

## STACAST: LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DI GETTI IN LEGA DI ALLUMINIO

F. Bonollo, E. Fiorese, G. Timelli, L. Arnberg, A.R. Adamane

*StaCast (New Quality and Design Standards for Aluminium Alloys Cast Products) è un progetto europeo dedicato alle fonderie dell'alluminio con l'obiettivo di sviluppare una nuova classificazione dei difetti strutturali nei getti e di definire dei limiti di accettabilità di questi difetti a seconda della destinazione finale prevista. Il raggiungimento di questo obiettivo aiuterà significativamente le fonderie a ridurre il costo della non-qualità, migliorando nel contempo il loro margine di competitività grazie al conseguimento di importanti vantaggi, per esempio nei costi dell'energia. StaCast ha condotto una vasta indagine tra le fonderie europee per conoscere le caratteristiche principali della loro produzione, in quale misura esse utilizzano gli Standard CEN, il bisogno di nuovi strumenti normativi riferiti ai difetti, alle proprietà meccaniche e alla progettazione meccanica di getti in lega d'alluminio. Questo articolo presenta i principali risultati di tale indagine, che ha coinvolto circa 80 aziende, e l'impostazione dei documenti normativi che sono stati elaborati sulla Classificazione dei Difetti e sul Potenziale Meccanico di getti in lega d'alluminio.*

**Parole chiave:** Leghe di Alluminio - Difetti ed Imperfezioni - Proprietà Meccaniche Statiche - Nuovi Standard

### INTRODUZIONE

StaCast (New Quality and Design Standards for Aluminium Alloys Cast Products, FP7-NMP-2012-CSA-6, Contratto n. 319188) è un progetto europeo dedicato alle fonderie dell'alluminio, che vede il coinvolgimento dell'Università di Padova (sede di Vicenza), dell'Università della Tecnica e dell'Economia di Aalen (Germania), dell'Università della Scienza e della Tecnologia di Trondheim (Norvegia), dell'Associazione Italiana di Metallurgia (Italia), dell'Assomet Servizi (Italia), e di FACE, Federazione dei Consumatori di Alluminio in Europa (Belgio).

La sfida del progetto StaCast è quella di contribuire a trasformare il settore europeo della fonderia di Alluminio in un settore basato sulla qualità e sull'efficienza, per mezzo dello sviluppo e dell'introduzione di due specifici Report Tecnici ufficialmente approvati dal CEN. Questi Report Tecnici riguardano aspetti che non sono ancora affrontati completamente nelle norma-

tive esistenti, cioè la Classificazione dei Difetti e le Proprietà Meccaniche Statiche delle leghe d'alluminio da fonderia.

Per raggiungere questi obiettivi, è stata condotta un'indagine preliminare coinvolgendo circa 60 fonderie, che rappresentano circa il 12% della produzione di getti in lega d'alluminio, e 20 fornitori. L'indagine mirava ad ottenere un quadro completo dell'approccio delle fonderie europee alla qualità dei prodotti, a verificare il grado di conoscenza e di applicazione delle esistenti normative CEN, e a identificare i più rilevanti bisogni di standardizzazione nel settore.

Questo articolo presenta i risultati principali dell'indagine, insieme alla struttura generale dei due nuovi Report Tecnici (sui Difetti e sul Potenziale Meccanico dei getti in lega d'alluminio), che sono stati approvati dal CEN nell'agosto 2014.

### INDAGINE SULLE FONDERIE EUROPEE DI ALLUMINIO

L'indagine si è basata su un questionario on-line strutturato in 6 sezioni:

- profilo aziendale;
- dati sulla produzione: produzione annua, processi, leghe, campi di applicazione dei getti;
- normative CEN già in uso;

- necessità di nuovi strumenti normativi e di indirizzo;
- tecniche usate per l'analisi dei difetti;
- difetti rilevati più frequentemente.

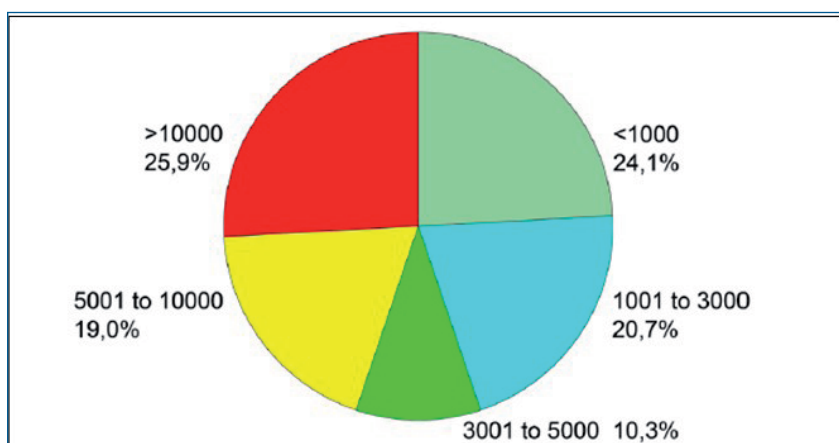
Il questionario è stato reso disponibile sul sito di StaCast ([www.stacast-project.org](http://www.stacast-project.org)). Più di 80 aziende hanno compilato il questionario: 58 fonderie, 11 fornitori di materiali e servizi, 2 produttori di stampi, 3 utenti finali, 8 università e centri di ricerca.

Le fonderie che hanno risposto al questionario rappresentano bene i due Paesi leader nella produzione di getti in lega d'alluminio: Germania (33 fonderie) e Italia (25 fonderie). Queste fonderie sono per la maggioranza (53.4%) piccole e medie imprese (SME), mentre le grandi industrie (IND) corrispondono al 46.6%.

