

# Ottimizzazione del processo di pressocolata per il miglioramento delle prestazioni meccaniche in caso di impatto

N. Gramegna, E. Della Corte, G. Quaglia, F. Garcia Lorente, I. Loizaga, S. Berrocal

*Le prestazioni di un componente in lega di alluminio soggetto a prova di impatto si definiscono sulla base dell'energia assorbita durante l'urto e il transitorio di smorzamento della velocità del corpo impattante. I test e gli strumenti di laboratorio sono onerosi e sofisticati per ogni componente, ma attualmente costituiscono l'approccio ideale per il collaudo finale del componente, a meno che gli strumenti CAE siano in grado di sostituire (almeno in parte) i test reali. Un tale obiettivo è sicuramente ambizioso in quanto richiede un'attenta ricerca e comprensione dei fattori che concorrono a definire il comportamento elasto-plastico a rottura del materiale. Ancor più delicata è la caratterizzazione del materiale nel caso di pressocolati in lega di alluminio dove le proprietà meccaniche dipendono fortemente dai difetti di fonderia piuttosto che dalla microstruttura. Il progetto NADIA (New Automotive components Designed for and manufactured by Intelligent processing of light Alloys, Thematic priorities 3 - NMP, Contract N°: 026563-2) del FP6 è stato valutato come il progetto di riferimento nel settore automotive per l'integrazione del processo manifatturiero con la risposta meccanica dei componenti in lega leggera. Al termine della ricerca di base sulle leghe secondarie e sugli effetti degli elementi e i parametri di processo sulle prestazioni del materiale, il progetto prevede l'applicazione ingegneristica delle nuove conoscenze e modelli. Con particolare riferimento ad uno dei dimostratori, il "Rack&Pinion" della CIE Automotive, un nuovo strumento ingegneristico è in grado oggi di trasferire la previsione delle proprietà meccaniche del getto (MAGMASOFT) in un codice FEM per simulazione di impatto (LS-DYNA) attraverso un'avanzata correlazione fra la tensione di rottura locale e i più significativi indici di difettologia per inglobamento da gas o porosità da ritiro.*

## PAROLE CHIAVE:

alluminio e leghe, difetti, fonderia, prove meccaniche, simulazione numerica

## INTRODUZIONE

A causa dei nuovi limiti imposti dall'industria nel settore automotive, che riguardano emissioni di gas, i consumi di carburante, riciclaggio e la conferma delle elevate prestazioni meccaniche richieste, le leghe leggere, in particolare quelle di alluminio, sono oggi sempre più adottate sia per parti motoristiche che di telaio con un potenziale risparmio di peso del 40-50 per cento rispetto ai classici materiali utilizzati nell'industria, come acciaio e ghisa. E' dunque sempre più importante progettare i componenti automobilistici, e in generale tutti i componenti, in combinazione con i processi al fine di minimizzare costi, scarti e massimizzare le prestazioni meccaniche; a tal fine è necessario prevedere, tramite strumenti di simulazione, la microstruttura, le proprietà meccaniche e in generale tutte le informazioni collegate alla qualità del componente.

La microstruttura e le proprietà meccaniche dipendono dal tipo di lega e dal processo di fonderia adottato che nel caso delle grandi serie per l'industria automobilistica predilige la pressocolata che si dimostra versatile anche per componenti ad alto

contenuto ingegneristico e di forma complessa. Come per ogni processo di colata, anche quello in alta pressione può introdurre difetti che diminuiscono le proprietà meccaniche nonostante la ripetibilità, il controllo e l'automatismo del sistema di iniezione. Infatti l'elevata velocità di iniezione può indurre a notevoli inglobamenti d'aria e i differenti spessori che caratterizzano il pezzo possono generare una locale riduzione dell'effetto di compattazione dei ritiri di solidificazione nonostante l'elevata pressione applicata sul metallo. A causa proprio delle specifiche condizioni di processo non è sempre semplice definire le cause che hanno generato un micro o macro difetto. Spesso la bolla di gas inglobata degenera in un reticolato di micro-cavità tipiche del ritiro di solidificazione come anche un giunto freddo o mancato riempimento può derivare da un serie di concause di processo che una volta identificate suggeriscono gli interventi correttivi. Sebbene dunque la classificazione dei difetti del pressocolato ha trovato oggi un valido documento pubblicato da AIM [1] risulta chiaro che la correlazione fra tipologia, dimensione, forma di difetti con le proprietà meccaniche della lega di alluminio richiede uno studio avanzato che vede il primo modello sviluppato all'interno del progetto NADIA [2-3].

La scatola pignone (Rack&Pinion), oggetto di questo articolo, è un componente di sicurezza con i conseguenti standard qualitativi per assicurarne la tenuta dell'olio in pressione, la resistenza a fatica e il comportamento duttile in caso di urto. La sostitu-

N. Gramegna, E. Della Corte, G. Quaglia, F. Garcia Lorente  
ENGINSOFT S.p.A., Italy

I. Loizaga, S. Berrocal  
FUNDACION CIE, Spain

zione del materiale acciaio con leghe di alluminio richiede un nuovo design e una maggior conoscenza del comportamento meccanico della lega leggera in funzione del processo produttivo. Il progetto del getto pressocolato incontra difficoltà nel coniugare la resistenza meccanica e la duttilità nelle zone maggiormente sollecitate con l'uniformità di spessore e la qualità metallurgica del pressocolato. Anche in questo caso, come spesso accade nella fase iniziale di sviluppo, il modello del componente assume una forma funzionale considerando il materiale e le sue prestazioni con elevati fattori di sicurezza dettati dall'esperienza sulla scarsa qualità del presso colato.

## SIMULAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI PRESSOCOLATA

Il percorso di progettazione e revisione del componente segue l'iter che nella pratica un buon "project manager" normalmente adotta, rimanendo però a livello virtuale, prima del benessere al collaudo finale. Lo schema operativo può essere sintetizzato in quanto segue:

- A. Simulazione del processo nella versione originale e ottimizzazione del processo di pressocolata allo scopo di migliorare la qualità del componente colato
- B. Determinazione delle proprietà meccaniche locali e tensioni residue con relativo trasferimento al codice FEM predisposto per l'analisi di impatto
- C. Simulazione di impatto considerando il nuovo modello, lo stato di pre-stress dovuto alle tensioni residue e le proprietà meccaniche locali a fine del processo produttivo, per verificare la quantità di energia assorbita nella situazione iniziale e in seguito ai miglioramenti implementati tramite il nuovo approccio

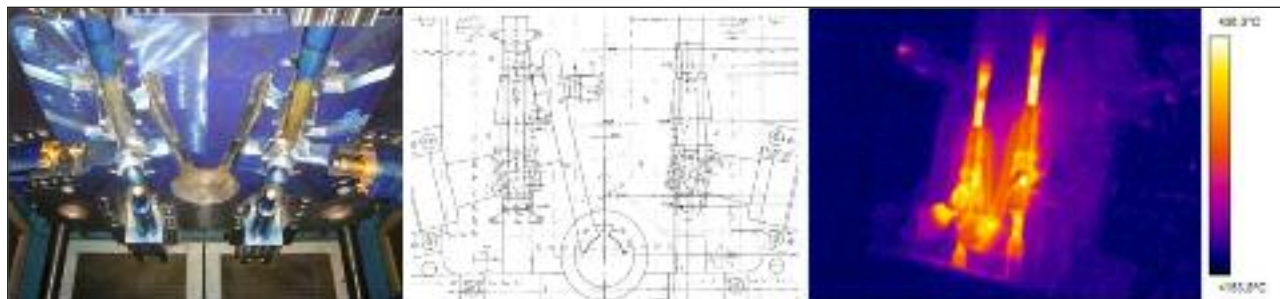
### Simulazione del processo nella versione originale

I primi risultati tangibili si ottengono dal confronto fra i criteri di qualità previsti nella simulazione di riferimento e le indagini di laboratorio sui primi getti campionati. Lo studio, svolto nel rispetto dei parametri reali di produzione sino al raggiungimento delle condizioni di regime termico dello stampo, mette in luce

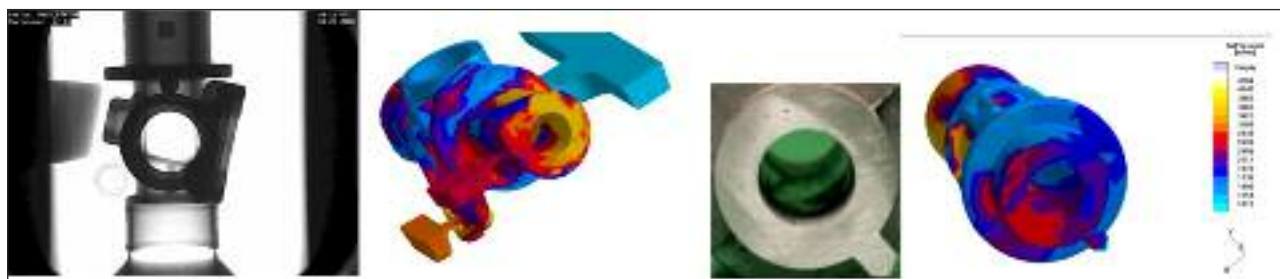
quali siano le possibili cause dei difetti da riempimento e solidificazione riscontrati, con la conseguente riduzione locale delle proprietà meccaniche. I modelli, i materiali, l'operazione di lubrifica e la movimentazione delle parti stampanti durante il ciclo produttivo costituiscono le basi per la simulazione del comportamento termico dell'attrezzatura (fig. 1), con l'immediato confronto fra le immagini rilevate dalla termo camera e le previsioni della simulazione [4-6].

In particolare, lo studio evidenzia come le più marcate porosità riscontrate originariamente sul getto di riferimento siano riconducibili ad inglobamento di gas nella zona centrale di maggior spessore del getto. Le prove distruttive di sezionamento e le indagini a raggi X confermano la distribuzione e la morfologia dei difetti (fig. 2). Come spesso accade nella pratica di fonderia, le soluzioni ai difetti possono essere molteplici e non risulta semplice la ricerca del miglior compromesso con le esigenze di riduzione di peso, funzionali, elevata produttività e lunga vita degli stampi. In questo caso si può adottare un approccio di ottimizzazione multi obiettivo con l'introduzioni di variabili e/o modifiche che possano essere più o meno invasive sull'attrezzatura già esistente.

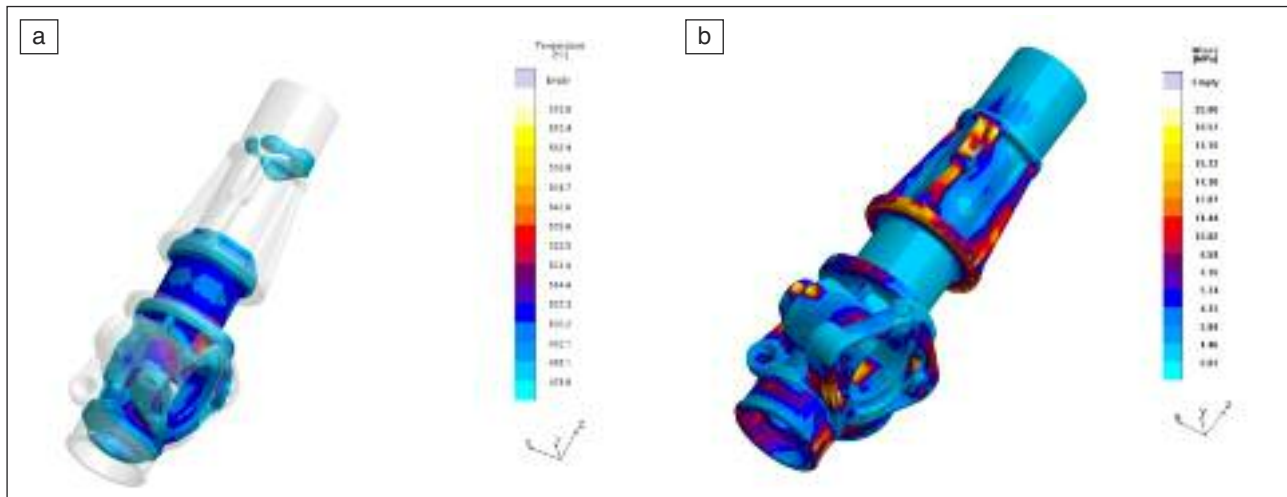
Nonostante le notevoli variazioni di spessore nel modello originale del getto, la fase di solidificazione sembra non incidere ulteriormente nella zona centrale del componente interessata dalle massime sollecitazioni per impatto ma evidenzia, sia nella realtà che nella simulazione, alcune porosità interdendritiche di lieve entità in alcune aree lontane dall'azione benefica di compattazione per la sovrappressione applicata. Lo studio della solidificazione, che avviene prevalentemente con il getto racchiuso all'interno dello stampo, descrive il passaggio dallo stato liquido allo stato solido punto per punto ed in istanti diversi a seconda dello spessore e dell'assorbimento di calore da parte dello stampo con il relativo sistema di termoregolazione. Ogni punto caldo che si isola dalla possibile azione di compensazione della variazione di densità, potrà generare un difetto da ritiro più o meno marcato a seconda della distanza dagli attacchi di colata e dal volume interessato da una consistente frazione liquida (fig. 3a). L'accurata simulazione della velocità di raffreddamento e la previsione, in



