



XXXI° Congresso di Fonderia ASSOFOND

Vicenza 26-27 ottobre 2012

MODELLAZIONE DI PROCESSO, PREVISIONE DI MICROSTRUTTURA E PROPRIETA' MECCANICHE DI GHISE SFEROIDALI COLATE IN SABBIA

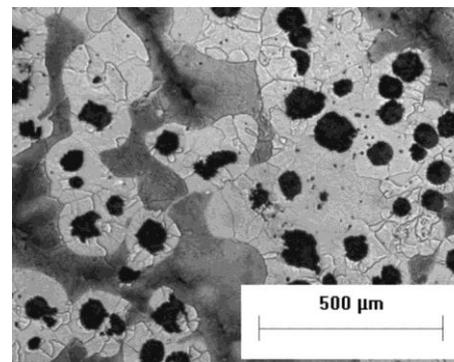
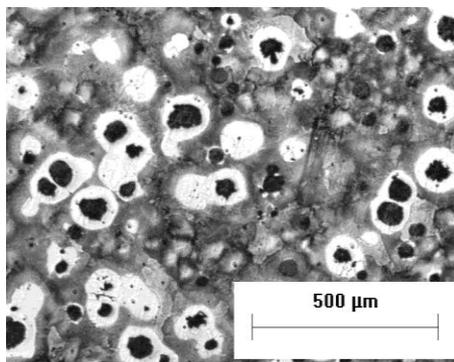
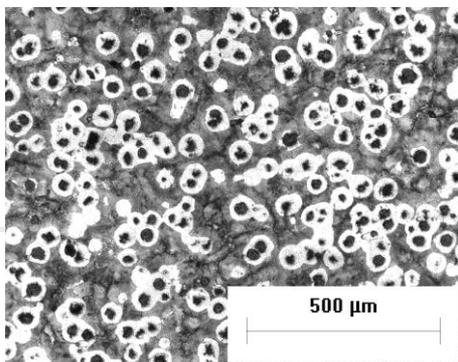
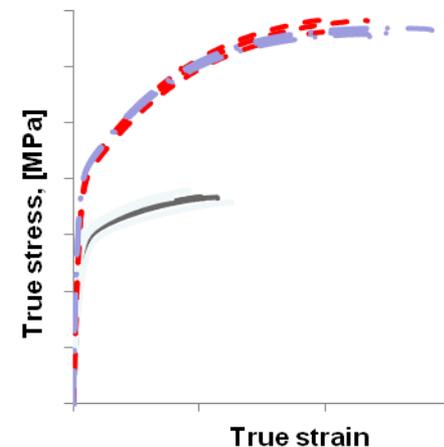
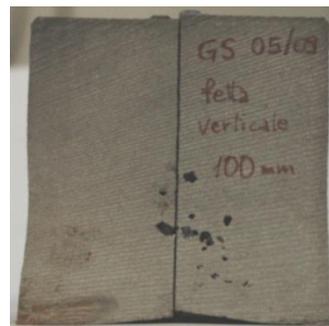
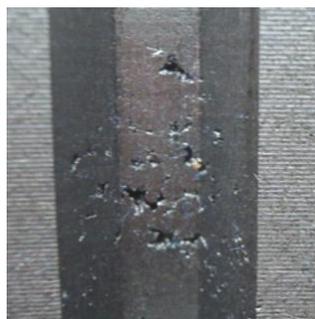
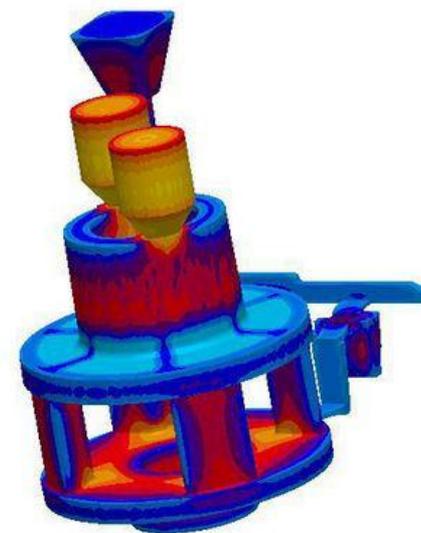
**Andrea Morri^a, L. Ceschini^a, Alessandro Morri^a, L. Tomesani^a,
E. Salsi^b, R. Squatrito^b, G. Minak^a, N. Radovic^b**

^a *Università di Bologna, Dip. DIN, V.le Risorgimento 2, 40136 Bologna*

^b *Università di Bologna, CIRI - MAM, V.le Risorgimento 2, 40136 Bologna*

Introduzione

La **simulazione di processo** rappresenta oggi un consolidato strumento di supporto proposto alle fonderie per ottimizzare le geometrie delle placche modello al fine di limitare le problematiche di riempimento ed alimentazione dei getti.

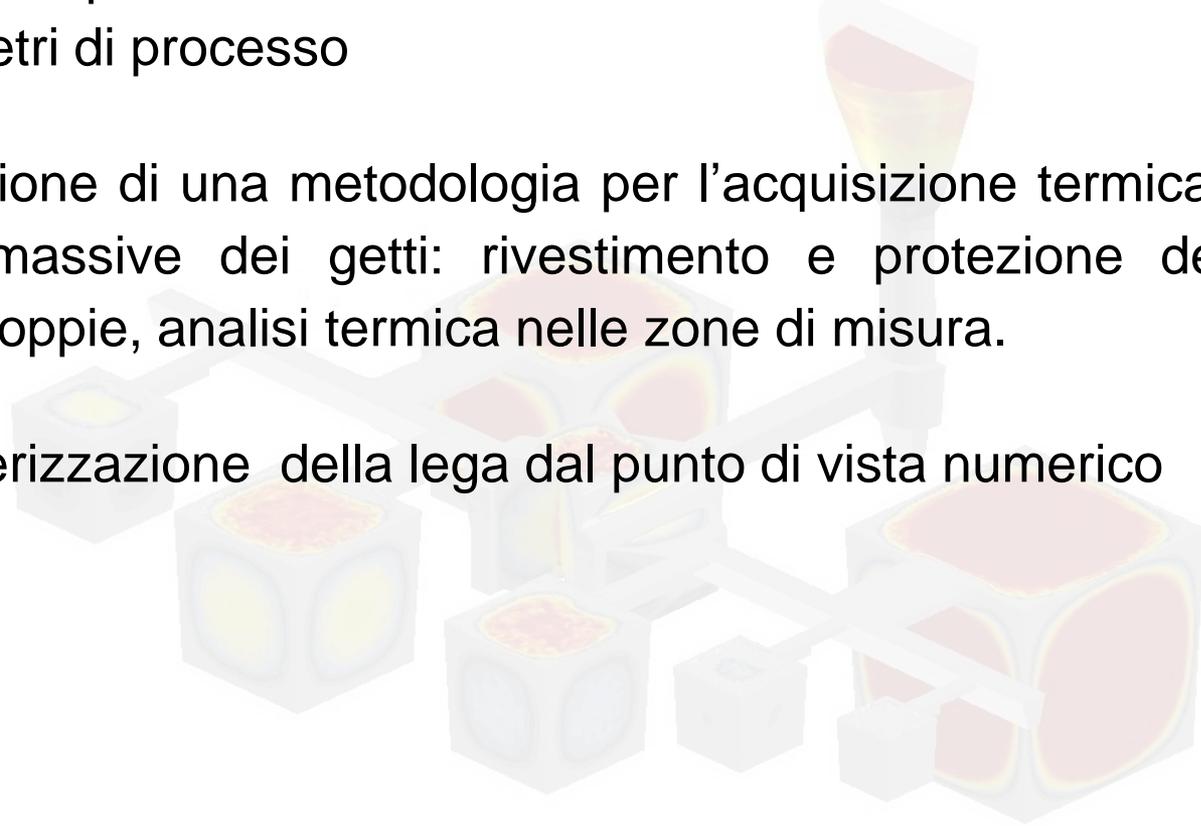


Obiettivi

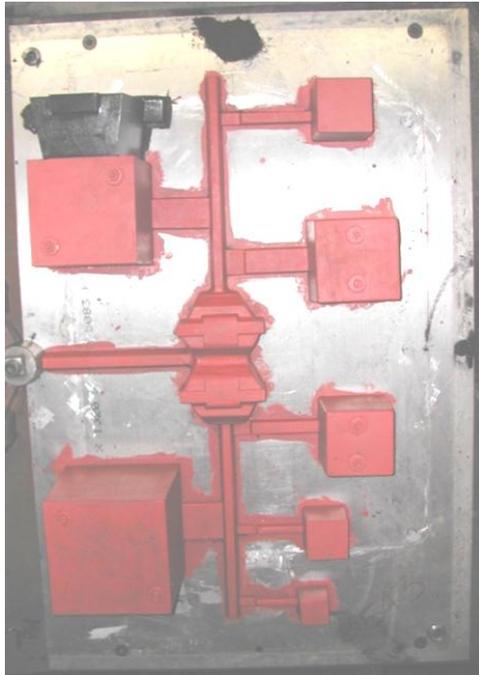
1. Taratura di codici di simulazione di processo e validazione di modelli numerici “MICRO” di previsione delle caratteristiche microstrutturali e meccaniche
2. Definizione di una metodologia di caratterizzazione di leghe ferrose tramite analisi termica “in situ”
3. Produzione di materiale con caratteristiche microstrutturali differenziate in base alle condizioni di solidificazione per l'estrazione di provini di caratterizzazione microstrutturale e meccanica

