

**QUALITÀ**

# LA DIAGNOSI DEI DIFETTI METALLURGICI

UN'INTRODUZIONE ALLE TECNICHE E PROCEDURE D'INDAGINE  
PER COMPRENDERE NATURA, ORIGINE E RIMEDI  
DEI DIFETTI NEI GETTI DI FONDERIA - PRIMA PARTE

Gabriele Ceselin, CEO & GM AQM srl - Provaglio d'Iseo (BS) - [www.aqm.it](http://www.aqm.it)

**L**ottenimento di getti da fonderia integri, d'adeguate prestazioni ed affidabili nel tempo, è il desiderio d'ogni fonderia e l'aspettativa minima d'ogni utilizzatore di questi prodotti. Tuttavia, la colata di un getto, indipendentemente dalla tecnologia produttiva impiegata e dalla natura della lega lavorata, è un processo di trasformazione metallurgica tra i più complessi per la straordinaria concomitanza di variabili di processo, di progettazione e d'esercizio. L'incorrere in casi d'insuccesso dovuti a cedimenti in esercizio dei getti o in scarti ancor prima dell'impiego degli stessi è cosa comune e frequente.

La comprensione della natura e dell'origine dei difetti, cedimenti o anomalie è un'attività fondamentale per chi debba risolvere in modo sistematico un problema e migliorare la qualità e le performance dei prodotti risultati critici; tale comprensione coinvolge il prezioso lavoro del diagnosta che, similmente ad un medico, è chiamato a raccogliere molteplici informazioni, numerosi risultati d'analisi, esami e prove, calcoli e simulazioni ma, soprattutto, ad un lavoro di sintesi che non può prescindere da un'adeguata ed approfondita conoscenza dei processi produttivi, della metallurgia delle leghe esaminate e dei meccanismi di cedimento o danneggiamento prima, durante o dopo un esercizio del getto.

### **Le risorse nella diagnosi di difetto dei getti**

Due sono essenzialmente i fattori chiave che assicurano il successo di una diagnosi di difetto (nota anche come failure analysis) ovvero:

- la competenza e l'esperienza del diagnosta e del suo team di analisti;
- la disponibilità di strumenti d'indagine adeguati, aggiornati ed affidabili.

Con particolare riferimento all'ambito della fonderia, il diagnosta dovrà avere profonda conoscenza della metallurgia, dei processi fusori, dei fenomeni collegati alla solidificazione e raffreddamento dei metalli, dei trattamenti termici e delle tecnologie specifiche di fusione e colata dei getti (in sabbia, a gravità in conchiglia, in pressofusione, ecc.). Questa conoscenza metallurgico-tecnologica dovrà completarsi con quella sui meccanismi, semplici e complessi, che portano tipicamente al cedimento o scarto di un getto. Poiché la diagnosi di difetto s'occupa indistintamente di un insuccesso, sia esso emergente in esercizio o nel corso del processo produttivo, ancor prima della messa in servizio, si comprende come la natura e complessità delle cause che portano all'insuccesso non sempre risiedano in fattori di natura metallurgica o connessi alla tecnologia fusoria ma, spesso e con frequenza tipicamente inaspettata, a cause dipendenti dalle errate o improprie condizioni d'esercizio.



FIGURA 1

Punto d'innescò di una frattura sullo spigolo di un getto in lega d'alluminio al 5 % di Si. 3x circa.

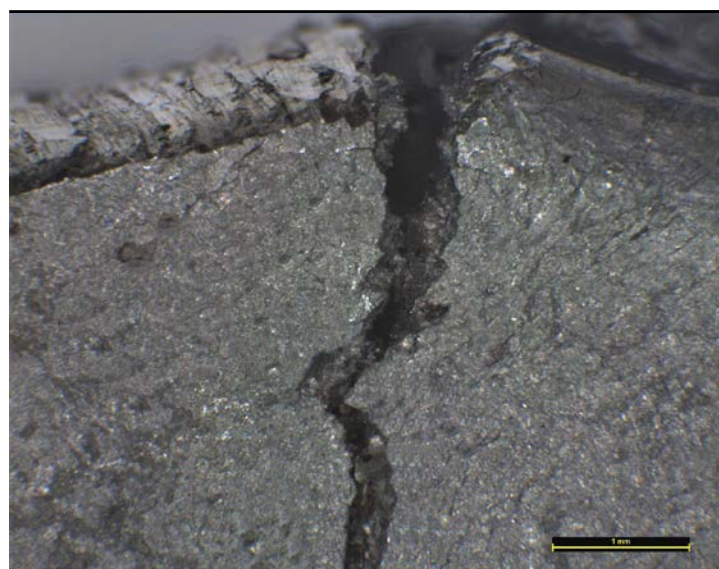


FIGURA 2

Dettaglio del punto d'innescò dell'immagine precedente con evidente frattura a lembi strappati. 10x circa.

