un effetto di stabilizzazione dei carburi di questi elementi, soprattutto in getti di grossa sezione dove la segregazione promuove la formazione di carburi intercellulari. Si raccomanda livelli di Mn favorevoli al di sotto del 0,2% in peso, perché presenta rischio di segregazione nei confini del grano e favorisce la formazione dei carburi e della perlite. Mn così come S nella composizione è spesso un problema quando si sceglie rottami di ferro per la fusione nelle fonderie di produzione. Il fosforo in quantità superiore di 0,05wt% è analogamente un rischio di segregazione e produce complessi carburi o fosfidi. L'inclusione di Zolfo in casting DI è una necessità fondamentale per rendere possibile la nodularizzazione, ma la sua quantità nella composizione dovrebbe essere regolata in modo critico perché la quantità in eccesso o inadeguata danneggia le proprietà in quanto avanza la formazione di grafite degenerati. L'aggiunta percentuale nell'intervallo di circa 0,015wt% è stata comunemente utilizzata e raccomandata nella produzione delle ghise sferoidali. L'aggiunta deliberata di magnesio (Mg), cerio (Ce), calcio (Ca) o Yttrium (Y) ⁸ come agente sferoidizzante è un'attività estremamente essenziale nella produzione di ghise duttili perché sono responsabili della precipitazione della grafite come sferoidi. (Fe-Si-Mg) sono ampiamente utilizzati nelle fusioni oggi a causa del suo basso costo e applicabilità a varie getti con diverse sezioni e valori carbonio equivalente ⁸. È quindi necessario utilizzare questi elementi principali con prudenza basati sulla singola applicazione, poiché le proporzioni inadeguate di questi elementi potrebbe portare a cattive proprietà per i pezzi risultanti.

Composizione chimica di una ghisa:

elementi	C	SI	Mn	P	S	Mg *
Tenore %	3.5	2.5	0.25	0.038	0.015	0.05

*Solo ghise sferoidali



Figura 8 : Ghise grigie senza aggiunto di Mg e Ce

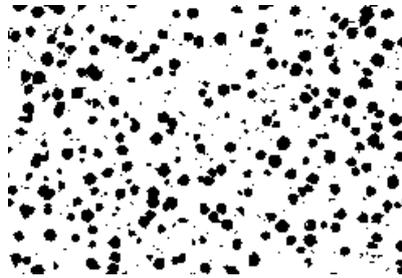


Figura 9 : Ghise sferoidale con aggiunto di Mg e Ce per la sferoidizzazione della grafite

Per capire bene gli effetti di alcuni elementi di lega nelle ghise sferoidali, l'austenite può quindi trasformarsi durante il raffreddamento:

- in ferrite con i noduli di grafite che aumentano di dimensioni perché arricchiti dal C, che diventa meno solubile nell'austenite e per l'effetto grafitizzante di Si ed Al.
- in perlite o in una struttura mista (occhio di bue) in base alla composizione, alla velocità di raffreddamento ed alla presenza soprattutto di Cr, Mn, Mo.

Effetti degli elementi di lega	Elementi di lega
Promotori ferrite	Si;Al
Promotori perlite	Cu; Mn; Sn; Cr; Ni ; Sb
Affinatore della perlite	Cu; Ni; Mo; V

2. Standardized grades – Ghise sferoidali

Il termine grado standardizzato comprende le diverse classi di ghisa duttile designate nella norma europea (norme EN). Queste classi di ghisa duttile comprendono i cosiddetti "ghisa duttile di prima generazione" noti anche come ghisa duttile ferritica e perlitica "ghisa duttile di seconda generazione" o ghisa duttile ferritica rinforzati con soluzione (SSF) entrambi specificati nella norma EN: 1563 e Austempered (introdotto negli standard EN 1564: 1997. La principale distinzione tra questi gradi deriva in gran parte dalle diverse microstrutture e dal metodo di produzione. Il rapporto di matrice tra ferrite e perlite è determinato regolando la quantità di agenti che formano perlite nella composizione chimica, tipicamente contenenti circa il 2-2,5% in peso di silicio. Tra questo grado, il grado ferritico-perlitico EN-GJS-500-7 è molto popolare in gran parte a causa della sua struttura combinata di ferrite e perlite che fornisce attributi di entrambe le matrici. Ma le incoerenze in proprietà come la resistenza, la distribuzione della durezza e la bassa duttilità sono alcune delle sfide conosciute con il grado ferritico-perlitico. Anche a causa della sensibilità a raffreddamento locale e elementi di stabilizzazione perlitica nella sua microstruttura, la lavorabilità è abbastanza esigente in questo grado, con conseguente minor durata degli utensili, costi aggiuntivi e problemi di controllo della dimensione nel suo componente. Questi problemi sono ancora più evidenti nei getti con spessori variabili e diversi lotti. La ghisa SSF ad alti silicio sono prodotti dal rafforzamento della soluzione della ferrite con Si e combinano proprietà uniche di resistenza intermedia e di allungamento elevato rispetto a gradi equivalenti nei gradi ferritici e perlitici. Le ghise duttili austemperati -ADI o kymenite sviluppati in Finlandia, dove il ferro duttile viene trattato a caldo con isoterma con una matrice ausferritica. L'ausferrite è una combinazione di ferrite aciculare e austenite stabilizzata in carbonio che possiede una combinazione di notevole resistenza, durezza, durezza, duttilità e lavorabilità. Viene prodotto da un processo a due fasi austempering che inizia con il riscaldamento e tenendo il getto alla "temperatura di austenizzazione" 900°C per circa un'ora e mezza per saturare l'austenite con il carbonio, dopo di che viene quindi raffreddato in modo rapido ed isotermico tenuto al suo "temperatura austemperata" 400 ° C di solito in un bagno di sale prima di lasciare raffreddare a temperatura ambiente. Nella tabella 2.1 e 2.2 sono elencate diverse ghise da ferritici a quelli perlitici e ADI specificati rispettivamente negli standard EN 1563 e 1564.

Material designation		Tensile strength	0,2 % proof stress	Elongation
Symbol	Number	R_m N/mm ² min.	$R_{p0.2}$ N/mm ² min.	A %min.
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT ²⁾	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

Material designation		Tensile strength	0,2 % proof stress	Elongation
Symbol	Number	R_m N/mm ² min.	$R_{p0,2}$ N/mm ² min.	A % min.
EN-GJS-800-8	EN-JS1100	800	500	8
EN-GJS-1000-5	EN-JS1110	1000	700	5
EN-GJS-1200-2	EN-JS1120	1200	850	2
EN-GJS-1400-1	EN-JS1130	1400	1100	1

IV. Processo produttivo

Il processo produttivo attuato nelle fonderie può essere ricondotto alle seguenti fasi:

1. Fusione e trattamento del metallo;
2. Formatura e preparazione anime;
3. Colata del metallo nella forma e raffreddamento;
4. Distaffatura (estrazione dei getti dalla forma);
5. Finitura del getto;

Per ogni lega prodotta, risulta rilevante il sistema di realizzazione della forma, ed il sistema di colata del metallo all'interno di essa. Tradizionalmente le fonderie si suddividono in fonderie con forma a perdere (ciascuna forma è utilizzata una sola volta, e viene distrutta al momento dell'estrazione del getto) o con forme permanenti (la medesima forma viene utilizzata per produrre innumerevoli quantità di getti); la formatura con forme permanenti viene molto utilizzata nel campo dei metalli non ferrosi (in particolare per la produzione di getti di alluminio), associate a tecniche di colata a pressione (alta pressione o bassa pressione). Nelle fonderie di metalli ferrosi, fatta eccezione per la realizzazione di getti centrifugati, la formatura viene realizzata in forme a perdere; in alcuni casi possono essere realizzati getti utilizzando sistemi di formatura misti (parte della forma a perdere e parte permanente). Il tipo di lega da produrre ed il tipo di forma utilizzata, condizionano le caratteristiche degli impianti e la scelta dei processi utilizzati. Le scelte tecnico- impiantistiche sono, inoltre, condizionate dal tipo di mercato al quale la fonderia si rivolge, in particolare rispetto alle dimensioni dei getti da produrre e le relative serie. Il processo produttivo di una fonderia può essere rappresentato dal seguente schema:

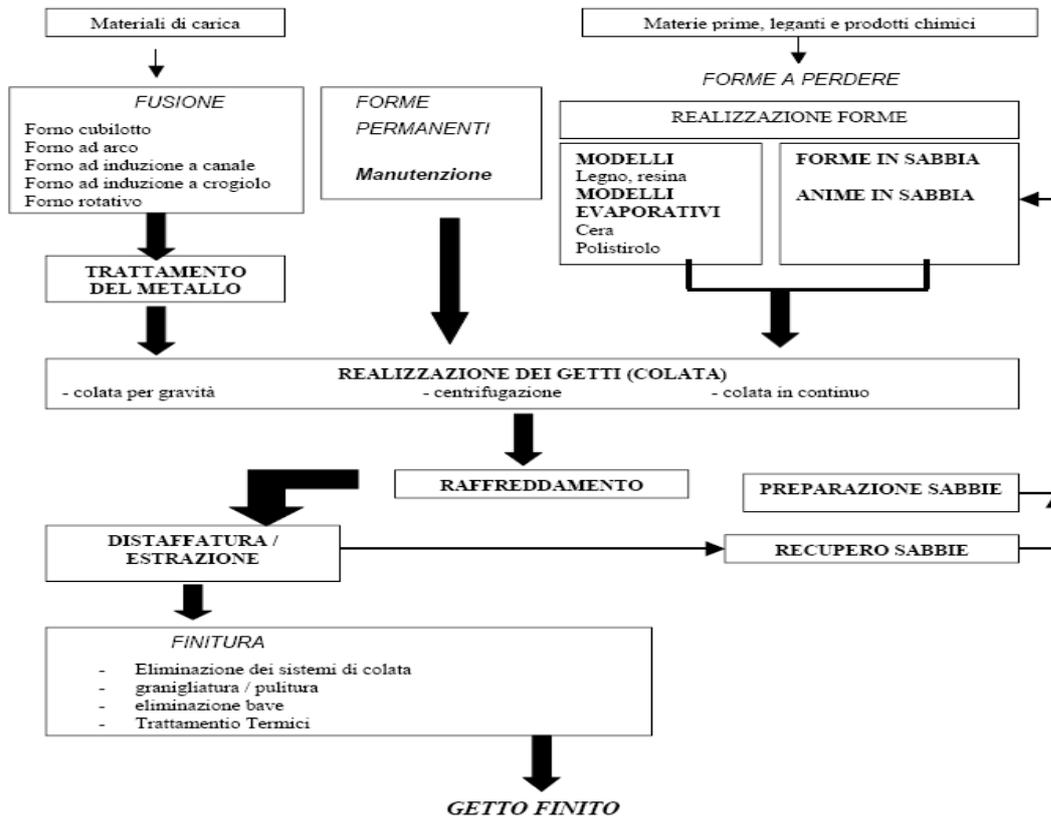


Fig 1. SCHEMA A BLOCCHI DEL PROCESSO PRODUTTIVO DI FONDERIA

Figura 10 : Schema a blocchi del processo produttivo di fonderia⁹

1. Fusione della ghisa sferoidale di base e trattamento del metallo

Tutti i forni destinati a fondere ghisa o acciaio possono essere impiegati anche per la fusione della ghisa di base. Dal punto di vista economico e qualitativo, la miglior produzione viene realizzata attraverso l'impiego abbinato di cubilotti e forni ad induzione, ma ciò è evidentemente realizzabile soltanto da parte di aziende con grandi volumi di produzione. Per restare di interesse generale, la discussione della fusione abbinata verrà da quella relativa alla fusione semplice in cubilotti e forni ad induzione.

A. Fusione in cubilotto

La quantità maggiore di ghisa sferoidale di base viene fusa, direttamente o per successivo abbinamento in cubilotti. Oltre ad essere il più comune e sperimentato dispositivo di fusione per la ghisa, il cubilotto offre anche alcuni vantaggi di qualità e di economia di fusione. Le ghise sferoidali base fuse in cubilotti, sono adatte ad ottenere strutture esenti da carburi. Naturalmente tale condizione dipende dalla qualità dei controlli metallurgici. Tuttavia, tale processo produttivo è entrato ormai in disuso, diventando sempre più esigenti le richieste per la tutela dell'ambiente. In generale si può affermare che le fonderie a cubilotto possono essere distinte in due gruppi:

a) quelle che hanno ereditato gli impianti dal passato e non possiedono controlli adeguati e pertanto sono in via di smantellamento passando alla fusione elettrica;

b) quelle che realizzando anche produzioni combinate, giustificate da volumi di produzione elevati, esercitano i controlli necessari, il cui costo viene recuperato dai risparmi realizzati. L'impianto di fusione a cubilotto in generale è un impianto di tipo semicontinuo, cilindrico ed asse verticale (figura 11), e si presta alla produzione di un solo tipo di ghisa (a vantaggio dei volumi di produzione) e può essere distinto a seconda del tipo di rivestimento e alla composizione della scoria. Nel processo fusorio la carica, scendendo lungo il cubilotto, viene riscaldata controcorrente dai gas di combustione del coke e giunge a completa fusione nella zona antistante gli ugelli di immissione del vento. La ghisa liquida si raccoglie nella parte più bassa del forno, detta crogiuolo che si separano dalle scorie che galleggiano e vengono eliminate attraverso l'apposito scarico. La composizione della scoria esercita una profonda influenza sulla qualità della ghisa ed anche sulle condizioni operative. La scoria viene definita, a seconda del suo contenuto in CaO, MgO e SiO₂, come acida o basica. La basicità della scoria è espressa dal rapporto:

$$(CaO(\%) + MgO(\%)) / SiO_2 (\%)$$

Se tale rapporto è maggiore di uno la scoria è basica; se è minore di uno è acida. Alcuni esempi sono riportati nella Tabella

Tipo di scoria	SiO ₂ (%)	CaO(%)	MgO(%)	Basicità
Acida	45	35	1	0.8
Basica	30	40	20	2.0



Figura 11 : Forno al cubilotto⁹

Esistono ovviamente, oltre alla composizione della scoria, molti altri parametri che influenzano la produzione della ghisa sferoidale base, come il rapporto coke/carica, altezza del letto di fusione,

disegno del cubilotto, carica metallica, temperatura di spillatura, ecc. (figura 12). In generale le ghise fuse in cubilotto presentano un certo tenore di Zolfo, che diventa elevato nel caso di scoria acida (0,08-0,12%). In operazioni di piccolo volume tale tenore viene abbattuto dalla lega sferoidizzante durante il trattamento di sferoidizzazione. In caso di elevati volumi di produzione, è preferibile per l'economicità della fusione realizzare una desolforazione prima della colata in staffa. Per suddetti limiti di carattere tecnico oltre che per limiti di carattere ambientale, si è verificato un sostanziale regresso del loro impiego soprattutto perché dal punto di vista della qualità dei getti non si riescono a garantire getti di dimensione piccoli e sottili esenti da galleggiamento di grafite o grafite esplosa, a causa degli elevati tenori di Carbonio e Zolfo (figura 13).

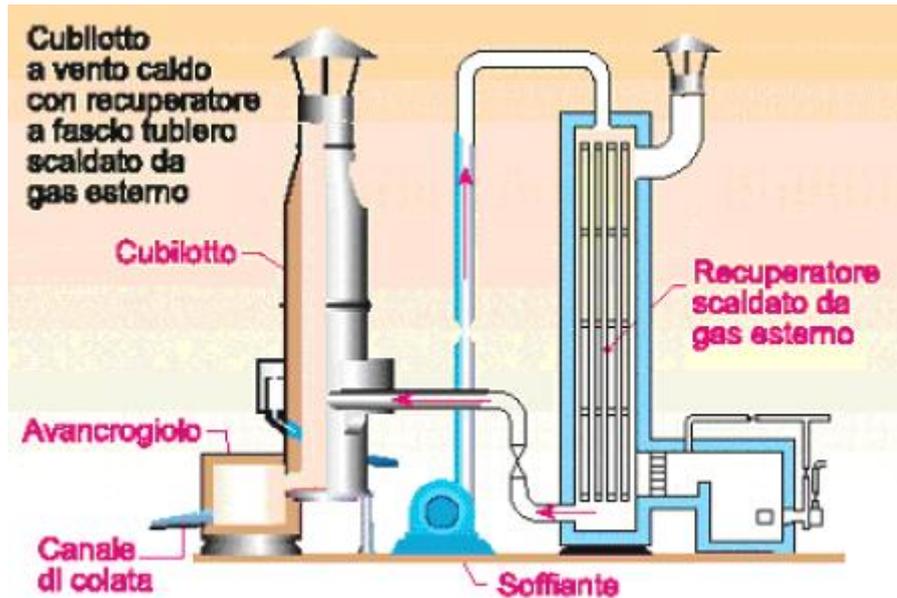


Figura 12 : Forno a cubilotto con recupero dei gas di scarico⁹

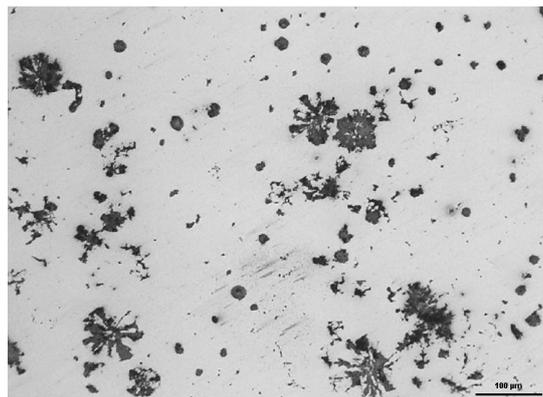


Figura 13 : Esempio di grafite esplosa⁹

B. Fusione elettrica

La fusione elettrica è semplice, pulita ed affidabile. Essa offre inoltre la massima flessibilità nella fusione di ghise di diverso tipo. I forni ad arco elettrico sono molto meno diffusi di quelli ad induzione. Il loro funzionamento, di tipo discontinuo, può fornire una produzione continua solo se vengono usate simultaneamente diverse unità. Ciò significa un grande volume produttivo, ed in questo caso la fusione primaria fornisce ghisa sferoidale di base con qualità metallurgiche superiori.

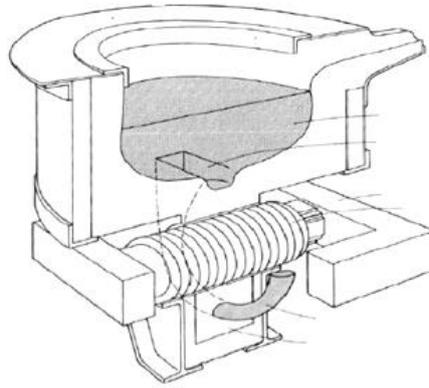


Figura 14 : Forno ad induzione a bassa frequenza con nucleo magnetico⁹

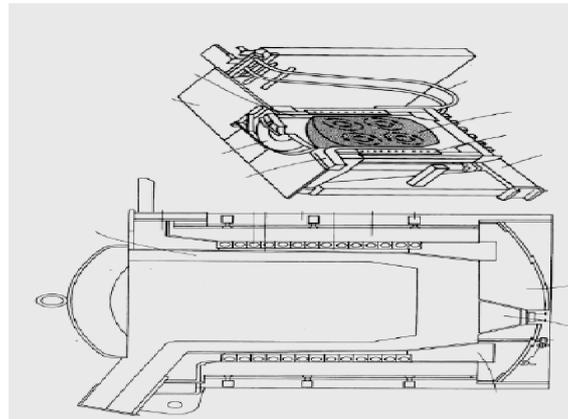


Figura 15 : Forno ad induzione a media frequenza senza nucleo magnetico, circondato da spira induttrice.⁹

È da notare che la capacità e la potenza dei forni devono essere scelte indipendentemente. La migliore capacità si ha al quintuplo del peso di ogni singola spillatura (trattamento). La potenza necessaria viene determinata dalla velocità di fusione richiesta.

C. Preparazione del metallo base

La qualità metallurgica della ghisa sferoidale base liquida è influenzata da tre variabili: a) sequenza di caricamento b) massima temperatura del forno e temperatura di stazionamento, c) contenuto in silicio della ghisa base.

- a) Per quanto concerne la sequenza di caricamento, le condizioni ottimali si ottengono mediante spillatura ed immediata ricarica, in modo da ridurre al minimo la formazione di carburi di fusione.
- b) Si afferma talvolta ancora che, sovrariscaldando la ghisa ad alta temperatura, si beneficia erroneamente della omogeneizzazione del fuso e della dissoluzione della rimanente grafite lamellare che può essere stata caricata. In realtà la grafite lamellare si scioglie quasi istantaneamente nel ferro liquido, cioè viene espulsa e resta intrappolata nella scoria. Ciò rende ovviamente imperativo agitare il bagno metallico nella fase di carburazione e non surriscaldare il bagno prima della spillatura.
- c) Dal punto di vista teorico il silicio è il solo elemento in un processo fusorio, in grado di trattenere l'ossigeno nel fuso. Allo stesso tempo, l'ossido di silicio diventa instabile al crescere della temperatura ed al di sopra della temperatura di solidificazione l'ossido di SiO₂ viene attaccato dal Carbonio con formazione di CO gassoso fungendo da luoghi di nucleazione per la grafite.

