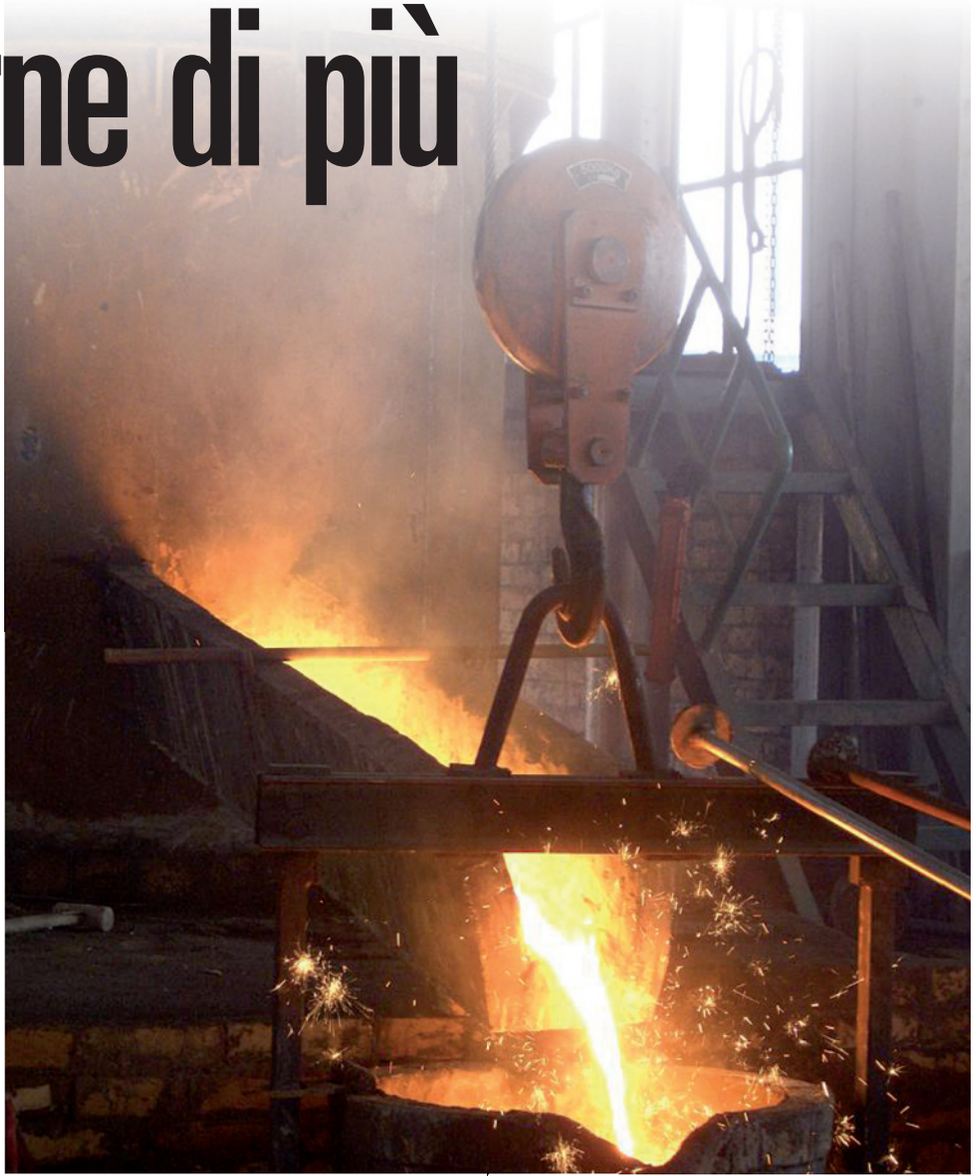
• Stefano Cucchetti

GRADO DI NODULARITÀ per saperne di più



APPROFONDIAMO L'ANALISI SULLA GHISA CHE GARANTISCE BUONE PRESTAZIONI A COSTI CONTENUTI, MOSTRANDONE LA VERSATILITÀ E LE DIVERSE CARATTERISTICHE CHE NE HANNO FATTO LA FORTUNA INDUSTRIALE

Nella ghisa sferoidale, quanto più gli elementi di grafite risultato assimilabili a sferoidi, tanto maggiore sarà il grado di "nodularità" della ghisa (in genere espressa in numero di noduli per unità di superficie). A parità di volume di grafite e numero di sferoidi per millimetro quadrato, a una maggior nodularità corrisponde una maggior resistenza a trazione e a snervamento. Riducendo il tenore di magnesio, la diminuzione delle proprietà meccaniche è meno marcata che aumentando la quantità di piombo: nel primo caso, infatti, gli elementi di grafite assumono forma irregolare, ma non degenerano nella "spiky graphite", promotrice di cricche, come avviene invece nel secondo caso, portando al relativo infragilimento del materiale.