Quindi, il diagnosta sarà chiamato anche all'esame delle condizioni d'esercizio. Ne consegue che la competenza di questo esperto dovrà essere giocoforza ampia. Egli dovrà correlare e confrontare informazioni ed evidenze multidisciplinari. In assenza di consolidata preparazione scientifica e tecnologica, roduta esperienza sul campo con diverse decine di failure analysis condotte con successo, ma anche e non secondariamente senza una matura





FIGURA 3

Frammento di un grosso getto in ghisa sferoidale EN-GJS-500-7. Chevron marks convergenti nel punto d'innescio, indicato dalla freccia. 0,2 x circa



FIGURA 4

Dettaglio della figura precedente. 0,2 x circa

- laboratorio metallografico in grado di sviluppare esami macroscopici, macrografici e micrografici;
- laboratorio di microscopia elettronica a scansione e microanalisi;
- laboratorio di prove meccaniche in grado di sviluppare prove di trazione, durezza, resilienza e talvolta prove di fatica e meccanica della frattura.

I laboratori di cui sopra dovranno necessariamente essere serviti da un'adeguata officina meccanica per prelevare saggi e campioni ed eseguire la lavorazione di provette, cosa non secondaria ma fondamentale e delicata poiché la corretta zona di prelievo e la lavorazione dei campioni sono in grado di influenzare le evidenze degli esami e prove successive.

Quanto sopra afferisce a prove o esami tipicamente di tipo distruttivo o semi distruttivo, ovvero che comportano operazioni con totale o parziale distruzione del getto in esame (tagli, estrazione campioni, lavorazioni, ecc.). Non meno essenziali sono tutte quelle prove, tipicamente non distruttive, che permettono di ricavare informazioni senza danneggiare/ compromettere il getto. Ecco quindi la necessità di disporre di laboratori e personale qualificato in grado d'eseguire:

- esami visivi anche con tecniche remotizzate;
- esami superficiali con le comuni tecniche a liquidi penetranti,
- magnetoscopia e correnti indotte;
- esami con tecniche radiografiche quali: radiografia, radioscopia ed oggi anche con tomografia industriale. Questi

capacità di raccogliere informazioni dalle persone direttamente coinvolte, ovvero fabbricanti, trasformatori ed utilizzatori di getti, non sarà conveniente rivolgersi a pseudo esperti, confidando d'ottenere risultati utili.

Dopo la competenza è necessario che il lavoro del diagnosta sia coadiuvato da strumentazioni diagnostiche adeguate e complete. Il laboratorio metallurgico moderno è la "sala operatoria" del diagnosta. Nelle failure analysis più complesse sono necessari molteplici esami e prove, quindi è essenziale disporre di un:

- laboratorio d'analisi chimica, in grado di determinare la composizione delle leghe metalliche nei minimi dettagli;

ultimi sono esami essenziali per l'ambito di riferimento di questo articolo e saranno in grado di rilevare e studiare al meglio discontinuità volumetriche interne dei getti.

Alle prove di laboratorio sarebbe poi utile associare, ove necessario, software di simulazione per lo studio agli elementi finiti di condizioni di carico o stress residuo, per lo studio simulato della solidificazione e raffreddamento di un getto, per l'analisi degli effetti di trattamenti termici massivi o localizzati, ecc. Tali simulazioni aiuteranno nella comprensione della genesi dei difetti preesistenti o generatisi in esercizio una volta stabilite o ricostruite le condizioni di processo e/o messa in servizio.

### Le fasi della diagnosi di difetto

Benché la sequenza sia modificabile secondo la natura del difetto, le principali fasi della failure analysis sono:

- raccolta dati e selezione dei saggi e campioni;
- esame visivo delle parti danneggiate;
- prove non distruttive;
- prove meccaniche;
- selezione, identificazione, pulizia e conservazione di ogni campione prelevato;
- esami macroscopici, analisi di fratture, cricche primarie e secondarie e d'altre caratteristiche delle superfici;
- esami microscopici in microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) associati ad eventuali microanalisi;
- selezione, preparazione ed esame macro e micrografico di opportune sezioni metallografiche;
- analisi chimica del materiale base o di zone particolari;
- analisi dei meccanismi di frattura;
- eventuali prove di simulazione delle condizioni d'esercizio o prove speciali per riprodurre il difetto;
- eventuali simulazioni agli elementi finiti di condizioni di carico o simulazioni di processo;
- analisi critica di tutte le informazioni raccolte, formulazione d'ipotesi di danneggiamento e stesura della relazione con raccomandazioni per evitare altri danni analoghi in futuro.

