



## Interpolation model of fatigue crack propagation data

### Modello per l'interpolazione dei dati sperimentali di crack propagazione

M. Grasso, F. Penta, P. Pinto, G.P. Pucillo

*Dipartimento di Ingegneria Industriale Università FEDERICO II, P.le V. Tecchio 80, 80125 Napoli*

---

**ABSTRACT.** It is well known that the assessment of fatigue damage by means of phenomenological models is closely linked to the procedure and accuracy with which experimental raw crack growth data are analysed. Very often they are discontinuous and naturally irregular and their analysis has to be made on different levels to reach the model formulation or, at least, a the canonical graphical correlation between the crack growth rates and the stress intensity factor range, which is the parameter controlling the phenomenon.

Actually, when experimental results are analysed, in addition to normal scatter due to both the phenomenon random character and measurement uncertainty, some further anomalies are often usually observed in the homogeneous sequences of data points of the crack growth curves: significant deviations, apparently inconsistent and absolutely uncontrollable, of some data from the trend followed by all the remaining experimental points of the same curve. They are probably due to the random evolution of the local combinations, in the infinite points of the crack front, of the stress states and the material strengths. Thus, pursuing an improvement in the analysis of crack growth data would mean to formulate a correlation model able to reproduce more accurately the aforementioned trend and not only simply and solely improve the data points interpolation by new averaging techniques and alternative fitting methods.

Although Standard procedures to carry out both fatigue crack propagation tests and experimental data analysis are currently in use, these do not guarantee that the anomalies in acquired data are absent and do not provide a mean nor a criterion to filter them. The different analysis methods developed to interpolate crack propagation data, besides those proposed by the ASTM Standard [1], are essentially based on the preliminary choice of a technique or a method to interpret the experimental raw data, i.e. crack length values as function of time or load cycles, without establishing a correlation between the observed variables. Generally, they essentially are local interpolation methods of the data, which are not able to filter the irregularities or anomalies characterizing this type of measurements. Since the evolution of the propagation phenomenon is fast (o rapid) when the crack is approaching the critical condition, the validity range of propagation models built on results obtained from a limited number of tests is closely linked to the particular experimentation carried out. Moreover, they are not able to fit all crack growth data with the same accuracy for the whole field of cycles number of each test [].

The main analytical models found in Literature [2÷8], based on polynomial or exponential interpolation formula, do not seem having solved completely the problem. Consequently, to improve the quality of raw crack propagation data analysis we propose an interpretative model whose validity has been analysed with a very wide set of crack growth data. A similar attempt, reported in [9] and concerning a three parameters model, has been successfully tested using only experimental data produced by Ghonem and Dore [10]. However, this model revealed some limitations when used to interpolate both data produced by Virkler and co-workers [11] and those recently produced by Wu and Ni [12]. For this reason the model has been modified introducing two more

---



parameters. To validate it a further set of experimental data, produced by the Authors has been used in combination (o together) with the others data already collected.

**SOMMARIO.** Si propone un modello d'interpolazione a cinque parametri dei dati di prova di *crack propagation* ottenuti con provini in acciaio di tipologia standard. Il modello è testato utilizzando, sia dati prodotti dagli Autori mediante campioni ricavati da rotaie ferroviarie, sia dati di letteratura ottenuti a più livelli di carico. Viene poi stabilito un confronto tra il grado di accuratezza dell'interpolazione ottenibile con tale modello e quello garantito da un modello a tre parametri proposto recentemente. Inoltre, si mette in evidenza la maggiore regolarità e leggibilità dei risultati delle elaborazioni condotte col nuovo modello rispetto a quella ottenibile con altre tecniche. Il lavoro si chiude con alcune considerazioni sulla valutazione dei parametri del modello e su alcune peculiarità degli stessi.

