

I fattori che portano alla formazione di risucchi nelle ghise grigie e sferoidali. Una rivisitazione completa del problema

Introduzione

E' noto che le ghise grigie (gg) hanno una capacità di autoalimentazione superiori alle ghise sferoidali (gs). Tuttavia esse sono soggette occasionalmente a fenomeni anomali di ritiro in cui le fonderie occasionalmente incapano specie in associazione alla colata automatica.

Per quanto riguarda le gs la formazione di risucchi anche occasionali ha più cause non sempre ben riconosciute come quella della temperatura. Questi incidenti naturalmente sono all'origine di costi e ritardi non più accettabili.

Lo scopo di questo lavoro è quello di eseguire una rivisitazione delle cause basate su quanto la letteratura tecnica ci ha finora fornito ma che sembrano non essere di dominio delle nuove leve ora responsabili sia della metallurgia che degli uffici tecnici anche quando dispongono di strumenti avanzati di lavoro.

Esiste quindi un deficit di conoscenze che va colmato. Le cause suddette sono invece confermate dall'esperienza dell'autore nel suo lavoro corrente di supporto tecnico con l'impiego di strumenti come l'analisi termica e la simulazione.

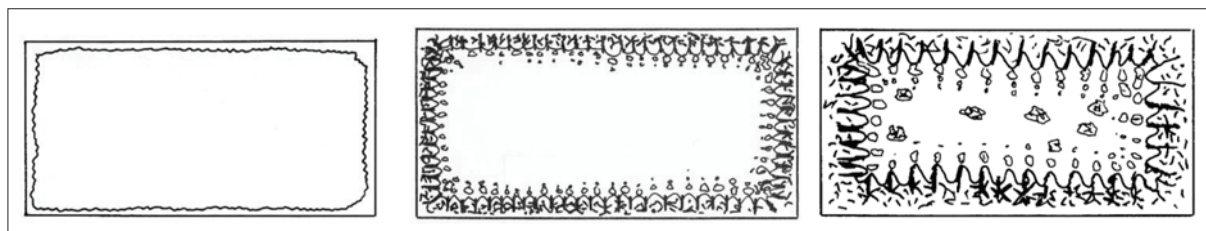
I diversi casi verranno corredata-

ti con esempi presi dalla realtà produttiva.

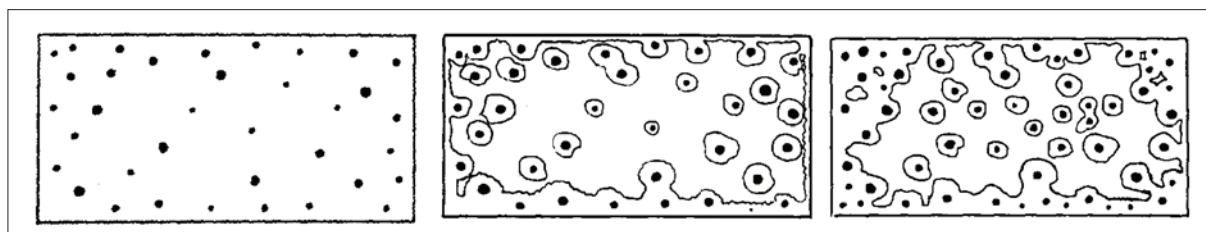
I meccanismi della solidificazione di ghise grafitiche

CASO DELLE GHISE GRIGIE

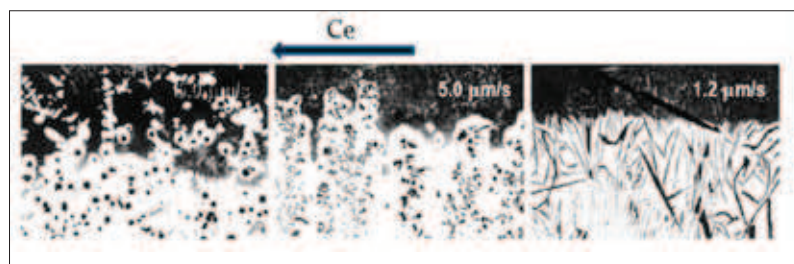
Queste leghe presentano una crescita a strati (Fig. 1) con uno sviluppo cooperativo (o coordinato) dell'eutettico. In queste condizioni l'espansione associata alla precipitazione della grafite si scarica direttamente sul liquido favorendo una compensazione ideale del ritiro austenitico evitando anche la sovrappressione che porterebbe ad un effetto di cedimento di forma.



■ Fig. 1 - Schema del meccanismo di solidificazione nelle ghise grigie.



■ Fig. 2 - Schema del meccanismo di solidificazione nelle ghise sferoidali.



■ Fig. 3 - I meccanismi di crescita cambia con l'aumento del tenore di cerio.

CASO DELLE GHISE SFEROIDALI

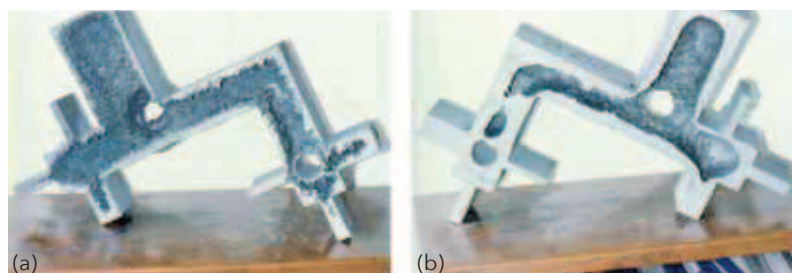
Le ghise sferoidali per contro presentano un eutettico divorziato (austenite ed i noduli di grafite non sono coordinati nel loro sviluppo) ed per di più il liquido possiede una minore conducibilità (Fig. 2). Ciò si traduce in una crescita pastosa (a strati più spessi) che non consente uno smaltimento dell'espansione grafite sul liquido ma che può riversarsi sulle pareti generando l'effetto cedimento di forma. L'alto contenuto di carbonio certamente non può che potenziare il rischio.

