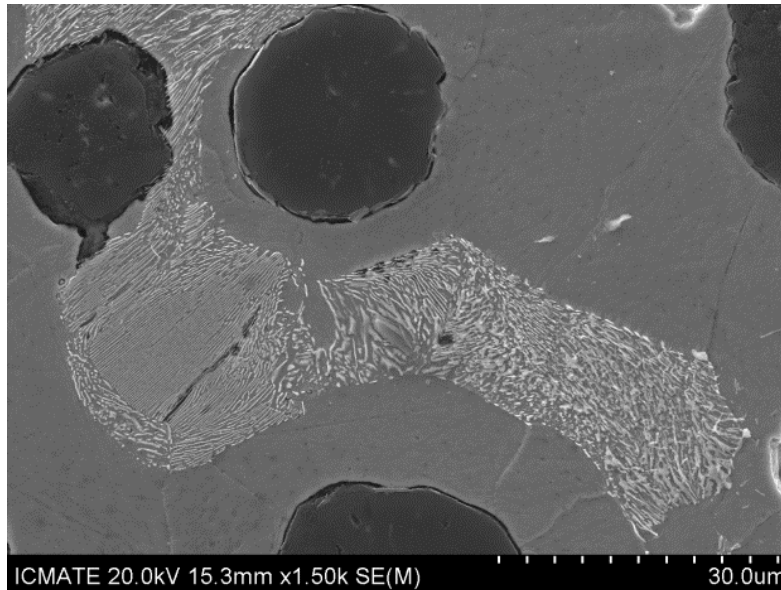


Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto di Chimica della Materia Condensata e di Tecnologie per l'Energia

(sede di Milano)