**KEYWORDS.** Crack propagation; Model correlation; Damage law; Experimental data analysis; Fatigue; Reliability.

## INTRODUZIONE

La valutazione del danno da fatica con modelli fenomenologici è, come è noto, strettamente legata alla procedura e all'accuratezza con le quali si effettua l'analisi dei dati della sperimentazione. Dati grezzi necessariamente discontinui e naturalmente irregolari che vanno processati a vari livelli per giungere alla formulazione del modello o quanto meno alla correlazione grafica canonica tra la velocità di propagazione e il campo di variazione del fattore di intensità delle tensioni (SIF) che governa il fenomeno. Al normale *scatter* di ciascun *set* di dati, legato alla natura stessa di ogni fenomeno, e all'incertezza di misura di ogni dato, si aggiungono delle anomalie nelle sequenze omogenee di dati, identificabili nei sensibili spostamenti, apparentemente ingiustificati e assolutamente incontrollabili, di alcuni dati dal comune *trend*, che verosimilmente saranno da attribuire alla casuale evoluzione delle combinazioni locali, negli infiniti punti del fronte della cricca, dello stato di sollecitazione indotto e delle caratteristiche di resistenza del materiale. Migliorare l'analisi dei dati potrebbe significare anche adoperarsi per costruire un modello di correlazione che riesca a cogliere l'anzidetto *trend*, anziché semplicemente o solamente migliorarne la lettura e mediane i valori col miglior *best fitting* possibile.

Sebbene esistano procedure standardizzate per l'esecuzione delle prove di propagazione e l'elaborazione dei relativi dati, esse non garantiscono l'assenza di disturbi, né offrono uno strumento per filtrarli.

Le principali formulazioni analitiche, polinomiali o esponenziali, rintracciate in letteratura [2÷8] non sembra abbiano risolto adeguatamente o definitivamente il problema. Di qui, il nostro interesse a trattare l'argomento con lo scopo di contribuire a migliorare, se possibile, la qualità dell'elaborazione dei dati grezzi delle prove di propagazione, con la formulazione di un modello interpretativo degli stessi valido in tutto il campo dei valori acquisiti. Un primo tentativo, presentato in [9], ha riguardato un modello a tre parametri, testato con esito positivo con n. 3 *set* di dati sperimentali prodotti da Ghonem e Dore [10]. Tuttavia, questo modello ha mostrato qualche limite di applicabilità a tutto il campo dei dati prodotti da Virkler [11] e più recentemente da Wu e Ni [12], per cui è stato modificato con l'introduzione di altri due parametri, come si vedrà in seguito. Le verifiche positive del nuovo modello, effettuate con i dati citati e con altri ottenuti dagli Autori presso il proprio Dipartimento (DII) con prove di verifica di conformità di rotaie ferroviarie [13], chiudono il lavoro.

## DATI SPERIMENTALI IMPIEGATI PER LA VERIFICA

I vari metodi di analisi sviluppati per l'interpretazione dei risultati di prove di *crack propagation*, in aggiunta a quelli proposti dalle Norme ASTM [1], si basano fondamentalmente sulla scelta preliminare di una tecnica o modalità di lettura dei dati grezzi di una prova: lunghezza del difetto e tempo o numero di cicli nel quale si raggiunge tale lunghezza, per stabilire tra essi una correlazione. Si tratta, in genere, di metodi di interpolazione locale dei punti sperimentali, privi di capacità filtrante delle irregolarità o delle anomalie naturalmente sempre presenti in tali dati. Inoltre,



per la rapida evoluzione del fenomeno della propagazione in prossimità del cedimento finale del materiale, i modelli analitici derivati dalla lettura con questi metodi, oltre a risultare il più delle volte strettamente legati alla particolare sperimentazione effettuata, non riescono a interpretare tutti i dati con la necessaria e controllata accuratezza in tutto il campo di durata di ciascuna prova [2-5-8].

