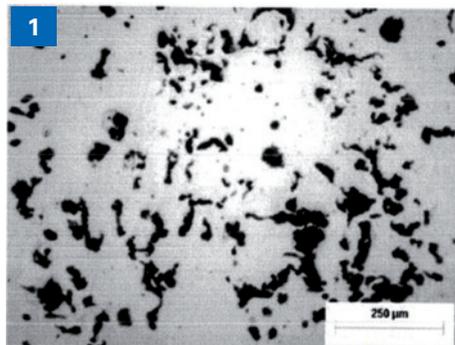


• Emanuele Savini

# LA GHISA A GRAFITE COMPATTA



**Fig. 1** Morfologia tipica dei "vermi" di grafite.

LE PROPRIETÀ DELLA GHISA A GRAFITE COMPATTA LA POSIZIONANO TRA LA GHISA TRADIZIONALE (ECONOMICA MA A BASSE PRESTAZIONI) E QUELLA SFEROIDALE (PIÙ COSTOSA), DALLA CUI LAVORAZIONE È STATA SCOPERTA. LE APPLICAZIONI POTENZIALI ENORMI SONO (PER COSTI E ALTRE PROPRIETÀ), TANTO DA RIUSCIRE TALVOLTA A CONTRASTARE L'ALLUMINIO IN APPLICAZIONI SPECIALI. NEL MONDO LA CONOSCONO SOLTANTO IN ALCUNE ZONE (IN ITALIA QUASI NESSUNO), MENTRE ALCUNI CI STANNO PUNTANDO UN PO' DI NASCOSTO. ECCO UN RIEPILOGO DI QUASI TUTTI GLI STUDI DISPONIBILI NEL NOSTRO PAESE, RILETTI IN MODO GLOBALE

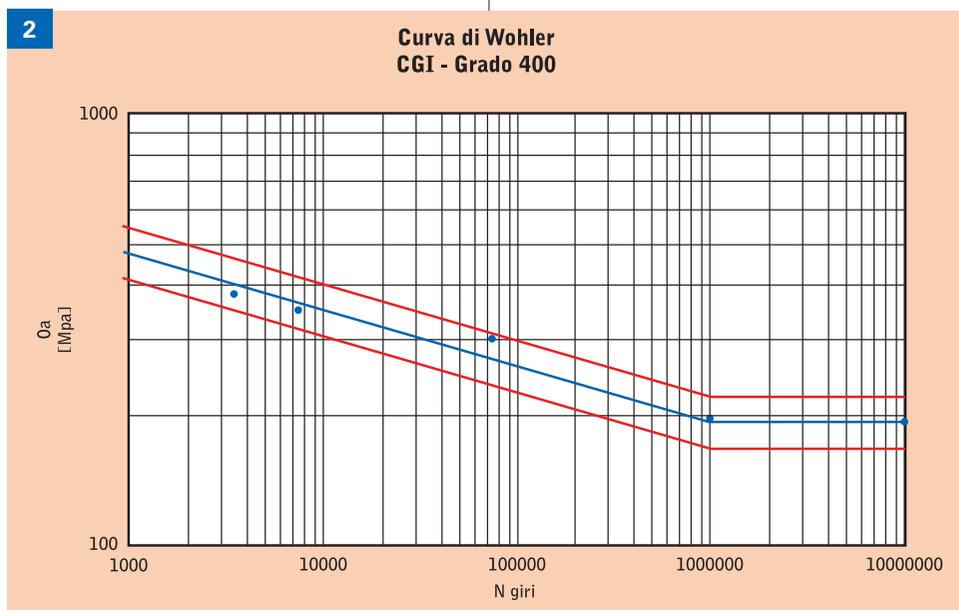
La ghisa a grafite compatta o "vermiculare" è nota nel mondo con l'acronimo CGI (Compacted Graphite Iron), ed è stata identificata con certezza nel 1965 [1]. L'appellativo "vermiculare" è riferito alla forma della grafite (fig. 1), la quale precipita in "vermi", ovvero lamelle grossolane e spesse, con punte arrotondate [2].

