

# Stima rapida delle proprietà meccaniche di fusioni in ghisa grigia

P. Ferro, T. Borsato, F. Bonollo, S. Padovan

I progettisti hanno spesso bisogno di conoscere i valori delle proprietà meccaniche nelle diverse zone di un getto. Questa necessità deriva dal fatto che tali proprietà sono molto diverse da quelle enunciate nella classificazione standard del tipo di ghisa utilizzata. A composizione chimica costante, le proprietà meccaniche di una fusione dipendono dalla microstruttura, che a sua volta è determinata dalla velocità di raffreddamento in ogni punto del componente. In questo lavoro, viene sviluppato un metodo che permette di prevedere in modo rapido le proprietà meccaniche in ciascuna zona del getto, utilizzando i risultati derivanti dalla simulazione numerica del solo processo di riempimento e solidificazione. Si è dimostrato che questo modello applicato a componenti di reale produzione, è in linea con i risultati sperimentali.

**PAROLE CHIAVE:** GHISA GRIGIA – ELEMENTI FINITI – ANALISI TERMICA – PROPRIETÀ MECCANICHE – EN-GJL-300

## INTRODUZIONE

Le proprietà meccaniche di un componente in ghisa sono spesso molto differenti da quelle riportate nella classificazione standard della lega utilizzata. Questo accade perché il grado di una ghisa viene classificato secondo valori ottenuti da campioni fusi separatamente, la cui storia termica e microstrutturale è molto diversa da quella della fusione stessa. In realtà, le variazioni geometriche della cavità dello stampo, causano diverse velocità di raffreddamento da un'area all'altra. A loro volta tali variazioni sono associate a differenti microstrutture e valori di proprietà meccaniche. Per questo motivo, i progettisti spesso obbligano la fonderia a produrre fusioni con caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione controllata mediante campioni prelevati in determinate zone della fusione stessa. Questa metodologia richiede costi e tempi elevati, in quanto implica da un lato una diminuzione della produzione e dall'altro l'utilizzo di test di trazione non conformi alla normativa vigente, a volte, a seconda della posizione di prelievo e dello spessore della fusione, difficili da realizzare. Si sottolinea inoltre il fatto che la resistenza statica e a fatica di getti di grosso spessore non è ancora stata standardizzata e questo è giustificato il crescente aumento di lavori in letteratura su tale argomento [1-5].

Una possibile soluzione a questo problema viene dalla simulazione numerica che è in grado di predire le proprietà meccaniche del getto dati i parametri di processo e la composizione chimica della lega [6].

Jakob Olofsson and Ingvar L Svensson hanno dimostrato nel loro lavoro [7] che è possibile predire le proprietà meccaniche di un componente di ghisa attraverso la simulazione del processo. In tale lavoro viene proposta una particolare strategia [8] che utilizza modelli di solidificazione e di trasformazione allo stato solido per predire la formazione di microstrutture e

il comportamento meccanico, a livello locale, di tutto il componente. Con un approccio simile, due anni prima, Donlean aveva proposto un modello in grado di predire la microstruttura e le proprietà meccaniche di componenti in ghisa sferoidale ferritica [9]. Il modello numerico è stato applicato a fusioni di grosso spessore con una correlazione soddisfacente tra risultati numerici e sperimentali. Nello stesso anno (2000), i ricercatori italiani Calcaterra, Campana e Tomesani, hanno utilizzato un sistema basato su una rete neurale artificiale per predire le proprietà meccaniche di un componente di ghisa sferoidale in relazione ai parametri di processo [10]. Tuttavia, tale approccio risulta limitato dal fatto che non prende in considerazione le variazioni geometriche di componenti reali. Un altro recente ed interessante lavoro applicato alla valutazione delle proprietà meccaniche delle fusioni è la rapida stima delle proprietà meccaniche dei getti attraverso la misurazione della resistività elettrica [11]. Tuttavia, anche se questo approccio sembra es-

**P. Ferro, T. Borsato, F. Bonollo,**

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

**S. Padovan**

Fonderie di Montorso, via Valchiampo 62, 36050, Montorso (VI), Italy  
Corresponding author: Prof. Paolo Ferro  
TEL. +39 0444 998769  
FAX. +39 0444 998888  
e-mail: paolo.ferro@unipd.it, ferro@gest.unipd.it