La carica metallica media per una ghisa base consiste di:

- Ghisa in pani o ghisa d'altoforno con quota di carica pari al 15-20%: fornisce, seppur relativamente costosa, essendo una pura lega ferro-carbonio, un contributo significativo al controllo della composizione chimica in quanto trasmette alla ghisa base favorevoli proprietà ereditarie come assenza di carburi, buona risposta all'inoculazione, bassi tenori di Zolfo (0.05-0.20%).
- Rottame di acciaio con quota di carica pari al 40-50%: è un importante componente della carica della ghisa sferoidale. È comunque importante dal punto di vista metallurgico il reperimento di acciaio di "buona qualità" sia dal punto di vista della composizione chimica sia dal punto di vista della forma fisica. Più significativamente, quegli elementi che favoriscono la formazione di carburi (Cr, B, V, Mo) e quelli che interferiscono con la forma della grafite (S, Pb, Zn) dovrebbero essere presenti in quantità piccole e costanti. Tuttavia, previsioni future fanno ritenere che la qualità del rottame di acciaio, per quanto concerne la produzione di ghisa sferoidale, tenderà a peggiorare poiché nel tentativo di aumentare il rapporto resistenza/peso crescerà l'apporto degli elementi di lega. Inoltre, nel tentativo di migliorare la resistenza alla corrosione tenderà ad aumentare l'apporto dello Zinco soprattutto sui componenti automobilistici. La forma fisica comprende dimensioni e superficie specifica (esempio ritagli di lamiere zincate e sottili)
- Ritorni di ghisa sferoidale con quota di carica di circa il 20-30%: è pratica comune nel processo produttivo di ghisa sferoidale tenere separati e ritorni di ghisa sferoidale (canali di colata, materozze ecc.) e successivamente riutilizzarli nella preparazione della carica metallica. A tutti gli effetti tali rottami presentano lo stesso costo dei getti commerciabili: il rottame infatti viene fuso dalla stessa miscela di ghisa d'altoforno e rottame di acciaio, trattato, inoculato e colato entro la stessa forma del getto da produrre. Per questo motivo tale materiale, avente in genere bassi tenori di Zolfo, di Manganese e di Fosforo, presenta caratteristiche metallurgiche confrontabili alla ghisa in pani e deve essere utilizzato con parsimonia, anche per tenere sotto controllo eventuali effetti di ereditarietà.

- Ferro-leghe e carburo di silicio con quota necessaria al raggiungimento dei tenori di Carbonio e Silicio previsti dalla composizione chimica.

2. Sferoidizzazione e inoculazione

A. Sferoidizzazione

Per ottenere una buona ghisa sferoidale, è necessario garantire le condizioni adatte alla nucleazione degli sferoidi di grafite. Questo scopo è raggiunto normalmente tramite abbattimento dello zolfo residuo al di sotto dello 0,018%, considerando un adeguato margine di sicurezza, maggiore al crescere della sezione del getto e successivo trattamento con lega Fe-Si-Mg, per raggiungere tenori di magnesio residuo superiori allo 0,03% di norma compresi tra 0,04% e 0,06%. Il trattamento di desolforazione si rende necessario per evitare che il magnesio reagisca in larga misura con lo zolfo, portandosi a un tenore residuo insufficiente per la completa sferoidizzazione della grafite. Si comprende come l'aggiunzione di magnesio alla ghisa preliminarmente alla colata o al riempimento della forma sia un passaggio molto delicato, a cui dedicare grande attenzione.

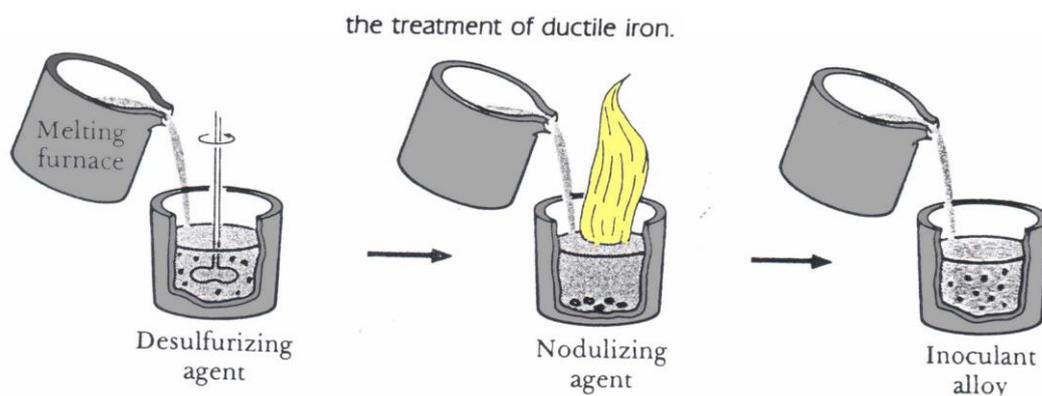


Figura 16 : processo di sferoidizzazione⁷

Sferoidizzazione tramite lega di magnesio

Le tipologie di trattamento tramite lega Fe-Si-Mg più conosciute sono: Opened Ladle-Sandwich Process, (Fig 18) Tundish Ladle Process (Fig 18), In-Mold Process e il Cored Wire Process. L'Opened Ladle-Sandwich Process consiste nell'alloggiamento della lega in una cavità o sul fondo della siviera, è un processo semplice e occasionale con rendimenti contenuti e variabili. Il Tundish Ladle Process è l'evoluzione del processo precedente, con l'aggiunta di una copertura sulla siviera al momento del trattamento. All'aumentare dell'efficacia della copertura, crescono il rendimento del trattamento, con conseguente risparmio di lega. L'In-Mold Process, invece prevede che la lega venga pesata da un sistema automatico e alloggiata in una apposita "vaschetta" ricavata nella forma inferiore. Una volta impostata la quantità di lega necessaria, andranno tenuti rigidamente sotto controllo parametri come la temperatura e il tempo di colata, che dovranno essere tali da garantire la ripetibilità del processo. Tempi di colata eccessivi, per esempio, porterebbero a esaurimento la lega prima che tutto il metallo sia entrato in staffa, con conseguenti difetti di sferoidizzazione della ghisa. Al contrario,

tempi di colata troppo brevi non consentirebbero la reazione di tutta la lega nella “vaschetta”; Cored Wire Process (Trattamento a Filo) è un processo automatizzato e caratterizzato da alti rendimenti, ma con un costo per l’acquisto dell’attrezzatura necessaria piuttosto elevato. La lega di magnesio è contenuta in un “filo” metallico che viene immerso e dunque fuso in siviera. La quantità di filo indispensabile al trattamento viene calcolata in maniera automatica. Tale processo assicura una buona ripetibilità, minore generazione di scoria, alti rendimenti dunque risparmi di lega e offre la possibilità di effettuare trattamento e inoculazione contemporaneamente, tramite lo stesso filo o con due sistemi separati. Per le fonderie con forno cubilotto, particolarmente soggette alla presenza di elevati tenori di zolfo, si può prevedere la possibilità di desolfurare la ghisa e innalzarne il tenore di magnesio contemporaneamente, tramite trattamento a filo con lega contenente magnesio e calcio. Si dovrà cercare di portare il tenore di magnesio il più vicino possibile a quello desiderato per la completa sferoidizzazione della ghisa, senza eccedere. Una concentrazione maggiore di quella necessaria potrebbe favorire la formazione di scoria dannosa per la qualità del getto. Come scritto in precedenza, infatti, il magnesio reagisce con zolfo, ossigeno, silicio e altri elementi; una quantità eccessiva promuove tali reazioni, e conseguentemente la generazione di una scoria leggera che si concentrerà sulla superficie e sotto alle anime, ma che potrà trovarsi anche all’interno del getto, specialmente con basse temperature di colata. Queste reazioni tenderanno ad avvenire costantemente al momento dell’aggiunta del magnesio al metallo liquido, favorendo localmente la formazione di lamelle di grafite. Per limitarle, si dovrà cercare di apportare la giusta quantità di lega di magnesio, in presenza di una adeguata ma non eccessiva inoculazione e di valori contenuti del carbonio equivalente e del tenore di silicio. Inoltre, colando a bassa temperatura aumentano le probabilità di formazione di scoria, in contrasto con le esigenze di risparmio di lega. La scoria può inoltre generarsi in caso di turbolenze durante il trattamento o in fase di riempimento della forma

B. Inoculazione.

All’interno della ghisa liquida sono inevitabilmente presenti piccole concentrazioni di elementi come cromo, molibdeno, manganese, vanadio, fosforo, ecc., provenienti principalmente dai materiali di carica. Tali elementi tendono ad accumularsi ai bordi dei grani e a promuovere la formazione di carburi intercellulari. Questo meccanismo è particolarmente favorito nella produzione della ghisa sferoidale, per via del trattamento con lega di magnesio. In fase di solidificazione, tra i grani il metallo liquido si impoverisce in carbonio e silicio e, viceversa, si arricchisce degli elementi carburigeni sopraccitati, potendo dunque portare alla formazione di carburi e fasi, come la steadite o eutettico fosforoso, dannosa per le proprietà meccaniche del pezzo in quanto ne aumenta la durezza e la fragilità. Per combattere la concentrazione degli elementi nocivi ai bordi dei grani, è utile cercare di aumentare il numero di celle di nucleazione, minimizzando dunque la quantità di liquido intercellulare. Tale effetto, in aggiunta alla regolazione dei tenori di carbonio e silicio, si ottiene per mezzo di un’efficace ed essenziale opera di inoculazione, che può evitare la necessità di effettuare azioni correttive per mezzo di trattamenti termici traducibili in incrementi di costi e tempi di produzione. L’inoculazione può avvenire tramite addizione di differenti tipi di materiale, principalmente grafite, lega Fe-Si o carburo di silicio, in forma di blocchetti, granella o filo; l’effetto di altri elementi eventualmente presenti, o immessi nella ghisa liquida sarà trattato in seguito. Può inoltre essere effettuata in momenti differenti e in più fasi, in base alle necessità - durante il trasferimento del metallo dal forno in siviera, in staffa, prima, durante e dopo il trattamento con lega di magnesio. La quantità, il tipo di inoculante e le fasi di inoculazione, vengono stabiliti in base alle caratteristiche della ghisa in uscita dal forno e alle eventuali specifiche per il getto in produzione,

tenendo conto del tipo di trattamento e dei parametri di colata. Come nel caso del magnesio, anche l'effetto degli inoculanti tende a diminuire con il tempo. Ci si dovrà quindi assicurare che non sussistano intervalli eccessivi prima della colata, e possibilmente posticipare il più possibile l'inoculazione. Inoltre, fornire il materiale alla ghisa in presenza di temperature troppo elevate ne accentuerà la dissipazione: con temperature troppo basse, si attenueranno le proprietà di inibizione alla formazione di carburi. L'inoculante dovrà risultare uniformemente distribuito e non essere somministrato in maniera eccessiva, potendo altrimenti causare difetti di ritiro. In definitiva, grande attenzione dovrà quindi essere dedicata a questa importantissima operazione, producendosi effetti sulla microstruttura, sul numero di noduli, sulla presenza di carburi e difetti di ritiro, e dunque sulle proprietà del getto.

In definitiva, trascurando tutti gli altri aspetti decisivi nell'ottenimento di una ghisa sferoidale con le caratteristiche volute (temperature di fusione e colata, tempi di colata, tempo di raffreddamento ed eventuali trattamenti termici, buona qualità della terra nella staffa e delle eventuali anime da utilizzare, adeguata progettazione dei canali e attacchi di colata, utilizzo di filtri, maniche e raffreddatori opportuni, ecc.) si è mostrato come il controllo dell'analisi chimica e delle modalità di trattamento della ghisa, e dunque le fasi di desolfurazione, sferoidizzazione e inoculazione, debba essere affrontato con molta attenzione e scrupolo. Analogamente, è importante controllare la buona qualità dei materiali di carica e di altri materiali che possano entrare in contatto con la ghisa (es. refrattari nel forno). Agire con sufficienza o disattenzione può causare errate composizioni microstrutturali, non solo relativamente alla forma e alla distribuzione della grafite ma anche relativamente alla matrice metallica, e conseguentemente non si otterrebbero le caratteristiche desiderate. Al contrario, la possibilità di ottenere a prezzi appropriati una ghisa ad alta resilienza anche a basse temperature, con una resistenza contenuta, oppure ad alta resistenza con bassi valori di allungamento e resilienza, ne consente un utilizzo competitivo per la produzione di componenti di diversa funzione e destinati a condizioni di lavoro differenti.

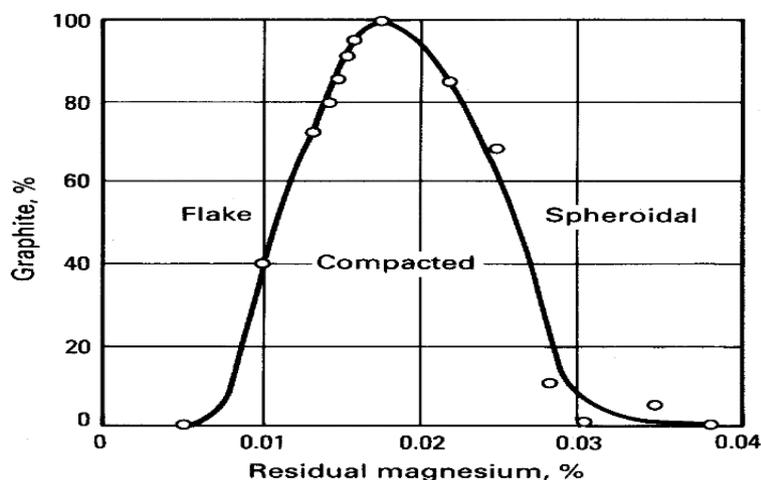


Figura 17 Forma grafite in funzione del magnesium residuale ⁷

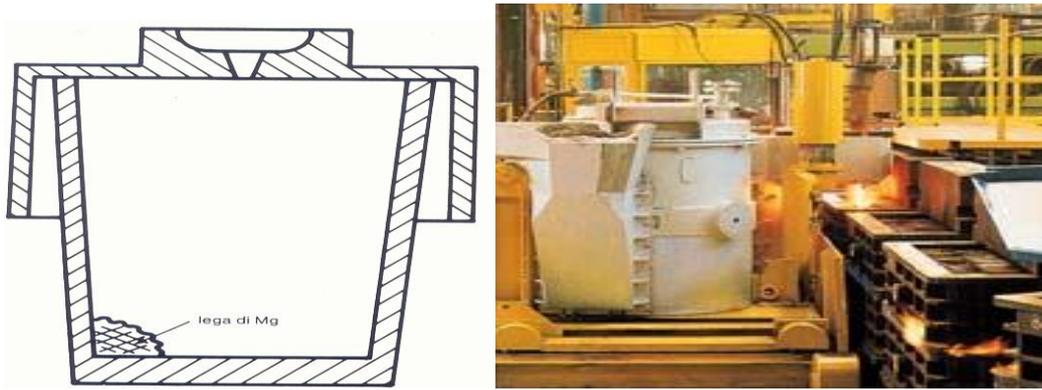


Figura 18 : Metodo con siviera presenza di lega madre al fondo (Opened Ladle-Sandwich Process) e Metodo Tundish cover (Tundish Ladle Process) automatico⁹

V. Solution strengthened Ferritic Ductile iron – SSFs

I gradi SSF noti anche come ghise sferoidali ad alto tenore di silicio furono sviluppati per primi nei primi anni '90 dopo ricerche approfondite sugli svantaggi del grado ferritico-perlitico. Il risultato è stato il grado SSF con vantaggio di aver una resistenza intermedia e una ottima duttilità. SSF sarà prodotta dalla soluzione solida della matrice di ferrite con circa il 3,5-4,4% in peso di silicio invece di rame (Cu), Mn o Sn, con conseguente matrice ferritica. Il tenore di lega di Si è costante a seconda del grado SSF a differenza di altri gradi ghise sferoidale in cui le aggiunte di lega dipendono dalla geometria e dalla dimensione di fusione. Crea quindi proprietà costanti in tutte le sezioni del getto e le stesse in lotto. Il contenuto di alto di Si anche sopprime l'influenza peggiore degli elementi generatori di carburo presenti nelle ghise che spesso sono deleteri alle proprietà del materiale. Questa matrice è responsabile della distribuzione uniforme della durezza e dei miglioramenti significativi della lavorabilità rispetto ad altri gradi. Con una migliore allungamento, quasi triplicabile che quello raggiunto da gradi ferritici e perlitici, gli SSF offrono anche circa il 13-27% di aumento della resistenza e meno sensibilità alla formazione di carburo. In più dei getti leggeri di questo grado, sono possibili che portano a una riduzione del peso di circa l'1,5% offrendo risparmi energetici e materiali, più controllo della dimensione e tolleranza geometrica. L'elevato contenuto di silicio aumenta inoltre la temperatura eutettoide del getto, migliorando così le prestazioni a temperatura elevata. Vari studi hanno inoltre confermato la loro migliore saldabilità e la riduzione significativa dei costi di lavorazione e di peso quando si considera la sostituzione diretta per l'acciaio in applicazioni simili. La tabella 2.3 elenca i tre ferri attualmente specificati per la classe SSF nella norma EN 1563

Material designation		Relevant wall thickness t mm	0,2 % proof strength	Tensile strength	Elongation
Symbol	Number		$R_{p0,2}$ MPa min.	R_m MPa min.	A % min.
EN-GJS-450-18C	5.3108	$t \leq 30$	350	440	16
		$30 < t \leq 60$	340	420	12
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		
EN-GJS-500-14C	5.3109	$t \leq 30$	400	480	12
		$30 < t \leq 60$	390	460	10
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		
EN-GJS-600-10C	5.3110	$t \leq 30$	450	580	8
		$30 < t \leq 60$	430	560	6
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		

Table 2-3. Ghise di grado con alto tenore di silicio EN 1563

L'aspetto micrografico:

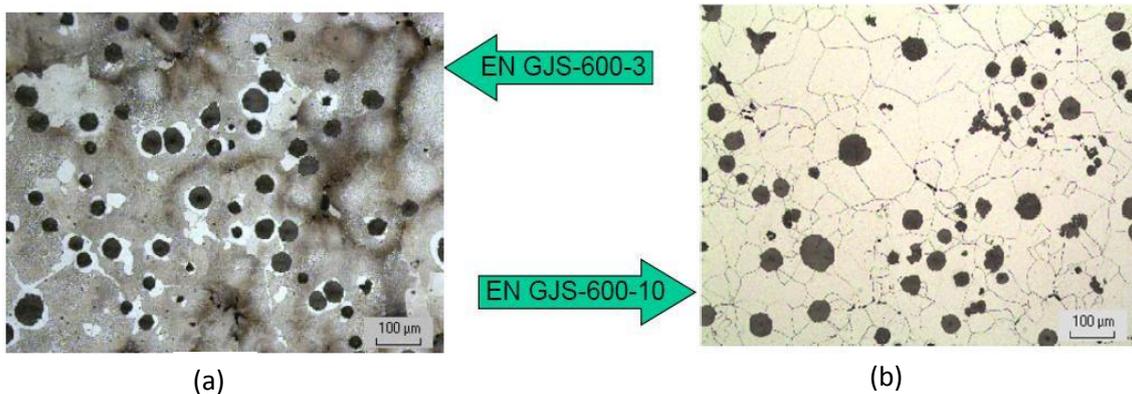


Figura 19 : (a) Ghise sferoidale 600-3 al 60% perlite (b) Ghisa sferoidale 600-10 ad alto silicio. La

dimensione dei noduli appare meno uniforme⁹

Una spiegazione possibile dell'uniformità della dimensione delle grafite è la presenza di una grafite primaria ipereutettica dovuto a un carbonio equivalente non eutettico.

1. Proprietà meccanica

La caratteristica distintiva di una migliore allungamento, resistenza allo snervamento e la lavorabilità sono le proprietà cruciali che hanno spinto gli SSF ad una più ampia accettazione sui gradi ferritici e perlitici. Per quanto riguarda le molte applicazioni che utilizzano i getti SSF, queste proprietà si sono rivelate molto critiche, valorizzando così la sua scelta come opzione valida con prospettiva e utilità crescente. La Figura 18 mette in evidenza il confronto tra i gradi standardizzati rispetto a loro rapporto di resistenza allo snervamento con la resistenza alla trazione. Il SSF ha un rapporto di circa 85% rispetto a circa il 65% per i gradi ferritici e perlitici come testato da campioni di 25 mm. Nonostante il rapporto più elevato, i valori di allungamento sono ancora significativamente superiori ai gradi ferritici e perlitici. Questo è a causa dell'influenza della sua composizione e della struttura che impedisce di più i movimenti delle dislocazioni che governa lo snervamento del materiale rispetto a la resistenza a rottura. Ciò è evidente anche dalla curva che indica la differenza concorrente dell'allungamento alla frattura rispetto alla resistenza allo snervamento $R_{p0.2}$ tra i tipi convenzionali con resistenza equivalente della SSF EN-GJS-500-10 e della EN-GJS-500-7 grado ferritico perlitico in figura 19

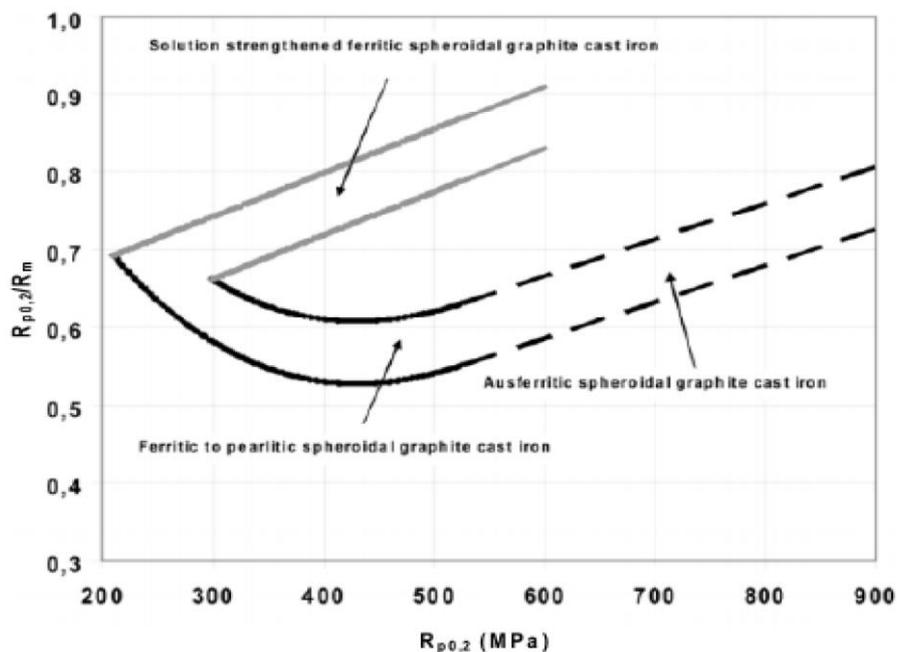


Figura 20 : Ratio 0.2% proof strength /tensile strength¹

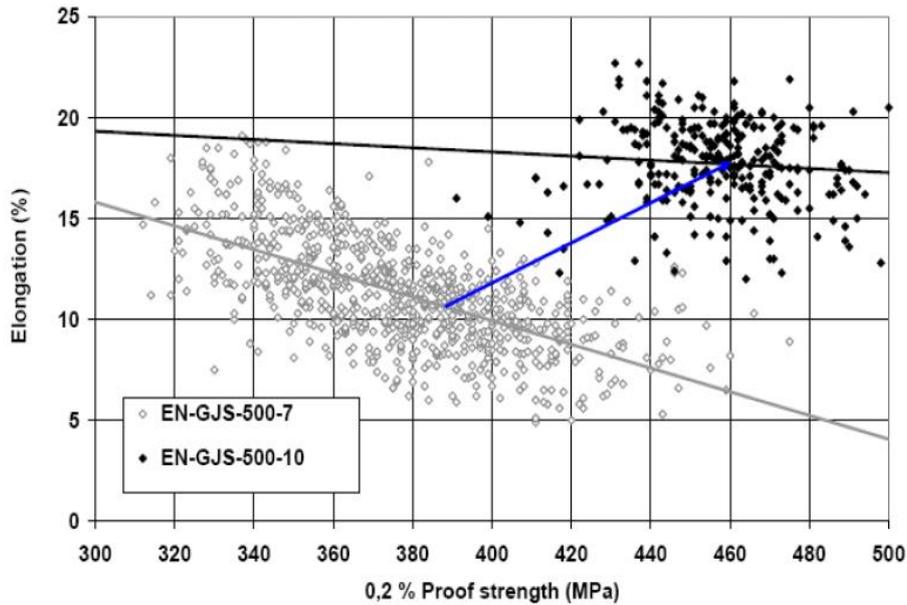


Figura 21 : Elongation vs 0.2% proof strength ¹

A parità di resistenza a trazione, queste ghise ferritiche sferoidali hanno:

- un allungamento a frattura pressoché raddoppiato
- un limite di elasticità più alto del 25%
- una vita utile più lunga.