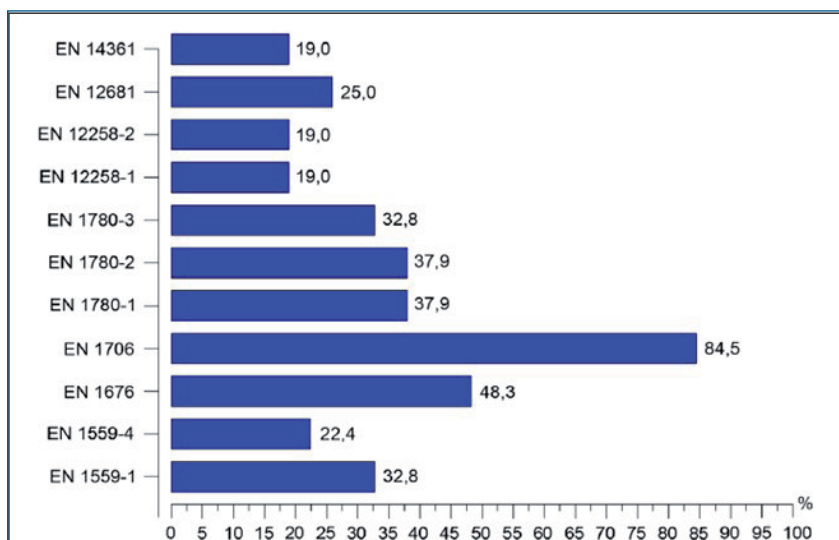
La maggior parte delle fonderie (69.0%) produce getti pressocolati (HPDC), mentre il 31% produce per colata in gravità e bassa pressione. Questa partizione è in accordo con la reale suddivisione della produzione europea di getti in lega d'alluminio (il 60-70% della produzione totale di solito è attribuita alla pressocolata). Quasi la metà delle fonderie (Figura 1), essendo SME, ha una produzione annua più bassa di 3000 ton (24.1% inferiore a 1000 ton/anno, 20.7% da 1000 a 3000 ton/anno). Dall'altro lato, una parte significativa delle fon-

**F. Bonollo, E. Fiorese, G. Timelli**  
Università di Padova (DTG),  
Vicenza (Italia)

**L. Arnberg, A.R. Adamane**  
Università di Trondheim (NTNU),  
Trondheim (Norvegia)



**Fig. 1 - Dati di produzione (ton/anno) delle fonderie che hanno risposto al questionario StaCast.**



**Fig. 2 - Conoscenza delle principali norme CEN delle fonderie che hanno risposto al questionario StaCast.**

derie (25.9%), essenzialmente IND, ha una produzione più alta di 10000 ton/anno. La produzione complessiva delle fonderie "StaCast" è di circa 375.000 ton/anno, che rappresenta circa il 12.5% della produzione annuale dell'UE (ciò conferma l'affidabilità dell'indagine compiuta).

La lega più diffusa è la EN AB 46000 (Al-Si9-Cu3(Fe)) utilizzata dal 58.6% delle fonderie, seguita dalla EN AB 43400 (Al-Mg-Si10(Fe)) utilizzata nel 37.9% delle fonderie. Quattro delle cinque leghe più utilizzate (EN AB 46000, EN AB 43400, EN AB 47100, EN AB 46100) sono leghe tipiche da pressocolata.

Quasi l'85% delle fonderie "StaCast" produce getti per applicazioni automotive, seguito da 34.5% per l'ingegneria meccanica, 25.8% per l'elettronica, e 10.3% per l'architettura e il design. In termini di componenti, le fonderie "StaCast" producono principalmente alloggiamenti e coperchi (29.3%), seguiti da componenti a parete sottile (20.7%), organi di sicurezza (19.0%) e blocchi motore (6.9%). Particolare attenzione è stata rivolta a verificare il grado di conoscenza e di applicazione delle normative. I risultati del sondaggio sono riassunti in Figura 2.

Le normative EN 1706 e EN 1676 (ri-

ferite alla composizione chimica delle leghe di Al da fonderia, alle proprietà e caratteristiche, ecc.) sono nelle prime posizioni (esse sono adottate ed applicate, rispettivamente, dall'84.5% e dal 48.3% delle fonderie). È ancora basso, dall'altro lato, il livello di conoscenza, adozione ed utilizzo delle normative sulle condizioni tecniche di fornitura dei getti (EN 1559-1 e EN 1559-4) e sui termini generali e le definizioni delle leghe di Al (EN 12258-1 e EN 12258-2). Questi standard sono adottati ed utilizzati da una percentuale globale di fonderie che va dal 22.2% al 33.3%. Alcune norme specifiche in materia di campionamento dal metallo fuso (EN 14361) e sul controllo radiografico (EN 12681), che sono cruciali per garantire la qualità dei prodotti in lega di alluminio, sono adottate ed utilizzate solo dal 19% e dal 25.9% delle fonderie.

In futuro verranno condotte molte attività di disseminazione di questi risultati allo scopo di migliorare la "penetrazione" delle normative nelle fonderie europee, che producono getti in lega di alluminio.

Per quanto riguarda i più rilevanti bisogni di standardizzazione delle aziende europee coinvolte come fonderia o come fornitore nella supply chain dei getti in lega di alluminio, si è verificato l'interesse verso la messa a punto di Report Tecnici CEN relativi a

- classificazione dei difetti;
- proprietà meccaniche delle leghe d'alluminio da fonderia;
- proprietà meccaniche dei getti in lega d'alluminio;
- progettazione di getti in lega di alluminio.

Interessante si è rivelata l'analisi delle tipologie di difetti maggiormente frequenti. I risultati di questa elaborazione sono rappresentati in Figura 3. In sintesi:

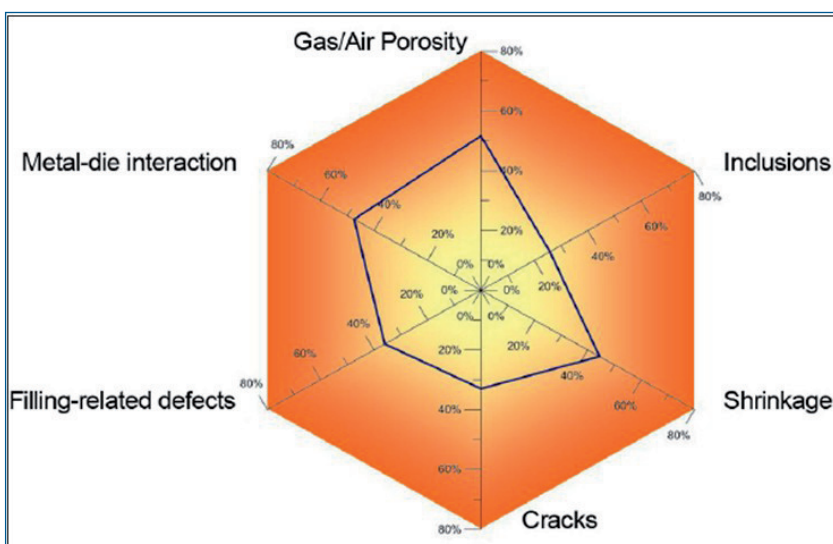
- la porosità da gas/aria è riscontrata con frequenza significativa;
- i difetti da interazione metallo-stampo si rilevano in alcuni casi, ma non frequentemente;
- il ritiro volumetrico si incontra in alcuni casi, ma non frequentemente;
- i difetti di riempimento sono riscontrati poco più che occasionalmente;

- le cricche vengono riscontrate occasionalmente;
- le inclusioni sono rilevate molto saltuariamente.

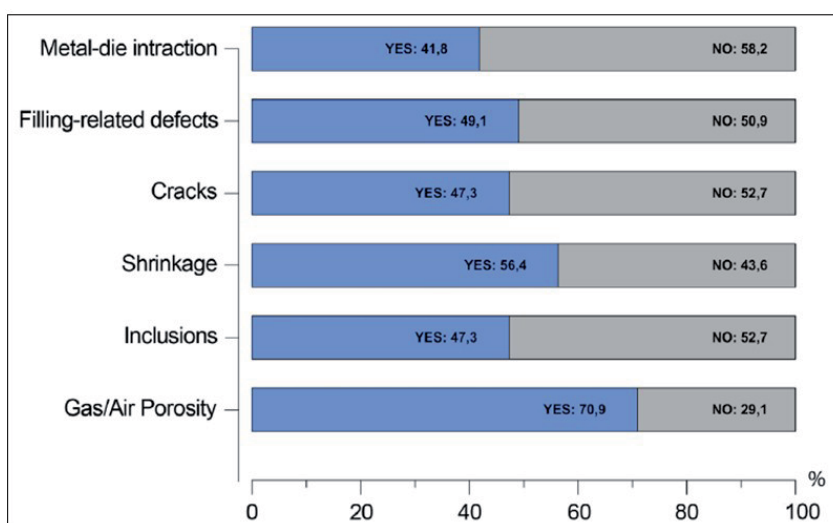
Tale “graduatoria” sembra in buon accordo con la comune percezione sui difetti: la porosità da gas/aria, i difetti di interazione metallo-stampo ed il ritiro volumetrico sono fenomeni “fisiologici” associati alla fonderia, mentre i difetti di riempimento e le cricche sono probabilmente associati ad una progettazione errata degli stampi e dei sistemi di colata; le inclusioni sono il difetto meno investigato.

È evidente che la genesi dei difetti è strettamente correlata allo specifico processo adottato. Per questa ragione, è utile comparare la situazione, in termini di frequenza dei difetti, delle fonderie di pressocolata (HPDC) con quella delle fonderie in gravità o in bassa pressione (LPDC). Infatti, in pressocolata i difetti significativamente più frequenti sono quelli da interazione metallo-stampo e la porosità da gas/aria. Se si considerano invece i processi di colata in gravità e di colata in bassa pressione, è dominante la presenza di problematiche di ritiro volumetrico e di porosità da gas/aria.

Inoltre, sono state acquisite informazioni circa gli approcci (sul 100% della produzione o su base statistica) ed il grado di utilizzo delle varie tecniche per rilevare ognuna delle classi di difetti sopra menzionate (porosità da gas/aria, ritiro, difetti di riempimento, cricca, inclusioni, difetti di interazione metallo-stampo), quali controllo visivo, ispezione a raggi X, test distruttivi, tenuta in pressione, densità, liquidi penetranti, ultrasuoni. Per tali classi di difetti, è stato chiesto se questi sono anche misurati o quantificati (e non semplicemente rilevati). Dalle risposte ricevute (Figura 4), appare chiaro che la quantificazione è effettuata (per la maggior parte delle fonderie), quando si ha a che fare con porosità da gas/aria (70.9%) o ritiro (56.4%). Per questi difetti, la rilevazione è realizzata per mezzo dei raggi X (nel 70-80% dei casi), associandola, grazie ai moderni software di analisi di immagine, a valutazioni



**Fig. 3 - Frequenza dei difetti stimata da tutte le fonderie che hanno risposto al questionario StaCast.**



**Fig. 4 - Grado di misura/quantificazione dei difetti.**

quantitative. Inoltre, questi tipi di difetti possono essere accettati nei getti nei casi in cui essi rimangano sotto una soglia precedentemente definita (in questo senso, in accordo alla definizione della Norma EN 12258-1, essi possono essere considerati “imperfezioni”, piuttosto che “difetti”). I difetti da interazione metallo-stampo, i difetti di riempimento e le cricche sono principalmente posizionati sulla superficie dei getti, e vengono fondamentalmente individuati tramite ispezione visiva, che decreta se il getto è accettabile oppure no. In que-

sti casi, la misura/quantificazione del difetto è meno strategica (condotta rispettivamente sul 41.8%, 49.1% e 47.3% delle fonderie).

Le inclusioni possono essere rilevate principalmente attraverso la metallografia, cioè su base statistica; il bisogno di misurarle/quantificarle è probabilmente associato a specifici requisiti dei getti, e quindi condotto solo dal 47.3% delle fonderie.