# Cast iron

sero molto efficiente per una diagnostica rapida delle fusioni sulla linea produttiva, esso richiede la determinazione di una equazione di regressione per ogni geometria. Infine, un'analisi di regressione è stata proposta da Shturmakov e Loper, per predire le proprietà meccaniche della ghisa grigia [12]. Sfortunatamente, i risultati ottenuti non prendono in considerazione i parametri di processo e la geometria del componente, ma considerano esclusivamente le variazioni della composizione chimica. Le proprietà meccaniche della ghisa grigia sono ben studiate nella letteratura in relazioni alle variazioni microstrutturali [13] alla velocità di raffreddamento [14], ma solo la correlazione tra la durezza velocità di raffreddamento è stata finora analizzata [14].

Tra gli approcci sopra suggeriti, finalizzati al calcolo della proprietà meccaniche dei componenti in ghisa, la simulazione numerica di processo sembrerebbe il più promettente. Tuttavia quest'ultimo presenta dei punti a sfavore devono essere criticamente presi in considerazione. Il calcolo fluido-termomeccanico transitorio e non lineare è costoso in termini di tempo e denaro e l'alto costo computazionale di un modello è spesso non conveniente per le applicazioni industriali che richiedono soluzioni veloci e affidabili. L'affidabilità di un modello è legato alla correttezza dei dati di input, che sono spesso difficili da reperire, come le proprietà metallurgiche, termiche e meccaniche in funzione della temperatura, la re-

sistenza e lo scambio termico tra fusione e forma. Un altro metodo di calcolo delle proprietà meccaniche si basa sulla valutazione delle proprietà statiche a fatica in funzioni dello spessore della sezione [15] e/o della microstruttura [16]. In questo scenario, il presente lavoro mira a proporre un approccio che sfrutti i vantaggi della simulazione termica e superi allo stesso tempo i problemi relativi al calcolo microstrutturale e meccanico. Il tempo di solidificazione viene dapprima ottenuto in ogni punto della fusione attraverso la simulazione numerica di riempimento e solidificazione [17]. Le proprietà meccaniche del componente vengono poi calcolate usando una curva master che mette in correlazione la resistenza a trazione finale e il tempo di solidificazione.

## Strategia di previsione delle proprietà meccaniche

L'approccio proposto, che mira a predire in modo rapido le proprietà meccaniche delle fusioni di ghisa, è illustrato nella figura 1. Viene calcolata una curva master per ogni tipologia di lega a partire da prove a trazione eseguite su provini prelevati da campioni a gradini. Inizialmente si ottiene una curva sperimentale che correla la variazione della resistenza a trazione rispetto allo spessore. Tramite una simulazione numerica, vengono poi correlati il tempo di solidificazione e lo spessore, ottenendo così la curva master che correla la resistenza a trazione con il tempo di solidificazione.