La forma della grafite

Il grafico di **fig. 1** mostra il notevole calo di prestazioni per quanto riguarda la resilienza a temperatura ambiente di una ghisa ferritica, al diminuire della nodularità; l'incidenza sulla resilienza a bassa temperatura è al contrario molto contenuta. L'effetto della diminuzione di nodularità sulla resistenza a trazione e sulla resistenza a snervamento di una ghisa perlitica, a quantità di cementite costante, è mostrato nei grafici di **fig. 2**. Come appare evidente dai grafici, anche per questa tipologia di ghisa al diminuire della nodularità si riscontra una diminuzione delle caratteristiche meccaniche di resistenza. Inoltre, una forma degli elementi di grafite più irregolare porta a un minor allungamento, proporzionale alla differenza tra tensione di rottura a trazione e tensione di snervamento. Un effetto negativo, al diminuire della nodularità, si ha anche sul limite di fatica, come mostrato nel primo grafico di **fig. 3a**, riferito a provini intagliati e non. Al contrario, in corrispondenza di nodularità minori si hanno migliori prestazioni per quanto riguarda lo

smorzamento delle vibrazioni, come intuibile dalle caratteristiche della ghisa lamellare e come appare evidente dal successivo grafico di **fig. 3b**.
Generalmente si cerca di evitare problemi di resistenza dovuti ad irregolarità nella forma degli sferoidi, imponendo un percentuale minima di sferoidi sul totale degli elementi grafitici, solitamente pari o superiore all'85%; è possibile controllare la sufficiente sferoidizzazione della grafite tramite il controllo non distruttivo di velocità degli ultrasuoni. Per ottenere una buona ghisa sferoidale, è comunque fondamentale verificare il tenore di magnesio residuo; si deve inoltre cercare di mantenere controllati i tenori delle sostanze che possono favorire l'insorgere di elementi lamellari, od annullare il loro effetto tramite piccole aggiunte di cerio.

Numero di sferoidi

Le proprietà meccaniche della ghisa sono influenzate anche dal numero di sferoidi per millimetro quadrato. Generalmente, un valore alto di questo parametro è segnale di buona qualità metallurgica; allo stesso tempo, un numero troppo elevato può essere controproducente. Gli effetti del numero di sferoidi sulle proprietà della ghisa sono comunque meno evidenti di quelli relativi alla forma degli stessi; generalmente, si può affermare che un numero di noduli per millimetro quadrato più elevato favorisce una struttura più fine e omogenea, riducendo la formazione di carburi, perlite e la segregazione di elementi dannosi tra i grani. Inoltre, aumenta la nodularità, promossa dall'inoculazione utilizzata per favorire la formazione dei noduli, e diminuisce la dimensione media degli sferoidi, con conseguenti effetti benefici sulle proprietà tensili e sulla resistenza a fatica. Si evidenzia inoltre come un numero di sferoidi più elevato si otterrà in corrispondenza di velocità di raffreddamento maggiori. Un effetto di un forte aumento del numero di noduli per millimetro quadrato sui valori di resilienza di una ghisa ferritica è mostrato nella **fig. 4**. Si osserva come le prestazioni del materiale a temperatura ambiente calino drasticamente, mentre vengono incrementate quelle a bassa temperatura. Un ridotto numero di sferoidi per m2 favorisce inoltre un comportamento fragile, mentre l'aumento di questo valore incrementa la tenacità a frattura.

Dimensioni degli sferoidi e volume di grafite

La quantità di grafite nella ghisa aumenta, a silicio costante, al crescere del tenore di carbonio. Gli effetti di un incremento del volume di grafite sul modulo dinamico di elasticità, per una ghisa sferoidale perlitica, sono mostrati in **fig. 5**. Anche il tenore di grafite e la dimensione degli sferoidi sono fortemente influenzati dalle condizioni di raffreddamento del getto e dalle dimensioni dello stesso. In corrispondenza a velocità di raffreddamento minori e dunque dimensioni della sezione maggiori, sarà più elevata la quantità di grafite, concentrata in sferoidi di grandi dimensioni e numero contenuto, a scapito della cementite. La diminuzione del modulo dinamico di elasticità all'aumentare del tenore di carbonio,