Per elaborare una nuova proposta di modellazione analitica del legame di correlazione tra lunghezza di cricca e numero di cicli di carico corrispondente, che potesse superare per quanto possibile le lacune riscontrate in altri modelli, sono stati esaminati ed interpretati diversi *set* di risultati di prove di propagazione effettuate con diversi materiali, differenti condizioni di carico e varie tipologie di provino. Si riportano di seguito i dati salienti delle fonti utilizzate, distinte per autore.

#### *Ghonem e Dore*

Il lavoro [10] propone un modello analitico basato sull'utilizzo delle *Markov chain* per descrivere l'evoluzione della cricca di fatica e tener conto, nel contempo, dello scatter dei dati sperimentali dovuto alla disuniformità microstrutturale del materiale. Le prove di riferimento sono state condotte a temperatura ambiente su provini in lega di alluminio 7075-T6 estratti da piastre dello stesso spessore e realizzati con la *center crack* perpendicolare alla direzione di laminazione delle lastre. Le condizioni di prova applicate dopo la precriccatura sono le seguenti:

	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)	R
<b>Test I</b>	22,79	13,68	9,11	0,6
<b>Test II</b>	22,25	11,13	11,12	0,5
<b>Test III</b>	15,19	6,08	9,11	0,4

Tabella 1: Condizioni di carico relative alle prove di Ghonem e Dore.

Ad ogni livello di carico sono stati testati n. 60 provini.

#### *Virkler*

Le finalità del lavoro [11] dichiarate dall'Autore sono quattro:

- determinare il metodo di calcolo delle velocità di propagazione che introduca il minimo errore quando si torna alle curve  $a-N$  integrando le curve di propagazione;
- determinare la distribuzione statistica delle durate,  $N$ , in funzione delle lunghezze di cricca,  $a$ ;
- determinare la distribuzione statistica delle velocità di propagazione in funzione del  $\Delta K$ ;
- determinare la distribuzione di un *set* di  $a-N$  stimato con i parametri della distribuzione delle velocità di propagazione.

Per raggiungere questi obiettivi, è stata condotta una sperimentazione *ad hoc* su un campione di n. 68 provini, di tipo M(T), in lega di alluminio 2024-T3, ricavati nelle dimensioni 558,8 x 152,4 mm<sup>2</sup> da piastre aventi spessore 2,54 mm. L'intaglio è stato ottenuto per elettroerosione. Le prove sono state eseguite nelle stesse condizioni ambientali e tutte, dopo la precriccatura, all'unico livello di carico indicato nella seguente tabella:

	$P_{max}$ (kip)	$P_{min}$ (kip)	$\Delta P$ (kip)	R
<b>Test I</b>	5,25	1,05	4,2	0,2

Tabella 2: Condizioni di carico relative alle prove di Virkler.

Inoltre, per studiare la distribuzione delle durate in corrispondenza di una determinata lunghezza di cricca, le acquisizioni sono state effettuate fissando preliminarmente i valori di  $a$  in corrispondenza dei quali registrare le durate..

#### *Wu e Ni*

Il lavoro di questi Autori [12] riporta i risultati di una sperimentazione condotta su n. 3 campioni di provini di tipo *compact tension* C(T), realizzati in lega di alluminio 2024-T351 con spessore  $B = 12$  mm e larghezza  $W = 50$  mm. Su un campione, le prove sono state condotte con un carico ad ampiezza variabile, mentre sugli altri due, indicati con le sigle CA1 e CA2 e di numerosità 30 e 10, rispettivamente, sono state applicati i livelli di carico indicati nella seguente tabella:



	$P_{\max}$ (kN)	$P_{\min}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)	<b>R</b>
<b>CA1</b>	4,5	0,9	3,6	0,2
<b>CA2</b>	6,118	3,882	2,236	0,63

Tabella 3: Condizioni di carico relative alle prove di Wu e Ni.

Lo scopo principale del lavoro è stato l'acquisizione di dati sperimentali statisticamente validi per studiare la variabilità dei risultati di prove di *crack propagation* ottenute con diverse condizioni di carico.