Allo stesso tempo non si ha perdita di resistenza.

In pratica e per le fonderie, la lavorabilità è un aspetto integrale della produzione di colata, i SSF rendono meno esigente la conformità alla tolleranza alla durezza, al controllo della dimensione e al mantenimento della durata degli utensili. Gli studi di diverse fonderie hanno riportato una riduzione del 20% dei costi di lavorazione con SSF rispetto al grado ferritico e perlitico dovuto alla durezza uniformemente distribuita nelle microstrutture SSF. La Figura 2.7 conferma questa affermazione dai risultati dei test sulla lavorabilità e sui costi di lavorazione esaminando la variazione di durezza nelle diverse sezioni di un mozzo di ruote costruito in EN-GJS-500-7 grado ferritico-perlitico e grado SSF (EN-GJS-500-14). Evidentemente i punti bassi e alti rappresentano un'operazione di lavorazione severa dovuta a molti inizi e arresti causata dalla distribuzione non uniforme della durezza nella struttura metallografica dei gradi ferritico-perlitici. Questo si traduce con usura significativa anche sugli utensili di lavorazione.

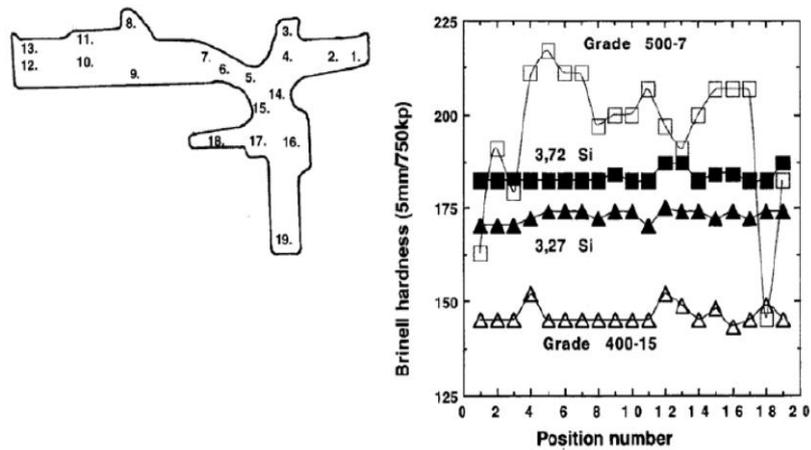


Figura 22 : Hardness variation in ferritic-perlitic grade vs SSF grade¹¹

Allo stesso modo, la rugosità superficiale di entrambi i gradi è anche legata alla facilità di lavorabilità. Dai campioni sperimentati, l'influenza della matrice in SSF fornisce migliori vantaggi sulla rugosità superficiale visto dal tipo di trucioli generati dalle operazioni di taglio che coinvolgono EN-GJS-500-7 e SSF grade EN-GJS-500-14. Utilizzando i parametri di lavorazione, la velocità di taglio (V_c) a 320m / min, la profondità (V_b) a 200 μ m, la velocità di avanzamento di 0,15mm e il raggio dell'utensile (a_p) a 0,5mm, i trucioli più lunghi e rotolanti nella figura 21 indicando un'operazione di lavorazione più liscia a causa della minore variazione di durezza è per la ghisa SSF mentre i trucioli più piccoli e robusti rappresentativi di intermittenza nei tagli sono per il grado ferritico-perlitico

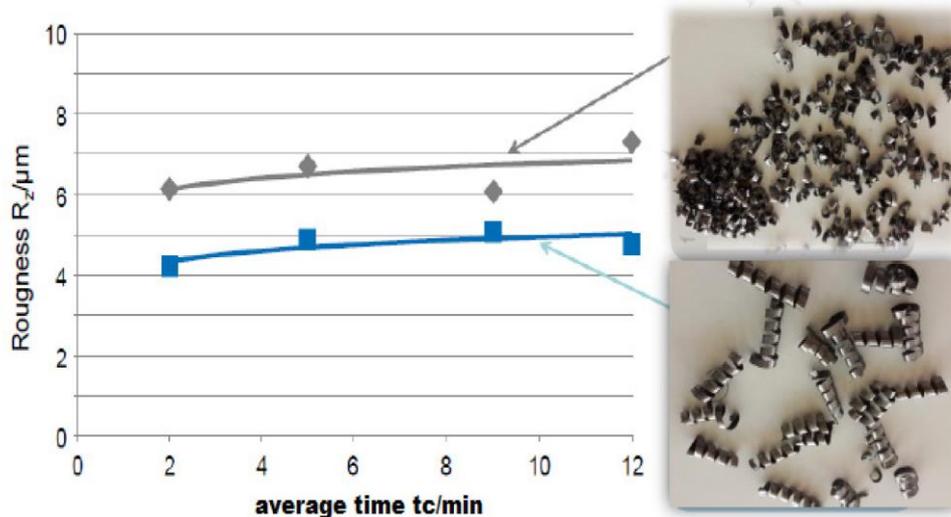


Figura 23 : Influence of matrix on surface roughness. EN-GJS-500-7 vs EN-GJS-500-14¹¹

quando entrambi i parametri di resistenza (snervamento e resistenza a trazione) sono confrontati con la durezza per SSF e ferritica per i gradi perlitici, i valori di resistenza allo snervamento di SSF sono significativamente più alti per un valore uguale in durezza. La resistenza a trazione tuttavia ha più o meno un rapporto proporzionale con i valori di durezza per entrambi i gradi DI. Ciò è spiegato

dai risultati presentati nella norma EN 1563 confrontando questa proprietà in entrambi i gradi di DI in figura 23. Questa forma di risposta del materiale nella classe SSF può essere attribuita in parte al contenuto di perlite inferiore nella matrice SSF e all'indipendenza della durezza da altri micro-costituenti nella microstruttura SSF.

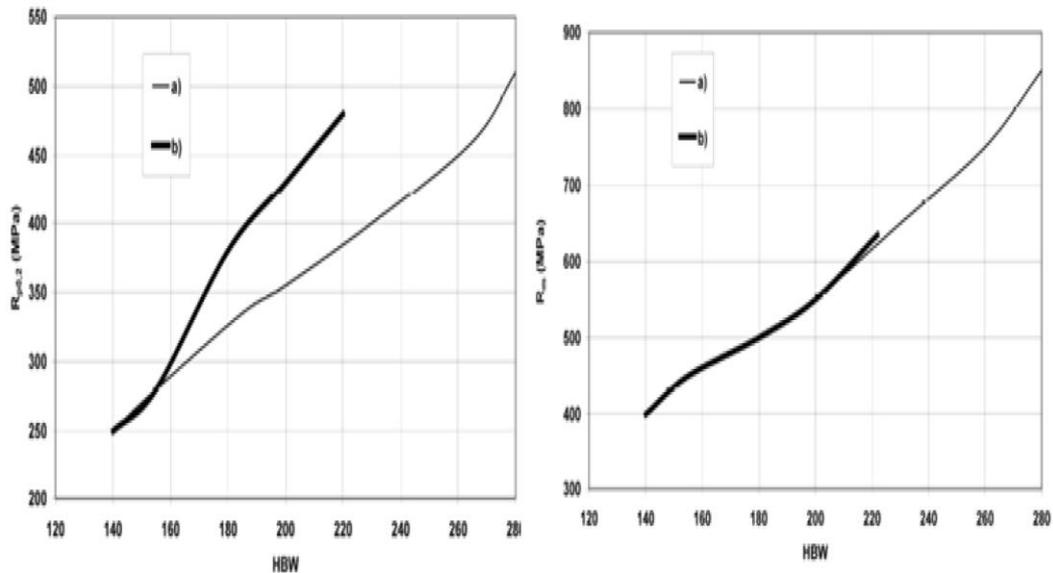


Figura 24 : (left). Relation between Brinell hardness and 0.2% proof strength (Right) hardness and tensile strength ¹

- a) ferrite and perlite grade
- b) SSF grade

Per altre proprietà del materiale SSF, le proprietà di impatto e di fatica sono paragonabili a quelle ferritiche e perlitiche dovute ad un elevato contenuto di silicio. La geometria dei campioni di prova non è spesso sottoposta ad alcune importanti condizioni di carico che potrebbero influenzare i risultati di tale prova. Inoltre, il test Charpy non è il metodo più adatto per la valutazione dell'energia di impatto in campioni del cast, piuttosto resistenza alla frattura allora un'analisi alternativa sarebbe preferibile. Allo stesso modo per la resistenza a fatica, ci sono differenze nella risposta a fatica fra campione proveniente dalla colata e campione lavorato. È stato stabilito che i pezzi di colata SSF conservano la loro forza alla superficie del getto grezzo di colata che è particolarmente un vantaggio per carico di fatica rispetto alla superficie decarburato del grado ferritico-perlitico causato dal basso silicio nella lega ternaria Fe-C-Si. Questa proprietà viene però persa quando i getti SSF vengono lavorati allora le proprietà di fatica per SSF diventano paragonabile al grado ferrite- perlite.

Il comportamento a fatica per questi due gradi di DI sono stati studiati in un test di flessione a 4 punti per i campioni di getto in figura 23.

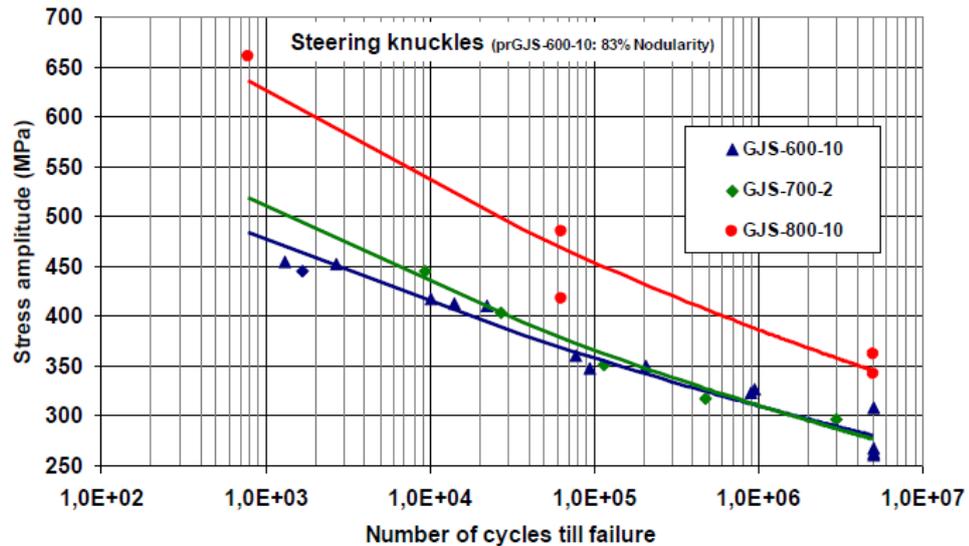


Figura 25 : Comparable fatigue results for ferritic-perlitic and SSF grade¹¹.

Nonostante questi attributi riconoscibili per i gradi SSF, il limite di rafforzamento con Si è comunque raggiunto a circa il 4,3% in peso (che è per l'EN-GJS-600-10) sopra questo valore una marcata diminuzione delle proprietà meccaniche in particolare in termini di resistenza e l'allungamento viene notato. Non ci sono state molte spiegazioni sul motivo per cui questo declino è avvenuto, ma poche ricerche hanno offerto ipotesi diverse ma quasi coesive che suggeriscono le cause di questo declino. Parte di queste ipotesi comprendono la formazione di reticolo a cristalli ordinati a lungo raggio con un elevato contenuto di Si nella soluzione solida, Si che agisce come elemento che indebolisce, nonché la segregazione di Si e alcuni elementi nella composizione. Queste affermazioni sono tutti ancora oggetto di numerosi studi in materia di gradi SSF¹². Mentre alcuni sono collegati al livello alto Si, altri alla logistica e alle praticità produttiva delle fonderie e alcuni alle lacune di conoscenza di questo grado relativamente nuovo. Sebbene con il livello di prova e di fiducia espressa nei risultati di studi conclusi sul deterioramento delle proprietà ai livelli elevati di Si, non sarebbe sicuro dire che è stato raggiunto il limite di rafforzamento con Si per i tipi di SSF, c'è la necessità di esplorare altre soluzioni per raggiungere una maggiore resistenza. Affrontare le sfide dei gradi SSF e trovare un rafforzamento alternativo è fondamentale per spostarsi oltre la soglia delle proprietà attuali. L'esame delle alternative tuttavia non esclude totalmente l'effetto e l'inclusione di Si dà considerazione a causa delle notevoli proprietà eccezionali che ha già fornito sui gradi attuali. Questo amplifica così le possibilità di lavorare con e attorno alla composizione attuale di SSF. Oltre la deteriorazione delle proprietà meccaniche del SSF grade dovuto all'alto tenore di silicio sopra 4.5 % ci sono altri effetti indesiderati su queste caratteristiche dovuto ai altri fenomeni intrinseci al grado SSF. La rappresentazione della durezza Brinell e dello stress di prova del 0,2% (Figura 7) dimostrano chiaramente che le fluttuazioni della durezza Brinell sono significativamente inferiori con i materiali ferritici GJS-500-14 e GJS-600-10 rispetto ai materiali tradizionali GJS- 500-7 e GJS-600-3. I materiali gradi GJS-450-18, GJS-500-14 e GJS-600-10 sono inclusi nella standardizzazione Europea si parla in proposito della seconda generazione di ghise con grafite sferoidale,

2. Influenza dell'alto tenore del silicio sulle proprietà meccaniche

Aumentando il contenuto di Si in gradi SSF rispetto al tradizionale 2,4% usato nella maggior parte dei gradi di DI, aumenta anche la resistenza a trazione e allo snervamento. Aumentando di circa 4,3% in peso, inizia il deterioramento delle proprietà con la diminuzione della resistenza a trazione seguita da successiva diminuzione della resistenza allo snervamento al 4,6% in peso di Si. Anche se l'effetto negativo di Si sull'allungamento è ben documentato, è comunque interessante notare che al punto del 4,5% in peso, l'allungamento scende quasi istantaneamente ed è quasi indeterminato ad un tenore Si più. La maggior parte degli studi che hanno esaminato il declino delle proprietà meccaniche nelle classi SSF affermano che la generazione iniziale di elementi infragilizzanti e la degenerazione di grafite caratterizzata da alti Si nella microstruttura è in grandi misure responsabili della diminuzione della resistenza alla trazione. La degenerazione e l'infragilimento progressivi conducono poi alla caduta successiva della resistenza. L'interazione all'interno della struttura reticolare generata dalla solida soluzione è stata identificata anche per contribuire ad intensificare il movimento rapido di dislocazione precedente al brusco declino delle proprietà, sulla base della generazione di reticolo cristallino a lungo raggio. Ulteriori studi sulla fisica dei materiali dei gradi SSF sarebbero naturalmente necessari per corroborare queste affermazione però. Alcuni ricercatori hanno anche trovato che l'effetto singolare di infragilimento causato dall'elevato Si potrebbe essere responsabile, anche se non è stata esplicitamente data alcuna ragione decifrabile^{13;14}. La durezza sembra essere immune al contenuto di alto contenuto di Si poiché vari test hanno confermato la sua indipendenza al livello di Si perché la durezza dipende in larga misura dalla struttura della matrice della ghisa e non molto dalla morfologia della grafite. Ciò spiega perché la durezza non sia influenzata né dall'effetto infragilimento di Si, dalla presenza di grafiti degenerati né dalla segregazione di elementi di lega nella microstruttura^{15;16}. La Figura 24 illustra l'effetto dell'aumento di tenore di Si sulle proprietà meccaniche delle SSF gradi. Qualitativamente possiamo mettere in evidenza l'aumento della resistenza a trazione e di snervamento al crescere del tenore del silicio nelle ghise. (Fig 24)

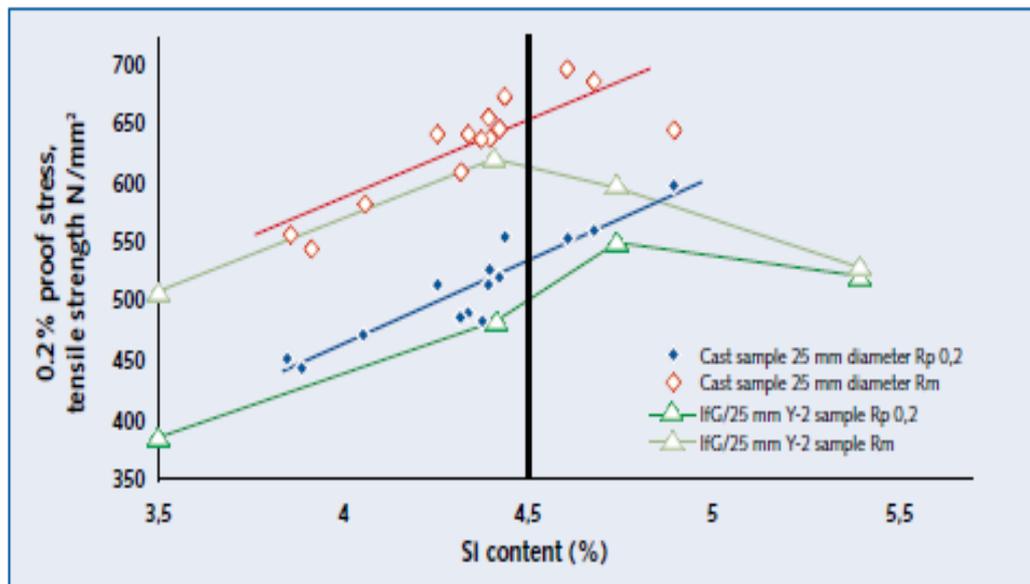


Figura 26 : Influence of high silicon on mechanical properties of SSFs tensile strength and 0.2% proof stress¹¹

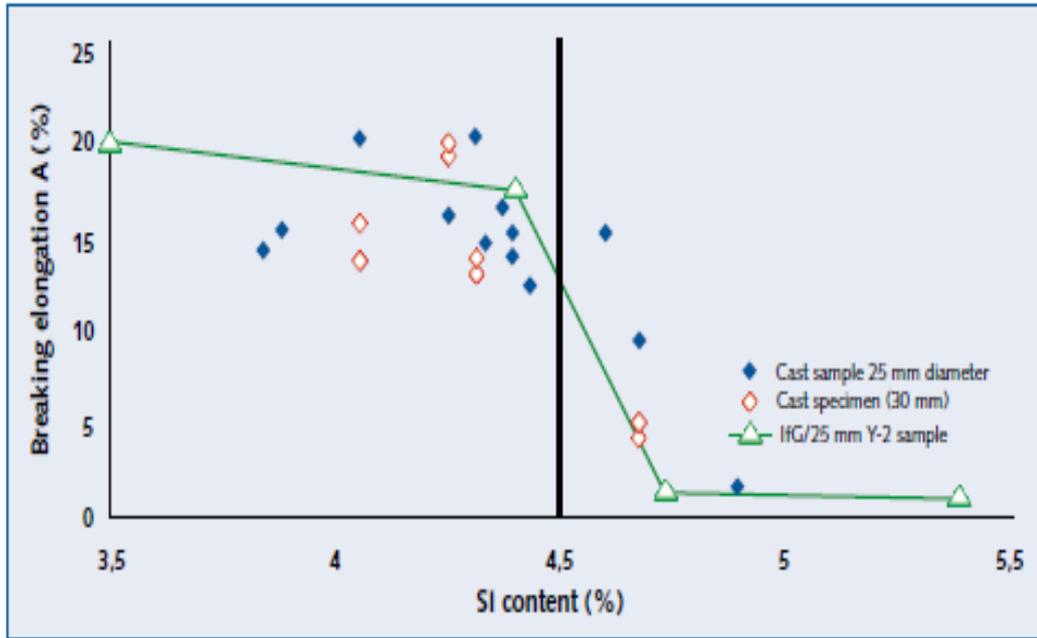


Figura 27 : Influence of high silicon on mechanical properties of SSFs breaking elongation¹¹