Un lavoro sperimentale recente ha fatto vedere come cambia la modalità di solidificazione della ghisa base lamellare con l'aggiunta progressiva di cerio in un ambito di crescita unidirezionale (Fig. 3). La velocità di crescita della lamellare si è rivelata molto lenta a confronto delle strutture intermedie comprese quelle a grafite compatta.

Negli anni 80 un lavoro sperimentale preparatorio alla creazione di un software di simulazione (Solstar) generò delle

immagini che confermavano questi andamenti (Fig. 4). Venne utilizzata la tecnica dello svuotamento progressivo di un getto campione sia in gg che in gs. In pratica, una serie di pezzi vennero colati e lasciati raffreddare in staffa per tempi prefissati dopo i quali i pezzi vennero distaffati onde osservare la progressione della solidificazione.

E' evidente nel caso delle gg che durante la solidificazione si mantiene un contatto liquido molto prolungato fra le diverse sezioni malgrado la differenza di spessori o moduli, ciò che facilita l'alimentazione da più punti del particolare. L'esatto contrario avviene nelle gs. Come co-



■ Fig. 4 - Progresso della solidificazione a parità tempo (5 min.) in un getto campione in (a) gg (b) gs.

rollario si desume anche che a differenza di quanto avviene per le gg, l'accrescimento nelle gs sembra seguire con maggiore proprietà la regola dei moduli di solidificazione e quindi le regole di progettazione.

La filosofia dell'alimentazione

CASO DELLE GHISE GRIGIE

Era ed è esperienza nelle gg che maggiore il contenuto di carbonio (e di CE) e minori sono le esigenze di alimentazione, favorite naturalmente dal loro meccanismo di solidificazione. Tuttavia, la progettazione suppone di conoscere numericamente le esigenze di alimentazione in termine di modulo del collo in funzione di quello del getto.

S.Karsay in uno studio analitico degli anni 70, partendo dal principio che le ghise grafite (gg e gs) dovevano essere alimentate per il periodo sufficiente di tempo (in termini di moduli) a raggiungere la



Fig. 5 - (a) Scatola con %C 3,15 e %Si 1,70% (CE: 3,75%) (b,c) Getti in GG 20.

temperatura di solidificazione eutettica, aveva proposto l'approccio noto oggi come "Alimentazione a pressione" che però non teneva conto dell'effetto del cedimento forma.

Tra l'altro l'approccio non faceva distinzioni fra i diversi tipi di ghisa grigia sebbene possiamo immaginarla più tagliato per le ghisa a basso CE (<3,8%) (G30 e G35) in quanto soggette ad un ritiro liquido molto evidente all'origine di ricali in caso di mancata compensazione (Fig. 5a).

L'approccio della "Materozzatura a pressione" permette in molti casi di eliminare le materozze utilizzando i sistemi di colata a tale scopo (Fig. 5b, 5c).

Le materozze dette Connor con sezioni di contatto di 1,5 -2 mm ne sfruttano in un altro modo la facilità di alimentazione e ancora oggi sono molto comuni nella produzione di dischi freno (G20 e G15 HC) (Fig. 6).

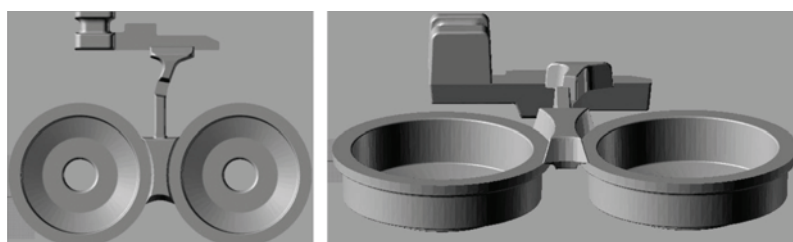


Fig. 6 - Esempio di colata Connor.

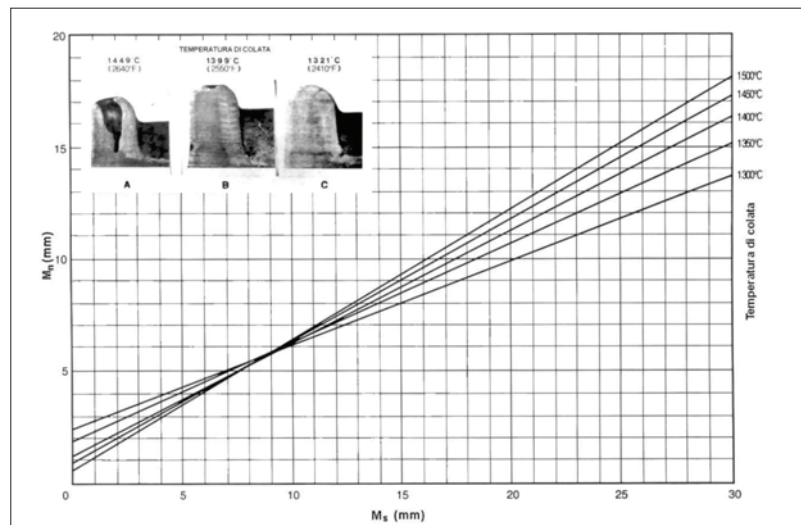


Fig.7 - Rapporto modulo collo/modulo significativo del getto in funzione della temperatura.