#### Grasso, Penta e Pucillo (GPP)

La sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Meccanica dei Materiali e delle Strutture del Dipartimento di Ingegneria Industriale [13] ha avuto come focus la caratterizzazione alla *crack propagation* di due tipologie di acciaio per rotaia ferroviaria. I provini impiegati, del tipo SENB con spessore  $B = 20$  mm e  $W = 45$  mm, sono stati testati nella configurazione *three point bending* ad ampiezza di carico costante. Le prove effettuate sono state in totale 21, di cui n. 15 con un acciaio e n. 6 con un altro, di diversa provenienza. Nella tabella seguente si riportano le condizioni di prova applicate a tutti i provini.

	$P_{\max}$ (kN)	$P_{\min}$ (kN)	$DP$ (kN)	<b>R</b>
<b>MATERIALE1</b>	12,03	6,015	6,015	0,5
<b>MATERIALE2</b>	12,03	6,015	6,015	0,5

Tabella 4: Condizioni di carico relative alle prove di GPP.

## FORMULAZIONE DEL MODELLO

Per formulare un nuovo modello che avesse i requisiti per colmare almeno in parte le citate lacune, sono stati analizzati i *set* di dati provenienti dalla sperimentazione brevemente descritta nel paragrafo precedente. La numerosità e la varietà dei dati dovrebbe conferire al modello la valenza di strumento affidabile di interpolazione dei dati di propagazione in un'ampia casistica di tipologie di materiali, di geometria dei provini e di condizioni di carico.

Partendo dal modello a tre parametri presentato altrove [9], si è proceduto per successivi affinamenti e con l'introduzione di altri parametri a modificarne l'espressione matematica, fino a individuare l'equazione della curva interpolante che meglio interpretasse il trend di tutti i dati processati. Il risultato finale è il seguente modello a cinque parametri:

$$a(N) = h \cdot (\tau)^p + k \cdot e^{\left( \frac{(\tau)^\alpha}{\beta - (\tau)^\alpha} \right)} \quad (1)$$

dove:

$$\tau = \frac{N + N_0}{N_f - N_0} \quad (2)$$

$N_f$  = numero di cicli a rottura;

$N_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $h$  e  $k$  = parametri da individuare mediante minimizzazione dell'errore;

$N$  = numero di cicli corrispondenti alla lunghezza di cricca,  $a$ .

Il numero di parametri apparentemente pari a 6 viene ridotto a 5 imponendo il passaggio per il primo e l'ultimo dei punti che compongono il *set* di dati grezzi. Questa condizione si traduce nelle seguenti espressioni:

$$b = a_f - k \cdot e^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (3)$$

$$k = \frac{a_0 - a_f \left( \frac{N_0}{N_0 + N_f} \right)^p}{e^{\left( \frac{\left( \frac{N_0}{N_f + N_0} \right)^\alpha}{\beta - \left( \frac{N_0}{N_f + N_0} \right)^\alpha} \right)} - \left( \frac{N_0}{N_f + N_0} \right)^p \cdot e^{\left( \frac{1}{\beta - 1} \right)}} \quad (4)$$

Con l'espressione (1), sulla cui accuratezza d'interpolazione si dirà in seguito, si calcola immediatamente la velocità di avanzamento della cricca in continuo nell'intervallo  $N_{iniziale} - N_{finale}$ , senza amplificare le irregolarità e/o le anomalie dei dati grezzi e senza perdere informazioni nei tratti iniziale e finale di detto intervallo, come accade con procedure del tipo di quelle consigliate dall'ASTM [1]. Inoltre, una volta identificati i parametri del modello, è possibile ricavare, per estrapolazione, l'andamento della curva al di fuori del campo delle durate sperimentato.

## VERIFICA DEL MODELLO

I diversi *set* di dati grezzi utilizzati per la validazione del modello proposto sono diagrammati nelle Fig. 1 e 2.