**FIG. 1** *La progettazione dello stampo e la termica degli stampi durante la produzione.*  
Die design and die thermal behaviour during the diecasting cycle production.



**FIG. 2** *La previsione dei difetti con la simulazione e confronto con immagini X-ray.*  
The defect simulation prediction and comparison to X-ray investigations.



**FIG. 3** a) distribuzione della temperatura durante la solidificazione, b) distribuzione delle tensioni residue a conclusione della simulazione in condizioni di regime termico.

a) temperature distribution during the casting solidification, b) equivalent residual stress distribution at the end of thermal steady state simulation.

posizione e dimensione, dei difetti sopracitati rappresenta la base per l'elaborazione delle proprietà meccaniche locali, come verrà descritto nel terzo paragrafo di questo articolo.

Il raffreddamento in aria del getto, a seguito della sua estrazione dallo stampo, sino alla temperatura ambiente e all'istante di tranciatura del sistema di colata, costituisce la storia termica del pezzo per una valutazione della contrazione non uniforme dello stesso. Infatti, la distribuzione non omogenea della temperatura del getto in fase di estrazione, oltre la quale non vi sono più vincoli alla libera deformazione, e la notevole diversità degli spessori (inclusi gli attacchi e i rami di colata) producono significative differenze nelle velocità di raffreddamento locali e una contrazione non omogenea del materiale con la conseguente generazione di tensioni e deformazioni residue. Come noto, il calcolo del comportamento non lineare meccanico del materiale è affrontabile con un appropriato solutore, in questo caso MAGMAstress, nel caso in cui l'evoluzione termica durante il processo produttivo sia ben nota.

La rimozione del ramo di colata, tramite tranciatura o asportazione per lavorazione meccanica, può influire sulla finale distribuzione di tensioni e deformazioni a causa del ritorno elastico generando un nuovo stato di equilibrio (fig. 3b). In assenza di un trattamento termico o riscaldamento di distensione, il getto pressocolato mantiene questo stato di pre-tensionamento sino alla fase di collaudo funzionale e risposta meccanica in esercizio. In questo caso, la simulazione di impatto assume lo stato di coazione di fine processo come condizione iniziale prima dell'applicazione delle nuove sollecitazioni meccaniche introdotte dal corpo contundente in caduta nel crash-test.

### Ottimizzazione del processo di pressocolata

L'obiettivo principale del modulo MAGMAfrontier è la determinazione, in modo assolutamente automatizzato, del "miglior" design per la produzione di un componente colato, attraverso la simulazione di un gran numero di varianti che possono essere diverse per parametri geometrici o di processo. Il processo di ottimizzazione si basa inizialmente su una popolazione determinata con algoritmi dedicati alla pianificazione degli esperimenti (Design of Experiment) nel modo più uniforme possibile per coprire l'intero campo vettoriale (sobol e reduced factorial) mentre le successive generazioni sono create da un algoritmo genetico multi-obiettivo (MOGA) in funzione dei fattori di elitismo e mu-

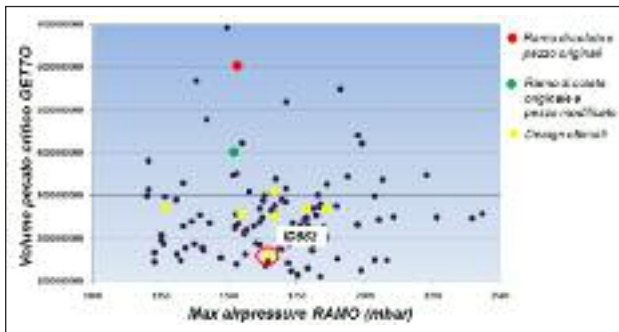
tazione. Nonostante la complessità del tema trattato, l'utilizzatore esperto di fonderia e progettazione di attrezzature, deve solo definire il numero iniziale di design della prima popolazione e quante generazioni successive in funzione del tempo a disposizione.

L'approccio adottato per la ricerca della soluzione ideale consiste in due fasi di studio con tecniche di ottimizzazione automatica che consentono un'indagine avanzata in un problema multi-obiettivo [7-9]:

- La prima considera solo modifiche poco invasive alle parti stampanti per limitare le lavorazioni meccaniche e quindi anche i costi ad esse collegati. Di fatto, si prevede la variazione della sezione dei due attacchi presenti senza nessuna modifica nella forma dell'attuale ramo e la conferma dei parametri di processo originali. Invece l'unico parametro di processo considerato sensibile è la corsa del pistone per il passaggio da I a II fase, mantenendo costante invece le velocità massima dello stesso.
- La seconda fase, invece, analizza ad ampio raggio tutte le possibili modifiche e varianti per ricercare la massima qualità possibile del componente pressocolato nel rispetto dei vincoli imposti da uno stampo già esistente (es. estrattori, orientazione, circuiti etc.)