Il tempo speso per raccogliere le informazioni disponibili sulla storia del componente fra cui:

- disegni 2D o file CAD 3D;
- processo di fabbricazione;
- trattamenti termici e superficiali;
- condizioni di stoccaggio, d'esercizio e sforzi applicati;
- condizioni ambientali;
- ogni altra informazione relativa all'emergere e manifestarsi del difetto;



FIGURA 5

Getto in lega d'alluminio al 7 % di Si con ritiri spugnosi affioranti in superficie evidenziati col controllo a liquidi penetranti (macchie rosse su sfondo bianco). 1 x circa

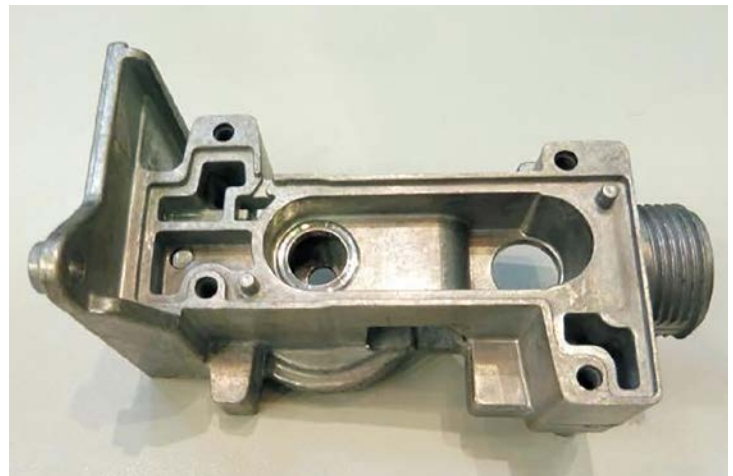
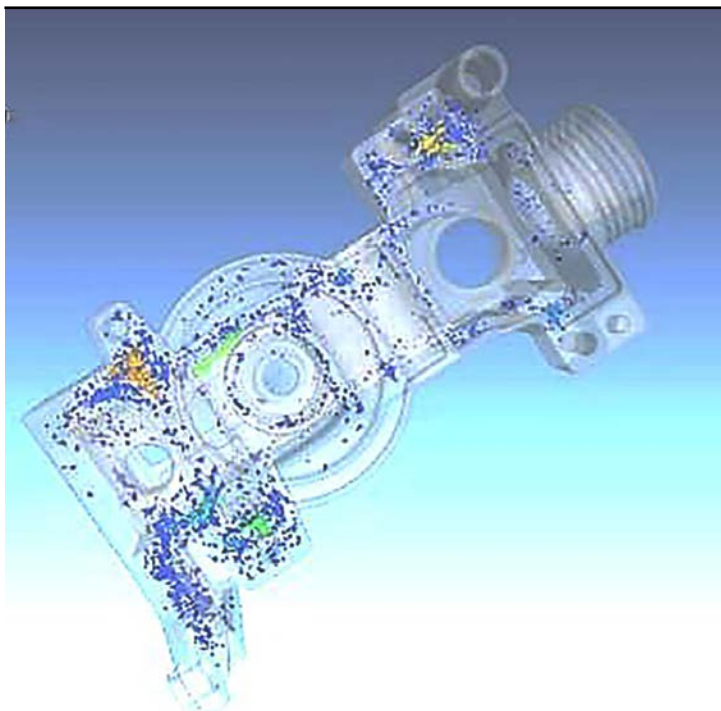


FIGURA 6

Getto pressocolato in lega d'alluminio al 11 % di Si sottoposto a controllo tomografico (vedasi fig. 7). 0,4x circa

è sempre ben impiegato, perché consente di pianificare l'indagine e giungere più agevolmente alla meta, con efficienza di risorse. Il diagnosta dev'essere giudice imparziale, perciò deve valutare ogni informazione ricevuta, ma non deve lasciarsi influenzare dalla pressione di chi è parte in causa; non deve crearsi preconcetti. Durante l'indagine deve verificare se le informazioni raccolte siano riscontrate dai risultati delle prove condotte scartando quelle chiaramente smentite dai risultati sperimentali.