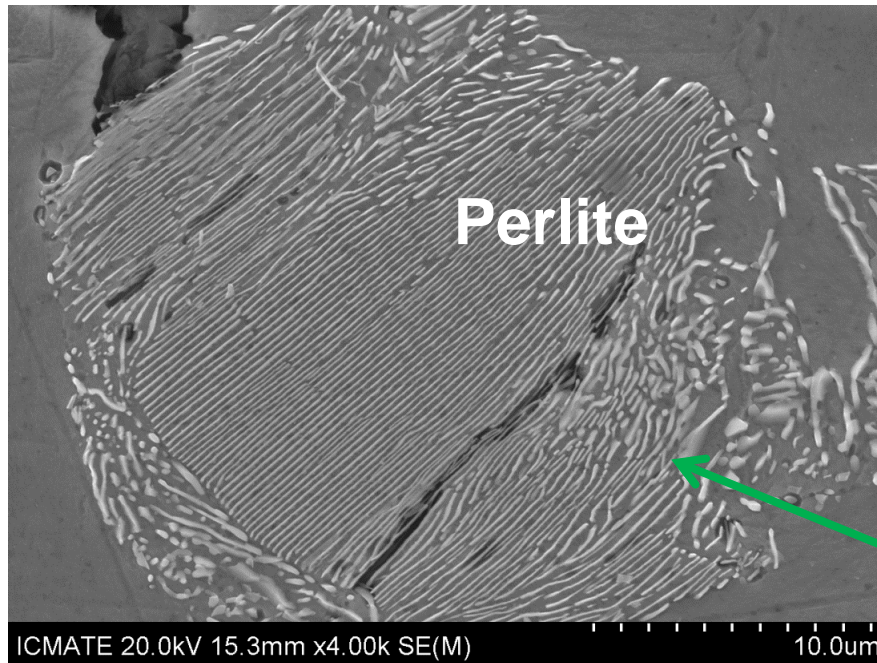


***Materials Science for a
New Classification Approach
of Conventional and Advanced
Spheroidal Cast Irons***

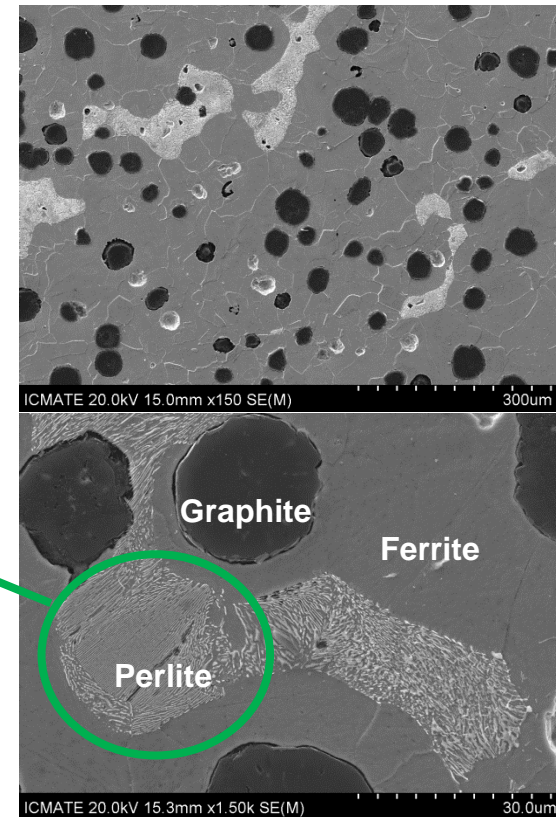
**Giuliano Angella
Franco Zanardi***

***Zanardi Fonderie SpA
Viale Nazionale 3, 37046
Minerbe (VR)**

Le ghise sferoidali sono leghe Fe-C-Si con ulteriori elementi in quantità minore ed un contenuto appropriato di Mg ($\approx 0.05\%$ in peso) per produrre grafite sferoidale in una matrice di ferrite con diverse frazioni volumetriche di perlite.



DI GJS 400



Composizione tipica ghisa GJS 400 ferritica (% in peso)

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg	Cr	P	S	Fe
3.63	2.45	0.129	0.133	0.0168	0.045	0.023	0.038	0.0043	Bal.

Mg – modifica della configurazione delle grafite

Mn – proviene principalmente dai rottomi automobilistici della carica e deve essere tenuto sotto controllo per ridurre le segregazioni chimiche

Cu – aumentando la presenza di questo elemento aumenta la frazione volumetrica di perlite

Le ghise sferoidali sono materiali attraenti grazie all'ottimo compromesso fra il basso costo produttivo ed ottime proprietà meccaniche che permettono un'ampia gamma di applicazioni possibili.

Il basso costo deriva dal limitato contenuto di elementi di lega (di attualità per il problema delle materie prime critiche) e dalla realizzazione di prodotti di fonderia in geometria prossima al componente finale.



Le ghise sferoidali non solo TOMBINI DI GHISA!!!



Ghise sferoidali di nuova generazione:

ghise con alta alligazione di Si

ghise vermiculari

ghise sferoidali austemperate (ADI)

ghise sferoidali isotermate (IDI)

prodotte per trattamenti termici

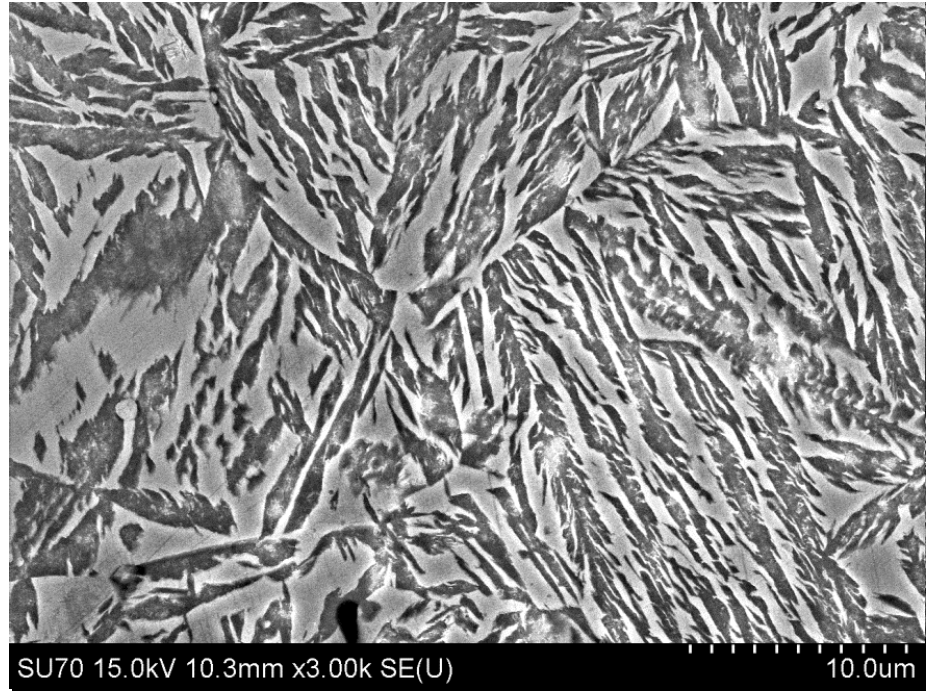
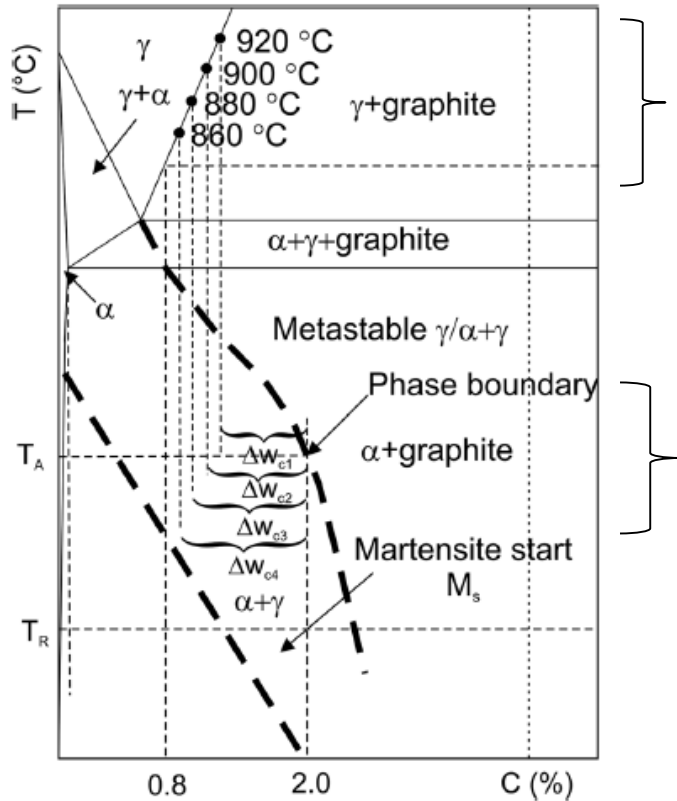
Hanno eccellenti proprietà meccaniche confrontabili con gli acciai bonificati di durezza simile (più costosi con un maggiore contenuto di elementi di lega) per l'applicazione in componenti strutturali nel trasporto pesante.