L'approccio Karsay

La soluzione grafica in funzione della temperatura di colata illustra il modulo del collo in rapporto al modulo significativo o maggiore del pezzo M_s (Fig. 7) da cui si ricava un valore medio nell'intervallo 0,55-0,60 almeno per moduli superiori a 1 cm.

I valori si sono rivelati sovrabbondanti e quindi molto sicuri per le gg (nella realtà pratica nelle G30 non eccede il rapporto dello 0,4). Sono invece risultati - come vedremo - insufficienti nel caso delle gs. Ma l'approccio ha costituito un buon punto di partenza.

Per concludere, il ritiro liquido di progettazione nelle G30 (le G35 sono ormai scomparse) è dell'ordine del 2-3%. max. mentre il modulo del collo come già detto è pari allo 0,4 del modulo del getto. Per le G25 il modulo del collo (o attacco) si può considerare lo 0,3 mentre che per le G20 e G15 lo 0,2. un ritiro liquido del 2% risulta più che sufficiente.



Fig. 8 - Getti in gg che presentano dei difetti di ritiro anomali.

Ritiri anomali nelle gg

Occasionalmente i getti in gg presentano dei difetti di ritiro sia esterni che interni non spiegabili con presenza nel primo caso di ricami specie nelle nicchie o negli incroci con eventuale presenza di esudazione di ghisa (Fig. 8). Il fenomeno è già stato studiato negli anni 80 dalla BCIRA (ente inglese per le ricerche sulle ghise non più attivo) ed è quindi noto da molto tempo.

I difetti furono associati ad un effetto di sovranucleazione del bagno a seguito di sia operazioni di correzione della composizione (o meglio di precondizionamento involontario nei forni elettrici) che a un eccesso di inoculazione o di entrambi (Fig. 9a).

Tale stato è evidenziabile in due modi: attraverso il conteggio di celle eutettiche opp. attraverso la determinazione del livello di sottoraffreddamento nella curva di analisi termica: un controllo, questo, più immediato (Fig. 9b). Nel primo caso si ritiene a rischio di risucchi conteggi superiori a 700 celle/cm² nel provino standard di trazione.

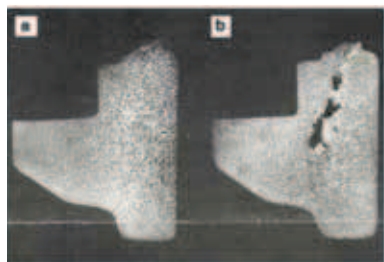


Fig. 9 - Bagni con livelli (a) nucleazione normale (b) di sovranucleazione- struttura più fine (c) curva tipica di analisi termica in una ghisa ipoeutettica.

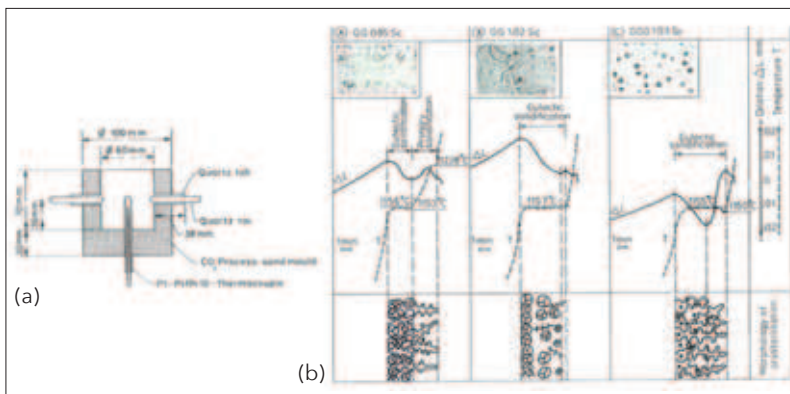


Fig. 10 (a) Provino Hummer (b) le curve composite relative ad un G30, G15 e gs (a destra).

Nel secondo caso si consiglia di non cercare di abbattere il sottoraffreddamento ($\Delta T < 2^\circ\text{C}$) che porta ad ottenere il 100% di grafite tipo A. Tra l'altro le norme chiedono solo il 90%. Un lavoro tedesco dimostrò statisticamente che la sensibilità ai ritiri era maggiore quanto più alto era il carbonio equivalente ciò che può apparire come un'apparente contraddizione ma che non lo è affatto giacché queste sono quelle più facilmente inoculabili.

La spiegazione che si avanza in questi casi è che la sovranucleazione modifica la modalità di crescita e la avvicina a quella

delle ghise sferoidali nel senso di favorire una crescita più pastosa quindi senza la possibilità di scaricare l'espansione sul liquido rimanente generando di conseguenza dei ritiri sia primari che secondari.

CASO DELLE GHISE SFEROIDALI NELLE FORME A VERDE

L'effetto cedimento di forma è un fenomeno noto da sempre nelle gs a causa anche della qualità della formatura a verde oggi certamente molto migliorata. Tuttavia per molto tempo non si è riusciti a valutare il suo ruolo agli scopi della progettazione dei sistemi di alimentazione.