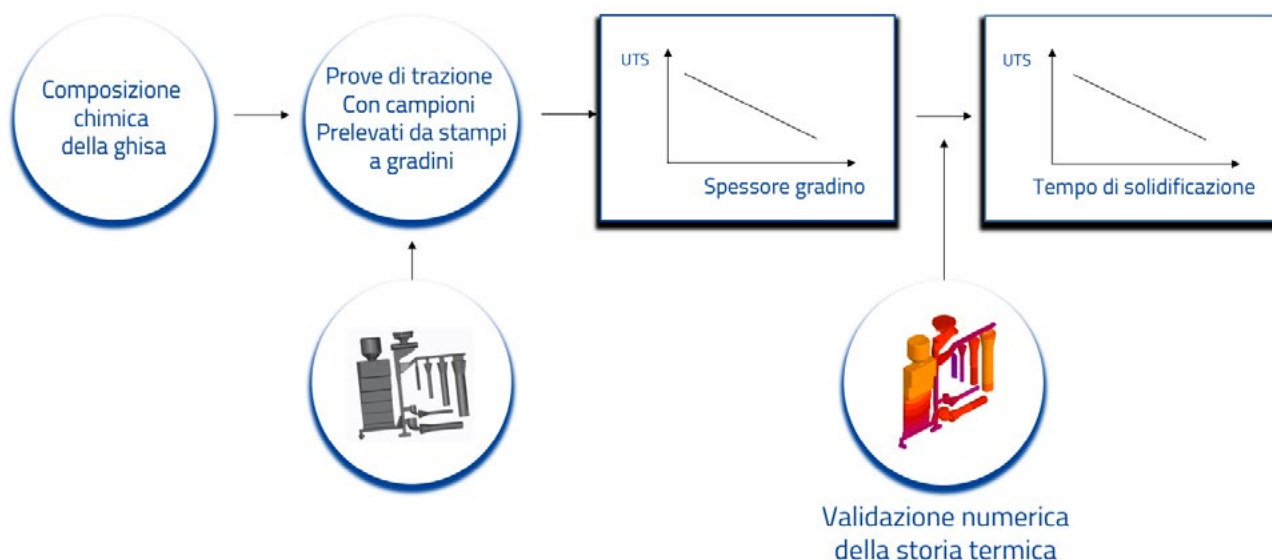
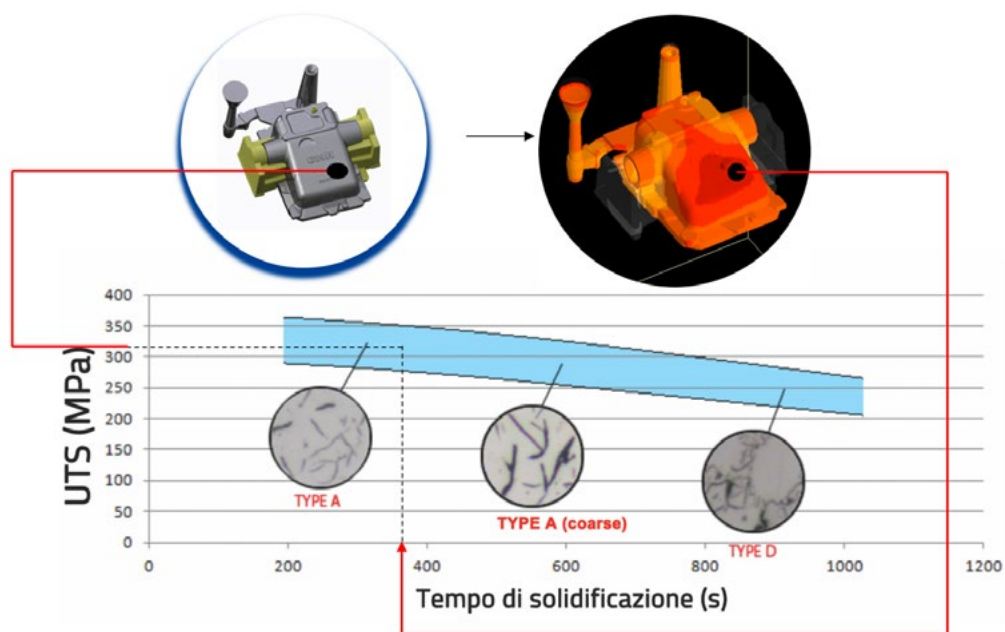


Fig. 1 – Schema per il calcolo della curva master

La curva master ottenuta viene usata per predire in modo rapido le proprietà meccaniche di un getto. Il tempo di solidificazione in ogni specifica area della fusione e calcolato mediante simulazione numerica viene utilizzato come input per la previsione delle proprietà meccaniche corrispondenti

con un grado di incertezza che è direttamente correlato alla banda di dispersione della curva master stessa (Fig.2). Nei prossimi paragrafi, verranno descritti i risultati ottenuti e la procedura per il calcolo della curva master della griglia grigia EN-GJL-300.