È la ghisa scoperta più di recente, peraltro a causa di non conformità nella produzione di ghisa sferoidale: come intuibile, risulta quindi possibile ottenerla adottando il medesimo processo di produzione di quest'ultima, con opportuni accorgimenti dei quali si parlerà in seguito.

## Gli impieghi

Al momento non esistono impieghi industriali di larga scala per quanto riguarda la ghisa compatta: basta considerare che i rapporti Censur [3] relativi alla produzione mondiale da fonderia non ne tengono conto, contrariamente alla ghisa grigia, sferoidale e malleabile.

In prospettiva, comunque, si ritiene che questo tipo di ghisa si potrà ritagliare uno spazio importante nel mercato, andando a colmare il gap di prestazioni esistente tra la ghisa lamellare e quella sferoidale. Infatti, pur mantenendo la colabilità e le ottime proprietà di smaltimento di calore della ghisa grigia, la CGI presenta una resistenza meccanica più vicina a quella della ghisa



**Fig. 2** Curva di Wohler relativa al materiale CGI Grado 400.

sferoidale, assumendo dunque caratteristiche intermedie tra le due tipologie.

Attualmente viene utilizzata principalmente per la produzione di lingottiere, dischi freno nel settore ferroviario, collettori di scarico, blocchi motore e teste motore [1]. In particolare, presenta caratteristiche che la rendono competitiva per utilizzi in campo motoristico, proprio per via della buona colabilità – dunque della possibilità di ottenere getti di forma complessa, come le testate dei motori – come delle proprietà termiche, delle buone capacità di smorzamento delle vibrazioni e della maggiore resistenza meccanica rispetto alla ghisa grigia... necessaria ad esempio nella realizzazione di motori Diesel ad alta prestazione, fortemente sollecitati [4, 11].

### Le caratteristiche

Come accennato in precedenza, le caratteristiche della ghisa a grafite compatta risultano intermedie tra quelle della ghisa sferoidale e quelle della ghisa grigia. A un incremento delle proprietà di resistenza meccanica ed all’impatto rispetto a quest’ultima, infatti, corrispondono una conduttività termica, una colabilità e un’attitudine all’assorbimento delle vibrazioni, maggiori di quelle proprie della ghisa sferoidale.

Risulta dunque evidente come tale tipo di ghisa possa colmare il gap prestazionale tra le due tipologie sopraccitate, con potenziale conquista di una importante fetta di mercato, non solo ai danni della ghisa grigia e sferoidale, ma andando a proporsi come alternativa per la realizzazione di componenti attualmente prodotti in lega leggera. Un raffronto esemplificativo tra alcune proprietà della ghisa grigia, sferoidale e compatta, per sottolineare quanto appena esposto, è riportata in [2].

A livello microstrutturale, la CGI presenta una struttura solitamente mista ferritico-perlitica – con rapporto perlite/ferrite influenzato dal tenore di manganese, e minore tendenza alla ferrizzazione rispetto alla ghisa sferoidale – con precipitazione di lamelle di grafite interconnesse, spesse,

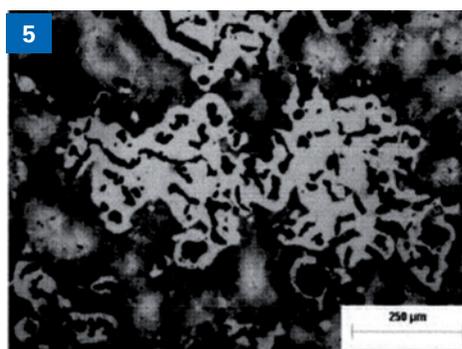
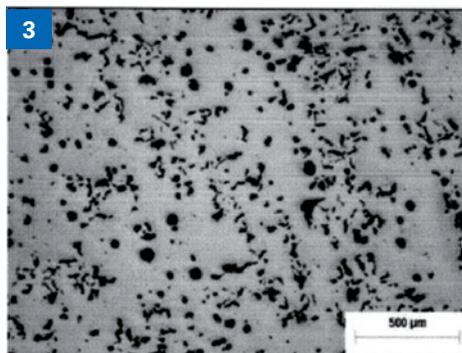


Fig. 3 Micrografia di una ghisa CGI, 50x.

Fig. 4 Micrografia di una ghisa CGI, 200x.