Aspetti critici

1. Messa a punto di un sistema di misura e controllo dei parametri di processo
2. Definizione di una metodologia per l'acquisizione termica in zone massive dei getti: rivestimento e protezione delle termocoppie, analisi termica nelle zone di misura.
3. Caratterizzazione della lega dal punto di vista numerico

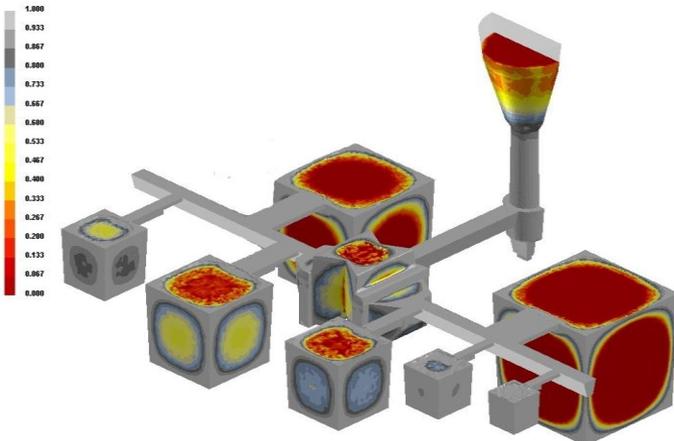


Materiale sperimentale



- Grappolo di cubi con modulo termico variabile in un ampio range (60mm ÷ 210 mm di lato)
- 2 colate in ghisa sferoidale EN-GJS-600-3 (UNI EN 1563-09)

	I esperienza	II esperienza
C	3.66	3.63
Si	2.60	2.65
Mn	0.218	0.276
P	0.032	0.036
S	0.004	0.002
Ni	0.069	0.060
Cr	0.062	0.083
Cu	0.052	0.077
Mo	0.001	0.002
Mg	0.055	0.049
Sn	0.013	0.011
Ti	0.034	0.033
Pb	0.007	0.007
Al	0.011	0.011
Zn	0	0
CE	4.50	4.53



Composizione chimica (% in peso)

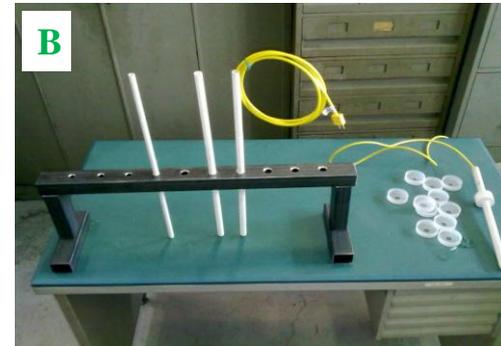
Sistema di acquisizione termica "in situ"

A) Catena di acquisizione dei dati di temperatura

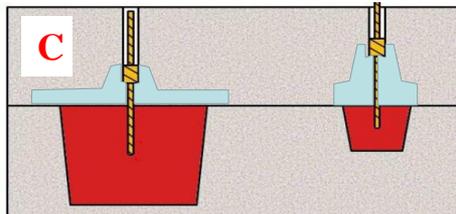
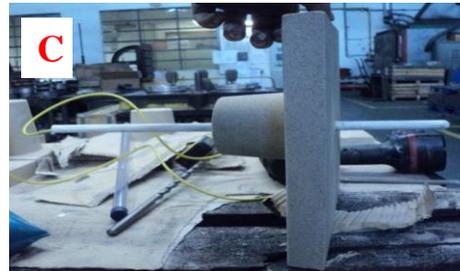


B) Formatura delle sonde in materiale ceramico refrattario

- Posizionamento delle termocoppie in tubi di ceramico refrattario preformati
- Utilizzo di materiale refrattario colabile (Miscela acqua/polvere di allumina per il fissaggio delle termocoppie (al dispositivo protettivo ed alla motta)
- Essiccazione in forno ventilato a 100°C per 48 ore

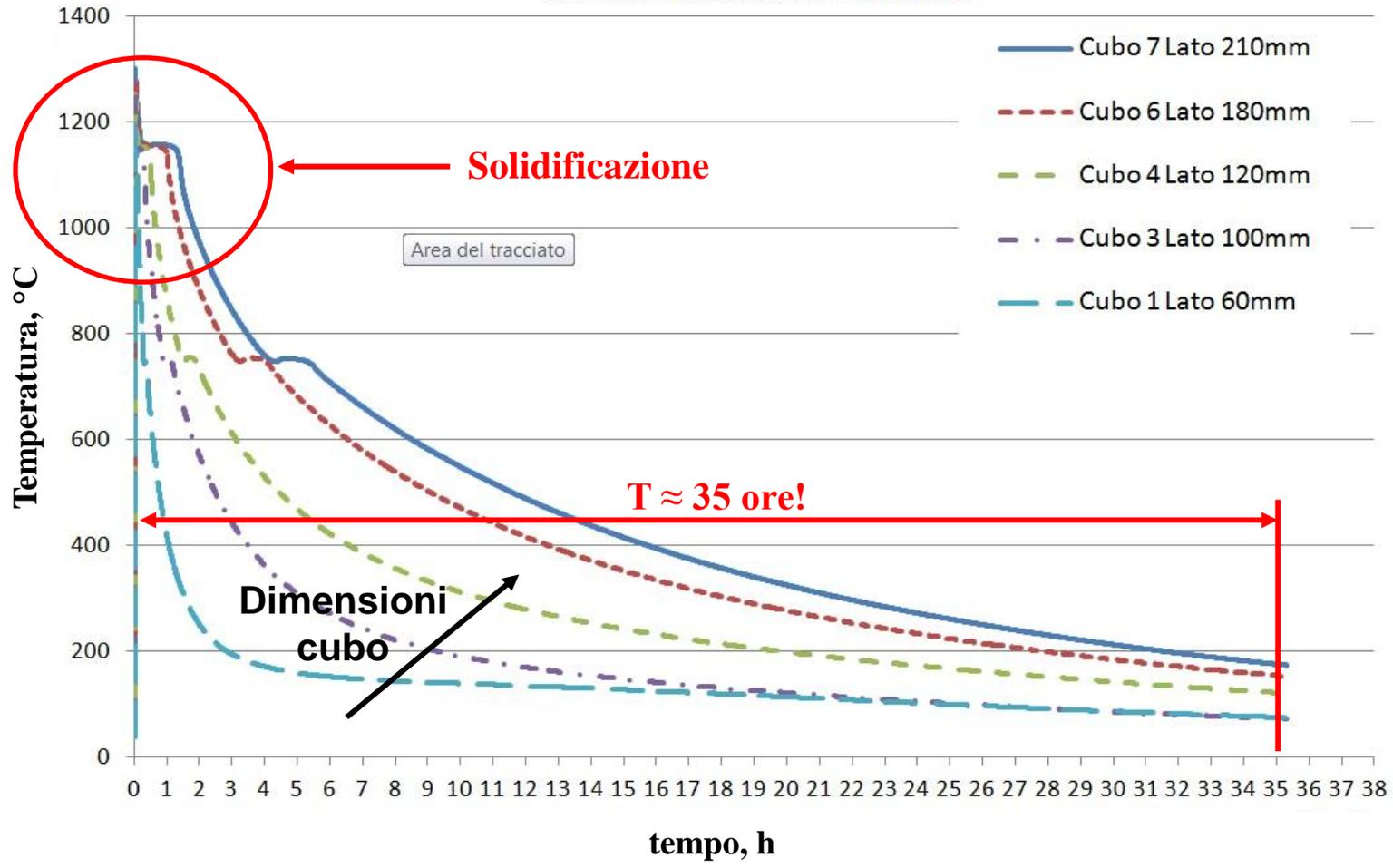


C) Applicazione del sistema "in linea"