EUROMAT2019, Stockholm

Symposium B9: "Advanced Cast Irons"

<http://euromat2019.fems.eu/symposia-structure/>

Processo di austempering



AUSFERRITE

M. Górny, · G. Angella, · E. Tyrata, · M. Kawalec, · S. Paź, · A. Kmita

Role of Austenitization Temperature on Structure Homogeneity and Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron, in Met.Mat.Int. (2019) in press

*Componenti per il trasporto pesante,
il trasporto ferroviario,
le macchine movimento terra,
le macchine per l'agricoltura e
macchine operatrici in generale.*



Braccio di sospensione



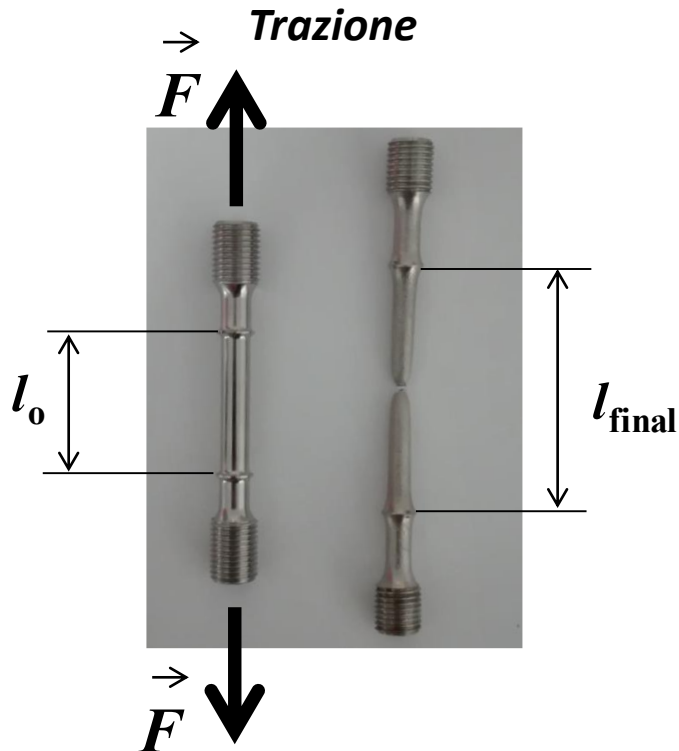
Albero per veicoli industriali

Le classificazioni delle ghise sferoidali convenzionali sulla base delle normative internazionali attualmente in uso sono essenzialmente basate su un solo processo, entro il quale tenori crescenti di un perlitizzante (es. il Rame), incrementano la porzione di perlite e conseguentemente durezza e resistenza meccanica con progressiva diminuzione della duttilità.