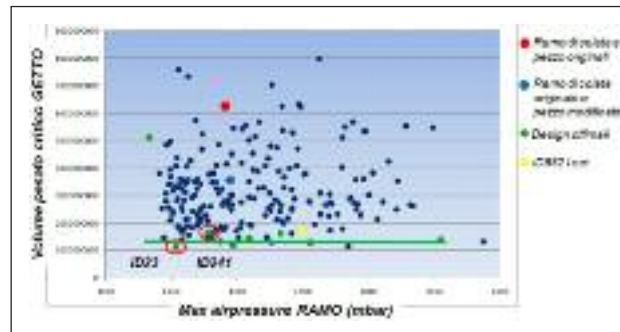
D'altro canto, i due obiettivi principali del problema si rivolgono alla qualità del pezzo, che si traduce nella minima quantità e pressione di aria inglobata nel getto, e nella riduzione del volume del ramo di colata con la contemporanea riduzione o assenza delle turbolenze nel ramo stesso allo scopo di aumentare la resa produttiva ed evitare che le bolle d'aria generatesi nella prima fase del riempimento siano trasportate all'interno nella cavità del getto come una miscela aria-metallo.

In estrema sintesi, i risultati ottenuti con della prima fase di valutazione di circa 850 design su complessive 7 generazioni identificano una frontiera di Pareto (insieme delle soluzioni migliori) che soddisfano i vincoli e si possono confrontare con le configurazioni originali tramite l'analisi di una serie di grafici (es. fig. 4) e strumenti statistici sui principali indici di qualità, si identifica un gruppo di soluzioni che meglio rispettano gli obiettivi stabiliti inizialmente. Tra questi, il progettista può selezionare il design "ottimale" in base a propri criteri decisionali per poi comunicare le modifiche e applicarle nella nuova e successiva campionatura.



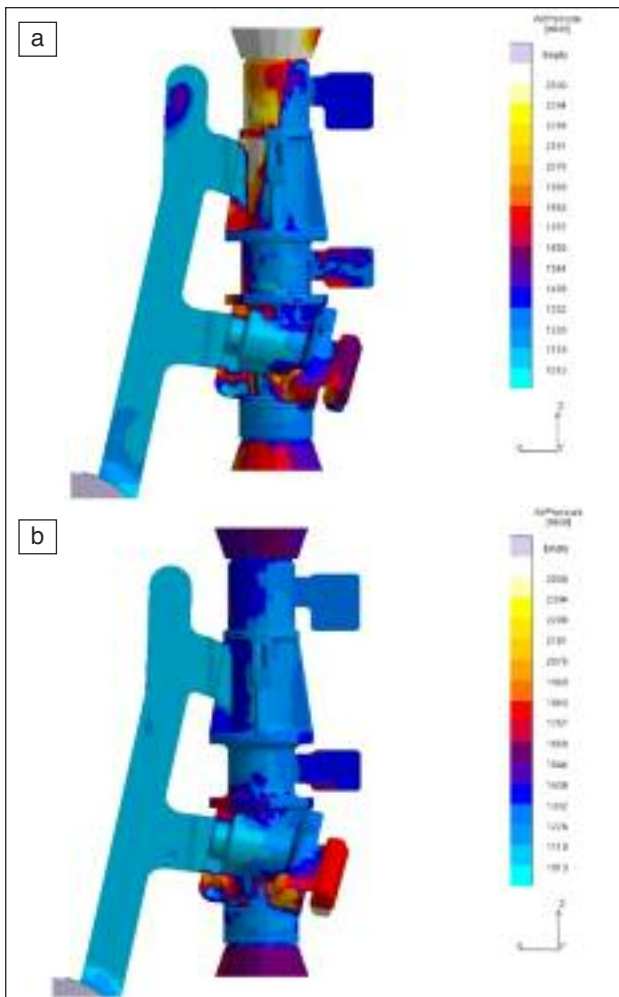
**FIG. 4** *Volume pesato critico della sovrappressione nel getto in raffronto con la massima sovrappressione nel ramo (fase 1 di ottimizzazione).*

*Diagram of weighted volume air pressure in the casting in comparison to the maximum airpressure in the gating system (optimisation phase 1).*



**FIG. 6** *Volume pesato critico della sovrappressione nel getto in raffronto con la massima sovrappressione nel ramo (fase 2 di ottimizzazione).*

*Diagram of weighted volume air pressure in the casting in comparison to the maximum airpressure in the gating system (optimisation phase 2).*



**FIG. 5** *Distribuzione del criterio di sovrappressione a fine riempimento: a) modello iniziale, b) modifica del getto e parametri di processo.*

*Visualization of airpressure criteria at the end of cavity filling: a) original model, b) modified casting and optimized process parameters.*

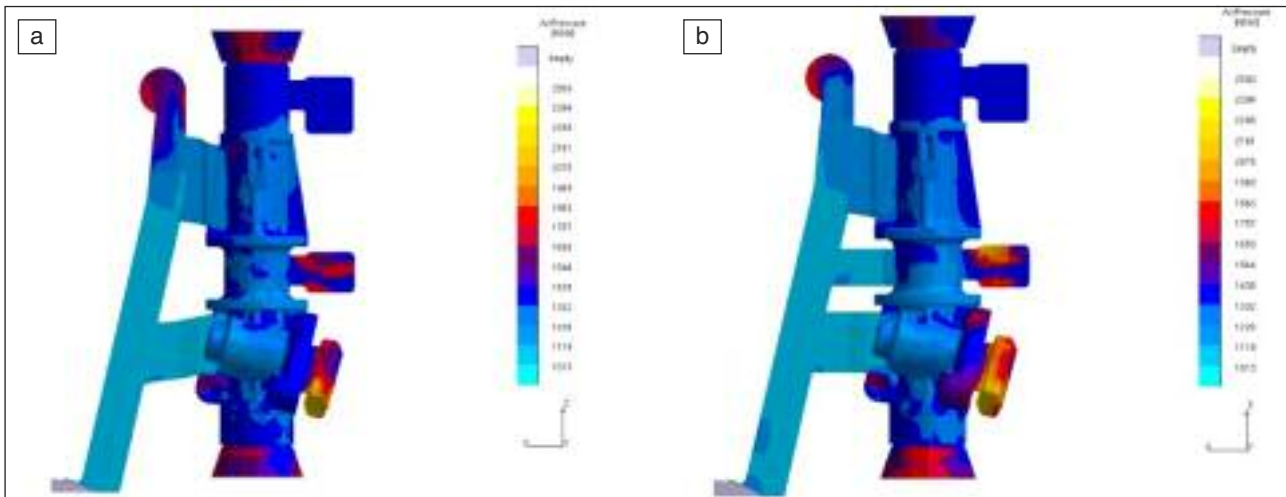
Nell'immagine seguente si può notare che il design identificato con il codice ID882 è il prescelto in virtù dell'ottimo comportamento del metallo nel ramo di colata, ma soprattutto per l'ideale minimizzazione fra le dimensioni e la concentrazione delle bolle d'aria residue nel pezzo (misurato dal volume pesato critico della sovrappressione) e la massima pressione e dimensione delle stesse (ovvero la sovrappressione d'aria). I punti sottostanti tale design e maggiormente prossimi all'origine degli assi, pur minimizzando ancor più i due valori in obiettivo, non rispettano il vincolo della temperatura minima agli attacchi posta pari a 578°C per la lega AlSi9Cu3. Si può notare, inoltre, il sostanziale miglioramento raggiunto sia nel confronto con la produzione originale (punto rosso in fig. 4) che nei riguardi dell'introduzione del nuovo pezzo con la riduzione dello spessore nella zona centrale (punto verde in fig. 4).