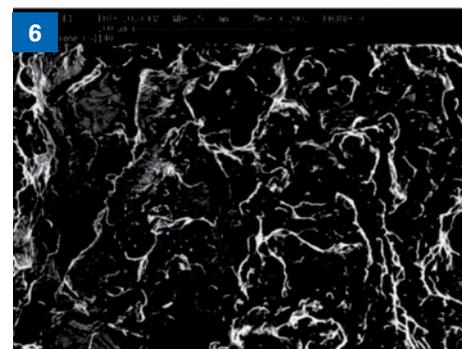
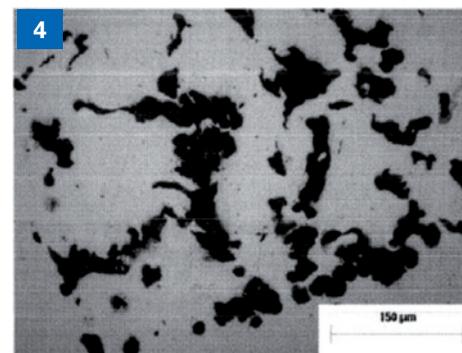
Fig. 5 Micrografia di una ghisa CGI, 100x, attacco Nital 2%.

Fig. 6 Immagine frattografica di una ghisa CGI, 200x.

di lunghezza limitata, contorte e dalle punte arrotondate (“vermi”). La percentuale minima di queste lamelle sul totale della grafite precipitata, per poter parlare di ghisa CGI, è stabilita pari all’80%.

La classificazione della ghisa compatta secondo la norma americana ASTM A 842-85, con specificazione dei valori minimi di resistenza a trazione, a snervamento ed allungamento per ciascuna tipologia, è mostrata in [5].

La tipologia ferritica 250 è ottenuta generalmente previo trattamento termico, mentre la tipologia perlitica 450 necessita come intuibile di aggiunta di elementi perlitizzanti, ma solitamente senza che risulti indispensabile effettuare trattamento termico [5]. Si noti, rispetto alla ghisa grigia, la discreta duttilità della ghisa compatta per la quale ha senso parlare di tensione di snervamento, sussistendo un valore della tensione in corrispondenza del quale si passa da una deformazione elastica ad una deformazione plastica. Relativamente all’allungamen-

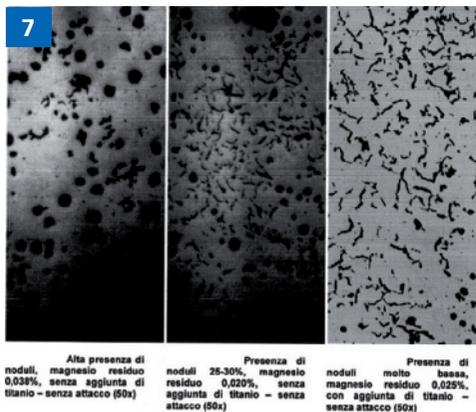


to, si precisa che, nel corso dell’esperienza di produzione di ghisa CGI effettuata presso la fonderia riminese SCM, sono stati misurati valori ben più elevati rispetto a quelli minimi stabiliti dalla norma con una media del 3,5% per i provini di tipologia CGI 400, del 6,82% per la tipologia CGI 300 e del 2,72% per la tipologia CGI 450 per i provini di [2, 6]. I valori medi della durezza per le varie tipologie definite nella norma sopraccitata sono riportati in [5].

