



Un approccio innovativo per l'analisi quantitativa delle superfici di frattura a fatica nelle ghise sferoidali mediante elaborazione di immagini.

Alberto De Santis, Daniela Iacoviello

DIS – “Sapienza” Università di Roma, via Ariosto 25 – 00185 Roma, Italia

Vittorio Di Cocco, Ornella Di Bartolomeo

DiMSAT – Università di Cassino, via G. Di Biasio 43 – 03043 Cassino (FR), Italia.

RIASSUNTO. Le osservazioni al microscopio elettronico a scansione (SEM) delle superfici di frattura ottenute a seguito di rotture per fatica consentono di evidenziare alcuni meccanismi di avanzamento che dipendono dal materiale e dalla modalità di applicazione delle sollecitazioni. L'introduzione di moderne tecniche di analisi di immagine assistite al computer permette di elaborare un numero di informazioni elevato che consente di porre in relazione le caratteristiche morfologiche locali con il comportamento meccanico macroscopico del materiale.

In questo lavoro è stata implementata una tecnica innovativa di analisi di immagine basata sull'analisi della tessitura, valutando l'influenza delle condizioni di applicazione della sollecitazione (ΔK applicato) sulla evoluzione del clivaggio rilevato sulle superfici di frattura a fatica di una ghisa sferoidale ferritoperlitica.

ABSTRACT. Scanning electron microscope (SEM) analysis of fatigue fracture surfaces is usually performed to identify fatigue crack propagation micromechanisms. Usually, both ductile and fragile morphologies are analyzed only considering a merely qualitative or semi-quantitative approach. In this work, an innovative computer assisted image analysis technique based on texture characterization is considered, in order to evaluate the influence of the applied ΔK on cleavage propagation micromechanism in a ferritic-pearlitic ductile cast iron.

PAROLE CHIAVE: frattura, ghisa sferoidale, analisi di immagine.

1 INTRODUZIONE

Nel corso della prima metà del novecento, il tentativo di ottenere un materiale capace di unire la colabilità delle ghise e la tenacità degli acciai fu coronato da un successo, almeno parziale, con le ghise malleabili. Queste sono ottenute mediante un lungo e costoso processo di ricottura di ghise bianche. L'elevato costo del trattamento, e le oggettive difficoltà nell'ottenere pezzi di grandi dimensioni, ne hanno limitato la diffusione in molti ambienti. Nel 1948, H. Morrogh della British Cast Iron Research Association (BCIRA) annunciò alla American Foundrymen Society Convention la formazione di grafite in forma sferoidale all'interno di una ghisa grigia ipereutettica, mediante l'aggiunta di piccole quantità di cerio. Nello stesso anno, l'International Nickel Company annunciò il raggiungimento del medesimo risultato mediante l'utilizzo di magnesio come sferoidizzante.

Le ghise sferoidali (solitamente indicate in inglese con il termine *ductile iron*) hanno avuto uno sviluppo continuo negli ultimi decenni, grazie ad un miglioramento del

controllo del processo di sferoidizzazione e delle microstrutture, ottenute sia mediante il controllo degli elementi di lega aggiunti, che grazie all'ottimizzazione dei trattamenti termici. Le ghise sferoidali possono essere caratterizzate da matrici anche notevolmente diverse (Fig. 1):

- ferritica (caratterizzate da una buona duttilità e da una resistenza alle sollecitazioni di trazione comparabile con quella di un acciaio non legato a basso tenore di carbonio);
- perlitica (caratterizzate da una elevata resistenza a trazione, ma da valori della duttilità e della tenacità non elevati);
- ferrito-perlitica (sono le ghise sferoidali più largamente utilizzate, con una resistenza a trazione intermedia rispetto a quella offerta dalle ghise completamente ferritiche e da quelle completamente perlitiche);
- martensitica (con una resistenza a trazione elevata, ma con livelli inferiori di duttilità e resilienza);
- bainitica (caratterizzate da valori di durezza intermedi rispetto a quelli ottenuti considerando le ghise a matrice

perlitica e quelle a matrice martensitica);
 - austenitica (caratterizzate da una resistenza alla corrosione migliorata e da una buona resistenza a trazione);
 - austemperata (caratterizzate da una resistenza a trazione quasi doppia rispetto alle ghise sferoidali a matrice perlitica, con un elevato valore dell'allungamento e della tenacità). Le caratteristiche di queste ultime, spesso indicate con l'acronimo ADI (*Austempered Ductile Iron*), sono legate alla particolare microstruttura ottenuta con il trattamento denominato *austempering*, a seguito del quale la microstruttura è costituita da austenite trasformata (arricchita in carbonio), austenite residua e ferrite aciculare (possono essere anche presenti piccole quantità di martensite e di carburi).

La microstruttura influenza la resistenza meccanica delle ghise sferoidali sia considerando il caso di sollecitazioni "semplici" (è il caso della resistenza a trazione, Fig. 2) che nel caso di sollecitazioni più complesse (ad

esempio, nel caso della resistenza alla propagazione della cricca di fatica, Fig. 3) [2-5]. Le peculiari caratteristiche meccaniche di queste ghise sono dovute alla morfologia degli elementi di grafite, sostanzialmente sferoidali, che agiscono come *crack arresters*, con un conseguente incremento della tenacità, della duttilità e della resistenza alla propagazione della cricca di fatica [6]. Tale risultato è comunque ottenuto solo nel caso di una buona nodulizzazione delle particelle di grafite, ottenuta mediante l'aggiunta di magnesio, magnesio+calcio, terre rare, oppure magnesio+terre rare [7].

Sebbene il processo di nodulizzazione sia comunemente ritenuto eterogeneo, il substrato di nucleazione non è stato ancora chiaramente identificato. E' stato infatti proposto che la nucleazione può aver luogo su differenti tipologie di inclusioni (MnS, CaS, SrS, MgO etc. [9, 10]), oppure in corrispondenza di bolle gassose [11]. Dopo la nucleazione, i noduli di grafite si accrescono grazie alla

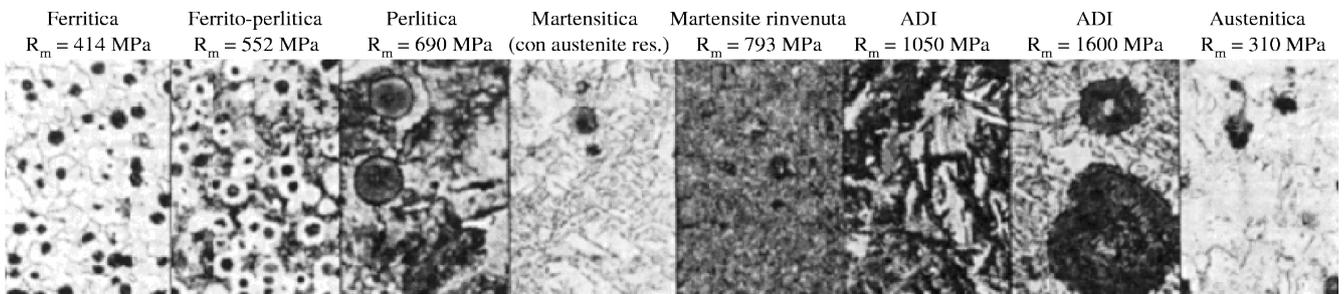


Figura 1: Ghise sferoidali: differenti microstrutture (le foto corrispondono a differenti ingrandimenti) [1].

