

# Un approccio predittivo al design degli acciai da cementazione

R. Valentini, V. Colla, L. Bacchi, E. Morgano

Viene proposto un nuovo approccio per la progettazione di componenti in acciaio da cementazione per applicazioni automobilistiche realizzati attraverso il processo di carburazione a gas a bassa pressione. Tale approccio si basa sull'identificazione della curva di temprabilità equivalente desiderata per conferire al componente le caratteristiche desiderate e sull'impegno di strumenti numerici per associare il profilo di durezza Jominy target completo alla composizione chimica necessaria per realizzarlo. Vengono inoltre impiegati strumenti numerici data-driven anche per la stima dei diagrammi di Continuous Cooling Transformation dell'acciaio considerato. Tali strumenti si rivelano efficaci nel supportare il rispetto dei severi standard di riferimento per l'applicazione considerata. I risultati sono stati validati attraverso indagini metallografiche e profili di temprabilità sperimentale, che mostrano un buon accordo tra simulazione e risultati sperimentali, dimostrando la validità dell'approccio proposto.

**PAROLE CHIAVE:** ACCIAI DA CEMENTAZIONE, RETI NEURALI, MODELLI PREDITTIVI, DIAGRAMMI CCT, PROFILO JOMINY.;

## INTRODUZIONE

Il processo di cementazione è un trattamento superficiale applicato solitamente ad acciai a basso tenore di carbonio per assicurare una buona tenacità dopo la bonifica e, allo stesso tempo, una elevata resistenza a usura, a fatica e al danneggiamento superficiale [1, 2]. Talvolta vengono aggiunti elementi di lega come Cr-Ni, Cr-Mo o Mn-Cr, per raggiungere una migliore temprabilità e quindi struttura completamente martensitica dopo tempra.

Il processo di cementazione è utile per applicazioni impegnative quali ad esempio ingranaggi per la trasmissione e alberi a camme [3]. Questo processo termomeccanico consiste in due fasi principali: innanzitutto il componente viene scaldato fino ad arrivare in campo austenitico per favorire l'arricchimento di carbonio nella superficie e la sua diffusione verso l'interno (favorita dal gradiente di concentrazione), segue poi il trattamento di tempra e rinvenimento.

La velocità è un punto chiave nella cementazione e l'arricchimento è un processo che richiede tempo, per questo motivo negli anni sono stati fatti alcuni tentativi per ridurre il tempo di processo aumentando la temperatura e al contempo cercando di mantenere sotto controllo la crescita dei grani.

**R. Valentini**

Università di Pisa

**V. Colla**

Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa

**L. Bacchi**

Letomec s.r.l., Pisa

**E. Morgano**

SILCO s.r.l., Rivalta (TO)

Proprio per questo sono stati elaborati modelli che riproducessero la distribuzione del carico nei pezzi cementati.

late le curve Continuous Cooling Transformation (CCT) dell'acciaio, al fine di definire un ciclo termico adeguato a raggiungere la microstruttura e le proprietà meccaniche volute. Infine, considerando la coerenza fra la chimica predetta dagli strumenti predittivi e le specifiche, è stata realizzata una colata di prova, validando la metodologia con un'analisi metallografica del componente prodotto e valutazione sperimentale del profilo di durezza. Lo studio ha così mostrato che sistemi di simulazione di tipo data-driven, accoppiati con un predittore di curve Jominy ANN, possono effettivamente offrire supporto alla progettazione di acciai da cementazione.

## MATERIALI E METODI

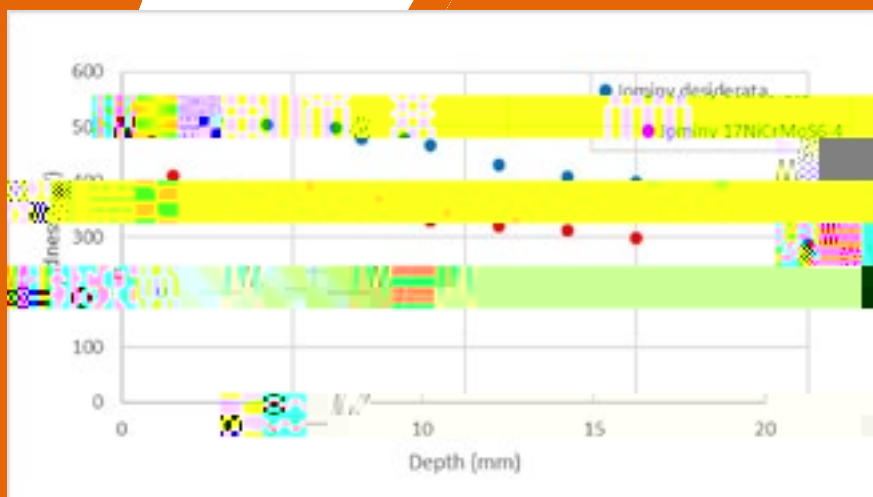
Utilizzando il metodo del Jominy equivalente è stato possibile determinare la curva Jominy del materiale in grado