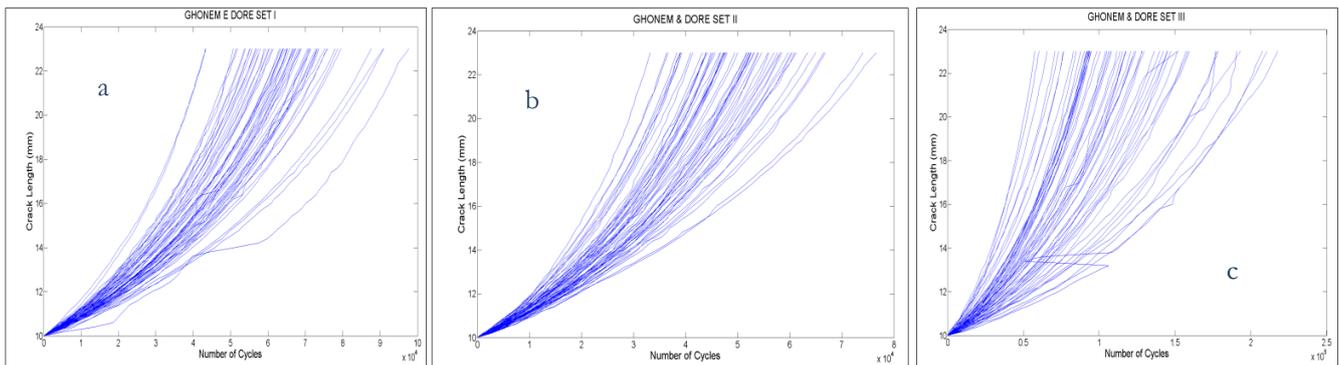


Figura 1: Dati sperimentali prodotti da Ghonem e Dore: a) *set* I, b) *set* II, c) *set* III.

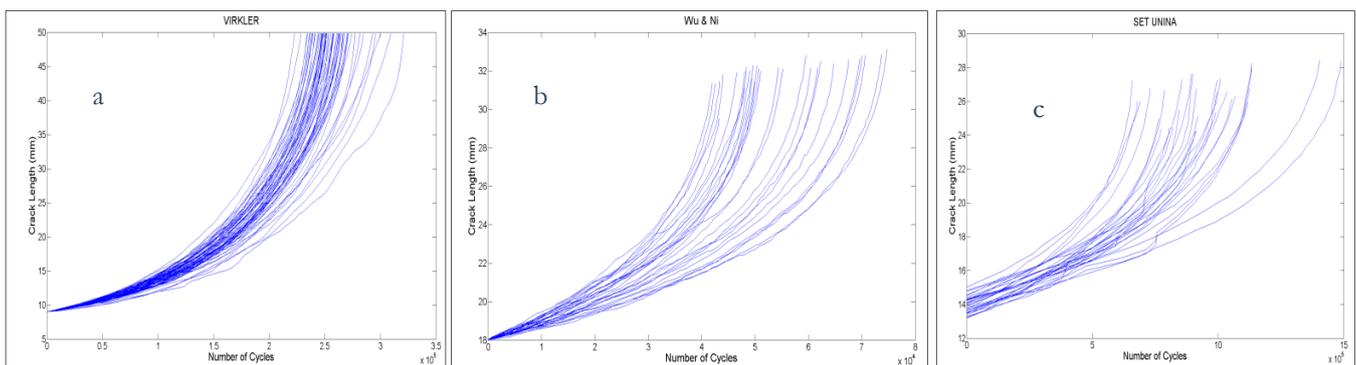


Figura 2: Dati sperimentali prodotti da: Virkler a), Wu b) e Ni, c) GPP.

Per valutare la capacità d'interpolazione dell'eq. (1), è stato calcolato il coefficiente di determinazione  $R^2$  per ciascuna curva sperimentale dei quattro *set* di dati, ottenendo valori superiori a 0,999; solo per il provino n° 29 del *set* III dei dati prodotti da Ghonem e Dore il coefficiente è sceso al di sotto di tale soglia, attingendo il valore pari a 0,97488, a motivo di alcune evidenti irregolarità presenti nei dati grezzi.