**Fig. 2** – Metodologia di previsione della resistenza meccanica di getti in ghisa

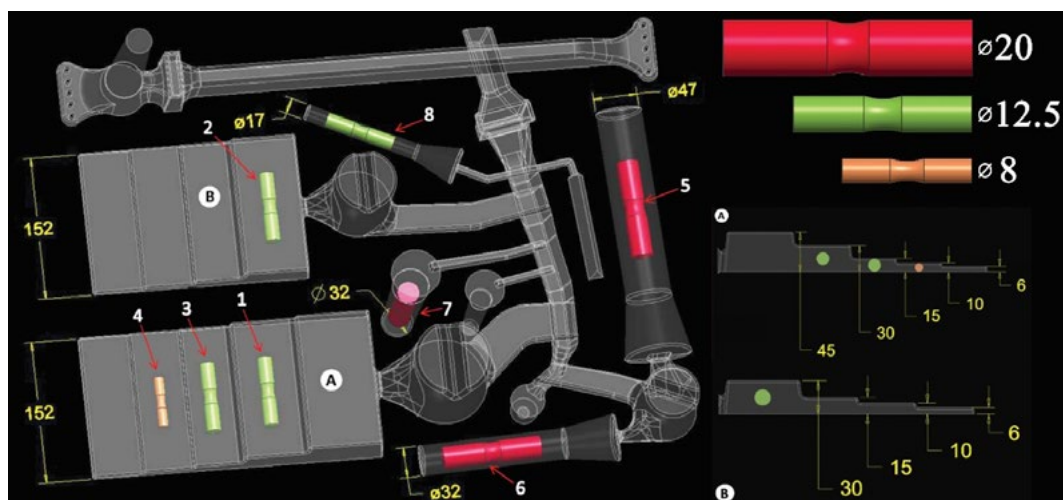
### Curva master, ghisa EN-GJL-300

#### Definizione dei campioni

La geometria dei campioni è stata ottenuta in accordo alla norma UNI EN 1561 e al lavoro eseguito da Behnam [14].

In particolare, il materiale, la ghisa grigia EN-GJL-300 (GCI) e

gli spessori e i corrispondenti diametri dei campioni sono stati scelti in accordo con lo spessore rilevante di parete, definiti negli standard sopra menzionati. La figura 3 mostra la geometria degli stampi usati nelle prove.

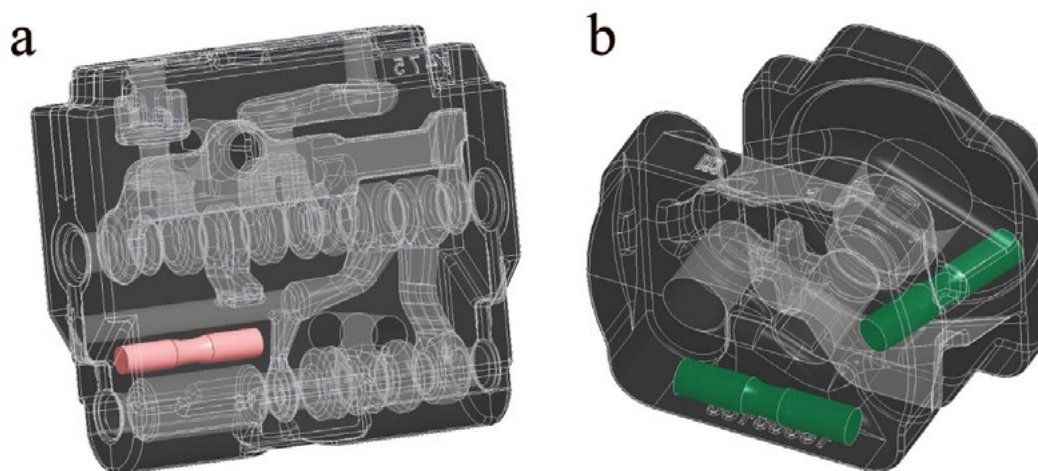


**Fig. 3** – Geometria degli stampi e dei campioni usati nelle prove [mm]. I provini con lo stesso colore hanno lo stesso diametro evidenziato nella legenda.

# Cast iron

È importante notare che, per tenere conto degli effetti di diverse velocità di raffreddamento all'interno dello stesso spessore, si è ottenuto un campione di 30 mm direttamente davanti all'attacco di colata nel campione a scalini B (fig. 3). Inoltre, al fine di sopperire alle variazioni dei parametri di fonderia che possono verificarsi in diversi giorni lavorativi, sono stati prodotti quattro campioni al giorno in quattro giorni diversi. I getti utilizzati per verificare l'approccio proposto sono un Valve Housing e un Front Cover prodotti secondo la norma UNI EN

1561. La durezza Brinell richiesta per la prima fusione doveva rientrare nell'intervallo tra 200 e 250 HB mentre la resistenza a trazione (UTS) doveva essere di almeno 250 MPa. La seconda fusione doveva soddisfare una durezza Brinell di 200-230 HB e una resistenza a trazione (UTS) minima di 210 MPa. Entrambi i getti sono stati prodotti con la EN-GJL-300 (GCI). La Figura 4 mostra la geometria dei getti reali utilizzati per convalidare l'approccio proposto e le aree in cui sono stati prelevati i campioni per le prove di trazione.

