

INFLUENZA DELLA TEMPERATURA sulla microstruttura della ghisa duttile austemperata

DA MICROIMMAGINI RIFERITE A DIVERSI CAMPIONI ANALIZZATI AL VARIARE DEI PARAMETRI DI PROCESSO, È RISULTATO CHE ANCHE L'AGITAZIONE SIA ATMOSFERICA, SIA DEL BAGNO DI SALE, INFLUISCE SULLA MICROSTRUTTURA FINALE. CONSIDERAZIONI SONO RIPORTATE, INFINE, RIGUARDO ALLA POSSIBILE NANO-CARATTERIZZAZIONE.

La ghisa duttile o sferoidale è un materiale tecnologicamente innovativo, comparso inizialmente negli anni '40 del secolo scorso con successiva industrializzazione di processo produttivo all'inizio degli anni '60. La stessa è creata mediante aggiunta alla ghisa grigia fusa di una scarsa quantità di magnesio, che cambia la forma di cristallizzazione del carbonio da fiocchi a sfere di grafite. Tale materiale è contraddistinto da proprietà uniche in termini di resistenza sia meccanica, sia a flessione. A queste caratteristiche meccaniche vanno aggiunte quelle tipiche della ghisa, vale a dire elevata resistenza alla trazione, agli impatti e di resa. Allorché la ghisa duttile è sottoposta a trattamento termico isotermico, viene prodotto un materiale completamente nuovo noto come ghisa duttile austemperata (ADI - *Austempered Ductile Iron*), dalle proprietà meccaniche notevolmente migliori rispetto alla ghisa duttile semplice. L'ADI possiede una microstruttura unica chiamata ausferrite, miscela di fine ferrite acicolare e di austenite residua stabile arricchita con notevole contenuto di carbonio. L'elevato rapporto tra resistenza e peso dell'ADI con-



Figura 1 - Microstruttura iniziale dei campioni di ghisa duttile (200x) [11]

sente al progettista di sostituire anche i getti d'alluminio con uguale massa, in applicazioni aventi uno spessore minimo di parete di ghisa duttile austemperata pari a 3 mm. La nuova microstruttura dell'ADI, infatti, conferisce al materiale proprietà superiori rispetto a molte leghe ferrose e d'alluminio:

nei confronti delle microstrutture perlitiche, ferritiche o martensitiche, l'ausferrite presenta resistenza doppia con riferimento ad un dato livello di duttilità ottenuto mediante trattamento termico convenzionale. Le proprietà meccaniche dell'ADI dipendono, dunque, dalla sua microstruttura ausferriti-

ca: la matrice austemperata fornisce resistenza a trazione e duttilità migliori rispetto a qualsiasi altro tipo di ghisa duttile. La combinazione dei parametri di trattamento termico e degli elementi di lega consente d'ottenere insiemi diversi di proprietà meccaniche, quale risultato della stessa microstruttura ausferritica.

Il trattamento termico dell'ADI consiste nella austenitizzazione della ghisa duttile, tempra in mezzo austemperante, permanenza a temperatura austemperata e quindi raffreddamento a temperatura ambiente. Durante il trattamento di austemperizzazione, l'ADI subisce un processo di trasformazione a due stadi:

- 1° stadio - l'austenite (γ) si decompone in ferrite bainitica (α) e austenite residua arricchita di carbonio (γ_{hc}) o ausferrite
- 2° stadio - l'ausferrite si decompone ulteriormente in ferrite (α) e carburi: tale decomposizione si verifica se l'ADI è mantenuta troppo a lungo alla temperatura d'austemperizzazione.

La comparsa di carburi nella microstruttura infragilisce il materiale, per cui le proprietà meccaniche ottimali dell'ADI sono raggiunte al completamento del primo stadio e prima dell'inizio del secondo.

L'aggiunta di alliganti, quali ad esempio il nichel, consente di incrementare l'austemperabilità, vale a dire di ricavare strutture interamente trasformate anche in getti di notevole spessore. Diversi studi, tuttavia, hanno provato che gli alliganti aggiunti abitualmente nelle ghise ADI possono segregare, causando inomogeneità nella struttura finale con conseguente diminuzione delle proprietà meccaniche.

