



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI PROCESSI CHIMICI DELL'INGEGNERIA

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

(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Processi Industriali)

**IL PROCESSO DI PRODUZIONE DI MANUFATTI IN GHISA
SFEROIDALE E I CONTROLLI DI QUALITÀ**

Relatore: Dott. Manuele Dabalà

Laureando: SHEFQET MIROFCI

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 LA TECNOLOGIA DI PRODUZIONE	3
1.1 La carica dei forni	3
1.1.1 Le correzioni	4
1.2 La Sferoidizzazione	5
1.2.1 Sferoidizzazione in siviera	6
1.3 L’Inoculazione	6
1.4 La colata	8
1.4.1 La siviera di colata	8
1.5 Il Ciclo di Produzione	9
CAPITOLO 2 I CONTROLLI DI QUALITÀ	13
2.1 Laboratorio Prove Materiali	13
2.1.1 Prove Meccaniche	16
2.2 Collaudo	20
CAPITOLO 3 ANALISI DEI DIFETTI	23
3.1 I difetti principali	23
3.1.1 La flottazione di grafite	23
3.1.2 Chunky graphite	24
3.1.3 Punte di spillo (pinholes).....	25
3.1.4 Dross o inclusioni non metalliche	25
3.1.3.1 Il meccanismo di formazione dei dross	26
3.2 Analisi di un caso di presenza di dross	28
3.2.1 Prevenzione	30
CONCLUSIONI	33
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	35

Introduzione

Dalla scoperta della ghisa sferoidale nel 1940 e dalla sua introduzione nell'industria nel 1948, molti materiali e metodi sono stati provati e adottati o rifiutati dai fonditori, e ancora oggi non si può affermare di aver trovato il processo di sferoidizzazione ideale per ogni tipo di produzione, caratterizzato da basso costo, semplicità operativa e sicurezza di risultati.

In questa Tesi di laurea triennale si è voluto pertanto approfondire lo studio del processo di produzione della ghisa sferoidale a partire dalla fusione del materiale, il processo di sferoidizzazione e i controlli che vengono effettuati per garantire la qualità del prodotto.

Il progetto di formazione si è svolto presso l'azienda "Zanardifonderie SpA", un'azienda che svolge l'attività di fonderia dal 1931 e che oggi ha una produzione prevalente di ghisa sferoidale e ghisa sferoidale austemperata (di cui è stata tra le prime industrie introduttrici d'Europa nel 1984), che di conseguenza si desidera ringraziare per l'opportunità data e per l'ospitalità mostrata.

Si sono analizzati, pertanto, le diverse fasi dei processi e l'influenza delle variabili operative principali sulla qualità del prodotto mediante l'osservazione delle principali rilevazioni in linea e di test eseguiti in laboratorio dell'azienda e anche presso l'Università.

La Tesi è strutturata in tre capitoli in ognuno dei quali si approfondiranno gli argomenti sopra citati.

Nel primo capitolo ci si è concentrati sulla tecnologia di produzione. Si sono analizzati le diverse fasi del processo produttivo, a partire dalla preparazione della ghisa base con la carica dei forni e le correzioni da effettuare per ottenere il prodotto desiderato, passando dalla sferoidizzazione eseguita in siviera all'inoculazione alla colata. Si è riportato inoltre la rappresentazione del ciclo produttivo all'interno dell'azienda con una breve descrizione dei vari reparti attraversati dai prodotti.

Nel secondo capitolo ci si è invece soffermati sui controlli di qualità. All'interno dell'azienda vengono sostanzialmente divisi in prove distruttive e non in riferimento al getto analizzato. Si parla principalmente delle prove meccaniche eseguite in laboratorio per le prime e in prevalenza per le prove eseguite in sede di collaudo finale per le seconde.

Nel terzo capitolo si sono analizzati i difetti principali che interessano maggiormente la produzione di getti in ghisa sferoidale. Durante lo svolgimento del progetto di formazione in fonderia si è verificato un caso di presenza fuori norma di inclusioni non metalliche (*dross*) sulla superficie del getto che ha portato allo scarto di esso, si è ritenuto interessante quindi riportare una dettagliata esposizione sul problema, le teorie sulla sua formazione e i modi più efficaci di prevenzione oggi maggiormente utilizzati.

Capitolo 1

La tecnologia di produzione

La produzione di ghisa sferoidale comporta la preparazione di una ghisa base ai forni la cui temperatura e composizione chimica vengono tenuti costantemente sotto osservazione. Una parte di essa viene spillata in una siviera precedentemente caricata con le opportune leghe di magnesio dove avviene la sferoidizzazione. Si passa quindi all'inoculazione per controllare la distribuzione della grafite e successivamente alla colata.

1.1 La carica dei forni

La produzione di ghisa sferoidale consente di ottenere getti con caratteristiche meccaniche allo stato *as-cast*. La matrice della ghisa sferoidale *as-cast* potrà essere ferritica, ferritico-perlitica, perlitica o aciculare in relazione alla velocità di raffreddamento dopo la solidificazione e alla presenza di elementi di lega. Le scelte della composizione della ghisa base e di conseguenza quella del tipo di forno sono quindi determinanti per ottenere i prodotti desiderati.

La ghisa base per sferoidale può essere prodotta da vari tipi di forni (cubilotti, forni elettrici ad arco o ad induzione), ognuno dei quali presenta dei vantaggi o svantaggi in relazione a vari fattori, quali il tonnellaggio richiesto, le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche dei getti da produrre, i metodi di sferoidizzazione usati, il capitale a disposizione, la disponibilità di materie prime e energia, le richieste ecologiche. Ad ogni modo nella scelta del mezzo fusorio si devono solitamente tener presenti due aspetti fondamentali: le caratteristiche operative del mezzo fusorio e le considerazioni di carattere analitico della ghisa base prodotta. Si ricorda inoltre l'influenza delle concentrazioni degli elementi principali costituenti la ghisa base. La percentuale di carbonio in una ghisa sferoidale può essere compresa tra il 3 e 4%, esso influenza le proprietà meccaniche, per una ghisa con buona scorrevolezza, basso ritiro ed elevato numero di noduli si può mantenere una percentuale finale tra 3.6 e 3.8%. Il manganese è un elemento di lega stabilizzante della perlite, per avere quindi la massima duttilità (matrice ferritica) il contenuto di Mn deve essere basso (0.15-0.20%). Il fosforo deve essere presenti in basse percentuali (<0.08) altrimenti diminuirebbe la resistenza all'urto. Il silicio in generale finale di una ghisa sferoidale è compreso tra il 2-3%, aumentando la sua presenza si riduce la resistenza all'urto. Il carbonio equivalente, calcolato come

$0.3 * (\%C + \%Si)$, può variare fra 4.3 – 4.7% a seconda dello spessore dei getti, sarà più alto a spessori minori (per evitare la flottazione della grafite gli spessori minori si raffreddano più velocemente). La percentuale di zolfo deve essere la più bassa (intorno allo 0.01%) in quanto reagirebbe con il magnesio disturbando il processo di sferoidizzazione successivo. Per quanto riguarda gli altri elementi influenti il materiale di carica deve essere scelto con cura onde evitare di introdurre nel forno elementi che possono ostacolare il processo di sferoidizzazione (Pb, Bi, Sb, Al, Ti, Se, Te) o favorire la formazione di carburi (Sn, As, Bi, Cr, Cu) o comunque interferire con l'ottenimento delle caratteristiche richieste dei getti.

L'azienda su cui si è svolto il progetto di formazione utilizza per la preparazione di ghisa base tre forni elettrici a induzione dalla capacità di 28 tonnellate e dalla potenza di 33000kVA, le temperature di lavoro sono superiori a 1450°C. L'utilizzo di questo tipo di forno presenta molte caratteristiche vantaggiose. Non ci sono limiti teorici alla temperatura raggiungibile, inoltre la composizione del bagno può essere controllata con cura a partire dalla carica.

Il caricamento dei forni fusori avviene meccanicamente attraverso un'elettrocalamita che carica il materiale su un nastro trasportatore a piano vibrante. I materiali di carica sono principalmente costituiti da ghisa in pani, ferro lamierino, boccame. La ghisa in pani, proveniente direttamente dall'altoforno, presenta generalmente un basso contenuto di elementi indesiderati, ha un'elevata percentuale di carbonio ed è quindi molto rilevante nei materiali di carica. L'apporto di ferro alla composizione è data dalla carica in forno di ferro lamierino. L'aggiunta inoltre di boccame, ritorni di getti di ghisa sferoidale fuori norma e indesiderati, dello stesso tipo dei getti che si vogliono produrre è molto importante per raggiungere e non alterare la composizione desiderata nel forno.