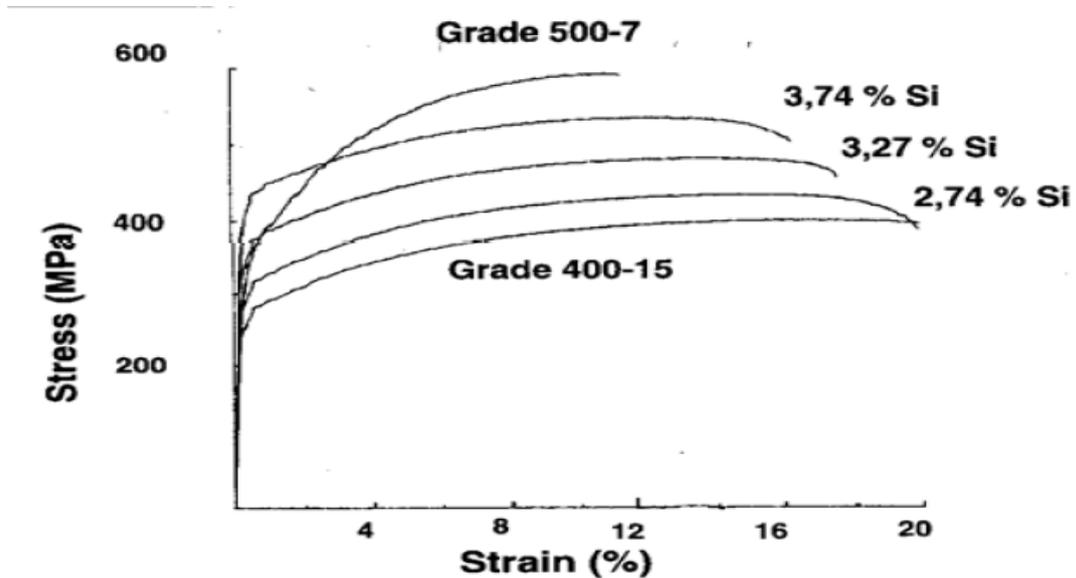
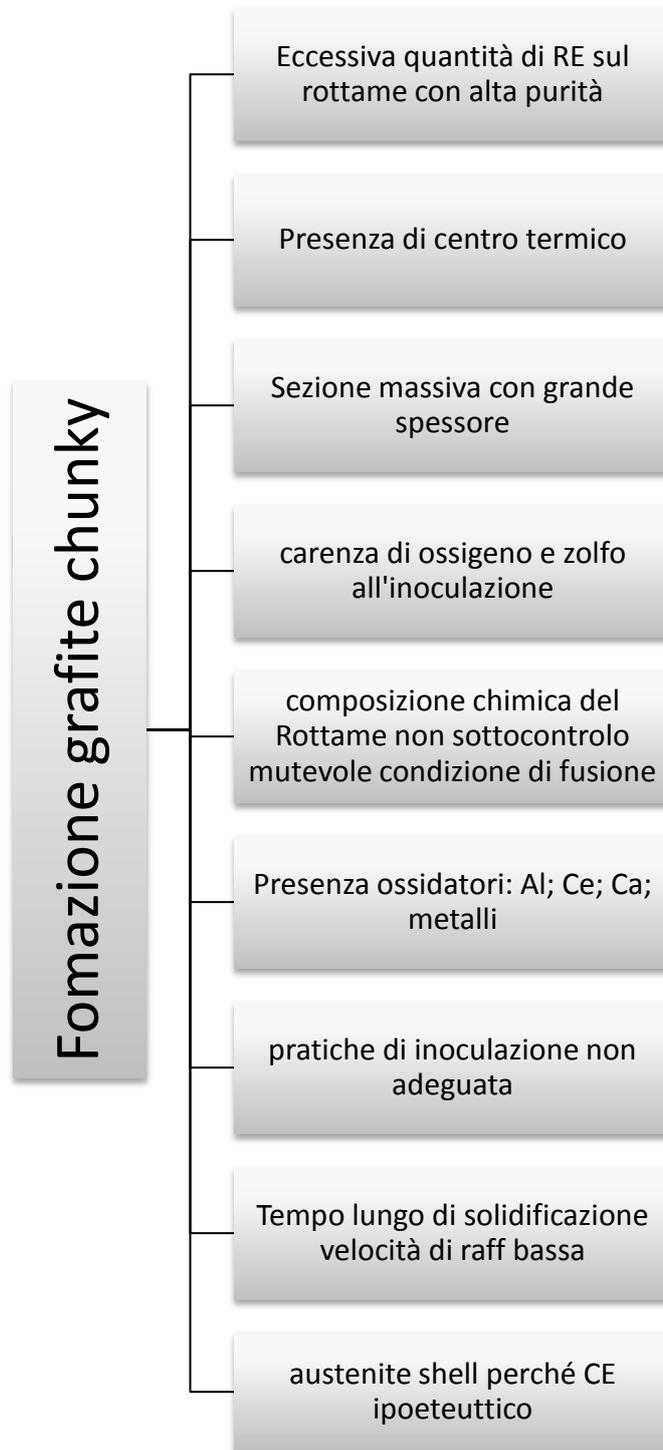


Figura 28 : Curva trazione sforzo deformazione funzione dell'alto tenore silicio¹⁰

Allo stesso modo, è stato provato che, mentre le ghise duttili con alto tenore di silicio reagiscono bene a temperature elevate e cicli termici perché il silicio aumenta la temperatura eutettoidica¹⁷. Il rapporto di Duit (2013) ha inoltre suggerito una minore dipendenza delle proprietà meccaniche dalla nodularità nei gradi SSF rispetto a quelli di prima generazione¹⁸.

3. Chunky grafite



Le cause probabile della formazione della grafite chunky

La morfologia della grafite oltre alla struttura della matrice è responsabile delle proprietà meccaniche del materiale e determina la qualità del pezzo in DI. La deviazione dalle forme sferiche convenzionali dei noduli di grafite crea punti di concentrazione dello stress nella microstruttura che influenza le proprietà, anche se l'effetto di rinforzamento della soluzione di Si riduce la sensibilità alla bassa nodularità. Per i gradi SSF, la norma EN 1563 accetta fino a 20% di grafite non sferica nella matrice con il resto consigliata per essere del tipo V e VI come stabilito nello standard EN-ISO 945-1 sulla classificazione dei noduli ¹. A parte la deviazione dalla morfologia normale come accennato in precedenza, la degenerazione della grafite costituisce un altro problema nelle microstrutture della ghisa influenzando la sua qualità e le proprietà. Il più dannoso di questi grafiti degenerati sono le grafiti degenerati ramificati e interconnessi spesso presenti nel centro termico dei getti di DI. Sono comunemente indicati come grafite chunky (CHG). I pezzi di sezione pesante DI con spessori di grandi dimensioni (tipicamente più grandi di 60mm)¹⁸ che richiedono lunghi tempi di solidificazione hanno in particolare mostrato una maggiore suscettibilità a CHG. La presenza di questa forma di grafite chunky in questi getti, in particolare con gradi SSF, è risultata dannosa per proprietà quali duttilità e UTS, anche se con minore effetto sulla durezza Brinell e resistenza allo snervamento ^{19;20}. Le immagini profondamente incise da campioni di sali SSF in figura 26 rivelano la presenza di CHG in casting DI e come si manifestano nelle immagini, essi macroscopicamente assomigliano a un cluster di grafite degenerata nella microstruttura. L'esistenza di CHG non è completamente nuova ai getti di DI, ma non era evidentemente discussa con molto impegno finché non sono stati esaminati i suoi effetti sulle proprietà dei titoli SSF. Diversi suggerimenti sulle cause di CHG nei gradi di DI variano da pratiche di inoculazione in diverse fonderie relative alla presenza di ossigeno e zolfo nel getto alla variazione condizione di fusione durante la solidificazione alla microsegregazione dell'elemento di lega nella composizione. L'ipotesi relativa alla carenza di ossigeno e zolfo all'inoculazione potrebbe essere una spiegazione perché i test sulla riduzione di CHG attraverso l'aumento aggiuntivo di ossigeno e zolfo nella fusione durante l'inoculazione hanno registrato una notevole riduzione di CHG¹⁷. Il cambiamento nella condizione di fusione durante la solidificazione potrebbe rivelarsi più difficile da controllare soprattutto per le sezioni di spessore più spesse in quanto il CHG si forma tipicamente nel centro termico. Ancora più, la carenza di ossigeno può essere attribuita anche alla presenza di forti ossidatori quali l'alluminio, il calcio, il cerio e altri metalli rari (RE) nella fusione. Gli esperienze di fonderia hanno sostenuto che una massa enorme e un tempo di solidificazione più lunga sono alcuni dei fattori predisponenti alla degenerazione della grafite nel normale DI, i casting dei pezzi con spessore di grande dimensione. Questo è simile nei getti SSF perché l'elevato contenuto di Si accoppiato con pratiche di fonderia come l'inoculazione, la temperatura di versamento, le condizioni di solidificazione e il livello di purezza della fusione influenzano la degenerazione della grafite.

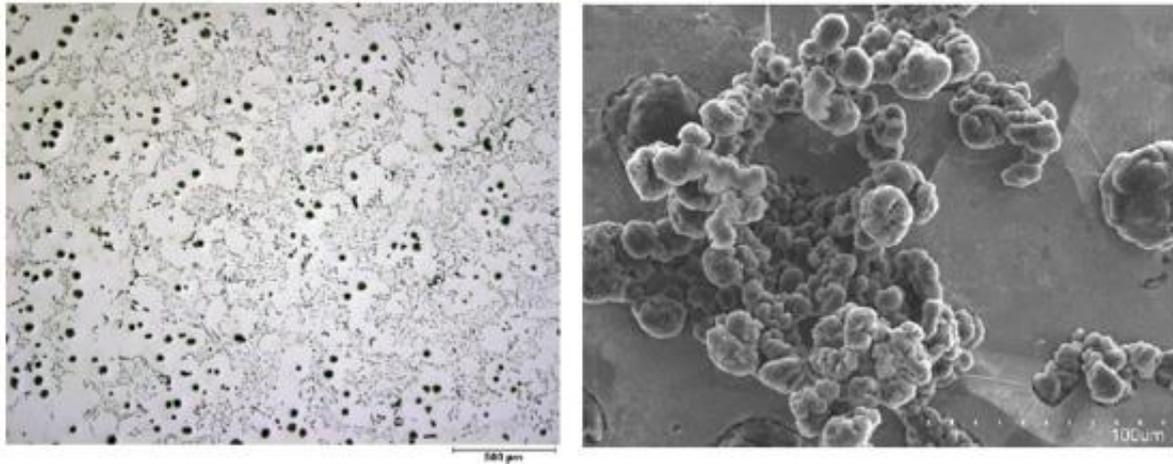


Figura 29 : Deviation in graphite shape in SSF, chain of small nodules¹¹

4. Segregazione elementi di lega

La valutazione degli studi attuali su SSF e l'analisi metallografici dei campioni rotti dimostra che anche la resistenza meccanica al fallimento è compromessa dalla segregazione Si e Mn attorno alle regioni di cellule eutettiche della ghisa^{14;13}. La segregazione avviene tipicamente intorno ai noduli di grafite e aree di celle eutettica mentre Mn segrega al solito bordi delle celle nei campioni analizzati SSF. Questo promuove la debolezza interfacciali nei microelementi della ghisa e elimina le forze di legame tra i noduli e la matrice di ferrite come spiegato negli studi che valutano i modelli di frattura in grado SSF¹⁴. Le pratiche standard di fusione offrono linee guida consigliate su come ridurre al minimo queste segregazioni, ma le variazioni nei processi di fonderia non garantiscono interamente le proprietà in classi SSF totalmente prive di questo problema a livello di produzione o in composizioni. L'analisi della frattografia hanno anche indicato reticolo alterato, coerente con i movimenti delle dislocazioni e propagazione delle cricche in aree in cui la microstruttura presenta delle segregazioni più elevate. L'effetto dei Si segregati nei getti DI è analizzato nelle figure 27 e 28. L'esito di prova dei campioni mostra un progressivo pattern di rottura dalla frattura duttile alla frattura fragile di clivaggio o alla frattura intergranulare, all' aumentare del contenuto di Si nella ghisa. Inoltre, è stato suggerito che la presenza di inclusioni e segregazione di ossidi di magnesio o cerio nei limiti delle cellule eutettiche contribuiscono ulteriormente all'azione del silicio nel frattoglio valutato.

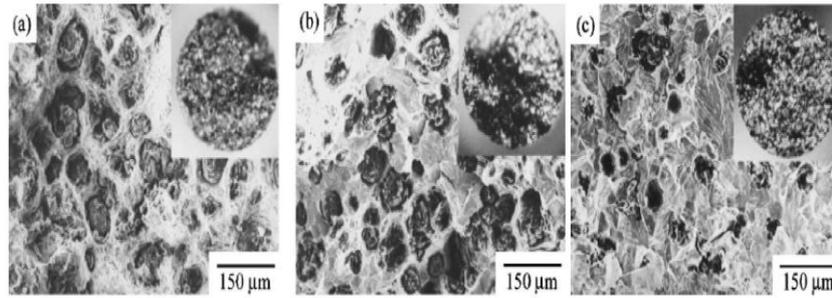


Figura 30 : Effect of silicon on fracture pattern of DI: (a) dimple fracture (2.9Si); (b) dimple and cleavage (4.0Si); (c) cleavage (4.3Si)¹³

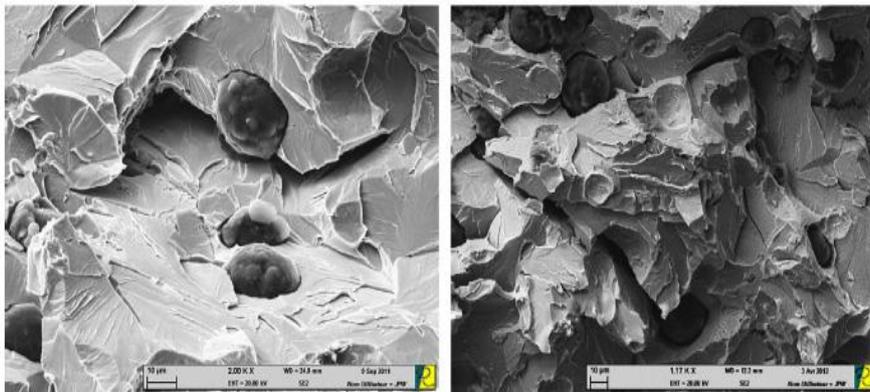


Figura 31 : Silicon segregation- Decohesion between nodules and ferrite matrix¹⁴

VI. Rinforzamento soluzione solida

Il rinforzamento di una soluzione solida è implementata attraverso l'introduzione di atomi di impurità nella struttura cristallina dei metalli puri. È una delle tre alternative disponibili per la lega come opzione di rinforzamento, mentre le altre due sono il rinforzamento della dispersione e l'indurimento per precipitazioni utilizzate per i metalli multifasici. Il rinforzamento della solida soluzione introduce questi atomi di impurità nella struttura metallica ospite sia mediante sostituzione che interstiziale e imponendo una deformazione del reticolo vicino causando restrizioni nel movimento progressivo di dislocazione nel reticolo cristallino. Si alza l'energia necessaria per innescare il moto delle dislocazioni. Nel rinforzamento della soluzione solida di sostituzione, gli atomi di soluto e di solvente sono tipicamente di dimensioni simili e come il nome implica, alcuni degli atomi di solvente sono sostituiti dagli atomi di impurità (soluti) nel reticolo. Il rinforzamento interstiziale della soluzione sfrutta le dimensioni minori degli atomi di soluto per occupare interstizi nel reticolo del solvente. Le soluzioni solide hanno una composizione omogenea, come gli atomi di soluto sono distribuiti in modo casuale attraverso la matrice materiale. In modo pratico, il

rafforzamento di una soluzione solida dipende dalla solubilità degli atomi di soluto nella matrice ospitante ed è influenzata in gran parte da un certo numero di fattori per essere efficace. Il fattore di dimensioni atomiche specifica secondo la regola di Hume-Rothery è che la differenza nei raggi atomici del soluto e dell'atomo di solvente deve essere inferiore al 15% per minimizzare il rischio di distorsione del reticolo. È anche efficace se le strutture cristalline di entrambe le soluzioni e le soluzioni di solvente sono simili e un soluto di alta valenza si dissolve facilmente nel solvente. La dimensione atomica del soluto e la sua frazione in volume sono i due criteri più importanti per questo processo di rafforzamento e come illustrato nella figura 29, i piccoli e più grandi atomi di soluto impongono trazione e compressione del reticolo ospite. La figura spiega anche la relazione tra la frazione di volume del soluto e la resistenza alla deformazione plastica del materiale. In soluzione solida rinforzata, gli atomi di soluto interagiscono con dislocazioni in molti modi per aumentare la resistenza del materiale alla deformazione plastica. L'interazione potrebbe essere elastica, modulare, stacking-fault, interazioni elettriche, a corto raggio e intervalli regolari a lungo raggio a seconda della deformazione di reticolo imposto alla struttura. All'interno del contesto di ghisa ad alto tenore di silicio, la soluzione solida rinforzata utilizza il silicio come soluto di impurità per rafforzamento sostituzionale producendo un materiale rinforzato che combina una resistenza e una duttilità uniche. Ciò è particolarmente interessante perché il rafforzamento del materiale richiede tipicamente alcuni compromessi soprattutto per la duttilità, ma questo non sembra essere una preoccupazione importante nei gradi SSF in quanto possiedono notevoli valori di allungamento rispetto a gradi standardizzati comparabili. Altri metodi di rafforzamento in soluzione solida come la dispersione e l'indurimento per precipitazioni si basano sulla formazione o sull'introduzione di materiali di seconda fase o particelle estranee che ostacolano il movimento di dislocazione per migliorare la resistenza del materiale.

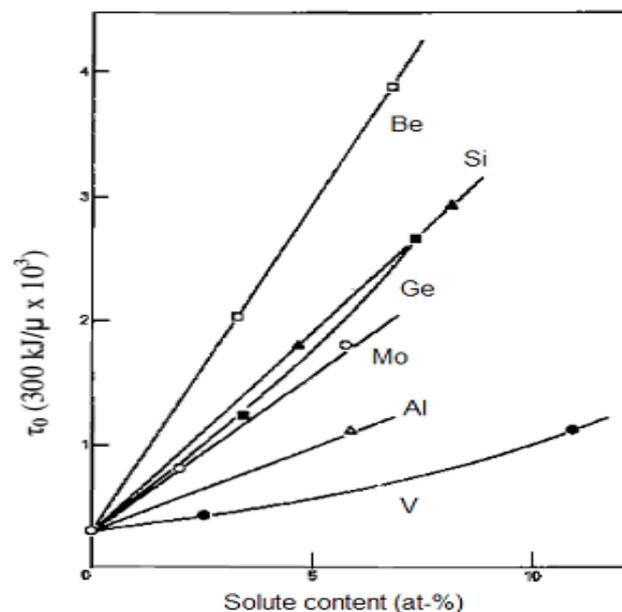


Figura 32 : Effect of Solute content on solid solution strengthening⁶

VII. Effetto della composizione chimica

Gli studi hanno dimostrato che le limitazioni presenti nelle proprietà possono anche essere correlate all'influenza di altri elementi nella composizione chimica o negli elementi di traccia non desiderati presenti negli scarti utilizzati nella fusione. La scelta prioritaria degli elementi della composizione chimica è fondamentale per superare le soglie attuali di questo grado di ghise²³. La produzione di ghise duttile attraverso un adeguato equilibrio degli elementi di lega può sostituire in modo adeguato il trattamento termico e le proprietà meccaniche ottenute con questo metodo in base ai risultati ottenuti dalle opere di Gonzaga (2013)²¹, Gonzaga e Carrasquilla (2005)²² sono spesso migliori di quelli ottenuti con metodi comuni. Combinazione di eccellenti proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione rende queste leghe la scelta migliore di materiale per molti applicazioni critiche. Il rafforzamento dei meccanismi attraverso la lega controllata è un concetto riconosciuto anche nella produzione di acciaio. Nei lavori Gonzaga (2013)²¹, Gonzaga e Carrasquilla (2005)²² hanno chiaramente evidenziato che la nodularità delle grafite governano la resa e l'allungamento della frattura e hanno individuato l'effetto deleterio dell'eccesso di manganese (Mn) e fosforo (P) sulle ghise duttile. Con un simile risultato di ricerca, Riposan (2007)²⁴ ha anche raccomandato che meno di 0,03wt% P e non più di 0,2wt% Mn siano percentuali ottimali per entrambi gli elementi in composizione chimica per ottenere la struttura ferritica in una ghisa duttile. Tuttavia, secondo Gonzaga e Carrasquilla (2005)²², l'elevato silicio in DI neutralizza l'effetto combinato di Mn e P nella composizione. Una delle caratteristiche primarie delle composizioni tipiche per il DI è che è costituito per ridurre la probabilità di formazione di carburo, avere frazione di volume di ferrite o perlite nella microstruttura a seconda della matrice desiderata, così come le proprietà di grafite.

Mentre queste condizioni possono essere soddisfatte con scelta e quantità di elementi adeguati nella composizione, ci sono fattori secondari come sequenze di inoculazione e solidificazione che contribuiscono e devono essere controllate per ottenere getti di qualità migliore (Serrallach)²³ al., 2010, Gonzaga (2013)²¹.