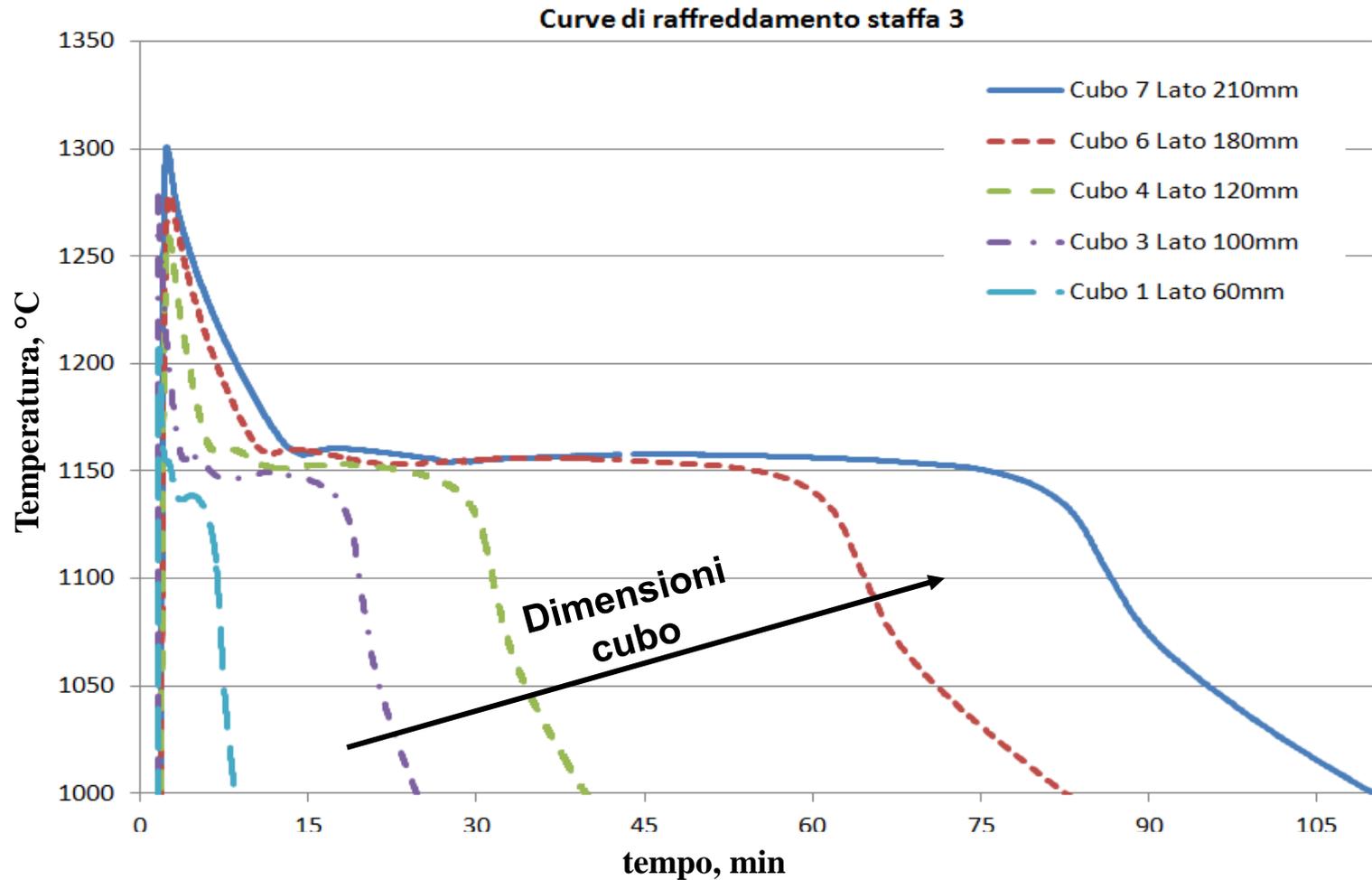


Risultati: Monitoraggio dell'attrezzatura di colata

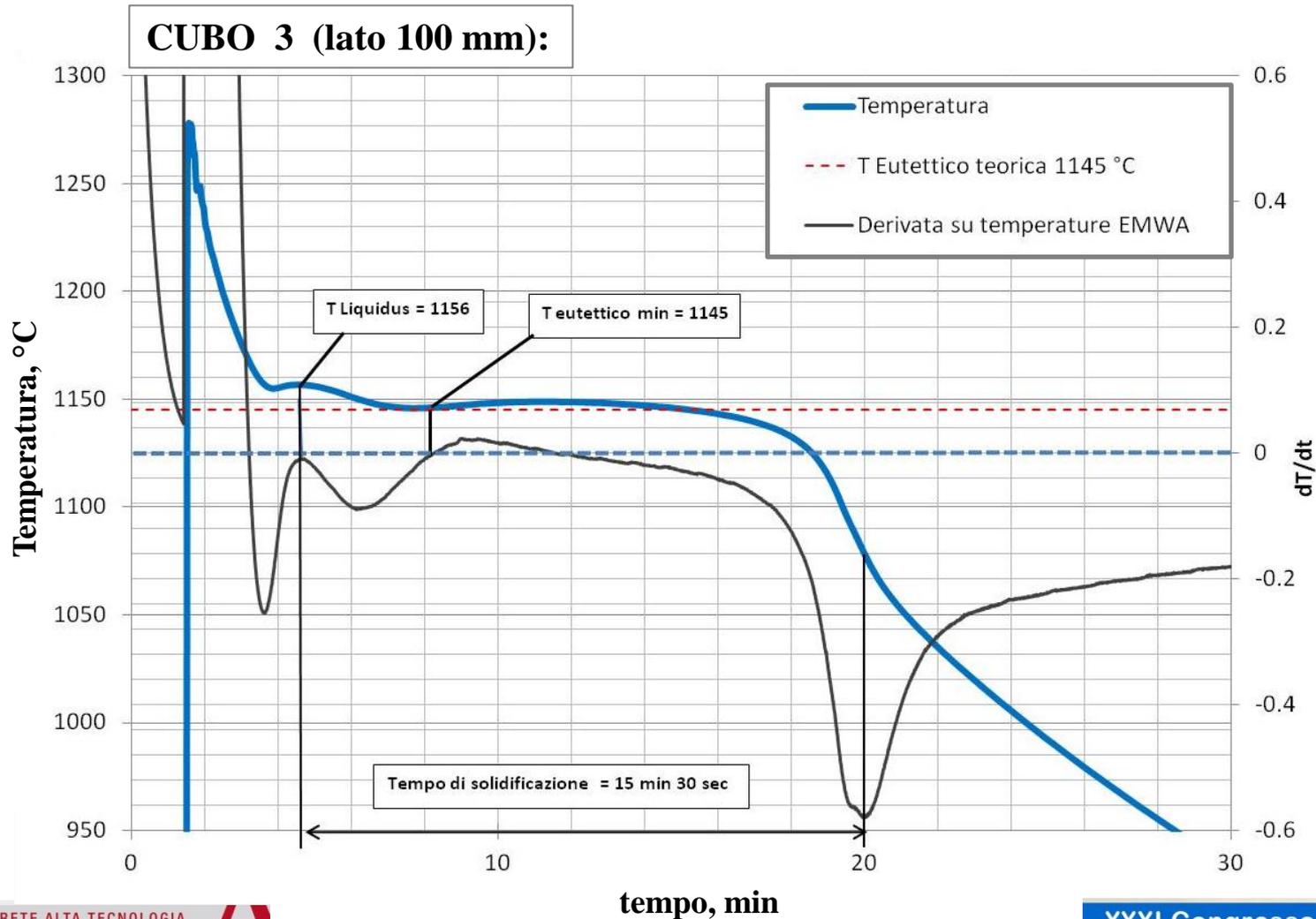
Curve di raffreddamento staffa 3



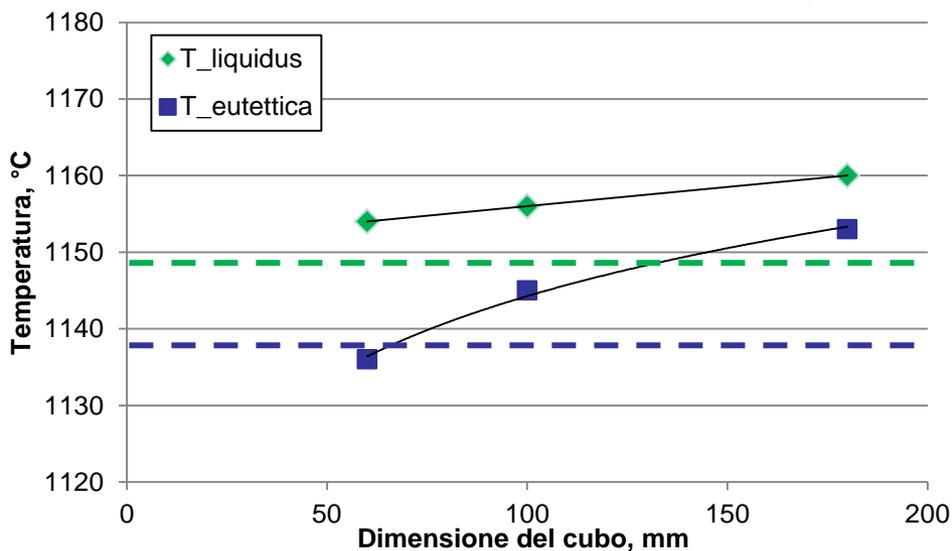
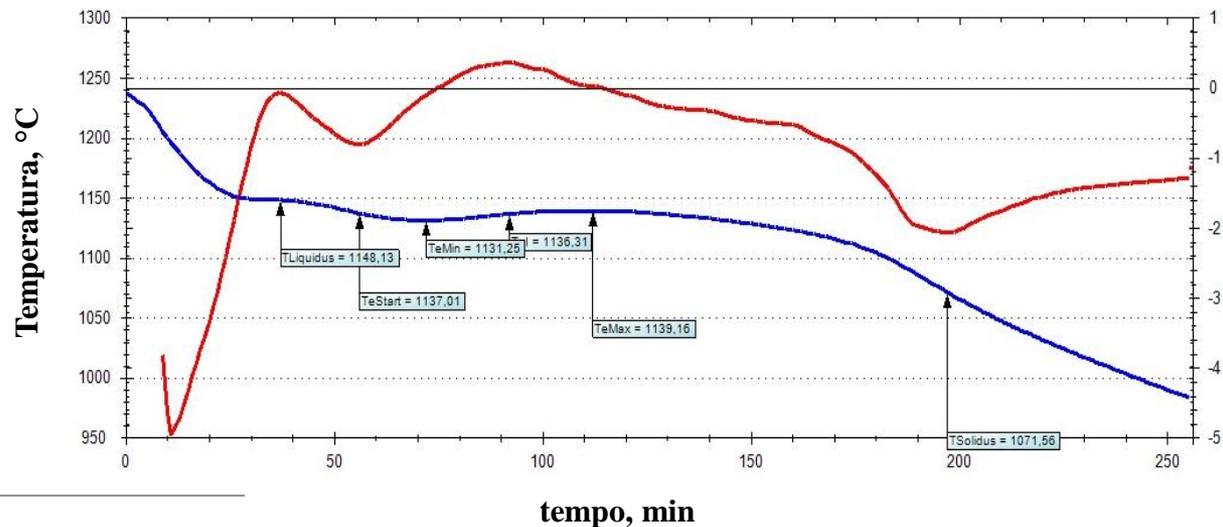
Risultati: Solidificazione