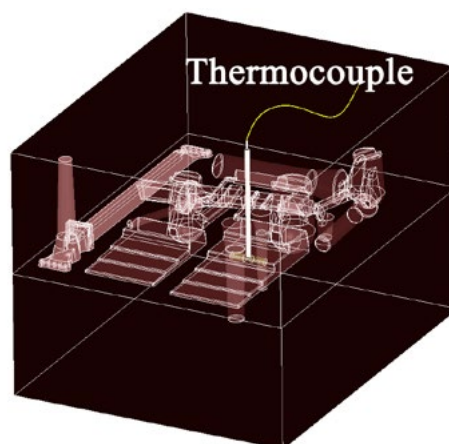


**Fig. 4** – Valve Housing (a) e Front Cover (b)

## Misurazione della temperatura

Per calibrare il modello numerico è stata effettuata una misurazione della temperatura direttamente all'interno della fusione durante la colata e la solidificazione per mezzo di una termocoppia di tipo K (K chromel (Ni-Cr) (+) / alumel (Ni-Al) (-)). Allo scopo di proteggerla dalla lega fusa, la termocoppia è stata inserita in un tubo ceramico ( $Al_2O_3$ ) e bloccata all'interno, at-

traverso un successivo riempimento del tubo con una soluzione ceramica a base di allumina, successivamente essiccata. La figura 5 mostra la posizione della termocoppia, al centro dello spessore di 30 mm del campione A (fig. 3), mentre la figura 6a mostra il risultato ottenuto, la definizione e la procedura utilizzata per calcolare il tempo di solidificazione.



**Fig. 5** – Posizione termocoppia

### Calibrazione dei parametri termici

Il modello numerico per la simulazione di riempimento e solidificazione è stato realizzato mediante il codice NovaFlow & Solid. Nell'approccio proposto, la simulazione viene utilizzata per calcolare i tempi di solidificazione nelle diverse parti del getto in cui devono essere determinate le proprietà meccaniche. È necessario che i parametri di input utilizzati nel modello siano corretti e quindi validati da prove sperimentali. È stata eseguita un'analisi di convergenza al fine di ottimizzare la densità

della mesh e i corrispondenti tempi di calcolo ottenendo una dimensione dell'elemento finito di 4,7 mm. La calibrazione dei parametri del modello è stata ottenuta confrontando la storia termica misurata con la termocoppia e quella risultante dalla simulazione (Figura 6b). I parametri di input sono stati ricavati dal database del software e sono state apportate piccole variazioni per sovrapporre le due curve come mostrato in Figura 6b. L'allineamento tra risultati sperimentali e numerici ha assicurato una buona calibrazione dei parametri del modello numerico.