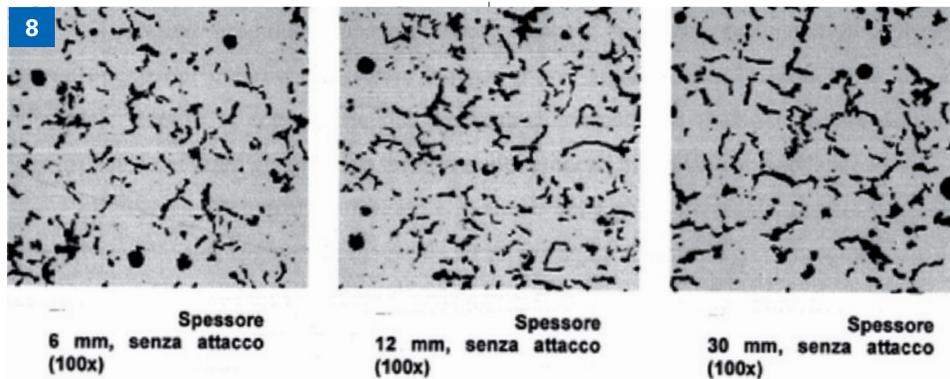
Anche in corrispondenza di cicli di sollecitazione, ci si aspetta che le prestazioni risultino intermedie tra quelle della ghisa grigia e quelle della ghisa sferoidale. Per una stima del comportamento a fatica della ghisa compatta, supponendo una sollecitazione a flessione, si riporta in **fig. 2** la curva di Wohler costruita dai risultati ottenuti sperimentalmente da provini di materiale CGI 400 [6, 10].

Considerando il valore medio di resistenza a trazione statica su 6 provini, ne è risultato un valore del rapporto di fatica  $k = 0,46$ , in accordo con la letteratura [4].

L’elevata conducibilità termica, vicina a quella della ghisa grigia, è uno dei punti di forza della ghisa a grafite vermicolare. Nelle misurazioni effettuate, tuttavia, tale pa-



rametro è risultato più vicino ai livelli della ghisa sferoidale – con una media di 28,52 W/(m\*K) – rendendo necessari ulteriori futuri accertamenti su un campione più numeroso, in aggiunta a eventuali modifiche sul sistema di rilevazione. Valori esemplificativi della conduttività termica riferiti a ghisa grigia, compatta e sferoidale sono mostrati nelle [2-9]. La velocità degli ultrasuoni, per una ghisa compatta conforme alla norma e priva di difetti, deve risultare superiore ai valori relativi alla ghisa grigia (sotto i 5000 m/s) e inferiore ai valori tipici della ghisa sferoidale (oltre i 5570 m/s). L'intervallo approssimativo di accettabilità, in corrispondenza di una percentuale di elementi vermicolari pari almeno all'80%, non è ben definito, tuttavia dovrebbe stabilirsi intorno ai 5000-5400 m/s [1, 6]. Nel corso dell'esperienza, si sono riscontrate velocità comprese per lo più nel range 5100-5500 m/s, con alcune eccezioni di valori fuori intervallo, come emerge dai risultati elencati in [6]. Infine, per evidenziare ancora una volta come la CGI presenti caratteristiche non solo meccaniche e fisiche, ma anche microstrutturali e morfologiche, intermedie tra la ghisa grigia e quella sferoidale, si riportano alcune immagini relative ad analisi micrografica e analisi frattografica di provini in ghisa compatta (figg. 3-6) [2]. Si noti come la superficie di frattura, nell'ultima immagine, appaia di tipo misto fragile-duttile, con presenza contemporanea di piani di clivaggio, indicativi di una frattura di tipo fragile, e micro vuoti, indicativi di una frattura di tipo duttile.



**Fig. 7** Esempificazione delle differenti morfologie della grafite al variare dei tenori di magnesio e titanio.

**Fig. 8** Morfologia della grafite in corrispondenza di vari spessori (cortesia SCM).

### La produzione

Come anticipato, la produzione della ghisa compatta può avvenire mediante i medesimi processi utilizzati per la ghisa sferoidale [7]. Un eccesso di zolfo prima del trattamento con lega di magnesio, o una contaminazione considerevole da parte di determinati elementi chimici, può infatti causare l'indesiderata precipitazione della grafite in forma vermicolare anche in corso di produzione di ghisa sferoidale.

Il controllo dei parametri di processo per ottenere ghisa compatta – con una percentuale di elementi grafittici vermicolari superiore all'80% – risulta comunque molto delicato; la mancanza di processi di produzione che garantiscano affidabilità e ripetibilità soddisfacenti è uno degli ostacoli principali alla rapida diffusione di questo tipo di ghisa nel mercato, in aggiunta alle criticità in fase di lavorazione. Risulterebbe inoltre certamente anti-economico affidarsi a processi di produzione brevettati.