Analisi della derivata della curva di raffreddamento



Confronto coi risultati dell'analisi termica tradizionale



	Analisi termica	Cubo 1 (60 mm)	Cubo3 (100 mm)	Cubo6 (180 mm)
T liq. [°C]	1148	1154	1156	1160
T eutet. [°C]	1137	1136	1145	1153

Simulazione di colata: condizioni a contorno

Processo di taratura ricorsiva dei coefficienti di scambio e della caratteristiche termofisiche dei materiali attraverso il confronto con le temperature acquisite:

- **Legha:** Caratterizzata con **Computherm** (Scheil) dalla composizione chimica registrata con Quantometro (**II esperienza**):

Elemento	Si	Mg	Mn	Cu	C	P	S	Ni	Al
%	2.65	0.049	0.276	0.077	3.63	0.036	0.002	0.06	0.011

- **Modulo di calcolo Microstrutturale attivo**

- **Motta: Green Sand**

Densità: 1370 kg/m³

Calore specifico: 1.03 KJ/Kg°K

Conduttività :

Temperatura [°C]	20	200	400	705	1005	1300
Conduttività [W/m°K]	0.40	0.45	0.51	0.59	0.77	1.13

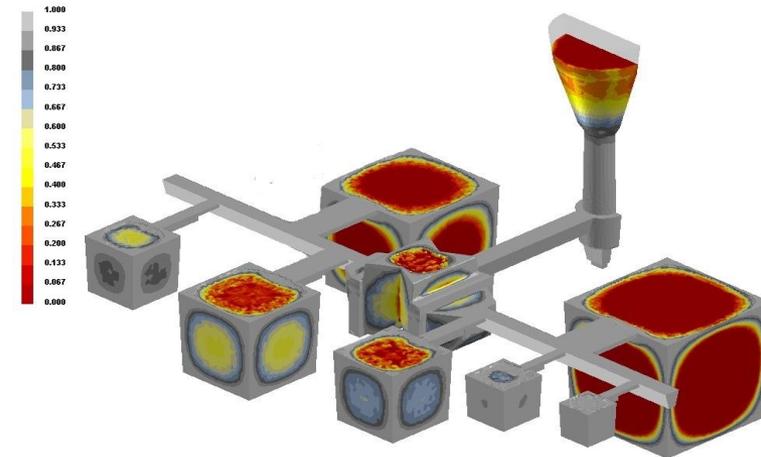
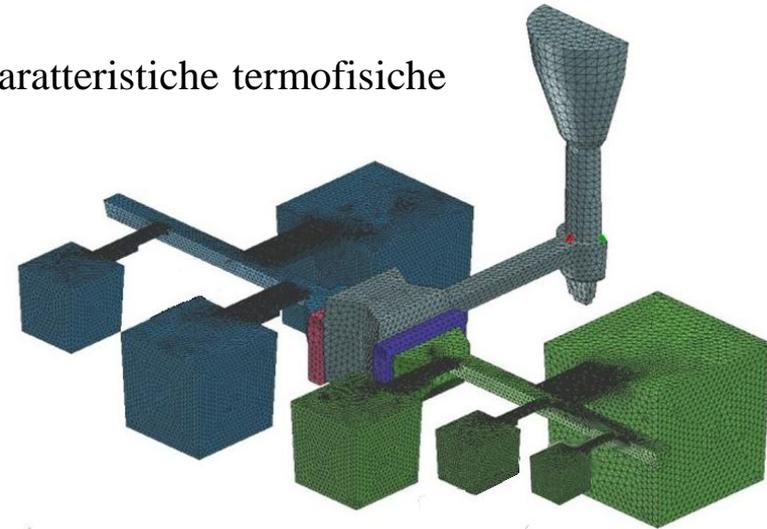
- **Interfacce (HTC) :**