1

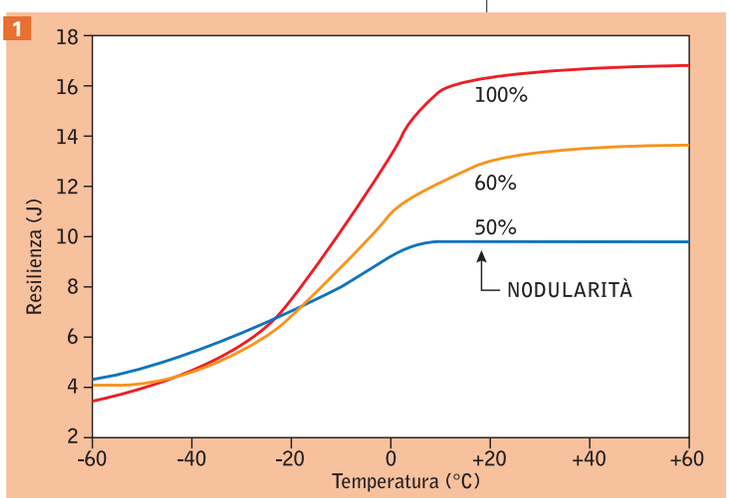
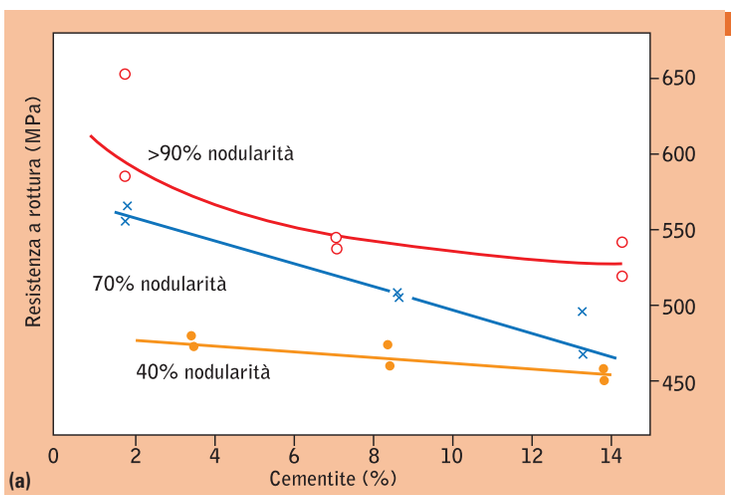
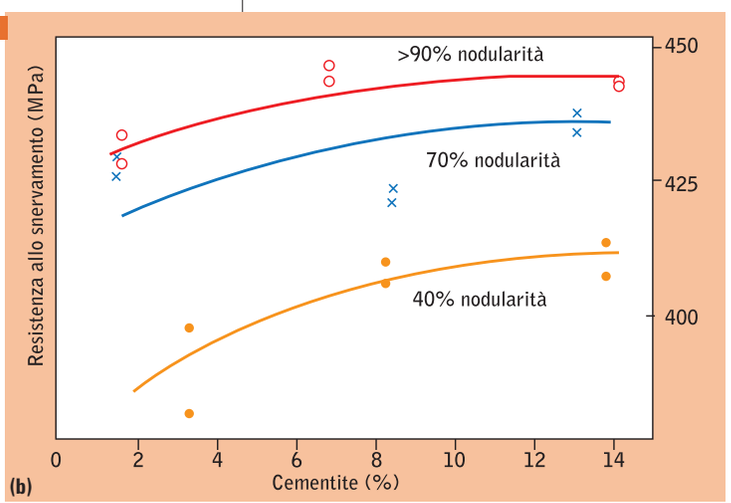


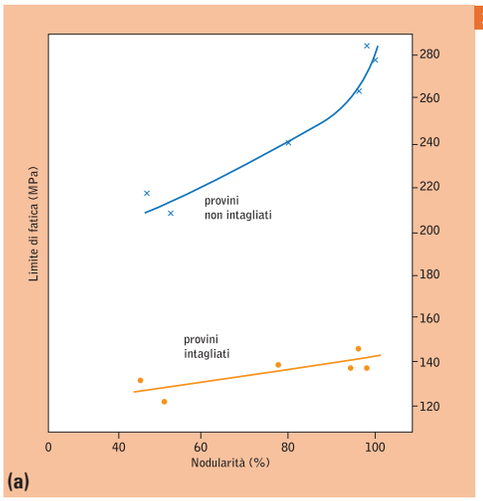
Fig. 1 **Variazione della resilienza in funzione della nodularità, per una ghisa sferoidale ferritica.**