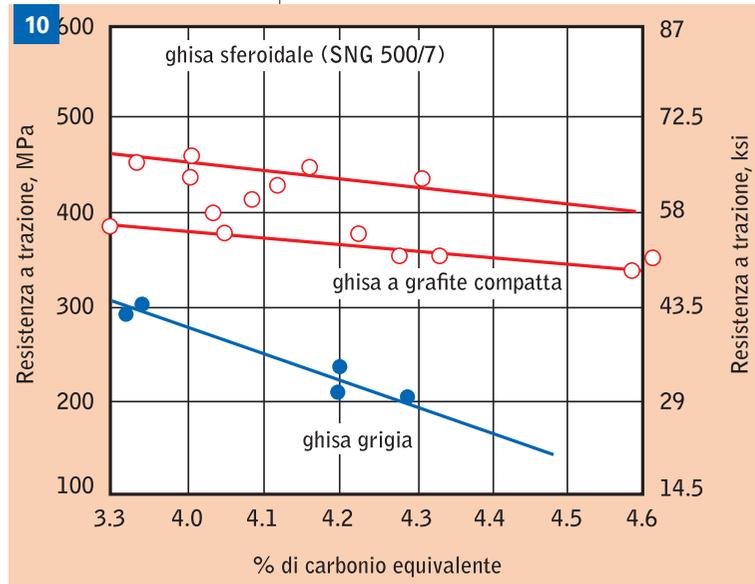
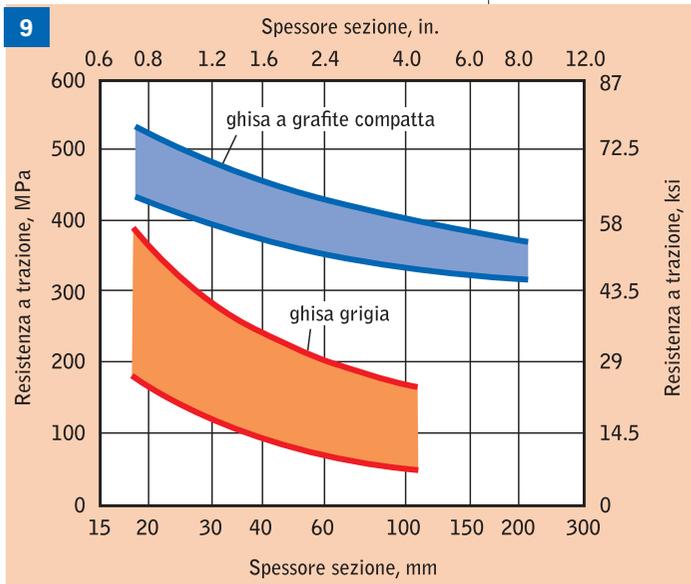
Necessari risultano la desolfurazione della ghisa liquida in caso il tenore di zolfo sia elevato – ad esempio tramite carburo di calcio, per le stesse motivazioni della ghisa sferoidale – e il trattamento con lega di magnesio (con metodo in-mold, a filo ecc.). La percentuale di magnesio residuo, per ottenere la tipologia vermicolare richiesta, dovrà essere compresa in un intervallo mol-

to stretto, indicativamente individuabile nel range tra 0,01% e 0,015%. Al di sotto dello 0,01% si registrerebbe la presenza di grafite in forma lamellare, mentre al di sopra dello 0,015%, approssimativamente, comincia il processo di formazione di sferoidi, che non renderebbero più possibile classificare la ghisa come compatta per una concentrazione di magnesio residuo dello 0,02% circa [1].

È possibile incrementare l'intervallo di accettabilità del tenore di magnesio residuo aggiungendo in post-inoculazione una lega di titanio, in quantità adeguata ma non eccessiva, in modo da contrastare l'effetto del magnesio senza incentivare la generazione di carburi, con peggioramento di lavorabilità; un tenore accettabile di titanio è ad esempio dello 0,1%, per un ulteriore effetto benefico, diminuendo l'evanescenza del magnesio, e consentendo al materiale di conservare le caratteristiche per intervalli piuttosto prolungati, anche di 15 minuti [2]. Le operazioni funzionali sono dunque le stesse della ghisa sferoidale (tra parentesi gli accorgimenti da adottare):

- trattamento di desolfurazione;
- trattamento con lega di magnesio (diminuendo la quantità di lega);
- adeguata inoculazione (eventualmente aggiungendo lega di titanio in post-inoculazione).