## IL NUOVO REPORT TECNICO CEN SULLA CLASSIFICAZIONE DI DIFETTI ED IMPERFEZIONI NEI GETTI

I difetti vengono intrinsecamente generati nei processi di fonderia per varie ragioni. Le proprietà finali ed il comportamento in esercizio dei getti dipendono sempre dalle caratteristiche microstrutturali e dai difetti: sia la microstruttura che i difetti sono il risultato delle varie fasi del processo, delle proprietà della lega impiegata e della progettazione di stampi e attrezzature. Il potenziale della pressocolata e, più in generale, della colata in stampo permanente sarà completamente sfruttato solo quando il livello di qualità dei prodotti potrà essere correttamente valutato e poi ottimizzato. A tal proposito, l'analisi dei difetti permette alla fonderia un efficace monitoraggio della qualità dei propri prodotti in relazione ad uno standard pre-definito. Inoltre, l'analisi dei difetti fornisce alla fonderia utili correlazioni tra il tipo/distribuzione dei difetti e la loro origine, affinché sia possibile apportare delle modifiche al processo per migliorare la qualità. Il primo strumento che deve essere messo a disposizione è una base comune di linguaggio, cioè una terminologia e una classificazione dei difetti, che supporti le fonderie nell'affrontare con maggiore dimestichezza e abilità il problema, con il fine ultimo di garantire qualità e affidabilità dei prodotti.

A partire dagli approcci più diffusi per la classificazione dei difetti proposti in letteratura o attualmente adottati dalle fonderie<sup>1-9</sup>, e approfittando di una precedente indagine di 2 anni condotta dall'Associazione Italiana di Metallurgia, con il coinvolgimento di circa 50 fonderie di lega d'alluminio<sup>1</sup>, il progetto StaCast ha suggerito un nuovo approccio di classificazione dei difetti basato su 3-livelli (Tabelle 1, 2 e 3):

- morfologia/posizione dei difetti (interni, esterni, geometrici);
- origine metallurgica dei difetti (per esempio porosità da gas, ritiro di solidificazione, ecc.);
- tipo specifico di difetti (lo stesso fenomeno metallurgico può generare diversi difetti).

| Livello I                                              | Livello II |                                                | Livello III |                               |
|--------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|
| <b>A</b><br><br><b>Difetti ed imperfezioni interni</b> | A1         | Difetti ed imperfezioni da ritiro              | A1.1        | Macro-porosità                |
|                                                        |            |                                                | A1.2        | Porosità inter-dendritica     |
|                                                        |            |                                                | A1.3        | Porosità planare              |
|                                                        | A2         | Difetti ed imperfezioni da gas                 | A2.1        | Porosità da aria intrappolata |
|                                                        |            |                                                | A2.2        | Porosità da idrogeno          |
|                                                        |            |                                                | A2.3        | Porosità da umidità residua   |
|                                                        |            |                                                | A2.4        | Porosità da lubrificante      |
|                                                        | A3         | Difetti ed imperfezioni di riempimento         | A3.1        | Giunzione                     |
|                                                        |            |                                                | A3.2        | Sfogliatura                   |
|                                                        |            |                                                | A3.3        | Goccia fredda                 |
|                                                        | A4         | Fasi non desiderate                            | A4.1        | Inclusione                    |
|                                                        |            |                                                | A4.2        | Struttura non desiderata      |
|                                                        | A5         | Difetti ed imperfezioni da contrazione termica | A5.1        | Cricca                        |
|                                                        |            |                                                | A5.2        | Cricca a caldo                |

**Tab. 1 - Classificazione dei difetti e delle imperfezioni interni.**

| Livello I                                                   | Livello II |                                                       | Livello III |                              |
|-------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|
| <b>B</b><br><br><b>Difetti ed imperfezioni superficiali</b> | B1         | Difetti ed imperfezioni da ritiro                     | B1.1        | Ricalo                       |
|                                                             | B2         | Difetti ed imperfezioni da gas                        | B2.1        | Bolla                        |
|                                                             |            |                                                       | B2.2        | Punta di spillo              |
|                                                             | B3         | Difetti ed imperfezioni di riempimento                | B3.1        | Giunzione e vortice          |
|                                                             |            |                                                       | B3.2        | Sfogliatura                  |
|                                                             |            |                                                       | B3.3        | Goccia fredda                |
|                                                             | B4         | Fasi non desiderate                                   | B4.1        | Depositi superficiali        |
|                                                             |            |                                                       | B4.2        | Contaminazione o inclusione  |
|                                                             | B5         | Difetti ed imperfezioni da contrazione termica        | B5.1        | Cricca                       |
|                                                             |            |                                                       | B5.2        | Cricca a caldo               |
|                                                             | B6         | Difetti ed imperfezioni da interazione metallo-stampo | B6.1        | Erosione                     |
|                                                             |            |                                                       | B6.2        | Metallizzazione              |
|                                                             |            |                                                       | B6.3        | Crettature da fatica termica |
|                                                             |            |                                                       | B6.4        | Segno di estrazione          |
|                                                             |            |                                                       | B6.5        | Corrosione dello stampo      |

**Tab. 2 - Classificazione dei difetti e delle imperfezioni superficiali.**

| Livello I                                                 | Livello II |                       | Livello III |                  |
|-----------------------------------------------------------|------------|-----------------------|-------------|------------------|
| <b>C</b><br><br><b>Difetti ed imperfezioni geometrici</b> | C1         | Mancanza di materiale | C1.1        | Getto incompleto |
|                                                           | C2         | Eccesso di materiale  | C2.1        | Sbavatura        |
|                                                           | C3         | Fuori tolleranza      | C3.1        | Getto deformato  |

**Tab. 3 - Classificazione dei difetti e delle imperfezioni geometrici.**

Il livello I è basato sulla morfologia/posizione dei difetti, con riferimento alle tecniche di analisi idonee alla loro rilevazione (ispezioni visive e controlli che comprendono l'intero volume del materiale): in tal senso si distinguono i difetti interni da quelli esterni (o superficiali). I difetti sub-superficiali (ossia così prossimi alla superficie del getto da incidere sul suo aspetto esteriore e rilevabili con tecniche convenzionali di indagine della superficie), sono considerati difetti superficiali. Infine, i difetti geometrici si riferiscono alla forma del getto in termini di dimensioni e tolleranze.