**FIGURA 7**

Stesso getto pressocolato dell'immagine precedente sottoposto a controllo tomografico. Porosità gassose rilevate col controllo. 0,3x circa

**Documentazione fotografica:** La raccolta di documentazione fotografica è essenziale per spiegare e trasferire i risultati dell'indagine. Il diagnosta deve sempre documentare con immagini i getti esaminati e gli esami svolti.

**Scelta dei saggi:** Prima d'iniziare la failure analysis il diagnosta deve scegliere i saggi rappresentativi del difetto e adatti all'indagine. Egli deve cercare anche altre tracce di danneggiamento o difetti oltre a quelle immediatamente visibili per evitare di scegliere saggi non completamente rappresentativi o in numero insufficiente.

Spesso è utile paragonare getti difettosi con altri integri per meglio capire se il difetto sia dovuto a condizioni d'esercizio o a errore di progetto, fabbricazione o fornitura.

**Condizioni d'esercizio anomale:** Nell'indagare la storia del getto danneggiato/difettoso è consigliabile insistere nella verifica delle eventuali condizioni d'esercizio; cioè verificare se durante l'uso siano accaduti eventi eccezionali che possano aver innescato il difetto e se tali eventi si siano ripetuti e con quale frequenza.

Bisogna capire se il difetto sia un caso isolato o si siano manifestati altri casi analoghi in passato nel componente esaminato o in altri casi simili.

Accertata la presenza di un'eventuale frattura fragile con l'esame

frattografico, è importante sapere se il componente abbia ceduto a bassa temperatura o sia stato sollecitato d'impulso o in condizioni di bi o triassialità, perché in queste condizioni si possono propagare fratture fragili anche in componenti di normale o d'elevata tenacità.

Il problema più comune che si pone al diagnosta è trovare il difetto iniziale o punto d'innescò (figg. 1 e 2). Di solito la direzione di propagazione della frattura può essere rivelata dalle caratteristiche corrugazioni della superficie di frattura, come le chevron marks, che convergono verso il punto d'innescò (figg. 3 e 4).

A patto che le superfici di frattura dei frammenti d'un componente rotto non vengano a contatto fra loro (interponendo un film di carta velina prima d'accostarle), può esser utile far combaciare i frammenti, per trovare la sequenza di propagazione di fratture multiple.

### Esami preliminari

Le parti difettose, compresi i frammenti, devono essere sottoposte ad accurato esame visivo prima di qualsiasi pulizia o lavorazione. Spesso residui o detriti trovati sulle superfici del getto forniscono informazioni utili per identificare le cause o la sequenza degli eventi che portarono a rottura o all'insorgere del difetto in generale.

### Esame visivo

Il primo esame visivo dev'essere condotto a occhio nudo poiché l'occhio ha eccezionale profondità di campo e capacità d'esaminare rapidamente grandi superfici scoprendo cambiamenti di colore e morfologia. Alcune di queste caratteristiche si perdono usando mezzi ottici (lenti, microscopi, endoscopi) od elettronici (telecamere).

Deve essere osservata e valutata l'importanza di qualsiasi indicazione o caratteristica morfologica o d'aspetto (colore, brillantezza, rugosità, ecc.). Tutte le caratteristiche più importanti, comprese le misure dimensionali, devono essere registrate in forma tabulare oppure su schizzi o con fotografie, non dimenticando di porre in primo piano, a margine dell'immagine, un righello o un metro per riferimento.

### Studio della frattura

Se la diagnosi coinvolge fratture, per prima cosa bisogna documentare l'intero getto, ivi compresi i pezzi e frammenti registrando le dimensioni, le condizioni e la giacitura delle rotture in relazione ai vari frammenti. Poi deve seguire l'esame della frattura, che va condotto con illuminazione diretta, su fondo scuro, usando vari angoli d'incidenza, per evidenziare le caratteristiche della frattura. Ciò consente anche di stabilire quali aree della frattura siano di maggior interesse.

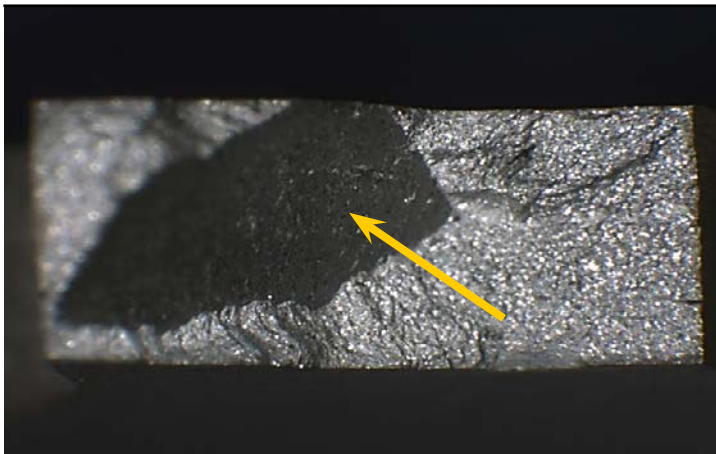


FIGURA 8

Superficie di frattura di una provetta di trazione prismatica ricavata da getto colato in conchiglia in lega d'alluminio al 7% di Si. Grossa inclusione non metallica visibile sulla frattura della provetta (area scura poligonale indicata con freccia). 3x circa