La differenza nell'indice di rischio di difetti diventa ancor più evidente e chiara se si confrontano due immagini della distribuzione di pressione d'aria inglobata a fine riempimento (fig. 5) sottolineando l'effetto benefico della modifica geometrica del pezzo e della variazione della curva di iniezione.

Si cerca ora, un ulteriore possibile miglioramento prevedendo la variazione dell'intero ramo di colata e la possibile aggiunta di un terzo attacco centrale. L'analisi dei risultati nella seconda fase di ottimizzazione, come descritti nel grafico seguente (fig. 6), permette l'individuazione di altre configurazioni ottimali in un insieme di ulteriori 245 design valutati con particolare riduzione della massima pressione e dimensione delle possibili bolle inglobate nell'intero pezzo (ID23 e ID241). Il vincolo sulla temperatura minima del metallo in ingresso conduce alla scelta di quest'ultimo che presenta una riduzione di difettologia pari a circa 2% rispetto al precedente ID882 e un evidente miglioramento del 73% nei confronti del getto originale.

Si può apprezzare la lieve ma ulteriore differenza (fig. 7) di sovrappressione d'aria tra il miglior design scelto a fine ottimizzazione preliminare e il nuovo design ottimale; infatti, nonostante le zone a rischio rimangono pressoché uguali, i valori massimi del criterio diminuiscono ulteriormente nel pezzo e aumentano nei pozzetti di sfiato con l'aggiunta dell'attacco centrale.

A conclusione del processo di ottimizzazione virtuale della fluidodinamica di iniezione, si ritiene utile una verifica finale di riempimento e solidificazione in condizione di regime termico dello stampo sia per il design ID882, meno oneroso in termini di modifica, che per il design ID241. Entrambe le analisi terminano con il completo raffreddamento del getto e successiva asportazione del

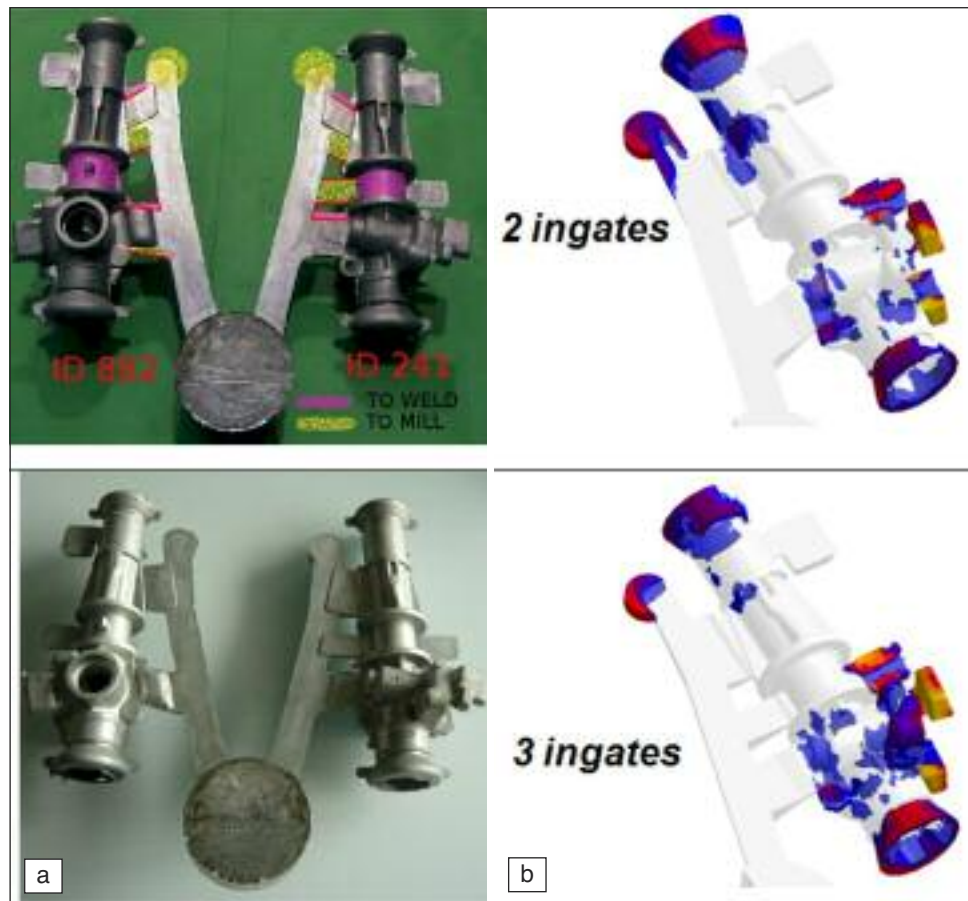


**FIG. 7** Distribuzione del criterio di sovrappressione a fine riempimento: a) configurazione ID882 ottimale in fase 1, b) configurazione ID241 ottimale in fase 2.

Visualization of airpressure criteria at the end of cavity filling: a) optimal design ID882 at the end of phase 1, b) optimal design ID241 at the end of phase 2.

**FIG. 8**  
Nuovi prototipi di getto e corrispondente previsione dei difetti.

New casting prototypes and corresponding simulation defect prediction.



ramo di colata per la stima delle proprietà meccaniche locali e lo studio delle tensioni e deformazioni residue a fine processo.