di restituire un certo profilo di durezza nel componente finito, in particolare un ingranaggio per applicazione automotive attualmente realizzato in 17NiCrMoS6-4.

L'approccio del Jominy equivalente consiste nel determinare sperimentalmente l'equivalenza fra il profilo di durezza di un componente reale, prodotto secondo determinate condizioni, e la curva Jominy del materiale considerato. Conseguentemente, il profilo di durezza desiderato può essere rapportato a un requisito sulla curva Jominy [19].

Il profilo di durezza del fianco del dente dell'ingranaggio in oggetto, realizzato in 17NiCrMoS6-4, è stato misurato prima del trattamento di cementazione con prova micro-Vickers applicando un carico di 1kg.

In figura 1 sono riportati sia il profilo corrente sia il profilo desiderato.



**Fig. 1** - Profilo di durezza sul fianco del dente dell'ingranaggio realizzato in 17NiCrMoS6-4 (rosso) e i valori desiderati (blu) / Hardness profile on gearbox realized with steel 17NiCrMoS6-4 (red dots) and new requirements (blue dots).

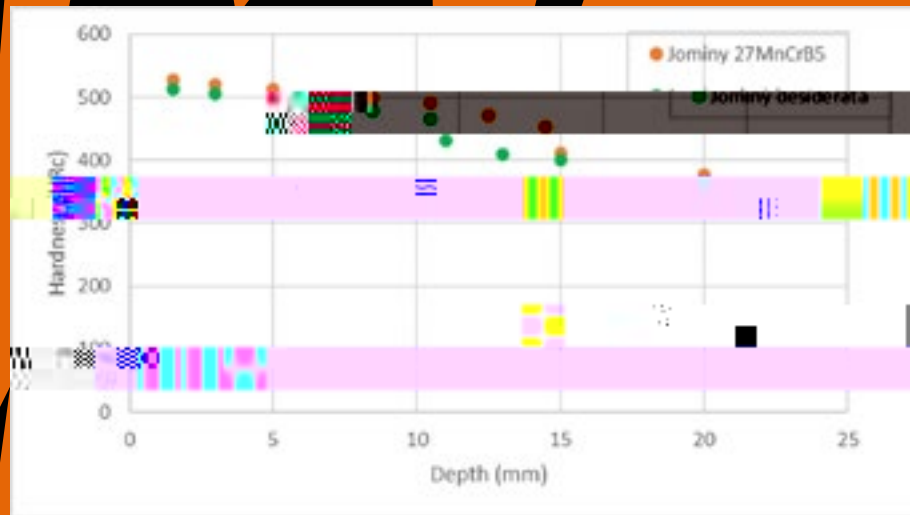
JoMiner è stato utilizzato per stimare la composizione chimica ideale dell'acciaio corrispondente alla curva Jominy desiderata e, successivamente, sono state valutate una serie di chimiche di acciai corrispondenti.

L'ottimizzazione è stata quindi eseguita per andare incontro alle specifiche del cliente, utilizzando come vincoli l'errore commesso sui primi 4 punti della curva e il costo degli elementi di lega, evitando quindi elementi come il nichel o il molibdeno. La composizione chimica risultato di questo processo è conforme a un acciaio 27MnCrB5 (figura 2).