L'obiettivo finale dell'austemperizzazione, in definitiva, è quello di conferire al materiale peculiarità concomitanti di resistenza all'usura e a fatica, leggerezza, e tenacità e lavorabilità soddisfacenti.

Il processo di austemperizzazione

Tale processo avviene il più comunemente impiegando un bagno di sale composto in uguale misura da nitrato di sodio (NaNO_3) e nitrato di potassio (KNO_3).

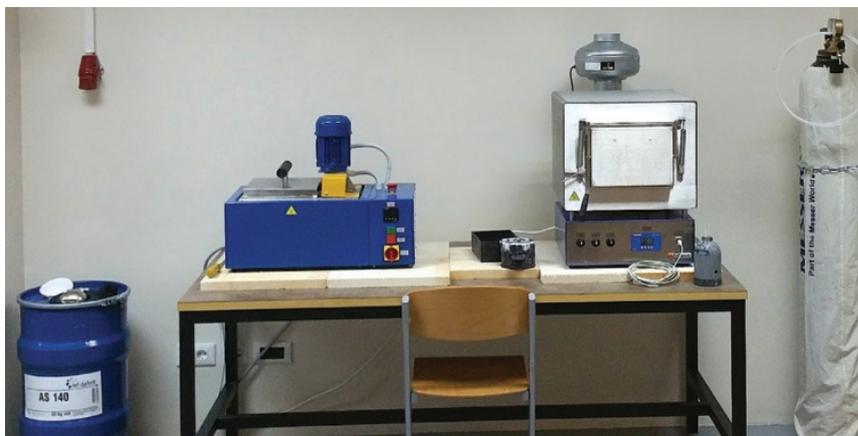


Figura 2 - Forni da laboratorio utilizzati per l'austenitizzazione e il trattamento termico isoteramico

La temperatura di funzionamento di questa composizione salina è compresa nell'intervallo 160÷550 °C, a seconda della composizione chimica del sale. La conversione di austemperizzazione può essere effettuata in bagno di piombo, ma poiché questo elemento ha un punto di fusione di 327°C che restringe l'intervallo di temperatura del processo di trattamento termico, può impiegarsi eccezionalmente un bagno d'olio, seppure con estrema cautela. I bagni di sale, usati spesso per il trattamento termico austemperante, sono impiegati anche per altri trattamenti, ad es. tempra, ricottura e austenitizzazione. La composizione chimica di tali bagni assume un ruolo chiave durante il trattamento termico. I sali fusi sono completamente sciolti su cationi e anioni (che sono termicamente assai stabili), e sono caratterizzati da bassa pressione di vapore, conduttività termica ed elettrica eccellenti, bassa viscosità e solubilità elevata. Le deformazioni dei pezzi sono molto ridotte, allorché si verificano, poiché la dissipazione di calore è assai rapida e uniforme. La buona capacità di dissolvere i gas migliora con l'aumento delle temperature, e alcuni sali fusi riescono a dissolvere persino i metalli. Altre motivazioni per cui il bagno di sale risulta il mezzo più generalmente impiegato per l'austemperizzazione del ferro duttile, sono le seguenti:

- sono consentiti processi di tempra con variazione discontinua della velocità di raffreddamento;
- il bagno conduce il calore molto velocemente e non è infiammabile;
- è eliminato il problema della bolla di vapore nella fase iniziale di raffreddamento;
- la viscosità del bagno è uniforme attraverso un ampio intervallo di temperature;
- il bagno rimane stabile alle temperature di lavoro ed è completamente solubile in acqua, il che facilita la successiva pulizia;
- il sale può essere facilmente estratto dall'acqua utilizzata per la pulizia con metodi di evaporazione;
- cambiando la temperatura di lavoro, agitando e aggiungendo acqua, l'intensità di raffreddamento può essere influenzata in modo significativo; a temperature di lavoro da 160 °C a 290 °C, il contenuto d'acqua è normalmente compreso nell'intervallo 0,5÷2%.

La Tabella 1 mostra le composizioni e le caratteristiche delle due varianti dei bagni salini più comunemente usati, vale a dire a gamma ristretta oppure ampia.