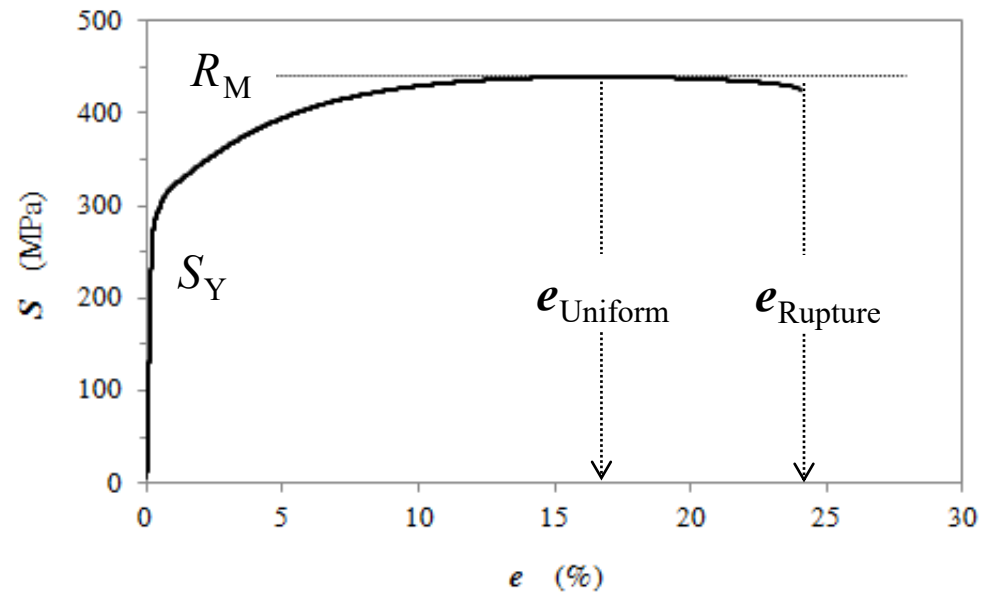
Proprietà meccaniche minime in trazione sono sufficienti a definire le ghise convenzionali:

- 1. Limite elastico S_Y**
- 2. Limite a rottura R_M**
- 3. Duttilità: allungamento percentuale a rottura ($e_{Rupture}$ o A5)**

Es. GJS 400-260-18



Curva di flusso plastico in trazione



$$S = F / A_0$$

con

A_0 = sezione resistente iniziale del tratto utile

F = intensità della forza applicata

$$e = (l - l_0) / l_0 \times 100$$

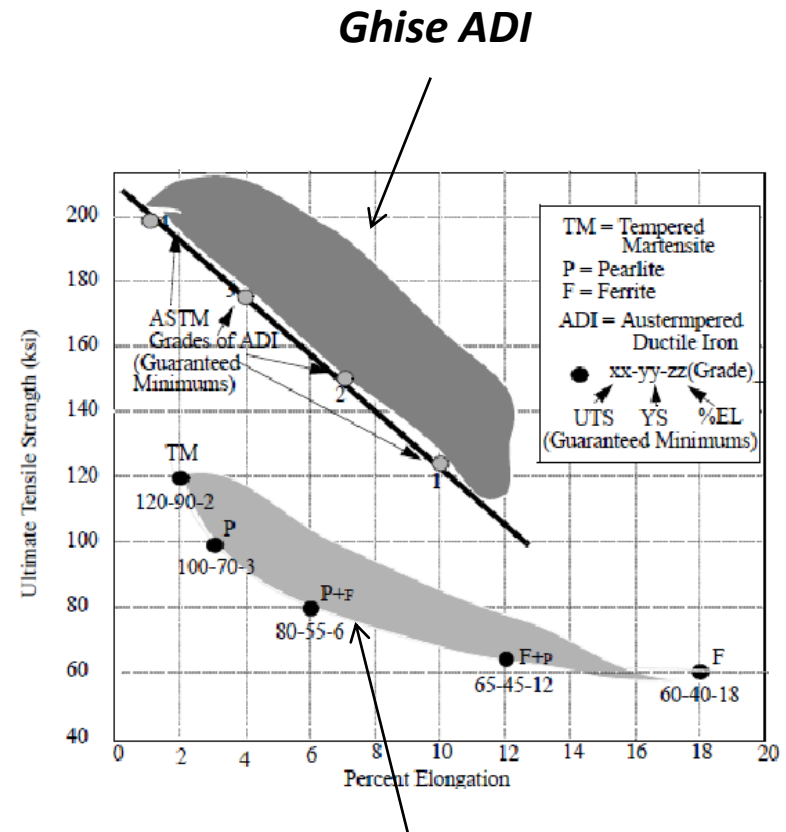
con

l_0 = lunghezza iniziale del tratto utile

l = lunghezza istantanea del tratto utile

Le recenti ghise sferoidali ad alto Silicio e quelle prodotte attraverso trattamenti termici (ADI e IDI) con spegnimento in bagno di sale necessitano dell'introduzione di una nuova dimensione (oltre al contenuto di perlite nelle ghise convenzionali ferritico-perlitiche)

Es. Ghise austemperate ADI →



L'obiettivo della collaborazione fra ICMATE Milano e Zanardi Fonderie SpA è quello di proporre un nuovo quadro normativo per definire una nuova classificazione* delle ghise convenzionali ed avanzate.