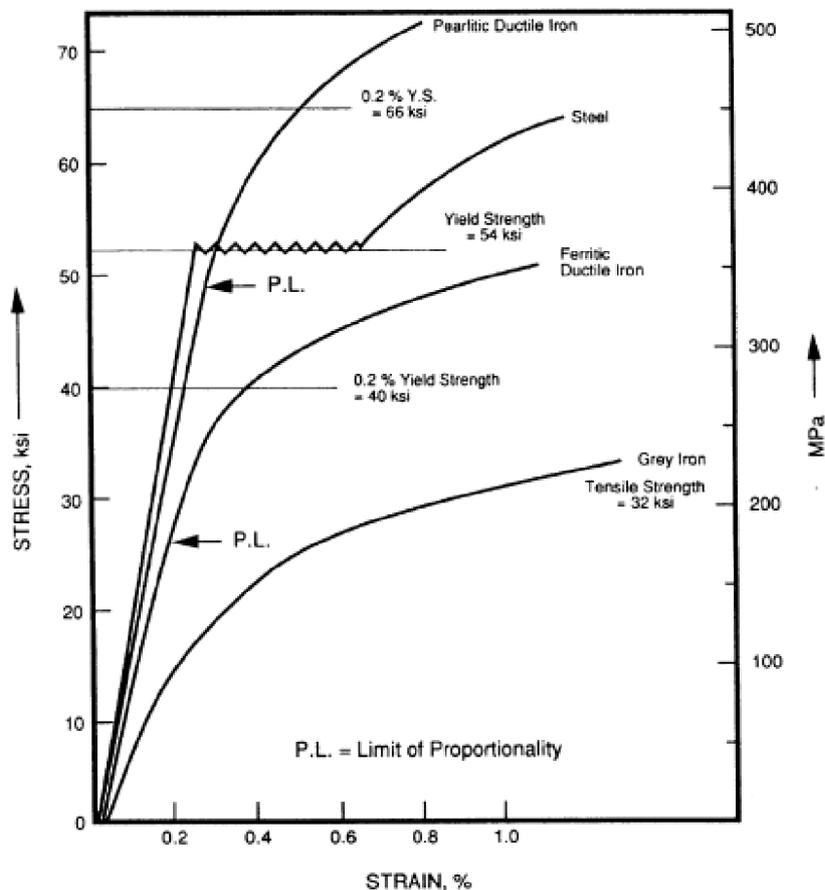


Figura 2: Resistenza a trazione per acciai, ghise grigie e ghise sferoidali ferritiche e perlitiche [1].

diffusione degli atomi di carbonio attraverso il guscio di austenite. A seguito di tale processo, si possono ottenere differenti morfologie (Fig. 4). A partire da noduli con la superficie liscia (Fig. 4a) oppure rugosa (Fig. 4b), si possono ottenere differenti forme di grafite degenerata (ad esempio, Fig. 4c). La perdita di una forma sferica degli elementi di grafite implica, macroscopicamente, un peggioramento notevole delle proprietà meccaniche, con una diminuzione della tenacità e della resistenza alla propagazione della cricca di fatica. L'analisi morfologica degli elementi di grafite può essere effettuata sia con

metodi diretti, mediante analisi metallografica, che con metodi indiretti, ad esempio mediante ultrasuoni.

La determinazione dei micromeccanismi di frattura viene solitamente effettuata mediante l'analisi al microscopio elettronico a scansione delle superfici di frattura. Differenti morfologie possono essere osservate in funzione della microstruttura della lega analizzata e delle modalità di applicazione delle sollecitazioni. Nel caso della propagazione delle cricche di fatica nelle ghise sferoidali a matrice ferrito-perlitica si possono osservare cricche secondarie, striature (Fig. 5) e clivaggio

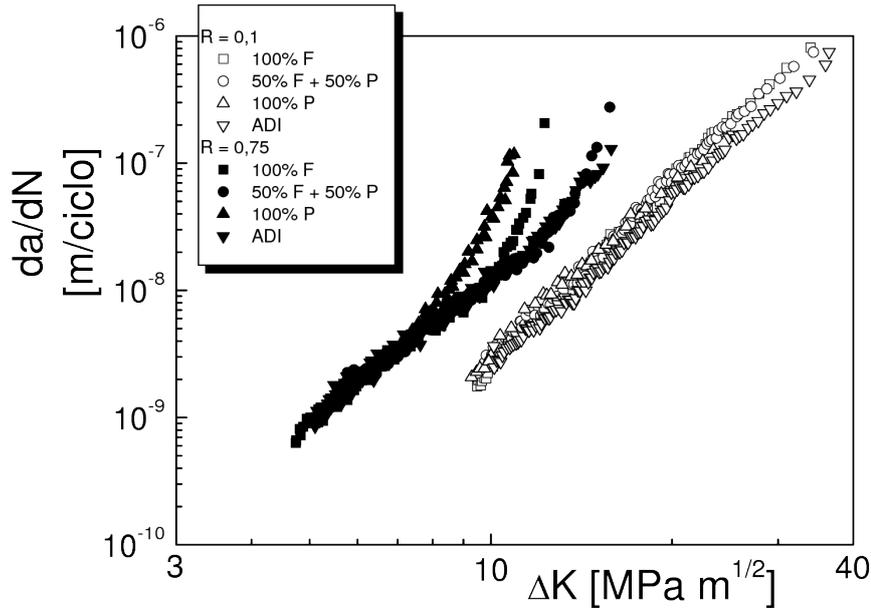


Figura 3: Influenza della microstruttura e del rapporto di carico sulla resistenza alla propagazione delle cricche di fatica [1, 8].

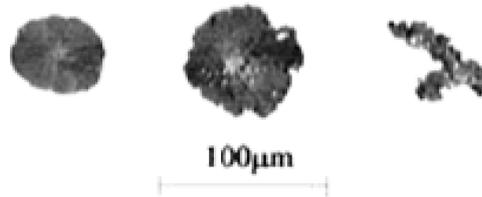


Figura 4: Differenti forme degli elementi di grafite nelle ghise sferoidali: a sinistra: sferoide con superficie liscia; al centro: sferoide con superficie rugosa; a destra: sferoide degenerato [12].

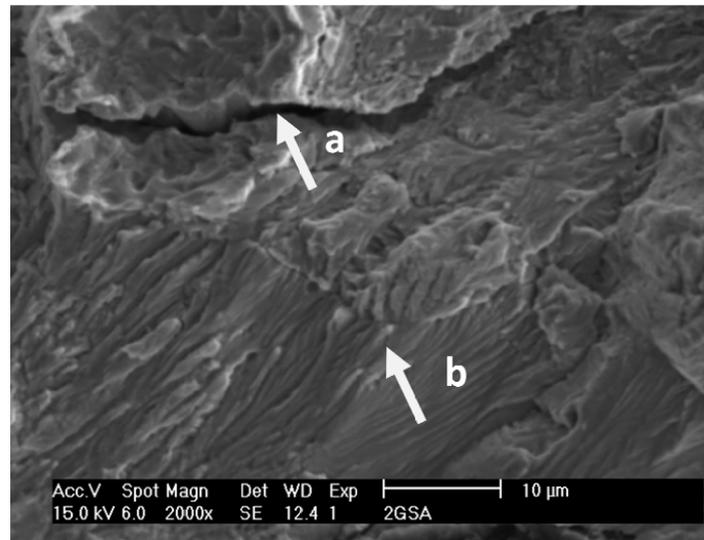


Figura 5: a) cricca secondaria, b) striature duttili.

(Fig.6); nel caso delle ghise sferoidali a matrice ferritico-perlitica, risulta sovente localizzato nei grani ferritici che circondano gli sferoidi di grafite).