1.1.1 Le correzioni

Prima del trattamento di sferoidizzazione si controlla sempre la temperatura della ghisa base per poterla eventualmente correggere per adeguarla al tipo di getto da colare, tenendo presente le inevitabili perdite di temperatura (circa 50-60 °C) che comporta il processo di sferoidizzazione, la post-inoculazione e il trasporto per recarsi al posto di colata. Di norma si cerca di evitare temperature di spillata troppo alte perché comportano una perdita eccessiva di magnesio e di conseguenza la formazione di grafite non sferoidale, come temperature troppo basse in quanto comportano l'aumento di magnesio residuo con conseguente formazione di scorie. I mezzi che si usano per la determinazione della temperatura della ghisa base, sono i pirometri a immersione: sostanzialmente delle termocoppie che operando sotto la superficie del bagno danno risultati soddisfacenti in quanto non influenzati da fumi o strati superficiali del bagno.

Oltre alla temperatura anche la composizione analitica della ghisa base potrà eventualmente subire delle correzioni per avere in definitiva la composizione adeguata alla ricetta dei getti. Con l'impiego di materie prime selezionate esenti da elementi che possono interferire con la

sferoidizzazione o promuovere carburi, la correzione analitica della ghisa base interesserà principalmente il carbonio e il silicio. Se questi sono in eccesso la loro riduzione sarà fatta con aggiunte di ferro, mentre, se risultano in difetto, si dovranno apportare correzioni con operazioni di carburazione, aggiunta di sacchi di grafite, SiC o con addizione di Fe-Si.

Dal forno si devono eliminare le scorie, l'operazione è eseguita aggiungendo della sabbia al bagno di modo da far coalescere le scorie così da poterle rimuovere facilmente attraverso le operazioni di scorificazione. La scorificazione consiste sostanzialmente nel passare un'asta di acciaio in cima alla quale è fissata una paletta anche essa in acciaio sul bagno di ghisa rimuovendo le scorie che galleggiano.

1.2 La Sferoidizzazione

L'aggiunta dell'agente sferoidizzante alla ghisa base per sferoidale rappresenta la fase più importante del processo produttivo. Sebbene sperimentalmente si siano impiegati con successo cerio, ittrio e altri elementi, per ragioni economiche e di disponibilità a livello industriale si impiega quasi esclusivamente il magnesio in forme elementari (filo, polvere, graniglia) o in lega con Si, Fe, Ni, Cu.

Il magnesio è caratterizzato da un basso peso specifico (1.74) e da un basso punto di ebollizione (1107°C) per cui l'aggiunta di Mg puro ai bagni di ghisa è inefficace, in quanto esso galleggia in superficie e evaporando brucia senza dare alcuna azione, inoltre può essere pericoloso, se è sommerso nel bagno i grandi quantitativi di vapore possono provocare violente agitazione nel bagno. Risulta quindi molto più conveniente impiegare il Mg in lega con elementi che ne aumentano il peso specifico e innalzano il punto di ebollizione. Le leghe più usate sono FeSiMg e NiMg.

Il contenuto minimo di Mg attivo in un getto per sferoidizzare la grafite è compreso fra lo 0.03-0.05%. In ogni caso la quantità di Mg da aggiungere ai bagni di ghisa dipende dalla resa del Mg, che dipende da molti fattori quali: tipo di lega impiegata, temperatura della ghisa da trattare, altezza del bagno nella siviera di trattamento, metodo di trattamento e tempo di attesa (a 1480°C le perdite di Mg sono dello 0.001% per minuto).

Per calcolare le quantità di Mg o di lega con Mg, necessaria per la sferoidizzazione della grafite, esistono delle formule empiriche, se ne riporta una:

$$\text{Mg da aggiungere(\%)} = \frac{\text{Mg desiderato(\%)}}{\text{Resa(\%)} * 0.01} + \text{S base(\%)} \quad (1.1)$$

Nel caso di Mg in lega il risultato dovrà essere rapportato alla percentuale con cui il Mg è presente in lega. Anche per il calcolo della resa, necessario se si vuole impiegare la giusta quantità di Mg ed evitare sprechi, esiste una formula empirica:

$$\text{Resa Mg (\%)} = \frac{\text{Mg residuo (\%)} + 0.76 \text{Si iniziale (\%)}}{\text{Mg aggiunto}} * 100 \quad (1.2)$$

I metodi di sferoidizzazione usati industrialmente sono numerosi e vari, in siviera aperta o chiusa, per immersione, in camera a pressione, con iniezione di magnesio solo per citare i più ricorrenti. La scelta di impiegare uno piuttosto di un altro è funzione di diversi fattori quali : la quantità di ghisa da trattare, il tempo di ciclo del metodo e il tempo di attesa che intercorre tra sferoidizzazione e colata, la ghisa base e quindi il mezzo fusorio , la caduta di temperatura nel trattamento di sferoidizzazione, e poi senza dubbio i costi, la riproducibilità e le limitazioni ambientali.

1.2.1 Sferoidizzazione in siviera

Nell'azienda dove si è svolto il progetto di formazione la sferoidizzazione si esegue in siviera. Le siviere di trattamento hanno la capacità di due tonnellate e sono collegate ad un sistema mobile automatizzato. Sono rivestite internamente da materiali refrattari neutri o basici del tipo Al_2O_3 e MgO che non reagiscono con il magnesio, la forma classica cilindrica della siviera presenta al fondo una divisione interna in due settori ("tasche").

In base al tipo di getti da produrre e alla composizione analitica della ghisa base appositamente preparata nei forni la siviera viene caricata con le leghe, contenute in 14 tramogge, che si sistemano in una delle due tasche di fondo. Pezzature minori di lega favoriscono meglio il contatto e quindi la reazione che avviene in seguito con il la ghisa base, aumentando la resa del magnesio. Una volta che si è pertanto controllata la temperatura e la composizione dei forni, nella siviera, dove si erano caricate le leghe, viene versata la ghisa base spillata dal forno che va a sommergere completamente le leghe. Quindi si chiude il coperchio della siviera lasciando che i vapori di magnesio reagiscano con la grafite, senza pericolo quindi di una reazione troppo violenta.

La siviera viene quindi trasportata in direzione della colata prima della quale però la ghisa dovrà attraversare una nuova fase: l'inoculazione.

1.3 L'Inoculazione

L'aggiunta di un agente inoculante efficace prima della colata comporta l'innalzamento della temperatura dell'eutettico stabile e l'abbassamento di quello invece metastabile, diminuendo quindi il pericolo di far precipitare carburi. L'aggiunta per esempio di 2% di Si a una lega Fe-C provoca l'allargamento della differenza delle due temperature dai 6°C iniziali (1153-1147°C) a 40°C. Si può capire quindi l'importanza di questa fase per la produzione di ghisa sferoidale che vuole avere la solidificazione dell'eutettico stabile.

L'altro aspetto molto rilevante su cui agisce l'inoculazione è il grado di nucleazione, quando non è possibile avere un elevato grado di nucleazione endogena si interviene con la nucleazione esogena (inoculazione): occorre quindi conoscere la natura dei nuclei che favoriscono la formazione dell'eutettico stabile. Lo zolfo ha una funzione abbastanza determinante sulla nucleazione in quanto al crescere del suo contenuto aumenta il numero delle celle eutettiche, inoltre è noto che in totale assenza di zolfo il Fe-Si, che è l'inoculante più diffuso, non ha alcun effetto inoculante. Il manganese invece ha un effetto negativo in quanto inibisce la nucleazione. Anche il titanio riduce notevolmente il numero dei nuclei. Aggiunte invece di Fe-Si (non purissimo ma con qualche impurità di Al, Ca) prima della colata aumentano il numero di nuclei.

Un aspetto caratteristico del trattamento di inoculazione è l'evanescenza con il trascorrere del tempo di attesa prima della colata. Nel caso di ghisa sferoidale si tiene particolarmente conto di questo fenomeno in quanto all'evanescenza della inoculazione si aggiunge anche quella del magnesio, tra i due trattamenti esistono iterazioni e l'evanescenza influenza la sferoidizzazione.

Per diminuire l'evanescenza invece di aggiungere l'inoculante prima della colata si può aggiungere direttamente nella corrente di colata oppure sia prima che dopo l'attesa. In figura 1.1 è rappresentato il momento in cui è effettuata l'inoculazione e la sua influenza sull'evanescenza dell'effetto sferoidizzante del Mg.

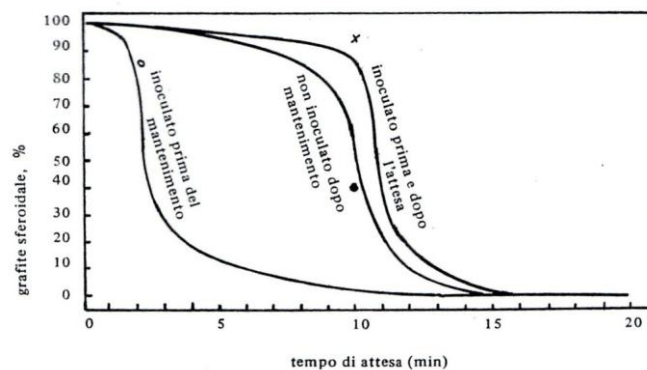


Figura 1.1 Effetto del momento in cui è stata eseguita l'inoculazione sulla evanescenza dell'efficacia sferoidizzante

Si vede che la percentuale di sferoidi diminuisce più rapidamente con una inoculazione prima dell'attesa che con una inoculazione dopo l'attesa. L'evanescenza dell'effetto sferoidizzante del Mg è più lenta nel caso della doppia inoculazione (prima e dopo l'attesa) rispetto alla inoculazione semplice (prima o dopo l'attesa).

