

Modellazione di processo, previsione di microstruttura e proprietà meccaniche di ghise sferoidali colate in sabbia

L. Ceschini, G. Minak, Al. Morri, An. Morri, L. Tomesani, N. Radovic, E. Salsi, R. Squatrito

Questo lavoro presenta i risultati di un'attività di caratterizzazione numerico-sperimentale di un processo di colata in sabbia di una ghisa sferoidale ferritico-perlitica. L'indagine si è avvalsa di un'attrezzatura di colata opportunamente progettata e realizzata per fornire moduli termici differenziati, tali da sottoporre il materiale a diverse condizioni di raffreddamento e solidificazione. Il sistema di colata è stato studiato mediante simulazione numerica, che ha permesso di replicare con adeguata accuratezza le condizioni di processo poi monitorate. Le caratteristiche microstrutturali sono state stimate attraverso modelli numerici implementati nel codice di calcolo PROCAST™ v.2011 per la previsione delle diverse microstrutture ottenute al variare delle condizioni locali di raffreddamento. La validazione delle simulazioni è stata effettuata comparando i dati ottenuti, con quelli ricavati da un accurato studio microstrutturale svolto su oltre 2000 micrografie ottiche, avvalendosi di un software di analisi d'immagine. Sono stati in particolare valutati: porosità percentuale, numero di noduli di grafite per unità di superficie, area media dei noduli, morfologia media dei noduli, frazioni grafite, ferritica e perlitica. Sono state quindi sviluppate relazioni empiriche in grado di permettere la valutazione delle proprietà a trazione del materiale noti i soli parametri microstrutturali ottenibili dalla simulazione numerica.

Keywords: ghisa, solidificazione, fonderia, getti, metallografia, prove meccaniche, modellazione, controllo processi, simulazione numerica

INTRODUZIONE

La ghisa, nonostante sia una lega ormai utilizzata da oltre un millennio, è un materiale che ha subito negli ultimi decenni una profonda evoluzione e rappresenta ancora oggi uno dei materiali più utilizzati nell'industria fusoria. Questa diffusione è legata sia alle peculiari proprietà tecnologiche e fisiche quali la buona colabilità, la ridotta contrazione volumetrica durante la solidificazione, la buona lavorabilità alle macchine utensili e l'elevata conducibilità termica, sia alle interessanti proprietà meccaniche e di resistenza ad usura. Tali proprietà possono inoltre essere modificate in un ampio intervallo, agendo su morfologia e distribuzione della grafite, oltreché su tipologia di matrice ottenibile direttamente nei getti o a seguito di idoneo trattamento

termico [1-3]. Nel caso di ghise a grafite sferoidale (GS), ad esempio, la microstruttura è determinata in parte durante la solidificazione (per quanto attiene a morfologia, dimensione e distribuzione della grafite) e in parte durante le trasformazioni allo stato solido (per la matrice), e può essere fortemente influenzata da diverse variabili, quali la composizione chimica, la velocità di raffreddamento, il metodo di post inoculazione. All'interno di applicazioni che vedono l'utilizzo della stessa lega, e all'interno dello stesso getto, a causa di diversi spessori e modalità di asportazione di calore, si possono avere velocità di raffreddamento molto diverse e quindi modalità di solidificazione che possono avvicinarsi a sistemi metastabili (solidificazione rapida, formazione di cementite, ghise bianche) oppure stabili (solidificazione lenta, formazione di grafite, ghise grigie). Si intuisce quindi come le condizioni di processo, influenzando le caratteristiche microstrutturali finali del getto colato, vadano ad indurre effetti significativi sulle proprietà meccaniche finali della ghisa.

L'incremento delle prestazioni meccaniche di un materiale come la ghisa non può limitarsi ad aspetti strettamente legati alla composizione chimica iniziale della lega ed ai suoi trattamenti di modifica, ma necessita di una sempre maggiore conoscenza delle condizioni del processo fusorio e dell'effetto che esse hanno sulla microstruttura finale. In aiuto a queste esigenze sono stati proposti negli ultimi de-

**L. Ceschini, G. Minak, Al. Morri, An. Morri,
E. Salsi, L. Tomesani**

*Università di Bologna, Dip. di Ingegneria Industriale DIN
V.le Risorgimento 2, 40136 Bologna - Italy*

N. Radovic, R. Squatrito

*Università di Bologna, Centro Interdipartimentale
Ricerca Industriale - Meccanica Avanzata e
Materiali (CIRI-MAM), V.le Risorgimento 2, 40136
Bologna - Italy*

cenni importanti sviluppi di modelli matematici, di carattere empirico-numerico, volti a prevedere le caratteristiche microstrutturali attese al termine della solidificazione di un getto. Questi modelli, oggi implementati sui principali codici di simulazione commercialmente disponibili, si affiancano agli strumenti di calcolo dei fenomeni di carattere termo-fluidodinamico del processo fusorio (dinamiche di riempimento della forma, velocità di raffreddamento locali e modalità di solidificazione), tenendo in conto anche aspetti più strettamente legati alla chimica e alla cinetica di trasformazione della microstruttura durante la solidificazione, come ad esempio i fenomeni diffusivi di alcuni elementi di lega. Validazioni di questi modelli numerici sono già state effettuate nel corso degli anni, prevalentemente in ambito accademico, mediante campagne sperimentali che hanno consentito di definire alcune costanti empiriche che compaiono nelle formulazioni analitiche presentate [5-9]. Risultano invece ancora poco indagate le loro applicazioni in ambito industriale, dove la variabilità delle condizioni di processo è legata ad un elevato numero di fattori, come ad esempio la dimensione e la variabilità degli spessori del getto, l'instabilità delle condizioni di processo ed evidenti difficoltà operative nella loro misurazione diretta.

In questo lavoro vengono presentati i risultati di un'attività di caratterizzazione numerico-sperimentale di un processo di fusione in sabbia di una ghisa sferoidale, condotta mediante l'impiego di una attrezzatura di colata in grado di riprodurre un adeguato campo di variabilità delle condizioni di processo e di consentire la loro misurazione diretta. Questa attività ha avuto un duplice scopo: da una parte la definizione, con adeguata affidabilità, di correlazioni empiriche tra proprietà meccaniche e parametri microstrutturali, dall'altra l'implementazione delle correlazioni empiriche ottenute su una base dati di parametri microstrutturali calcolati mediante simulazione numerica di un processo controllato.

MATERIALE E PROCEDURA SPERIMENTALE

Attrezzatura sperimentale, sistema di misura e simulazione numerica

L'attrezzatura di colata è stata progettata per garantire al suo interno una certa variazione delle condizioni di solidificazione e, di conseguenza, una certa variabilità delle caratteristiche microstrutturali e meccaniche dei provini da essa estratti. Il layout dell'attrezzatura prevede un sistema di colata (con bacino e canali di colata opportunamente dimensionati) che alimenta un grappolo di sette cubi di diverse dimensioni, aventi rispettivamente lato di 60, 75, 100, 120, 150, 180, 210 mm. Assieme ai cubi è stato poi inserito nell'attrezzatura anche uno scalino in modo da poter investigare un range ancora più ampio di velocità di solidificazione e raffreddamento. La Figura 1 riporta lo schema dell'attrezzatura che, per semplicità costruttiva, prevede un'alimentazione del grappolo in caduta e l'impiego di due filtri per ottenere un riempimento più omogeneo della motta.