Considerando il modo I di propagazione, all'apice della cricca lo stato di sollecitazione è triassiale e dipende dal K_I applicato e dalla distanza dall'apice. Con riferimento allo schema riportato in Fig. 7, e nell'ipotesi di materiale continuo, omogeneo ed isotropo, in presenza di cricca le relazioni che esprimono lo stato di sollecitazione locale, valide nell'ipotesi di modo I, sono le seguenti [13]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right)\right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right)\right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{3\alpha}{2}\right) \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} \end{aligned} \quad (1)$$

Lungo la direzione di propagazione della cricca ($\alpha=0$), le suddette equazioni si semplificano e si annullano le componenti tangenziali. In questo caso le uniche sollecitazioni sono costituite da sforzi normali (sistema principale) i cui valori sono:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2)$$

$$\sigma_z = 2\nu \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3)$$

A partire da queste equazioni, ponendo la σ_y pari al valore dello snervamento R_s si può calcolare, in prima approssimazione, l'estensione del raggio di plasticizzazione all'apice della cricca:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_s}\right)^2 \quad (4)$$

La zona plasticizzata può essere quindi schematizzata come una regione con sezione approssimativamente circolare che si estende dall'apice della cricca verso il materiale, all'interno della quale si hanno elevati valori di triassialità. All'interno di questa zona si hanno le

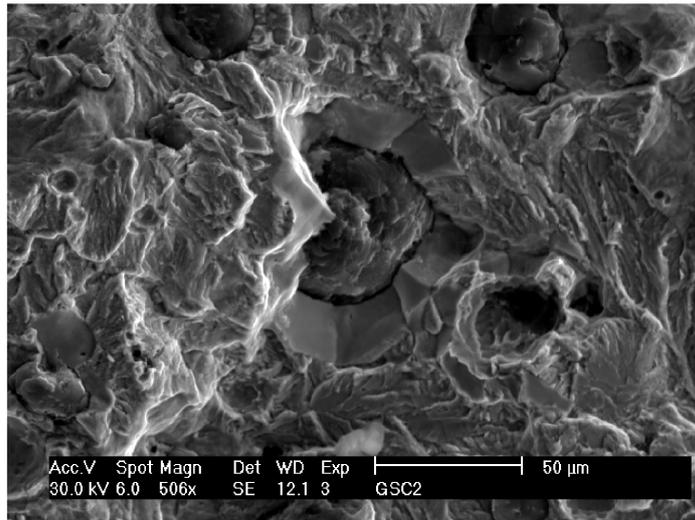


Figura 6: Clivaggio esteso nei grani ferritici intorno agli sferoidi.

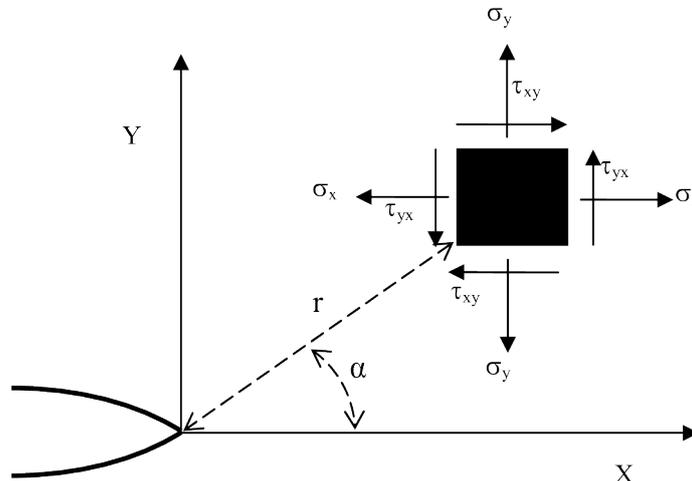


Figura 7: Descrizione delle zone all'apice della cricca con relativo stato di sollecitazione.

condizioni favorevoli per il verificarsi di fenomeni di rottura fragile con conseguente clivaggio.

In questo lavoro è stata utilizzata una tecnica innovativa di analisi di immagine, basata sull'analisi della tessitura [14,15], al fine di quantificare l'importanza del clivaggio nelle superfici di frattura ottenute con provini CT (compact type) sottoposti a prove di propagazione di cricche di fatica.

2 ANALISI DI IMMAGINI: SEGMENTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DELLA TESSITURA

Al fine di quantificare la percentuale di clivaggio come rapporto tra area totale delle zone di clivaggio e l'area della matrice metallica (area totale della superficie osservata meno quella occupata dai noduli), è necessario determinare le zone in cui il livello di grigio è maggiormente uniforme (zone di clivaggio) e l'area occupata dai noduli.

Per determinare le zone caratterizzate da una elevata uniformità del livello di grigio, si sono quantificate alcune grandezze indicative delle morfologie di frattura duttili e

fragili mediante l'analisi della tessitura. Per quanto il concetto di tessitura possa apparire ovvio, non esiste una sua definizione formale; intuitivamente essa descrive proprietà di relazioni reciproche fra elementi o regioni di una immagine. La tessitura viene descritta mediante quantità che misurano proprietà quali la regolarità, la trama più o meno grossolana, la presenza di periodicità. Ci sono fondamentalmente tre approcci per descrivere la tessitura: metodi statistici, metodi che usano l'analisi delle strutture e metodi che utilizzano l'analisi spettrale. L'approccio statistico è utile per la caratterizzazione di tessiture sotto l'aspetto della presenza di granularità, o per la presenza di zone più o meno regolari. L'approccio strutturale ricerca l'eventuale presenza della ripetizione di elementi primitivi (quali linee, o cerchi etc.). Le tecniche spettrali sono basate sull'analisi dello spettro di Fourier e sono utilizzate soprattutto per individuare eventuali periodicità nell'immagine, studiando picchi nello spettro. In Fig. 8 sono indicati alcuni esempi di tessitura che si possono incontrare nell'analisi di un nodulo: possono essere presenti parti uniformi, zone con striature, oppure con profili che si distinguono dallo sfondo ma non facilmente