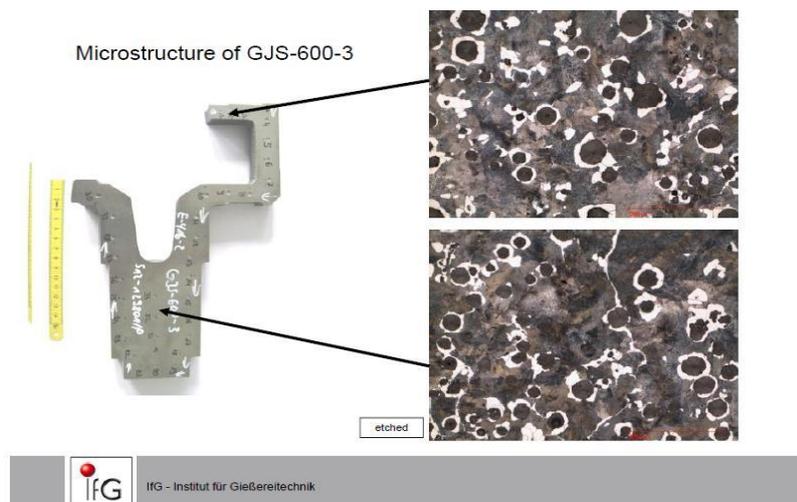


Figura 33 : microstruttura GJS-600-3 spessore differente¹⁰



Figura 34 : Microstruttura GJS-600-10 Spessore differente¹⁰

Nelle ghise perlitiche ferritiche tradizionali le buone proprietà sono ottenute mediante alligamento con Sn, Cu e Mn in % dipendenti dagli spessori. (Fig 33) Nei nuovi tipi ciò lo si ottiene con una ferrite indurita per soluzione solida di silicio compresi fra 3,2 e 4,3 %, valori che non dipendono dagli spessori (Fig 34). Il silicio è fra gli elementi di lega più importante. Ha un effetto importante sulla metallurgia della ghisa SSF e conferisce a questa le caratteristiche uniche che lo rende diverso dalle ghise duttile convenzionali. Il silicio sposta l'eutettico a valori più bassi di carbonio: al 3% per un tenore di silicio al 3,8%. Ciò riduce la percentuale di grafite disponibile per l'autoalimentazione. Dalle esperienze di O/Cava questo fattore favorisce una maggiore tendenza alla porosità rispetto a quelle delle ghise tradizionali. (Fig 34)

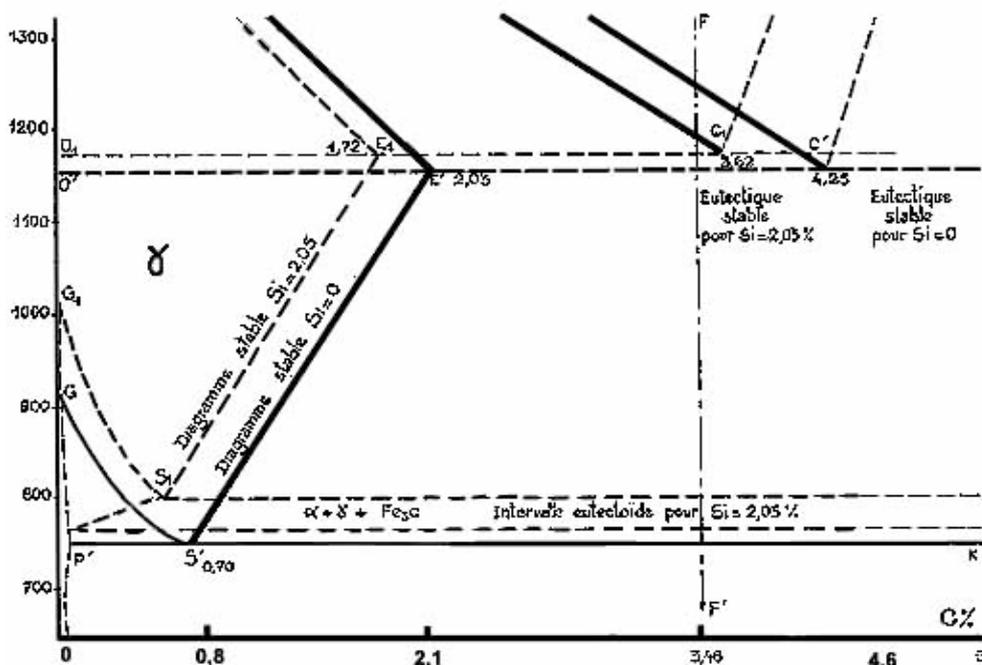


Figura 35 : Diagramma Fe-C per livelli di silicio: 0; 2.05⁷

Il ruolo del silicio è:

- Ridurre la quantità di carbonio nell'eutettico e nell'eutettoide;
- Aumentare la temperatura dell'eutettoide e stabilizzare la grafite;
- Grafitizzante a velocità di raffreddamento basso;
- Preparazione dei campioni per analisi e prove meccaniche.

VIII. Presentazione dei campioni per analisi e prove meccaniche per ghise SSF referenza alla

UNI_EN_1563_2012

Lo studio si riferisce a la ghisa sferoidale colate in stampi di sabbia o stampi a comportamento termico comparabile. Con riserva di modifiche da concordare, si possono applicare a getti ottenuti con metodi alternativi come per esempio la colata in continua. La designazione del materiale è basata sulle minime proprietà meccaniche ottenute in campioni di ghisa con spessore o diametro di 25 mm. La designazione è indipendente dal tipo di campione. Sono importanti:

- la posizione (i) di un componente di colata dove il campione (i) deve essere preso;
- le proprietà meccaniche da misurare;
- i valori minimi, o valori consentiti, per queste proprietà meccaniche (per informazioni, vedi allegato B).

NOTA: Le proprietà dei pezzi di colata potrebbero non essere uniformi, a seconda della complessità dei getti e della variazione dei loro spessori di sezione.

I campioni devono essere realizzati con lo stesso materiale di quello utilizzato per produrre la colata che rappresentano. Possono essere utilizzati diversi tipi di campioni (*separately cast samples, cast-on samples, side-by-side cast samples, samples cut from a casting*), a seconda dello spessore di massa e di parete del pezzo di colata. Quando rilevante, il tipo di campione dovrebbe essere concordato tra il produttore e cliente. Salvo diverso accordo, la scelta dell'opzione è lasciata a discrezione del produttore. Quando la massa della fusione supera i 2 000 kg e il suo relativo spessore di parete di 60 mm, è preferibile utilizzare *cast-on samples o side-by-side cast samples*; le dimensioni e la posizione del campione sono concordate tra il fabbricante e i clienti entro l'accettazione dell'ordine. Se il trattamento sferoidizzante viene eseguito nello stampo (in mould process), si deve evitare *separately cast samples*. Tutti i campioni devono essere adeguatamente marcati per garantire la completa

tracciabilità ai getti che rappresentano. I campioni sono soggetti allo stesso trattamento termico, come quello dei getti che rappresentano. I pezzi di prova a trazione e impatto devono essere finalmente lavorati dai campioni dopo il trattamento termico.

1. Dimensione del campione

La dimensione del campione deve essere in corrispondenza con lo spessore di parete corrispondente del getto, come illustrato nella Tabella 4. Se vengono utilizzati altri spessori, questo deve essere concordato tra il produttore e il cliente.

*Tipi e dimensioni dei campioni del cast e dimensioni dei provini di trazione in relazione allo spessore della parete corrispondente del getto*²⁵

Relevant wall thickness t mm	Type of sample				Preferred diameter of tensile test piece ^a d mm
	Option 1 U-shaped (see Figure 1)	Option 2 Y-shaped (see Figure 2)	Option 3 Round bar (see Figure 3)	Cast-on sample (see Figure 4)	
$t \leq 12,5$	—	I	Types b, c	A	7 (Option 3: 14 mm)
$12,5 < t \leq 30$	—	II	Types a, b, c	B	14
$30 < t \leq 60$	b	III	—	C	14
$60 < t \leq 200$	—	IV	—	D	14

^a Other diameters, in accordance with Figure 5, may be agreed between the manufacturer and the purchaser.
^b The cooling rate of this cast sample corresponds to that of a 40 mm thick wall.

A. Frequenza e numero di test

I campioni rappresentativi del materiale devono essere prodotti a una frequenza adeguata alle procedure di garanzia della qualità del processo adottate dal costruttore o come concordate con il cliente. In assenza di una procedura di garanzia della qualità del processo o di qualsiasi altro accordo tra il produttore e il cliente, è necessario produrre almeno un campione (cast sample) per la prova di trazione per confermare il grado di materiale, a una frequenza da concordare tra il costruttore e il cliente. Quando sono necessari i test d'impatto, i campioni devono essere prodotti a una frequenza da concordare tra il produttore e il cliente.

2. Tipi di campioni

A. Separately cast sample

I campioni devono essere colati separatamente in stampi di sabbia e in condizioni di produzione rappresentative. Gli stampi utilizzati per colare *Separately cast sample* devono avere un comportamento termico comparabile al materiale colato utilizzato per colare i getti. I campioni devono soddisfare i requisiti che si osservano nelle figure 1, 2 o 3 allegato 2. I campioni devono essere rimossi dallo stampo ad una temperatura simile a quella dei getti.

B. Side-by-side cast samples

Side-by-side cast samples i campioni sono rappresentativi dei getti contemporaneamente colati e anche di tutti gli altri getti di uno spessore di parete rilevante simile dalla stessa unità di prova. Quando sono richieste proprietà meccaniche per una serie di getti appartenenti alla medesima unità di prova, *Side-by-side cast samples* devono essere prodotti nell'ultimo getto colato. I campioni devono soddisfare i requisiti riportati nelle figure 1, 2 o 3 allegato 2.

C. Cast-on samples

Cast-on samples sono rappresentativi dei getti a cui sono collegati e anche di tutti gli altri getti di spessore di parete rilevante simile dalla stessa unità di prova. Quando sono richieste proprietà meccaniche per una serie di getti appartenenti alla stessa unità di prova, i campioni prelevati devono essere prodotti nell'ultimo getto colato. Il campione deve avere una forma generale come indicato in figura 4 allegato 1 e le dimensioni indicate in esso. L'ubicazione del *Cast-on samples* deve essere concordata tra il costruttore e il cliente entro l'accettazione dell'ordine, tenendo conto della forma del getto e del sistema dell'impianto, al fine di evitare effetti negativi sulle proprietà del materiale adiacente.

D. Test pieces machined from cast samples

La provetta di trazione è mostrato in figura 5 e, se del caso, il campione di prova di impatto mostrato nella Figura 6 è lavorato da un campione mostrato in figura 3 allegato 1 o dalla parte tratteggiata delle figure 1, 2 o 4 allegato 1. La procedura di sezionamento del *cast sample* deve essere conforme all'allegato G. Salvo diverso accordo, viene utilizzato il diametro preferito per la provetta.

E. Samples cut from a casting

In aggiunta ai requisiti del materiale, il produttore e il cliente possono concordare le proprietà richieste (per informazioni, consultare tabella ...) in punti indicati nel casting. Queste proprietà devono essere determinate da prove su provini lavorati da campioni tagliati dal getto in certe posizioni indicate. Il produttore e il cliente si accordano sulle dimensioni di questi provini. In assenza di indicazioni da parte del cliente, il produttore può scegliere i luoghi da cui tagliare i campioni e le dimensioni dei provini. La linea centrale del provino deve essere collocata in un punto intermedio tra la superficie e il centro.

NOTA 1: Quando la zona di ultima solidificazione nella colata è inclusa nel diametro del provino di prova, non è possibile ottenere il valore minimo di guida dell'allungamento.

NOTA 2 Nel caso di grandi getti singoli, i campioni in esame possono essere prelevati in posizioni concordate nella fusione che devono essere indicate.

3. Prove meccaniche

A. Test di trazione

La prova di trazione deve essere eseguita secondo la norma EN ISO 6892-1: 2009. Il diametro del provino preferito è di 14 mm, ma per motivi tecnici o per provini lavorati *Samples cut from a casting*, è consentito utilizzare un provino di diverso diametro (vedi allegato 1- figura 5). In ogni caso la lunghezza originale del provino deve essere conforme all'equazione:

$$L_0 = 5,65 \times \sqrt{S_0} = 5 \times d$$

Lo: è la lunghezza iniziale;

So: è l'area della sezione trasversale iniziale del provino;

d: è il diametro della provetta lungo il tratto utile.

Se l'equazione di cui sopra per Lo non è applicabile, allora un accordo viene effettuato tra il fabbricante e il cliente sulle dimensioni della provetta. Un provino con un diverso tratto utile può essere concordato tra il produttore il cliente.

B. Prova d'urto

La prova d'urto deve essere effettuata su tre pezzi di prova a urto Charpy V (vedi allegato 1 - figura 6) in conformità con la norma EN ISO 148-1: 2010, utilizzando apparecchiature di prova dotate di un'energia adeguata a determinare correttamente le proprietà.

C. Prova di durezza

La durezza deve essere determinata come durezza Brinell secondo EN ISO 6506-1. prove di durezza alternative possono anche essere concordate. La prova deve essere effettuata sulle provette o in uno o più punti sui getti dopo la preparazione della zona di test in conformità con l'accordo tra il produttore e l'acquirente. Se le posizioni di misura non sono oggetto di un accordo, essi sono scelti dal produttore. Se non è possibile effettuare la prova di durezza sul casting, poi di comune accordo tra il produttore e l'acquirente, effettuare la prova di durezza su una manopola getto dentro il casting.

D. Osservazione della struttura della grafite

La struttura di grafite deve essere confermata dall'esame metallografico. Metodi non distruttivi possono anche fornire informazioni come gli ultrasuoni. In caso di controversia, i risultati dell'esame microscopico devono prevalere.

4. Presentazione norma UNI_EN_1563_2011 specificazione delle ghise SSF

A. Test pieces machined from cast samples

Le proprietà meccaniche delle ghise SSF sono specificate in questa tabella

*Proprietà meccaniche misurate su provini Test pieces machined from cast samples per ghise SSF*²⁵

Material designation		Relevant wall thickness	0,2 % proof strength	Tensile strength	Elongation
Symbol	Number	t mm	$R_{p0,2}$ MPa min	R_m MPa min	A % min
EN-GJS-450-18	5.3108	$t \leq 30$	350	450	18
		$30 \leq t \leq 60$	340	430	14
		$t > 60$	to be agreed upon between the manufacturer and the purchaser		
EN-GJS-500-14	5.3109	$t \leq 30$	400	500	14
		$30 \leq t \leq 60$	390	480	12
		$t > 60$	to be agreed upon between the manufacturer and the purchaser		
EN-GJS-600-10	5.3110	$t \leq 30$	470	600	10
		$30 \leq t \leq 60$	450	580	8
		$t > 60$	to be agreed upon between the manufacturer and the purchaser		

NOTE The mechanical properties of test pieces machined from cast samples may not reflect exactly the properties of the casting itself. Values for tensile properties of the casting are given in Annex B for guidance.

B. Test pieces machined from samples cut from a casting

Valori di guida per le proprietà meccaniche misurate sui provini lavorati *Samples cut from a casting* per ghise gradi ssf²⁵

Material designation		Relevant wall thickness	0,2 % proof strength	Tensile strength	Elongation
Symbol	Number	t mm	$R_{p0,2}$ MPa min.	R_m MPa min.	A % min.
EN-GJS-450-18C	5.3108	$t \leq 30$	350	440	16
		$30 < t \leq 60$	340	420	12
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		
EN-GJS-500-14C	5.3109	$t \leq 30$	400	480	12
		$30 < t \leq 60$	390	460	10
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		
EN-GJS-600-10C	5.3110	$t \leq 30$	450	580	8
		$30 < t \leq 60$	430	560	6
		$60 < t \leq 200$	Guidance values to be provided by the manufacturer		

In the case when the purchaser requires minimum mechanical property values to be obtained in a stated location of the casting, these values are to be agreed with the manufacturer.

- la posizione (i) su un componente di colata dove il campione (i) deve essere preso;
- le proprietà meccaniche da misurare;
- i valori minimi, o valori consentiti, per queste proprietà meccaniche (per informazioni, vedi tabella .. sopra).

NOTA: Le proprietà dei pezzi di colata potrebbero non essere uniformi, a seconda della complessità dei getti e della variazione dei loro spessori di sezione.

C. Specificazione durezza

La durezza Brinell e i suoi valori di intervallo per i gradi elencati nella tabella ... devono essere specificati solo se concordati tra il produttore e il cliente entro l'accettazione dell'ordine.

Valore durezza Brinell dei diversi gradi normati di ghise sferoidale 25

Material designation		Brinell hardness range HBW	
		Relevant wall thickness t	
Symbol	Number	$t \leq 60$ mm	$60 \text{ mm} < t \leq 200$ mm
EN-GJS-350-22	5.3102	less than 160	less than 160
EN-GJS-400-18	5.3105	130 to 175 ^a	130 to 175 ^a
EN-GJS-400-15	5.3106	135 to 180 ^a	135 to 180 ^a
EN-GJS-450-18	5.3108	170 to 200	160 to 190
EN-GJS-450-10	5.3107	160 to 210 ^a	160 to 210 ^a
EN-GJS-500-14	5.3109	185 to 215	170 to 200
EN-GJS-500-7	5.3200	170 to 230 ^a	150 to 230 ^a
EN-GJS-600-10	5.3110	200 to 230	190 to 220
EN-GJS-600-3	5.3201	190 to 270 ^a	180 to 270 ^a
EN-GJS-700-2	5.3300	225 to 305 ^a	210 to 305 ^a
EN-GJS-800-2	5.3301	245 to 335 ^a	240 to 335 ^a
EN-GJS-900-2	5.3302	270 to 360 ^a	270 to 360 ^a
NOTE 1 The lowest hardness is achieved with a ferritic matrix and low silicon content. The hardness increases with the amount of pearlite or increased silicon content.			
NOTE 2 Eutectic carbides increase hardness but they are normally undesirable and only likely to be present in minor amounts.			
^a By agreement between the manufacturer and the purchaser, a narrower hardness range may be adopted; a tolerance range of between 30 and 40 Brinell hardness units is commonly acceptable. This hardness range may be wider for grades with a ferritic-pearlitic matrix structure.			

I gradi SSF sono: EN-GJS-400-18; EN-GJS-500-14; EN-GJS-600-10 si nota che l'intervallo di variazione della durezza è 30 HBW rispetto al circa 45 HBW per altri i gradi convenzionale

D. Composizione chimica

Per soddisfare i requisiti delle proprietà meccaniche, si raccomanda una soluzione solida ferritica strutturale rinforzata dal silicio.

*Con un contenuto di silicio crescente, il contenuto di carbonio dovrebbe diminuire in modo corrispondente.*²⁵

Designation		Si	P	Mn
Symbol	Number	% approx. ^a	% max.	% max. ^b
EN-GJS-450-18	5.3108	3,20	0,05	0,50
EN-GJS-500-14	5.3109	3,80	0,05	0,50
EN-GJS-600-10	5.3110	4,30	0,05	0,50

^a Si content may be lower due to other alloying elements.
^b With lower Mn content (e.g. 0,30 %), machinability and elongation will be improved.

E. Struttura della grafite e della matrice

La struttura di grafite dovrebbe essere prevalentemente di forma V e VI secondo la norma EN ISO 945-1. A causa dell'aumento del contenuto di silicio, queste soluzioni solide rinforzate di ferrite di ghisa sferoidale possono mostrare una grafite compatta (forma III) in sezioni massive. Tuttavia, le matrici ferritici sono, anche per livelli elevati di soluzione rinforzato con silicio, molto meno sensibile alla nodularità ridotta di grafite rispetto alle ghise rinforzati da notevoli quantità di perlite. È possibile accettare un livello di circa il 20% della forma III, a condizione che il resto sia prevalentemente di forma V e VI, per soddisfare le proprietà di trazione minime specificate in questo standard europeo. La matrice dovrebbe essere prevalentemente ferrite con un contenuto massimo di perlite pari al 5%. La quantità di cemento libero non deve superare l'1%.

F. Nodalità

La nodularità di ghisa sferoidale è definita come percentuale di particelle di grafite che sono di forma sferoidale o nodulare (forma V e VI di EN ISO 945-1). Mentre il numero di particelle è rilevato con ingrandimento di 100 x, la determinazione della forma e della sua percentuale dovrebbe essere effettuata con un ingrandimento che mostra le particelle di grafite in circa la dimensione secondo la norma EN ISO 945-1: 2008. Se la classificazione di forma di grafite viene eseguita sulla base di questo standard rispetto al riferimento di immagini, computerizzata analisi di immagine con parametri software specifici potrebbe essere applicata per questo materiale. Nodularità non solo dipende dall'influenza del processo di produzione, per esempio, dalla composizione chimica, la concentrazione di magnesio residuo o il metodo di inoculazione, ma anche dalla velocità di solidificazione della massa fusa nelle rispettive zone di parete. Inoltre, è possibile influenzare la forma di grafite anche nella

zona di contatto dell'aria dello stampo. La rotondità del nodulo mostra un solo aspetto della qualità del materiale. Altri parametri che influenzano le qualità del materiale sono, tra l'altro, il numero di particelle di grafite e la loro distribuzione, la concentrazione di perlite e la sua disposizione, la soluzione solida rinforzata della ferrite e l'eventuale microritiro. Per quanto riguarda la garanzia delle proprietà materiali minime specificate in questo Standard, è *impossibile* definire valori precisi di nodularità per un determinato modulo di solidificazione. Tuttavia, l'esperienza dimostra che una nodularità dell'80% o più generalmente assicura le proprietà di trazione minime specificate in questo standard europeo, purché la matrice della varietà scelta sia di conseguenza adeguata. La maggior parte del 15% al 20% di grafite non è in forma V e VI, è quindi in forma IV e possibilmente in forma III (e può anche essere di forma II in getti con pareti massici). Per getti sottoposti a carichi severi, in particolare in condizioni di fatica, può essere necessaria una nodularità superiore (inclusi i requisiti per una determinata percentuale di forma V e VI grafite), soprattutto per gradi di ghise sferoidale perlitiche ferritiche. La velocità di ultrasuoni e la frequenza di risonanza sonora sono influenzati dalla struttura di grafite. La loro misurazione, dopo la calibrazione, può fornire informazioni sulla nodularità. Tuttavia, questa misura non può sostituire l'esame metallografico.

IX. Alcuni risultati di caratterizzazione e descrizione dei parametri usati

Durante il processo produttivo delle ghise SSF presso O/Cava meccanica procede ai prelevamenti di campione per eseguire i test di qualificazione del getto. Questi prelevamenti fatti sui diversi campioni rispettano le Norme Standard Europea UNI-EN-1563. Per i test di trazione, i campioni prelevati sono del tipo *Samples cut from a casting*. Le composizioni chimiche attribuite ai lotti sono ottenuti con spettrometria di massa sui campioni corrispondenti a diversi step del processo dopo un cambiamento apprezzabile del per cento in massa di alcuni elementi determinanti per la qualità del getto come: Magnesio (Mg); Manganese (Mn); Carbonio (C); silicio (Si); fosforo (P); Zolfo (S). Durante la solidificazione si può osservare continuamente la curva di raffreddamento associate alla velocità di raffreddamento sfruttando i parametri ricavati numericamente dalla curva per valutare qualitativamente il getto. Questa interpretazione delle curve di raffreddamento e velocità di raffreddamento verrà discusso in modo dettagliato. (Allegato 2)

1. Risultati di caratterizzazione

In allegato 3 ci sono alcuni dettagli sulle tecniche d'inoculazione associati alle composizioni chimiche per ogni prova.