Un sale a gamma ristretta è utilizzato solo per il trattamento termico di austemperizzazione, mentre uno a gamma ampia è adottato per i seguenti trattamenti:

- tempra
- la cosiddetta "tempra termale" o mar-tempering, vale a dire trattamento termico volto a produrre una struttura martensitica completa
- altri processi di rinvenimento.

Sperimentazione e prospettive

Gli effetti della temperatura d'austemperizzazione e dell'agitazione del bagno di sale sulla microstruttura finale dell'ADI sono stati investigati mediante microscopia ottica. I parametri prescelti di trattamento termico sono i seguenti:

- temperatura d'austenizzazione: 900 °C;
- tempo di mantenimento alla temperatura d'austenizzazione: 1 ora;
- tempo di mantenimento alla temperatura d'austemperizzazione: 1 ora;
- temperatura d'austemperizzazione: variabile nell'intervallo 230÷450 °C.

La composizione dei campioni standardizzati Charpy di ghisa duttile inizialmente preparati, realizzati secondo la norma ISO-148-1 (che descrive la prova di resilienza su provette Charpy - intagli a U e a V - per materiali metallici, è riportata in Tabella 2.

La Figura 1 rappresenta la microstruttura iniziale di tali campioni, mostrando ghisa duttile ferritica con piccolissima quantità di perlite nella microstruttura.

La Figura 2 mostra i forni da laboratorio impiegati per l'austenizzazione e il trattamento termico isoteramico, mentre la Figura 3 mostra in dettaglio il forno a bagno di sale per il trattamento termico isoteramico. Le superfici dei vari campioni, successivamente al trattamento termico di austemperizzazione effettuato alle diverse temperature e prima d'essere investigate al microscopio, sono state sottoposte a trattamenti preliminari mediante nastri abrasivi e pulitura meccanica, onde ridurre al massimo la rugosità, e a pulitura mediante soluzione nital (alcol e acido nitrico al 3%), per rimuovere eventuali contaminazioni superficiali. Le Figure 4 e 5 mostrano, a titolo d'esempio, le diverse microstrutture ottenute dopo l'austemperizzazione a differenti temperature, con e senza agi-



Figura 3 - Dettaglio del forno a bagno di sale da laboratorio, utilizzato per il trattamento termico isoteramico

tazione del bagno di sale. Tali immagini mostrano chiaramente dei cambiamenti importanti della microstruttura finale rispetto a prima del trattamento termico: alle basse temperature d'austemperizzazione, la microstruttura è più fine rispetto alle alte temperature, indipendentemente dall'agitazione del bagno di sale.

Si evidenzia, inoltre, una presenza maggiore della fase d'ausferrite nei campioni temprati nel bagno di sale agitante, a differenza di quelli temprati nel bagno di sale calmo. Una maggior produzione d'ausferrite, infine, può essere ottenuta aumentando il tempo di mantenimento alla temperatura d'austemperizzazione fino a 2 ore.

Lo studio dell'influenza della temperatura d'austemperizzazione sulla micro- e nanostruttura della ghisa duttile austemperata, a livello d'approccio metodologico, può essere arricchito impiegando le seguenti altre metodologie, in maniera complementare alla sperimentazione già effettuata:

metodi tradizionali (ad esempio, prove di durezza e di tenacità), metodi avanzati, quali quelli di caratterizzazione micro- e nano-strutturale tramite tecniche neutroniche.

Le ghise sferoidali austemperate si prestano a numerose applicazioni, ad es. nel settore automotive, per cui la determinazione in modo non distruttivo della presenza di difetti all'interno del materiale

TABELLA 1 - COMPOSIZIONI E CARATTERISTICHE DEI BAGNI DI SALE PER AUSTEMPERIZZAZIONE [9]

	NaNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	NaNO ₂	temperatura di fusione	temperatura operativa
	%	%	%	°C	°C
gamma ristretta	45÷55	45÷55	-	220	260÷595
gamma ampia	0÷25	45÷55	25÷55	150÷165	175÷540

(compresi quelli sub-superficiali) e la definizione dell'esatta struttura metallografica rivestono un'importanza fondamentale. Le tecniche neutroniche, non distruttive, sono particolarmente utili per interpretare convenientemente la base strutturale per la proprietà fisiche, al fine di perfezionare la qualità del materiale considerato, e consentono in questo caso di determinare direttamente su campioni reali dei parametri corresponsabili delle caratteristiche macroscopiche e delle performance finali. La tecnica della diffusione neutronica a piccoli angoli (DNPA), valida per la caratterizzazione a livello di micro- e nano-scala, consente d'ottenere informazioni sulle disomogeneità presenti (difetti tipo pori, precipitati e bolle di gas), e individuare le separazioni di fase.