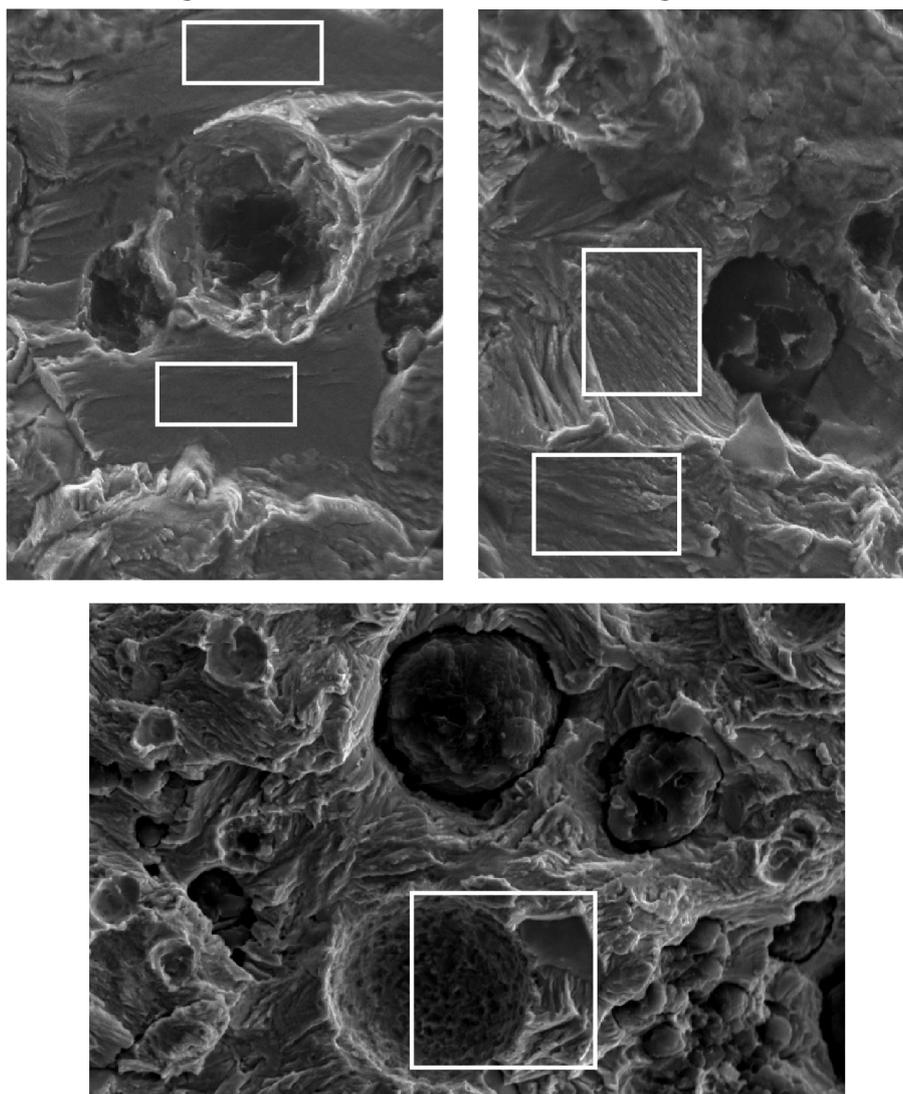


Figura 8: Esempi di tessitura.

classificabili.

La scelta dell'approccio più opportuno da seguire dipende dal tipo di immagine disponibile; per quanto riguarda le immagini di cui ci siamo occupati, l'approccio statistico appare il più adatto, non essendo presenti ripetizioni di elementi primitivi o periodicità evidenti. Invece un elemento che risulta interessante riguarda la presenza di zone regolari in cui il livello di grigio non varia sensibilmente (Fig. 9).

L'approccio statistico richiede il calcolo di alcune quantità volte a caratterizzare oggettivamente la tessitura. E' utile suddividere l'immagine in sottoregioni allo scopo di individuare le zone in cui il livello di grigio varia maggiormente rispetto al valor medio. La scelta di quanto estese debbano essere tali sottoregioni dell'immagine è il risultato di un compromesso: esse non possono essere troppo piccole data la presenza del rumore che potrebbe alterare significativamente la valutazione del valor medio e dunque il calcolo della varianza del segnale (troppi falsi positivi). Analogamente sottoregioni troppo ampie potrebbero mascherare variazioni significative o periodicità (perdita di positivi veri).

Indichiamo con g la variabile che rappresenta i livelli di grigio possibili nell'immagine, con L il numero di livelli grigio distinti considerati e con $p(g_i)$, $i = 1, 2, \dots, L-1$, l'istogramma corrispondente. Per quanto riguarda il livello di grigio nell'immagine suddivisa in sottoregioni, può essere utile valutare sia il *valor medio* che la *varianza*, definite rispettivamente come:

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} g_i p(g_i) \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - m)^2 p(g_i) \quad (6)$$

Rimangono così individuate le zone di minore o maggiore variabilità del livello di grigio.

Un altro parametro interessante basato sugli istogrammi è una misura dell'*uniformità*:

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(g_i) \quad (7)$$

Dal momento che p assume valori nell'intervallo $[0,1]$ e che la loro somma è pari a 1, la misura U è massima per una immagine in cui tutti i livelli di grigio sono uguali (uniformità massima) e ovviamente decresce al variare dei livelli di grigio.

Un'altra misura della variabilità dei livelli di grigio è l'entropia che vale 0 per immagini costanti ed è così definita:

$$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(g_i) \log_2 p(g_i) \quad (8)$$

E' utile calcolare l'uniformità e l'entropia in sottoregioni ed anche in questi casi valgono le stesse considerazioni svolte in precedenza circa l'estensione delle sottoregioni.

Queste proprietà statistiche a volte non sono adeguate a descrivere le relazioni reciproche fra i pixel o gruppi di pixel. A tale scopo, sempre nell'ambito dell'approccio statistico si utilizzano spesso le matrici di co-occorrenza [15]; si tratta di analizzare proprietà statistiche (momenti di ordine k , uniformità, entropia, etc.) riferite ad elementi di matrici opportunamente costruite. Indicato con P un operatore di posizione (ad esempio la ripetizione di certi valori di livelli di grigio muovendosi in orizzontale o in verticale o a 45° o a 135°) si può costruire una matrice di dimensione $k \times k$ in cui l'elemento di posto (i, j) indica il numero di volte che nell'immagine in esame pixel con livello di grigio i capitano nella posizione specificata dall'operatore vicino a pixel con livello di grigio j , con $1 \leq i, j \leq k$. La matrice così ottenuta divisa per la somma dei suoi elementi è la matrice di co-occorrenza C . Su di essa si possono calcolare, come detto, diverse grandezze; indicato con c_{ij} il suo elemento generico, può essere utile calcolare:

- la massima probabilità: $\max_{i, j} (c_{i, j})$

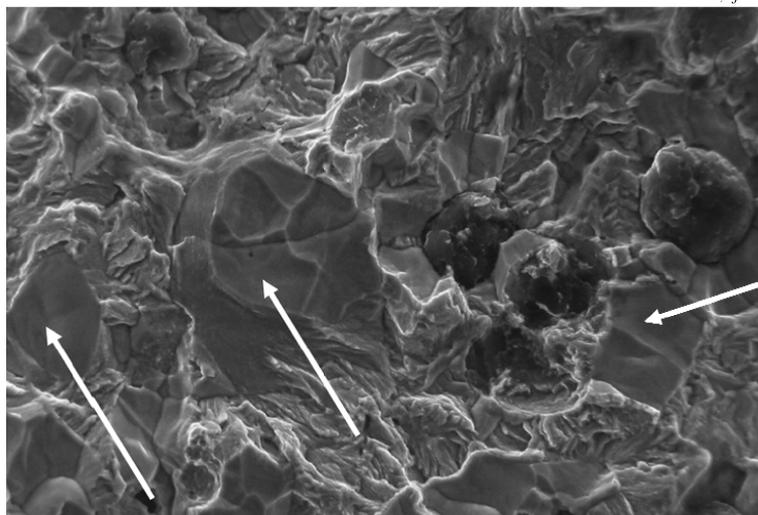


Figura 9: Esempi di zone regolari.

- il momento di ordine k : $\sum_i \sum_j (i-j)^k c_{ij}$

- l'uniformità: $\sum_i \sum_j c_{ij}^2$

- l'entropia: $-\sum_i \sum_j c_{ij} \log_2 c_{ij}$

L'idea base è di caratterizzare il contenuto della matrice tramite questi descrittori. Ad esempio la massima probabilità è un indicatore della sensibilità maggiore alla proprietà specificata dall'operatore.

In molti casi può essere utile utilizzare più di un indicatore, come è stato fatto in questo lavoro. Nelle immagini esaminate non erano evidenti periodicità o direzioni privilegiate pertanto è stato ritenuto utile studiare indicatori quali la varianza, l'uniformità e l'entropia. Quest'ultimo si è rivelato eccessivamente dipendente dalla grandezza delle sottoregioni in cui veniva suddivisa l'immagine e pertanto si è definitivamente considerata la varianza e l'uniformità.