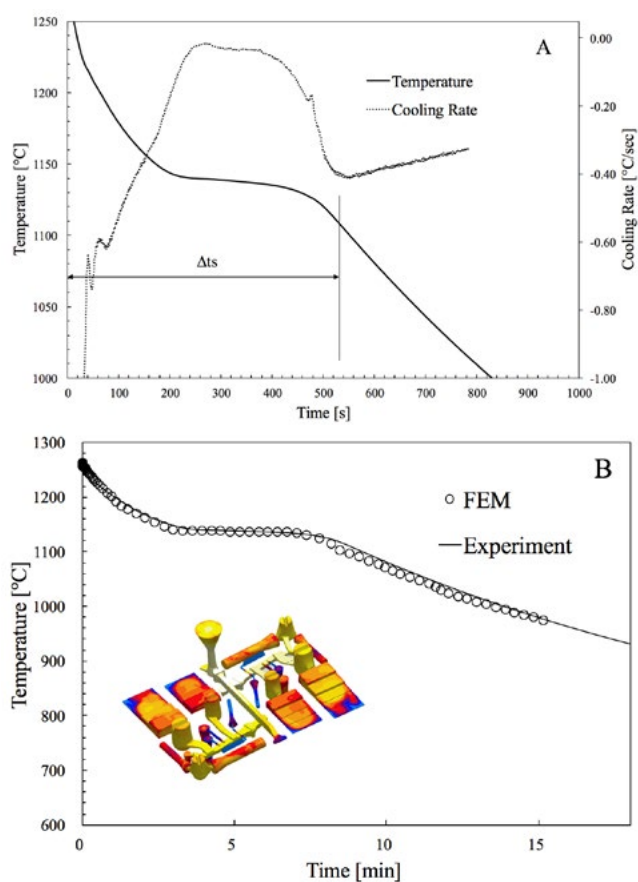


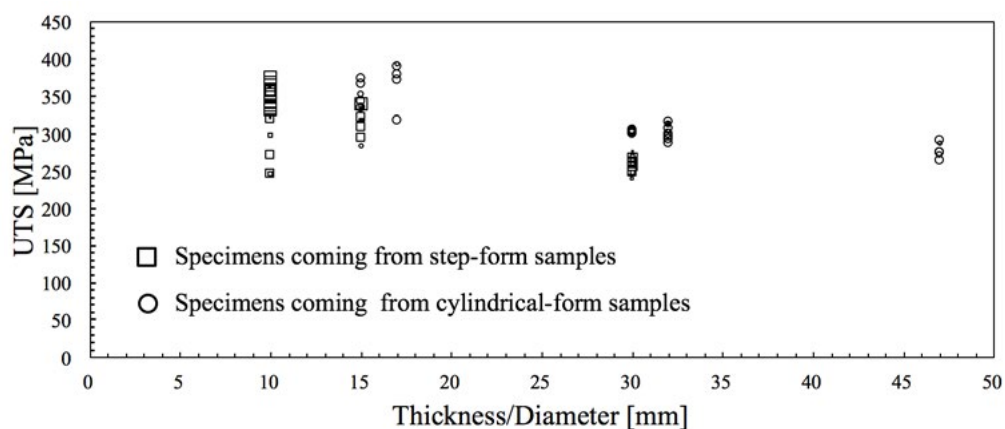
Fig. 6 – Storia termica misurata all'interno del gradino di spessore 30 mm (A) e confronto tra risultati sperimentali e numerici (B).

### Risultati e discussione

#### UTS 'versus' Spessore

La Figura 7 riassume i risultati delle prove a trazione (in termini di UTS) in funzione dello spessore (o diametro) del campione da cui sono stati prelevati i provini. Si noti che nonostante la dispersione dei risultati, tipica dei materiali fragili, si trova una relazione inversa tra lo spessore/diametro del campione e il suo valore UTS. Maggiore è lo spessore/diametro, minore è la resistenza alla trazione. Tuttavia, questa relazione sembra non essere vera per campioni prelevati da gradino di 10 mm. Questo comportamento apparentemente anomalo è dovuto all'elevata velocità di raffreddamento e alla conseguente microstruttura

sottoraffreddata che può essere rilevata in quella zona del campione a gradini. Vale la pena ricordare che la dispersione dei risultati è anche dovuta alla diversa microstruttura che può essere presente nei campioni prelevati da gradini dello stesso spessore ma caratterizzati da tempi di solidificazione diversi. Per lo stesso motivo, la microstruttura e quindi le proprietà meccaniche, dei provini provenienti da campioni a gradini e cilindrici, saranno diverse. Questo è il motivo principale per cui la "curva master" deve riferirsi al tempo di solidificazione piuttosto che allo spessore o al diametro della fusione come fatto nel passato o negli standard.

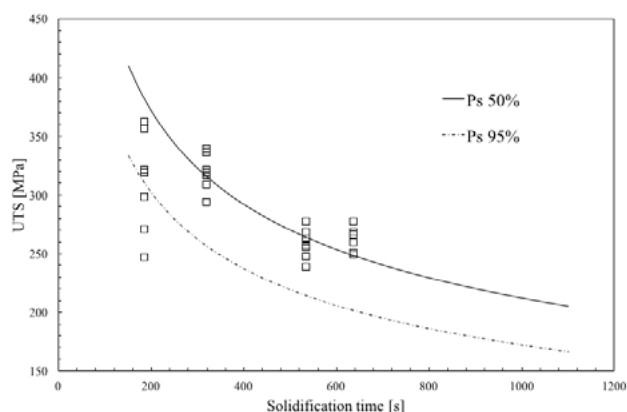


**Fig. 7** –UTS di EN-GJL-300 GCI in funzione dello spessore/diametro del campione

### Curva master, UTS 'versus' tempo di solidificazione

Utilizzando il modello numerico calibrato, il tempo di solidificazione è stato calcolato per ciascun campione facendo riferimento al punto centrale del gradino dal quale è stato prelevato. La piccola variazione dei tempi di solidificazione attraverso la sezione del campione è stata quindi trascurata. Usando solo i valori UTS provenienti da campioni a gradini, la Figura 7 è stata