LE ESPERIENZE HUMMER

Finalmente negli anni 90 R.Hummer sviluppò un provino in cui era possibile elaborare delle curve di analisi termica in contemporanea a quelle di espansione/ritiro lungo l'intervallo della solidificazione (Fig. 10).

Successivamente e per conferma produsse dei getti campioni (cubi di ca. 100mm di lato) alimentati per tempi crescenti giocando con colli di alimentazione a sezione progressiva (Fig. 11). Egli dimostrò che nel caso delle gs nelle forme a verde il ritiro in condizioni normali si protrae per ca. il 50% del tempo di solidifica-

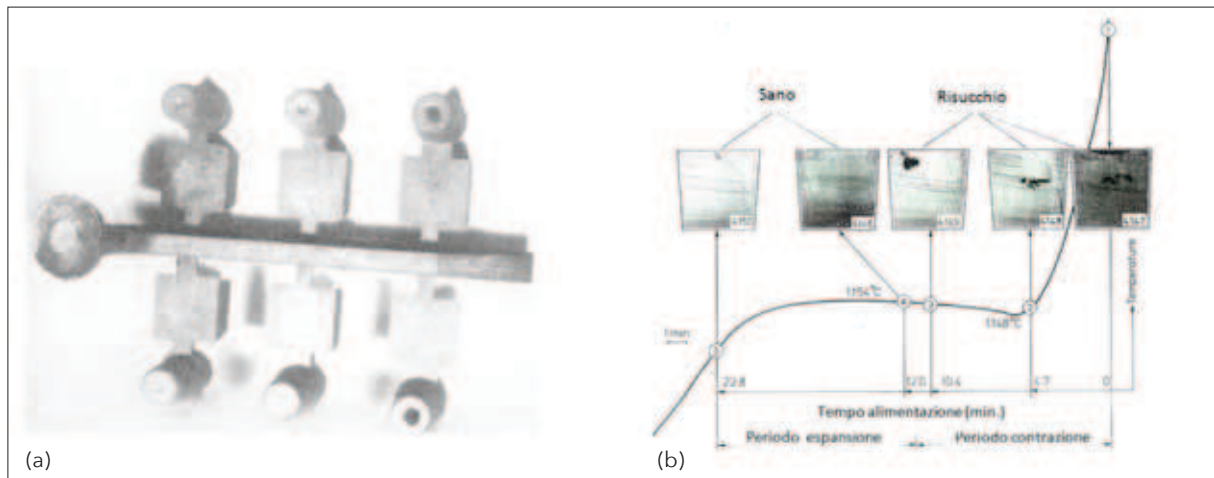


Fig. 11 - (a) I getti campioni con colli crescenti (b) risucchi e tempi di alimentazione (DX).

zioni del getto che in termini di moduli significa

$$\sqrt{0,5} = 0,7$$

Quindi il modulo del collo rappresenta il 70% del modulo del getto nel caso della formatura a verde. Il valore differisce non di poco rispetto a quello dedotto da Karsay (60% max.) che infatti non assicurava una costanza di risultati, salvo il caso di condizioni di produzione di ottimo livello.

La Fig.12 illustra un caso nella fabbricazione senza materozze di alberi a camme per autovetture Fiat prodotte a milioni sfruttando il sistema di colata presso lo stabilimento di Carmagnola non più esistente.

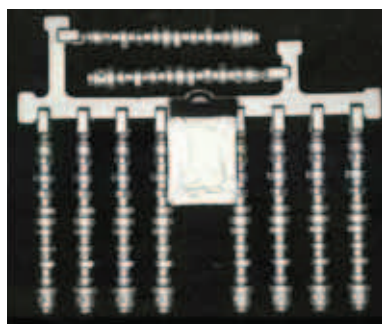


Fig. 12

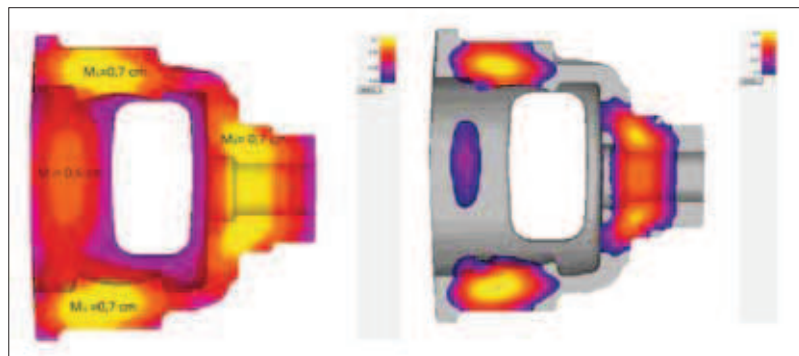


Fig. 13 - (a) - I moduli nel pezzo - (b) Moduli > 0,5 cm (SOLIDCast).

Una regola che si può desumere in questi casi è che la materozza opp. montante può alimentare indirettamente qualunque sezione del pezzo a patto che nessuna sezione nel percorso abbia un modulo inferiore a quello definito poco fa (Fig. 13). Tuttavia questa regola è valida per moduli inf. a 1,5 cm. Per valori maggiori l'alimentazione indiretta non funziona più ed è giocoforza necessario attaccarsi alla sezione più calda.