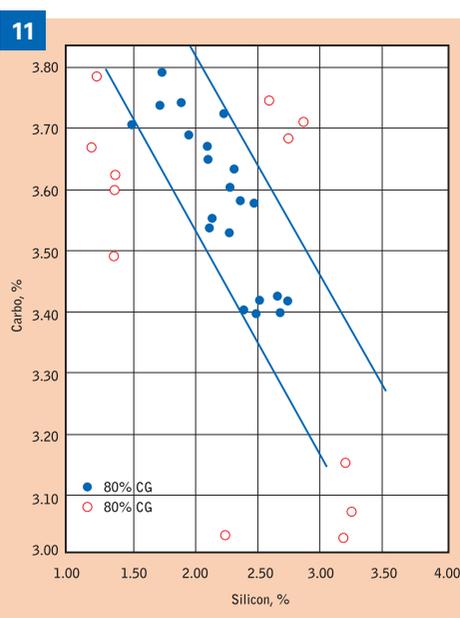
È possibile, come per la ghisa sferoidale, eliminare il trattamento di desolfurazione, accorpandolo a quello con lega di magnesio. Si precisa inoltre che si è considerato il trattamento con lega di magnesio in quan-



to maggiormente diffuso, essendo comunque possibile controllare la forma della grafite con altri materiali (es. terre rare).

Si riportano (fig. 7) micrografie esemplificative della variazione morfologica della grafite, in funzione dei corrispondenti tenori di magnesio residuo e titanio nella ghisa [4]. In [2] si mostra come siano stati ottenuti campioni di ghisa compatta imponendo una percentuale di titanio dello 0,1%, in corrispondenza di tenori accettabili di magnesio residuo fino allo 0,025%, con l'intervallo di accettabilità ampliato dunque per effetto dell'aumento della presenza di titanio. Ovviamente, qualora si decida di apportare lega di titanio alla ghisa, si dovrà fare attenzione a separare il bocchame affinché non venga caricato accidentalmente in corso di produzione, per evitare contaminazioni. Sono stati inoltre prodotti provini a gradini per testare l'effetto della velocità di raffreddamento sulla dimensione e forma degli elementi grafittici; il materiale si presenta piuttosto omogeneo, come in fig. 8 [4].

In caso di produzione senza aggiunta di lega di titanio, l'omogeneità risulta ben più complicata da ottenere: nelle sezioni di maggior spessore si riscontra più evanescenza del magnesio, con conseguenze evidenti sulla struttura. Velocità di raffreddamento troppo elevate – così come eccessiva inoculazione – possono comunque



**Fig. 9** Andamento della resistenza a trazione in funzione dello spessore della sezione, per CGI e ghisa grigia.

**Fig. 10** Resistenza a trazione in funzione del carbonio equivalente, per ghisa grigia, compatta e sferoidale.

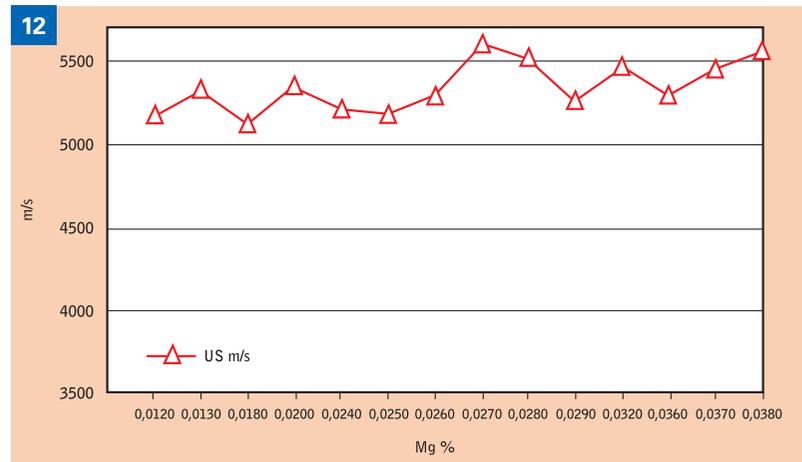
**Fig. 11** Range ottimale di carbonio-silicio per ghise a grafite compatta.