Motta - Getto: 750 W/m² °K

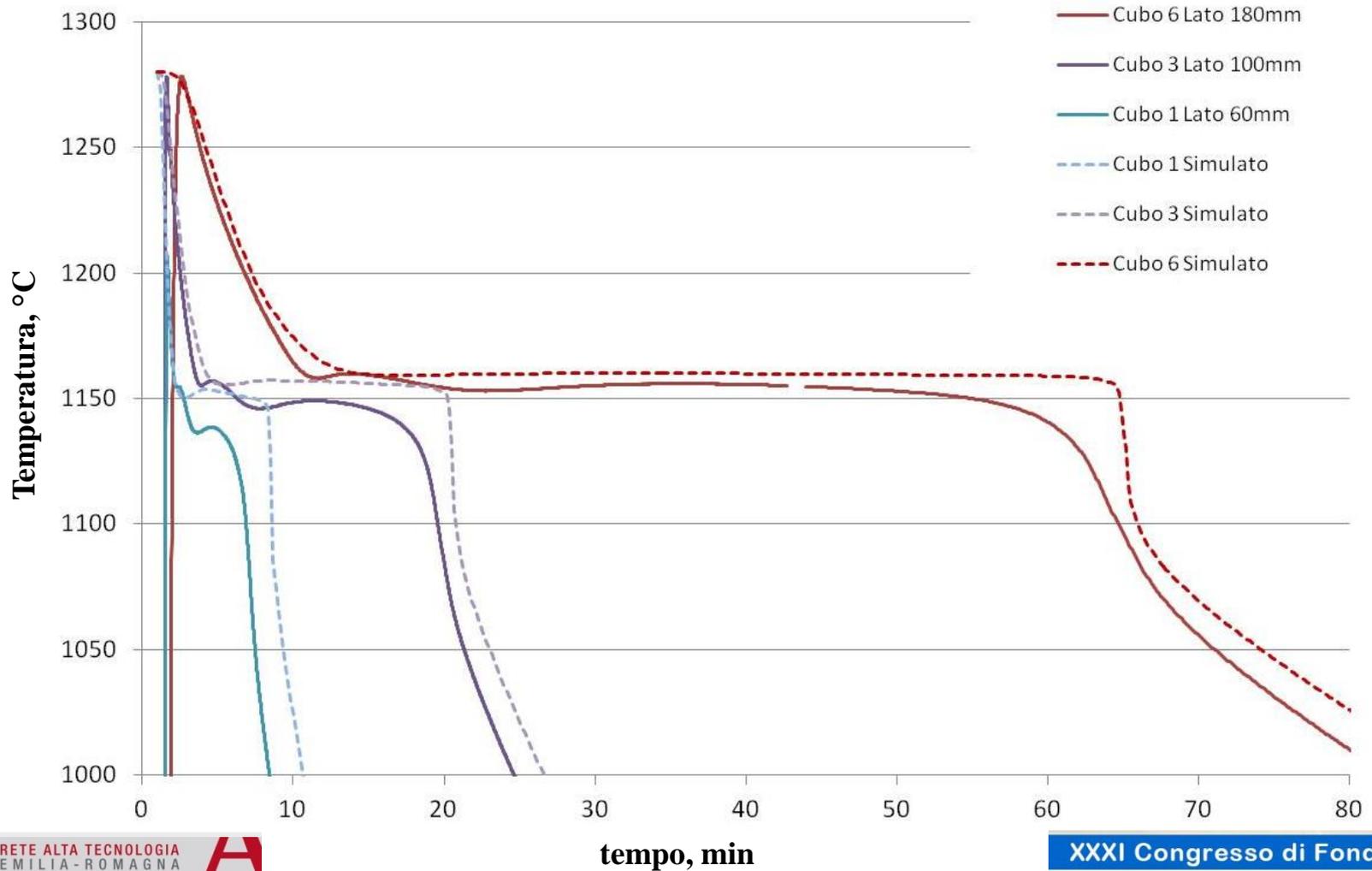
- **Condizioni iniziali :**

Temperatura iniziale Motta: 30 °C

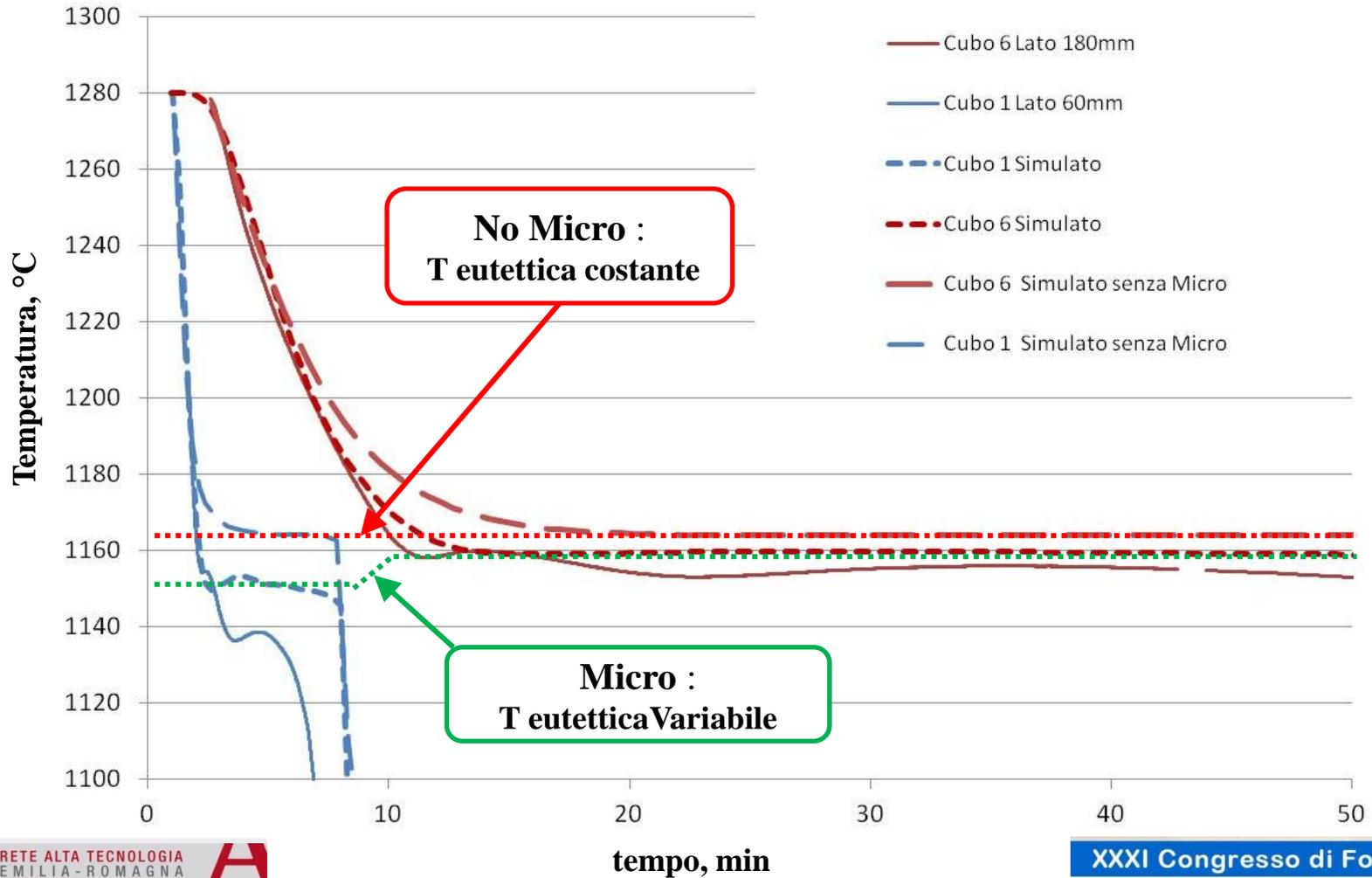
Temperatura iniziale Getto: 1280 °C (*media misurata dopo il riempimento*)



Acquisizione vs. simulazione: Curve di raffreddamento



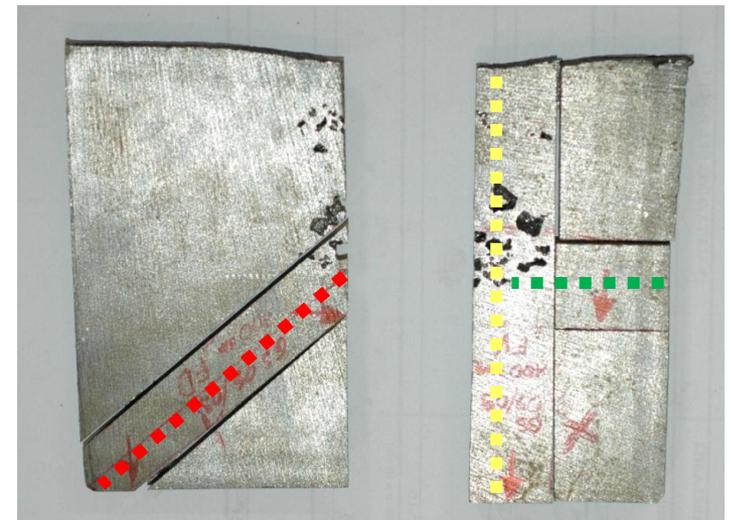
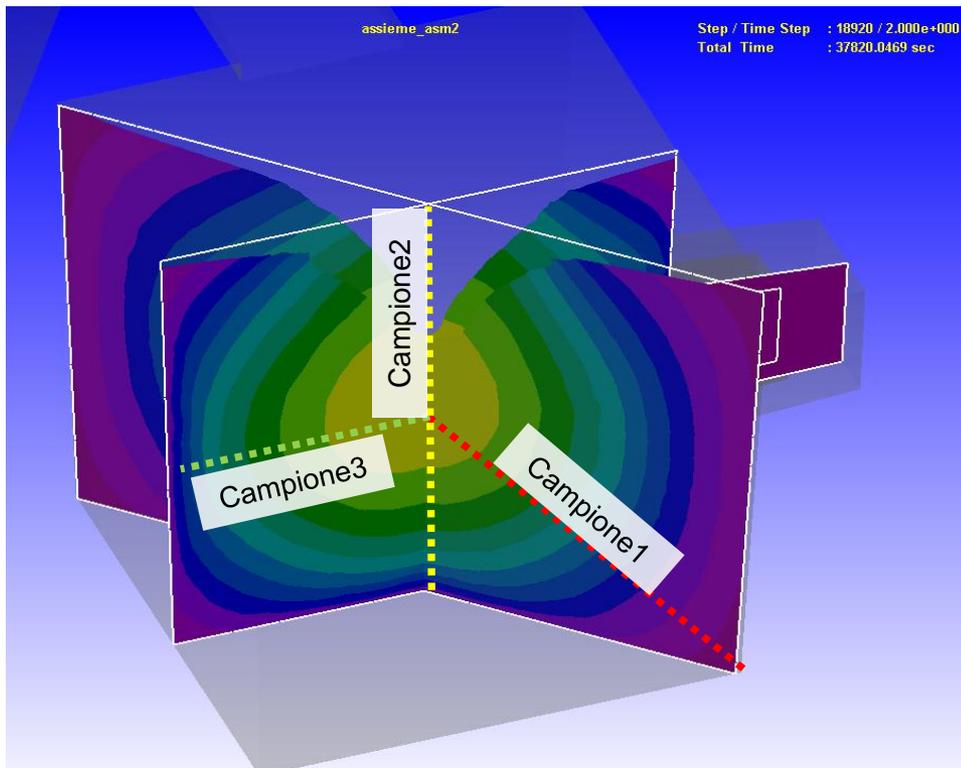
Benefici del modulo MICRO



Validazione delle simulazioni di microstruttura

Zone di estrazione dei provini

Le zone a maggior gradiente di velocità di raffreddamento evidenziano maggiori variazioni di Microstruttura