Ci sono resistenze a non cambiare il vecchio approccio di classificazione:

- 1. La capacità di produrre ghise avanzate mediante spegnimento in bagni di sali è poco diffusa (un nuovo quadro normativo darebbe visibilità alle ghise avanzate che pochi sanno produrre)**
- 2. L'approccio convenzionale del progettista è basato su materiali noti con vecchie classificazioni:**
 - ghise convenzionali utilizzati per componenti poco sollecitati**
 - acciai per applicazioni più gravose (anche se le nuove ghise hanno proprietà simili agli acciai da bonifica)**

*** Zanardi F., Bonollo F., Bonora N., Ruggiero E. and Angella G., Int. J. Metalcasting 11 (2017) 136–147.**

È necessario rivedere l'impostazione normativa affinché essa consideri come dimensioni classificatorie entità familiari ai progettisti ed allo stesso tempo collegate alle nuove varianti utilizzate dai processi produttivi:

- 1. contenuto di Silicio***
- 2. trattamenti termici.***

La soluzione è modellare le curve di trazione correlando il comportamento plastico con le caratteristiche microstrutturali, con l'obiettivo di introdurre nuove dimensioni nel quadro classificatorio

A new approach to assess properly these highly performing spheroidal cast irons (Dis) is needed, based on **dislocation-density-related Voce equation** that can correlate plastic behaviours with microstructures in a wide range of different DIs.*

The new assessment procedure comes into two diagrams:*

- 1) diagram for the assessment of DIs **plastic behaviour** (= **ideal microstructure**) based on Voce equation parameters;*
- 2) diagram for the assessment of **failure conditions** related to eventual material **defects** based on Voce formalism.*

**Donnini R., Zanardi F., Vettore F. and Angella. G, Mat. Sci. Forum, 925 (2018) 342-349.*

Voce equation

$$\sigma = \sigma_S + (\sigma_0 - \sigma_S) \cdot \exp(-\varepsilon / \varepsilon_C)$$

σ_S = saturation stress;

ε_C = characteristic strain;

σ_0 = back-extrapolated stress to $\varepsilon = 0$.

Dislocation-density-related equation

$$\sigma \approx M \alpha_0 G b \rho^{1/2}$$

ρ = total dislocation density;

M = Taylor factor (≈ 3.0);

α_0 = dislocation-dislocation interaction strength (≈ 0.5);

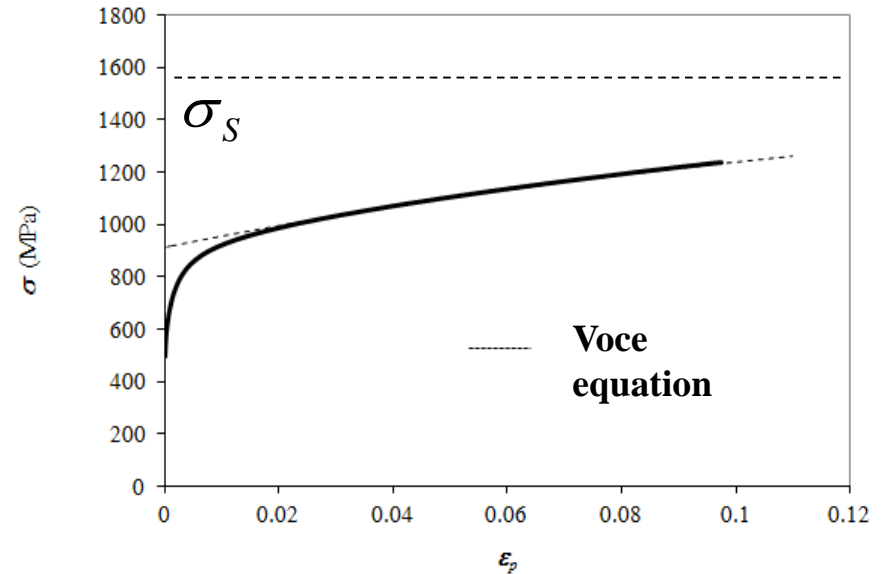
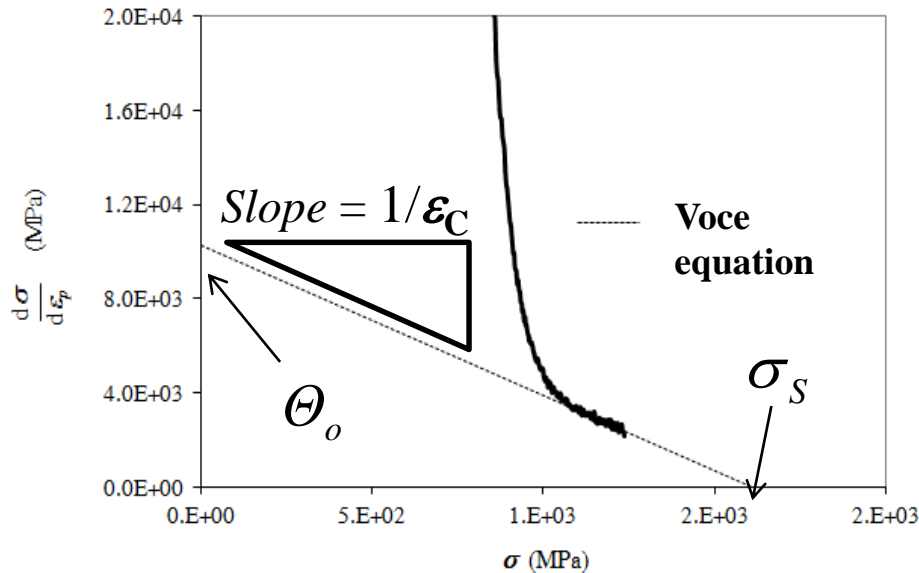
G = elastic shear modulus;

b = length of the Burgers vector.

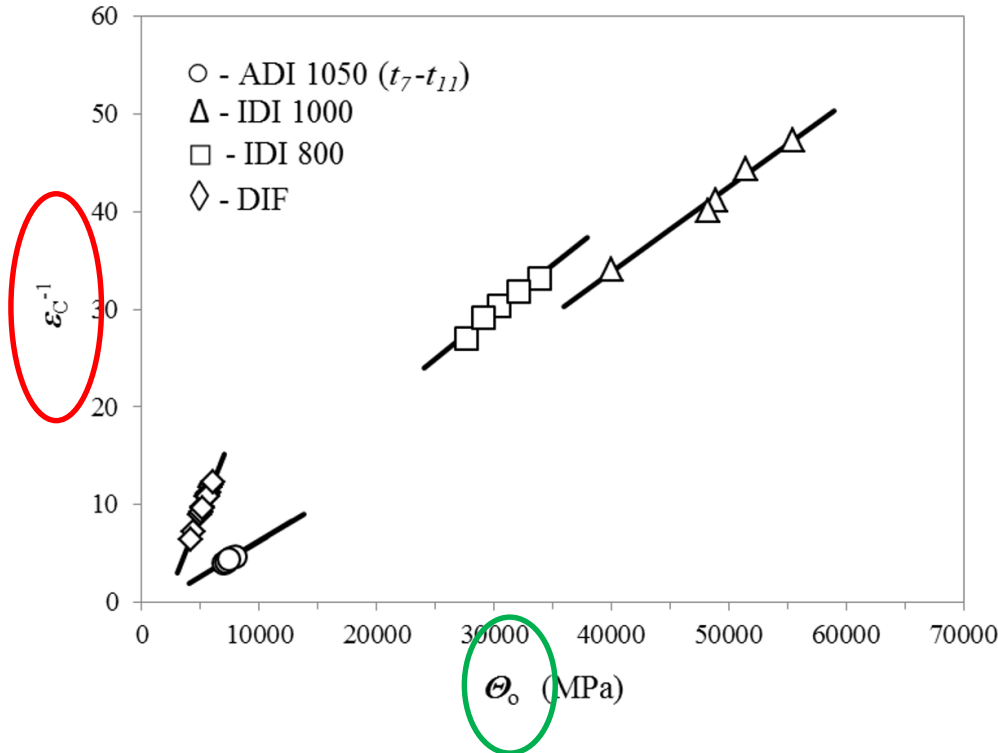
Voce equation fitting procedure

Voce parameters are found through **strain hardening analysis**

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \Theta_o - \frac{1}{\varepsilon_C} \cdot \sigma \quad \longrightarrow \quad \sigma_S = \Theta_o \cdot \varepsilon_C$$



Il diagramma* identifica in modo univoco diverse classi di ghise sferoidali convenzionali ed avanzate per diversi contenuti di Si e trattamenti termici



Isothermed Ductile Irons (IDI) 800 and 1000 with ferrite;