provocare un numero sovrabbondante di centri germinativi, dannoso per le proprietà del getto – analogamente a quanto accade per la ghisa sferoidale [8]. In corrispondenza di sezioni di spessori molto diversi tra loro, la resistenza a trazione può risultare dunque notevolmente diversa, come da

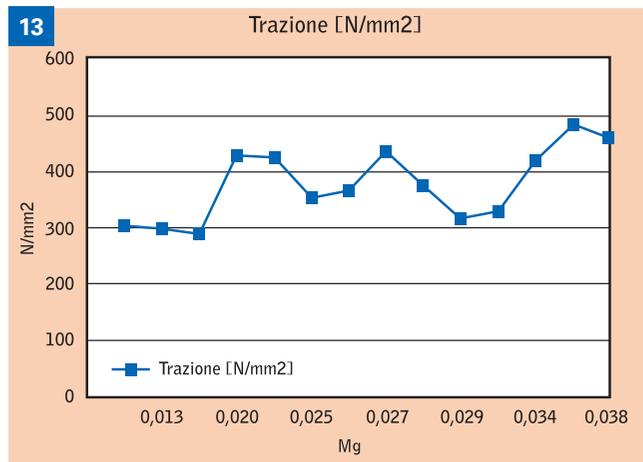
fig. 9, con anche un confronto con il comportamento della ghisa a grafite lamellare [6]. Ovviamente, anche la ghisa compatta mostrerà proprietà fortemente influenzate dalla composizione chimica, e grande attenzione andrà dedicata a questo. Molti elementi chimici presentano effetti analoghi a quelli ben noti relativamente alla ghisa sferoidale; se ne omette dunque una ulteriore completa trattazione, con l'esclusione di alcune importanti precisazioni.

In particolare, la fig. 10 mostra come aumentando il tenore di carbonio equivalente diminuisca la resistenza a trazione, in maniera simile a quanto accade per la ghisa sferoidale e – in misura maggiore – per la ghisa grigia [6]. Il tenore ottimale di carbonio equivalente dipende dalle dimensioni del getto; per sezioni di spessore compreso tra 10 e 40 mm, la concentrazione ottimale è generalmente pari al 4,3%. Un carbonio equivalente elevato, in presenza di alte temperature, aumenta la colabilità della ghisa [6]. Il rapporto tra carbonio e silicio, ottimale per ottenere ghisa compatta, è mostrato dal grafico di fig. 11.

Il manganese è generalmente presente in percentuali comprese tra lo 0,1% e lo 0,6%, in relazione al tipo di struttura della matrice desiderata, ferritica o perlitica [6]. Anche lo stagno, il rame e il molibdeno possono influenzare la microstruttura; esempi indi-



**Fig. 12** Variazione della velocità degli ultrasuoni in funzione della percentuale di magnesio residuo.



**Fig. 13** Variazione della resistenza a trazione in funzione della percentuale di magnesio residuo.

cattivi di concentrazioni utilizzate nella produzione di ghisa compatta sono lo 0,03-0,04% di stagno, lo 0,4-0,8% di rame e lo 0,3-0,5% di molibdeno. Analogamente a quanto valido per la ghisa sferoidale, il fosforo va contenuto il più possibile, a tenori minori dello 0,06%, per evitare cali di duttilità. Lo zolfo, dopo il trattamento con lega di magnesio, dovrà essere presente in concentrazioni minori dello 0,012% [6]. La CGI può essere ottenuta anche a partire da tenori di zolfo prima del trattamento pari allo 0,1% in assenza di desolfurazione, tuttavia in tali condizioni risulta più complicato centrare le concentrazioni residue adatte alla precipitazione della grafite in forma vermicolare. È dunque conveniente procedere a preventiva desolfurazione, abbassando il tenore di zolfo almeno sotto lo 0,03%.