La misurazione dei parametri di processo è stata effettuata tramite osservazione diretta delle diverse fasi del processo valutando tempi, temperature e modalità di esecuzione



Fig. 1 - Schema dell'attrezzatura sperimentale di colata

Figure 1 - Scheme of the experimental casting equipment

del travaso in siviera, dell'inoculazione, della sferoidizzazione e della colata. Mediante opportuna strumentazione si è inoltre provveduto a rilevare la composizione chimica della lega prima e dopo il trattamento di sferoidizzazione. In ultimo, si è fatto uso dell'analisi termica sia su provino campione che con misura diretta all'interno della staffa per acquisire le curve di raffreddamento della lega. La possibilità di disporre di misurazioni dell'andamento delle temperature in punti caratteristici del getto ha permesso di:

- Individuare, mediante misurazioni dirette, le dinamiche di trasformazione di fase nei punti sottoposti a misura, ottenendo riscontri in termini di temperatura e durata temporale delle trasformazioni eutettiche ed eutettoidiche.
- Definire le corrette condizioni al contorno e impostazioni di processo per le simulazioni numeriche, mediante confronto con i dati misurati nei punti di acquisizione.
- Impiegare i risultati numerici validati per poter disporre di informazioni sulle condizioni di solidificazione in tutti i punti del getto.

La temperatura all'interno del getto è stata misurata con termocoppie di tipo K (Chromel/Alumel) rivestite con materiale ceramico a base allumina, che presenta adeguate caratteristiche di resistenza meccanica ad alta temperatura, conduttività termica e stabilità chimica. Si sono realizzati rivestimenti di diverso diametro (Figura 2-a), proporzionati alle dimensioni dei cubi nei quali effettuare il monitoraggio delle temperature.

Le termocoppie sono state posizionate verticalmente in modo da effettuare la misura della temperatura al centro di ogni cubo del grappolo (Figura 2-b) e collegate tramite cavi compensati ad un multimetro digitale dotato di scheda multiplexer a 16 canali. L'acquisizione delle curve di raffreddamento è stata effettuata fino alla fase di defestatura (35 ore circa).

L'attività sperimentale ha previsto complessivamente la realizzazione di tre colate in ghisa sferoidale, di cui due monitorate secondo le modalità descritte ed una terza da destinare all'estrazione del materiale per le caratterizzazioni meccaniche e microstrutturali. La realizzazione delle colate è stata inoltre accompagnata da:

- Analisi chimiche tramite quantometro su provini di materiale estratto da siviera, prima e dopo il trattamento di sferoidizzazione.
- Analisi termica mediante sistema ITACA™ v.7 su provino campione prelevati dalla siviera nell'istante immediata-

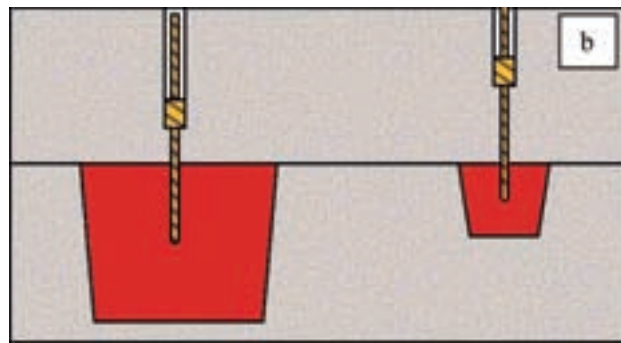
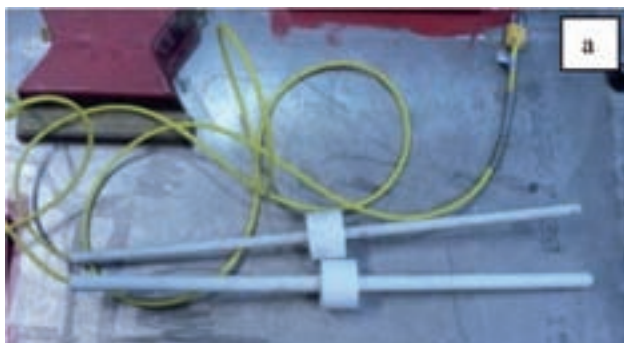
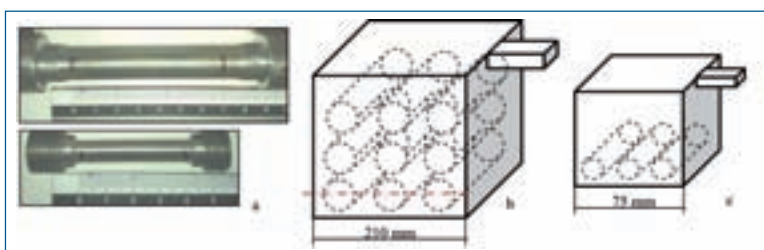


Fig. 2 - Rivestimenti a base di allumina realizzati sulle termocoppie (a) e schema di posizionamento delle stesse nella motta (b).

Fig.2 - Alumina based coatings on the thermocouples (a) and scheme of their positioning in the mould (b).

Fig. 3 - Provini utilizzati nei test di caratterizzazione meccanica (a) e schemi di estrazione dei provini da due cubi di diverse dimensioni: 210 mm (b) e 75 mm (c).

Fig.3 - Specimens used for hardness and tensile tests (a) and scheme of their extraction from two different size cubes: 210 mm (b) and 75 mm (c).



mente precedente la colata.

- Simulazione numerica mediante codice di calcolo PROCAST™ v.2011, impiegando il modello di previsione delle caratteristiche microstrutturali accoppiato al database di calcolo delle caratteristiche termofisiche di lega COMPUTHERM™ [10].

PROVE MECCANICHE ED ANALISI MICROSTRUTTURALI

La composizione chimica dei getti analizzati è riportata in Tabella 1. Dai cubi prodotti sono stati estratti 35 campioni di trazione di sezione circolare, con diametro variabile tra i 14 ed i 5 mm a seconda della dimensione del cubo e secondo quanto riportato dalla norma UNI EN 1563:2009. In funzione della dimensione dei vari cubi ed evitando l'estrazione di campioni da zone affette da probabile ritiro o porosità, sono stati estratti da un minimo di 3 ad un massimo di 9 campioni per cubo. La Figura 3 riporta un esempio dei provini utilizzati nei test di caratterizzazione meccanica (Figura 3a) e gli schemi di estrazione dei provini da due cubi di diverse dimensioni (Figure 3b e 3c). Le prove di trazione sono state eseguite secondo norma UNI EN 10002-1 su una macchina idraulica. Prove di durezza Brinell sono state eseguite preliminarmente su ogni provino in accordo alla norma ASTM E 10 - 08 con sfera da 2.5 mm di diametro e 62.5 kg di carico.