Per poter determinare la superficie di clivaggio è necessario calcolare l'area dei noduli; essa infatti deve essere sottratta all'area totale per poter così avere l'area disponibile. A tale scopo è utile segmentare l'immagine, ovvero passare dai 256 livelli di grigio iniziali ad un numero più ridotto, ad esempio nel nostro caso è stato necessario considerarne 16. Tale operazione di segmentazione è stata effettuata mediante l'applicazione gerarchica dell'algoritmo dei level set con approccio discreto [16]; tale procedura è stata già applicata con successo alle immagini di provini metallografici [17]. Si procede prima ad una binarizzazione (segmentazione a due livelli di grigio, bianco e nero); successivamente ciascuna zona viene ulteriormente binarizzata ottenendo una segmentazione complessiva a quattro livelli; tale procedura viene successivamente ripetuta fino ad ottenere il numero di livelli di grigio previsti. Quindi l'operazione base è una binarizzazione. A tale scopo una curva iniziale di forma qualunque viene fatta evolvere sul piano dell'immagine in modo tale da collocarsi sulle frontiere degli oggetti di interesse, che quindi possono essere separati gli uni dagli altri. L'immagine iniziale è divisa in due zone, una parte interna ed una esterna. L'evoluzione avviene mediante la minimizzazione di un opportuno indice di co-

sto che tiene conto della distribuzione del livello di grigio e della regolarità dei contorni degli oggetti (in questo caso i noduli) in esame: la curva viene deformata in modo tale che all'interno di ciascuna delle zone il livello di grigio sia il più possibile omogeneo, mentre risulti molto differente passando da una regione all'altra. La configurazione finale definisce la segmentazione ottima che separa totalmente i noduli dallo sfondo; non dipende dalla scelta iniziale della curva che evolve, e dipende esclusivamente dalla distribuzione del livello di grigio dell'immagine stessa. E' stato verificato che la convergenza dell'algoritmo è molto rapida.

3 MATERIALI E METODI

In questo lavoro è stata considerata una ghisa sferoidale la cui composizione chimica e valori di resistenza a trazione sono riportati in Tab. 1 e Tab. 2, rispettivamente. La ghisa investigata, denominata EN GJS 500-7, è caratterizzata da frazioni volumetriche comparabili di ferrite e di perlite (Fig. 10). La sferoidizzazione risulta essere elevata, con un valore del diametro medio degli sferoidi di grafite pari a circa 38 μm , con valori massimi di circa 80 μm .

Le superfici di frattura investigate sono state ottenute effettuando prove di propagazione di cricche di fatica in aria, in condizioni di ampiezza di carico costante, con rapporto di carico $R (=K_{\min}/K_{\max})$ pari a 0,1, utilizzando una frequenza di sollecitazione di 20 Hz, secondo la normativa ASTM E647 [18].

L'analisi al SEM secondo la procedura riportata nel paragrafo precedente, è stata effettuata in corrispondenza di cinque valori della lunghezza della cricca, cui corrispondono cinque differenti valori del ΔK (Fig. 11): per ognuno di questi valori sono state considerate 12 immagini ottenute con il medesimo ingrandimento (500x).

4 RISULTATI E COMMENTI

Nella Fig. 12 vengono riportate come esempio alcune delle frattografie sottoposte alla elaborazione (rispettiva-

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3,70	2,70	0,28	0,010	0,032	0,14	0,063	0,050	0,036

Tabella 1: EN GJS 500-7: composizione chimica.

R_m [MPa]	R_s [MPa]	A [%]
510	400	20

Tabella 2: EN GJS 500-7: resistenza a trazione.

mente $\Delta K = 8, 9, 11, 13, 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Nelle immagini in esame si possono evidenziare diverse morfologie di frattura; naturalmente, trattandosi di ghise sferoidali, si osservano anche sferoidi parzialmente scoperti e crateri corrispondenti al distacco o alla disgregazione di sferoidi. L'analisi si è focalizzata nella quantificazione della frazione dell'area interessata al meccanismo di frattura

più fragile, ovvero quello mediante clivaggio.

A priori, il numero di livelli di grigio in cui una immagine può essere segmentata può essere elevato a piacimento, ma, ai fini dell'ottimizzazione del processo, è conveniente ridurre tale numero, scegliendo il valore per il quale la quantità di informazioni contenuta nell'immagine sia sufficiente ad identificare le differenti morfo-

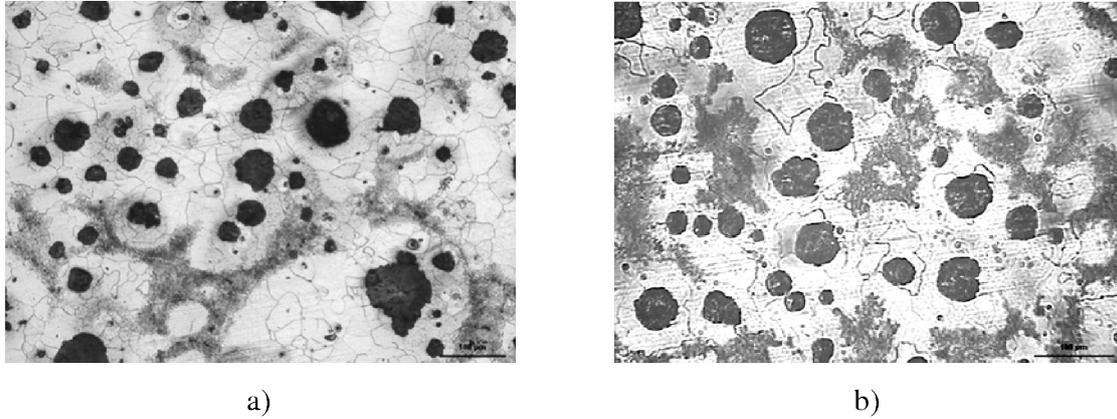


Figura 10: Ghisa sferoidale EN GJS 500-7 con ferrite chiara, perlite grigia e grafite nera; a) sferoidi medi, b) sferoidi di dimensione maggiore.

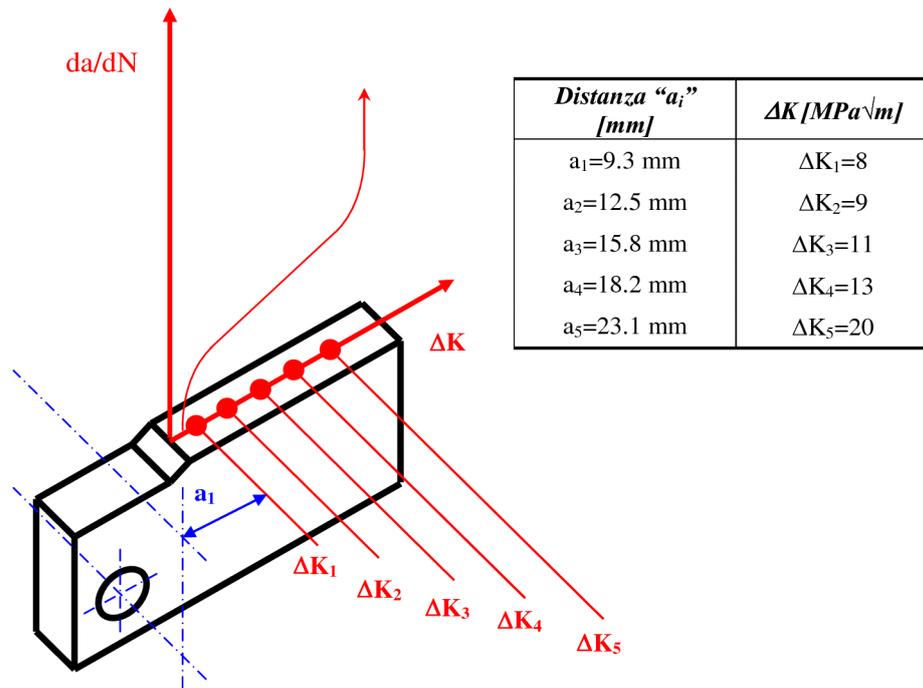


Figura 11: Zone di osservazione del provino CT per le analisi della superficie frattura.