Fig. 2 **Variazione di resistenza a trazione (a) e a snervamento (b) in funzione della nodularità, per una ghisa sferoidale perlitica.**



2





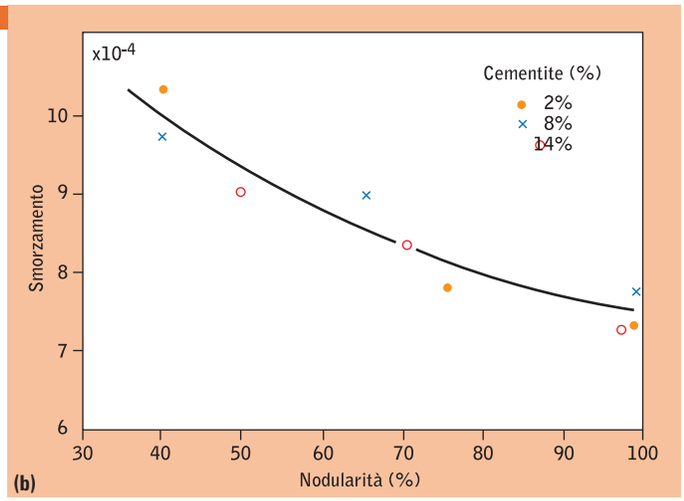


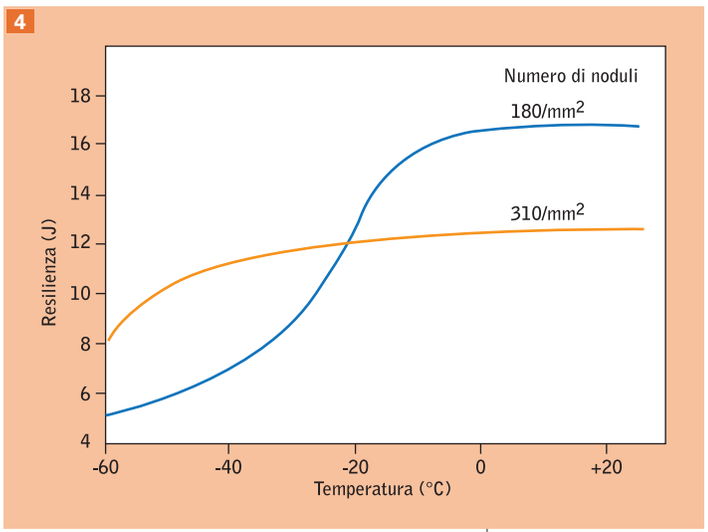
Fig. 3 Incremento del limite di fatica (a) e diminuzione delle proprietà di smorzamento (b) all'aumentare della nodularità in una ghisa sferoidale.

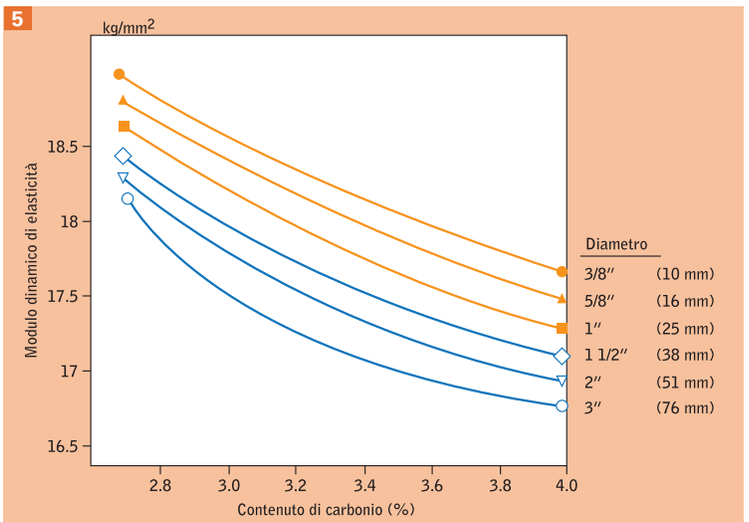
Fig. 4 Effetto di un forte aumento del numero di noduli sulla resilienza, per una ghisa sferoidale ferritica.

Fig. 5 Variazione del modulo di elasticità in funzione del tenore di carbonio, per una ghisa sferoidale perlitica.

Fig. 6 Effetto del contenuto di perlite su resistenza a trazione e a snervamento, allungamento e durezza Brinell.