Le analisi metallografiche sono state eseguite in corrispondenza della mezzeria di ogni campione di trazione. I campioni metallografici estratti sono stati inglobati in resina, spianati con carte abrasive, lucidati con pasta diamantata in accordo alla norma ASTM E3. Dopo analisi metallografica sono stati sottoposti ad attacco chimico (Nital2) per evidenziare i costituenti della matrice metallica, come previsto dalla normativa ASTM E883. L'analisi d'immagine condotta secondo quanto indicato nelle norme ISO 945-1:2008, ISO 16112:2006 ed ASTM A247-10 è stata volta alla determinazione di: nodularità della grafite (N [%]), numerosità di noduli (NC [mm²]), loro area media (NA [μm²]) e frazioni di grafite (G [%]), ferrite (F [%]) e perlite (P [%]). Per stabilire le correlazioni tra parametri microstrutturali e proprietà meccaniche si è fatto uso di matrici di correlazione [11] ed analisi di regressione non lineare a variabili multiple. In funzione dei risultati espressi dalle matrici di correlazione, sono state definite le variabili di input per l'analisi di regressione condotta tramite il software XLstat™.

RISULTATI

Proprietà meccaniche ed analisi microstrutturali

Le analisi metallografiche in microscopia ottica hanno evidenziato una microstruttura caratterizzata da una buona sferoidizzazione della grafite e una matrice perlitico-ferrite.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Mg	Sn	Ti	Pb	Al	Zn
3.70	2.65	0.276	0.036	0.002	0.060	0.083	0.077	0.002	0.049	0.011	0.033	0.007	0.011	0

Tab. 1 - Composizione chimica (% in peso) della lega utilizzata

Table 1 - Chemical composition (wt.%) of the ductile iron object of this study

Dimensione cubo	Caratteristiche Microstrutturali						Proprietà Meccaniche				
	G %	F %	P %	NA μm^2	NC mm^{-2}	N %	HB -	Rm MPa	Rs MPa	A% %	E GPa
210 mm	10.4	46.3	43.2	2576	41	64	171	503	310	9.3	172
180 mm	8.1	50.9	41.1	1725	47	71	173	518	329	11.3	168
150 mm	9.1	45.0	45.9	1931	47	71	182	552	345	11.9	171
120 mm	10.9	33.4	55.8	2139	51	83	183	576	361	9.7	174
75 mm	7.6	24.0	68.4	1455	52	82	205	663	385	9.2	169

Tab. 2 – Risultati medi della caratterizzazione microstrutturale e meccanica condotta sui provini di trazione estratti da ogni cubo dove: G = Frazione grafitica percentuale; F = Frazione ferritica percentuale; P = Frazione perlitica percentuale; NA = Area media dei noduli; NC = numero di noduli di grafite per mm^2 ; N = nodularità della grafite; HB = durezza Brinell; Rm = tensione di rottura; Rs = tensione di snervamento; A% = allungamento percentuale a rottura; E = modulo elastico.

Table 2 - Average results of microstructural and mechanical characterization carried out on tensile specimens extracted from each cube where: G = percentage fraction of graphite, F = percentage fraction of ferrite, P = percentage fraction of perlite, NA = average area of the graphite nodules, NC = graphite nodules density [mm^2], N = graphite nodularity, HB = Brinell hardness, Rm = ultimate tensile strength, Rs = yield strength, A% = elongation to failure, E = Young Modulus.

tica (Figura 4). I dati ottenuti hanno permesso di correlare la velocità di raffreddamento dei vari cubi con la dimensione e la morfologia degli sferoidi di grafite, nonché con la frazione di costituenti della matrice. In particolare, all'aumentare della velocità di raffreddamento (al ridursi della dimensione dei cubi) si è rilevato un incremento del numero di sferoidi (da 32 mm^{-2} a 67 mm^{-2}), una riduzione delle loro dimensioni (da 3500 μm^2 a 1200 μm^2) e un aumento della frazione perlitica (da 34% al 70%) della matrice. In Tabella 2 sono riportati i valori, mediati per ciascun

cubo, di tutte le caratteristiche microstrutturali analizzate, assieme ai dati relativi alla caratterizzazione meccanica. E' chiaramente visibile come i campioni estratti dai cubi di dimensioni inferiori, aventi una matrice prevalentemente perlitica e sferoidi di dimensioni inferiori, abbiano mostrato una maggiore durezza e resistenza ma minore duttilità.

Correlazioni sperimentali tra caratteristiche meccaniche e microstrutturali

La disponibilità di correlazioni attendibili fra le principali

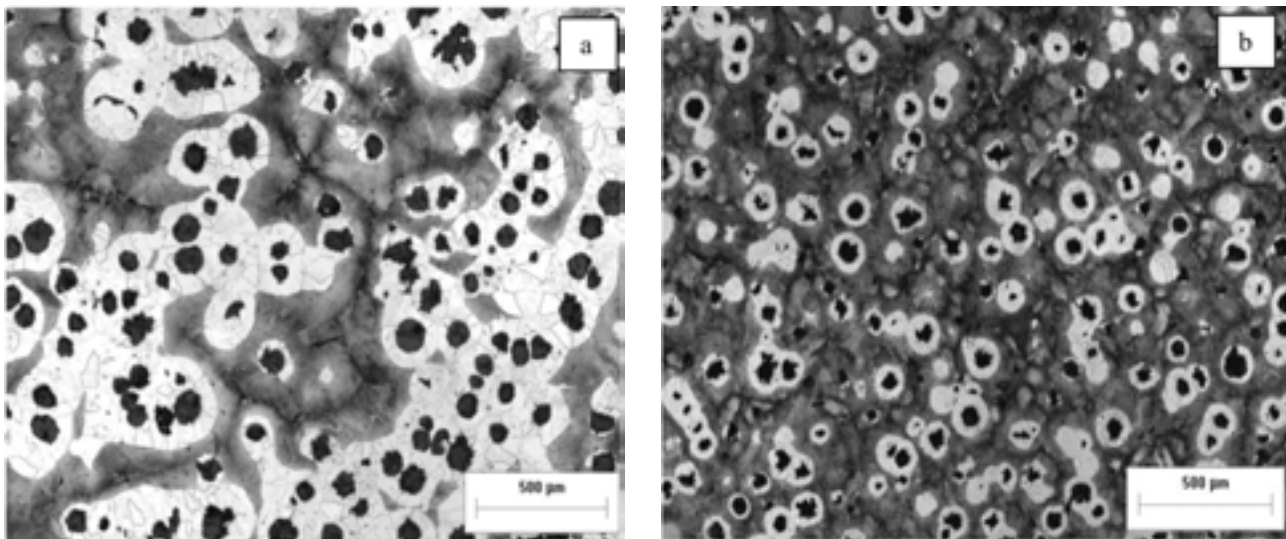


Fig. 4 - Microstrutture caratteristiche: (a) del cubo in ghisa sferoidale di lato 210 mm avente sferoidi di grosse dimensioni ed un elevato rapporto fra ferrite e perlite; (b) del cubo di lato 75 mm caratterizzato da sferoidi di piccole dimensioni ed un basso rapporto fra ferrite e perlite (b).