Nell'esempio di Fig. 13 - noti i moduli importanti del pezzo - si verifica l'eventuale collegamento termico fra di loro Mn: 0,5 cm (0,7x0,7 cm) che non esiste (DX). Quindi le 3 aree richiedono alimentazione separata.

Influenza della qualità metallurgica

L'analisi termica attraverso l'elaborazione della curva di solidificazione di raffreddamento in assenza di tellurio ci consente di valutare la qualità metallurgica (o capacità di autoalimentazione) del bagno in base a 4 parametri: il sottoraffreddamento, la recalescenza, la temperatura di fine solidificazione e l'angolo di chiusura a essa associato. Esperienza mostra che gli andamenti possono essere vari (Fig. 14). Tuttavia quella desiderabile è più vicina alla curva a sinistra dove i valori di sottoraffreddamento e recalescenza sono minimi. Inoltre la curva appare ben bilan-

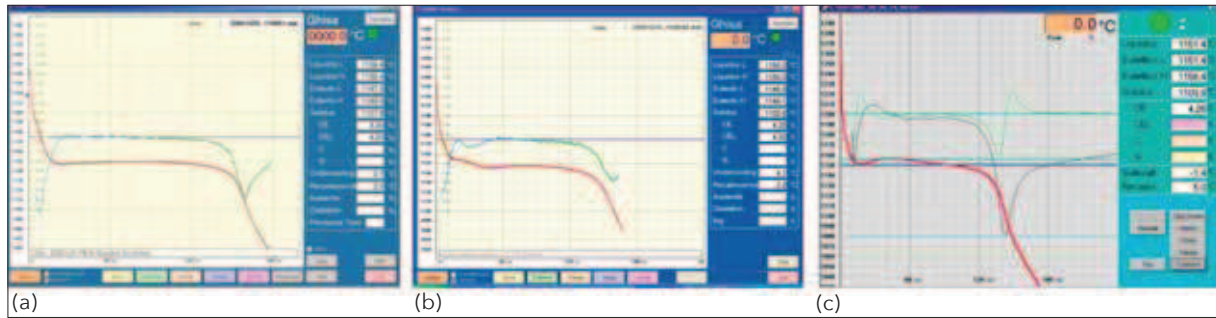


Fig. 14 - Alcuni dei diversi andamenti delle curve di raffreddamento trovati nella pratica (a) curva desiderabile (b) curva con Liquidus anomalo (c) curva con recalescenza prematura molto marcata.

ciata (vedi prima derivata) e la chiusura è buona. Le altre curve sono migliorabili attraverso una modifica della pratica metallurgica se si vogliono assicurare una maggiore costanza di risultati.

Le porosità e l'angolo di chiusura

L'angolo di chiusura della curva alla fine del processo è un indicatore della tendenza alla formazione di porosità o anche di microcavità che possiamo chiamare "Terziario" per differenziarlo da quello secondario dovuto al cedimento forma e quindi può affettare anche ai getti di grossi spessori prodotti in forme rigide. L'inoculazione finale con il prodotto giusto ha un ruolo molto marcato sia nel favorire la chiusura della curva che nel contrasto delle difettosità di questo origine.

STORIA CASO N.1

Si tratta di un particolare di oltre 100 kg di peso prodotto in forme a verde. Dopo la messa a punto e per un certo periodo non presentava alcun difetto di sanità. Tuttavia un giorno questo cominciò a manifestarsi in modo evidente (Fig. 15a). Furono fatti tentativi con maniche di altro tipo ma senza successo. Per ultimo si decise di adoperare una materozza in sabbia di diam. 180Φ che naturalmente non risolse (Fig. 15b).

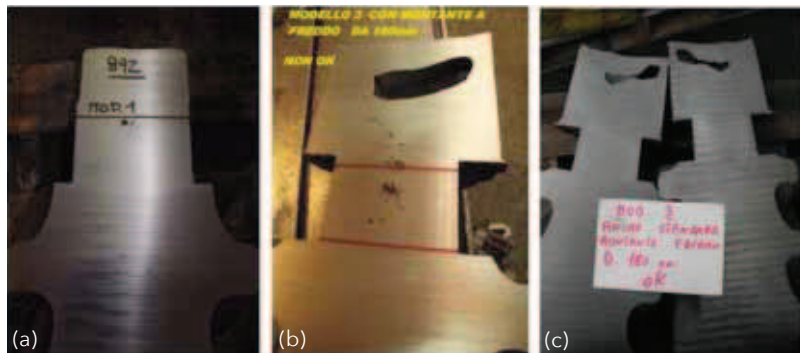


Fig. 15 - Il particolare in studio nelle 3 fasi di intervento.

Si decise ora di agire sulla metallurgia introducendo un richiamo di inoculazione in staffa con una pastiglia di 300 gr di un prodotto al cerio-bismuto (tipo SMW 605) che eliminò il difetto (Fig. 15c). Appare evidente dalla forma della cavità che il prodotto anche in piccola dose (0,1% max.) è riuscito a modificare l'andamento del ritiro.

L'effetto sulla curva viene invece illustrato in Fig.16 dove si mette a confronto sullo stesso bagno un prodotto tradizionale per l'inoculazione sul flusso ed il prodotto anzidetto. In Fig.16a a parità di aggiunta l'angolo VPS è di 40° che si può ritenere buono. In Fig.16b l'aggiunta di SMW 605 ha portato alla generazione di un angolo addirittura di 29°. Siccome il software in merito associa questo angolo al livello di sferoidizzazione, questo viene valutato come nullo nel secondo caso.