A. Prova I-1:

data: 22/05/2017

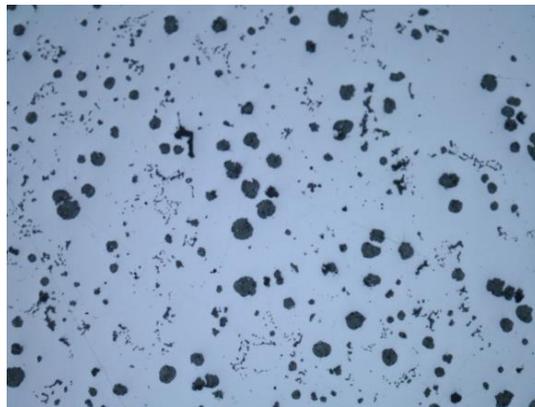
composizione chimica: per cento in peso:

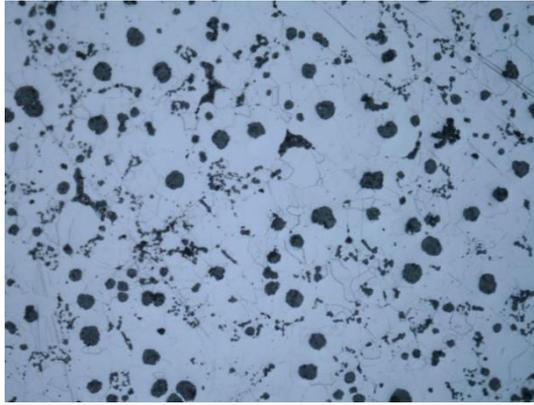
C	Si	Mg	Mn	P	S
2.88	3.94	0.061	0.283	0.004	0.009

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
532	440.1	10.2

Microstruttura prova I1:





B. Prova I-2:

data: 22/05/2017

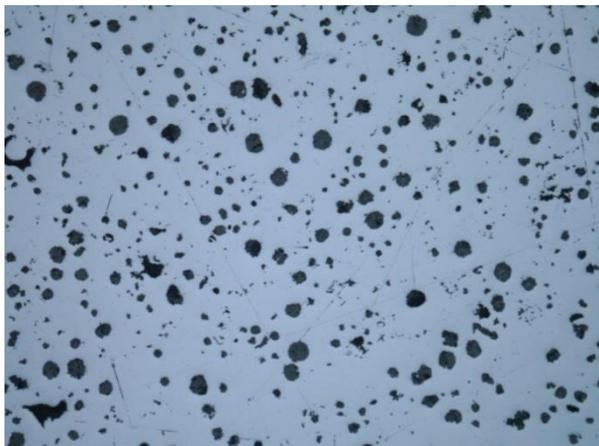
composizione chimica: per cento in peso:

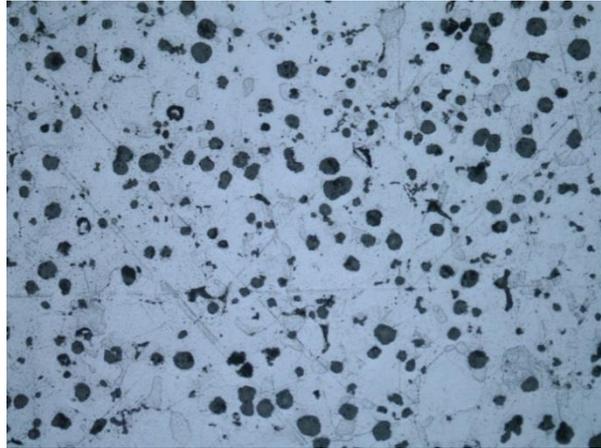
C	Si	Mg	Mn	P	S
3.04	4.04	0.044	0.287	0.02	0.009

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
534.3	441.7	8.68

Microstruttura prova I2:





Note della produzione procedura d'inoculazione I-1 e I-2:

Analisi richiesta: C.3.10%-Si.3.80%-Mn.0.25% Max-P.0.05% Max.

La prova è stata eseguita sul Forno 2 il 22/05/2017 (lunedì)

Il FO era stato caricato il 21/05/17 per la 1° colata del 22/05/17 con 10000 Kg. ghisa pani 5000 Kg ferro EL.AN. selezionato 7000 Kg. di boccame e 5000 Kg. di pacchi.

Il Mn. in forno il 22/05/17 mattino era di 0.28%

Dopo aver colato F1784-F1815 del mattino il forno è stato corretto per eseguire la prova caricando 250 Kg. di Si. e 2000 Kg. di ferro EL.AN selezionato (acciaio dolce)

Si. finale in forno = 3.06%

Mn. finale in forno = 0.27%

C.eq. finale = 4.10%

E' stata colata la prima siviera di prova con lega MTI 832 e SMW 605 in siviera 0.3%, la seconda con lega MTI 832 e FeSiBiRe in siviera 0.3%(MTI)

Si. finale I° siv.= 4.04% Mg finale 0.044%

Si. finale II° siv. = 3.94% Mg finale 0.061%

Sono state eseguite diverse prove di inoculazione così distribuite.

Prova 1 SMW + inserto SMW

Prova 2 Bi (MTI 0.5) +inserto SMW

C. Prova II-1:

data: 05/05/2017

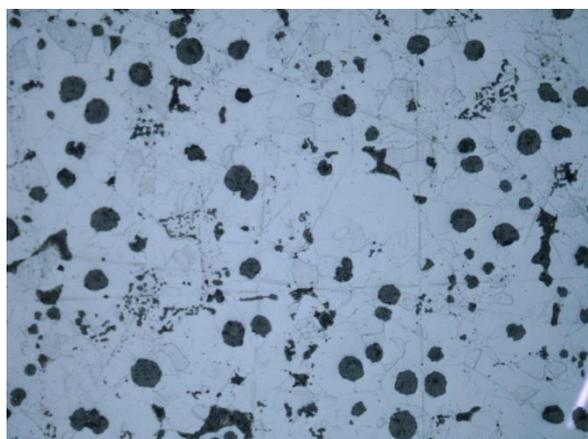
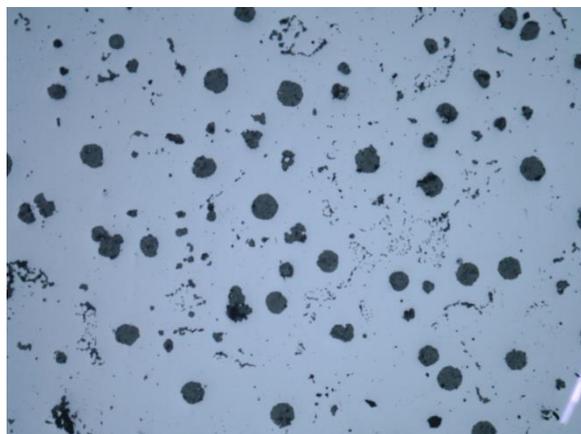
composizione chimica: per cento in peso:

C	Si	Mg	Mn	P	S
2.82	3.84	0.063	0.264	0.019	

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
505.5	412.6	9.23

Microstruttura prova II-1:



D. Prova II-2:

data: 05/05/2017

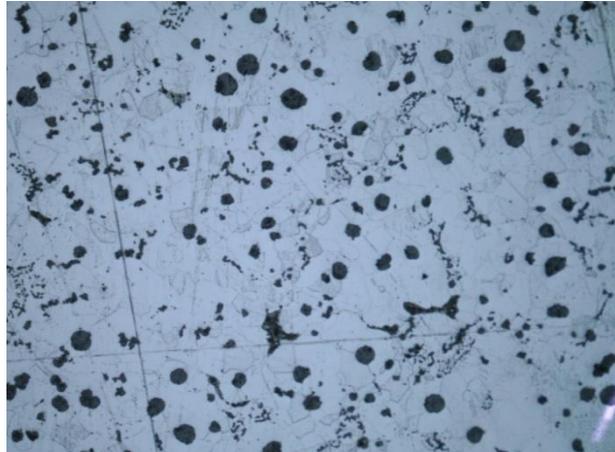
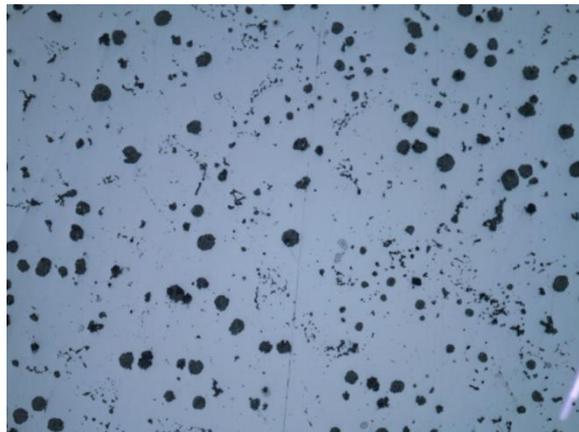
composizione chimica: percento in peso:

C	Si	Mg	Mn	P	S
2.99	3.95	0.057	0.258	0.019	0.018

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
526.2	412.6	7,84

Microstruttura prova G2:



Note della produzione procedura d'inoculazione Prova II-1 e II-2:

Analisi richiesta: C.3.10%-Si.3.80%-Mn.0.25% Max-P.0.05% Max.

La prova è stata eseguita nel Forno 0 il 05/05/2017 F1959

Il F0 era stato caricato il 04/05/17 per la 1° colata del 05/05/17 con 7000 Kg.ghisa pani 7000 Kg ferro EL.AN. selezionato 2000 Kg. di boccame e 6000 Kg. di pacchi più il piede di bagno (7-8000Kg.)

Il Mn. in forno il 04/05/17 era di 0.31%

Il Mn. in forno il 05/05/17 I° colata era di 0.26%

Dopo aver colato F1903 del mattino il forno è stato corretto per eseguire la prova caricando 200 Kg. di Si. e 2000 Kg. di ferro EL.AN selezionato (acciaio dolce)

Si. finale in forno = 3.12%

Mn.finale in forno = 0.26%

C.eq. finale = 4.13%

È stata colata la prima siviera di prova con lega MTI 832 e Bar 102, la seconda con lega MTI 832 e SMW 605.

Si. finale I° siv.= 3.84% Mg finale 0.063%

Si. finale II° siv. = 3.95% Mg finale 0.057%

Hb Lega 832+Bar 102= 207-212

Hb Lega 832+SMW 605= 217-221

E. Prova III-1:

data: 02/09/2016

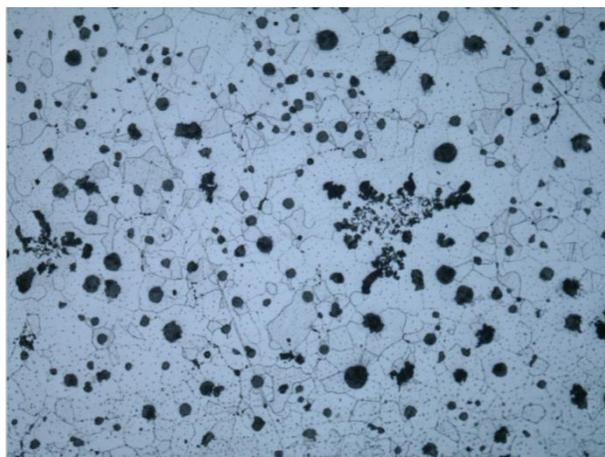
composizione chimica: percento in peso:

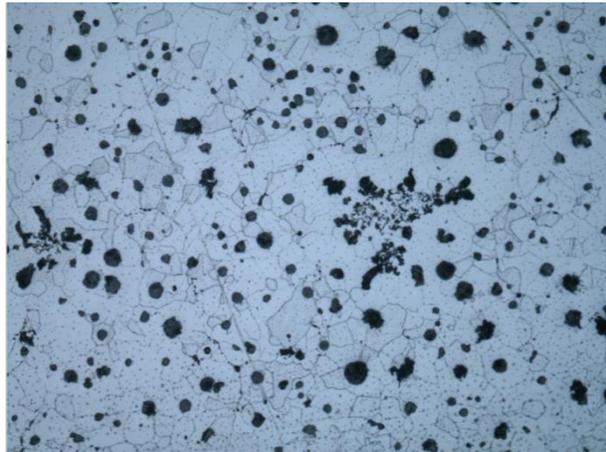
C	Si	Mg	Mn	P	S
2.58	3.81	0.056	0.224	.026	0.008

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
569.3 Mpa	463.2 MPa	15.7%

Microstruttura prova III-1:





F. Prova III-2:

data: 02/09/2016

composizione chimica: per cento in peso:

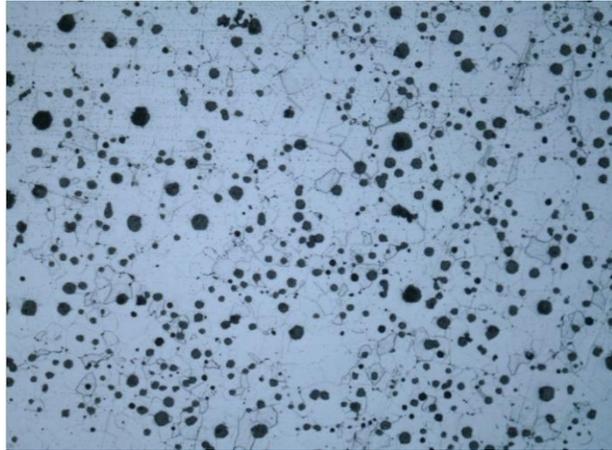
C	Si	Mg	Mn	P	S
2.65	4	0.063	0.22	0.025	0.009

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
604.4 Mpa	494.9	15.8%

Microstruttura prova F2:





Note della produzione procedura d'inoculazione III-1 e III-2:

Analisi richiesta: C.3.10%-Si.3.80%-Mn.0.25% Max-P.0.05% Max.

La prova è stata eseguita nel Forno 0 il 02/09/2016

Il FO era stato caricato il 01/09/16 per la 1° colata del 02/09/16 con 6000 Kg.ghisa pani 5000 Kg ferro EL.AN. selezionato 6000 Kg. di boccame e 5000 Kg. di pacchi più il piede di bagno (6-7000Kg.)

Il Mn. in forno il 01/09/16 era di 0.35%

Il Mn. in forno il 02/09/16 1° colata era di 0.22%

Dopo aver colato F1809-F1853 del mattino il forno è stato corretto per eseguire la prova caricando 320 Kg. di Si. e 3000 Kg. di ferro EL.AN selezionato (acciaio dolce)

Si. finale in forno = 3.12%

Mn.finale in forno = 0.21%

C.eq. finale = 4.06%

E' stata colata la prima siviera di prova con lega MTI 832 e la seconda con lega MTI 610

Si. finale 1° siv.= 3.81% Mg finale 0.056%

Si. finale II° siv. = 4.00% Mg finale 0.063%

Sono state eseguite diverse prove di inoculazione così distribuite.

Lettera P sul mozzo indica la lega MTI 832

Lettera U sul mozzo indica la lega MTI 610

Da P1 a P9 Inoculante in flusso 120g (0.12%)

Da P10 a P18 Moldinoc da 80 g (per getto)

Lo stesso schema di inoculazione è stato usato con la lettera U (lega 610)

Hb Lega 832= (215-220 collo) - (219-224 flangia)

Hb Lega 610= (241-235 collo)- (232-233 flangia)

Trazione su flangia Lega 832: Rt=569.3 MPa , Rs=463.2 MPa , A=15.7%

Trazione su flangia Lega 610: Rt=604.4 MPa , Rs=494.9 MPa , A=15.8%

G. Prova IV-1:

data: 19/09/2017

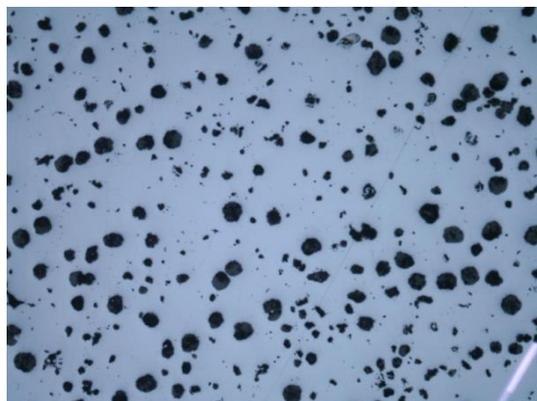
composizione chimica: percento in peso:

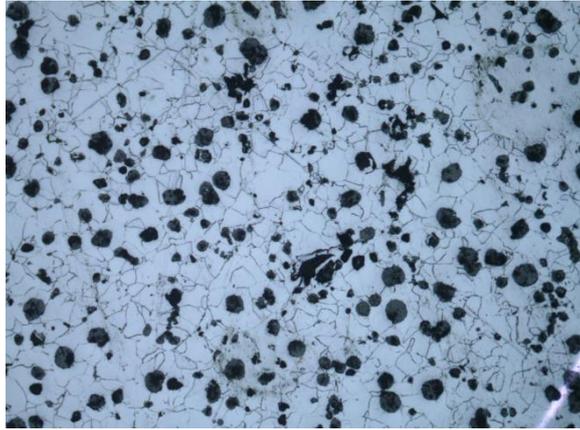
C	Si	Mg	Mn	P	S
2.88	4.08	0.061	0.28	0.033	0.016

Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
529.2	418.6	13.7%

Microstruttura prova IV-1:





H. Prova IV-2:

data: 19/09/2017

composizione chimica: per cento in peso:

C	Si	Mg	Mn	P	S
2.77	4.10	0.056	0.277	0.032	0.009

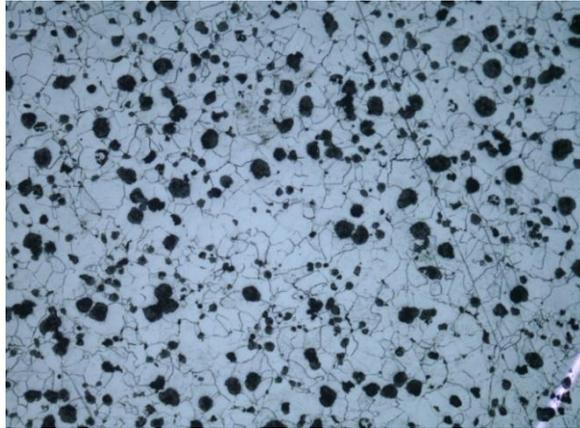
Prova trazione:

Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
547	441.7	15.1

Microstruttura prova IV-2

:





Note della produzione procedura d'inoculazione IV-1 e IV-2:

Analisi richiesta: C.3.10%-Si.3.80%-Mn.0.25% Max-P.0.05% Max.

La prova è stata eseguita sul Forno 0 il 19/09/2017

Il FO era stato caricato il 18/09/17 per la 1° colata del 19/09/17 con 10000 Kg. ghisa pani, Kg 6000 ferro EL.AN. selezionato, Kg.5000 di boccame.

Il Mn. in forno il 18/09/17 seconda fusione era di 0.321%

Dopo aver colato F1897 del mattino il forno è stato corretto per eseguire la prova caricando 240 Kg. di Si. e 4000 Kg. di ferro EL.AN selezionato (acciaio dolce)

Si. finale in forno = 2.92%

Mn.finale in forno = 0.259%

C.eq. finale = 3.89%

Sono state colate due siviere di prova: la prima con lega MTI 831 e FeSiBiRe 0.3% in siviera e 90 g. di inoculante in flusso al FeSiBiRe .

La seconda con lega 630 (MTI) e FeSiBiRe 0.3% in siviera e 90 g. di inoculante in

Flusso FeSiBiRe.

Si. finale 1° siv.= 4.08% Mg finale 0.061% (lega 18 Kg.)

Si. Finale 2° siv. =4.10% Mg.finale 0.056% (lega 25 Kg.)

Prove di trazione

Lega 831 = Rs.418.6 Rt.529.2 A.13.7%

Lega 630 = Rs.441.7 Rt.547 A.15.1%

2. Descrizione dei parametri osservati durante le prove

A. Studio metallografica (Microstruttura)

La metallografia è la branca della metallurgia che si dedica allo studio delle caratteristiche strutturali e morfologiche dei materiali metallici, comprese le rilevazioni di proprietà non geometriche ma intrinseche dei vari costituenti dei metalli. Gli scopi essenziali interessano:

- 1- comprensione delle caratteristiche e delle proprietà chimiche, fisiche, meccaniche e tecnologiche dei materiali metallici;
- 2- la previsione del comportamento dei materiali metallici nelle condizioni d'esercizio; — il controllo della corrispondenza dei materiali alle specifiche richieste, e quindi formulare un giudizio sulla validità dei processi di lavorazione cui essi dovranno essere sottoposti o sono già stati sottoposti;
- 3- il riconoscimento delle eventuali anomalie e quindi individuazione delle cause connesse al ciclo produttivo (metallurgico e tecnologico) o a quelle di funzionamento (chimiche, meccaniche e/o termiche), che le hanno provocate.

Le determinazioni metallografiche traggono le loro possibilità operative dalla preliminare conoscenza dei diagrammi d'equilibrio delle leghe, quindi dalla preliminare conoscenza della composizione del materiale esaminato e dalla configurazione reticolare derivante dagli esami cristallografici. Il grado di preparazione dipende dalla definizione che si richiede all'esame macroscopico, può essere sufficiente una lavorazione con finitura non elevata (per esempio nel controllo corrente per l'identificazione di difetti di solidificazione quale il cono di ritiro). Generalmente un tipo di preparazione più accurato definisce tanti più particolari, quanto migliore è stata la preparazione della superficie da osservare. Le operazioni connesse con la preparazione della superficie da esaminare (spianatura, levigatura, eventualmente lappatura) devono essere condotte in modo da evitare qualsiasi alterazione strutturale del materiale (per esempio da surriscaldamento o da incrudimento). Nel caso sia sufficiente la sola lavorazione all'utensile, si deve curare che non restino rilievi troppo pronunciati provocati, per esempio, da una cattiva regolazione della macchina, da avanzamenti troppo elevati al tornio o alla limatrice. Nel caso in cui l'attacco sia utilizzato per la messa in evidenza d'eterogeneità strutturali o di difetti di lieve entità, si raccomanda una preparazione della superficie di tipo accurato, che può giungere fino alla lucidatura, per ottenere una buona definizione.