Fig. 4 - Typical microstructures: (a) of the 210 mm edge ductile iron cube with large graphite nodules and high ferrite to perlite ratio; (b) of the 75 mm edge ductile iron cube with fine nodules and low ferrite to perlite ratio.

caratteristiche microstrutturali del getto e le sue proprietà meccaniche è fondamentale per valutare preventivamente, già in fase di simulazione numerica di processo, la resistenza puntuale del getto stesso. Questo consente di ridurre i tempi di progettazione, garantendo al contempo un'elevata affidabilità ed ottimizzando la scelta del materiale in funzione del processo tecnologico e viceversa. L'attività sperimentale condotta ha avuto l'obiettivo di definire correlazioni empiriche (eq. 1-4) in grado di fornire i valori di durezza (HB), tensione di rottura (Rm), tensione di snervamento (Rs) ed allungamento percentuale a rottura (A%), in funzione delle caratteristiche microstrutturali quali la frazione di ferrite (F), il numero di noduli grafitici per mm²

(NC), la loro area media (NA) e la nodularità della grafite (N), determinati attraverso le analisi microstrutturali.

$$HB = 178,1 + 988,2 \cdot F^{-0,944} - 6,1 \cdot NA^{0,291} + 7 \cdot N^{0,320} \quad (1)$$

$$Rs = 374,1 + 1888,6 \cdot F^{-0,964} - 6,1 \cdot NA^{0,295} + 1,8 \cdot NC^{0,758} - 976,1 \cdot N^{-0,639} \quad (2)$$

$$Rm = 623,6 + 4311,4 \cdot F^{-1,065} - NA^{0,613} + 81 \cdot NC^{0,101} - 4693,5 \cdot N^{-0,776} \quad (3)$$

$$A\% = 1,1 + 0,8 \cdot F^{0,371} \cdot NC^{0,260} \quad (4)$$

In Figura 5 sono riportati i grafici di confronto fra i valori di durezza, resistenza a snervamento e trazione ed allungamento a rottura, ottenuti sperimentalmente ed attraverso l'applicazione delle relazioni empiriche. Questi evidenziano

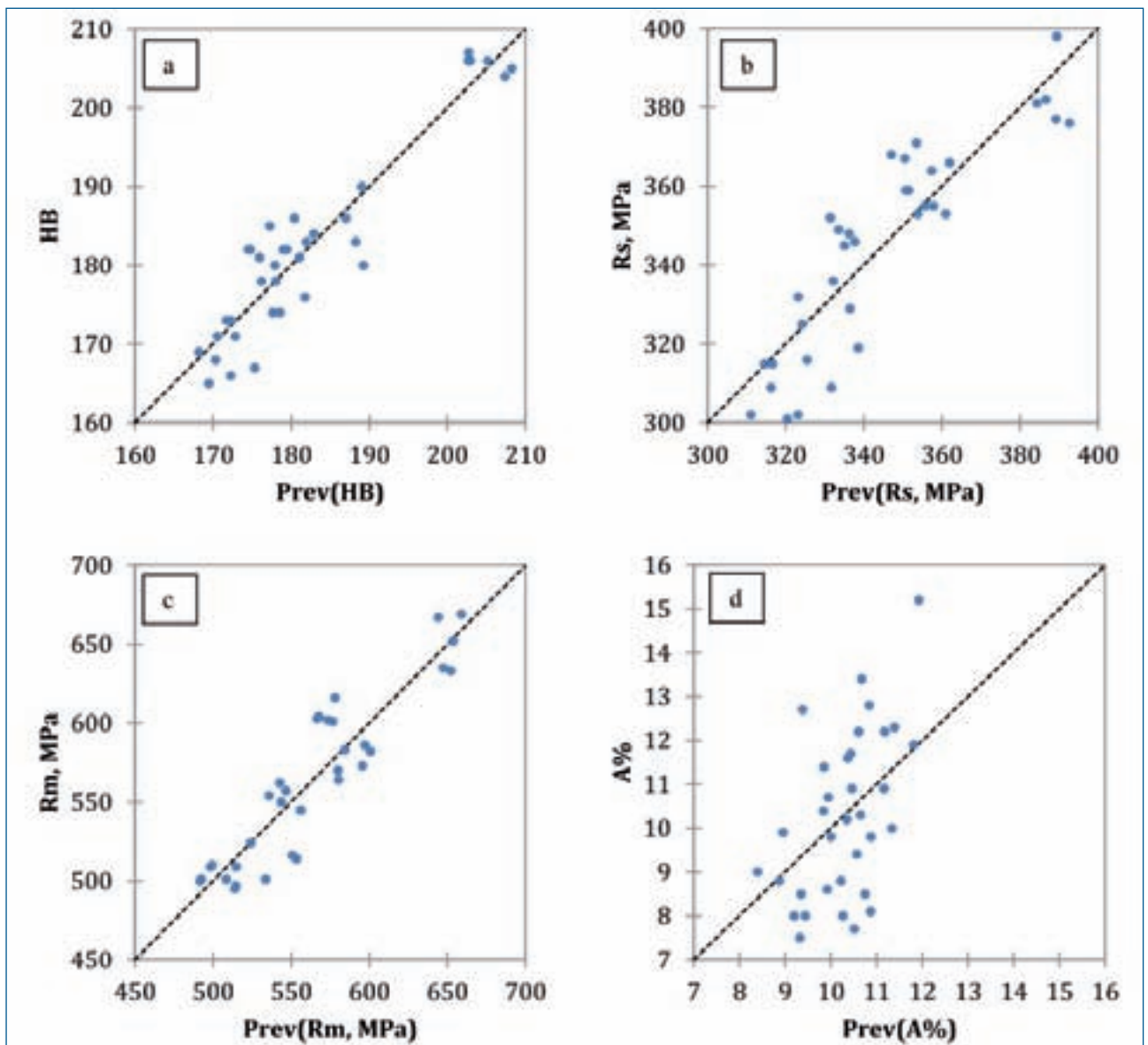


Fig. 5 - Confronto fra le proprietà meccaniche misurate sui provini e quelle previste attraverso i modelli empirici elaborati (Eq. 1-4): (a) durezza, (b) tensione di snervamento, (c) tensione di rottura, (d) allungamento percentuale a rottura.

Fig.5 - Comparison between measured and calculated (Eq. 1-4) mechanical properties of the tensile specimens: (a) hardness, (b) yield strength, (c) ultimate tensile strength, (d) elongation to failure.

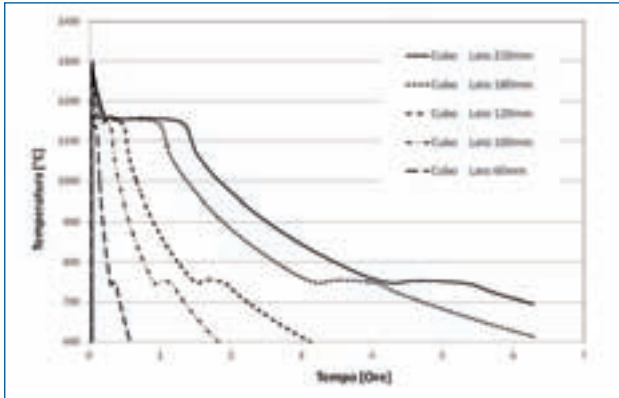


Fig. 6 - Curve di raffreddamento misurate al centro dei cubi di lato 60, 100, 120, 180 e 210 mm

Fig.6 - T-t profile measured in the center of 60, 100, 120, 180 e 210 mm edge cubes.