L'accuratezza dell'interpolazione è evidenziata anche dalla rappresentazione nelle Fig. 3, 4 e 5, a mo' di esempio, di alcuni set di dati grezzi, ai quali sono state sovrapposte le curve interpolanti costruite col modello (1).

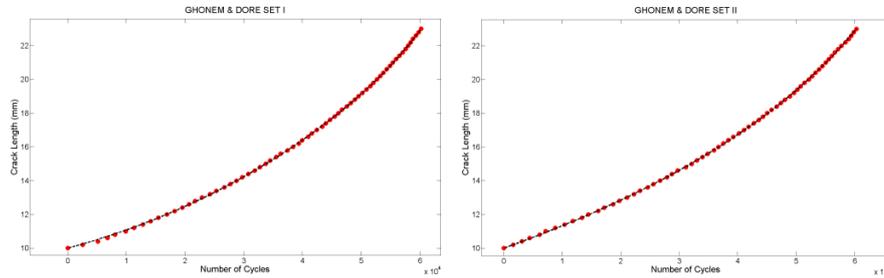


Figura 3: Dati sperimentali di Ghonem e Dore: *set I* (sx) e *set II* (dx), con le corrispondenti curve interpolanti.

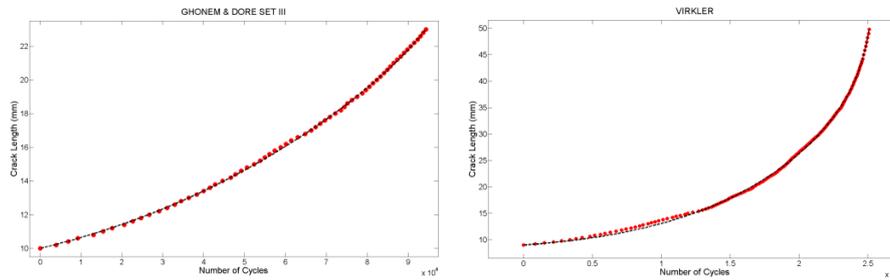


Figura 4: Dati sperimentali di Ghonem e Dore: *set III* (sx) e Virkler (dx), con le corrispondenti curve interpolanti.

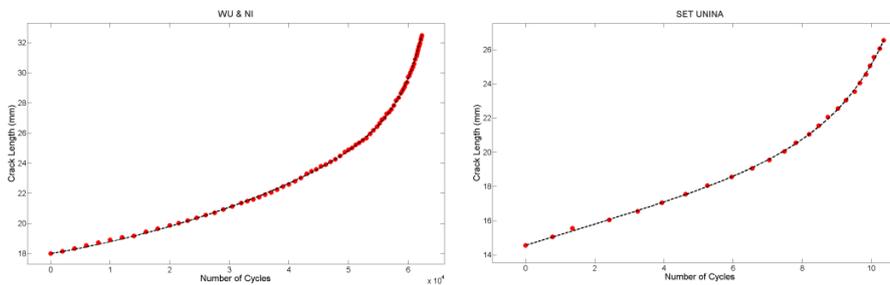


Figura 5: Dati sperimentali di Wu e Ni (sx) e GPP (dx), con le corrispondenti curve interpolanti.

In seconda analisi, è stato effettuato il *test* di normalità del  $\chi^2$  sui residui rispetto alla curva interpolante e costruito l'istogramma delle frequenze di questi ultimi. Nella fig. 8 si riportano, per brevità, solo le distribuzioni relative a due *set* di dati, uno di Virkler ed uno di Wu & Ni, mentre nelle Fig. 9÷14 sono diagrammate le medie e le deviazioni standard dei residui per tutti i *set* di dati.