Oltre al momento in cui avviene l'inoculazione è influenzata l'evanescenza anche la granulometria dell'inoculante. La percentuale di sferoidi diminuisce più lentamente con Fe-Si

in pezzi, ma l'effetto inoculante di Fe-Si granulare è migliore e ciò porta a preferirlo nella pratica.

Nell'azienda dove si è svolto il progetto di formazione si utilizza il metodo della "doppia" inoculazione. L'inoculante in polvere è caricato in due tramogge e viene aggiunto alla ghisa in due momenti successivi: la prima volta quando la ghisa dalla siviera di trattamento viene versata nella siviera di colata, prima del tempo di attesa, e la seconda viene aggiunto nella corrente di colata o nella forma stessa. Normalmente l'inoculante che si usa è il Fe-Si "sporcato" con Al e Ca, ma se si vuole accelerare il processo si utilizzano inoculanti in cui sono presenti anche elementi come Zr, Sr, Ba, che aumentano il numero di sferoidi ma sono pericolosi in quanto aumentano la tendenza alla solidificazione metastabile.

Quindi l'efficacia del trattamento con Mg è ripristinata in una certa misura da una successiva inoculazione di Fe-Si.

1.4 La colata

La ghisa dopo aver subito il trattamento di sferoidizzazione viene versata nella siviera di colata dove a seconda delle modalità precedentemente descritte subisce il trattamento di inoculazione per poter così essere pronta da colare sulle forme di sabbia. I parametri più importanti da considerare in questa fase sono certamente la velocità di colata e la temperatura. In genere la colata avviene a temperature dell'ordine di 1390-1415 °C, alle quali la tensione di vapore del magnesio è superiore alla pressione atmosferica per cui onde evitare che la forma sferoidale della grafite, soprattutto negli ultimi getti colati, degeneri a causa dell'evanescenza del magnesio bisogna colare nel minor tempo possibile di modo tale che il magnesio residuo sia sufficiente a sferoidizzare la grafite. La velocità della perdita di Mg è generalmente bassa (0.001% al minuto) anche se tende ad aumentare in rapporto diretto con la temperatura. Una colata con velocità basse favorisce l'ossidazione del magnesio o silicio presente nella ghisa liquida con conseguente formazione di scorie mentre una velocità troppo alta può causare sbavature o comunque interferenze con le forme di sabbia.

1.4.1 La siviera di colata

La siviera con cui avviene la colata nell'azienda è in camera di pressione, la ghisa da colare è posta in una siviera dentro una camera sotto pressione di un gas inerte.

Con questo metodo si opera nel modo seguente: all'arrivo della siviera di trattamento viene aperto il coperchio e viene versata la ghisa liquida nella siviera di colata; si chiude il coperchio in modo da formare un ambiente a tenuta di pressione; si evacua l'aria contenuta nella camera tramite una valvola; quindi si introduce l'azoto da una bombola esterna fino a raggiungere la pressione desiderata; si abbassa l'immergitoio nella ghisa e, agendo su un'elettrovalvola gli si fanno compiere diverse salite e discese per assicurare una buona

agitazione del bagno; quindi si riapre la valvola ristabilendo nella camera la pressione atmosferica e infine si può iniziare a colare i getti nelle forme (con previa inoculazione di Fe-Si come già precedentemente descritto).

Si riporta l'immagine di una siviera a camera di pressione: quella nella figura 1.2 prevede anche il trattamento di sferoidizzazione ma è comunque esemplificativa della siviera descritta in quanto mostra la valvola di sfiato, la camera a tenuta di pressione, la bombola di gas inerte

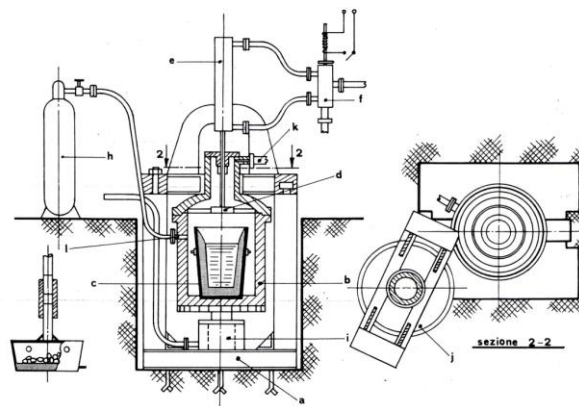


Figura 1.2 Siviera in camera di pressione di un gas inerte

La colata è controllata elettronicamente da un operatore situato in una cabina di controllo che deve valutare l'altezza del bagno, la pressione interna alla camera e quindi la velocità della corrente di colata, accertandosi sempre di colare alla giusta temperatura.

Le forme su cui avviene la colata provengono dal reparto di Formatura e prima ancora hanno attraversato altri reparti: si vuole quindi riportare una breve descrizione del ciclo di produzione della ZanardiFonderie SpA e dei vari reparti.

1.5 Il Ciclo di Produzione

Per capire l'organizzazione del ciclo di produzione dei getti in ghisa sferoidale si deve prima capire la funzione dei reparti che vengono attraversati durante questo percorso di produzione. I reparti principali che si analizzano sono quello di "Lavorazioni Terre", "Animisteria", "Formatura" e "Finitura".

Nel reparto Terre si svolgono due funzioni principali: vengono preparate e selezionate le terre che andranno al reparto Formatura e vengono rigenerate le terre dal ciclo di produzione. La terra generalmente in fonderia è costituita da una miscela di sabbia silicea e agglomerati (detti

leganti) che possono essere organici o inorganici. Le terre che andranno a costituire le forme su cui colare sono costituite al 65% di bentonite, 32% nero minerale e un 3% amido pregelatinizzato. Il reparto ha anche a disposizione un laboratorio dove vengono analizzate le composizioni, la temperatura, l'umidità delle terre. La terra eccedente dai vari impianti di formatura e distaffatura viene recuperata tramite tramogge negli impianti stessi ed inviata in questo reparto tramite nastri trasportatori ad un impianto di recupero dove viene deferizzata per eliminare il materiale ferroso rimasto, selezionata, sminuzzata ed infine rigenerata negli impianti di rigenerazione per essere di nuovo riutilizzata.

La forma viene ottenuta facendo pressare la terra nella staffa. Le staffe sono appositi telai in ferro, ghisa, o acciaio nei quali è introdotto il modello in alluminio e pressando la terra attorno a esso si ottiene la forma. La formatura è eseguita meccanicamente in un impianto automatico in cui la macchina formatrice è collegata ad un sistema di scorrimento automatico delle staffe fino alla colata. Inoltre è dotata di un sistema automatico di ribaltamento e di chiusura delle staffe: infatti vengono preparate due forme, la superiore e l'inferiore, nella prima si applica un foro per il canale di colata e nella seconda si inseriscono le anime se la forma prevede delle cavità interne.

Le anime vengono prodotte nel reparto di Animisteria. L'anima è una forma che riproduce esattamente le parti cave dell'oggetto che si vuole produrre. Essa si ottiene pressando la terra in un contenitore di metallo detto cassa d'anima nel quale sono previsti spazi vuoti in corrispondenza delle parti cave volute. Le anime vengono prodotte in apposite macchine automatiche dette spara anime dove la terra viene pressata nella cassa usando aria compressa. La terra è costituita nella maggior parte da sabbia di fonderia rigenerata (75%) con aggiunta di resine fenoliche e ammine che funzionano da catalizzatori. Una volta indurita l'anima viene estratta tramite appositi estrattori e verniciata con un intonaco refrattario. Nella successiva fase di ramolaggio l'anima viene rifinita, eventualmente pulita e inserita manualmente nella forma della staffa inferiore dopo che ha subito la pressatura, mentre nella staffa superiore si applica un foro per il canale di colata.

Le staffe accoppiate seguono quindi la linea automatizzata per andare alla colata. Dopo la colata le staffe vengono lasciate raffreddare facendo percorrere loro un percorso di 4 piani a temperatura ambiente fino a raggiungere 200-300°C.

Le staffe vengono condotte in tamburo rotante che ha la funzione di distaffatrice, le staffe vengono spaccate. All'uscita dal tamburo gli operatori raccolgono le anime, e anche le zolle di terra viene recuperata, i getti possono essere raggruppati e passare alle successive lavorazioni dei getti. I getti, dopo aver tolto le materozze, vengono ripuliti e lucidati attraverso la granigliatura o sabbiatura. Nella sabbiatura i getti liberati dalle materozze vengono investiti con un getto di sabbia abrasiva.

Infine nella fase di finitura i getti subiscono la sbavatura. La sbavatura è l'operazione durante la quale si provvede alla rifinitura e alla levigatura dei getti, nonché alla eliminazione dai getti

delle bave di metallo che si formano in prossimità dei punti di unione tra le due semistaffe. Questa fase è detta anche smerigliatura o molatura.