La struttura del progetto di ricerca NADIA fornisce un sostegno ai partner per poter applicare entrambe le soluzioni sullo stampo reale, produrre alcuni getti e apprezzare con indagini microstrutturali (micro e macrofocus) e prove di impatto l'effettivo beneficio previsto. L'unica semplificazione adottata vede una figura in accordo con la configurazione ID882 e la seconda impronta, nello stesso stampo simmetrico per sistema di colata, aderente

alla proposta del design ID241 (fig. 8a). I risultati delle indagini di laboratorio confermano un generale e considerevole miglioramento rispetto al getto originale, con qualche lieve differenza fra le ultime due prove, ritenute ottimali, che spostano i piccoli difetti di inglobamento d'aria dal corpo alla flangia (fig. 8b).

Per ovvie ragioni editoriali, tutte le indagini di laboratorio non rientrano in questo articolo che si focalizza prevalentemente sugli aspetti numerici, tecniche di progettazione e verifiche pratiche di collaudo.

## DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE LOCALI E TENSIONI RESIDUE

La ricerca svolta in quattro anni di attività ha fornito utili indicazioni per costruire un primo modello di correlazione fra le proprietà meccaniche locali alla microstruttura e difettologia nei getti pressocolati, sulla base di numerosissimi dati sperimentali acquisiti da provini di trazione e piastre portate a rottura per flessione.

Oggi, il progetto della scatola pignone rappresenta un dimostratore industriale del nuovo approccio integrato. In altre parole, grazie alla tecnologia sviluppata, il concetto avanzato di "Multi-scale design & simultaneous engineering" (progettazione multi-scala & ingegneria simultanea) è stato esteso e reso disponibile anche ai componenti pressocolati (prodotti con leghe di alluminio o magnesio), permettendo, per la prima volta, una realistica previsione della resistenza a trazione locale finale UTS in funzione della qualità del pressocolato.

In particolare, la correlazione finale adotta quattro criteri sensibili che descrivono i seguenti aspetti:

- La pressione dell'aria per identificare la posizione, la gravità e la dimensione dell'inglobamento di gas
- La lunghezza del percorso della lega per evidenziare il possibile raffreddamento della lega e le impurità a causa di un comportamento fluidodinamico poco omogeneo
- Il contatto con l'aria della superficie libera del fronte di avanzamento della lega per indicare il rischio di formazione di ossidi
- La velocità di raffreddamento durante la fase di solidificazione per identificare i punti caldi con rischio di porosità da ritiro

Ogni singolo esperimento al variare dei parametri di processo applicati nella produzione di provini pressocolati al pari della corrispondente simulazione, fornisce una dimensione, tipologia e morfologia diversa dei possibili difetti riscontrabili in pressocolata sempre nelle stesse sezioni di interesse per il provino di trazione o la piastra sottoposta al tri-bending test.

Dai dati sperimentali si evidenzia che il valore massimo della tensione di rottura (325 MPa) della lega EN AB 46000 si riduce in funzione dei differenti indici di difettologia previsti dal codice di simulazione.

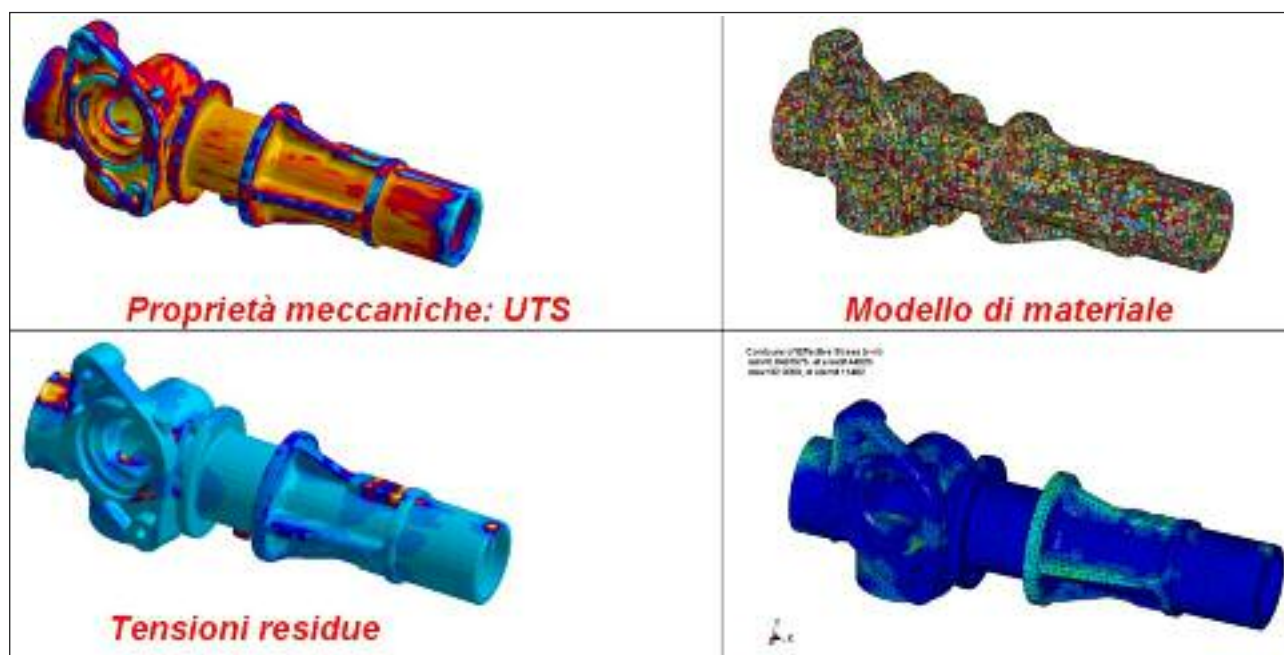
Il modello finale costituisce uno strumento tecnologico-ingegneristico completamente nuovo che, attraverso un'adeguata interfaccia, può elaborare i risultati derivanti da una simulazione numerica di un processo di pressocolata (riempimento dello stampo, campo termico, criteri di previsione dei difetti) con lo scopo di:

- Visualizzare la "distribuzione qualitativa" all'interno del pezzo colato (es. localizzazione e criticità dei difetti);
- Predire la distribuzione locale delle proprietà meccaniche dei pezzi colati (prendendo in considerazione il comportamento meccanico ottimale della lega e le limitazioni imposte dai difetti);
- Trasferire le informazioni riguardanti il comportamento meccanico locale agli strumenti di analisi strutturale, quale parte del nuovo e integrato approccio alla Design Chain;
- Usare queste informazioni all'interno dei codici FEM in modo da validare il comportamento in servizio dei pezzi pressocolati e così valutare la rottura del componente in caso di fenomeni di crash o fatica.