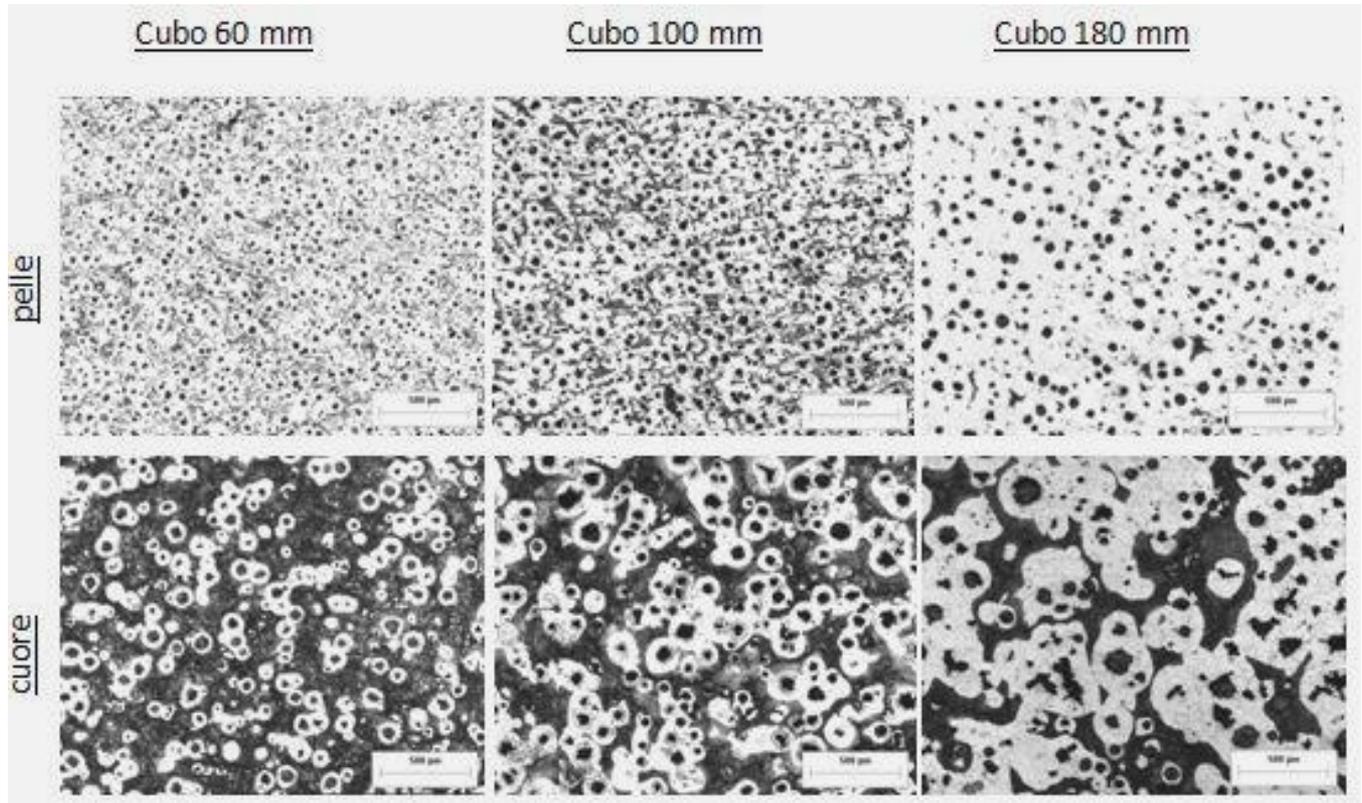


Cubi analizzati:

- Cubo 1 (Lato 60 mm)
- Cubo 3 (Lato 100mm)
- Cubo 6 (Lato 180mm)

Risultati delle analisi microstrutturali

Velocità di raffreddamento ↑ Numero noduli ↑ Dimensione noduli ↓ Ferrite ↓



Velocità di raffreddamento ↑

Numero noduli ↑

Dimensione noduli ↓

Ferrite ↑



Confronto tra simulazione e misurazione

Numero di Noduli

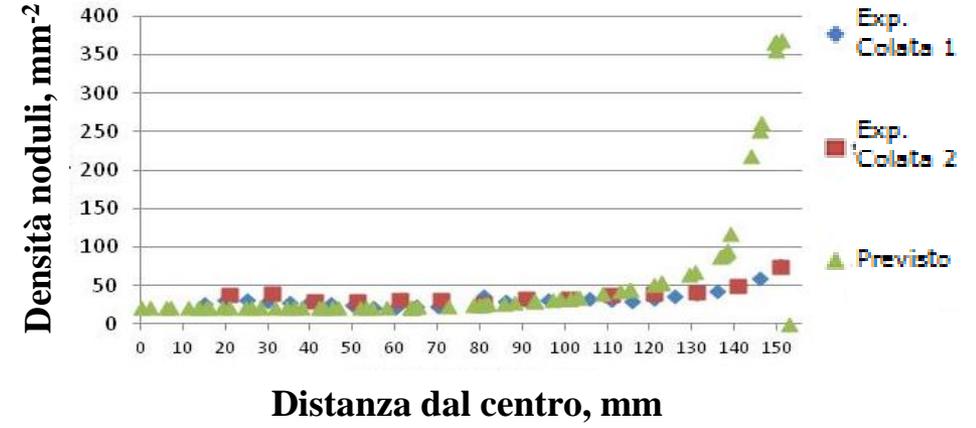
Andamento nel provino1 (diagonale)

Confronto fra calcolo 2D-3D:
 N: numero di noduli per unità di volume
 Np: numero di noduli per unità di superficie
 fgr: frazione di grafite

$$N = \sqrt{\frac{N_p^3}{f_{gr}}}$$

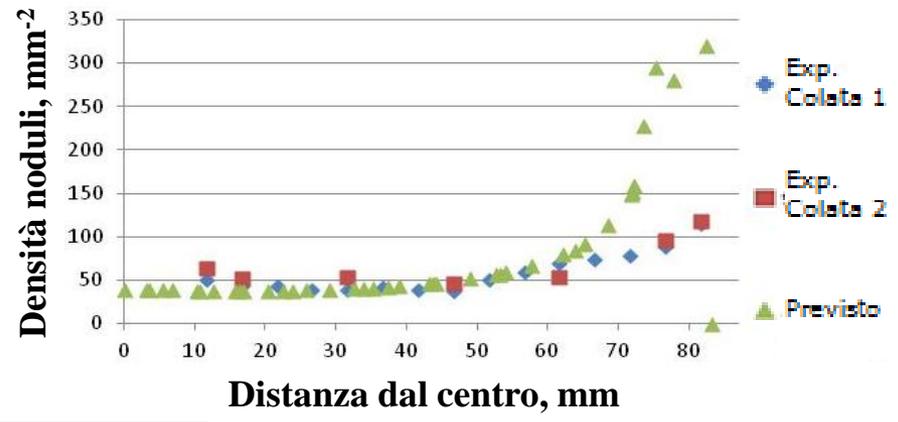
K. Wiencek, J Rys, Materials Engineering, 1998 No. 3, p 396

Cubo 6 lato 180mm



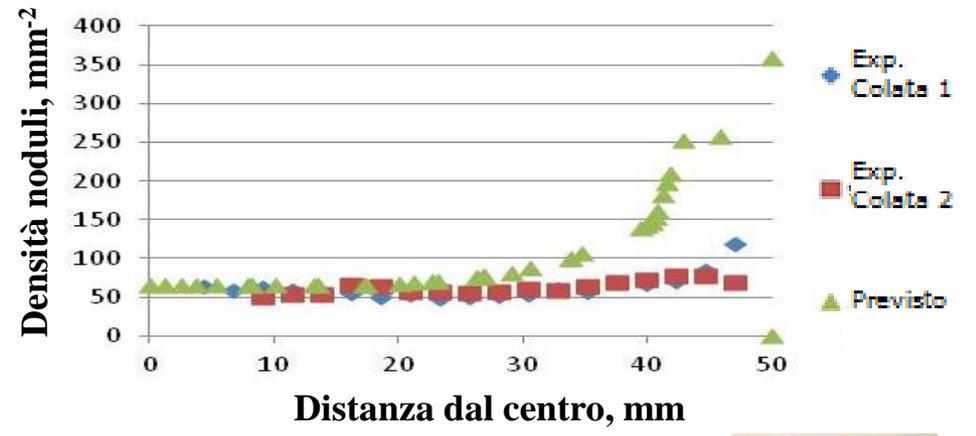
Distanza dal centro, mm

Cubo 3 lato 100mm



Distanza dal centro, mm

Cubo 1 lato 60mm

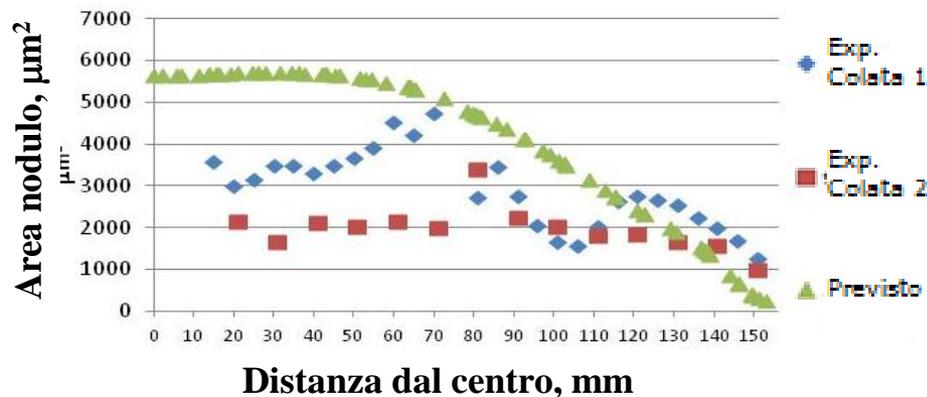


Distanza dal centro, mm

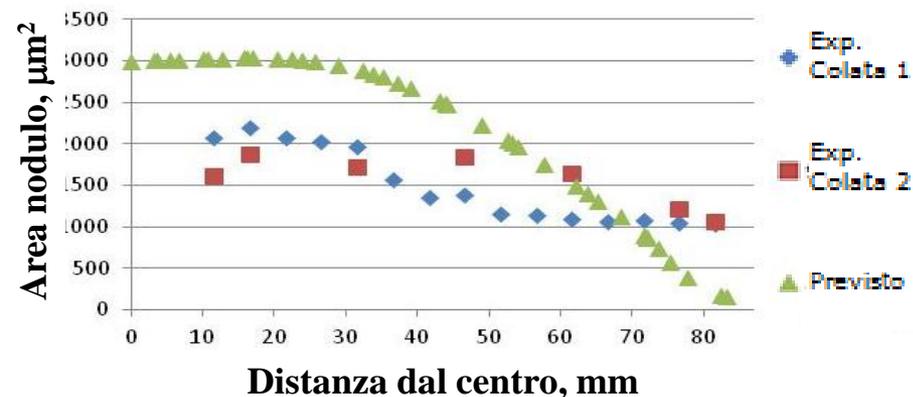
Confronto tra simulazione e misurazione

Area del Nodulo Grafitico Andamento nel provino1 (diagonale)