quindi convertita in un grafico più utile che mette in relazione l'UTS al tempo di solidificazione; tale curva viene chiamata "curva master" (CM) (Fig. 8). I dati sono stati elaborati statisticamente utilizzando una distribuzione log-normale e sono state plottate le probabilità di sopravvivenza ( $P_s$ ) del 50% e del 95% (Fig. 8).



**Fig. 8** – Curva master di EN-GJL 300 GCI

### Calcolo rapido delle proprietà meccaniche dei getti

Supponendo di ottenere getti sani, privi di macro difetti rilevanti, la CM (Fig. 8) può essere utilizzata per stimare rapidamente l'UTS del getto utilizzando i tempi di solidificazione provenienti dalla simulazione numerica. Facendo riferimento ai tempi di solidificazione calcolati delle zone di interesse del Front Cover e del Valve Housing mostrati nella figura 4, i valori UTS stimati con una probabilità di sopravvivenza del 50% sono 270 MPa, 265 MPa e 225 MPa, rispettivamente. Se i valori reali di UTS

ottenuti mediante prove di trazione sono ora inseriti nella CM, è facile osservare che essi si trovano vicini ai valori di  $P_s$  50% (Fig. 9). Gli stessi risultati sono stati ottenuti per le proprietà meccaniche dei campioni di forma cilindrica, come mostrato nella figura 9. Infine, la figura 9 mostra anche le microstrutture ottenute in funzione del tempo di solidificazione.

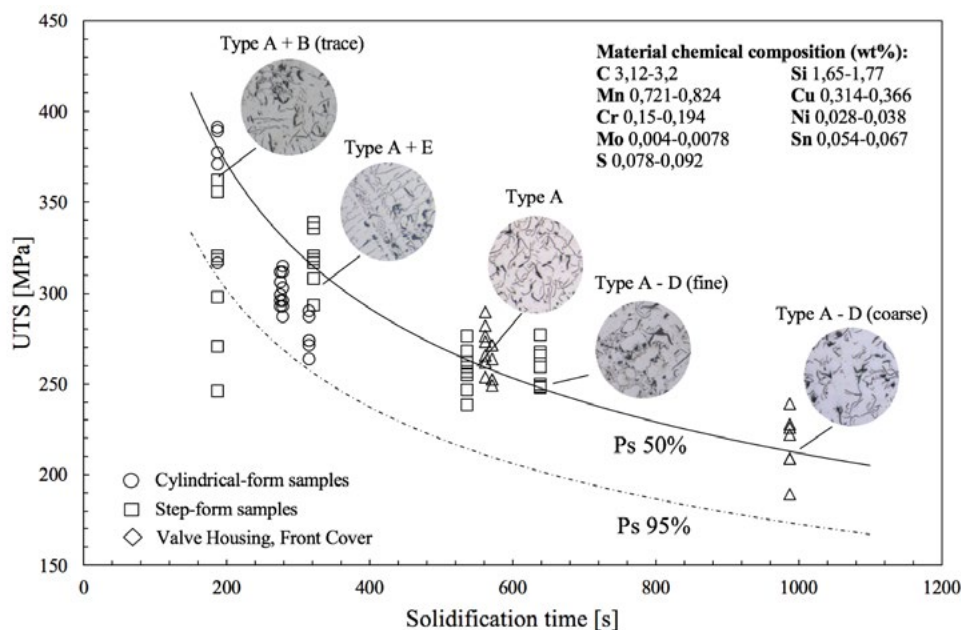


Fig. 9 – Confronto tra valori UTS previsti e sperimentali in funzione del tempo di solidificazione