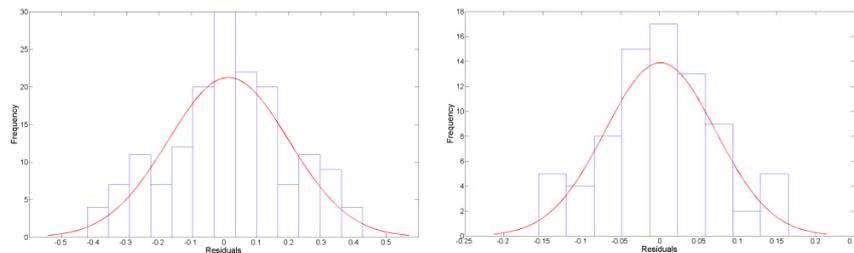


Figura 6: PDF dei residui.

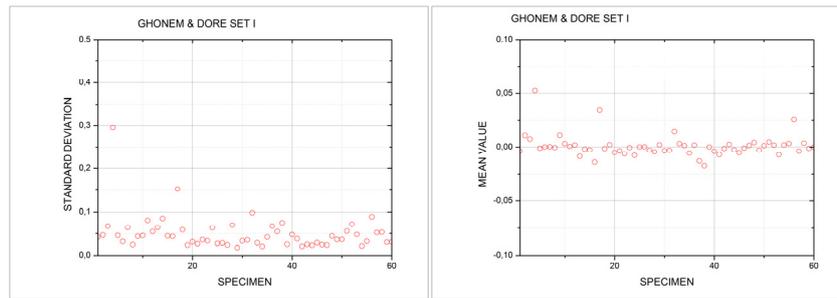


Figura 7: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set I* di Ghonem e Dore.

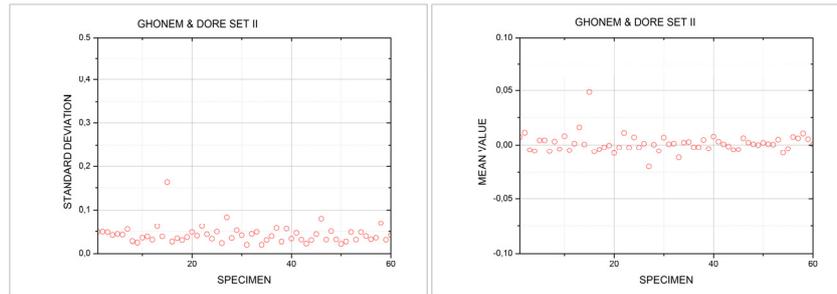


Figura 8: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set II* di Ghonem e Dore.

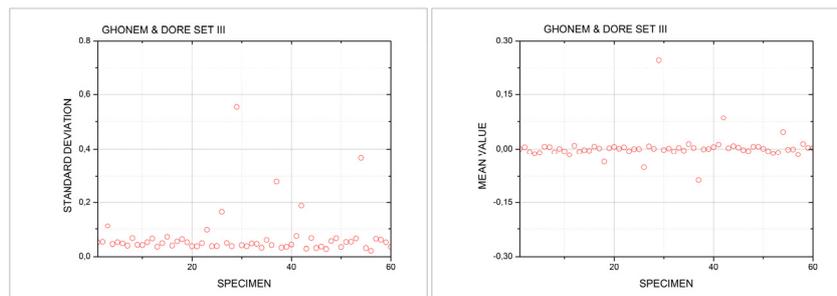


Figura 9: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set III* di Ghonem e Dore.

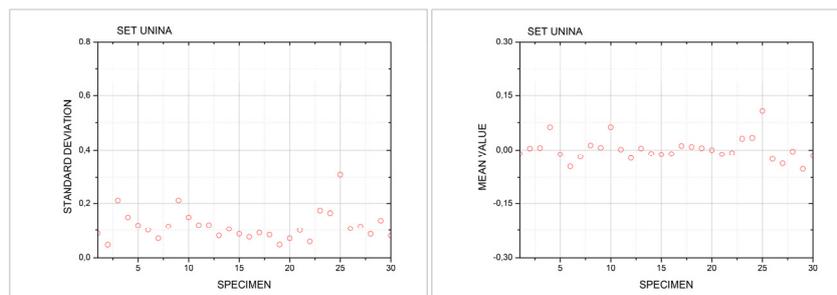


Figura 10: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set GPP*.