In questo caso lo scopo è valutare la forma della grafita segregata durante il processo, per qualificare gli inoculanti usati e il meccanismo di inoculazione seguito conoscendo in precedenza la composizione chimica del getto. La preparazione dei campioni prelevati sul getto per l'osservazione al microscopio ottico si procede come illustrato nella figura seguente:

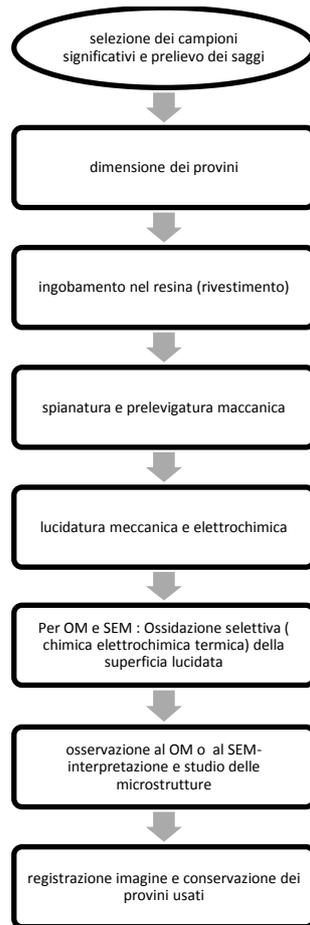


Figura 36 : Procedura preparazione compioni metallografico

Le obiettivi principali dell'osservazione al microscopio ottico di questi campioni sono:

- 1- Valutare la presenza della grafite chunky
- 2- Valutare la conformità del getto a la specificazione UNI-EU 1563 rispetto alla forma della grafite
- 3- Abbinare le forme ottimali ottenuti dai getti con i metodi di inoculazioni e i tipi di inoculanti usati.

B. L'inoculazione

La messa in evidenza degli inoculanti et delle tecniche d'inoculazione usati durante le prove è stato fatto per identificare in modo empirico quegli inoculanti associate alla tecnica d'inoculazione porta a una segregazione più ottimale della forma della grafite. Le tecniche d'inoculazione usati sono:

1. *Inoculazione in siviera*: Aggiungendo l'inoculante prima della colata in siviera, mentre questa viene trasportata fino allo stampo.

2. *Inoculazione in flusso*: Facendo fluire il bagno fuso in una preforma contenente l'inoculante, ove a seconda della velocità del flusso del bagno fusorio, la corretta percentuale di Si viene adsorbita dal bagno.

Ecco una tavola mostrando gli inoculanti usati da O/Cava Meccanica per le ghise duttili SSF

Inoculanti commerciali usati	Si	Al	Ca	Bi	TER	granulometria	meccanismo d'uso
FeSiBiRe	60 - 70 %	0,8 - 1,5 %	1 - 1,5 %	0,8 - 1 %	0,6 - 1 %	0,2 - 0,7 mm	In flusso
FeSiBiRe – Rubicer	71,30%	0,63%	1,97%	0,98%	0,89%	2 - 7 mm	in siviera
INOCULIN 540	63,80%	3,59%	1,46%				
SMW 605	69	0.9	2.2	1.1	1.1	2 – 6 mm	In siviera
intervallo adeguato di TER (terre rare) per evitare la Grafite chunchy							

La selezione degli inoculanti per il processo produttivo delle ghise duttili è basata sulla realizzazione di queste azioni classificati in ordine di priorità

- 1- Prevenzione di ghisa carburata o bianca
- 2- Migliorazione della forma della grafite
- 3- Aumentazione del numero di sferoidi
- 4- Riduzione della dissoluzione dei germi
- 5- Eliminazione dei micro-retiri.
- 6- Riduzione dei difetti gassosi

Effetti degli elementi attivi degli inoculanti:

Aluminio: Favorisce fortemente la formazione di ferrite. Per parti sottili, viene utilizzato un inoculante contenente 4% di alluminio (INOCULIN 540). Prodotti Foseco:

Calcio: Migliora la germinazione della grafite. Riduce la tendenza a la tempra.

Bario: Favorisce fortemente la grafitizzazione. Riduce il svenimento dell'effetto inoculante. Rischio di formazione di scoria quando aggiunto in eccesso. Prodotti Foseco: INOCULIN 320, 360

Bismuto: Sempre aggiungere in presenza di terre rare per contrastare il suo effetto antisferoidizzante, il bismuto aumenta notevolmente il numero di sferoidi e riduce le loro dimensioni, riducendo al minimo la loro flottazione. Elimina la formazione di carburo. Prodotti Foseco: INOCULIN 400, 440, 460

Lo Stronzio: è contenuto in una FeSi ad alta purezza. Elimina i carburi senza aumentare il numero di sferoidi. Non utilizzare con FeSiMg contenente terrestri. Prodotti Foseco: INOCULIN 33, 33X, SR50

Zirconio: Neutralizza l'azoto e migliora l'inoculazione. Buona solubilità dell'inoculante grazie alla presenza di manganese che riduce il punto di fusione dell'inoculante. Prodotti Foseco: INOCULIN 80, 25, 90, 250, 900.

Cerio e altre terre rare: Aumenta notevolmente il numero di sferoidi. Riduce la dissoluzione dell'effetto inoculante. INOCULIN 920 contenente solo il lanthanum, migliora la capacità di auto-alimentazione intrinseca delle ghise sferoidale. Prodotti Foseco: INOCULIN 920, 940.

L'esperienza ha dimostrato che meno ci sono i noduli di grafite nelle ghise duttili, più tendono ad essere grandi ma anche irregolari nella forma. In questo caso le caratteristiche meccaniche sono diminuite. Allo stesso modo, minore è il numero di noduli, maggiore è il rischio di avere perlite (la ferrite è sempre localizzato intorno al nodulo di grafite), nonché il rischio di ottenere carburi e microporosità. Pertanto, l'inoculazione, che ha un effetto moltiplicatore sulla formazione di nuclei e quindi cellule di solidificazione, è un passo essenziale di una produzione di qualità. Aumentando il numero di noduli, quindi, promuove la formazione di ferrite e riduce il rischio di carburi e micropori in aree intercellulari. Inoltre, inoculanti sono ricchi di silicio, quest'ultimo promuove la solidificazione della ghisa secondo il diagramma stabile Fe – C.

L'efficacia delle fasi di inoculazione dipende dalla buona qualità della carica metallica e da un buon processo di colata sotto controllo. Infatti, più il carico sarà "scarso" in nuclei (caso osservato con un notevole contributo di acciaio nel carico), più sarà necessario inoculare. Analogamente, un processo di fusione incontrollato (tempo di fusione o lunga manutenzione, surriscaldamento significativo, temperatura di ritenzione superiore a 1450 ° C), distrugge i nuclei e richiede più inoculazione. Per evitare rischi in questa fase del processo di fusione, è consigliabile avere una composizione delle cariche con un valore ottimale di nuovo ghisa colare in mode veloce e a bassa temperatura. La valutazione del potenziale di nucleazione della ghisa è un passo preliminare necessario prima di iniziare l'inoculazione. Uno dei modi più efficaci è l'analisi termica misurando almeno il sotto raffreddamento e la ricalescenza. Un'alternativa è l'uso di tempra. I risultati possono essere confermati da una parte, in tutte le sue sezioni. Ma un potenziale di nucleazione stabile nel getto di base porta generalmente ad un numero uniforme di noduli nei pezzi. Un getto di base con un elevato potenziale di nucleazione permette di ottenere getti con strutture desiderate prive di carburi. Ciò impedirà un costoso trattamento termico di recupero.

C. Procedura d'inoculazione

Primo passo preconditionamento: Questa fase serve a omogeneizzare il potenziale di nucleazione del bagno. Ciò consiste nell'aggiungere di uno dei seguenti prodotti al bagno metallico depurato. Sia un combustibile di alta qualità e purezza, sia li ferro-silicio o ili carburo di silicio standard, sia un inoculante specifico. In ogni caso, il prodotto aggiunto deve avere una granulometria adatta in modo che la dissoluzione sia veloce. Ciò è particolarmente importante nel caso di carbure de silicio che dissolve ma non fonde. Generalmente, l'aggiunta di 0,1% o 1 kg per tonnellata metrica è sufficiente per aumentare la formazione dei nuclei.

Secondo passo pre-inoculazione: In questa fase, l'aggiunta di 0,2 e 0,4% ferrosilicone o inoculante viene eseguita durante il trasferimento dal forno nella siviera o nella parte inferiore della siviera con prodotti per il trattamento. Nel caso di un trattamento sandwich o di tundish, l'inoculante può essere una parte del materiale di copertura. Nel complesso, la lega FeSiMg e l'inoculante possono ridurre l'effetto carburogeno del magnesio e regolare il contenuto di silicio della ghisa secondo il grado richiesto e lo spessore dei pezzi prodotti. Come per le altre fasi di inoculazione, la funzione primaria di un inoculante è quello di aumentare il numero di nuclei e quindi facilitare la crescita delle particelle di grafite invece della segregazione di carburi.

terzo passo: inoculazione in siviera: L'inoculazione in siviera, spesso indicata come "post inoculazione", è sicuramente il passo più importante del processo. A causa della reazione violenta del magnesio durante il trattamento di sferoidizzazione, una frazione significativa dei nuclei generati durante le fasi 1 e 2 può essere aspirata nella scoria che galleggia sul bagno di metallo liquido. Il trattamento con il magnesio tende anche ad aumentare il sottoraffreddamento. È quindi necessario regolare il potenziale di nucleazione della ghisa. L'aggiunta da 0,1 a 0,3% (0,4% accettabile) di un efficace inoculante tra la siviera di trattamento e la siviera di colata è normalmente sufficiente per reimpostare il potenziale di nucleazione della ghisa e per compensare l'effetto di carburogeno del magnesio. Nel caso di un forno di colata, la quantità e la scelta dell'inoculante devono essere in precedenza verificato per minimizzare incrostazione del forno.

Ultimo passo: inoculazione in flusso: questo passo è il più costoso del processo d'inoculazione per i seguenti motivi: aggiunta nel getto del metallo durante la colata, l'inoculante richiede una granulometria fine che lo rende più costoso. Inoltre, le sue prestazioni possono essere relativamente basse a causa della dispersione potenziale sulla parte superiore degli stampi intorno alla tundish. Questa di conseguenza contamina la sabbia e può causare difetti potenziali per le successive produzioni. Nel caso di aggiunta di blocchi stampati o sinterizzati nel sistema di colata, il costo dell'agglomerazione è incluso nel prezzo dell'inoculante.

L'inoculazione in flusso è comunque il più efficace dell'intero processo di inoculazione. È ben noto che entrambi i trattamenti di sferoidizzazione e di inoculazione si dissolvono nel tempo. Con questo passo, l'effetto dissolvenza viene così ridotto al minimo. Spesso, una piccola aggiunta di inoculante a questo livello può sostituire una quantità maggiore di prodotti nei passaggi precedenti. In alcuni casi può essere evitato l'inoculazione in flusso. Questo ultimo passo è spesso usato come una sicurezza anziché una necessità. Spesso, l'inoculazione in flusso sarà meno efficace di una buona scelta della carica metallica e / o del controllo dei processi di colata e di sferoidizzazione. Ad esempio, sebbene l'inoculazione in flusso non possa eliminare completamente gli effetti degli elementi indesiderati come Cr, V, Mo, Sb, Ti, può ridurre al minimo le loro azioni aumentando il numero di noduli e diminuendo il loro grado di segregazione. L'utilizzo di materie prime di alta qualità, come il rottame di ghisa, ha dimostrato di migliorare l'efficacia dell'inoculazione. Inoltre, l'uso di rottame di ghisa nell'alimentazione riduce la quantità di inoculazione garantendo una fusione più veloce e riducendo la comparsa di difetti intercellulari. Sebbene l'inoculazione in flusso non sia sempre considerata essenziale per la produzione di getti in ghisa GS, rimane di fondamentale importanza per la produzione di pezzi sottili (pari o inferiori a 3 mm) o pezzi spessi (di 100 a 200 mm) per garantire un elevato numero di noduli e ridurre al minimo i difetti intercellulari che influenzano le caratteristiche meccaniche. In sintesi, i fondatori hanno bisogno di sapere perché è necessario inoculare ghisa

sferoidale, quando e come devono farlo migliorando le proprie procedure al fine di ottenere pezzi di alta qualità ad un costo inferiore.

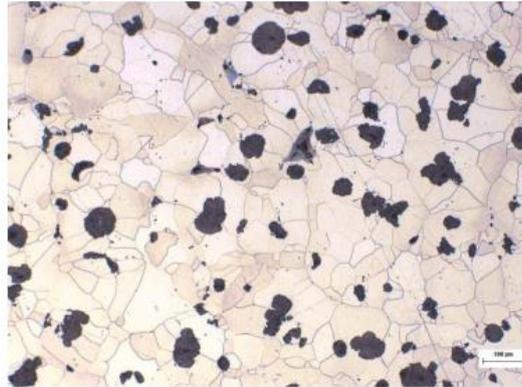


Figura 37 : Microstruttura di un pezzo spesso in ghisa sferoidale ferritica mostrando una nodularità imperfetta causata da una inoculazione non adeguata²⁵

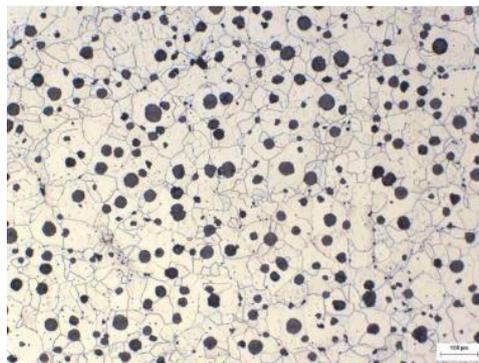


Figura 38 : Microstruttura di un pezzo spesso in ghisa sferoidale ferritica mostrando un numero di nodule e una nodularità adeguata²⁵

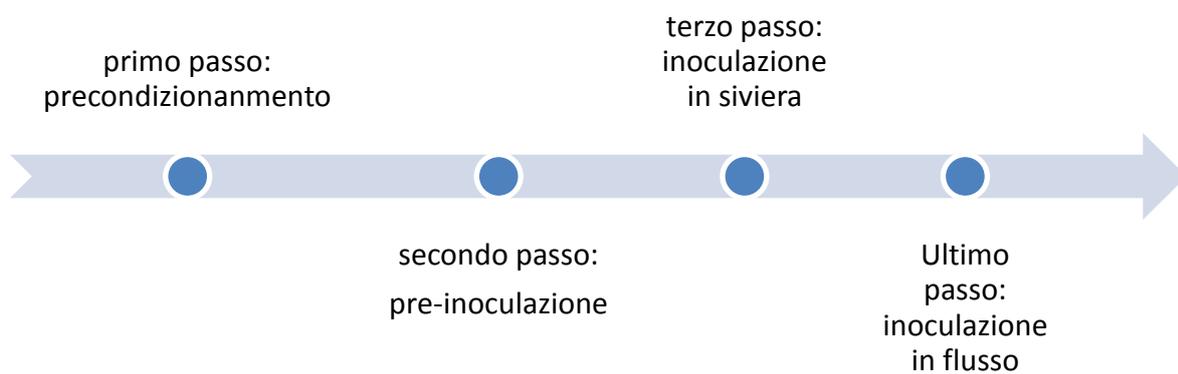
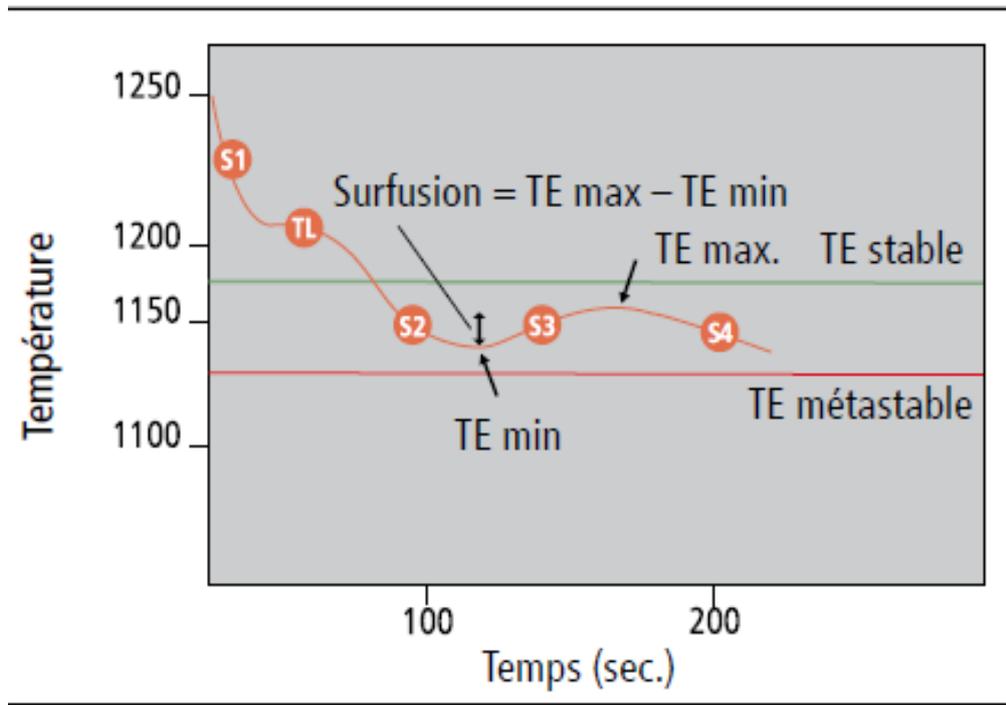


Figura 39 : Step dell'inoculazione delle ghise sferoidale

D. Interpretazione della solidificazione secondo le curve di raffreddamento

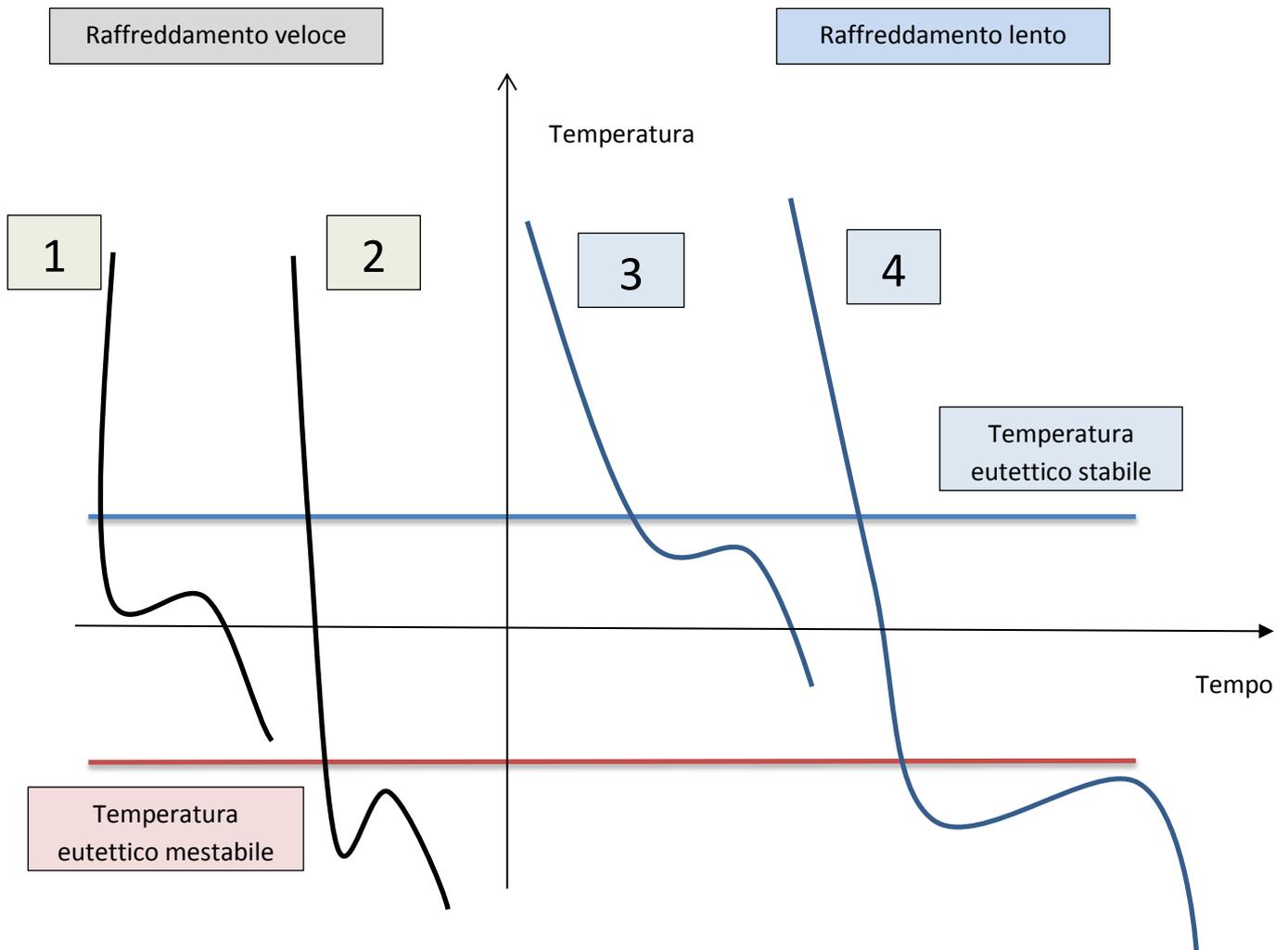
La qualità metallurgica di una parte di ghisa dipende dalla sua modalità di solidificazione, che può essere modificata mediante inoculazione. Le curve di raffreddamento possono essere interpretate come segue:



Curva di raffreddamento di una ghisa inoculata

- S1: L'insorgenza di solidificazione.
- TL: (Temperatura di liquidus) Viene formata la prima fase solida. Per le ghise ipoeutettici, l'austenite precipita. Per le ghise ipereutettici, precipita la grafite primaria. Differisce in base al% del silicio.
- S2: Comparsa della formazione di grafite
- TE stable : Temperatura di solidificazione dell' eutettica ferro-grafite .
- TE metastable : Temperatura di solidificazione dell' eutettica Fer-Cementite.
- TE min: Austenite e grafite continuano a crescere, l'inoculazione aumenta questa temperatura.
- Surfusion: (sottoraffreddamento) Austenite e grafite continuano a crescere, l'inoculazione aumenta questa temperatura.
- S3: (Recalescenza) Aumento della temperatura della lega durante il ciclo di raffreddamento.
- Tmax : Temperatura massima dell'eutettico. Determina la recalescenza : ($R = TE \text{ max} - TE \text{ min}$), influenza la grafitizzazione.
- S4: Secondo stadio di solidificazione. La formazione di microporosità è collegata a questa porzione della curva.

L'inoculazione modifica il profilo della curva di analisi termica in modo da aderire alla modalità di solidificazione stabile (grafica).



Per il raffreddamento rapido o lento, l'inoculazione aumenta le temperature di TE min. permettendo una modalità stabile di solidificazione (grafite).