Il passaggio di dati da un codice specifico per la simulazione dei processi di fonderia e uno strumento FEM, dedicato al calcolo altamente non-lineare per grandi deformazioni sino a rottura, non rappresenta un compito semplice se non si utilizzano tecniche di interpolazione dei dati dalla mesh (a volumi di controllo) ideale per la fluidodinamica verso la mesh, per ovvi motivi composta da elementi finiti diversi, per solutori espliciti (fig. 9). I due sistemi molto verticalizzati trovano un punto d'incontro grazie a specifiche routine numeriche per il trasferimento e inizializzazione di un materiale disomogeneo nelle proprietà locali e nello stato di pre-tensionamento riscontrato alla fine processo di pressocolata.

## APPROCCIO INTEGRATO: I RISULTATI DEL PROCESSO PRODUTTIVO E LA SIMULAZIONE D'URTO

L'approccio integrato, che si conclude con la simulazione del test di impatto, viene qui descritto per le quattro situazioni di produzione e simulazione descritte in precedenza. Per maggior dettaglio, il confronto fra il materiale nel getto originale, preso come riferimento, e l'ultimo ottimizzato nella forma e nei parametri

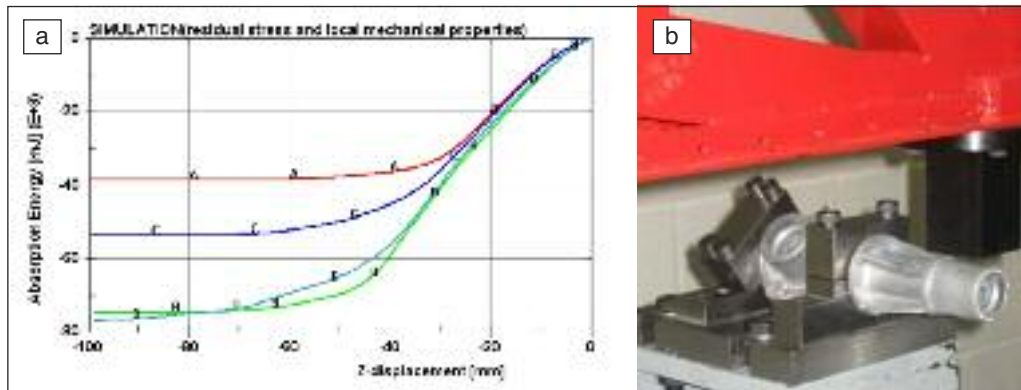


**FIG. 9** *Proprietà meccaniche e tensioni residue trasportate dal codice a Volumi di Controllo (CV) al codice FEM. Interpolation of mechanical properties and residual stress distribution from Control Volume (CV) mesh to FEM code.*

FIG. 10

a) confronto tra le curve di Energia Assorbita nel caso di differenti simulazioni di impatto, b) foto della prova d'urto.

a) Energy Absorption curves versus vertical displacement in case of four different impact simulations b) photo of impact test.



di processo evidenzia un limite massimo di tensione ultima a rottura del materiale sempre di 296-298 MPa. Mentre il limite inferiore sale da 149 a 178 MPa allontanandosi dal valore di tensione di snervamento con la corrispondente previsione di un significativo incremento dell'energia assorbita in fase di urto. Questo è quanto viene confermato dalle quattro simulazioni e relativi test in laboratorio che si possono riassumere nel diagramma di fig. 10a con le diverse curve di energia assorbita in funzione dello spostamento verticale del corpo contundente. I risultati relativi alla simulazione di impatto con la geometria e processo originali (curva A: energia assorbita vs spostamento verticale), considerando proprietà meccaniche omogenee da normativa ed assenza di tensioni residue, si possono confrontare con altre tre diverse applicazioni:

- curva B) modello modificato e sistema di colata ottimizzato, senza approccio integrato, per evidenziare l'effetto della modifica geometrica del pezzo e processo ottimale (miglioramento dell'energia assorbita del 94 % rispetto alla configurazione A);
- curva C) modello originale e sistema di colata originale, considerando la previsione delle proprietà meccaniche locali e lo stato di tensione residuo, per confermare che in assenza di approccio integrato la risposta meccanica può essere sottostimata o irrealistica (incremento del 39% dell'energia assorbita rispetto alla configurazione A);
- curva D) modello modificato e sistema di colata ottimizzato, con approccio integrato, per confermare che una buona progettazione del pezzo e del processo possono aumentare la qualità del prodotto con la conseguente uniformità di prestazioni meccaniche. In altre parole, la vicinanza fra le due curve B e D (+3% di energia assorbita) è giustificata da valori di UTS locali molto prossimi ai valori tipicamente suggeriti dalla normativa vigente per un materiale "sano".

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro descrive un approccio integrato completo tra simulazione di processo e verifica all'urto per un componente pressocolato, al fine di verificare virtualmente, nel modo più realistico possibile, la vita di un componente a partire dalla fase di produzione fino alla prova di impatto.