Il livello II è focalizzato principalmente sull'origine metallurgica dei difetti. I difetti sono raggruppati in varie classi rispetto alla loro origine metallurgica generale:

- difetti dovuti alla presenza di gas (difetti da gas);
- difetti causati dalla contrazione volumetrica del materiale durante la solidificazione (difetti da ritiro);
- difetti dovuti alla contrazione termica vincolata dal metallo precedentemente solidificato o dallo stampo (difetti da contrazione termica);
- difetti legati al riempimento inadeguato della cavità dello stampo (difetti di riempimento);
- difetti da interazione metallo/stampo;
- difetti legati alla presenza di fasi non opportune (fasi non desiderate), che si formano in seguito all'interazione del metallo con l'ambiente circostante durante la fusione, la colata, il riempimento o l'estrazione dallo stampo.

Come precedentemente detto, la conoscenza dell'origine metallurgica può fornire dei punti di partenza per l'applicazione di azioni correttive (inclusi i parametri di processo).

Il livello III identifica i tipi specifici di difetti. Di solito, il termine utilizzato per descrivere un particolare tipo di difetto consente una migliore esplicitazione dell'origine metallurgica del difetto stesso, che è stato preliminarmente individuato nel livello precedente.

Questa classificazione dei difetti è

ibrida e multi-livello, come mostrato schematicamente nelle Tabelle 1, 2 e 3. La proposta di classificazione fa riferimento solo ai difetti metallurgici nei getti pressocolati e colati in stampo permanente. I difetti strettamente connessi alle operazioni di movimentazione, finitura, lavorazione meccanica successive all'estrazione dallo stampo sono esclusi dalla presente classificazione, nonostante essi possano causare lo scarto del prodotto. In questo modo, la gamma di difetti non diventa eccessivamente ampia. Questa classificazione è stata strutturata come Report Tecnico CEN, includendo una breve descrizione di ogni difetto ed imperfezione. Specifici

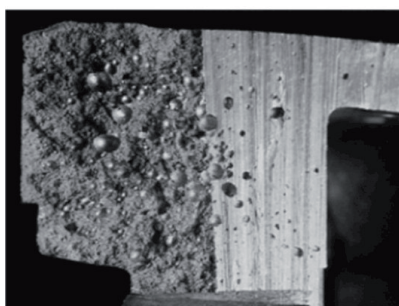
## ***Difetti causati da gas*** ***Porosità da intrappolamento d'aria***

### *Definizione*

La porosità da intrappolamento d'aria è formata da piccole cavità dovute a bolle d'aria intrappolate all'interno del metallo liquido.

### *Morfologia*

Le porosità da intrappolamento d'aria



**Fig. 5 - Esempio di difetto interno: Porosità da intrappolamento d'aria<sup>[10]</sup>.**

si presentano come delle cavità sferiche o ellittiche caratterizzate da superfici relativamente lisce sulle quali si può trovare un sottile strato di ossido (dovuto all'interazione ad alta temperatura tra l'aria e il metallo liquido).

ci allegati raccolgono definizioni più estese (con riferimenti alla morfologia e all'origine metallurgica), figure o schemi rappresentativi, e metodi di ispezione possibili (alcuni esempi sono riportati nelle Figure 5-9). È stata anche riportata la traduzione della terminologia dei difetti ed imperfezioni dall'inglese all'italiano, al francese, al tedesco e allo spagnolo. Per ogni difetto ed imperfezione, sono anche menzionati la tipica dimensione e le tecniche di rilevazione più importanti.

Il Report Tecnico è stato formalmente approvato dal CEN (TC 132 - Aluminium and Aluminium alloys) nell'agosto 2014.

La distribuzione finale delle cavità all'interno del getto dipende dal cammino del metallo. La dimensione di una porosità da intrappolamento d'aria varia nel range 10-2000 µm. Questo difetto può essere rilevato per mezzo di ispezioni radiografiche o ultrasoniche e per mezzo di test metallografici.

### *Origine metallurgica*

La porosità da intrappolamento d'aria è il difetto più frequente trovato nei getti pressocolati. Le bolle d'aria si possono formare nella vena di liquido turbolento all'interno della camera del pistone, nei canali di riempimento o nella cavità dello stampo.

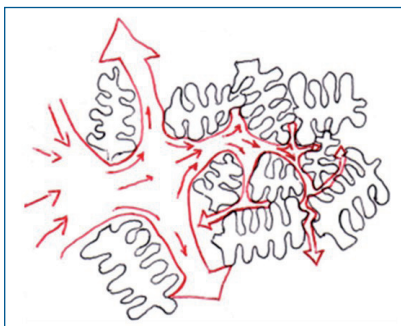
## ***Difetti dovuti al ritiro volumetrico*** ***Ritiro inter-dendritico***

### *Definizione*

La porosità interdendritica consiste in una serie di cavità localizzate nelle regioni interdendritiche, e si forma quando l'afflusso di metallo liquido in queste regioni è inadeguato a bilanciare il ritiro volumetrico durante la solidificazione.

### *Morfologia*

La porosità interdendritica è caratte-



**Fig. 6 - Esempio di difetto interno: Ritiro inter-dendritico <sup>[10]</sup>.**

rizzata da una rete di braccia lunghe e strette. La dimensione di una porosità interdendritica varia tra 10-150  $\mu\text{m}$ . Questo difetto può essere rilevato per mezzo di ispezioni radiografiche o ad ultrasuoni e per mezzo di test metallografici.

#### *Origine metallurgica*

La formazione della porosità interdendritica è favorita da un'ampia mushy zone, ossia nel caso di ampi intervalli di solidificazione e bassi gradienti di temperatura (cioè nelle regioni che solidificano alla fine in getti a grosso spessore). La porosità interdendritica può costituire un cammino preferenziale per i gas e per la propagazione della cricca, e quindi risulta deleteria per la tenuta a pressione. Questo difetto è presente sia in pressocolata che nella colata in stampo permanente.

### **Difetti legati al riempimento Sfogliatura**

#### *Definizione*

Una sfogliatura è un tipico difetto superficiale, ma in alcuni casi può anche essere considerato come difetto interno al getto. La sfogliatura è una sorta di sottile strato metallico (pelle) con una microstruttura diversa rispetto al materiale che la circonda e parzialmente separata da un film di ossido.