### Prove non distruttive

Le prove non distruttive (PND), quali l'esame con liquidi penetranti (PT) (fig. 5) e particelle magnetiche (MT) per getti in lega ferromagnetica, sono spesso di grande utilità nella diagnosi perché permettono d'individuare danneggiamenti o discontinuità superficiali non visibili ad occhio nudo né con altre tecniche non distruttive. Altre PND più adatte per rilevare eventuali discontinuità o difetti interni sono la radiografia, la radioscopia (RT) e, più recentemente, la tomografia industriale (CT) che consente una visualizzazione radiografica tridimensionale del volume dei getti e dei loro difetti con enorme vantaggio nella comprensione della natura e origine degli stessi (porosità, cavità gassose, ritiri di solidificazione, ecc.) (figg. 6 e 7).

Meno frequentemente e su getti tipicamente massivi sono impiegati anche gli esami con ultrasuoni (UT).

### Prove meccaniche

La prova di durezza è la più importante e versatile ai fini della diagnosi ma non sufficiente per esprimere un giudizio definitivo. Altre prove meccaniche sono spesso necessarie per verificare se il getto sia conforme alle specifiche. Se la durezza non è conforme possiamo esser certi della non conformità del getto ma non vale il contrario perché spesso accade che la durezza sia conforme ma che le altre caratteristiche non lo siano affatto; è un caso ricorrente in componenti d'acciaio e lega d'alluminio dove l'esame delle caratteristiche tensili (carico di rottura, snervamento allungamento e strizione) misurate con prova di trazione, è fondamentale.

Quando necessario devono essere eseguite prove di trazione e di resilienza, a temperatura ambiente, a bassa o alta temperatura per simulare le condizioni di servizio, purché sia disponibile una quantità di materiale sufficiente per la preparazione delle provette. Talvolta è necessario eseguire prove speciali come la determinazione del coefficiente KIC o dell'integrale J.

Può anche essere utile sottoporre le provette a particolari cicli termici per simulare le condizioni d'uso del getto e verificare se e come si modificano le proprietà meccaniche.

Ciò è molto utile per confutare l'ipotesi del meccanismo di danneggiamento del getto e per lo studio del comportamento fisico delle leghe.

Il diagnosta deve porre massima attenzione nell'interpretazione dei risultati di prove meccaniche che, talvolta, possono essere influenzate da difetti presenti nelle provette estratte direttamente dai getti (porosità, giunzioni fredde, inclusioni, ecc.) (fig. 8).

### Precauzioni per il prelievo e conservazione delle superfici di frattura o dei difetti

È molto importante conservare adeguatamente i saggi prelevati per l'indagine e in particolare le superfici di frattura, per evitare alterazioni d'indizi importanti.

Tutte le superfici possono subire danni chimici e meccanici. Il danneggiamento meccanico può dipendere da urti, sfregamenti con altri oggetti, anche durante il prelievo o trasporto al laboratorio del getto. Si deve assolutamente evitare di toccare o strofinare le superfici di frattura con le dita, né tentare di riunire le sezioni mettendo in contatto le parti affacciate.

Il danneggiamento chimico è dovuto quasi sempre a corrosione e può essere prevenuto con diversi interventi. Non bisogna mai lavare con acqua o reagenti chimici le superfici di frattura o le zone o superficie contenenti difetti prima che l'analista le abbia esaminate e deciso come pulirle. In alcuni casi il lavaggio completo con acqua e poi con acetone è indispensabile, come per i saggi contaminati con acqua di mare o con fluidi antincendio. Perciò il diagnosta deve intervenire rapidamente o dare precise istruzioni che prevedano anche la conservazione dei fluidi di lavaggio.

### Preparazione delle sezioni

Poiché le strumentazioni d'indagine possono accettare provette di dimensioni non superiori a determinati valori, è spesso necessario ricavare dal getto un saggio di facile manipolazione contenente la frattura o il/i difetti.

I tagli non devono alterare o danneggiare le superfici di frattura o le zone difettose ed aree adiacenti. Concluderemo con una seconda parte questa introduzione