Fig. 7 Variazione delle proprietà di smorzamento in funzione del tenore di carbonio, per ferrite e perlite.





mostrata nella figura precedente, è dunque indicativa anche dell'effetto su di esso dell'aumento delle dimensioni medie degli sferoidi. Noduli di piccole dimensioni contribuiscono inoltre a innalzare il limite di fatica e l'effetto è tanto maggiore quanto più alta è la durezza del getto.

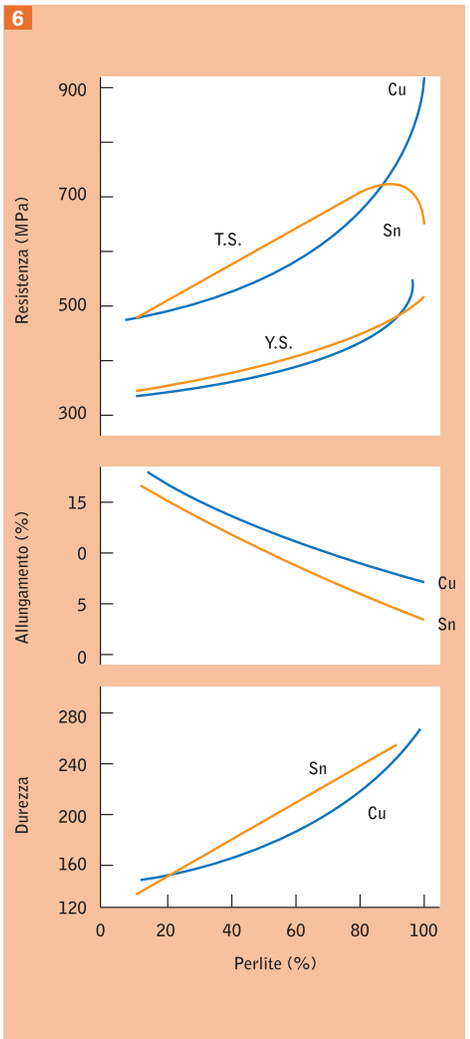
Carbonio Equivalente

Il carbonio equivalente (CE) è un parametro di controllo importante per la produzione di una ghisa sferoidale in linea con le caratteristiche desiderate. Per calcolarlo, sono state proposte diverse formule; una delle più utilizzate è quella che lo pone uguale alla somma della percentuale di carbonio e di un terzo di quelle di silicio e fosforo. Utilizzando la formula sopra descritta, un valore del CE pari a 4,3 (eutettico) viene ritenuto sufficiente ad ostacolare la formazione di carburi, responsabili di diminuzione della lavorabilità, deterioramento delle proprietà meccaniche ed aumento della durezza. Mantenendo un elevato valore del CE, infatti, aumenta il potere grafitizzante del bagno fuso, diminuendo di conseguenza la tendenza alla formazione di carburi. Valori eccessivi possono però portare alla degenerazione degli sferoidi in forme irregolari, mentre valori insufficienti possono causare ritiro di solidificazione eccessivo e, come detto, basso potere grafitizzante.

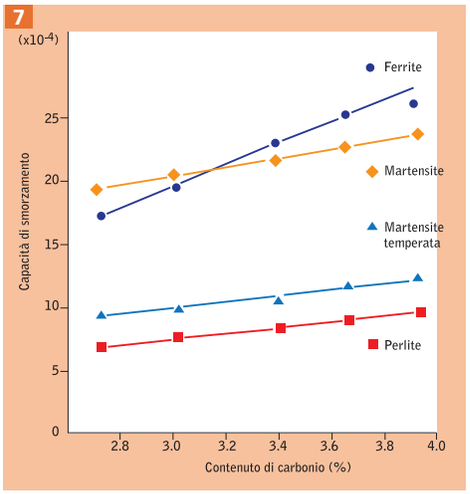
Combinando un elevato tenore di carbonio equivalente con basse velocità di raffreddamento, e dunque con sezioni di grandi dimensioni, può inoltre comparire il fenomeno del "galleggiamento" della grafite. Questo consiste nella formazione di ampi sferoidi che, durante la solidificazione, si concentrano sulla superficie del getto, diminuendo conseguentemente il volume di grafite al centro dello stesso. Si generano perciò disomogeneità nella lega che possono portare ad un degrado delle caratteristiche meccaniche desiderate. Questo fenomeno va quindi prevenuto, mantenendo un basso tenore di CE in presenza di getti con sezione di grandi dimensioni.