Tale metodo, dai fondamenti teorici simili a quelli della diffusione dei raggi X ai piccoli angoli (che però è limitata per lo scarso potere di penetrazione dei raggi X), consta

TABELLA 2 - COMPOSIZIONE IN PESO % DEI CAMPIONI DI GHISA DUTTILE [11]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Fe
3,63	2,52	0,20	0,04	0,008	0,04	0,047	bal.

nell'allargamento di un fascio neutronico dopo l'attraversamento del campione contenente le eterogeneità. Gli angoli di diffusione considerati debbono essere maggiori di λ/R , in cui R è la più grande dimensione delle disomogeneità e λ è la lunghezza d'onda del fascio neutronico. Modelli specifici d'approssimazione dei dati analitici ottenuti permettono di ricavare, a livello generale, la funzione distributiva delle dimensioni delle disomogeneità, insieme a dati su quantità, frazione volumica e forma dei difetti considerati. La distribuzione delle forme, nello specifico, può essere valutata generalmente nell'intervallo $10^0 \div 10^4 \text{Å}$. La DNPA, fornendo

informazioni con alto grado di precisione statistica poiché mediate su un volume macroscopico di campione compreso tra il mm^3 e il cm^3 , è sicuramente complementare alla microscopia - sia quella ottica, sia quella elettronica (quest'ultima, riuscendo ad analizzare soltanto una porzione d'area dalle dimensioni assai ridotte). L'austenite residua, contenuta nell'ausferrite di cui è composta la ghisa ADI, può essere più o meno saturata di carbonio, con conseguenti effetti sulla qualità del materiale, per cui è importante definire la percentuale d'austenite poco saturata di carbonio. La diffrazione neutronica, in questo caso, può contribuire a determinare il contenuto d'austenite residua - ad es., confrontandola in funzione di uno stato applicato di tensione e deformazione - con soddisfacente precisione anche in caso di frazioni di massa d'austenite inferiori allo 0,01%. Tecniche diffrattografiche, d'altro canto, sono state già impiegate: si può citare, a titolo d'esempio, la diffrazione dei raggi X utilizzata per studiare la morfologia delle superfici danneggiate da cavitazione e alterazioni microstrutturali in campioni di ghisa ADI a 300 °C e 400 °C con microstruttura d'ausferrite col 16% e 31,4% d'austenite residua. Una buona previsione dell'evoluzione micro- e nanostrutturale in seguito al trattamento d'austemperizzazione, infine, può essere effettuata mettendo a punto opportuni modelli basati sull'investigazione tramite tecniche neutroniche di campioni/componenti reali, combinati col metodo degli elementi finiti: tali modelli possono essere concepiti e sviluppati in termini di ricristallizzazione dinamica e fenomeni d'accrescimento del grano.

I riferimenti bibliografici sono disponibili su richiesta alla redazione

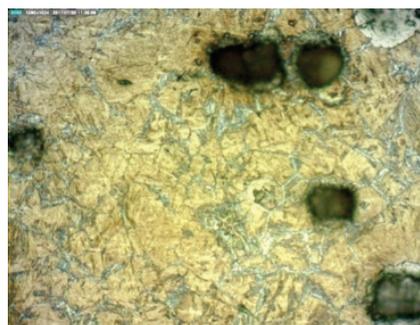


Figura 4 - Microstruttura dopo austemperizzazione a 230 °C con agitazione del bagno di sale (200x)

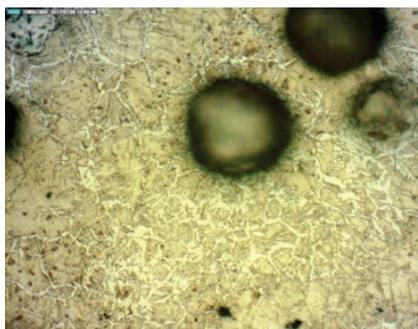


Figura 6 - Microstruttura dopo austemperizzazione a 258 °C senza agitazione del bagno di sale (200x)