#### *Morfologia*

Questo difetto è formato da uno strato metallico sottile, che presenta una



**Fig. 7 - Esempio di difetto superficiale: Sfogliatura <sup>[10]</sup>.**

superficie di separazione dal resto del materiale parallela alla superficie del componente con adesione imperfetta e microstruttura più fine. Questo difetto presenta dimensioni variabili e può essere rilevato attraverso ispezioni ad ultrasuoni e test metallografici.

#### *Origine metallurgica*

La sfogliatura si forma quando il metallo entra in contatto con la superficie dello stampo e si raffredda più velocemente delle regioni circostanti. Questo tipo di difetto può essere rilevato sia in pressocolata sia nella colata in stampo permanente.

### **Difetti da interazione metallo/stampo Metallizzazione**

#### *Definizione*

Come per altri difetti da interazione metallo/stampo, l'origine metallurgica del danneggiamento dello stampo (metallizzazione) si riflette nel nome del difetto sul getto.

#### *Morfologia*

La metallizzazione causa rugosità superficiale o mancanza localizzata di materiale sul getto. Lo spessore del difetto di metallizzazione varia nel range 1-200  $\mu\text{m}$ . Questo difetto può essere rilevato per mezzo di ispezioni visive e test metallografici.

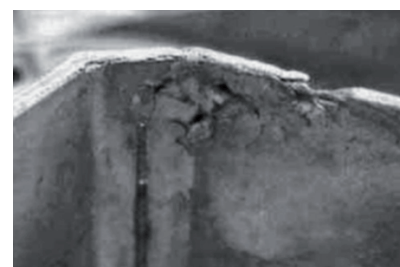


**Fig. 8 - Esempio di difetto superficiale: Metallizzazione <sup>[10]</sup>.**

#### *Origine metallurgica*

L'origine metallurgica della metallizzazione è la formazione di fasi intermetalliche sulla superficie dello stampo e la successiva adesione della lega d'alluminio su di esse. La metallizzazione avviene spesso in quelle regioni dello stampo esposte al metallo liquido ad alte temperatura e velocità di flusso. La metallizzazione può anche avvenire sulle zone dello stampo soggette a precedente fatica termica o erosione. Questo tipo di difetto può essere rilevato più frequentemente in pressocolata a causa dell'alta pressione ed alta velocità del metallo durante il riempimento dello stampo.

### **Difetto da mancanza di materiale Getto incompleto**



**Fig. 9 - Esempio di difetto geometrico: Getto incompleto <sup>[10]</sup>.**

#### *Definizione*

Un getto incompleto presenta una locale mancanza di materiale rispetto alla geometria della cavità dello stampo.

#### *Morfologia*

La mancanza di materiale può essere dell'ordine di parecchi mm o cm.

Questo difetto può essere rilevato per ispezione visiva.

## Origine metallurgica

A causa della viscosità troppo alta, una porzione del fronte di metallo può fermarsi prima che la cavità dello stampo sia completamente riempita. Questo tipo di difetto può essere rilevato sia in pressocolata che in colata in gravità.

## IL NUOVO REPORT TECNICO CEN SUL POTENZIALE MECCANICO DELLE LEGHE AL-SI DA FONDERIA

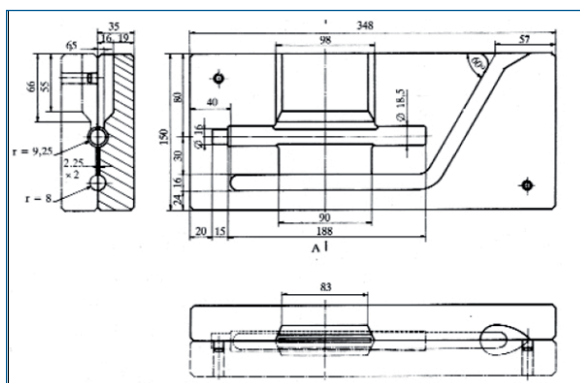
La normativa EN 1706 (Alluminio e sue leghe – Getti – Composizione chimica e proprietà meccaniche) mette in evidenza che

- per le leghe pressocolate, “le proprietà meccaniche sono molto dipendenti dai parametri di iniezione e le proprietà date sono solo indicative”; i valori dati “non sono valori tipici, ma sono i minimi valori che possono essere ottenuti da provini di test colati separatamente in pressione con area in sezione di 20,0 mm<sup>2</sup> e un tipico spessore di 2,0 mm”; comunque, “provini di test colati in pressione non sono normalmente prodotti” e “testare il getto intero con carichi che riflettono le condizioni di servizio previste è più significativo”;
- per altri processi (colata in bassa pressione e gravità) “il progetto esatto dei provini di test dovrebbe essere accordato tra fornitore e cliente” e “l’uso delle regole e delle normative esistenti è raccomandato finché uno Standard europeo appropriato non sarà pubblicato”; inoltre, “i campioni di test colati separatamente hanno un’utile funzione per il controllo della qualità della lega; comunque, i valori ottenuti dai getti potrebbero differire dai minimi valori specificati nelle tabelle a causa di variazioni nella struttura derivanti da differenze nello spessore della sezione e nella qualità”.

Attualmente, l’ottenimento di prodotti colati in lega d’alluminio di elevata qualità è fortemente richiesto dagli utilizzatori finali ed è la forza motri-

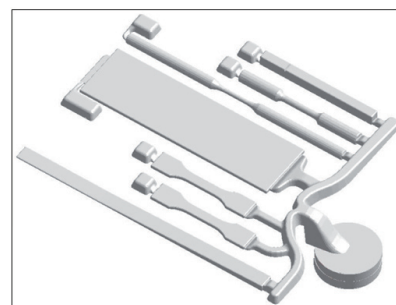
ce per l’innovazione nel campo della fonderia. Questo obiettivo può essere perseguito se i difetti nei getti sono minimizzati e la microstruttura è ottimizzata, tenendo in considerazione tutte le principali variabili legate alla lega usata e alle condizioni di processo. Dal punto di vista della progettazione, bisogna però aver presente che la valutazione delle proprietà meccaniche nei prodotti in lega di alluminio è una questione rilevante, che non è pienamente trattata nelle normative internazionali esistenti. In altri termini, la progettazione degli attuali getti in lega d’alluminio ad alte prestazioni non può essere basata su valori delle proprietà meccaniche date “solo in modo indicativo”.