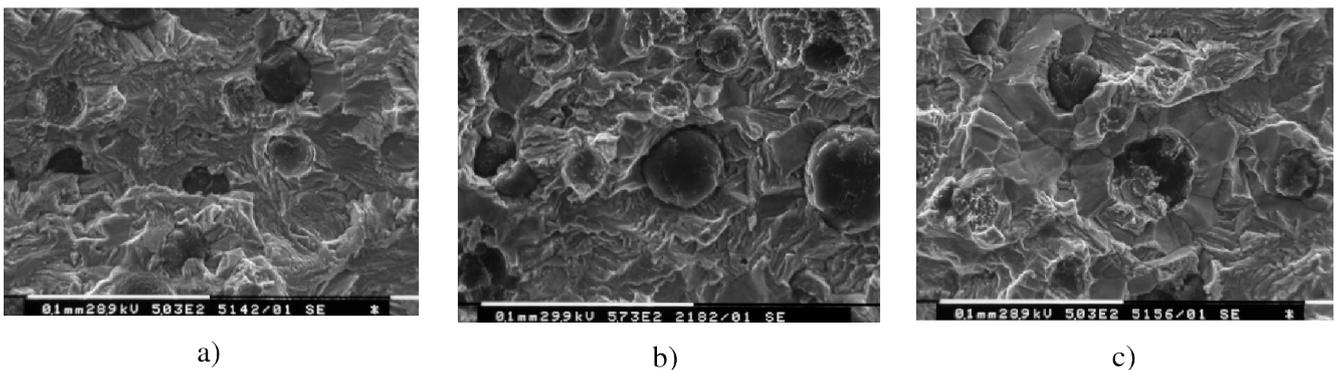


Figura 12: Esempi di frattografie sottoposte ad analisi di immagine: a) $\Delta K=11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, b) $\Delta K=13 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, c) $\Delta K=20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

gie (Fig. 13). Per le immagini utilizzate, il livello di segmentazione risultato conveniente è risultato pari a 4 livelli di grigio (Fig. 13c).

La prima fase consiste nella identificazione della superficie di frattura occupata dai noduli (tale frazione non viene conteggiata nel calcolo della frazione di superficie coinvolta nel clivaggio). Tale selezione è basata sull'analisi di proprietà morfologiche, quali la forma rotondeggiante (equivalente ad una bassa eccentricità) e la mancanza di contorni eccessivamente frastagliati (elevata solidità). E' opportuno osservare che, per quanto i noduli risultino ad una ispezione visiva sempre evidenti, spesso il loro livello di grigio è assolutamente comparabile con quello di altri elementi dell'immagine. In questi casi è stato necessario operare una correzione gamma con coefficiente minore di 1, cioè al livello di grigio g_i viene sostituito il livello g_i^γ . Questo corrisponde ad una variazione della scala di grigio in modo da rendere più distinguibili le zone più scure dell'immagine. Nel compu-

to dell'area dei noduli rientra anche l'area del vuoto lasciato da un nodulo: essa viene calcolata insieme all'area dei noduli, in quanto si presenta anch'essa di area più scura e di forma rotondeggiante.

Per determinare la superficie di clivaggio, l'analisi è basata sul fatto che essa si presenta come una zona con un livello di grigio abbastanza uniforme; per individuarne l'estensione si ricorre all'analisi della tessitura utilizzando come indicatori la Varianza e l'Uniformità. L'immagine viene suddivisa in sottoregioni di lato pari a 15 pixel, che è risultato essere un compromesso accettabile fra l'esigenza di avere un buon "filtraggio" del rumore di misura e quella di non considerare regioni troppo grandi da perdere variazioni di tessitura: una zona uniforme deve essere caratterizzata da un valore alto dell'uniformità e basso della varianza. L'analisi viene effettuata per ognuna delle righe di pixel dell'immagine, come nell'esempio della Fig. 14, dove viene riportato l'andamento del livello di grigio corrispondente alla riga

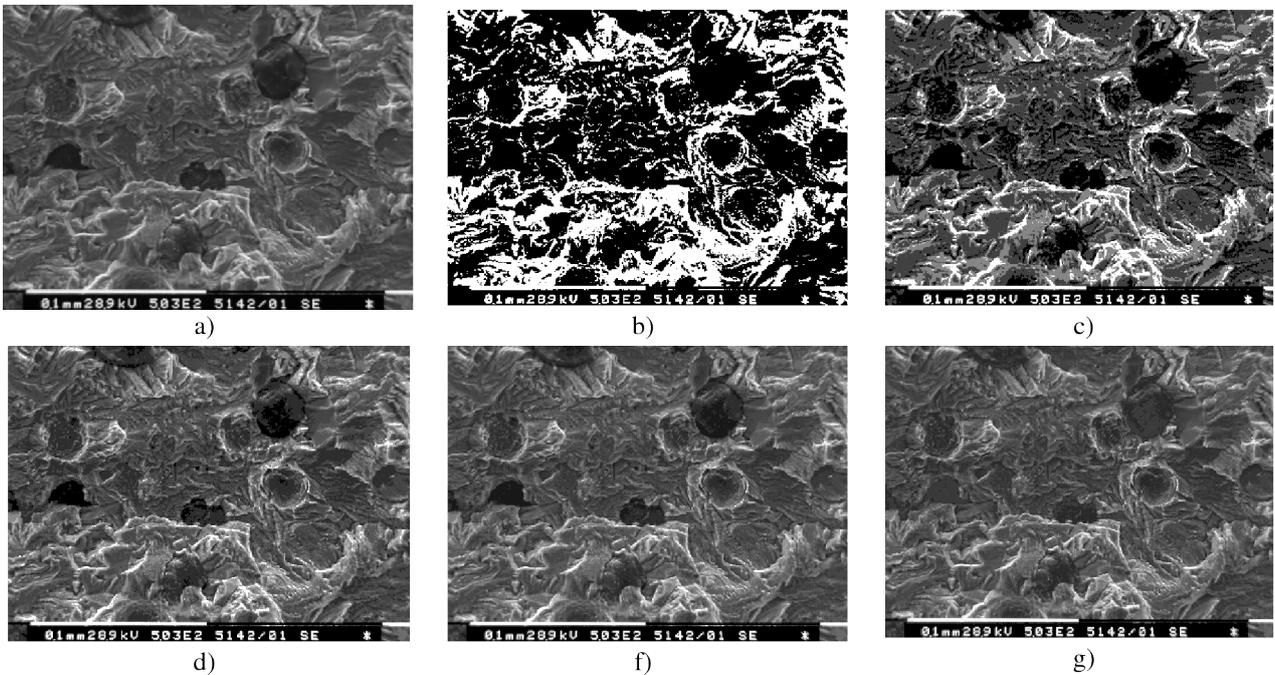


Figura 13: Esempio di segmentazione a più livelli; a) immagine originale; b)-g) segmentazione a 2, 4, 8, 16, 32 livelli

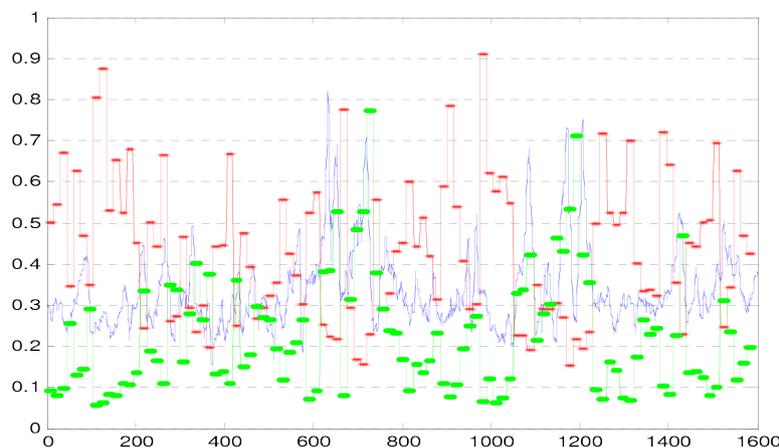


Figura 14: Andamento del livello di grigio della riga 100 dell'immagine di Fig. 12a (in blu), insieme alla riga 100 della relativa matrice di Uniformità (in rosso) e della matrice della Varianza (in verde).