Figura 5 - Microstruttura dopo austemperizzazione a 352 °C con agitazione del bagno di sale (200x)

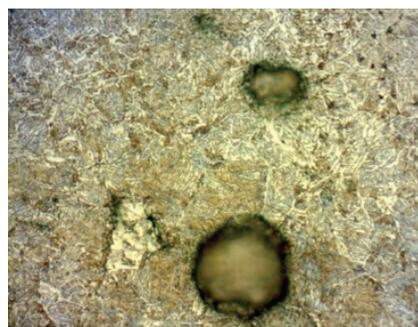
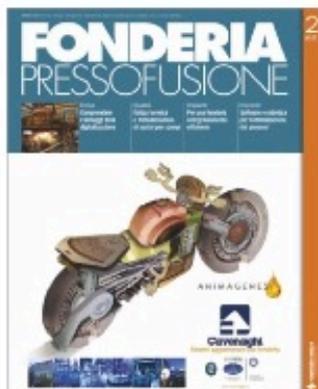


Figura 7 - Microstruttura dopo austemperizzazione a 368 °C senza agitazione del bagno di sale (200x)

Bibliografia

- [1] G. Behera, S.R. Sohala, Effect of copper on the properties of austempered ductile iron castings, Bachelor thesis, Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India (2012).
- [2] L. Sidjanin, R.E. Smallman, Metallography of Bainitic Transformation in Austempered Ductile Iron, *Materials Science & Technology*, Vol. 8, Issue 12 (1992), pp. 1095-1103.
- [3] J.R. Keough, K.L. Hayrynen, G.L. Pioszak, Designing with Austempered Ductile Iron (ADI), *AFS Proceedings 2010*, American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, paper 10-129, p. 15.
- [4] R. Elliot, The role of research in promoting austempered ductile iron, *Heat Treatments of Metals*, Vol.3 (1997), pp 55-59.
- [5] *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, H. Chandler (Ed.), 2nd Edition, ASM International (1995), p. 904.
- [6] D. Rajnovic, O. Eric, L. Sidjanin, The standard processing window of alloyed ADI materials, *Kovove Materialy - Metallic Materials*, Vol. 50 (2012), pp. 199-208.
- [7] B. Bosnjek, B. Radulovic, K. Pop-Tonev, V. Asanovic, Influence of Microalloying and Heat Treatment on the Kinetics of Bainitic Reaction in Austempered Ductile Iron, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 10 (2001), pp. 203-211.
- [8] S. Barbagallo, E. Cerri, S. De Riccardis, Effetto del trattamento termico di austempering sulle caratteristiche microstrutturali e meccaniche di ghise sferoidali, *La metallurgia italiana*, Vol. 1 (2004), pp. 47-53.
- [9] M. Gagné, *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montréal (2004), p. 174.
- [10] D. Živković, I. Gabrić, Z. Dadić, N. Čatipović, I. Vrljičak, Analysis of austempering treatment parameters on properties of ductile iron EN-GJS-400, *Proc. 5th Int. Conf. "Mechanical Technologies and Structural Materials" MTMS2015*, Split, Croatia, 24-25 Sept. 2015, S. Jozić, B. Lela, Eds., Croatian Society for Mechanical Technologies, Split, Croatia (2015), ISSN 1847-7917, pp. 181-188.
- [11] N. Čatipović, D. Živković, Z. Dadić, M. Viceić, Influence of the salt bath agitation and austempering temperature on the microstructure of austempered ductile iron, *Proc. 7th Int. Conf. "Mechanical Technologies and Structural Materials" MTMS2017*, Split, Croatia, 21-22 Sept. 2017, S. Jozić, B. Lela, Eds., Croatian Society for Mechanical Technologies, Split, Croatia (2017), ISSN 1847-7917, pp. 17-22.
- [12] *Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method*, Norma EN ISO 148-1:2016, ISO International Organization for Standardization (2016), p. 29; *Materiali metallici - Prova di resilienza Charpy - Parte 1: Metodo di prova*, Norma Uni EN ISO 148-1:2016.
- [13] M. Rogante, Caratterizzazione avanzata dei getti da fonderia mediante tecniche neutroniche, *Fonderia Pressofusione, Tecniche Nuove, Ed.*, Milano, Vol. 2 (2017), pp. 16-21.
- [14] M. Rogante, Caratterizzazione, mediante scattering neutronico, di materiali e componenti per l'impiantistica nucleare ed industriale, *Tesi di Dottorato in Ingegneria Nucleare*, Università di Bologna (1999), p. 223.
- [15] M. Rogante, Applicazioni Industriale delle Tecniche Neutroniche, *Atti del 1° Workshop Nazionale per l'Industria "Applicazioni Industriale delle Tecniche Neutroniche®"*, Ed. Rogante Engineering, Civitanova Marche, Italy (2008), pp. 40-120.
- [16] Caratterizzazione di materiali e componenti a livello di micro- e nano-scala mediante diffusione neutronica a piccoli angoli, *Studio d'Ingegneria Rogante*, Civitanova Marche, Italy, pagina web http://www.roganteengineering.it/pagine_servizi/servizi2.pdf.
- [17] Determinazione delle tensioni residue mediante diffrazione neutronica, *Studio d'Ingegneria Rogante*, Civitanova Marche, Italy, pagina web http://www.roganteengineering.it/pagine_servizi/servizi1.pdf.
- [18] M. Dojcinovic, O. Eric, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos, Effect of austempering temperature on cavitation behaviour of unalloyed ADI material, *Materials Characterization*, Vol. 82 (2013), pp. 66-72.