Dopo questa fase il getto può passare al collaudo finale, ma se il tipo di getto che si vuole produrre deve avere delle proprietà particolari allora potrà seguire una fase di trattamento termico. Nella Zanardifonderie Spa si producono anche getti in ghisa ADI e quindi i getti seguono un trattamento di austempering.

L'azienda dispone inoltre di un'officina per le lavorazioni meccaniche e di un reparto di verniciatura per soddisfare appieno le esigenze dei clienti.

Capitolo 2

I controlli di qualità

In questo capitolo si riportano le modalità con cui vengono effettuati i controlli per garantire la qualità del prodotto all'interno dell'azienda.

I controlli di qualità vengono svolti principalmente all'interno del laboratorio. Qui vengono eseguite le analisi chimiche delle materie prime, del processo fusorio nonché le prove per controllare le caratteristiche meccaniche dei getti e le micrografie. Nel reparto di collaudo vengono effettuate, invece, le cosiddette prove non distruttive come la magnetoscopia o il controllo agli ultrasuoni.

2.1 Laboratorio Prove Materiali

All'interno del laboratorio vengono svolte numerose e differenti attività riguardanti più momenti del processo di produzione.

Il laboratorio controlla il materiale in accettazione e verifica con adeguati strumenti la corrispondenza con le qualità chimiche attese: si controlla la permeabilità e la granulometria delle terre e della sabbia in ingresso per i reparti di animisteria e formatura.

Vengono eseguite analisi della composizione chimica della lega sia dei forni sia della colata. La composizione chimica della ghisa nei forni fusori viene operata ad ogni carica completa o rabbocco: l'operatore preleva una "pastiglia" di ghisa, detta così per la sezione circolare e lo spessore minimo, che viene mandata al laboratorio. I risultati delle analisi chimiche vengono comunicati immediatamente al reparto Forni e Colata in modo da permettere agli operatori di apportare le eventuali modifiche alla "ricetta" della ghisa operando le correzioni riportate al capitolo uno. Ad ogni cambio di tipo di ghisa viene prelevata e analizzata una pastiglia anche dalla siviera di trattamento in modo da permettere agli operatori di conoscere la giusta composizione della ghisa in siviera.

Le analisi della composizione chimica della lega vengono effettuate tramite un quantometro. Il quantometro è uno strumento basato sull'emissione atomica che fornisce una misura quantitativa degli elementi presenti nella lega.

Esternamente si presenta come una “scatola” con una unità accessibile in cui disporre il campione da analizzare e poi richiudere come in figura 2.1 e un monitor per avere un’interfaccia e mostrare i risultati delle misure.



Figura 2.1: *Quantometro, l’unità dove viene posto il campione è quella esterna di destra.*

Per quanto riguarda il suo funzionamento come tutti gli strumenti che funzionano ad emissione atomica è costituito da una sorgente e porta campione, un selettore di lunghezze d’onda, un rilevatore fotoelettrico e un’unità per l’elaborazione e presentazione del segnale.

Nel caso di un quantometro si ha uno spettrografo composto dai principali elementi presenti in una lega metallica, disposto circolarmente: quando il campione viene eccitato tramite una forte scossa elettrica, emette radiazioni di varie lunghezze d’onda, quando una di queste corrisponde a una di quelle che può ricevere lo spettrografo un sistema di tubi fotomoltiplicatori amplifica e registra automaticamente l’intensità del segnale che è proporzionale alla presenza dell’elemento e quindi alla sua percentuale nel campione analizzato. In figura 2.2 si presenta lo schema di funzionamento di un quantometro.

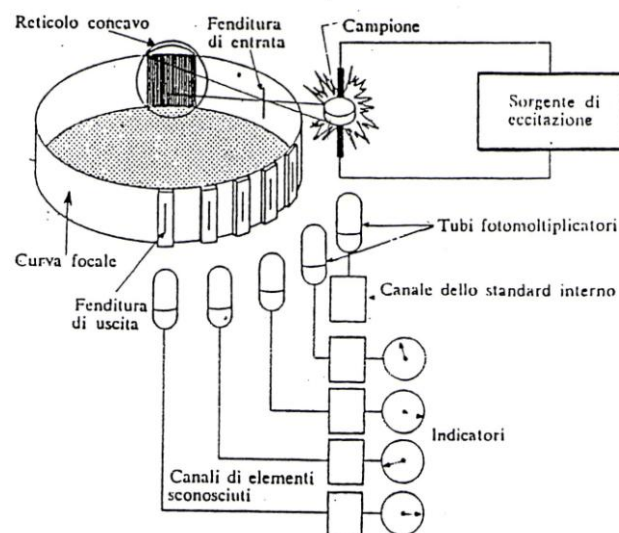


Figura 2.2: *Schema del funzionamento di un quantometro*

Per l'analisi chimica il laboratorio dispone inoltre di un analizzatore specifico di carbonio e zolfo. Il funzionamento di questo strumento è semplice: piccoli pezzi di un campione frantumato vengono fatti bruciare con l'ossigeno a formare CO , CO_2 , SO_2 , una sorgente emette poi raggi infrarossi che vengono assorbiti da queste specie chimiche e in base alla legge di Lamber Beer fornisce la concentrazione C del composto :

$$A = \epsilon * l * C, \quad (2.1)$$

dove A è l'assorbanza, ϵ una costante e l il cammino ottico.

Il laboratorio dispone inoltre di un microscopio ottico per il controllo micrografico della ghisa. Nel reparto di colata viene prelevato dalla siviera di colata prima di ogni nuovo rifornimento un campione (provino di fine siviera) e viene inviato al laboratorio. L'operatore che svolge questo compito deve già controllare superficialmente la forma degli sferoidi su un microscopio ottico prima di inviare il provino al laboratorio. I provini dopo essere stati ridotti a dimensioni opportune vengono inglobati in formelle di resina. Lo scopo principale è di poterli bloccare efficacemente durante le operazioni di spianatura e lucidatura. Si usano resine termoindurenti che richiedono un riscaldamento sotto pressione (30-40 MPa). Il provino è inserito con i granuli di resina nel cilindro di una pressa, portato alla temperatura (160-180°C) e lì mantenuto sotto pressione figura 2.3.

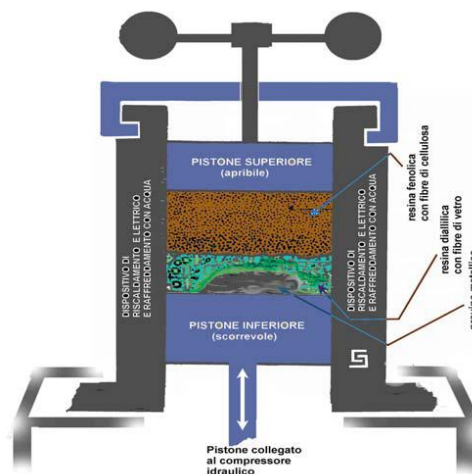


Figura 2.3: Schema di un dispositivo per il montaggio di resina termoindurente ai provini metallici

La spianatura iniziale si esegue con macchine utensili, passare a passaggi su carte abrasive di granulometria maggiore fino alla lucidatura che avviene mediante macchine "lappatrici" a piatti rotanti che sostengono dischi di tessuto capaci di trattenere sulla superficie una sospensione acquosa di polveri abrasive come in figura 2.4.

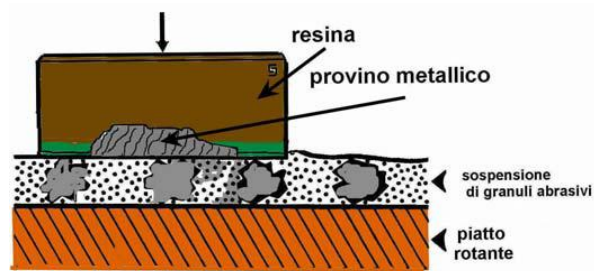


Figura 2.4: Schema di funzionamento della lappatura

I provini lucidati vengono analizzati al microscopio. L'operatore ha il compito di analizzare osservando e interpretando le micrografie se la microstruttura del provino corrisponde al prodotto desiderato, in caso di non conformità, sarà necessario effettuare modifiche al ciclo produttivo. In mancanza problemi le immagini vengono registrate e archiviate.

Il controllo micrografico fa parte delle prove distruttive in quanto prevede la "distruzione" del getto, così come le prove meccaniche che vengono effettuate in laboratorio.

2.1.1 Prove Meccaniche

Queste prove hanno il compito di verificare se il getto di ghisa ottenuto presenta le caratteristiche meccaniche volute. Vengono eseguite sia prove statiche (la prova di trazione), sia prove di fatica (a flessione rotante, a trazione alternata), oltre alla prova di Charpy.

Il comportamento sforzi-deformazioni di un materiale è generalmente caratterizzato dalla prova di trazione. Essa consiste nel sottoporre un provino di forma e dimensioni opportune (standardizzate da norme internazionali ISO) ad una forza di trazione unidirezionale F crescente lentamente da 0 a un valore tale da determinare la rottura, misurando la forza applicata e le deformazioni.