100 dell'immagine corrispondente alla Fig. 12a, con l'andamento della Varianza e dell'Uniformità.

In corrispondenza delle zone in cui il segnale originale varia di meno, l'uniformità è massima e la varianza è minima. Per decidere dunque quali sono le zone in cui presumibilmente si è in presenza di clivaggio si considerano congiuntamente queste due informazioni, prevedendo anche dei valori di tolleranza; pertanto identificato come zone di clivaggio quelle per cui l'uniformità assume valori maggiori di una soglia (fissata al 50% del suo valore massimo) e la varianza assume valori inferiori ad un'altra soglia (fissata pari a 0.1). I valori delle soglie sono stati determinati mediante un'operazione di taratura su un gruppo significativo provini in cui le zone di clivaggio erano già state classificate in modo visuale da un esperto.

Le Fig. 15a e 15b rappresentano l'immagine che descrive rispettivamente l'uniformità e la varianza relativamente alla Fig. 12a.

In questa fase di analisi della tessitura e di ricerca delle superfici di clivaggio è possibile che vengano erroneamente incluse anche regioni appartenenti ai noduli; essi infatti in alcuni casi presentano un livello di grigio abba-

stanza costante (probabilmente dovuto alla presenza di zone parzialmente sfaldate, nel caso dei noduli, o di residui di noduli nel caso dei vuoti). Tale problema viene completamente superato dalla identificazione, e dalla eliminazione dal calcolo, dei noduli e dei vuoti nella prima fase del processo: questi infatti sono stati già identificati mediante la procedura di segmentazione. Se una superficie indicata come probabile sede di clivaggio ha il baricentro abbastanza vicino a quello di un nodulo essa non viene considerata nell'analisi della percentuale di clivaggio. Nella Fig. 16 si descrive la procedura utilizzata per determinare la percentuale di clivaggio, relativamente all'immagine di Fig. 12a fino ad ora utilizzata come esempio. In Figura 16a si determinano le zone occupate dai noduli (o che erano occupate dai noduli); di ciascuna zona bianca è nota l'area e il centroide. Nella Fig. 16b sono indicate in bianco le zone di clivaggio; fra le zone determinate in questa fase può essere presente anche area individuata nella Fig. 16a come appartenente ad un nodulo, in quanto spesso nei noduli si presenta un livello di grigio piuttosto uniforme. Tuttavia il suo centroide risulterà vicino a quello precedentemente determinato nell'analisi dei noduli (Fig. 16a) e

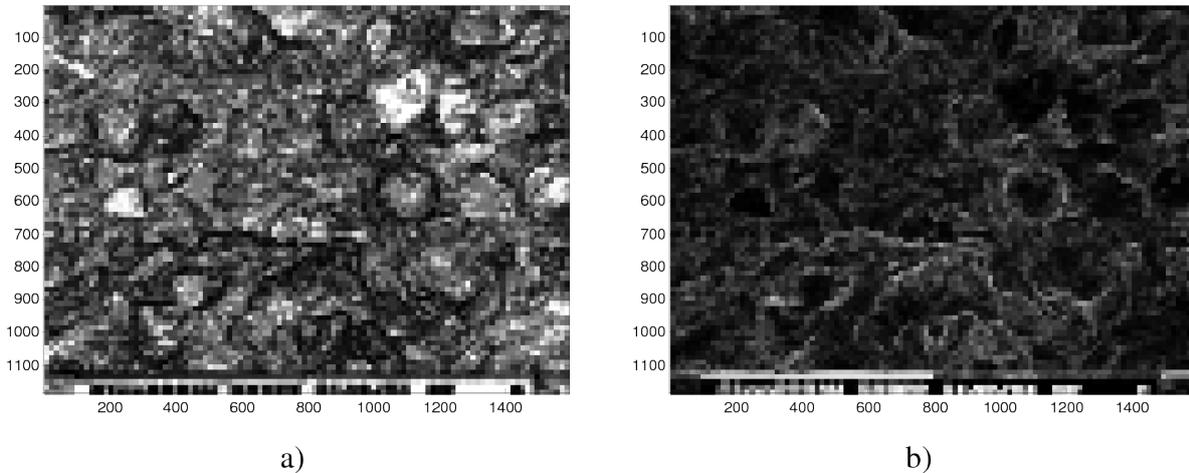


Figura 15: Rappresentazione delle elaborazioni della immagine di Fig. 12a: a) uniformità, b) varianza.

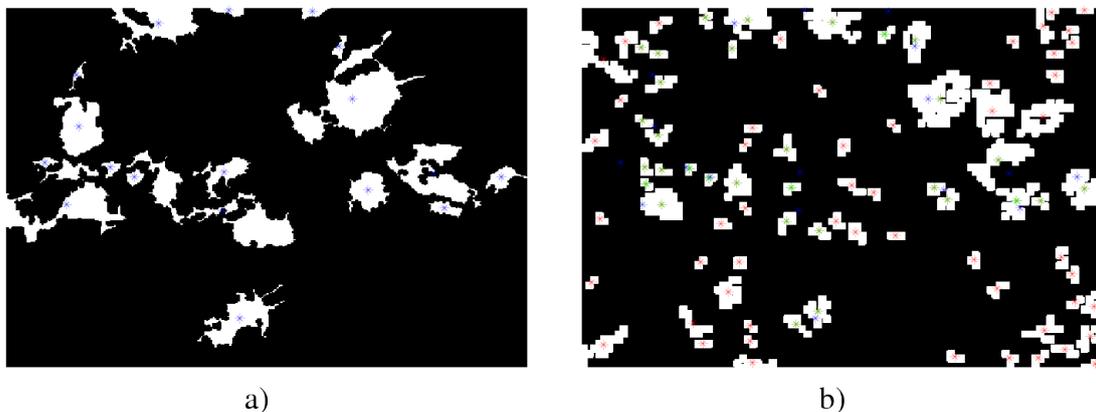


Figura 16: Calcolo degli elementi di interesse per la valutazione della percentuale di clivaggio; a) in bianco ci sono le zone occupate dai noduli di area superiore a 1000 pixel con i relativi centroidi; b) in bianco ci sono le zone occupate da clivaggio delle quali un asterisco rosso indica i rispettivi centroidi, mentre un asterisco verde indica il centroide di una zona identificata come clivaggio ma vicina più di 100 pixel al centroide di una zona individuata come nodulo.

dunque dall'insieme delle zone di clivaggio si può eliminare questa zona che in realtà appartiene all'insieme delle aree dei noduli. Il valore utilizzato per decidere se il centroide di una zona di possibile clivaggio è vicino al centroide di un nodulo è stato fissato a 100 pixel; tale valore è dello stesso ordine di grandezza dell'asse maggiore dei noduli che vengono considerati in questa analisi.

Per l'immagine in esame si è determinata la percentuale di clivaggio rispetto all'area disponibile (pari all'area totale senza l'area dei noduli); nel caso in esame questa è risultata pari al 10%.

L'analisi dei risultati ottenuti considerando i cinque valori di ΔK investigati (12 immagini per ΔK di 8, 9, 11, 13 e 20 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) evidenzia una certa dispersione dei risultati, con i valori medi del clivaggio comunque caratterizzati da un andamento crescente con il ΔK applicato (Fig. 17).