L'aspetto innovativo del sistema progettuale descritto non risiede nell'uso dei codici di calcolo verticalizzati sul processo o sulla risposta meccanica, considerati di riferimento nei due settori di applicazione, ma lo si ritrova nella previsione delle proprietà meccaniche in funzione del processo e qualità del prodotto come anche nel dialogo fra codici diversi. Esso offre la possibilità di visualizzare il reale comportamento meccanico dei pressocolati, e conseguentemente la capacità di validare e di predire correttamente la risposta in servizio dei pezzi pressocolati. Con maggior dettaglio, la natura innovativa può essere compresa conside-

rando alcuni aspetti rilevanti:

- a) È ben noto che la pressocolata è un processo in cui tutte le principali azioni di sviluppo sono mirate al controllo e alla diminuzione della quantità dei difetti [14-18];
  - b) È ben nota la mancanza d'informazione sugli "Standards", che forniscono dati puramente a titolo indicativo, sul comportamento meccanico sulle leghe per pressocolati in alluminio (senza contare il ruolo ricoperto dai difetti) [14-18];
  - c) È ben noto che la sfida alla sopravvivenza, per la pressocolata, è quella di offrire sempre più prodotti all'industria automobilistica e non solo, che chiede a sua volta, un continuo miglioramento ed aumento delle prestazioni e requisiti in servizio;
  - d) I difetti del pressocolato possono non essere un problema, a condizione che essi siano controllati e predetti in termini di tipologia, dimensione, distribuzione ed effetti sulle proprietà.
- Lo strumento tecnologico presentato si propone di soddisfare le continue richieste ed esigenze di maggiore qualità, maggiore volume, attualità, metodo di produzione economicamente vantaggioso, in particolar modo per il settore automotive. La capacità di integrare processi ingegneristici e manifatturieri, consentendo una più accurata e sicura progettazione dei componenti, in vista di una crescente richiesta di prestazioni in servizio, potrà far fronte alle moderne esigenze di efficienza economica (es. consumo energetico ridotto e riciclabilità), sicurezza (resistenza all'urto, analisi della rumore e delle vibrazioni) ed eco-sostenibilità.

## RINGRAZIAMENTI

Tale tecnologia è stata sviluppata sia mediante test sperimentali che computazionali, eseguiti in collaborazione con i produttori della lega, i laboratori universitari, le fonderie, gli utilizzatori finali del settore automotive, nell'ambito del Progetto di Ricerca Europeo NADIA (ovvero da EnginSoft, Raffineria Metalli Capra, Toolcast, CIE Automotive, MAGMA, DTG - Università di Padova).

## BIBLIOGRAFIA

- 1) E. Gariboldi, F. Bonollo, P. Parona: "Manuale della difettologia nei getti pressocolati - Handbook of defects in high pressure die-casting", Associazione Italiana di Metallurgia, 2010
- 2) S. Odorizzi: "NADIA: New Automotive components Designed for and manufactured by Intelligent processing of light Alloys", HTDC 2006, Vicenza
- 3) F. Grosselle, G. Timelli, F. Voltazza, E. Della Corte: "A new reference die for mechanical properties evaluation in die-casting", HTDC 2008
- 4) N. Gramegna: "Analisi dei fattori che concorrono al bilancio termico di uno stampo per pressocolata", 31° AIM, Nov. 2006
- 5) F. Bonollo, N. Gramegna, S. Odorizzi: "La pressocolata delle leghe di alluminio: simulazione numerica del processo" - Edimet, Giugno 1999
- 6) F. Bonollo, S. Odorizzi: "Numerical simulation of Foundry processes" - SGEeditoriali, Aprile 2001
- 7) N. Gramegna: "Automatic optimisation: it is possible", Pressocolata

- & Tecniche Fusorie, Giugno 2006
- 8) F. Bonollo, N. Gramegna, L. Onesti: "Ottimizzazione: uno strumento in più per la pressocolata", P&T, Settembre 2001
  - 9) N. Gramegna, P. Baumgartner, V. Kokot: "Capabilities of new multi-objective Casting Process Optimisation tool", IDEAL International Conference - 7th October 2005 - Lecce (Italy)
  - 10) Brach, Raymond M., Mechanical Impact Dynamics: Rigid Body Collisions, John Wiley & Sons, New York, 1991.
  - 11) Zukas, Jonas A.; Nicholas, T.; Swift, H. F.; Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., Impact Dynamics, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 1992.
  - 12) Asay J.R., Shahinpoor M. (eds) High pressure shock compression of solids, 1993.
  - 13) LS-DYNA Theory Manual, March 2006. Livermore Software Technology Cooperation.
  - 14) Akhtar et al: "A Comparative study of defects and mechanical properties in high pressure die cast and gravity die cast Aluminium alloys"; International Foundry Research, 2 (2009), 36-48
  - 15) G. Timelli, F. Bonollo: "Quality mapping of Aluminium alloy diecastings"; Metallurgical Science and Technology, 26-1 (2008), pp 2-8
  - 16) G. Timelli, F. Bonollo: "Quality mapping of Aluminium alloy diecastings"; Metallurgical Science and Technology, 26-1 (2008), pp 2-8
  - 17) M. Avalle et al.: "Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: A comparison between standard specimens and production components"; Int. J. Fatigue, 24 (2002), 1-9
  - 18) G. Timelli et al.: "The impact of defects on the quality of Aluminium alloys diecastings"; ATA - Ingegneria dell'autoveicolo, 62 (1/2) (2009), pp 12-19

## Abstract

### Die casting process optimisation to improve the component impact performance

#### Key words:

high pressure die casting, impact test, foundry defects, process optimization, mechanical properties, light alloy, design chain

The absorbed energy during impact test and the velocity reduction of the body are the reference diagram to evaluate the performance of the Al-alloy component under impact test. Tests and laboratory tools are sophisticated, expensive and the clamping system is specific for each component, but today the destructive tests represent the ideal and final approach to validate the casting, unless the CAE tools are enable to replace (even though partially) the real lab test. A new virtual design chain tool is an ambitious target because it needs a deeply research and understanding of factors to define the elasto-plastic behavior of the Al-alloy material. The objective is more challenging in case of high pressure die casting process where the local mechanical properties depend strongly on foundry defects rather than microstructure.

The European research NADIA project (New Automotive components Designed for and manufactured by Intelligent processing of light Alloys, Thematic priorities 3 - NMP, Contract N°: 026563-2) has been awarded as reference FP6 project in automotive sector to integrate the manufacturing process with mechanical response of light alloys. The basic research activity was related to secondary light alloys, trace element and foundry process parameters effects with the successive application of material models in the engineering application. With particular reference to one demonstrator component, the high pressure die casting "Rack&Pinion", an innovative correlation of defects (e.g. air inclusion, shrinkage porosity etc.) and mechanical properties has been implemented in MAGMASOFT simulation tool in order to transfer the realistic local ultimate tensile strength to LS-Dyna FEM code. The final impact simulation, taking into account the local mechanical properties and residual stress, has been compared with test results to validate the full integrated virtual approach.