Cavenaghi SpA
Via Varese, 19
20020 Lainate (MI)
Tel. +39 029370241
Fax. +39 029370855
www.cavenaghi.it
info@cavenaghi.it
cavenaghi@pec.it



EDITORIALE	6
Annalisa Pola	
L'OPINIONE	64
Cristiano Fragassa	

8	FOCUS AUTOMATIZZATI E PERSONALIZZATI Roberto Carminati
12	QUALITÀ STABILITÀ TERMICA DI LEGHE DI ALLUMINIO DA FONDERIA PER APPLICAZIONI MOTORISTICHE Stefania Toschi
18	MISURE SPERIMENTALI DI VISCOSITÀ PER METALLI ALLO STATO LIQUIDO E SEMISOLIDO Marialaura Tocci, Annalisa Pola, Michael Modigell
24	BANCO PROVA PER LA SIMULAZIONE DI FENOMENI DI FATICA TERMICA SUPERFICIALE E METALLIZZAZIONE DI ACCIAI PER STAMPI F. S. Gobber, D. Ugues, M. Rosso, A. G. Pisa
30	INFLUENZA DELLA TEMPERATURA SULLA MICROSTRUTTURA DELLA GHISA DUTTILE AUSTEMPERATA N. Čatipović, D. Živković, M. Rogante
34	NUOVE COMPETENZE PER LA FONDERIA CHE CAMBIA Roberto Carminati
37	SCUOLA ESTIVA DI METALLURGIA
38	MATERIALI SISTEMA LEGANTE EFFICIENTE ED ECOLOGICO A.Gieniec, N. Hurkes, P. Vietoris, H. Dieckhues
42	IMPIANTI TECNOLOGIA AL PLASMA NEI SISTEMI DI COLATA: UN NUOVO APPROCCIO PER UNA FONDERIA ENERGETICAMENTE EFFICIENTE Stefano Cucchetti, Cristiano Fragassa, Emanuele Savini
49	SOFTWARE E ROBOTICA PER L'OTTIMIZZAZIONE DEI PROCESSI Roberto Carminati
53	PREPARAZIONE, FLESSIBILITÀ, METODO
54	PIÙ PULIZIA, PIÙ EFFICIENZA, PIÙ CAPACITÀ PRODUTTIVA Gianandrea Mazzola
56	LA FONDERIA HA UN'ANIMA TRIDIMENSIONALE Michele Cerruti
54	IL METALLO RESTA PESANTE Giovanni S. Buono