Il provino è una barretta a sezione costante circolare conformata in modo da avere delle estremità più robuste da afferrare e un tratto più sottile che costituisce il tratto utile per la prova della lunghezza iniziale. Il provino viene collegato alla macchina di prova (figura 2.5) alle estremità, mediante ganasce, uno dei quali è fisso mentre l'altro è collegato alla traversa mobile della macchina. Lo spostamento di quest'ultima permette l'applicazione del carico.



Figura 2.5: Macchina per la prova a trazione

La distanza iniziale tra le ganasce corrisponde ad h . Durante le prove si misurano la forza applicata e lo spostamento dell'elemento mobile Δh rispetto alla configurazione iniziale. In molti casi si misura l'allungamento localizzato su un tratto del provino mediante un estensimetro.

I dati misurati sono riportati su un diagramma tensioni nominali- deformazioni nominali (σ - ϵ), come in figura 2.6, nel quale le prime sono date dal rapporto tra i carichi applicati e l'area iniziale del provino e sono misurate in MPa, le seconde dal rapporto tra l'allungamento totale e la lunghezza iniziale. Il diagramma fornisce il valore della tensione di snervamento (σ_s), il passaggio dal comportamento elastico a plastico, e il valore della tensione di rottura (σ_r). Nel tratto elastico si vede che le due grandezze sono direttamente proporzionali, per cui i dati vengono elaborati per definire le costanti della legge di Hooke come il modulo di Young (E).

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.2)$$

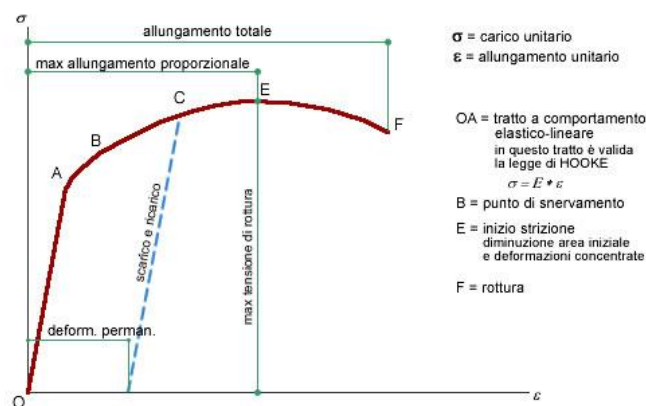


Figura 2.6: diagramma tensioni nominali – deformazioni nominali

Facendo variare il carico con una funzione temporale si esegue la prova a fatica. Vengono eseguite prove di fatica a trazione alternata e a flessione rotante. Nelle prove a fatica il carico viene fatto variare in modo ciclico, cioè in modo che la funzione temporale che lo descrive presenti una successione di minimi e massimi alternati. Il valore degli estremi deve essere tale che le tensioni corrispondenti devono essere inferiori ai valori di rottura e il numero di cicli applicato è dell'ordine di centinaia di migliaia.

Le relazioni tra la componente alternata di un ciclo di fatica e il numero di cicli che un provino sopporta prima della rottura sono riportate nel diagramma di Wohler (figura 2.7), dove si vede che per numero di cicli nullo il carico corrisponde a quello di rottura, ed esiste un limite al di sotto del quale il provino non si rompe neanche per un numero infinito di cicli. La costruzione di questo diagramma si ottiene effettuando con un certo carico vari tentativi cambiando numero di cicli e ottenendo così una distribuzione normale. Si eseguono poi altre prove cambiando il valore di carico. La curva che si ottiene congiungendo i valori medi di ogni carico è la curva di Wohler al 50% (figura 2.8). Questo significa che, riguardo ai provini testati, esiste una probabilità del 50%, sottoposti in modo ciclico a quel carico, si rompano prima di raggiungere il numero di cicli determinato dalla curva di Wohler.

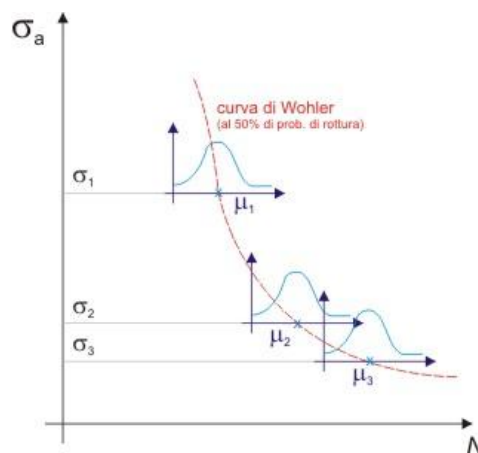


Figura 2.8: Costruzione della curva di Wohler

Oltre alla prova di trazione statica e alle prove di fatica la verifica delle proprietà meccaniche nel laboratorio comprende anche la misura della resistenza all'impatto con il pendolo di Charpy (figura 2.9). In questo strumento un pendolo di massa nota viene fatto cadere da un'altezza nota su un campione intagliato, in modo da aumentare la probabilità di frattura fragile. Dal valore dell'energia cinetica del pendolo al momento dell'impatto (uguale all'energia potenziale del pendolo prima che venga fatto cadere) e dall'energia potenziale guadagnata nella risalita dopo aver rotto il provino è possibile calcolare l'energia assorbita, K , nella frattura.

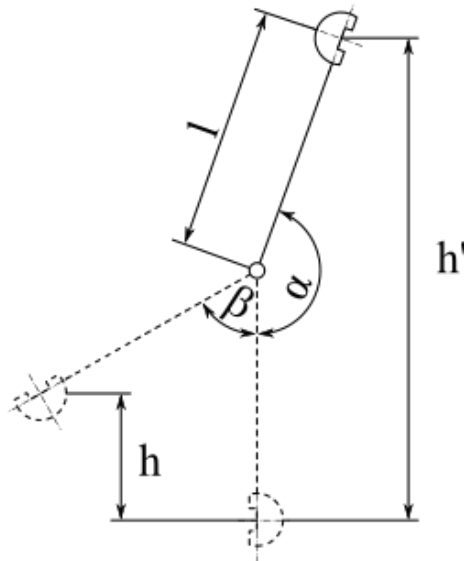


Figura 2.9: schema di funzionamento del pendolo di Charpy

$$K = m \cdot g \cdot h' - m \cdot g \cdot h \quad (2.3)$$

La verifica della durezza pur essendo una prova meccanica non viene effettuata in laboratorio, ma in sede di collaudo o al termine dei trattamenti termici se previsti. La durezza misura la resistenza di un materiale alla penetrazione. Essa dipende da numerosi fattori (inclusa la forma del penetratore) e non può essere considerata una vera e propria proprietà del materiale. Tuttavia risulta in buona correlazione con la resistenza a trazione, inoltre la facilità con cui viene effettuata unita al fatto che si tratta di una prova non distruttiva, rendono questa misura particolarmente utile per la valutazione delle prove meccaniche. A causa della dipendenza della resistenza alla penetrazione dalla forma dello strumento usato non è possibile individuare un valore generale della durezza, ma si parlerà di durezza Brinell, Rockwell, Vickers in relazione al tipo di misura. La durezza Brinell (HB) viene misurata forzando sulla superficie del campione un penetratore sferico di acciaio. Questo strumento lascia una impronta circolare il cui diametro (in mm) fornisce, insieme al valore del diametro D (in mm) della sfera ed il carico applicato F (in kgf) il valore di durezza HB mediante la formula

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.4)$$

Condizioni standard si ottengono con un carico di 3000 kgf e un diametro di 10 mm. La durezza Rockwell si misura mediante un penetratore conico di diamante con un angolo al vertice di 120° , mentre nella durezza Vickers fa uso di un penetratore piramidale a base quadrata con angolo al vertice di 136° .

2.2 Collaudo

Il controllo di qualità prevede inoltre, controlli dimensionali dei getti per verificare la corrispondenza al progetto e lo svolgimento di prove non distruttive, ovvero quelle che non prevedono la distruzione del getto da analizzare, come il controllo agli ultrasuoni, radiografie a raggi X, le magnetoscopie.

Con il metodo ad ultrasuoni è possibile rilevare la presenza di difetti e discontinuità all'interno del getto, misurarne lo spessore e la distanza. Il metodo utilizza una sonda che genera gli ultrasuoni i quali vengono fatti passare attraverso il materiale da esaminare. Un rilevatore poi riscontra il segnale di arrivo, i due segnali sono facilmente visibili come picchi sullo schermo dello strumento (figura 2.10). Se tra questi due picchi ne compaiono altri significa che il metodo ha evidenziato la presenza di un difetto nel getto utilizzato.

La forma e la dimensione del picco confrontate con appositi standard consentono poi di individuare il difetto.

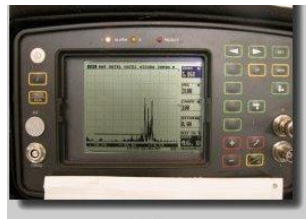


Figura 2.10: Strumento per l'analisi agli ultrasuoni, si possono notare i picchi che mostrano la presenza di un difetto.