Influenza del magnesio e le terre rare

E' stato dimostrato che la sensibilità alla porosità aumenta con il crescere del Mg residuale. L'effetto si evidenzia nelle curve di analisi termica con un allargamento dell'angolo di chiusura al Solidus. Il residuale giusto non ha un valore assoluto ma dipende dal valore dello zolfo residuale. Infatti, la ghisa risulta completamente sferoidizzata per il rapporto: $\% \text{Mg} = \% \text{S} + 0,025\%$ a patto che lo zolfo non superi lo 0,015% (Fig. 17a). Eccessi oltre lo 0,04% non aiutano certo a ottimizzare la QM del metallo.

Le leghe sferoidizzanti contengono delle terre rare normalmente nell'ordine 0,7-2% (di cui il 50% è cerio) non solo per contrastare l'eventuale presenza di elementi di disturbo ma anche per affinare la struttura e conferi-

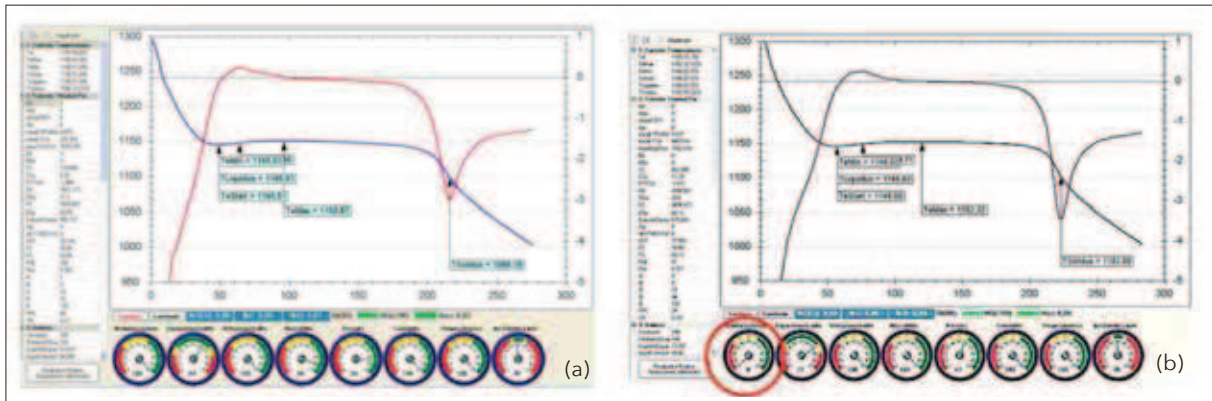


Fig. 16 - Curve relative al prodotto a base (a) Ca-Mn-Zr (b) SMW 605 al bismuto. Qui l'angolo è così chiuso da portare il software a ipotizzare che la ghisa non sia sferoidale (sotto il cerchio). Notare anche che l'angolo è legato alla velocità di raffreddamento al Solidus e si rapportano in modo inverso.

re caratteristiche di ritiro migliori (Fig. 17b). Questo è un dato asodato ed è nell'esperienza della fonderia. Le terre rare formano solfuri e ossidi che si ritiene agiscono come centri di nucleazione. Tuttavia è utile non esagerare specie con il cerio. Valori residuali superiori allo 0,010% peggiorano la tendenza ai ritiri.

Per questa ragione anche nella produzione di getti grossi è previsto un minimo di presenza di terre rare. Tuttavia un eccesso di cerio porta in questi casi alla formazione di grafite degenerata tipo Chunk o a pezzi che

però può essere contrastata con aggiunte di antimonio opp. di inoculanti con formulazione cerio-bismuto (ASK tipo SMW 605).

Influenza della temperatura

A riempimento del pezzo finito si formerà una crosta di spessore dipendente dalla temperatura di colata. Ovviamente più è bassa e maggiore è lo spessore. L'effetto di questa crosta è importante nel caso di getti a moduli bassi ($M < 1$ cm) come si evince dal grafico di Karsay di Fig. 7. Se osserviamo le

linee corrispondenti alle temperature più basse di colata, il rapporto Mcollo/Mgetto aumenta. In altre parole, le croste fungono come strozzature termiche.

STORIA CASO N.2

Una certa placca modello contenente 16 modelli era alimentata dalle due estremità con materozze calde dove si trovano le due masse termiche maggiori (moduli 0,92 cm e 0,72 cm) (Fig. 18a). Curiosamente i getti più vicini alla discesa risultavano difettosi con delle grosse cavità a cuore (Fig. 18b). Parallelamente le materozze nell'estremità piccola si