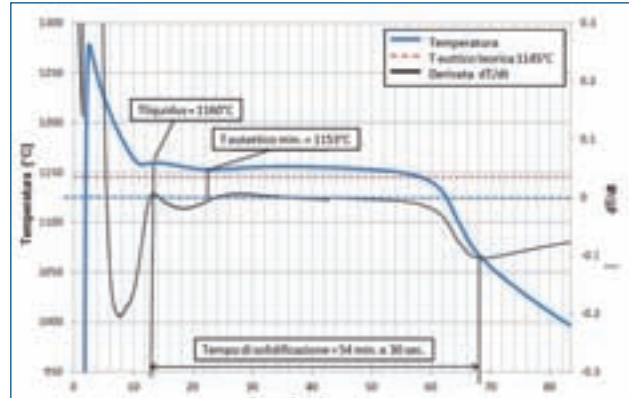


Fig. 8 - Esempio di analisi della derivata della curva di raffreddamento registrata nel cubo di lato 180 mm.

Fig.8 - Example of derivative analysis of the cooling curve logged in the 180 mm edge cube..

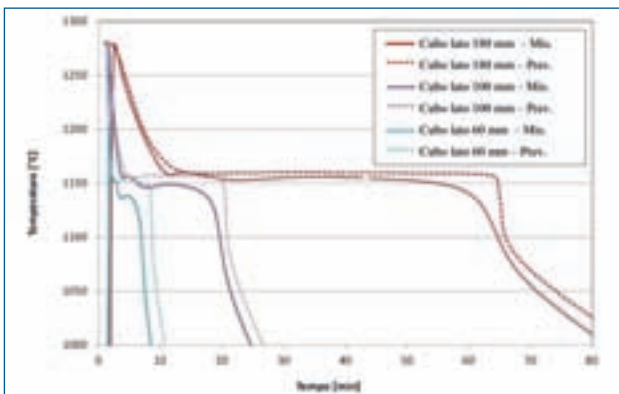


Fig. 7 - Confronto fra curve di solidificazione misurate (continue) e simulate (tratteggiate) al centro dei cubi di lato 60, 100 e 180 mm.

Fig.7 - Comparison of the measured (bold) and simulated (dot) cooling curves logged in the center of 60, 100 and 180 mm edge cubes.

come le equazioni sperimentali siano in grado di predire con buona accuratezza i valori di durezza e resistenza del materiale, come confermato anche dai ridotti scarti medi, ma non l'allungamento a rottura del materiale. Nella previsione della durezza, l'errore medio commesso è di circa 3 punti Brinell ed il coefficiente di determinazione (R^2) si è assestato a 0.878. Per quel che riguarda la tensione di snervamento (rottura), l'errore medio è di circa 10 MPa (17MPa) ed il coefficiente

di determinazione (R^2) si è assestato a 0.790 (0.845). Diversamente, una scarsa correlazione ($R^2 = 0.266$) e scarti medi relativamente elevati (1.3%) si sono riscontrati per l'allungamento a rottura.

CONFRONTI NUMERICO-SPERIMENTALI

Andamento delle curve di raffreddamento

In Figura 6 vengono mostrate le curve di raffreddamento acquisite in cinque punti di misura della singola colata. Osservando le prime sei ore di acquisizione, è possibile analizzare le fasi principali del raffreddamento ovvero le trasformazioni eutettiche ed eutettoidiche. Per tutte le acquisizioni, le temperature alle quali avvengono queste trasformazioni sono coerenti con le temperature teoriche del diagramma Fe-C per la lega in questione (1152°C per l'eutettico stabile, 738°C per l'eutettoide).

Il grafico di Figura 7 riporta i confronti fra l'andamento delle curve di temperatura acquisite al centro dei cubi di lato 60, 100 e 180 mm e le relative curve ottenute da simulazione numerica. E' possibile osservare un buon accordo tra dati numerici e valori misurati nelle fasi iniziali del raffreddamento, a testimonianza di una corretta assunzione dei parametri di processo e delle condizioni al contorno del problema. Nelle fasi iniziali (alti gradienti termici) il sistema è fortemente influenzato dal valore delle resistenze termiche assunte per le superfici di interfaccia metallo/sabbia e dalla corretta caratterizzazione termofisica dei materiali in gioco (lega, sabbia). Un'analisi più attenta delle zone di attraversamento dell'intervallo di temperatura di

	Crogiolo ITACA		Cubo 60 mm		Cubo 100 mm		Cubo 180 mm	
	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.
$T_{liquidus}$ (°C)	1148	-	1154	-	1156	-	1160	-
$T_{eutectico\ min}$ (°C)	1137	1151	1141	1151	1145	1156	1153	1159

Tab. 3 - Confronto delle $T_{liquidus}$ e $T_{eutectico\ min}$ misurate e simulate nei vari cubi e misurate tramite ITACA®
 Table 3 - ITACA® $T_{liquidus}$ and $T_{eutectico\ min}$ Comparison of measured and simulated $T_{liquidus}$ and $T_{eutectico\ min}$ for the cubes.

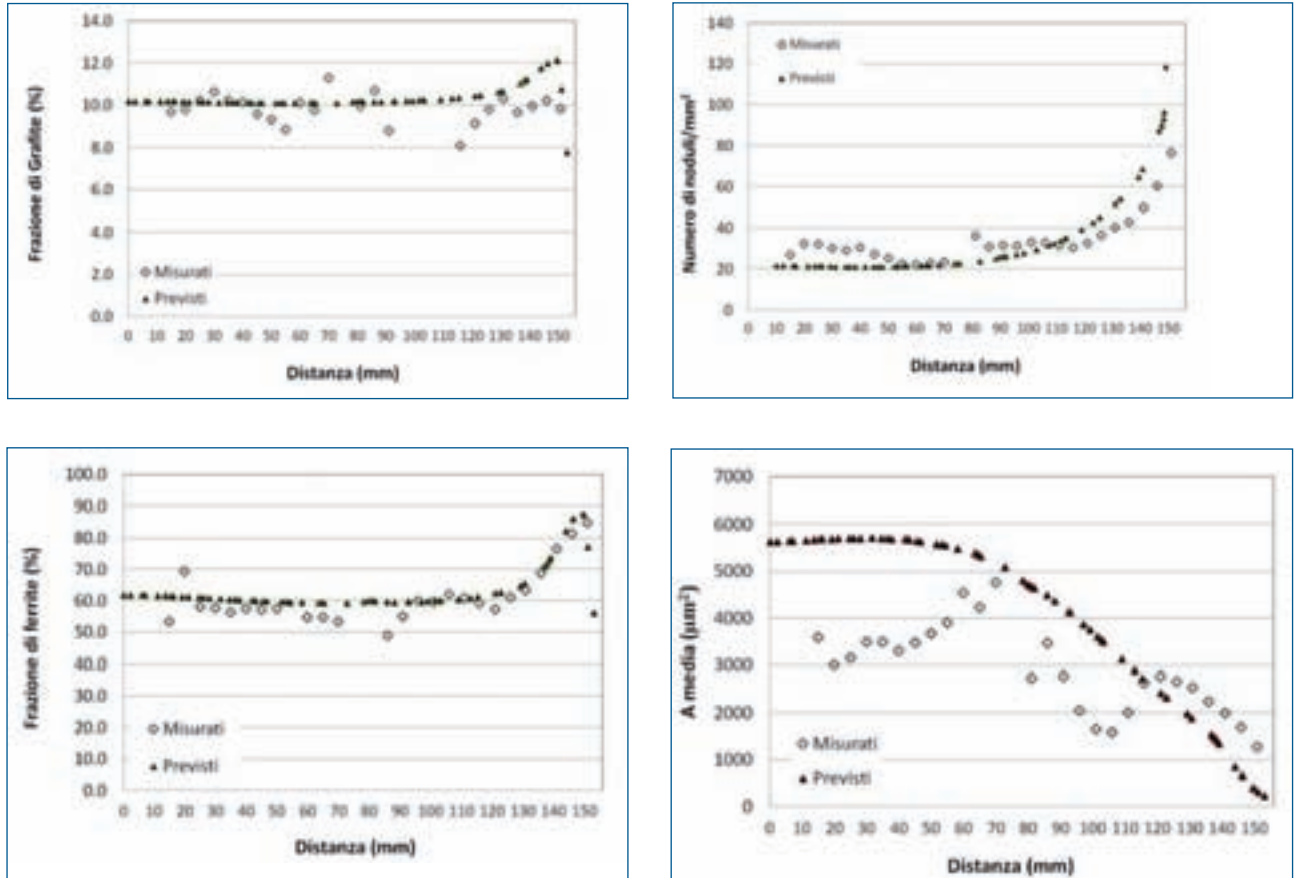


Fig. 9 - Confronto dei valori misurati e previsti delle caratteristiche microstrutturali lungo un profilo di interesse all'interno del cubo di lato 180mm (sulle ascisse è riportata la distanza dal centro del cubo).

Fig.9 - Comparison of measured and predicted values of the microstructural parameters within the 180 mm edge cube (on the x axis the distance from the cube center)..

trasformazione eutettica (Figura 7) mostra un accordo accettabile tra curve di previsione numerica e valori misurati, relativamente ai tempi di completa trasformazione di fase. Ciò evidenzia una buona capacità del modello nella previsione delle dinamiche di solidificazione eutettica anche al variare delle velocità di raffreddamento.

Per una determinazione più precisa dei punti di inizio e fine della trasformazione eutettica, si è proceduto ad effettuare l'analisi della derivata prima delle curve di temperatura (Figura 8) misurate, individuando:

- Il valore di temperatura di nucleazione della fase primaria, o $T_{liquidus}$ (T_l), in corrispondenza del primo massimo relativo della derivata.
- Il valore di temperatura minima raggiunta durante la trasformazione eutettica ($T_{eutettico\ min}$), in corrispondenza del successivo punto in cui la derivata assume valore nullo.

Come atteso, l'analisi della derivata prima ha restituito valori di temperatura di trasformazione di fase diversi, in funzione delle diverse velocità di raffreddamento, riscontrando, all'aumentare delle velocità di raffreddamento,

Dimensione cubo [mm]	Rm [MPa]		Rs [MPa]		A%		HB	
	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.	Mis.	Sim.
210	509	476	311	279	8.2	9.5	171	157
180	524	502	332	288	10.7	9.9	173	162
150	558	539	350	303	12	10.3	182	170
120	584	555	367	311	9.4	10.4	183	173
75	662	593	385	332	9.2	10.7	205	182

Tab. 4 - Confronto tra proprietà meccaniche simulate e misurate (media dei valori rilevati nella zona inferiore di ogni cubo).

Table 4 - Comparison between measured and simulated mechanical properties (average of the values detected in bottom of the cubes).

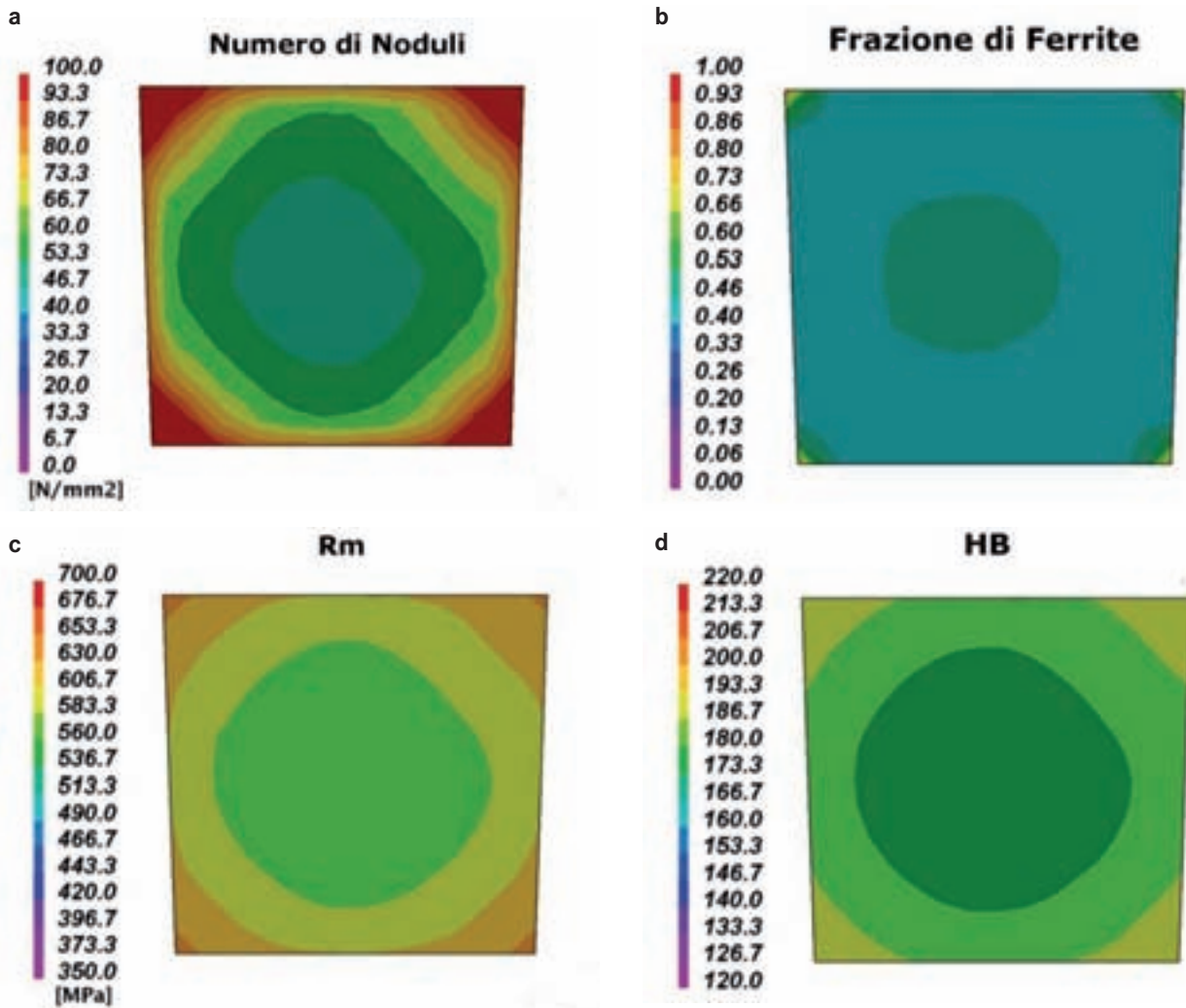


Fig. 10 - Risultati della simulazione di processo in una sezione del cubo di lato 75 mm: Numero di noduli di grafite per mm² (a); Frazione di Ferrite (b); Carico unitario di resistenza a trazione (c); durezza Brinell (d).