In [4] si mostrano i risultati della caratterizzazione a fatica; si notino i tenori di carbonio equivalente, silicio, magnesio e titanio, coerenti con quanto sopra esposto. In [6, 12] si riporta un riepilogo dei provini prodotti, i primi con fusione in forno cubilotto e poi desolfurazione e trattamento con lega di magnesio, quelli contraddistinti dall'acronimo cgi prodotti con fusione in forno rotativo a metano, senza desolfurazione e con l'aggiunta in alcuni casi di lega di titanio [6, 13]. A partire da tali dati, si è studiata l'influenza della percentuale di magnesio sulla velocità degli ultrasuoni e sulla resistenza a trazione, come emerge dai grafici di **figg. 12-13**. L'andamento dei grafici indica un aumento generale delle due proprietà al crescere

della percentuale di magnesio, comunque con significative oscillazioni dovute anche all'effetto di altri elementi e parametri di processo. I dati più significativi sono stati raccolti in [6], da cui si è potuto calcolare la correlazione tra le percentuali di magnesio e zolfo e la velocità degli ultrasuoni nel materiale [6].

La relazione  $US (m/s) = 5116,447 + 17.351,86 Mg\% - 60.286,9 S\%$ , ottenuta

sperimentalmente, può essere molto utile nel determinare i tenori ottimali di magnesio e zolfo per produrre la ghisa voluta.

### Conclusioni

Risulta quindi evidente come la ghisa a grafite compatta abbia caratteristiche e potenzialità per ampliare prestazioni e impieghi delle ghise, e per ritagliarsi una fetta importante del mercato. Molta attenzione andrà dedicata ai parametri di processo. I progressi nel miglioramento della lavorabilità, inoltre, potrebbero presto eliminare un altro fattore attualmente di ostacolo a una decisa irruzione sul mercato della CGI [12]. ■

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Dispense tecniche redatte da SCM Fonderie di Rimini (l'azienda è a disposizione per ulteriori informazioni).
- [2] Valerio Castaldo, "Caratterizzazione termomeccanica e microstrutturale di getti in ghisa grigia, sferoidale e compatta," Tesi di Laurea con relatore E. Quadri, Università degli Studi di Ancona, Dipartimento di Meccanica, 2006.
- [3] Rapporti Census, [www.moderncasting.com/content/view/full/841/207](http://www.moderncasting.com/content/view/full/841/207).
- [4] Filippo Ventura, Tesi di Laurea con relatore E. Quadri, Università degli Studi di Ancona, Dipartimento di Meccanica.
- [5] ASTM A842-85 (Reapproved 1997), Standard Specification for Compacted Graphite Iron Castings.
- [6] Enrico Flamigni, "Processo di produzione di ghisa a grafite compatta (CGI), integrato con la produzione di ghisa sferoidale, mediante fusione al forno rotativo e trattamento con filo animato," Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Ancona, Dipartimento di Meccanica, 2009.
- [7] E. Flamigni, G. Pasini, Esperienza di produzione di ghisa a grafite compatta (CGI) mediante sottotrattamento di sferoidizzazione e post-inoculazione con lega contenente titanio, "La metallurgia italiana," 5/2004.
- [8] Ductile Iron Data for Design Engineers, [www.ductile.org/didata](http://www.ductile.org/didata).
- [9] E. Campagnoli, V. Castaldo, E. Flamigni, M. Marcantoni, E. Quadri, Caratterizzazione termica di getti in ghisa grigia, sferoidale e compatta, "Fonderia Pressofusione," ottobre 2007.
- [10] E. Flamigni, M. Marcantoni, E. Quadri, F. Ventura, Caratterizzazione meccanica di getti in ghisa a grafite compatta, "Fonderia Pressofusione," febbraio 2005.
- [11] E. Flamigni, La ghisa a grafite compatta, "Progettare," febbraio 2003.
- [12] Andrea Appiani, "Correlazione tra proprietà e struttura di una ghisa vermicolare," Tesi di Laurea, Relatore Giuseppe Silva, Politecnico di Milano, Polo Regionale di Lecco, Facoltà di Ingegneria Industriale, 2010.
- [13] D. Aquili, E. Flamigni, E. Quadri, M. Marcantoni, V. Castaldo, Esperienza di produzione di ghisa a grafite compatta mediante sottotrattamento di sferoidizzazione con filo, "Fonderia Pressofusione," settembre 2009.