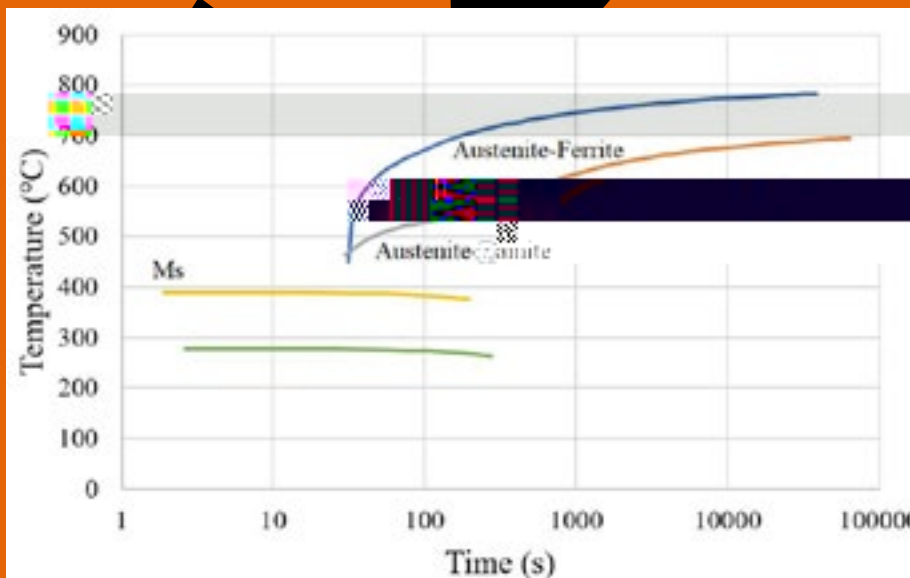
Una volta trovata una buona coerenza fra le curve Jominy, è stato ulteriormente affinata la valutazione andando a stimare le proprietà meccaniche e la microstruttura in funzione della velocità di raffreddamento. Per fare questo, le curve CCT sono state calcolate tramite un modello data-driven [17] e basato sull'approccio di Wierszyllowski [20] per la definizione del tempo di inizio trasformazione bainitica e ferritica. Per temperature inferiori viene utilizzato un modello basato sull'equazione di Koistinen and Marburger [20] per determinare la cinetica della trasformazione martensitica. La temperatura di Bainite Start ( $B_s$ )

è calcolata sulla base della composizione dell'acciaio tramite equazioni di letteratura, mentre la temperatura di Martensite (M<sub>s</sub>) si calcola da un'equazione di regressione basata su

dati sperimentali. In figura 3 è riportato il diagramma CCT stimato.



**F .2** - curva Jominy dell'acciaio 27MnCrB5, con la curva desiderata (verde) e i requisiti (orange) (green curve and orange requirements (green curve and orange requirements)).



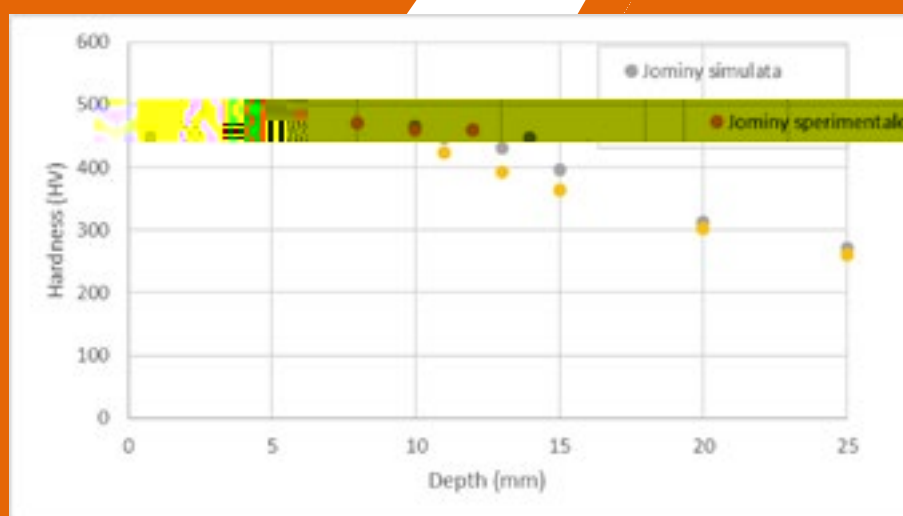
**F .3** - Diagramma CCT stimato per la colata selezionata / Estimated CCT diagrams for the selected casting.

È stata quindi prodotta una colata di prova di un acciaio al Cr-Mo-B, in particolare il 27MnCrB5. Su tale colata è stata quindi eseguita una prova Jominy sperimentale in accordo alla ASTM A255. La composizione chimica della cola-

ta è riportata in tabella 1, inoltre in figura 4 è riportato il confronto fra il profilo Jominy simulato e i valori ottenuti sperimentalmente.

**F.1** - Composizione chimica della colata sperimentale (contenuti espressi in massa%) / Chemical analysis of the considered casting (contents are expressed in wt%).