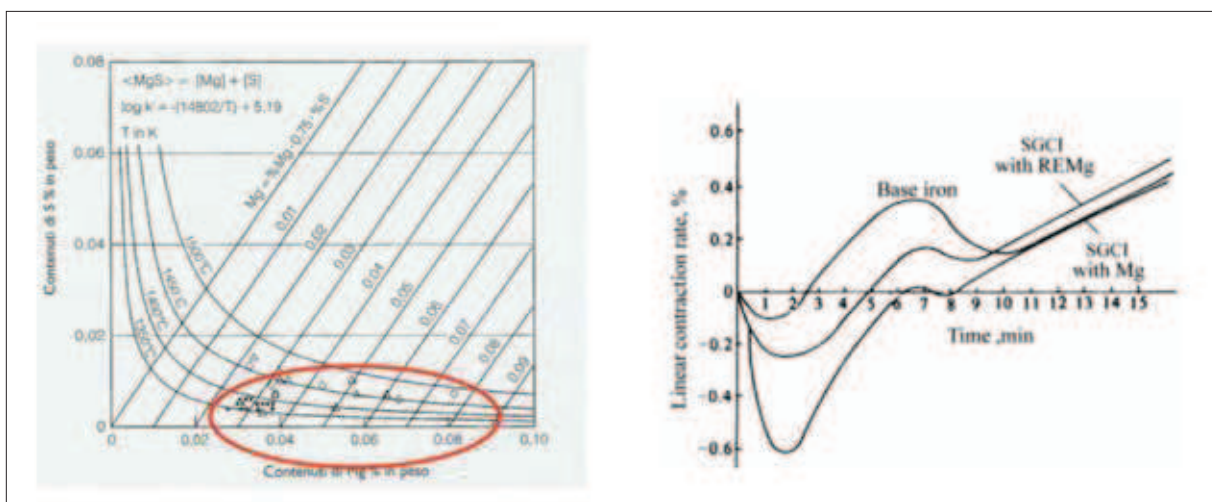
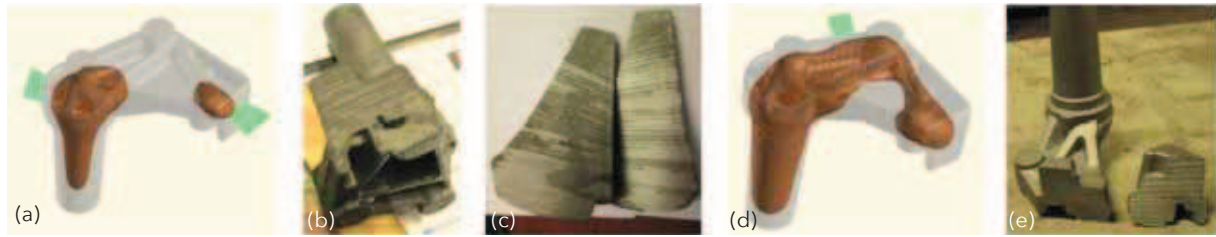


Fig. 17 - (a) Rapporto Mg-S nelle gs prodotte industrialmente (sotto il cerchio) (b) Curve di contrazione e dilatazione con l'impiego di leghe con e senza TR e raffronto con la ghisa base.



■ Fig. 18 - (a) Le 2 masse termiche del getto con gli ingressi in verde (b) il difetto (c) le materozze coniche (d) posizione dell'unico attacco (e) situazione dopo eliminazione della materozza.

presentavano immancabilmente sane. Un esempio in cui il pezzo alimenta la materozza. Il tutto suggeriva anche un'interazione tra le due materozze attraverso la sezione intermedia.

Vennero sostituite con materozze coniche ma il risultato non cambiò: queste risultavano sane (Fig. 18c). Oggettivamente la causa da ricercare era la maggiore temperatura di riempimento in questi getti. Dopo aver eseguito uno studio con il software SOLIDCast si decise di eliminare le materozze nelle estremità piccole ed i loro attacchi e spostare l'altro attacco nella zona centrale (Fig. 18d) in modo da irrobustire termicamente il collegamento termico così da applicare il principio anche ai pezzi posti distanti. I pezzi risultarono poi tutti sani (Fig. 18e).

Quindi, colare con temperature discendenti nei getti piccoli vuol

dire andare incontro a problemi di risucchio. La conclusione è quella di colare in questi casi a temperature possibilmente non inferiori a 1.420°C e curare naturalmente lo schema del sistema di colata.

L'influenza della temperatura di colata su materozze e maniche

Il ritiro liquido o primario è molto contenuto nelle gs: non supera il 2% e probabilmente si azzerava a 1.350°C. Ciò è ben evidenziato dalle minimaniche dove il ritiro netto viene evidenziato come una colonna di mercurio. Per questo motivo nella formatura a verde temperature relativamente basse (<1.380°C) sono foriere di risucchi a causa del malfunzionamento di materozze e qualche volta anche di maniche esoteriche che non si innescano per una temperatura di colata insuffi-

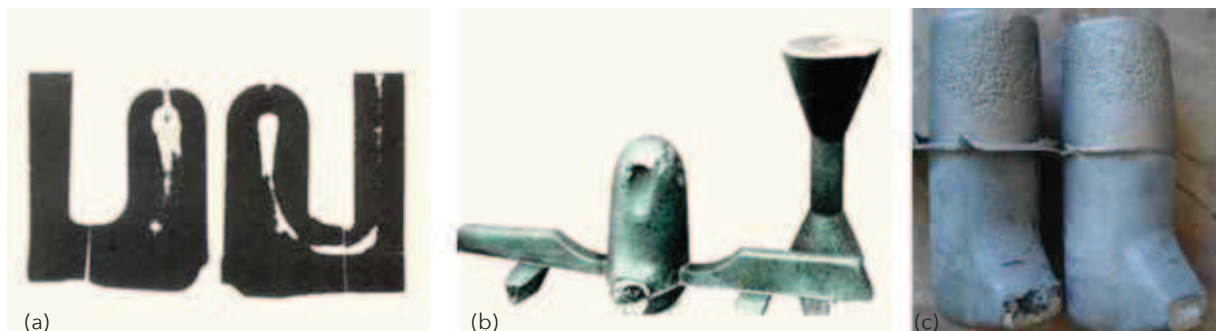
ciente. Se poi si adoperano attacchi di colata non sottili il gioco è fatto (Fig. 19).