FONDERIA PRESSOFUSIONE

2
giu18

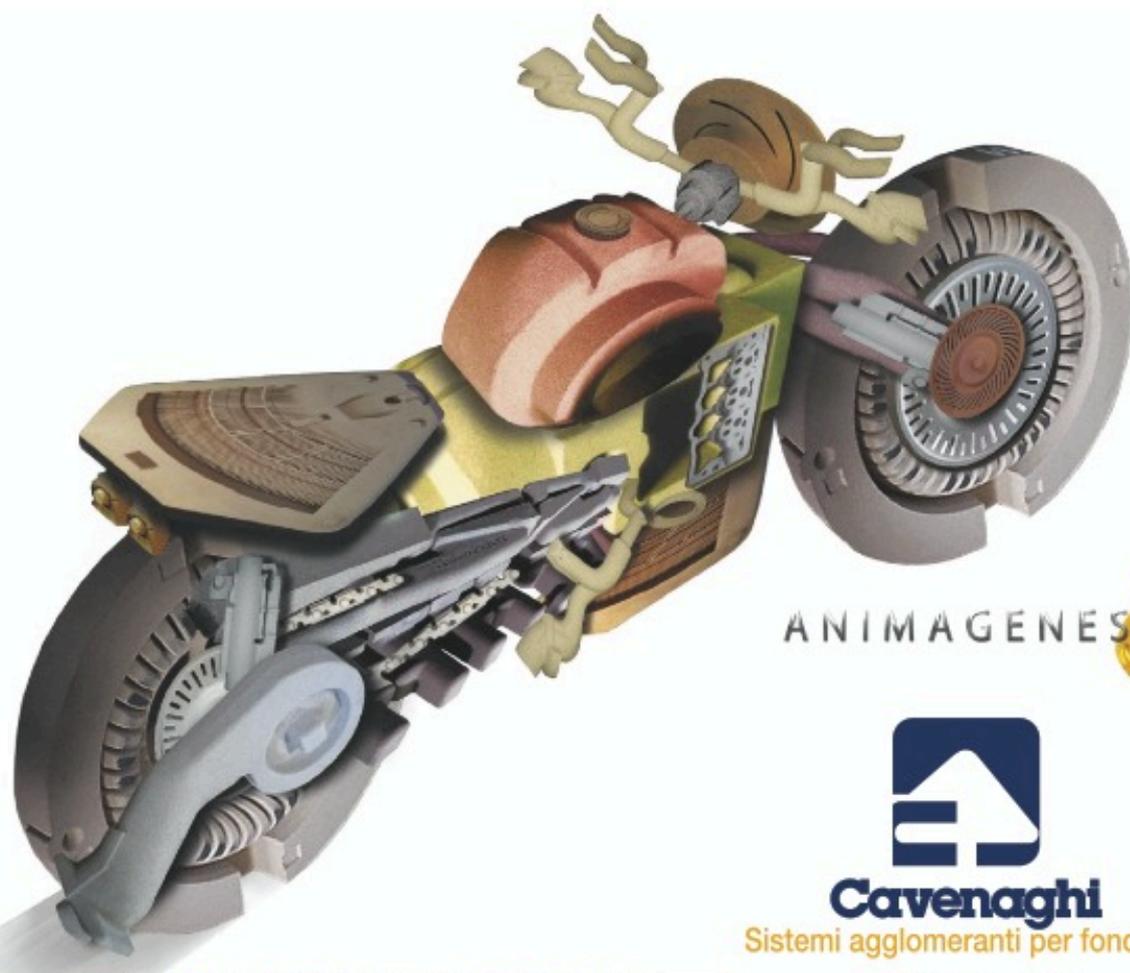


Focus
**Comprendere
i vantaggi della
digitalizzazione**

Qualità
**Fatica termica
e metallizzazione
di acciai per stampi**

Impianti
**Per una fonderia
energeticamente
efficiente**

Impianti
**Software e robotica
per l'ottimizzazione
dei processi**



ANIMAGENESI



Cavenaghi

Sistemi agglomeranti per fonderia



UNI EN ISO 9001:2015
UNI EN ISO 14001:2015

SISTEMI DI GESTIONE
CERTIFICATI

CERTIFICAZIONE
E MEMBRO DELLA
FEDERAZIONE CIG

www.cavenaghi.it