C	M		P		C	N	M	C.	Al		N		B
0.25	1.21	0.24	0.012	0.020	0.34	0.06	0.01	0.19	0.024	0.004	0.001	0.05	0.003



**F.4** - curva Jominy simulata vs curva reale della prova Jominy eseguita sulla colata di prova per acciaio 27MnCr5 / Estimated vs real Jominy curves for the selected casting.

La stessa colata è stata poi utilizzata per la produzione dell'ingranaggio, sul quale è stato poi eseguito il processo di cementazione in bassa pressione e tempra in gas. Al termine è stato anche eseguito il tipico trattamento di distensione a 180°C. Successivamente, dal componente sono stati prelevati alcuni campioni per l'analisi metallografica e la misura del profilo di durezza, necessari al fine di validare il processo.

## RISULTATI

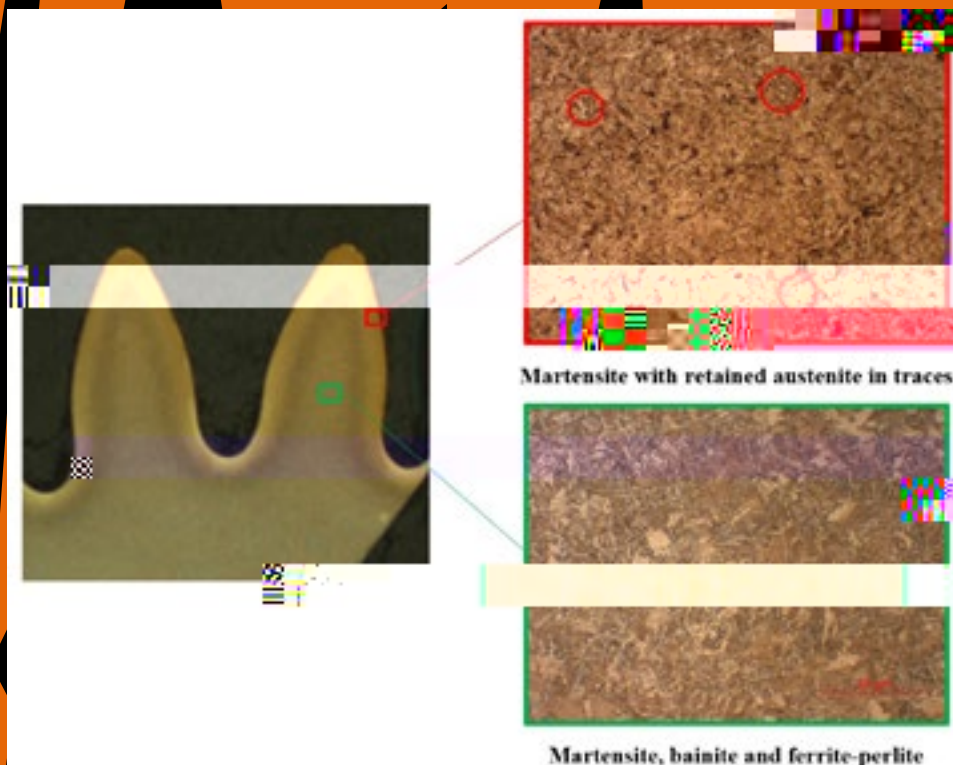
La microstruttura finale è stata valutata sia sulla superficie del fianco del dente sia in profondità, previo attacco metallografico Nital. La figura 5 mostra uno strato cementato interamente martensitico con alcune tracce di austenite residua, mentre l'interno è caratterizzato da martensite mista a bainite.