Di qui la tendenza nelle gs di evitare le materozze tradizionali in sabbia. L'utilizzo di materozze coniche garantisce una maggiore affidabilità a patto di rispettare i canoni di progettazione. Tuttavia questi due tipi non sono affidabili nel caso di moduli maggiori a 1,5 cm. L'utilizzo di animette esoteriche Williams può essere di aiuto in certi casi (Fig. 20).

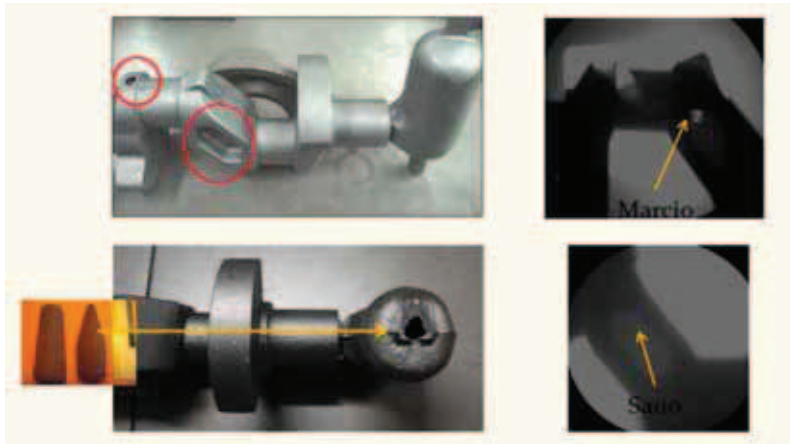
L'utilizzo dell'animetta Williams ha favorito l'innescò della materozza in sabbia consentendo l'eliminazione dei difetti sopra citati

Errato posizionamento di materozze

I montanti in genere anche se dimensionati correttamente possono dare luogo a difetti per un



■ Fig. 19 - (a) Radiografia di un gruppo materozza-getto in acciaio (b) caso di un getto in gs (c) maniche che hanno lavorato in modo irregolare malgrado le loro dimensioni



■ Fig. 20 - Il getto in alto presenta un ricalo esterno e uno interno evidenziati dalla radioscopia.

errato posizionamento, in quanto localmente possono generare dei punti caldi. Per cui questi vanno applicati vicini ai baricentri termici ma non in coincidenza di essi (Fig. 21).

Saturazione di anime e maschi in genere

Certi difetti non spiegabili possono essere relazionati alla presenza di fenomeni di saturazione termica e che si possono risolvere per questo solo con la simulazione. Nel caso di Fig.22, la porosità non risulta dalle minimaniche era da attribuirsi alla vicinanza di quella inferiore con il mozzo.

Conclusioni

I difetti di risucchio rappresentano una voce importante nell'elenco degli scarti specie nelle gs e quindi costituiscono una fonte di ritardi. Tutto questo va a detri-

mento non solo dei conti ma anche dell'immagine della fonderia.

Se consideriamo che la perdita secca per lo scarto in genere non sia inferiore a 1 euro/kg non risulta difficile valutare il costo di tale scarto, senza considerare poi eventuali costi di lavorazione addebitati nel caso di getti già consegnati.

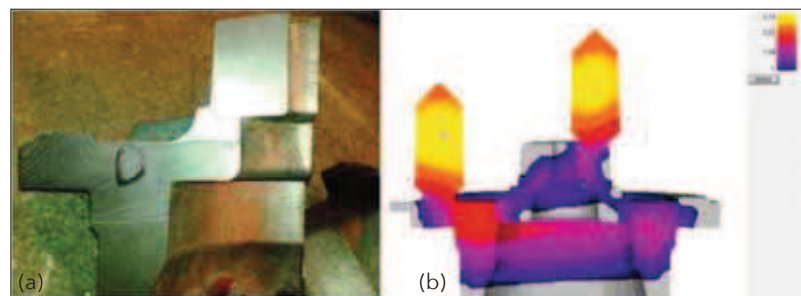
Nell'esperienza dell'autore i difetti hanno origine diverse, che riguardano sia la progettazione

delle attrezzature sia il controllo di processo, con il personale spesso ridotto all'osso. Per cui conviene rafforzare queste aree e naturalmente fornire al personale conoscenze e pratiche migliori.

E' necessaria una buona conoscenza della metallurgia come l'intendiamo oggi, che non è la mera ripetizione del diagramma Ferro-carbonio, sebbene esso rimanga come un riferimento metallurgico validissimo.

I software di simulazione hanno portato un grande beneficio nel facilitare l'analisi dei particolari. Tuttavia l'impostazione della soluzione, che rappresenta la fase complementare della soluzione, è spesso soggetta a criteri derivati più dall'esperienza non di rado elusiva che da una filosofia chiara e ferma. Quindi servirebbe organizzare dei corsi formativi in questo settore, per unificare criteri e trarre così un maggior beneficio da questi mezzi.

Julio Alva - Servizio tecnico Tesi SpA - Monza ■



■ Fig. 22 - Porosità generata dalla disposizione della manica inferiore e rilevata mediante simulazione (SOLIDCast).



■ Fig.21 - Esempi di difetti di risucchio a causa di un errato posizionamento delle alimentazioni.