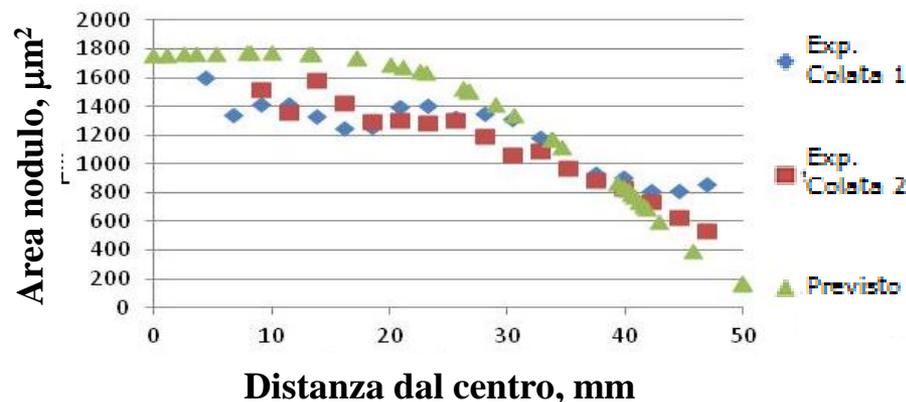
Cubo 6 lato 180mm



Cubo 3 lato 100mm



Cubo 1 lato 60mm

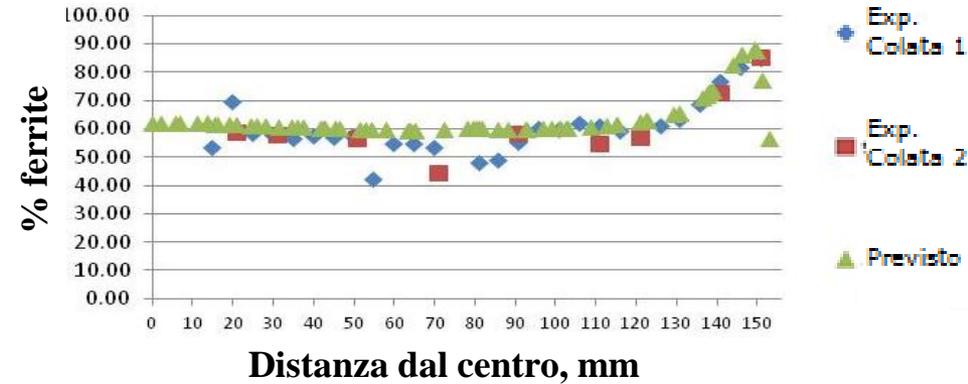


Confronto tra simulazione e misurazione

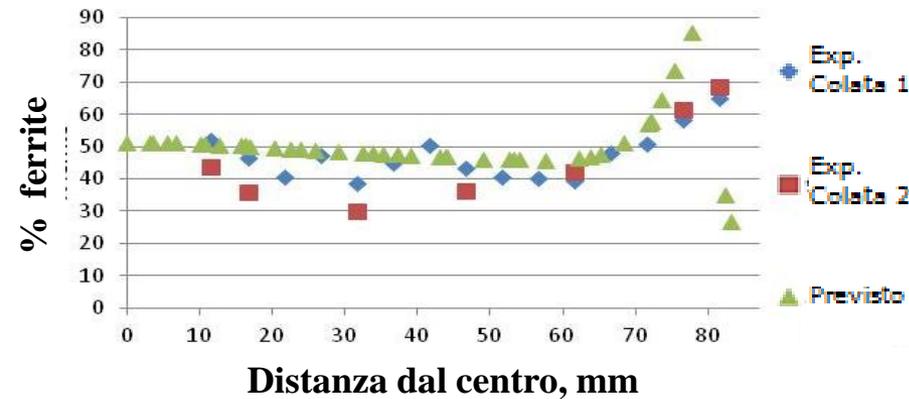
Frazione Ferritica

Andamento nel provino1 (diagonale)

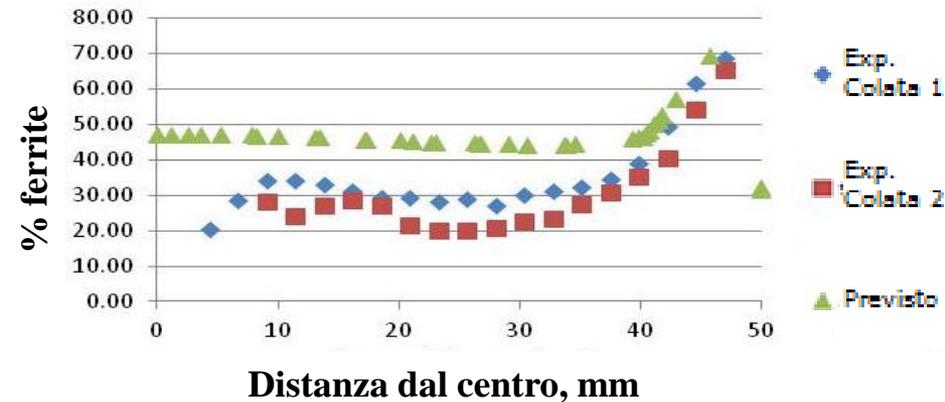
Cubo 6 lato 180mm



Cubo 3 lato 100mm



Cubo 1 lato 60mm

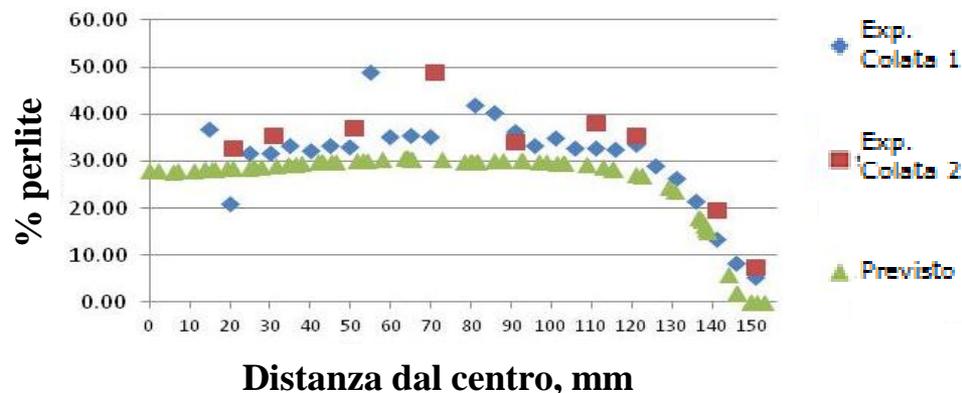


Confronto tra simulazione e misurazione

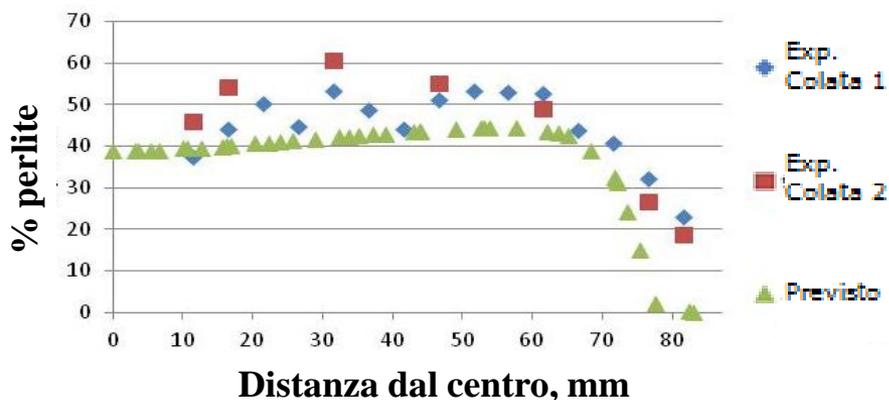
Frazione Perlitica

Andamento nel provino1 (diagonale)