Il profilo di durezza è stato quindi misurato mediante me-

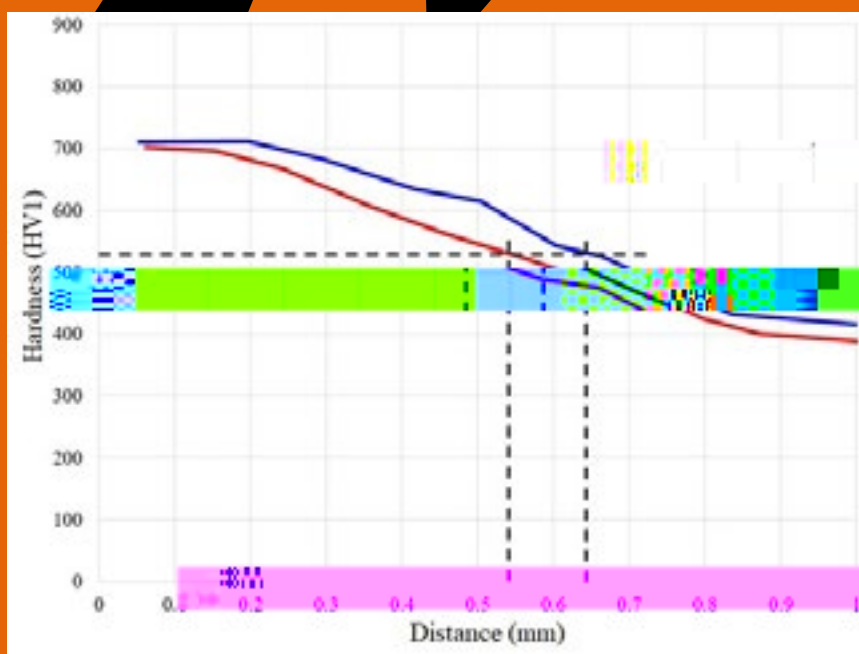
todo Vickers, applicando un carico di 1kg. il test è stato eseguito sia sul fianco del dente sia nella zona di raccordo alla base del dente. I risultati sono riassunti in figura 6.

Assumendo un contenuto di carbonio stimato di circa 0.80-0.85% nello strato cementato, la durezza che si estrapola è pari a circa 850HV [21]. Il contenuto di carbonio è stato poi misurato, risultando pari a 0.83%, la durezza relativa è risultata leggermente inferiore a quanto atteso, compatibilmente con la presenza di tracce di austenite residua. La profondità effettiva di cementazione, corrispondente a 525HV, è stata inoltre misurata ed è risultata corrispondente a 0.55-0.65mm.

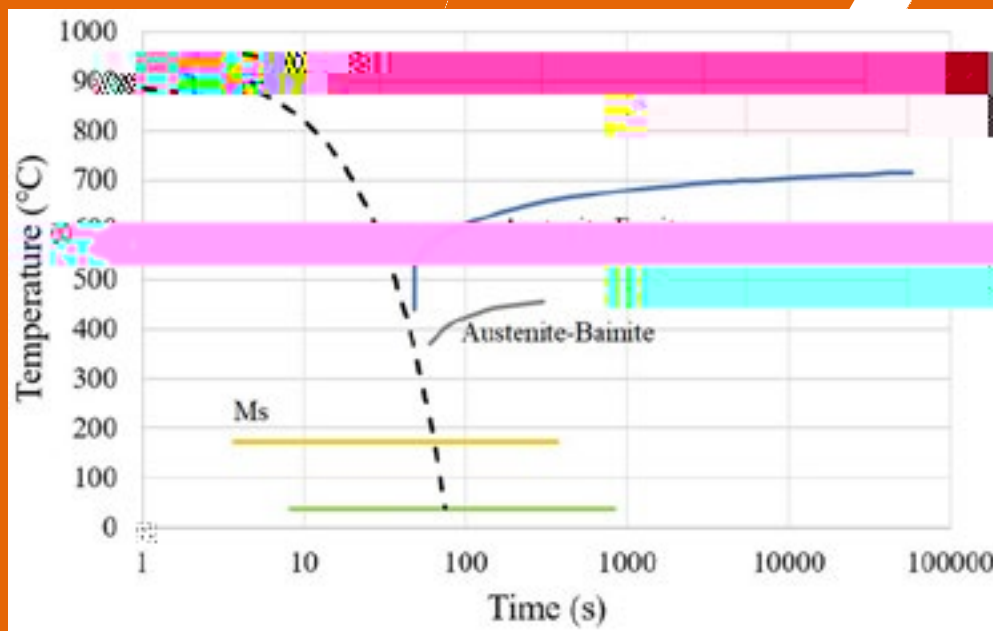
Il diagramma CCT è stato conseguentemente simulato anche per lo stato cementato utilizzando la specifica composizione chimica (figura 7).



**F .5** - Immagini microscopiche ottiche a 500x e 1000x dell'ingranaggio prodotto in acciaio al cromo. In alto: analisi microscopica della superficie della curva. Microscope images of the gear tooth surface and magnified micrographs of the case-hardened surface and root area.



**F .6** - Profilo di micro durezza Vickers sul fianco del dente (blu) e sul raccordo alla base del dente (rosso) / Hardness profile assessed through micro-Vickers method on tooth flank (blue line) and radius area (red line).