Presenza di cementite

Una maggior presenza di cementite, dura e fragile, porta a un aumento della tensione di snervamento e una diminuzione della tensione di rottura a trazione e del limite di fatica della ghisa; conseguentemente, si registra anche un calo dell'allungamen-



to. Inoltre, aumenta il modulo dinamico di elasticità e diminuisce la lavorabilità alla macchina utensile. Un tenore più elevato di cementite diminuisce inoltre ovviamente il volume di grafite: ne deriva una maggior probabilità di presenza di porosità interne, per via della riduzione dell'effetto di espansione dato, durante la solidificazione, dalla formazione della grafite. Per questi motivi, si cerca solitamente di contenere il tenore di cementite al di sotto del 5%, mantenendo basse concentrazioni degli elementi che ne possono favorire la formazione, anche mediante il controllo dei materiali di carica, ed aumentando il numero di noduli tramite inoculazione. Quando necessario, è possibile effettuare un trattamento termico per eliminare i carburi in eccesso.



La microstruttura

Ma ciò che più di ogni altra cosa influenza le caratteristiche meccaniche della ghisa, come detto in precedenza, è la struttura della matrice. In particolare, al variare del rapporto ferrite/perlite si possono ottenere materiali caratterizzati da elevata duttilità e tenacità, alto allungamento e bassa resistenza, e viceversa materiali con alta durezza e resistenza e bassa duttilità. E' possibile sottoporre i getti a trattamento termico, in base alle caratteristiche desiderate, per ottenere una matrice completamente ferritica tramite trattamento di ricottura oppure massimizzare il contenuto di perlite tramite trattamento di normalizzazione.

La struttura della matrice è condizionata dalla composizione chimica – gli effetti su di essa dei vari elementi chimici saranno trattati in successivo articolo – e dalla velocità di raffreddamento. A titolo esemplificativo, gli effetti del contenuto percentuale di perlite su resistenza a trazione, a snervamento, allungamento e durezza per provini di 25 mm di spessore sono mostrati in **fig. 6**. Risulta evidente come esista una forte relazione tra la perlite presente e le proprietà meccaniche della ghisa; positiva relativamente a resistenza a trazione, resistenza a snervamento e durezza, negativa relativamente all'allungamento. Si noti che, modificando il tenore di perlite per mezzo di aggiunte di lega rame-manganese o stagno-manganese, gli effetti sono analoghi per quanto riguarda resistenza a snervamento, allungamento e durezza Brinell, mentre la resistenza a trazione diverge in prossimità ed oltre i livelli necessari all'ottenimento di una matrice completamente perlitica: mentre il rame in eccesso contribuisce al rafforzamento della matrice, lo stagno è probabilmente responsabile della formazione di grafite intercellulare degenerata, causa per l'appunto del decadimento della resistenza a rottura. Al diminuire del rapporto ferrite/perlite si ha una diminuzione della resilienza misurata tramite pendolo di Charpy; il massimo di tale proprietà si verifica per una ghisa sferoidale a struttura completamente ferritica, al bisogno sottoposta a trattamento di ricottura. Inoltre, una matrice ferritica assicura generalmente una temperatura di transizione duttile/fragile ben minore di una perlitica, permettendo alla ghisa di mantenere buone caratteristiche di resilienza anche a basse temperature. Dal grafico emerge come, in presenza di specifiche relative alla resilienza a –20 o a –40 °C, la ghisa scelta dovrà essere quasi se non completamente ferritica (spesso con l'ausilio di un adeguato trattamento termico), e presentare dunque una resistenza a trazione che si aggirerà – secondo la norma UNI in vigore – intorno ai 350-400 MPa.

Dal grafico di **fig. 7** si evince al contrario come una struttura ferritica eserciti una migliore opera di smorzamento delle vibrazioni rispetto ad una perlitica. Questa proprietà è infatti generalmente penalizzata all'aumentare della durezza e viceversa per il tenore di carbonio. Si segnala però che, all'aumentare della tensione superficiale applicata, tale comportamento può ribaltarsi, e in presenza di sforzi elevati, una ghisa sferoidale perlitica può presentare migliori caratteristiche di smorzamento delle vibrazioni rispetto ad una ghisa sferoidale ferritica. Entrambe le tipologie mostrano comunque un comportamento di norma migliore rispetto agli acciai, pur non raggiungendo i livelli della ghisa grigia, il cui principale vantaggio in materia è fornito dall'azione delle lamelle di grafite. ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA