

## Un metodo innovativo per la stima della resistenza a fatica di getti in ghisa sferoidale in presenza di difetti di solidificazione

T. Borsato, P. Ferro, C. Carollo, F. Berto

In questo lavoro si è valutata la resistenza a fatica di ghise sferoidali a matrice ferritica, perlitica e ferritica rafforzata per soluzione solida caratterizzate da tempi di solidificazione che vanno da pochi minuti fino a diverse ore.

È stata eseguita una campagna di caratterizzazione meccanica, effettuando test di trazione e prove di fatica su provini prelevati dalle zone di maggiore interesse all'interno dei getti analizzati.

Successivamente i campioni sono stati osservati al microscopio ottico per analizzare le proprietà microstrutturali e al microscopio elettronico a scansione per osservare le superfici di frattura.

Attenzione è stata posta nella caratterizzazione dei difetti che innescano le cricche di fatica. In particolare, la dimensione dei difetti è stata analizzata tramite analisi statistica degli estremi.

Partendo dall'idea di Murakami, viene proposto un metodo per la previsione della resistenza a fatica di ghise sferoidali as-cast contenenti differenti difetti di solidificazione (es. grafite degenerata, porosità, inclusioni non metalliche, ..).

Il modello è stato ottimizzato utilizzando i dati sperimentali ottenuti dalla campagna sperimentale ed è stato validato grazie a un ampio benchmarking con dati trovati in letteratura.

I risultati ottenuti evidenziano un alto potenziale del metodo proposto nello stimare la resistenza a fatica di componenti caratterizzati da diversi tempi di solidificazione e contenenti difetti microstrutturali.

### INTRODUZIONE

Lo sviluppo negli ultimi anni di settori come quello delle energie rinnovabili, e dell'eolico in particolare, ha determinato la domanda di componenti in ghisa sferoidale ad elevate prestazioni e dimensioni fino a prima mai considerate. Questo ha fatto sì che negli ultimi decenni si cominciasse a studiare l'influenza degli spessori dei getti sulle proprietà delle ghise sferoidali con cui questi sono prodotti, ed a valutare composizioni innovative del materiale, in grado di garantirne una costanza delle prestazioni, indipendentemente dalle condizioni di solidificazioni indotte dalle dimensioni dei componenti.

È ben conosciuto infatti che, aumentando lo spessore dei componenti, le condizioni di raffreddamento e di solidificazione possono diventare critiche e possono portare alla formazione di difetti microstrutturali (bassa nodularità, particelle di grafite degenerata, porosità da ritiro, segregazioni, ..) i quali sono deleteri per la resistenza meccanica.

Uno dei metodi più utilizzati per la stima della resistenza a fatica materiali metallici contenenti difetti è il metodo proposto da Murakami [1]:

#### T. Borsato

University of Padova,  
Department of Engineering and Management,  
Stradella S. Nicola 3, 36100, Vicenza,  
Italy - VDP Fonderia Spa, via lago di Alleghe 39, 36015 Schio, Italy

#### P. Ferro

University of Padova, Department of Engineering and Management,  
Stradella S. Nicola 3, 36100, Vicenza, Italy

#### C. Carollo

VDP Fonderia Spa, via lago di Alleghe 39, 36015 Schio, Italy

#### F. Berto

NTNU, Department of Engineering Design and Materials, Richard  
Birkelands vei 2b, 7491, Trondheim – Norway

# Nodular cast iron

$$\sigma_a = F_{loc} \frac{(HV + 120)}{\sqrt{area}^{1/6}} \left( \frac{1 - R}{2} \right)^\alpha \quad [1]$$

Dove HV è la durezza Vickers del materiale e  $\sqrt{area}$  è un parametro rappresentativo dei difetti presenti.  $\sqrt{area}$  è definito come la radice dell'area del difetto proiettata su un piano perpendicolare alla massima tensione principale.

Successivamente, Deguchi [2] ha proposto la seguente equazione per stimare la resistenza a fatica di ghise ferritico/perlitiche indebolite da piccoli difetti artificiali, come intagli o fori:

$$\sigma_a = F_{loc} \frac{(0.34 \sigma_{UTS} + 170)}{\sqrt{area}^{1/6}} \left( \frac{1 - R}{2} \right)^\alpha \quad [2]$$

È importante notare come in questo caso, la dimensione dei difetti artificiali ( $\sqrt{area}$ ) non sia in nessun modo legata alle condizioni di solidificazione, alla microstruttura e alle proprietà meccaniche dei materiali.

Questi modelli proposti in letteratura sembrano non essere adeguati quando si considerano getti in ghisa sferoidale caratterizzati da condizioni di raffreddamento e di solidificazione critiche. È infatti noto che, con l'aumentare delle dimensioni dei getti, il tempo di solidificazione aumenta, causando una maggiore probabilità di trovare difetti di dimensioni elevate. Di conseguenza, difettologie e proprietà meccaniche sono intrinsecamente legati alla microstruttura derivante dal processo di solidificazione e di raffreddamento.

In questo lavoro, viene proposto un nuovo modello, basato sul parametro  $\sqrt{area}$ , per la stima della resistenza a fatica di ghise sferoidali as-cast contenenti difetti di solidificazione, quali ad esempio bassa nodularità, porosità o grafite degenerata.

Il modello tiene in considerazione il forte legame tra microstruttura derivante dalla solidificazione e i difetti di che influenzano negativamente la resistenza a fatica.

## Materiali e Procedura Sperimentale

In questo lavoro sono state considerate differenti tipologie di ghisa sferoidale; ghise tradizionali a matrice ferritica (GJS 400-18), a matrice perlitica (GJS 700-2) e ghise di nuova generazione a matrice ferritica rafforzata per soluzione solida tramite l'aggiunta di Silicio (SSF).

Al fine di valutare l'effetto di lunghi tempi di solidificazione e di raffreddamento, sono stati analizzati getti di spessore crescen-

te, da 50 mm fino a 650 mm [3-8].

Da ciascun getto sono stati prelevati dei campioni per la caratterizzazione meccanica, statica e a fatica, e per la caratterizzazione microstrutturale.

In particolare si sono svolti test di durezza Brinell (HBW 5/750), secondo UNI EN ISO 6506:2006; test di trazione secondo ISO 6892-1:2016.

Inoltre si sono svolti test di fatica assiale a temperatura ambiente usando la macchina di prova Rumul Testronic 150 kN, presente nel laboratorio di VDP Fonderia, la quale consente di applicare un carico alternato a una frequenza di circa 130 Hz. I risultati dei test di fatica sono stati quindi elaborati statisticamente considerando una distribuzione log-normale. Per ciascun getto prodotto è stata definita la resistenza a fatica sperimentale ( $\sigma_a \text{ exp}$ ) come la semi-ampiezza di tensione relativa a una probabilità di sopravvivenza del 50% a 2 milioni di cicli.

Successivamente, sono state eseguite delle analisi metallografiche tramite l'utilizzo di un microscopio ottico e di un software di analisi di immagine, con lo scopo di analizzare alcuni parametri microstrutturali come ad esempio il conteggio di noduli o la loro dimensione.

Inoltre, alcuni provini rotti dopo il test di fatica, sono stati analizzati al SEM al fine di identificare, sulla superficie di frattura, i punti di innesco della cricca e valutare la loro dimensione ( $\sqrt{area}$ ). Infine, tramite l'analisi statistica degli estremi, è stata determinata la dimensione massima del difetto per ciascun getto analizzato.

In Tabella 1 sono riportate le dimensioni e le composizioni chimiche dei getti analizzati in questo lavoro.

**Tab. 1** – Dimensione e composizione dei getti analizzati.

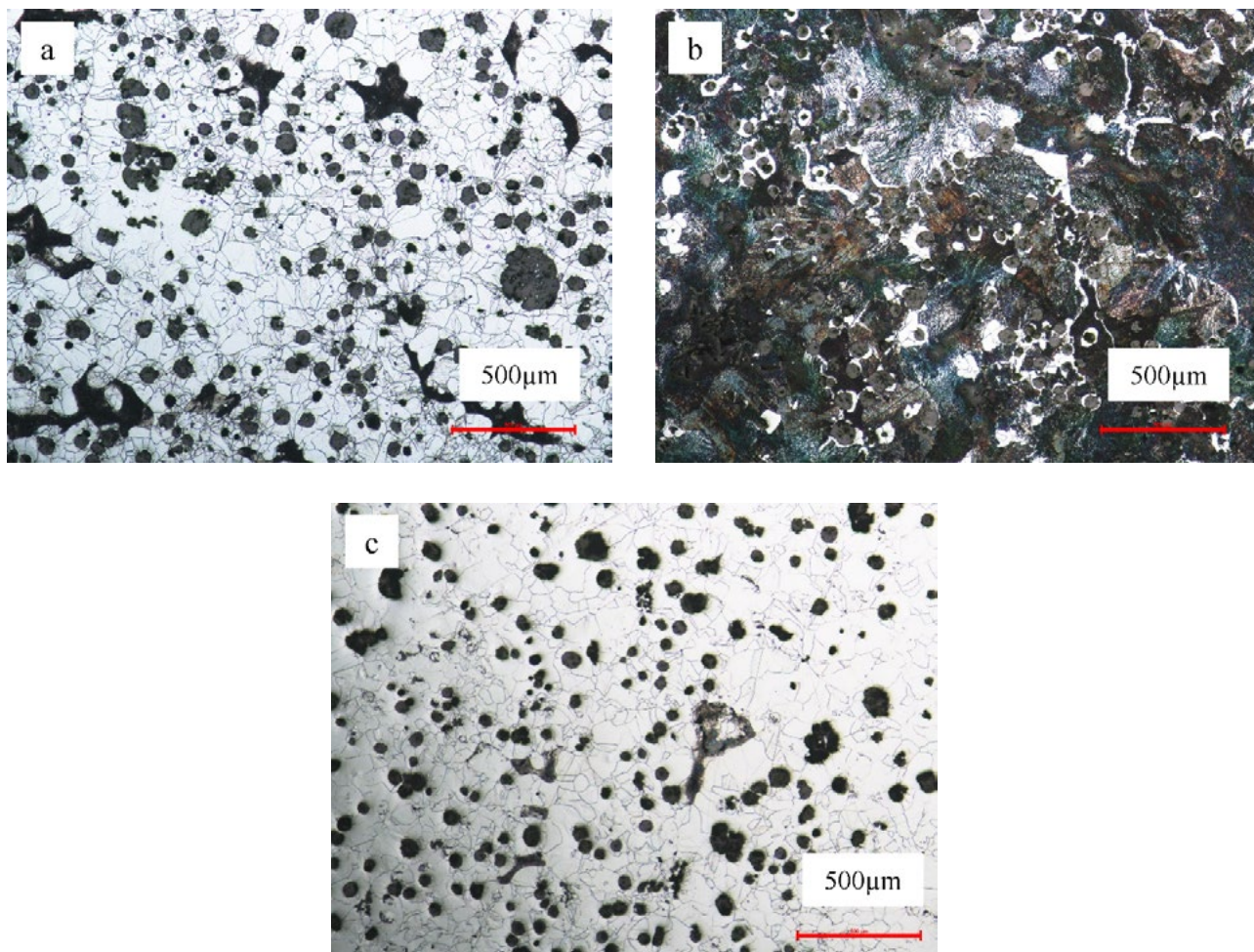
Material	Casting code	Dimensions [mm]	C	Si	Mn	Cu	Mg
	P-A	300x300x250	3.65	1.95	0.30	1.25	0.059
GJS 700-2	P-B	300x300x250	3.75	2.25	0.30	1.20	0.063
Pearlitic	P-E	300x300x250	3.58	2.50	0.36	1.12	0.054
	P-C	600x600x600	3.70	1.94	0.31	1.18	0.068
GJS 400-18 LT Ferritic	F-F	300x300x250	3.79	2.06	0.22	0.07	0.064
GJS 400-18	F-Chunky	cast cylinder ø650	3.50	2.45	0.12	0.13	0.055
Ferritic	F-Good	cast cylinder ø650	3.50	2.45	0.12	0.13	0.055
SSF DI	S-D	300x300x250	3.18	3.22	0.19	0.25	0.043
	S-G	300x300x250	3.14	3.50	0.19	0.10	0.058
	S-H	300x300x250	3.10	3.55	0.19	0.10	0.060
Solution	S-I	ø 300 H520	3.30	3.19	0.20	0.16	0.047
strengthened	S-YIII	Y-shape (50)	3.31	3.25	0.13	0.16	0.050
ferritic	S-YIV	Y-shape (75)	3.31	3.25	0.13	0.16	0.050

## Risultati

Nella figura 1 sono mostrati alcuni esempi delle microstrutture dei materiali analizzati. In particolare, la microstruttura della GJS 400-18 LT (fusione F-F) è caratterizzata da noduli di grafite sferoidale all'interno di una matrice ferritica, con aree di perlite dovute alla indesiderata segregazione di elementi promotori

di carburi presenti nella lega. Nella GJS 700-2 (fusione P-C), la matrice perlitica è predominante, con una piccola quantità di ferrite ai bordi dei grani e attorno ai noduli di grafite. Infine, ghisa sferoidale rafforzata per soluzione solida (S-I) mostra una matrice completamente ferritica con tracce limitate di perlite.

# Nodular cast iron



**Fig. 1** – Esempi di micrografie ottenute dai getti F-F (a), P-C (b) and S-I (c), attaccate con Nital 5%.

Le proprietà meccaniche dei campioni prelevati dai getti sono raccolte nella Tabella 2. Si può osservare che, considerando le ghise perlitiche GJS 700-2, i valori effettivi di resistenza a trazione e carico di snervamento finali sono molto inferiori a quelli nominali. Nel caso della matrice ferritica, la riduzione delle proprietà meccaniche è inferiore.

È anche importante notare che, a causa della presenza di grafite Chunky, il carico di rottura e, in modo più marcato, l'allungamento a rottura hanno mostrato una riduzione considerevole rispetto ai getti esenti da questo difetto.

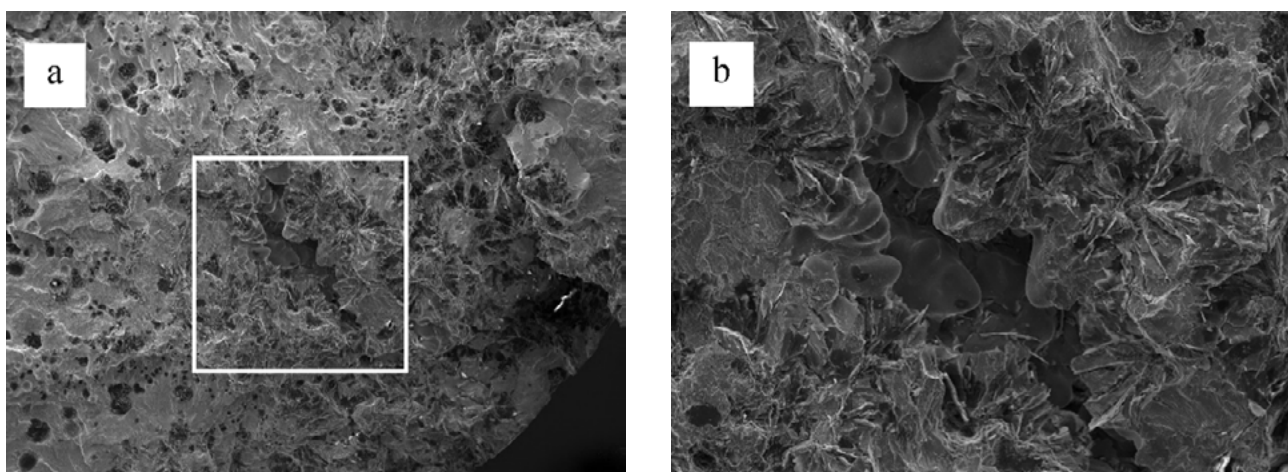
Sono state eseguite prove di fatica assiale con un rapporto di

carico uguale a 0, fino alla separazione totale delle due parti dei campioni. Nel caso della fusione di F-F e S-I, è stato adottato anche un rapporto di carico pari a -1. I risultati dei test di fatica sono stati analizzati statisticamente utilizzando una distribuzione log-normale. Dettagli e risultati dei test di fatica sono riportati nella Tabella 2.

L'analisi delle superfici di frattura di alcuni campioni rotti ha rivelato che la rottura da fatica inizia in prossimità di difetti di solidificazione che potrebbero essere porosità da ritiro, particelle di grafite esplose o spiky o una combinazione di difetti (Figura 2).

**Tab. 2** – Proprietà meccaniche dei getti.

Material	Casting code	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$\sigma_y$ 0.2% [MPa]	$\epsilon_R$ %	Hardness HB	Load Ratio	$\sigma_a$ exp 50% $2 \cdot 10^6$ cycles [MPa]
	P-A	579	364	2.6	220	0	120
GJS 700-2	P-B	513	368	1.9	220	0	134
Pearlitic	P-E	511	410	2.0	220	0	140
	P-C	472	320	3.1	200	0	95
GJS 400-18 LT Ferritic	F-F	383	250	19.9	150	0 -1	100 140
GJS 400-18	F-Chunky	321	265	3.4	145	0	79
Ferritic	F-Good	378	267	11.5	145	0	91
SSF DI	S-D	485	381	17.8	190	0	132
	S-G	511	412	15.4	195	0	131
	S-H	488	430	5.2	195	0	127
Solution strengthened	S-I	489	384	17.8	190	0 -1	135 184
ferritic	S-YIII	492	389	17.2	190	0	151
	S-YIV	487	384	17.1	190	0	142



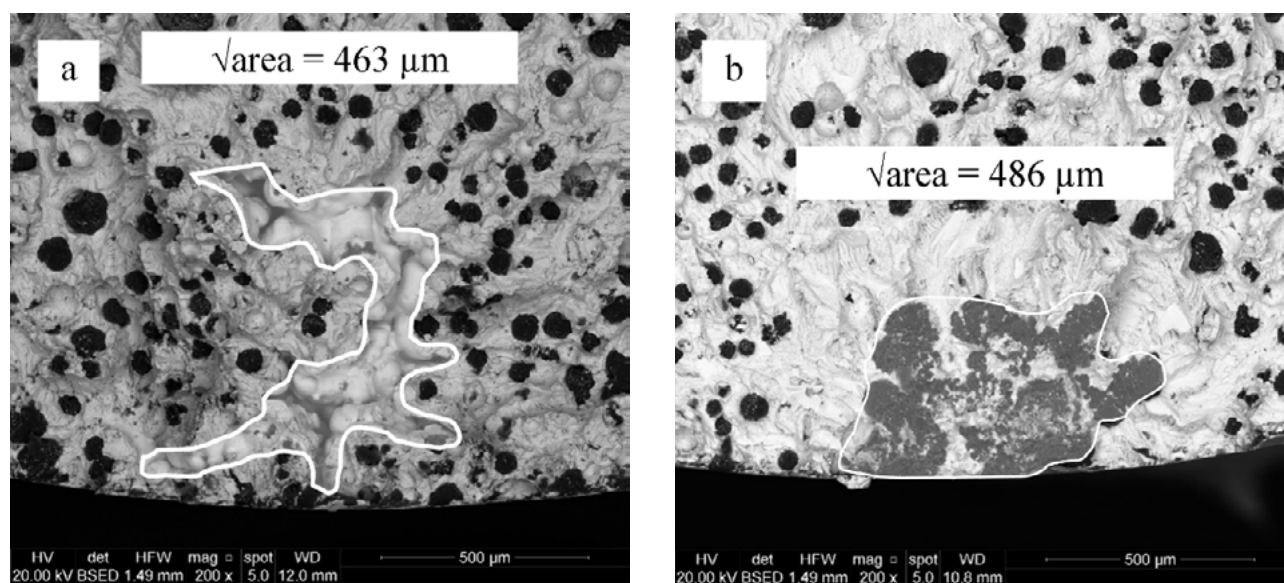
**Fig. 2** – Immagine SEM del punto di innesco della cricca (a) e particolare della presenza simultanea di porosità e di grafite spiky (b).

# Nodular cast iron

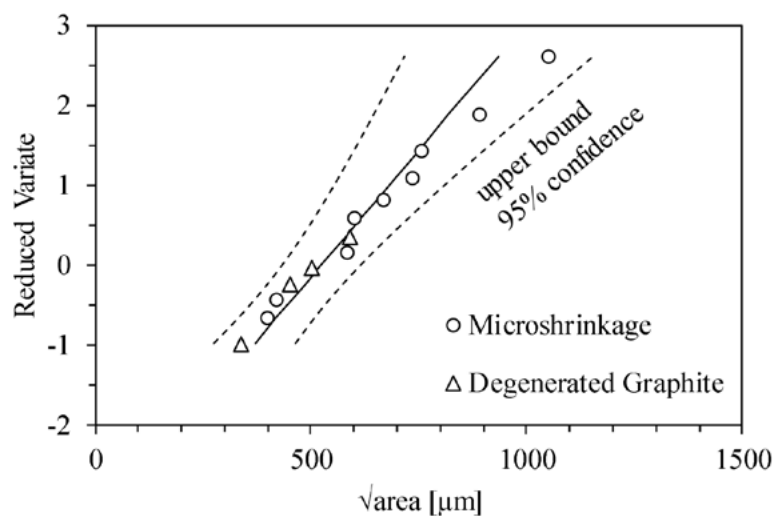
Per stimare le dimensioni massime dei difetti innescanti la frattura, è stata misurata la superficie proiettata delle porosità, particelle di grafite degenerate o inclusioni che hanno agito come iniziatori della cricca, come mostrato nella Figura 3. Utilizzando l'analisi statistica dei valori estremi, la  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$  è stata stimata, per ciascun getto, considerando la dimensione del difetto corrispondente al limite superiore dell'intervallo di confidenza del 95% della distribuzione  $\sqrt{\text{area}}$ .

In figura 4 è mostrato un esempio di distribuzione dei difetti, dove sia i microritiri che le particelle di grafite degenerate agiscono come iniziatori della frattura.

I valori massimi delle dimensioni dei difetti stimati ( $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ ) sono riportati nella Tabella 3 insieme al numero medio di noduli valutato su campioni lucidati. Si può osservare in Figura 5 una buona correlazione tra il numero di noduli e la dimensione massima del difetto.



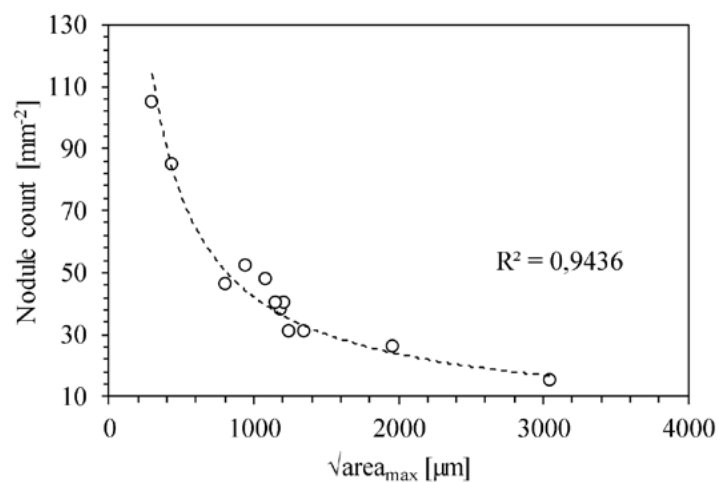
**Fig. 3** – Immagini SEM delle superfici di frattura che mostrano le dimensioni ( $\sqrt{\text{area}}$ ) cavità da ritiro (a) e grafite degenerata (b) che agiscono da innesco della cricca.



**Fig. 4** – Distribuzione dei valori estremi dei difetti innescanti la frattura (microritiri e grafite degenerata).

**Tab. 3** – Proprietà microstrutturali dei getti.

Material	Casting code	Nodule count [mm <sup>-2</sup> ]	$\sqrt{\text{areamax}}$ [ $\mu\text{m}$ ] 95% confidence band
	P-A	26	1959
GJS 700-2	P-B	52	946
Pearlitic	P-E	46	806
	P-C	15	3051
GJS 400-18 LT Ferritic	F-F	31	1243
GJS 400-18	F-Chunky		1350
Ferritic	F-Good	31	1350
SSF DI	S-D	38	1188
	S-G	48	1082
	S-H	40	1212
Solution strengthened	S-I	40	1150
ferritic	S-YIII	105	300
	S-YIV	85	430



**Fig. 5** – Correlazione tra in numero di noduli e la dimensione del Massimo difetto presente.

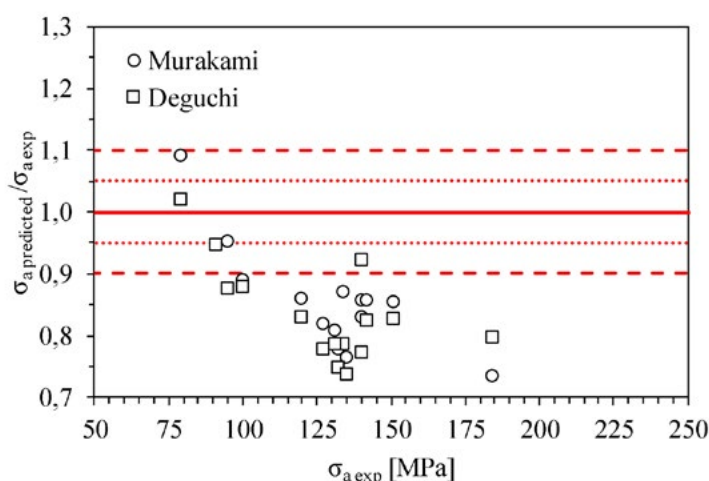
# Nodular cast iron

## Stima della resistenza a fatica di getti contenenti difetti di solidificazione

I metodi proposti in letteratura (Murakami e Deguchi) sono stati applicati ai nuovi dati sperimentali al fine di valutarne l'applicabilità sui getti di grosse dimensioni contenenti difetti di solidificazione. I risultati ottenuti utilizzando i due modelli sono mostrati in Figura 6, dove viene tracciato il confronto tra la resistenza a fatica stimata e quella sperimentale per ogni getto. Si può osservare che entrambi i metodi sottostimano la resistenza sperimentale alla fatica. Si potrebbe spiegare considerando che i due modelli sono stati sviluppati analizzando campioni con piccoli difetti intrinseci, strutture fini e conteggio elevato dei noduli o difetti artificiali, non correlati alle condizioni di solidi-

ficazione e di raffreddamento. Infatti, come mostrato in Figura 5, la microstruttura e i difetti sono strettamente accoppiati. Le dimensioni delle tacche o dei fori presenti nei provini considerati in letteratura, non sono invece correlate alla microstruttura reale e alle proprietà meccaniche del materiale.

La situazione è invece molto diversa se si considerano getti di notevoli dimensioni e a spessore elevato, nei quali la microstruttura non è omogenea e dove possono essere presenti vari tipi di difetti (microporosità da ritiro, grafite degenerata, chunky o spiky). Questi difetti intrinseci, che sono direttamente correlati al processo di produzione e alle condizioni di solidificazione, influenzano il comportamento del materiale.



**Fig. 6** – Confronto tra la resistenza a fatica sperimentale e stimata secondo le equazioni proposte da Murakami e Deguchi.

Vista la limitata accuratezza dei metodi già presenti in letteratura, nello stimare la resistenza a fatica ( $\sigma_a$ ) di differenti tipologie di ghisa sferoidale as-cast, contenenti difetti di solidi-

ficazione, una nuova espressione, basata sul parametro  $\sqrt{\text{area}}$ , viene qui proposta:

$$\sigma_a = F_{loc} \frac{(A \sigma_{UTS} + B \sigma_{y 0.2\%})}{\sqrt{\text{area}_{max}}^{1/6}} \left(\frac{1-R}{2}\right)^\alpha \quad [3]$$

Dove:

$F_{loc}$  è un parametro che tiene in considerazione la posizione dei difetti all'interno del provino, ed è uguale a 1.41 per un difetto al di sotto della superficie.

R è il rapporto di carico applicato durante il test di fatica

A, B e  $\alpha$  sono dei parametri da ottimizzare sulla base dei dati sperimentali.

Differentemente da quanto proposto in letteratura, la nuova equazione considera le proprietà meccaniche locali del materiale, in termini di tensione di rottura  $\sigma_{UTS}$  e tensione di sner-

vamento  $\sigma_{y0.2\%}$ , combinate con la massima dimensione del difetto presente. In questo modo è possibile considerare le reali caratteristiche del materiale, tenendo in considerazione anche i possibili difetti microstrutturali che influenzano negativamente il comportamento meccanico.

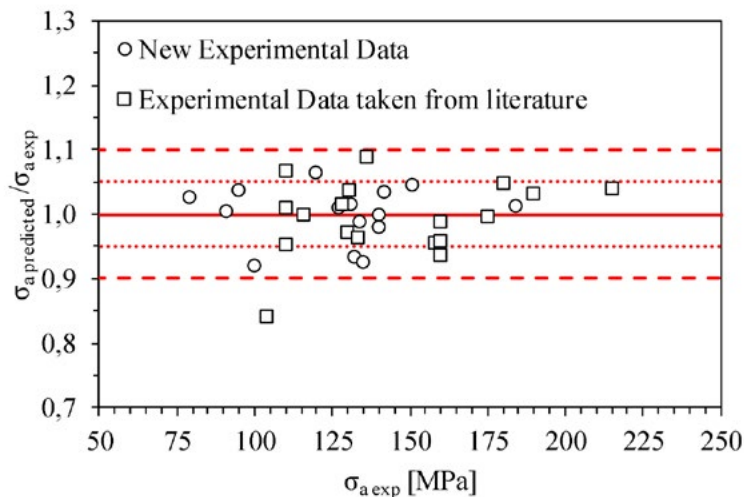
I parametri numerici della nuova equazione proposta sono stati ottimizzati, tramite analisi statistiche, utilizzando la mole di dati sperimentali ottenuti dalla campagna sperimentale svolta in VDP Fonderia. Il modello così ottenuto è stato successivamente validato considerando ulteriori dati sperimentali presenti



in letteratura ottenuti investigando gli effetti dei lunghi tempi di solidificazione sulle proprietà meccaniche di ghise tradizionali [9-16].