**F .7** - Curve CCT stimate per la composizione chimica dello strato cementato / Estimated CCT diagrams for the chemical composition of the carburized film.

Assumendo un rateo di raffreddamento pari a  $12^{\circ}\text{C/s}$  (rappresentato dalla linea tratteggiata in figura 7), la microstruttura finale restituita dalla simulazione mediante un modello data-driven, include una frazione di austenite residua del 6-8% nella microstruttura finale, con marten-

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Schmid, M. Kuge, E. Schuster, Fatigue strength under vibratory stress and notch reduction of casehardened steel 25Mocr4 depending on various manufacturing processes for heavy transmission gears, *Steel Research International*, 82 (11), pp. 1278-1286 (2011).
- [2] Y.-G. Cao, L.-G.-Q. Zhang, L.-Q. Wang, Contact Fatigue Properties of SAE 8620 Steel after Case Carburizing, *Journal of Iron and Steel Research International*, 23 (2), pp. 139-145 (2016).
- [3] G. Kripak, M. Sharma, P. K. Jha, C. S. G. Reddy, H.-W. Zoch, G. Bleck, Development of an aluminium-reduced niobium-microalloyed case hardened steel for high speed manufacturing, *HTM - Journal of Heat Treatment and Materials*, 74 (1), pp. 36-49 (2019).
- [4] J. Rudnizki, B. Zeislmaier, W. Bleck, Numerical simulation of carbon profiles and precipitation evolution during high temperature case hardening, *Steel Research International*, 81 (6), pp. 472-476 (2010).
- [5] Y.-H. Yang, L.-Q. Yang, Z. Chen, H. Chen, Microstructure and mechanical properties of gear steels after high temperature carburization, *Journal of Iron and Steel Research International*, 20 (12), pp. 140-145. (2013).
- [6] M. Dahlström, M. Larsson, Y. Giraud, High pressure carburizing of components heat treated by low pressure carburizing and gas quenching, *Int. Powder Metallurgy Congress and Exhibition*, 2017 (2017).
- [7] O.B. Tapar, M. Steinbacher, J. Gibmeier, J. Grottel, Simulation of the Effects of Low-Pressure Carburizing Process Parameters on Microstructural Evolution by Means of In Situ X-Ray Diffraction, *Advanced Engineering Materials* (2020).
- [8] G. Hiller, Advantages of low-pressure carburizing and high-pressure gas quenching technology in manufacturing, *Surf. Eng.*, 8(1) 35-41 (2014).
- [9] Fiat Group Automobiles standard 52414. Acciaio per cementazione Acciai al Manganese – Cromo (2010).
- [10] S.R. Elmi Hosseini, H. Khosravi, R. Sohrabi, Z. Hosseini, M. Zohour Karimi, M. Makarem, Correlation between hardness and microstructure of a cementation steel carburized in the presence of na2co3 as an energizer material, *Journal of Materials*, 12(12) 2213-2217 (2013).
- [11] B. Chan, M. Bibby, N. Holtz, Predicting HAZ hardness with artificial neural networks. *Can. Metallurgical Quarterly*, 43(1) 1-10 (2004).
- [12] B. Chan, M. Bibby, N. Holtz, Predicting HAZ hardness with artificial neural networks. *Can. Metallurgical Quarterly*, 43(1) 1-10 (2004).
- [13] B. Chan, M. Bibby, N. Holtz, Predicting HAZ hardness with artificial neural networks. *Can. Metallurgical Quarterly*, 43(1) 1-10 (2004).



# A predictive approach to case hardening steel design

A novel approach for case hardening steel design in automotive application is proposed. Such approach is based on the identification of the desired equivalent hardenability curve to provide the component with the desired characteristics and on the use of numerical tools to associate the complete Jominy target hardness profile to the required chemical composition. Moreover, data-driven numerical tools are applied to estimate Continuous Cooling Transformation diagrams of this steel. These tools are effective in supporting compliance with the strict reference standards for the considered application. The results were validated through metallographic investigations and experimental hardenability profiles, which show a good agreement between simulation and experimental results, demonstrating the validity of the proposed approach

**KEYWORDS:** CASE HARDENING STEELS, NEURAL NETWORKS, MATERIAL PROPERTIES PREDICTION, CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION DIAGRAMS, JOMINY PROFILE;

[TORNA ALL'INDICE >](#)