### Conclusioni

È stato descritto un metodo per una stima rapida delle proprietà meccaniche di getti in ghisa grigia EN-GJL 300. L'approccio proposto si basa sulla relazione intrinseca tra microstruttura-tempo di solidificazione e proprietà meccaniche. Una curva master, che descrive le proprietà a trazione in funzione del tempo di solidificazione, è stata calcolata mediante prove di trazione eseguite su provini prelevati da campioni a gradini e la simulazione numerica di riempimento e solidificazione. Per getti sani si suppone che la curva master dipenda solo dalla composizione chimica della lega analizzata. È stato dimostrato che con un rapido calcolo numerico dei tempi di solidificazione delle

zone di interesse di una fusione industriale, la curva master è in grado di stimare rapidamente la resistenza a trazione di tali zone. Il vantaggio del metodo consiste nel superare i problemi relativi al calcolo numerico microstrutturale e meccanico (alti tempi di calcolo, incertezze sulle proprietà meccaniche della lega in funzione delle fasi e della temperatura), sfruttando i soli risultati derivanti dal calcolo numerico termico.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Fonderie di Montorso SpA per la fornitura del materiale, nonché il supporto finanziario e tecnico per questo progetto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Borsato, P. Ferro, F. Berto, C. Carollo. Mechanical and Fatigue Properties of Heavy Section Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron Casting. *Advanced Engineering Materials* DOI: 10.1002/adem.201600256 (2016).
- [2] T. Borsato, P. Ferro, F. Berto, C. Carollo. Fatigue strength improvement of heavy-section pearlitic ductile iron castings by in-mould inoculation treatment. *Int. J. Fatigue*. 2017. In press.
- [3] T. Borsato, P. Ferro, F. Berto, C. Carollo. Mechanical and fatigue properties of pearlitic ductile iron castings characterized by long solidification times. *Engineering Failure Analysis* 79 (2017) 902-912
- [4] T. Borsato, P. Ferro, F. Berto, C. Carollo. Fatigue properties of solution strengthened ferritic ductile cast irons in heavy section castings. *La Metallurgia Italiana*. 10 (2017) 25-32.
- [5] P. Ferro, P. Lazzarin, F. Berto. 2012. "Fatigue properties of ductile iron containing chunky graphite". *Materials Science and Engineering A*, 554 pp. 122-128.
- [6] Peng Lan, Jiaquan Zhang. Study on the mechanical behaviors of grey iron mould by simulation and experiment. *Materials and Design* 53 (2014) 822–829
- [7] Jakob Olofsson and Ingvar L Svensson. Casting and stress-strain simulations of a cast ductile iron component using microstructure based mechanical behavior. *Mater. Sci. Eng.* 33 (2012) 012051
- [8] Olofsson J and Svensson I L. Incorporating predicted local mechanical behaviour of cast components into finite element simulations *Mater. Des.* 34 (2012) 494–500
- [9] P. Donelan. Modelling microstructural and mechanical properties of ferritic ductile cast iron, *Materials Science and Technology*, 16:3, (2000) 261-269
- [10] S. Calcaterra, G. Campana, L. Tomesani. Prediction of mechanical properties in spheroidal cast iron by neural networks. *Journal of Materials Processing Technology* 104 (2000) 74-80
- [11] M. Bieroński, O. Krasa, M. Koza, D. Książek, R. Kuś. Evaluation of the Mechanical Properties of Gray Cast Iron Using Electrical Resistivity Measurement. *Archives of Foundry Engineering*, 16 (2016) 29-32
- [12] Shturmakov AJ, Loper CR Jr. Predictive analysis of mechanical properties in commercial gray iron. *Am Foundry Soc* 2002; 99: 609–615
- [13] L. Collini, G. Nicoletto, R. Konecna. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* 488 (2008) 529–539
- [14] M.M. Jabbari Behnam, P. Davami, N. Varahram. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron. *Materials Science and Engineering A* 528 (2010) 583–588.
- [15] C. S. Çetinarıslan, S. Karaman Genç. Study in the variation of mechanical properties of nodular cast iron depending upon section thickness. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2014, 45, No. 2, pp 106-113
- [16] P. Baicchi, L. Collini, M. Guidetti, R. Konecna, V. Majerova, G. Nicoletto. Correlazione microstruttura-proprietà della ghisa grigia. *Proceeding of XXXIV national congress of Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS)*. 14-17 September 2005. Milan (IT)
- [17] V. Kumar and A. Kumar, "Simulation of Cooling Rate of Gray Cast Iron Casting in a Sand Mould and its Experimental Validation", *Materials Science Forum*, Vol. 710, pp. 208-213, 2012