All'aumentare del valore del ΔK si hanno condizioni di sforzo più gravose, con un conseguente incremento dell'importanza di morfologie di frattura fragili. Il raggio della zona di plasticizzazione all'apice della cricca, valutato secondo la relazione (4), evolve partendo da circa 50 μm (per ΔK pari a 8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) a circa 400 μm (per ΔK pari a 20 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$). Questo implica che per buona parte dell'avanzamento della cricca, sicuramente a partire dalla zona della soglia, fino alla zona di propagazione lineare (Paris) inoltrata, la zona di plasticizzazione all'apice è comparabile con i noduli di grafite. Ne consegue anzitutto la difficoltà di considerare il ΔK come un parametro in grado di descrivere compiutamente lo stato tensionale all'apice della cricca, in quanto il fattore di intensificazione degli sforzi K è definibile nel caso di materiale continuo, omogeneo ed isotropo: dalle valutazioni effettuate, le prime due condizioni sembrerebbero essere rispettate solo in parte. Inoltre,

l'incremento della zona plastica all'apice della cricca con l'avanzamento della medesima ed il conseguente incremento dell'importanza della triassialità, agevola l'attivazione di meccanismi di frattura fragili, determinando la graduale crescita dell'importanza del clivaggio sulla superficie di frattura. L'elevata dispersione dei risultati relativi alla stima del clivaggio secondo la metodologia esposta nel presente lavoro può essere attribuita all'ingrandimento utilizzato nel rilievo delle superfici di frattura. Probabilmente un ingrandimento inferiore, cui conseguirebbe una maggiore area analizzata per ogni foto, consentirebbe di diminuire tale dispersione. La significatività dei valori medi valutati è comunque assicurata dal numero di frattografie considerate.

Nonostante il ridotto numero di valori di ΔK considerati nella sperimentazione, si può osservare che i valori medi delle percentuali delle superfici di frattura interessate dal clivaggio (P_{cliv}) sono correlabili con il ΔK secondo una relazione del tipo:

$$P_{cliv} = B\sqrt{\Delta K} \quad (9)$$

Una conferma di tale relazione mediante campagne di prova più estese, ed una ottimizzazione della procedura sperimentale con una conseguente diminuzione della dispersione dei risultati, potrebbe offrire un utile strumento di indagine per eventuali manufatti in ghisa sferoidale ferrito-perlitica rotti a fatica.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato implementato uno strumento di analisi di immagine quantitativa in grado di valutare la percentuale delle superfici di frattura a fatica di ghise

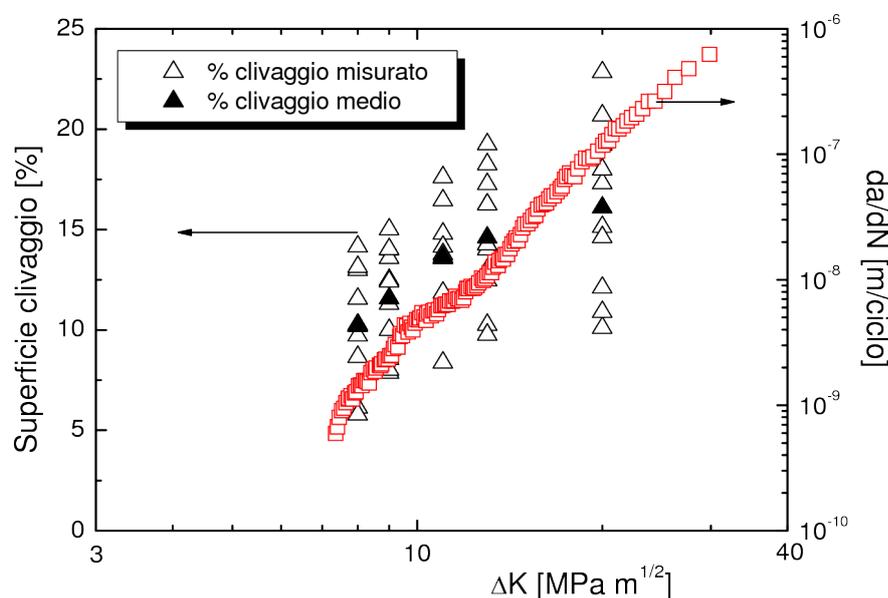


Figura 17: Evoluzione della percentuale della superficie di clivaggio al variare del ΔK applicato.

sferoidali interessate dal clivaggio. Tale risultato è stato ottenuto mediante l'analisi di immagini quantitative basata sulla segmentazione ed analisi della tessitura; per quanto riguarda la prima è stata effettuata mediante l'analisi con i level set, tecnica ben nota per la sua efficienza ed accuratezza. L'analisi delle zone con livello di grigio uniforme rientra nel più generale contesto dell'analisi delle tessiture; per risolvere il problema in esame è stato in questo caso utile considerare congiuntamente due parametri, l'uniformità e la varianza: nelle zone più uniformi il primo assume valori alti (prossimi a 1) e il secondo valori bassi.

L'analisi quantitativa delle superfici di frattura ottenute per propagazione delle cricca di fatica in una ghisa sferoidale GS500 ferrito-perlitica ha permesso una valutazione dell'evoluzione del clivaggio con l'avanzamento della cricca, evidenziando l'incremento della sua importanza con l'incremento della triassialità conseguente all'avanzamento della medesima. Una analisi della evoluzione del raggio di plasticizzazione corrispondente al K_{max} (che cresce con l'avanzare della cricca, considerato che le prove sono state svolte in condizioni di ampiezza di sollecitazione costante) pone dei dubbi sulla reale efficacia del fattore di intensificazione degli sforzi nella descrizione dello stato tensionale all'apice della cricca, in particolare nel caso in cui la plasticizzazione sia comparabile alle dimensioni degli sferoidi di grafite.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Labrecque, M. Gagne, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37 (1998) 343-378.
 [2] F.D. Grinswold, R.I. Stephens, *Int. J. of Fatigue*, 9 (1987) 3-10.
 [3] K. Tokaji, T. Ogawa, K. Shamoto, *Fatigue*, 16 (1994) 344-350.
 [4] J. Zuidema, L. Wijnmaalen, C. Van Eldijk, *Fatigue* 99, Pechino (1999) 2071-2076.
 [5] A. Refaey, N. Fatahalla, *J. of Materials Science* 38 (2003) 351-362.
 [6] K. Tokaji, T. Ogawa, K. Shamoto, *Fatigue* 16 (1994) 344-350.
 [7] H. Morrogh, "The solidification of Metals", The Iron and Steel Institute (1967) 238.
 [8] F. Iacoviello, V. Di Cocco, *Crack Paths* 2003, Parma Italia (2003) 116.
 [9] F. Keming, M. Baihe, Y. Zongsen, *Journal of Rare Earths*, 10 (1992) 208-211.
 [10] M. Onsoien, T. Skatland, O. Grong, *International Journal of Cast Metals Research*, 11 (1999) 319-324.
 [11] S. Yamamoto, Y. Kawano, Y. Murakami, B. Chang, R. Ozaki, *Metal Science*, 12 (1978) 56-60.
 [12] J. Zuidema, L. Wijnmaalen, C. Van Eldijk, *Fatigue* 99, Pechino (1999) 2071-2076.
 [13] A. A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Transactions, Royal Society of London*, 221 (1920).
 [14] R. C. Gonzales, R.E. Woods, "Digital Image Processing", Prentice Hall (2001).
 [15] R. M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein, "Textural Features for Image Classification", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3 (6) (1973) 610-621.
 [16] A. De Santis, D. Iacoviello, *Signal, Image and Video Processing*, 1 (2007) 303-320.
 [17] A. De Santis, O. Di Bartolomeo, D. Iacoviello, F. Iacoviello, *Journal of Materials Processing and Technology*, 196, (2008) 292-302.
 [18] ASTM Standard Test Method for Measurements of Fatigue Crack Growth Rates (E647-93), *Annual Book of ASTM Standards* (1993) 0301, American Society for Testing and Materials.