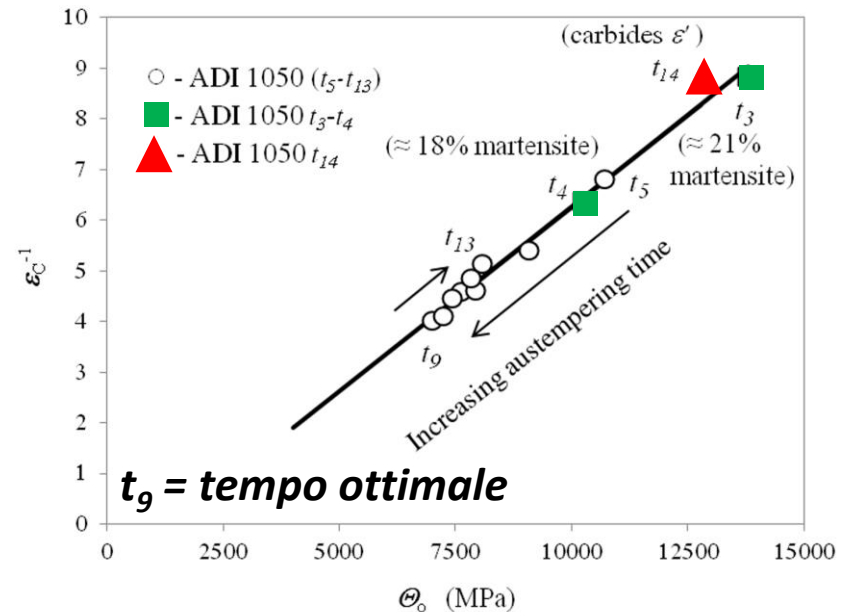
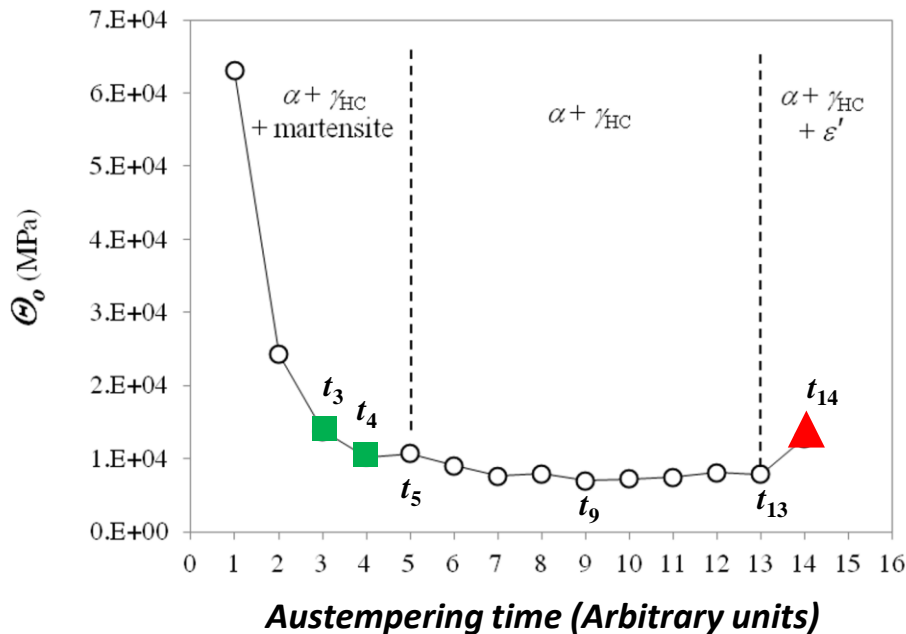
ferritic DI (DIF) with ferritic matrix;

Austempered Ductile Irons (ADI).

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \Theta_o \cdot \frac{1}{\varepsilon_c} \cdot \sigma$$

*Donnini R., Zanardi F., Vettore F. and Angella. G, *Mat. Sci. Forum*, 925 (2018) 342-349.

Determinazione della finestra temporale di processo di austempering



**Improper ADI 1050 microstructure can be identified straightforwardly:
martensite for short times; carbides ϵ' for long times.**

**A second diagram compares
the experimental elongations e_r
with the uniform elongations e_u
calculated according to the Voce formalism.**

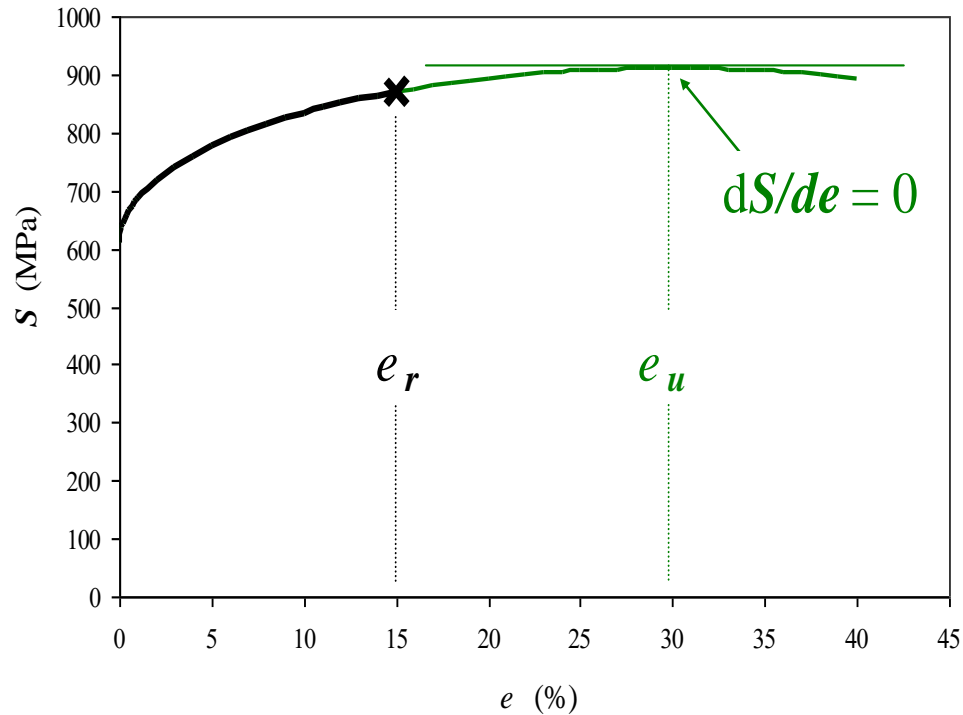
Uniform elongation e_u (for $dS/de = 0$)