La progettazione avanzata e gli strumenti ingegneristici attualmente disponibili per ottimizzare il processo permettono un cambio radicale in questo approccio. Il potenziale meccanico reale delle leghe di alluminio da fonderia deve essere accuratamente definito. Il progetto StaCast ha elaborato un nuovo Report Tecnico CEN nel quale è introdotto e descritto il potenziale meccanico statico (in termini di carico di rottura, carico di snervamento e allungamento), che può essere ottenuto dalle leghe Al-Si colate in alta pressione, bassa pressione e gravità (processi a stampo permanente). Le proprietà meccaniche sono misurate su provini di test prodotti con stampi di riferimento e

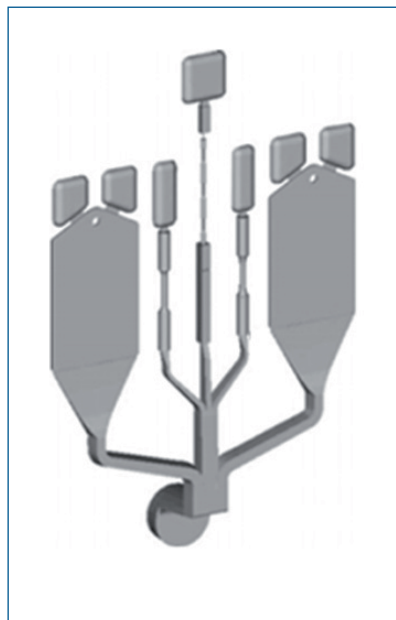


parametri di processo ottimizzati, opportunamente ideati per valutare il potenziale meccanico delle leghe da fonderia<sup>11-17</sup>.

I getti di riferimento proposti per le leghe Al-Si da pressocolata sono riportati in Figura 10 (costruito e te-



**Fig. 10 - Getto di riferimento per la pressocolata #1<sup>13</sup>.**

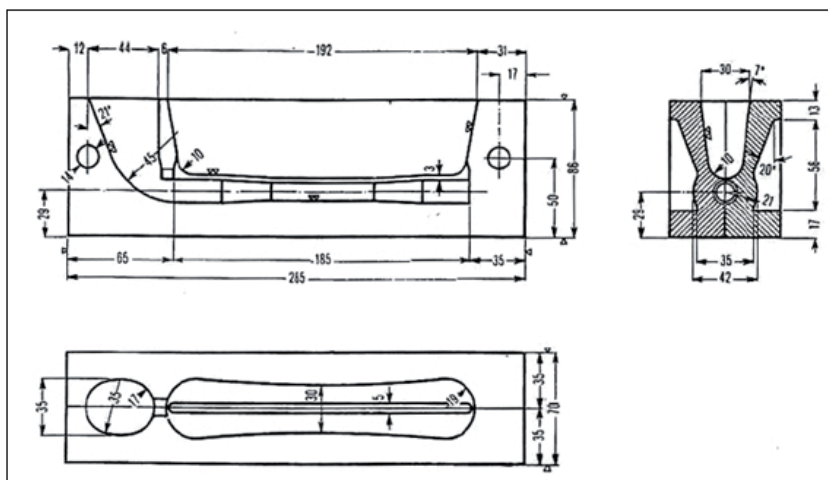


**Fig. 11 - Getto di riferimento per la pressocolata #2<sup>12</sup>.**

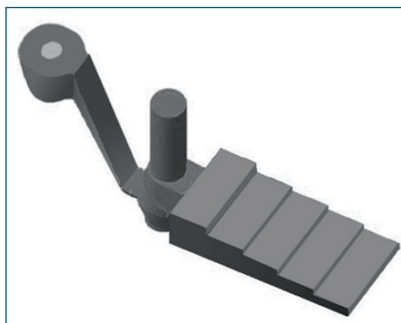
**Fig. 12 - Getto di riferimento per la colata in gravità #1<sup>17</sup>.**

stato nell’ambito del progetto NADIA, EU IPs-SMEs, Contratto n. 026563-2, 2006-2010) e in Figura 11 (costruito e testato presso Hydro in collaborazione con NTNU – Università di Trondheim).