Figure 10 – Microstructure and tensile properties simulation in a section of the 75 mm edge: Number of graphite nodules [mm⁻²] (a); Ferrite fraction [%] (b); Ultimate tensile strength [Mpa] (c); Brinell hardness (d).

sottoraffreddamenti più marcati e temperature di trasformazione eutettica in generale più basse. In Tabella 3 si riporta la temperatura di eutettico minima misurata e simulata nei cubi di lato 60, 100 e 180 mm. Assieme ad essa viene riportata solo la $T_{liquidus}$ misurata dato che quella simulata non è risultata valutabile data la vicinanza della composizione chimica della lega alla composizione eutettica. A titolo comparativo vengono inoltre riportati i risultati ottenuti da un'analisi termica mediante software ITACA v.7, effettuata usando un crogiolo standard comunemente impiegato in stabilimento.

L'importanza di una corretta previsione numerica dei valori di temperatura di trasformazione eutettica è da ricondurre all'influenza di questa specifica fase della solidificazione sulla successiva formazione delle microstruttura. La morfologia della matrice risulta infatti influenzata dalle caratteristiche della nucleazione in fase eutettica e non solo dalle condizioni del raffreddamento in fase eutettoidica.

Previsione delle microstrutture e delle proprietà meccaniche

Considerazioni di carattere generale sull'affidabilità del modello numerico sono state effettuate mediante un confronto, illustrato in Figura 9, tra valori di previsione numerica delle microstrutture e valori misurati di: frazione grafite, perlite, ferrite, numero di noduli, raggio grafite medio e nodularità. Il numero di noduli, calcolato in simulazione numerica per unità di volume, è stato convertito in un dato bidimensionale, per un confronto con i dati ricavati dalle micrografie ottiche, secondo la relazione di Wienceck [12]:

$$N = \sqrt{\frac{N_p}{f_{gr}}} \quad (5)$$

Dove:

- N è numero di noduli per unità di volume
- N_p è il numero di noduli per unità di superficie
- f_{gr} frazione di grafite.

Le correlazioni sperimentali (Eq. 1-4) fra caratteristiche

meccaniche e microstrutturali sono state implementate nel software previsionale utilizzando come variabili in ingresso i risultati numerici forniti dalla simulazione. Nelle Figure 10 e 11 sono riportati gli andamenti di alcune proprietà microstrutturali e meccaniche, rispettivamente in una sezione dei cubi di lato 75 e 210 mm. Si evidenzia una stratificazione delle proprietà meccaniche (Figg. 10 e 11 (c)-(d)), direttamente collegata alla variazione delle microstrutture (Figg. 10 e 11 (a)-(b)).

Poiché le correlazioni proposte non tengono in conto degli effetti della porosità, che è stata invece riscontrata nelle zone superiori e centrali di alcuni cubi, si è proceduto con un confronto diretto tra le caratteristiche meccaniche misurate nella zona inferiore di ogni cubo ed il valore numerico mediato su un profilo che attraversa la stessa zona (Fig. 2-b in rosso). Il confronto tra questi valori è riportato in Tabella 4. Si può osservare una buona corrispondenza negli andamenti delle proprietà previste e misurate, con una generale tendenza ad un incremento delle proprietà meccaniche al diminuire del modulo termico del singolo cubo. I dati simulati presentano valori sistematicamente più bassi

di quelli derivati dalle prove meccaniche, con scarti compresi tra il 3% ed il 15%. Tale sottostima nel calcolo della durezza, resistenza a snervamento e rottura, è imputabile al fatto che la simulazione fornisce il raggio grafítico medio del nodulo (3D) mentre i modelli sono stati sviluppati considerando il raggio del nodulo ottenuto tramite metallografia (2D). Quest'ultimo sottostima in maniera sistematica il valore reale del raggio del nodulo grafítico quindi, considerando il segno negativo del coefficiente nelle eq. 1-3, porta ad una sottostima delle proprietà meccaniche.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata condotta un'attività di caratterizzazione numerico-sperimentale di un processo di colata in sabbia di una ghisa sferoidale. In particolare, è stata realizzata un'attrezzatura di colata per produrre provini aventi caratteristiche microstrutturali e meccaniche differenziate. È stato inoltre messo a punto un sistema di acquisizione delle curve di solidificazione e di raffreddamento della lega oggetto di studio. La caratterizzazione meccanica e microstrutturale dei provini ha permesso la formulazione