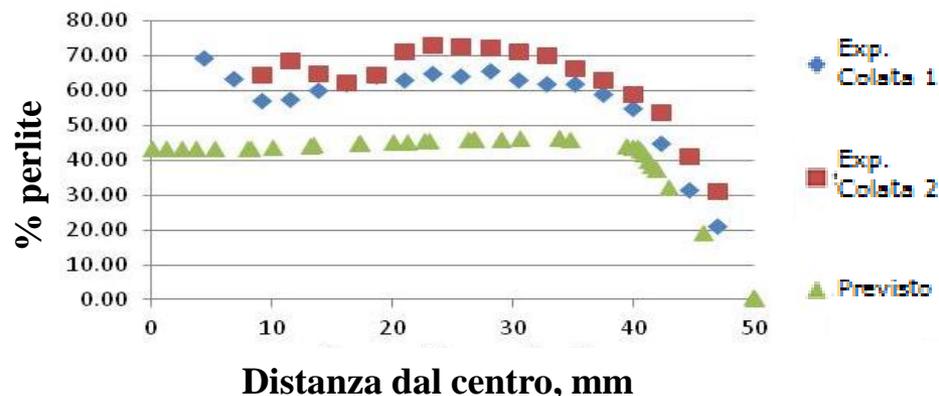
Cubo 6 lato 180mm



Cubo 3 lato 100mm



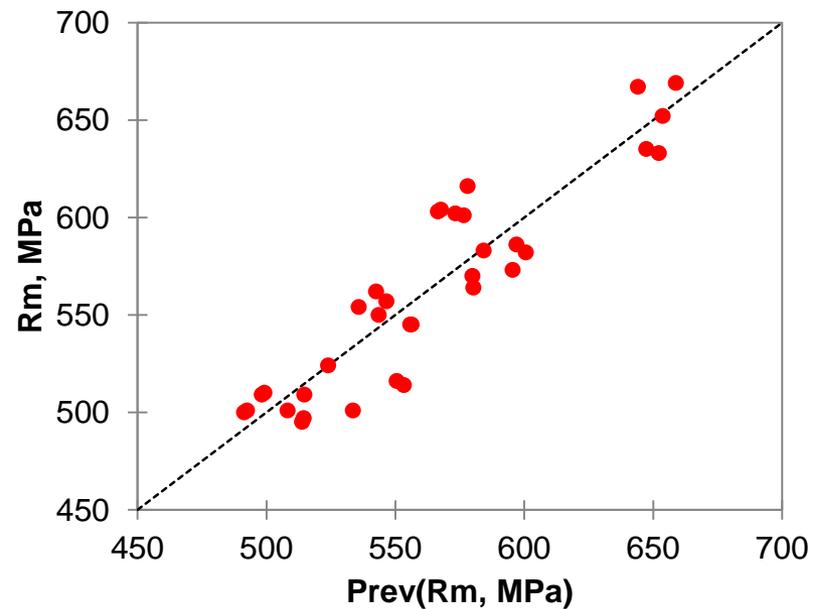
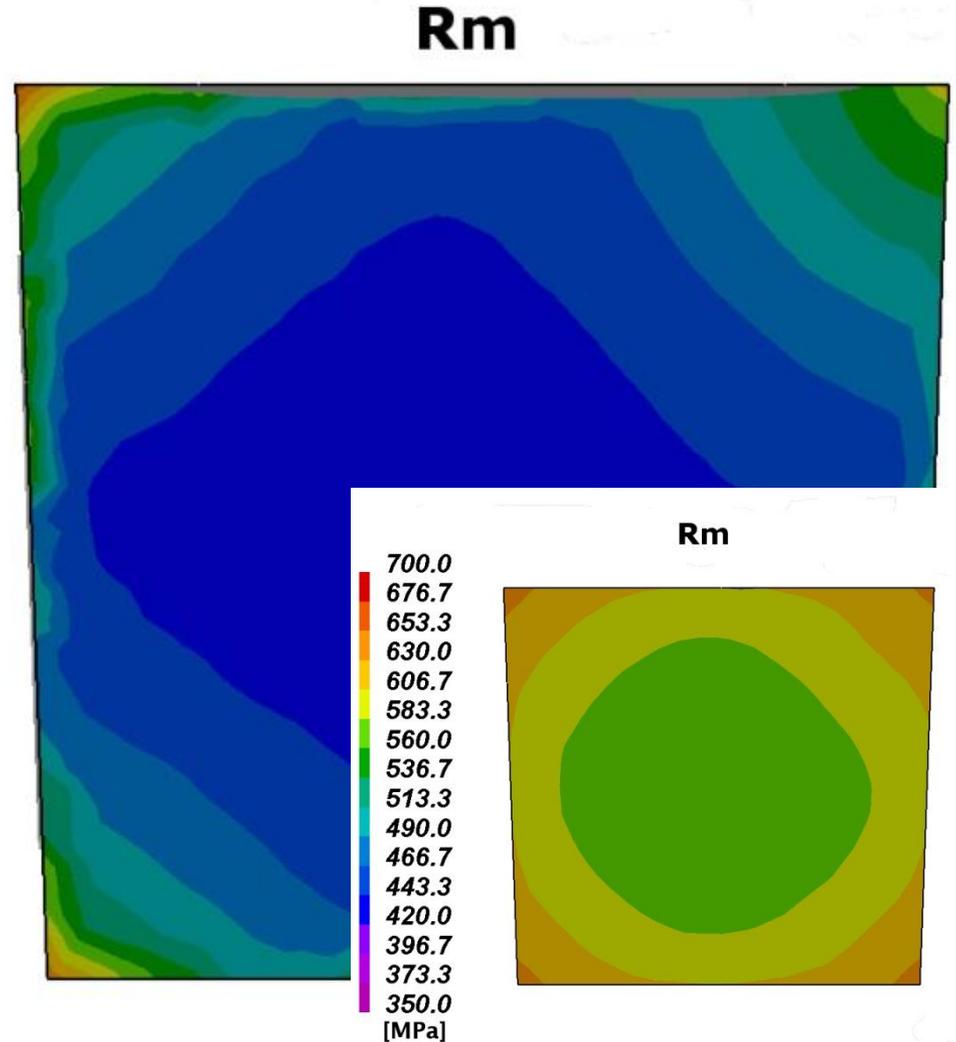
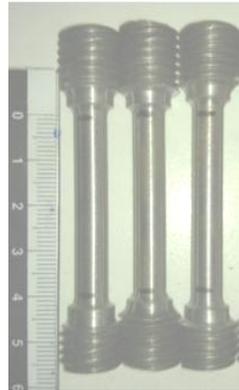
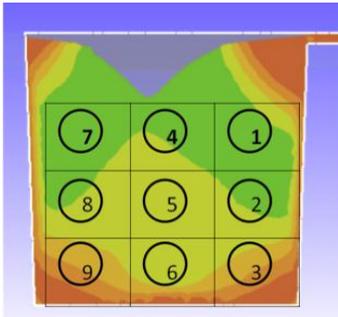
Cubo 1 lato 60mm



Confronto tra simulazione e misurazione

Resistenza a Trazione

Norme: UNI EN 1563:2009 - UNI EN 10002-1



Conclusioni

- L'attrezzatura di colata per la caratterizzazione di leghe ferrose ha permesso la differenziazione e la misura delle condizioni di processo
- Il confronto della simulazione numerica con i dati acquisiti in diversi punti dell'attrezzatura ha permesso la validazione dei modelli di caratterizzazione della lega
- L'attività sperimentale ha permesso la produzione di campioni di materiale aventi microstrutture e proprietà meccaniche differenziate
- I confronti fra risultati numerici ed indagini micrografiche hanno mostrato una buona corrispondenza, fornendo dati di previsione della microstruttura su tutto il dominio del getto (trascurando gli effetti di bordo).
- Si sono realizzate previsioni delle proprietà meccaniche su tutto il dominio del getto attraverso attività di correlazione numerico-sperimentali con le microstrutture



Ringraziamenti

Il lavoro presentato è stato svolto nell'ambito della collaborazione fra il Dip. DIN (prima DIEM, SETEC e DISTART) dell'Università di Bologna ed SCM Fonderie all'interno del più ampio progetto di costituzione del Laboratorio CRIF - Centro di Ricerca per l'Industria Fusoria.

Simulazione di colata: caratterizzazione della lega

Caratterizzazione della lega in base alla composizione chimica con PanIron 5.0, modulo delle leghe ferrose di **CompuTherm**

Approccio Termodinamico

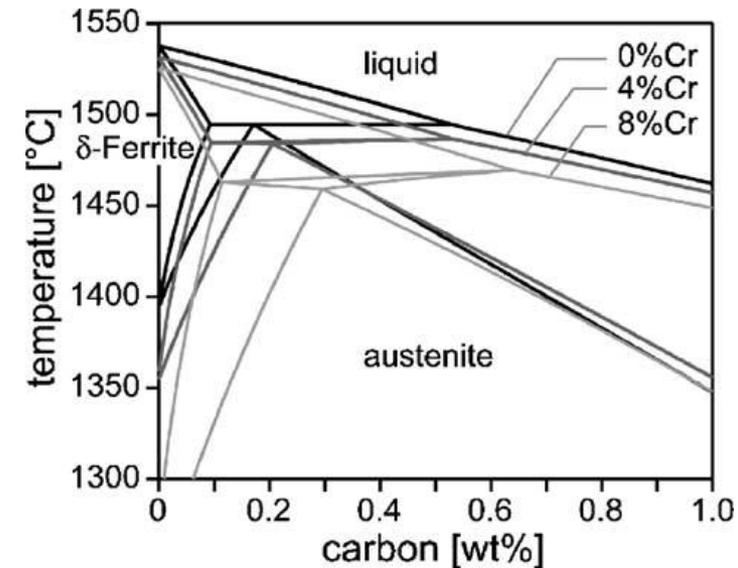
- Calcolo diagramma di fase:
Regola della Leva, Scheil, Back Diffusion
- Calcolo delle proprietà termodinamiche e termofisiche :
media pesata delle proprietà delle diverse fasi
(based on Thermodynamics Databases)

Approccio Cinetico (modelli di calcolo microstrutturali)

Modelli di Nucleazione ed Accrescimento delle diverse fasi dipendenti anche da:

- **condizioni locali di raffreddamento** (velocità di raffreddamento / **Sottoraffreddamento ΔT**)
- **composizione chimica locale** (e velocità di diffusione delle specie chimiche)

Ad ogni step di calcolo viene effettuata la **caratterizzazione locale della lega con CompuTherm**, tenendo conto della **modifica continua della composizione chimica** durante tutto il processo di raffreddamento del getto.



"Multiphase solidification in multicomponent alloys"
U. Hetch, L. Granasy, etc, *Materials Science and Engineering R46* (2004)

Percentuale di Grafite

Andamento nel provino1 (diagonale) nei cubi di 1,3,6 simulato con Procast e misurato