Come mostrato in Figura 7, utilizzando la nuova equazione proposta, si può ottenere una stima della resistenza a fatica

molto più accurata rispetto ai precedenti metodi proposti in letteratura (vedi Figura 6). Infatti, come si può osservare, la resistenza a fatica è stimata con un errore che ricade all'interno di una banda di dispersione del  $\pm 10\%$ .



**Fig. 7** – Confronto tra la resistenza a fatica sperimentale e stimata con la nuova equazione. Bande di dispersione  $\pm 5\%$  and  $\pm 10\%$ .

## Conclusioni

In questo lavoro viene proposto un metodo in grado di stimare con buona accuratezza la resistenza a fatica di ghise sferoidali as-cast contenenti difetti di solidificazione.

Il modello è stato ottenuto grazie ad un'ampia campagna sperimentale durante la quale sono state valutate le proprietà microstrutturali e meccaniche di getti caratterizzati da lunghi tempi di solidificazione e di raffreddamento.

L'equazione considera le proprietà locali del materiale nonché la dimensione del difetto massimo ( $\sqrt{area_{max}}$ ) presente nel materiale, stimato tramite un'accurata analisi degli inneschi della frattura.

Rispetto ai modelli precedentemente proposti in letteratura, la presente equazione consente una stima più affidabile della resistenza a fatica di diversi tipi di ghisa sferoidale contenenti vari tipi di difetti di solidificazione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Murakami Y. Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions. 1st ed. Elsevier, Oxford, 2002.
- [2] Deguchi T, Matsuo T, Takemoto S, Ikeda T, Endo M. Effects of graphite and artificial defects on the fatigue strength of ferritic-pearlitic ductile cast iron. *Int J Fract Fatigue Wear*, Volume 4, Proceedings of the 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear 2016;4:93-98.
- [3] Borsato T, Berto F, Ferro P, Carollo C. Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings. *Procedia Struct Integr*. 2016;2:3150–3157.
- [4] Borsato T, Ferro P, Berto F, Carollo C. Mechanical and fatigue properties of heavy section solution strengthened ferritic ductile iron castings. *Adv Eng Mater*. 2016;18:2070-2075.
- [5] Borsato T, Ferro P, Berto F, Carollo C. Fatigue properties of solution strengthened ferritic ductile cast irons in heavy section castings. *La Metallurgia Italiana*. 2017;10:25-32.
- [6] Borsato T, Ferro P, Berto F, Carollo C. Mechanical and fatigue properties of pearlitic ductile iron castings characterized by long solidification times. *Eng Fail Anal*. 2017;79:902-912.
- [7] Borsato T, Ferro P, Berto F, Carollo C. Fatigue strength improvement of heavy-section pearlitic ductile iron castings by in-mould inoculation treatment. *Int J Fatigue*. 2017;102:221-227.
- [8] Ferro P, Lazzarin P, Berto F. Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite. *Mater Sci Eng A*. 2012;554:122–8.
- [9] Shiraki N, Yuki U, Toshitake K. Effects of Number of Graphite Nodules on Fatigue Limit and Fracture Origins in Heavy Section Spheroidal Graphite Cast Iron. *Materials Transactions*. 2016;57:379-384.
- [10] Benedetti M, Torresani E, Fontanari V, Lusuardi D. Fatigue and Fracture Resistance of Heavy-Section Ferritic Ductile Cast Iron. *Metals*. 2017;7:88.
- [11] Foglio E, Gelfi M, Pola A, Lusuardi D. Effect of Shrinkage Porosity and Degenerated Graphite on Fatigue Crack Initiation in Ductile Cast Iron. *Key Eng Mat*. 2017;754:95-98.
- [12] Kainzinger P, Guster C, Severing M, Wolf A. Influence of micro-shrinkage on the fatigue behaviour of ductile iron. In: 13th International Conference on Fracture, 2013, June 16–21, Beijing, China.
- [13] Kainzinger P, Wohlfahrt M, Grün F. Einfluss der lokalen Gefügeausbildung auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*. 2015;160:2-8.
- [14] Shirani M, Härkegard G. Damage tolerant design of cast components based on defects detected by 3D X-ray computed tomography. *Int J Fatigue*. 2012;41:188-198.
- [15] Shirani M, Härkegard G. Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components. *Eng Fail Anal*. 2011;18:12–24.
- [16] Foglio E, Lusuardi D, Pola A, La Vecchia GM, Gelfi M. Fatigue design of heavy section ductile irons: influence of chunky graphite. *Mater Des*. 2016;11:353–361.