L'utilizzo di radiografie ai raggi X consente di individuare la presenza di cricche, inclusioni, porosità all'interno del getto. Il difetto viene evidenziato in quanto le radiazioni quando incontrano una anomalia nel loro percorso all'interno del materiale subiscono delle alterazioni. Dopo aver attraversato il getto in esame vanno ad impressionare una lastra fotografica posta dietro l'oggetto. Successivamente si sviluppa una pellicola con l'immagine del getto in esame. L'immagine viene poi letta confrontandola con quelle standard di getti senza alterazioni per riconoscere i difetti.

Per rilevare anomalie superficiali, quali la presenza di inclusioni o cricche, si usa la magnetoscopia. Questa consiste nella magnetizzazione del pezzo, in presenza di anomalie superficiali ci sarà una deviazione delle linee di forza del campo magnetico.

Cospargendo il getto con polveri magnetiche in sospensione liquida queste seguiranno l'andamento delle linee di forza, è possibile quindi individuare la presenza di difetti superficiali dove si vede l'accumulo delle polveri (figura 2.11). Il getto esaminato viene poi

fatto passare in un tunnel di smagnetizzazione che agisce riducendo progressivamente il ciclo di isteresi.

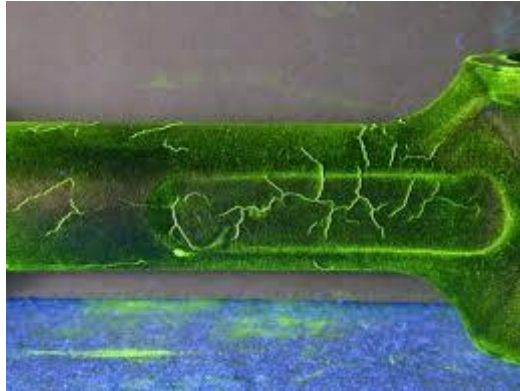


Figura 2.11: *Accumulo delle polveri magnetizzate durante il controllo di magnetoscopia*

Capitolo 3

Analisi dei difetti

Gran parte dei difetti riscontrabili nei getti di ghisa con grafite sferoidale sono comuni alle altre ghise in genere. In questo capitolo si riportano quei difetti che si manifestano principalmente nella produzione di manufatti in ghisa sferoidale. Si tratta di difetti macroscopici che possono essere visibili sulla superficie del getto o rendersi evidenti dopo una lavorazione meccanica o manifestarsi dopo fratture o sezionamento del getto.

3.1 I difetti principali

3.1.1 *La flottazione di grafite*

La flottazione della grafite compare nelle ghise con grafite sferoidale ipereutettiche nell'intervallo che intercorre tra la post – inoculazione e la solidificazione. Il fenomeno si presenta sotto forma di grafite che tende a salire verso le superfici del getto, a causa della diversa densità della ghisa liquida (circa 6.9 g/cm³) e grafite (2.2 g/cm³), creando soprattutto nelle sezioni di grande spessore delle zone dove il carbonio rimane intrappolato. In queste zone si osserva un colore molto scuro della frattura, si ha inoltre un notevole decremento di durezza, per una matrice perlitica da 270-280 HB si scende a 240-245 HB.

Questo difetto risulta influenzato dalla temperatura di colata e lo spessore delle pareti: mentre nei getti sottili le velocità di raffreddamento non permettono sensibili flottazioni della grafite, i getti con pareti medie e grosse sono viceversa particolarmente sensibili a questo fenomeno.

Il diagramma seguente (figura 3.1) mostra come dovrebbe cambiare il valore del carbonio equivalente in funzione dello spessore delle pareti per ridurre il problema della flottazione.

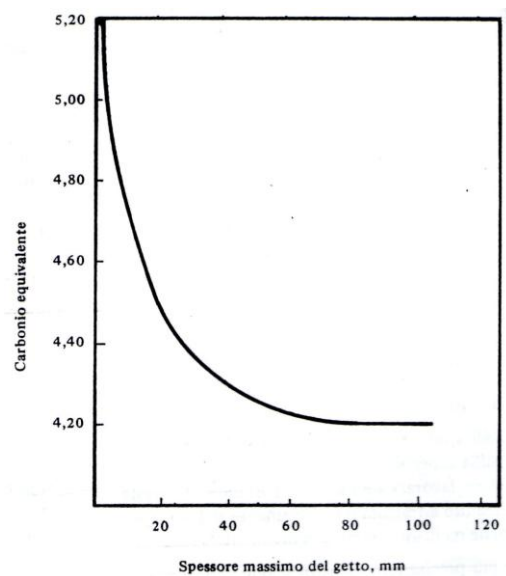


Figura 3.1: Valori di CE per getti di ghisa sferoidale di vari spessori

3.1.2 Chunky graphite

La presenza di grafite chunky è un difetto caratteristico dei getti in ghisa sferoidale (figura3.2). Questo difetto si manifesta sulla superficie lavorata di una sezione, o sulla frattura, presentandosi come una macchia più scura.

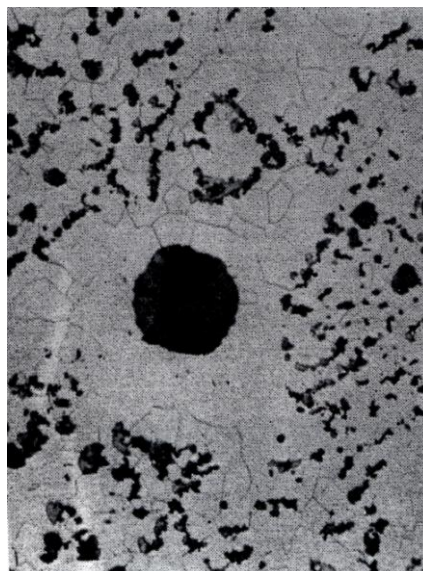


Figura 3.2: Presenza di chunk graphite.

Esistono molte teorie sulla formazione di questo difetto, la più nota è quella del limite di fase o delle bolle, per quanto riguarda la grafite sferoidale, e afferma che il difetto trae origine dal

fatto che la nucleazione e la crescita della grafite si determina soltanto su una parte anziché su tutta la superficie della bolla di magnesio. Un altro approccio (Wedge Theory , Ing. Adrian Udriou) spiega il meccanismo della formazione di una grafite generata dalla distruzione dei noduli risultati dalla prima germinazione e crescita eutettica, distruzione compiuta durante la nucleazione e crescita grafitica secondaria e dalla crescita allo stato solido.

Il difetto può essere prevenuto agendo sui seguenti fattori:

- Carbonio equivalente tenuto leggermente ipoeutettico;
- Inoculazione efficace;
- Bassa temperatura di colata;
- Colata veloce.

3.1.3 *Punte di spillo (pinholes)*

Punte di spillo sono un difetto originato da piccole bolle di gas che si congelano sotto la pelle del getto di ghisa, sono anche denominati in inglese *pinholes*. Sono scoperti quando il getto è rifinito alle macchine utensili e spesso costituiscono un difetto fastidioso in quanto spesso comportano lo scarto di un getto in fase avanzata di lavorazione.

I gas che possono rimanere intrappolati sotto la pelle del getto sono l'idrogeno, l'azoto e il monossido di carbonio. Questi possono derivare da un'elevata presenza del gas nella ghisa che viene poi espulso durante la solidificazione. I gas possono inoltre provenire da interazioni della ghisa con le anime di resina ricca di azoto, o dalla presenza eccessiva di vapore acqueo.

Se della scoria è rimasta intrappolata ad esempi il contatto con il metallo genera monossido di carbonio secondo la reazione



I possibili rimedi riguardano la riduzione del tenore di idrogeno e azoto nella ghisa, nell'essiccazione sufficiente delle forme e delle anime.

3.1.4 *Dross o inclusioni non metalliche*

Il termine *dross* sta ad indicare un difetto tipico della ghisa sferoidale, identificabile in venature di scoria che rimangono intrappolati nel getto, localizzandosi principalmente nella sua parte superiore. Macroscopicamente appare come un'interruzione grossolana della matrice metallica, spesso evidenziata solo da una lavorazione meccanica. A livello microscopico si presenta come vene irregolari di colore grigio associata a grosse quantità di grafite (figura 3.3).