$$e_u (\%) = [\exp(\varepsilon_u) - 1] \cdot 100$$

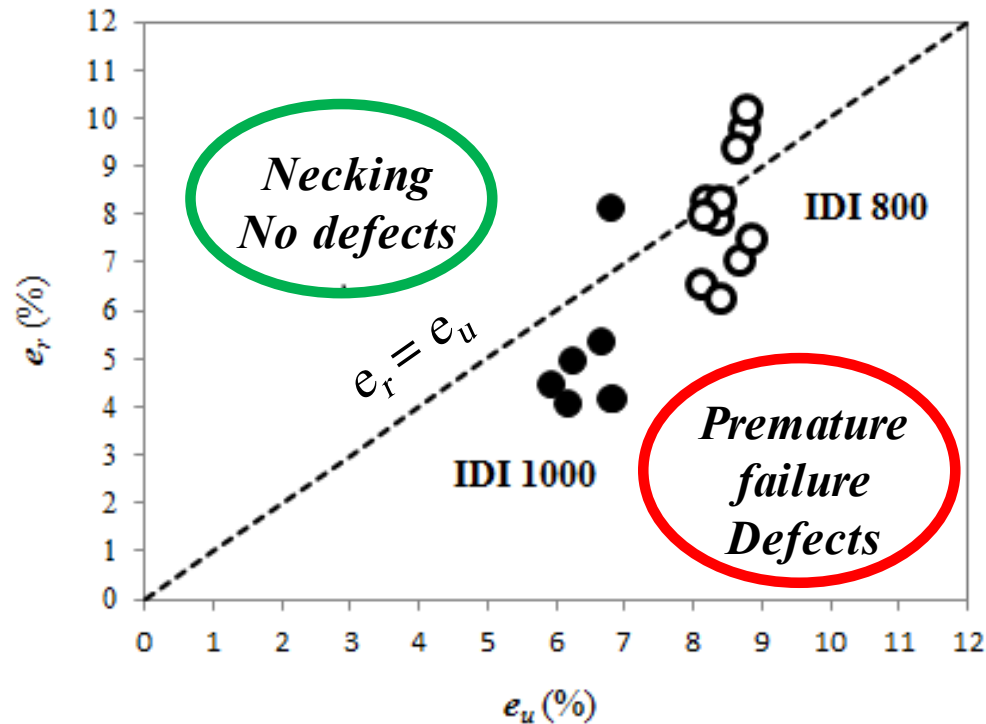
with ε_u = uniform strain according to Voce formalism

$$\varepsilon_u = \varepsilon_c \cdot \ln \left[\frac{\varepsilon_c + 1}{\varepsilon_c} \cdot \frac{\sigma_V - \sigma_o}{\sigma_V} \right]$$

In spheroidal cast irons necking does not occur, and the condition $dS/de = 0$ corresponds to the ultimate tensile stress with the best achievable elongation, namely the **uniform elongation e_u** .



Failure assessment diagram for IDI 800 and IDI 1000



Angella G., Zanardi F., Proc. 73rd World Foundry Congress "Creative Foundry" (2018) 265-266.

Conclusioni

Un dottorato industriale CNR-Zanardi è stato finanziato: “Revisione e prove sul materiale per la stesura di un manuale di progettazione meccanica per getti di ghisa”.

Il progetto di dottorato industriale si propone di compiere prove di trazione e revisionare prove di trazione già compiute sui materiali d’interesse primario per la Zanardi Fonderie SpA (ghise sferoidali GJS 600 nella versione perlitico ferritica e ad alto Silicio, e ghise IDI 800 nella versione LT e RT, ADI GJS 1050, materiali di produzione Zanardi Fonderie SpA), analizzando le curve di flusso plastico mediante il modello costitutivo con basi fisiche di Voce.

Questa analisi sarà utilizzata per la stesura di un manuale di progettazione meccanica che sia raccolto in forma ordinata per le classi di ghise studiate.

Grazie per l'attenzione!