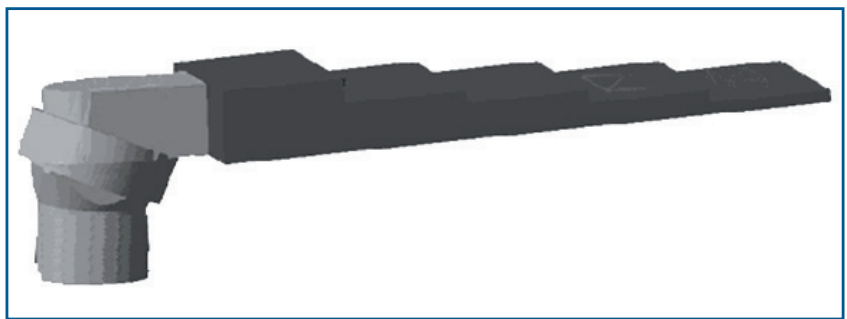
Gli stampi di riferimento proposti per



**Fig. 13 - Getto di riferimento per la colata in gravità #2<sup>17</sup>.**



**Fig. 14 - Getto di riferimento per la colata in gravità #3<sup>14,16</sup>.**



**Fig. 15 - Getto di riferimento per la colata in bassa pressione #1<sup>14,16</sup>.**

| Lega                                  | Condizioni di processo<br>(pressocolata)                                                                                         | Potenziale meccanico    |                            |           |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|
|                                       |                                                                                                                                  | R <sub>m</sub><br>[MPa] | R <sub>p0.2</sub><br>[MPa] | A<br>[%]  |
| Al-Si9-Cu3-Mg0.3-<br>Fe0.8-Mn0.3      | Velocità al gate: 51 m/s;<br>Tempo di riempimento: 9.7 ms;<br>Temperatura di colata: 690 °C<br>CAMPIONI PIATTI<br>Spessore: 3 mm | 309 ± 6                 | 163 ± 1                    | 3.6 ± 0.3 |
|                                       | CAMPIONI TONDI<br>Diametro: 6 mm                                                                                                 | 342 ± 8                 | 168 ± 6                    | 5.1 ± 0.4 |
| Al-Si11-Cu2-<br>Mg0.2-Fe0.9-<br>Mn0.2 | Velocità al gate: 51 m/s;<br>Tempo di riempimento: 9.7 ms;<br>Temperatura di colata: 690 °C<br>CAMPIONI PIATTI<br>Spessore: 3 mm | 312 ± 2                 | 153 ± 1                    | 3.5 ± 0.1 |
| Al-Si12-Cu1(Fe)                       | Velocità al gate: 51 m/s;<br>Tempo di riempimento: 9.7 ms;<br>Temperatura di colata: 690 °C<br>CAMPIONI PIATTI<br>Spessore: 3 mm | 283 ± 2                 | 137 ± 1                    | 3.5 ± 0.1 |
|                                       | CAMPIONI TONDI<br>Diametro: 6 mm                                                                                                 | 315 ± 7                 | 131                        | 7.1 ± 0.5 |

**Tab. 4 - Potenziale meccanico di alcune leghe Al-Si pressocolate (stampo di riferimento per la pressocolata #1)<sup>13,15</sup>.**

la colata in gravità delle leghe Al-Si sono riportati nelle Figure 12, 13 e 14 (costruito e testato presso Hydro in collaborazione con NTNU – Università di Trondheim).

Il getto di riferimento per la colata in bassa pressione di leghe Al-Si è mostrato in Figura 15 (costruito e testato presso Hydro in collaborazione con NTNU – Università di Trondheim).

Il potenziale meccanico della lega deve essere ottenuto dai test meccanici condotti su provini ricavati dai getti di riferimento. Il potenziale meccanico va indicato per mezzo di una tabella nella quale sono riportati i valori di  $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  e  $A\%$ , insieme a tutte le informazioni disponibili sulla com-

posizione chimica della lega, sui parametri di processo e sulla procedura di test. Esempi di potenziale meccanico di leghe Al-Si da pressocolata sono riportati in Tabella 4.

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Per le fonderie europee, la possibilità di sopravvivere alla crisi economica è strettamente legata alla loro competitività, efficienza ed innovazione. Nei prossimi anni, un ruolo chiave sarà certamente giocato dalla disponibilità di normative, Report Tecnici e strumenti di progettazione per il miglioramento dell'efficienza e della competitività lungo la catena di progettazione e di produzione di getti in lega di alluminio. I concetti di integrazione multi-disciplinare e di effettiva interazione devono essere trasferiti ed "assorbiti" da chiunque operi nella catena di fornitura. La messa in opera di queste azioni permetterà alle

fonderie di sviluppare un più maturo ed efficiente approccio verso i grandi clienti finali.

L'indagine e i due Report Tecnici descritti in questo articolo, ufficialmente approvati dal CEN nell'agosto 2014, forniranno un aiuto importante ai progettisti meccanici nella scelta delle leghe e nella progettazione di componenti in lega di alluminio.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il supporto finanziario dei progetti europei StaCast (FP7-NMP-2012-CSA-6, Contratto n. 319188) e MUSIC (FP7-FoF-ICT-2011.7.1, Contratto n. 314145).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] F. BONOLLO, E. GARIBOLDI, P. PARONA, Handbook of defects in high pressure diecastings, Associazione Italiana di Metallurgia (AIM), Milano (2010).
- [2] J. CAMPBELL, Complete Casting Handbook - Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design Castings, 1st edn Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann (2011).
- [3] W.G. WALKINGTON, Die Casting defects - Causes and solutions, North American Die Casting Association, (1997).
- [4] M.C. FLEMINGS, Solidification Processing, Mc Graw Hill, New York (1974).
- [5] ASM Metals Handbook, 10th ed. vol. 15 Casting, ASM - Metals Park, Ohio (1990).
- [6] E. DI RUSSO, Atlante Metallografico delle leghe di alluminio da fonderia, Edimet, Brescia (1991).
- [7] J.R. BROWN, Non-ferrous foundryman's handbook, Butterworth, Oxford (1999).
- [8] American Foundrymen's Society, International atlas of casting defects 81-87, (1999).
- [9] F. BONOLLO, S. ODORIZZI, Numerical Simulation of Foundry Processes, SGE, Padova (2001).
- [10] Aluminium alloy castings: the EU StaCast guide to defects classification, mechanical potential and design issues", Assomet Servizi Srl, Associazione Italiana di Metallurgia (AIM), (2014).
- [11] C. DØRUM, H.I. LAUKLI, O.S. HOPPERSTAD, M. LANGSETH, Structural behaviour of Al-Si die-castings: experiments and numerical simulations, European Journal of Mechanics A/Solids 28 1-13 (2009).
- [12] G. TIMELLI, O. LOHNE, L. ARNBERG, H.I. LAUKLI, Effect of solution heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a die-cast AlSi7-MgMn alloy, Metallurgical and Materials Transactions A 39A 1747-1758 (2008).
- [13] G. TIMELLI, S. FERRARO, F. GROSSELLE, F. BONOLLO, F. VOLTAZZA, L. CAPRA, Mechanical and microstructural characterization of high-pressure die-cast Al alloys, La Metallurgia Italiana No.1 5-17 (2011).
- [14] S. AKHTAR, G. TIMELLI, F. BONOLLO, L. ARNBERG, M. DI SABATINO, A comparative study of defects and mechanical properties in high-pressure die-cast and gravity die-cast aluminium alloys, International Foundry Research/Giessereiforschung 61 No.2 2-14 (2009).
- [15] F. GROSSELLE, G. TIMELLI, F. BONOLLO, Doe applied to microstructural and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys for automotive applications, Materials Science and Engineering A 527 3536-3545 (2010).
- [16] S. AKHTAR, D. DISPINAR, L. ARNBERG, M. DI SABATINO, Effect of hydrogen content, melt cleanliness and solidification conditions on tensile properties of A356 alloy, International Journal of Cast Metals Research 22 No.1-4 22-25 (2009).
- [17] C. PANSERI, Manuale di fonderia dell'alluminio, Hoepli, Milano (1966).