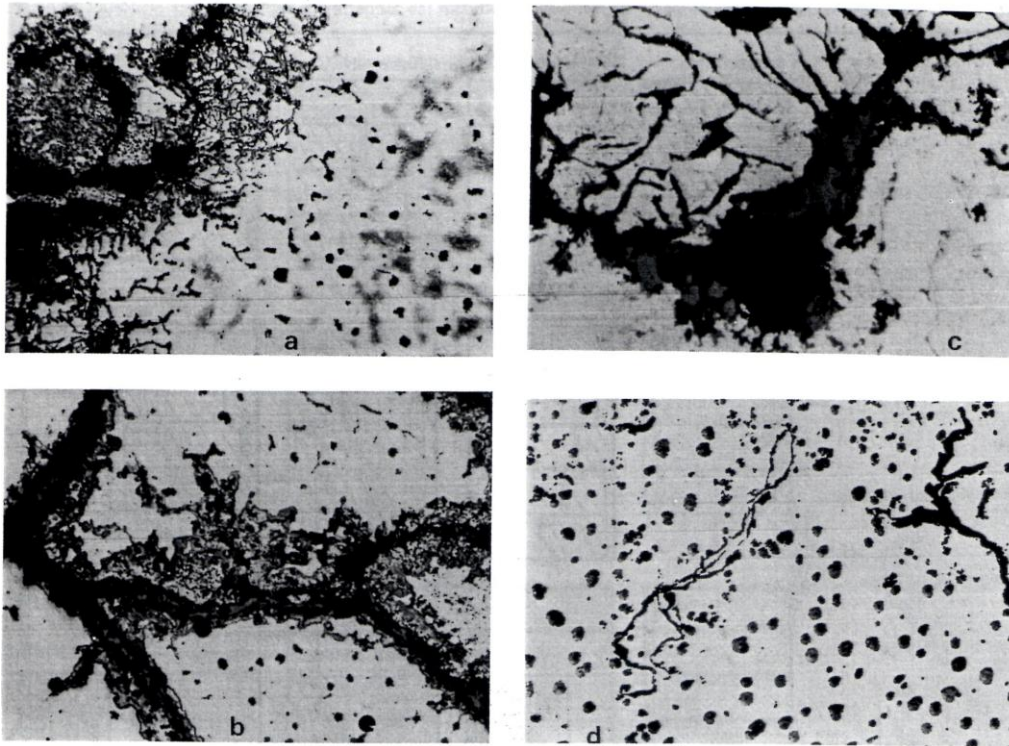


Figura 3.3: Diverse micrografie di inclusioni di dross

Le analisi delle specie chimiche presenti in queste inclusioni mostrano delle composizioni chimiche con ossigeno complesse: $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-Ce}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O-CaO-TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$. Le specie dominanti sono $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$, in particolare è molto ricorrente la presenza di silicati complessi di magnesio, Mg_2SiO_4 forsterite ritenuta derivante dalle reazioni



La formazione di dross interessa principalmente lo strato superficiale del getto. Se questo difetto rimane intrappolato nello strato più superficiale può essere facilmente rimosso tramite una lavorazione meccanica. Il problema maggiore dei dross è il livello di penetrazione all'interno del getto. Infatti la presenza di dross oltre a sminuire l'aspetto superficiale del getto influenza la resistenza a fatica, può favorire più facilmente l'innesco di cricche se il getto viene sottoposto a sforzi ciclici.

3.1.3.1 Il meccanismo di formazione dei dross

La formazione dei dross è associata a due eventi: il trattamento al magnesio e la riossidazione successiva di questo elemento. Durante il trattamento al magnesio la quantità di scoria che si forma è influenzata dalla composizione del bagno e la temperatura di trattamento.

Nel bagno avviene la formazione degli ossidi e la loro successiva aggregazione e coalescenza.

Gli ossidi generatori di scoria che si formano principalmente nel forno sono SiO_2 e FeO e la loro formazione è descritta dal diagramma di stato (figura 3.4):

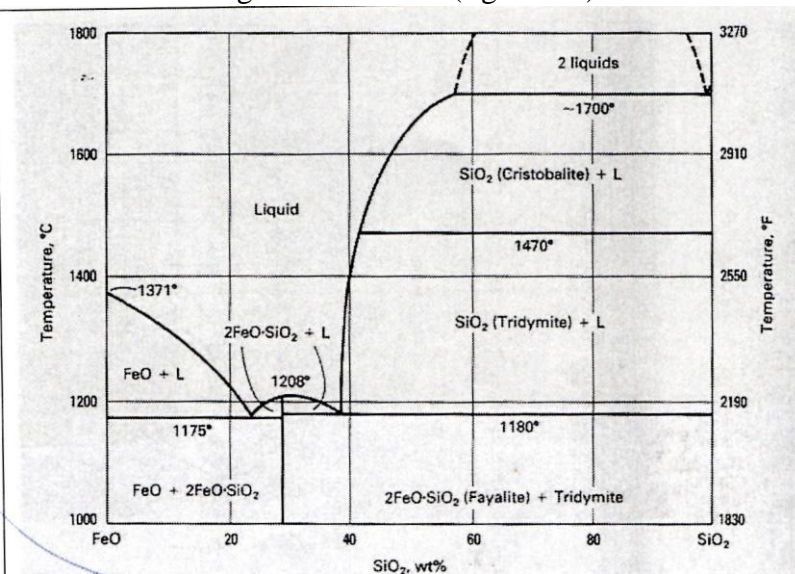


Figura 3.4: Diagramma di stato FeO-SiO_2

La percentuale di silice presente nella ghisa liquida risulta dipendente dalla temperatura. Questo è il risultato di uno studio sul comportamento della ghisa liquida fatto nel 1951 presso l'Università di Wisconsin da Heine e Loper. Si osserva infatti che ad alte temperature come 1550°C il diagramma di Ellingham (figura 3.5) indica che il CO è molto più stabile rispetto a SiO_2 , quindi il carbonio presente nel bagno si ossida prima del silicio. Se si osserva il bagno si osserva un bagno pulito senza film ricoprenti, il Si si riduce e il CO viene espulso dal bagno. A circa 1420°C le reazioni si invertono e si ossida il Si , formando un film di SiO_2 che ricopre il bagno.

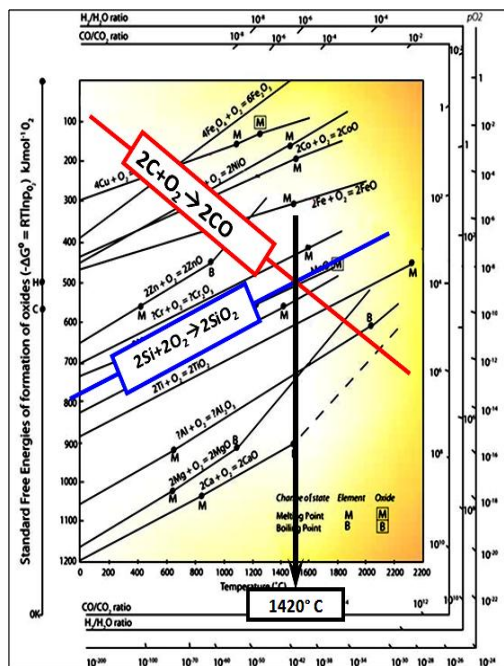


Figura 3.5: Diagramma di Ellingham due reazioni

La temperatura di equilibrio dipende dalla composizione, una formula empirica usata è :

$$TEQL = \frac{30213}{17.42 - \log\left(\frac{Si}{C_2}\right)} - 273 \quad (3.3)$$

In seguito al trattamento di sferoidizzazione, la silice formata si combina con il magnesio del trattamento, che durante il raffreddamento allo stato liquido si ossida, per formare la forsterite secondo il seguente diagramma di stato (figura 3.6)

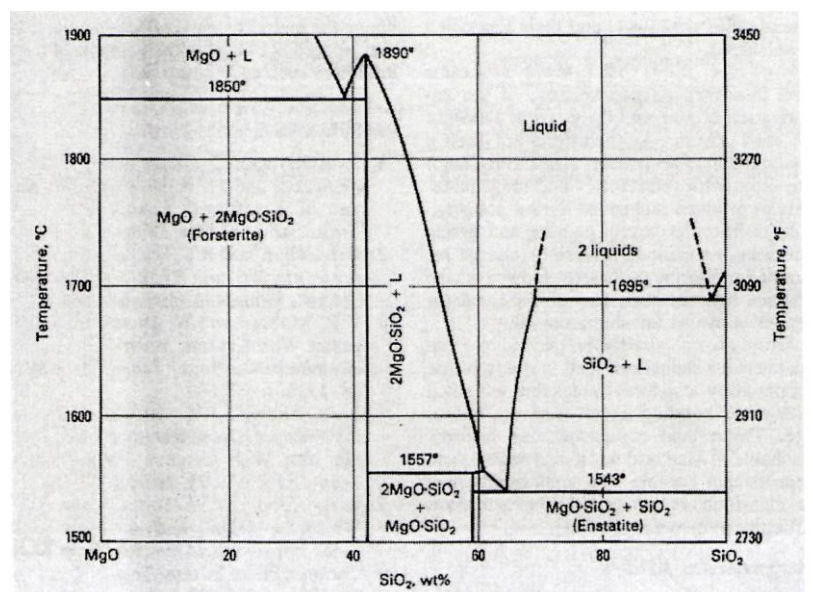


Figura 3.6: Diagramma di stato MgO – SiO₂

Una riossidazione successiva del magnesio ha luogo dopo il trattamento, e procede con l'abbassarsi della temperatura. La riossidazione inoltre è influenzata dalla turbolenza della colata nella forma che aumenta l'esposizione all'aria.