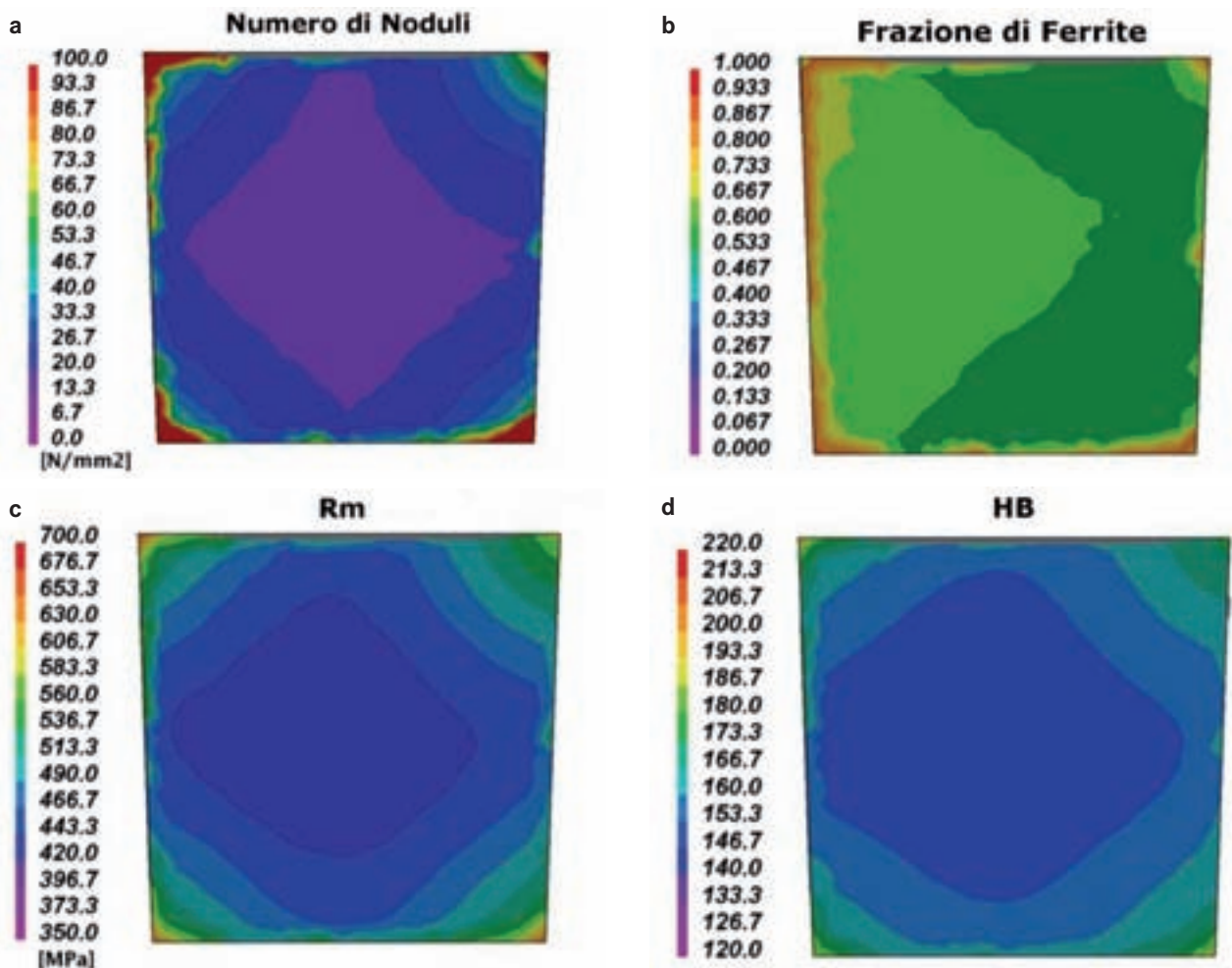


Fig. 11 - Risultati della simulazione di processo in una sezione del cubo di lato 210 mm: Numero di noduli di grafite per mm^2 (a); frazione di ferrite (b); carico unitario di resistenza a trazione (c); durezza Brinell (d).

Figure 11 - Microstructure and tensile properties simulation in a section of the 210 mm edge: Number of graphite nodules [mm^2] (a); Ferrite fraction [%] (b); Ultimate tensile strength [Mpa] (c); Brinell hardness (d).

di correlazioni empiriche microstruttura-proprietà, che sono state implementate all'interno di un software FEM di simulazione del processo fusorio. L'attività sperimentale ha portato alle seguenti considerazioni principali:

- È stato confermato l'effetto della velocità di raffreddamento su dimensioni e morfologia della grafite, oltreché sulle frazioni di perlite e ferrite nella matrice.
- Le correlazioni empiriche fra caratteristiche microstrutturali e durezza, resistenza a snervamento e resistenza a trazione, hanno fatto registrare elevati indici di determinazione (circa 0,8).
- Il confronto tra i risultati delle prove meccaniche e le simulazioni numeriche ottenute implementando le correlazioni empiriche proposte, sottostimano il dato reale. Questa sottostima è riconducibile ad una sottostima del raggio dei noduli valutato tramite analisi metallografica.

Sono attualmente in corso ulteriori analisi microstrutturali e prove meccaniche al fine di migliorare ulteriormente le correlazioni qui presentate e la loro implementazione nelle simulazioni.

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca è stata svolta in collaborazione con il laboratorio CRIF – Centro di Ricerca per l'industria fusoria di SCM Group SpA (RN) all'interno del progetto Regione Emilia Romagna "Dai distretti produttivi ai distretti tecnologici".

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. F. YEUNG, H. ZHAO, W. B. LEE, The Morphology of Solidification of Thin-Section Ductile Iron Castings, *Materials Characterization* 40:201-208 (1998)
- [2] M. KOENIG, M. WESSÉN, Influence of alloying elements on microstructure and mechanical properties of CGI, *International Journal of Cast Metals Research* 2010 VOL 23 NO 2 97-110

[3] T. SJOEGREN, I. L. SVENSSON, Modelling the effect of graphite morphology on the modulus of elasticity in cast irons *International Journal of Cast Metals Research* 2004 Vol. 17 No. 5 271-279

[4] M. HAFIZ, Mechanical properties of SG-iron with different matrix structure, *Journal of Materials Science* 36 (2001) 1293 – 1300

[5] M. STEFANESCU, Solidification and modeling of cast iron—A short history of the defining moments *Materials Science and Engineering A* 413-414 (2005) 322-333

[6] M. KOENIG, Literature review of microstructure formation in compacted graphite Iron, *International Journal of Cast Metals Research* 2010 VOL 23 NO 3 185-192

[7] J. GUO, M. T. SAMONDS, Modelling and experimental validation of microstructure and mechanical properties of ductile during solidification, 447-451, *Proceed. of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing*, Sheffield, 2007

[8] D. EMADI et al., Applications of thermal analysis in quality control of solidification processes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 81 (2005) 235-242

[9] P. DONELAN, Modelling microstructural and mechanical properties of ferritic ductile cast iron, *Materials Science and Technology*, Vol. 16, pp. 261-269

[10] Information on the Thermodynamic Database for Iron-Based Alloy: Pan Iron 5" *CompuTherm*, Madison, USA, www.computherm.com

[11] DRAPER N. R., SMITH H., *Applied Regression Analysis*, 1981, New York: John Wiley.

[12] E.FRAS, M. GORNY , Eutectic cell and nodule count as the quality factors of cast iron, *AFE Archives of Foundry Engineering*, 2008 Vol. 8 No. 3 53-58

Process modeling, microstructure prediction and mechanical properties of sand cast ductile iron castings

Keywords: ductile iron, solidification, thermal analysis, microstructure, tensile properties, models, simulation.

This work focuses on an experimental activity aimed to carry out a microstructural and numerical characterisation of a sand cast ductile iron. A properly designed casting equipment was realized, in order to have different thermal modules for the production of castings subjected to various solidification and cooling conditions.

The casting system has been studied by numerical simulation and a good accordance between measured and simulated process parameters was obtained by heat transfer coefficients optimisation. The changes in microstructure due to the different local cooling conditions were then estimated through numerical models implemented in the casting simulation code PROCAST v.2011. The validation of microstructure simulations was performed by comparing numerical data with those obtained by a careful microstructural characterization of the castings. More than 2000 optical micrographs of polished and Nital etched specimens were analysed by using a commercial digital image analysis software. The more relevant microstructural features were considered: density of graphite nodules [mm^{-2}], mean area of the graphite nodules [μm^2], nodularity [%] and graphite, ferrite and perlite fractions [%].

Together with microstructural analyses, a great number of tensile test were carried out on specimens directly extracted from the castings. By matching tensile test and microstructural characterisation data, empirical equations for the evaluation of the main tensile properties from the knowledge of the main microstructural parameters, were developed. The hardness and ultimate tensile test models were at the end implemented in the casting simulation software obtaining a good accordance with experimental results.