1

Curva di raffreddamento rapido di una ghisa inoculata. TE min. > TE metastabile, favorendo l'aspetto di una ghisa grigia. Alta concentrazione dei nuclei.

2

Curva di raffreddamento rapido di ghisa non inoculata. TE min. <TE metastabile, favorendo l'aspetto di una ghisa bianca. Bassa concentrazione dei nuclei

3

Identica alla precedente ma inoculata, la struttura è interamente grafitea. Alte concentrazioni dei nuclei

4

Per un pezzo spesso, curva di raffreddamento lento di ghisa non inoculata. Si ottiene una miscela di strutture grafite / carburizzate. Bassa concentrazione dei nuclei

3. Confronto fra risultati delle prove e la Normativa UNI_EN_1563

Al capitolo VIII -4 sono stati elencati i valori dei parametri caratteristiche della ghisa SSF specificati dalla Normativa UNI_EN_1563 in questo paragrafo faremo un paragone fra i risultati delle prove eseguite sui campioni provenienti dai getti di O/Cava Meccanica elencati sopra (Paragrafo IX) e le specificazioni di questa Norma UNI_EN_1563. Lavoriamo sui campioni di ghise EN-GSJ-500-14 di tipo *Test pieces machined from cast samples* con spessore rilevante inferiore al 30 mm.

Prova I-1

Composizione chimica

	C	Si	Mg	Mn	P	S
I-1 %	2.88	3.94	0.061	0.283	0.004	0.009
Norma % approssimativa	----	3.80		Max 0.5	Max 0.05	

Nota: Rispetto della norma

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
I-1	532	440.1	10.2
Norma valore Min	500	400	14

Nota: NON rispetto della norma (Allungamento a rottura)

Struttura della grafite: non conforma presenza grafite chunky

Prova I-2:

Composizione chimica

	C	Si	Mg	Mn	P	S
I-2 %	3.04	4.04	0.044	0.287	0.02	0.009
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: Rispetto della norma

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
I-2	534.3	441.7	8.68
Norma valore Min	500	400	14

Nota: NON rispetto della norma (Allungamento a rottura)

Struttura della grafite: non **conforma e presenza grafite chunky**

Prova II-1:

Composizione chimica

	C	Si	Mg	Mn	P	S
II -1 %	2.82	3.84	0.063	0.264	0.019	
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: Rispetto della norma

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
II-1	505.5	412.6	9.23
Norma valore Min	500	400	14

Nota: NON rispetto della norma (Allungamento a rottura)

Struttura della grafite: **NON conforma e presenza grafite chunky**

Prova II-2

	C	Si	Mg	Mn	P	S
II-2	2.99	3.95	0.057	0.258	0.019	0.018
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: Rispetto della norma

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
II-2	526.2	412.6	7,84
Norma valore Min	500	400	14

Nota: NON rispetto della norma (Allungamento a rottura)

Struttura della grafite: **NON conforma e presenza grafite chunky**

Prova III-1

	C	Si	Mg	Mn	P	S
III-1 %	2.58	3.81	0.056	0.224	0.026	0.008
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: **rispetto della norma**

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
III-1	569.3 Mpa	463.2 MPa	15.7%
Norma valore Min	500	400	14

Nota: rispetto della norma

Struttura della grafite: **NON conforma e presenza grafite chunky**

Prova III-2

	C	Si	Mg	Mn	P	S
III-2 %	2.65	4	0.063	0.22	0.025	0.009
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: **Rispetto della norma**

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
III-2	604.4 Mpa	494.9	15.8%
Norma valore Min	500	400	14

Nota: rispetto della norma

Struttura della grafite: **NON conforma e presenza grafite chunky**

Prova IV-1

	C	Si	Mg	Mn	P	S
IV-1 %	2.88	4.08	0.061	0.28	0.033	0.016
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: **Rispetto della norma**

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
IV-1	529.2	418.6	13.7%
Norma valore Min	500	400	14

Nota: **NON** rispetto della norma (Allungamento a rottura)

Struttura della grafite: **NON** conforma e presenza grafite chunky

Prova IV-2

	C	Si	Mg	Mn	P	S
IV-2 %	2.77	4.10	0.056	0.277	0.032	0.009
Norma % approssimativa	----	3.80	0.3	Max 0.5	Max 0.05	----

Nota: rispetto della norma

Caratteristiche meccaniche

	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A%
IV-2	547	441.7	15.1
Norma valore Min	500	400	14

Nota: rispetto della norma

Struttura della grafite: **NON** conforma e presenza grafite chunky

Il confronto dei dati mostra che la prova IV-2 rispetta completamente la Normativa UNI_EN_1563. Sapendo in anticipo che le condizioni operative di colata sono controllate nello stesso modo per ogni tipi di prova, sono state messo in evidenza attraverso diverse pratiche d'inoculazione variando il modo d'inoculare e gli inoculanti scelti. In seguito, saranno presentate le tecniche d'inoculazione delle prove e sarà messo in evidenza quella ottimale che ha dato i risultati osservati alla prova IV-2.

A. Relazione Microstruttura – sferoidizzazione e inoculazione – caratteristiche meccaniche

Nel processo industriale di O/Cava Meccanica la fase di sferoidazione e d'incolazione eseguita in siviera (Fig 40) sono di un'importanza notevole per assicurare la qualità dei getti prodotti. Per le ghise sferoidale il successo della sferoidazione dipende del processo di gestione del magnesio

residuo dunque, della quantità ottimale di lega FeSiMg introdotto in siviera per ottenere un percento di Mg residuo sopra 0.03%.

Processo di gestione del magnesio residuo

- la percentuale minima di Mg residuo nella ghisa necessaria ad assicurare una buona sferoidizzazione è 0.03% in peso; normalmente in produzione oscilla fra 0.03 e 0.07%
 - La quantità minima di lega FeSiMg da introdurre per ciascun trattamento viene dapprima determinata approssimativamente mediante calcolo seguente. Come esempio di calcolo:
 - 2000kg di ghisa per ogni siviera di trattamento
 - 8% di Mg per ciascun kg di lega sferoidizzante (=0.08kg/kg)
- ⇒ $(2000 \cdot 0.03 / 100) = 0.6 \text{kg}$ di Mg per trattamento
- ⇒ $0.6 / 0.08 = 7.5 \text{kg}$ di lega TEORICI minimi per garantire 0.03% di Mg nel bagno.

Tale valore deve però essere aumentato per tenere conto di:

- un certo rendimento <1 del magnesio introdotto, che in buona parte volatilizza ossidandosi durante la reazione esotermica
- il decadimento del magnesio residuo nel bagno fuso durante la colata, che via via si ossida e si riduce quindi in percentuale.

A tale scopo, il tenore minimo di Mg residuo nel bagno di 0.03% deve essere garantito sull'ULTIMO PEZZO COLATO da quel trattamento in siviera; il tempo max ammesso dall'inizio del trattamento di nodularizzazione alla fine della colata dell'ultimo pezzo è di 12 MINUTI; in genere entro tale tempo la caduta di temperatura è molto più rapida della discesa del magnesio, quindi ad esempio a 15 minuti un pezzo avrebbe ancora teoricamente una quantità di Mg conforme, ma una temperatura troppo bassa per poter essere colato correttamente.

Su base sperimentale, quindi, la quantità di lega FeSiMg introdotta in ciascuno trattamento viene corretta in maniera adeguata a garantire le caratteristiche richieste (tipicamente, da 17 a 19kg per 2000kg di ghisa)

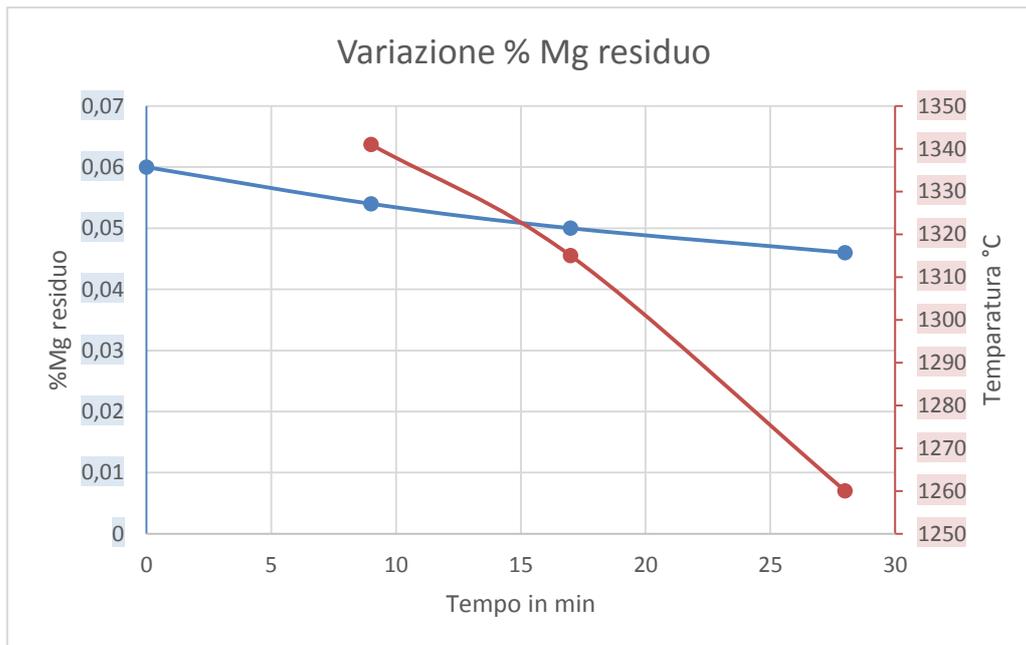


Figura 40 : Siviera di trattamento di sferoidizzazione e di pre-inoculazione



Figura 41 : Lega inoculante

La temperatura d'inizio colata è circa 1380 °C e il tenore di magnesio residuo a questa temperatura deve essere superiore al 0.03 % per assicurare una sferoidizzazione ottimale dei getti. Come è stato enunciato il percento di magnesio residuo diminuisce con il tempo. Allora il processo di fonderia di O/Cava meccanica ha mostrato un percento di magnesio superiore alla soglia (0.03%) anche al di sotto della temperatura di colata durante un tempo di 28 min, assicurando una qualità ottimale di sferoidizzazione. Il grafico seguente mostra l'andamento del percento del magnesio residuo con il tempo



Processo di gestione dell'inoculazione

Il processo d'inoculazione standard per le ghise sferoidali convenzionale si è rivelato non adeguato alle ghise sferoidali SSF. Ciò è dovuto alla composizione chimica diversa in generale e in particolare il tenore di silicio alto (compreso fra 3,5 – 4 %) delle ghise SSF che causa una tendenza alla segregazione della grafite chunky e alla porosità, soprattutto nei getti spessi. Usando le tecniche e gli inoculanti usuali non è stato possibile eliminare la segregazione importante della grafite chunky. Al contrario abbiamo notato che la presenza di alcuni elementi chimici nei inoculanti usuali favorisce la segregazione di questa forma di grafite esempio il (Cerio; terre rare). A causa della complessità delle reazioni metallurgiche associate al processo d'inoculazione e alla pratica di fonderia specifica a O Cava, la ricerca degli inoculanti e di un processo d'inoculazione adeguato ai getti in ghise SSF si è eseguita in modo empirico. Una serie di prove è stata compiuta cambiando il processo di inoculazione e gli inoculanti.

Gli inoculanti e le tecniche d'inoculazione usati per diverse prove sono elencati in allegato 3 e dopo osservazione notiamo che l'inoculazione per cui si ottiene una microstruttura adeguata è la prova IV. Gli inoculanti usati per questa prova sono: MTI 630 (6% di Magnesio; 3 % di Calcio e 0 % di terre rare) e FeSiBiRe. Dobbiamo precisare che la combinazione dell'inoculazione in siviera con quello in flusso è stata determinante per ottenere questo risultato. Ci siamo basati sulle migliorazioni successive notate passo a passo sulle prove precedenti. La presenza della grafite chunky ha un'incidenza diretta sulle caratteristiche meccaniche e più marcata sull'allungamento a rottura.

4. Discussione passo inoculazione

L'inoculazione è senza dubbio di un'importanza capitale per il processo produttivo della ghisa sferoidale SSF. Una buona inoculazione rassicura una microstruttura finale adeguata e di conseguenza le proprietà ottimali. Quando questo passo è eseguito bene abbiamo un controllo sul numero di noduli; sulla riduzione o l'eliminazione dei carburi per poter ottenere le caratteristiche specifiche alle ghise duttili SSF. (buona lavorabilità, resistenza). Il controllo globale della composizione chimica, il trattamento alla lega di magnesio sono significativi per ottenere una struttura della grafite desiderata. Tuttavia, il passo d'inoculazione rimane il più importante. La

necessità dell'inoculazione è anche dovuto alla tendenza di tempra delle ghise con tenore bassa di zolfo e dell'aggiunto di magnesio e della presenza del cerio che aumenta il sotto raffreddamento e favorisce la segregazione di una quantità non desiderata di carburi. L'inoculazione permette di ottenere nuclei aggiuntivi per amplificare la precipitazione della grafite. Ciò consente di attenuare il fenomeno di sotto raffreddamento e la formazione dei carburi. Ci sono molti problemi risolti con un'inoculazione efficace:

1. La degenerazione della forma dei noduli di grafite è causata dalla dissoluzione del magnesio e anche dell'inoculante. Un aggiunto leggero di inoculante permette di restituire la forma dei noduli e favorisce l'accrescimento. È per questo che dopo l'inoculazione in siviera con la MTI 630 abbiamo associato un'inoculazione in flusso con l'inoculante FeSiBiRe.
2. La segregazione di carburi nella ghisa FFS è causata da una tecnica non adeguata d'inoculazione o per la dissoluzione dell'inoculante. Anche una regolazione della velocità di raffreddamento è un contributo per risolvere il problema.
3. Un tenore eccessivo di Ce (cerio) o di magnesio può provocare un aumento di segregazione di carburi e soprattutto la degenerazione della forma della grafite. Per risolvere questo problema abbiamo aumentato la quantità di inoculanti e l'efficacia dell'inoculazione.
4. Abbiamo anche ridotto la temperatura di colata per rendere più efficace l'inoculazione, riducendo la dissoluzione dell'inoculante.
5. Specificamente al grado di ghise SSF abbiamo usato un inoculante con un tenore più alto di Bismuto e di Calcio, un tenore ridotto (inferiore al 1%) di terre rare e di cerio (Ce).

Un'ulteriore osservazione al microscopio ottico non ha dato informazioni in più sfruttabili per capire come è stato impedito la segregazione della grafite chunky.

X. Conclusione

Come noti, i risultati dell'analisi microscopica ottica di tre campioni (I; II; III) delle prove sperimentali di GJS-500-14 mostrano una matrice di ferrite dominante con i segni evidenti di degenerazione della grafite, confermando il fatto che l'inoculazione non è efficace. Si stima che il contenuto di perlite nella matrice sia inferiore al 5% ammissibile nella ghisa SSF, come specificato nella EN 1563.

Il caso della prova IV mostra un numero maggiore di noduli, e una buona nodularità (morfologia della grafite) con una assenza della grafite chunky, cioè è collegato al migliore allungamento osservato nelle ghise GS-500-14 standardizzato. Rispetto ai gradi di ghise duttile convenzionale, i gradi SSF, con l'elevato tenore di Si, sono stati collegati alla tendenza di segregazione della grafite chunky dovuto alla grande formazione di siti di nucleazione eterogenei. Il passo d'inoculazione è adeguato a ridurre al minimo o annullare la segregazione della grafite chunky usando inoculanti e tecnica d'inoculazione adeguata. La scelta del processo d'inoculazione è collegato ai fattori importanti come: la qualità del rottame; la composizione chimica a diversi passi del processo produttivo; del tempo di permanenza in siviera prima della colata; della velocità di raffreddamento del metallo fuso; della geometria del pezzo prodotto. Tenendo conto di tutti

questi parametri specifici al processo metallurgico dell'azienda O/Cava abbiamo ritenuto ottimale come tecnica d'inoculazione, una combinazione d'inoculazione in siviera e in flusso.

- Inoculazione in siviera con lega 630 (MTI): 6% di Magnesio; 3% di calcio; 0% terra rare
- Inoculazione in siviera con lega FeSiBiRe di granulometria (2 - 7 mm) (*inoculante Pagina 65*)
- Inoculazione in flusso con lega FeSiBiRe di granulometria (0,2 - 0,7 mm) (*tavola inoculante Pagina 65*)

Nonostante l'uso di un metodo empirico per aver questo risultato, abbiamo ottenuto la risoluzione del problema della segregazione della grafite Chunky e raggiunto così le specificazioni della Norma UNI EN 1563.

Generalmente, mentre i risultati derivati dalle prove soddisfano gli obiettivi previsti del lavoro di tesi, rimangono ancora importanti questioni relative all'uso delle proporzioni esatte d'inoculante al variare della qualità del rottame che rimane senza risposta. Le prove sui getti e le prove meccaniche riguardano solo proprietà meccaniche statiche e metallografiche. Le proprietà meccaniche cicliche o dinamiche non sono incluse nelle prove perché le proprietà primarie essenziali per la caratterizzazione delle ghise sono soddisfatte da solo analisi delle proprietà statiche. Un approccio diverso richiederebbe studi estesi eseguiti in un altro campo di studio, relativi alla fisica dei materiali e i calcoli termodinamici appropriati alla diffusione e alla formazione dei carburi. Inoltre, l'analisi al SEM e il comportamento del materiale a temperature elevate sarebbe anche un approccio adeguata a fare uno studio approfondito dell'effetto degli inoculati a ridurre la segregazione della grafite chunky.

XI. Riferimenti bibliografici

- 1- Standard E. NORM FprEN 1563:2011, founding - spheroidal graphite cast irons. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. 2011; ICS 77.080.10.
- 2- Wiley J. Fundamentals of materials science and engineering an interactive. .
file:///C:/Users/pachoskie/Desktop/HiSi/Ci/Callister - Fundamentals of Materials Science and Engineering 5e HQ.pdf. Accessed 2/5/2015 5:12:34 A
- 3- RTZ Iron and Titanium America. A design engineer's digest of ductile iron - the cast iron of the past, present and future. Sorel Metal.; Ductile iron marketing group digests (8th Edition).
- 4- UNI EN ISO 945 EUROPEAN STANDARD 1975
- 5- https://it.wikipedia.org/wiki/Ghisa_duttile
- 6- https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/17814/master_Okunnu_Rilwan_2015.pdf?sequence=2
- 7- <http://bomet.fci.unibo.it/didattica/sambogna/CLASSIF%20GHISE%20m3%20LTChIn.pdf>
- 8- . Prihti T. Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion. [Msc]. Tampere university of technology; 2011

- 9- dottorato di ricerca in ingegneria civile e meccanica xix ciclo caratterizzazione microstrutturale e comportamento meccanico delle ghise sferoidali Ornella Di Bartolomeo 2005-2006 università degli studi di cassino
- 10- Rio Tinto et Iron Sorelmetal novembre 2014
- 11- Componenta Dokum A.S. EN1563 - new generation ductile irons. 7th International Ankiros Foundry congress. 2014;1(1):1-55
- 12- Stets W, Lablich H, Giebereitechnik I, Gassner G, Schumacher P. Solution strengthened ferritic ductile cast irons- properties, production and application. . 2013;18(2).
- 13- Lin H, Lui T, Chen L. Effect of silicon content on intergranular embrittlement of ferritic spheroidal graphite cast iron suffered from cyclic heating. Materials Transactions. 2003;44(1):173-180.
- 14- Alhussein a, Risbet M, Bastien a, Chobaut JP, Balloy D, Favergeon J. Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron. Materials Science and Engineering: A. 2014; 605:222-228.
- 15- Källbom, R. K Hamberg, L-E Björkegren. Chunky graphite in ductile iron castings. World foundry conference. 2006
- 16- Källbom R, Hamberg K, Wesslén M, Björkegren L-. On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite. Materials Science and Engineering: A. 2005;413-414:346-351.
- 17- Larker R, Ab I, Vindeln S-. Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083 / JS / 500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators. . 2009.
- 18- Duit B. EN 1563: New generation ductile irons (solid solution strengthened ductile irons). . 2012.
- 19- Serrallach J, Lacaze J, Sertucha J, Suárez R, Monzó A. Effect of selected alloying elements on mechanical properties of pearlitic nodular cast irons. Key Eng Mat. 2010; 457:361-366.
- 20- Källbom, R. K Hamberg, L-E Björkegren. Chunky graphite in ductile iron castings. World foundry conference. 2006.
- 21- Gonzaga RA. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. Materials Science and Engineering: A. 2013; 567:1-8
- 22- Gonzaga RA, Carrasquilla JF. Influence of an appropriate balance of the alloying elements on microstructure and on mechanical properties of nodular cast iron. J Mater Process Technol. 2005;162-163:293-297.
- 23- Serrallach J, Lacaze J, Sertucha J, Suárez R, Monzó A. Effect of selected alloying elements on mechanical properties of pearlitic nodular cast irons. Key Eng Mat. 2010; 457:361-366.
- 24- Riposan I, Chisamera M, Stan S. Influencing factors on as-cast and heat treated 40018 ductile iron grade characteristics. . 2007;4(4):6-9.
- 25- Fonderia Getti di ghisa a grafite sferoidale UNI EN 1563 Licence O/Cava Meccanica
- 26- http://www.sorelmetal.com/fr/publi/PDF/115_FR.pdf
- 27- http://www.sorelmetal.com/fr/publi/PDF/115_FR.pdf
- 28- Emanuele Savini FONDERIA novembre 2011
- 29- Emanuele Savini FONDERIA marzo 2012

Ringraziamenti

Con queste ultime, brevi righe intendo ringraziare le persone che mi hanno guidato durante il periodo di studio e scrittura di questo elaborato finale. Un primo ringraziamento va al prof. Mario Rosso, relatore di questa tesi, per tutti il sostegno e i consigli che mi ha dato, per avermi permesso di lavorare sull'argomento che mi interessa e per la sua disponibilità ad aiutarmi sempre, in modo preciso e attento. Un grazie particolare alla Dott.ssa Ildiko Peter che è state, per me, preziosa fonte di motivazione e ispirazione per il lavoro svolto in questi ultimi giorni. Un grazie particolare anche all' Ing. Daniele Manuele che mi ha accolto nell' azienda O/Cava Meccanica e mi ha seguito durante tutto questa collaborazione tesi.