Basse temperature di colata (minori della temperatura di equilibrio) e il mantenimento di ghisa liquida nei forni a basse temperature favorisce l'accumulo di ossidi e di conseguenza la presenza di dross.

3.2 Analisi di un caso di presenza di dross

Durante lo svolgimento del progetto di formazione in fonderia, si è potuto riscontrare un caso di scarto di produzione di un getto a causa della presenza di inclusione superficiale non

metallica (*dross*). Le micrografie eseguite presso il laboratorio dell'azienda (figura 3.7) mostravano la tipica conformazione pellicolare dei dross.

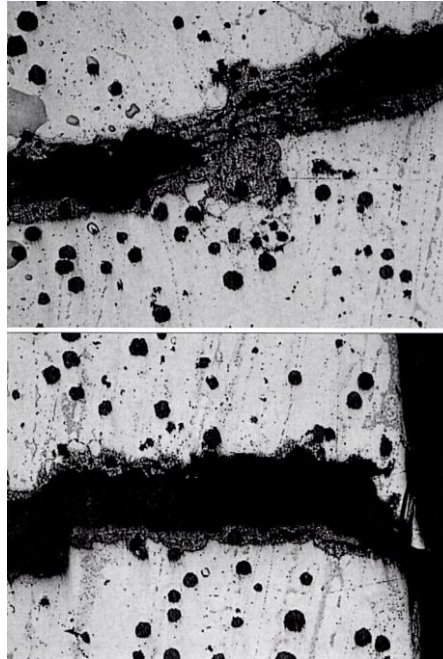


Figura 3.7 : *Esame micrografico di una zona difettosa a causa di presenza di Mg_2SiO_4 , forsterite*

Per avere la conferma che si tratti proprio di presenza di dross, si è analizzato il campione in esame anche con il microscopio elettronico presso i laboratori dell'Università. L'analisi al SEM (figura 3.8) ha mostrato chiaramente la presenza dei silicati di magnesio attesi, come si può vedere dai picchi di composizione (figura 3.9) :

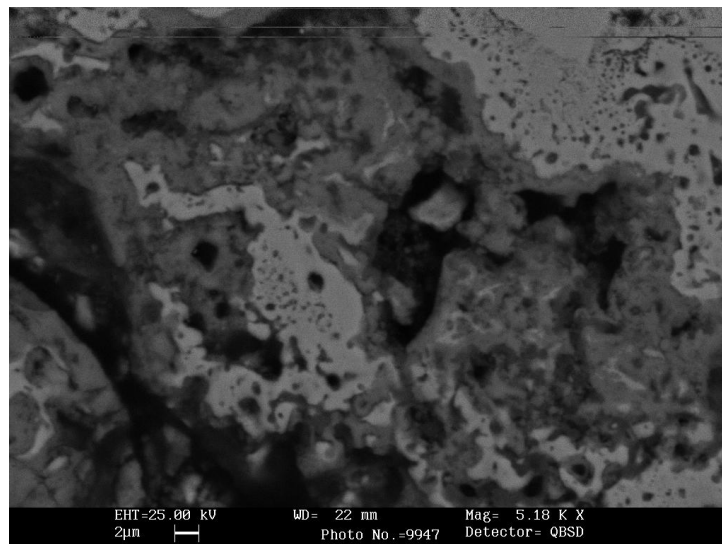


Figura 3.8: *L'analisi al microscopio elettronico mostra la presenza di zone scure molto probabilmente dovute alla presenza di forsterite*

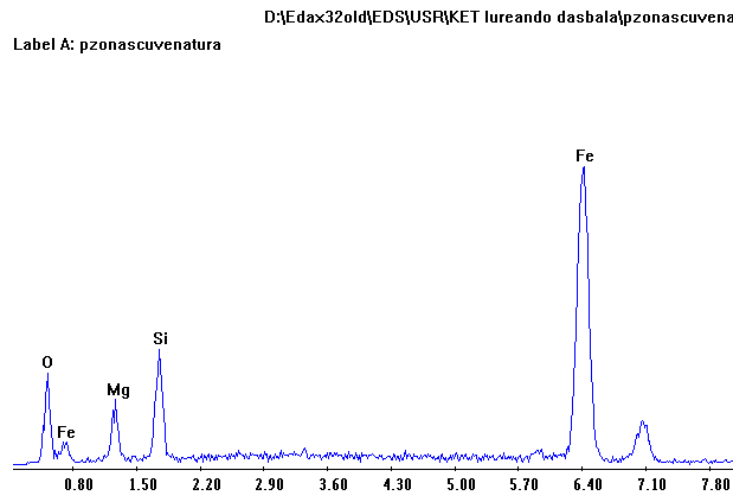


Figura 3.9: La presenza dei picchi di ossigeno, magnesio e silicio conferma le attese, si tratta di Mg_2SiO_4 forsterite, l'elevato picco del ferro è giustificata dalla presenza di ossido di ferro.

3.2.1 Prevenzione

Gli elementi principali per la formazione dei dross si è visto sono Mg, Si, O₂. Tutti questi ingredienti vengono inseriti nelle varie fasi di fusione, sferoidizzazione, inoculazione e colata. Per prevenire la formazione di dross quindi si analizzano queste fasi.

Durante il processo di fusione una grossa quantità di scoria viene generata dalla sabbia di formatura che aderisce ai bocconi (SiO₂), e alla ruggine sempre presente sui pani di ghisa (FeO, Fe₂O₃). Silice e allumina possono anche arrivare da iterazioni del metallo liquido con il refrattario.

Una parte di silice può essere eliminata aggiungendo sabbia in modo da aumentare la percentuale di SiO₂ (figura 3.4) facendo precipitare un composto che galleggia sul bagno e può essere facilmente rimosso. Tutte le aggiunte in forno alla ghisa liquida devono essere fatte in funzione della temperatura di equilibrio per evitare l'ossidazione del silicio a SiO₂ (figura 3.5).

Nel trattamento con il magnesio si deve tenere conto che una cattiva conservazione (esposizione ad aria e umidità) della lega FeSiMg provoca l'ossidazione, tanto maggiore quanto più piccoli sono i pezzi di ferrolega. La percentuale di Mg massima non deve superare 0.4%.

Particolarmente pericoloso per la formazione di inclusioni è l'eccesso di inoculante. Sul tipo di inoculante da utilizzare ci sono molte contraddizioni sulla percentuale di Si: un basso tenore abbasserebbe sì la tendenza alla formazione di dross ma anche l'effetto inoculante.

Nell'azienda si utilizza un inoculante al 65% di Si in siviera e invece all'85% di Si sul flusso di colata per compensare il raffreddamento dovuto al soffio d'aria.

Nei reparti di formatura e colata si agisce per prevenire i problemi di dross e di scorie in generale cercando di bloccare gli ossidi già esistenti e di evitare un riossidazione del metallo. Per bloccare le scorie esistenti si utilizzano dei filtri ceramici in grado di intrappolare anche particelle molto piccole. Questi filtri vengono posti in prossimità del getto durante la formatura.

Nella colata bisogna assicurarsi di essere sopra la temperatura di equilibrio per impedire l'ossidazione del Si (figura 3.5). La colata lenta o interrotta genera scoria perché permette l'ossidazione del metallo e deve quindi essere evitata. L'utilizzo della colata a pressione è molto favorevole sotto questo punto di vista in quanto permette di controllare la velocità. Si deve altrettanto evitare una colata troppo "energica", sia perché nella turbolenza generata si intrappola aria sia perché potrebbe erodere e trascinare sabbia dalle pareti della forma.

CONCLUSIONI

Grazie a questo progetto di formazione si è avuto la possibilità di approfondire un argomento d'interesse come quello della produzione della ghisa sferoidale. La comprensione di tale argomento è stata facilitata e stimolata dalla constatazione pratica di quello che si è visto sui libri. Si è potuto osservare come vengono svolte le diverse fasi di produzione della ghisa sferoidale dalla fusione alla sferoidizzazione in siviera, all'inoculazione e alla colata. Si è verificato quali prove vengono effettuate per garantire la qualità del prodotto, le prove svolte in laboratorio e in fase di collaudo.

Si è avuto inoltre la possibilità di approfondire il problema della formazione dei dross grazie anche ad un incontro tra fonderie organizzato dall'Assofond.

Quest'opportunità si è dimostrata utile per capire l'organizzazione di una grande azienda, la disposizione dei reparti e la gestione delle risorse umane.

Si desidera quindi ringraziare tutta la ZANARDIFONDERIE SPA per l'opportunità concessa, il tutor aziendale Federico Vettore e il tutor accademico Dott. Manuele Dabalà .

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Assofond,(1973), *La Metallurgia delle ghise- Le ghise grigie e sferoidali*, Assofond
2. Metals Handbook- Ductile Iron,p 33
3. Julio Alva (2010), *Fonderia pressofusione*, p 38
4. Giulio Zanotti,,*Metallurgia delle ghise*,Assofond
5. Ing.Adrian Udrouiu, *Wedge theory*,