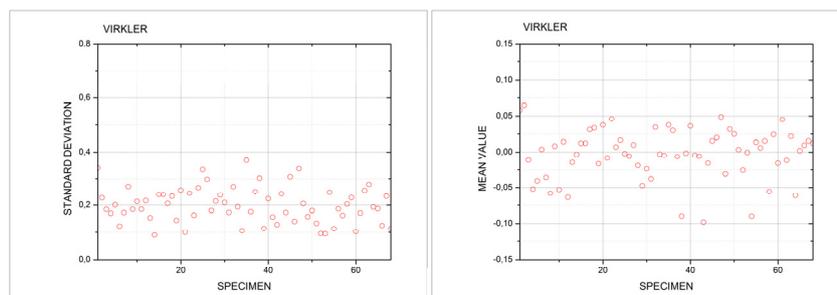


Figura 11: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set* di Virkler.

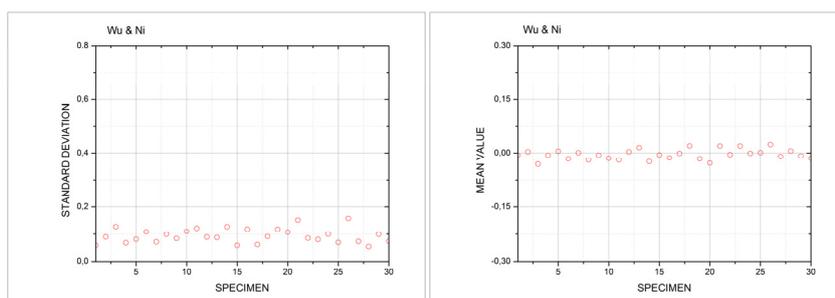


Figura 12: Media (sinistra) e deviazione standard (destra) dei residui ottenuti dall'interpolazione del *set* di Wu e Ni.

I risultati dei *test* di normalità, riportati nella Tab. 5, mostrano che per una frazione cospicua delle curve sperimentali impiegate nello studio di validazione, l'ipotesi di normalità dei residui può essere accettata con un livello di confidenza del 95%. In molti casi, invece, il *test* di normalità non è superato a motivo di alcune anomalie presenti nei dati grezzi, che si traducono in anomalie negli istogrammi delle frequenze dei residui. Come già osservato altrove [9], se si confrontano in scala ingrandita la rappresentazione dei dati grezzi e la relativa curva interpolante nelle zone corrispondenti alle anomalie presenti negli istogrammi, si nota che i punti sperimentali si discostano in maniera irregolare dal trend caratteristico degli altri punti dello stesso *set*.

		Numbers of best-fit with normal distribution of residuals	Numbers of best-fit with non normal distribution of residuals
GHONEM & DORE	<i>set</i> _I	34	26
	<i>set</i> _II	45	15
	<i>set</i> _III	43	17
GPP		21	//
Wu & Ni		35	33
VIRKLER		16	14

Tabella 5: Risultati dei *test* di Normalità.

Considerazioni analoghe valgono per gli *outliers* osservabili nei diagrammi delle medie e delle deviazioni standard dei residui di Fig. 7÷12. Essi, infatti, oltre che agli scostamenti di singoli dati grezzi dal trend comune, sono dovuti anche a scostamenti di insiemi di punti che si susseguono lungo una traiettoria dissimile, se pur per un breve tratto, da quella seguita da tutti gli altri punti. Queste anomalie alterano la risposta dell' algoritmo di minimizzazione dello scarto quadratico medio impiegato per la stima dei parametri del modello. In presenza di esse, l'algoritmo fornisce i parametri di una curva interpolante avente residui con distribuzione non simmetrica e con media significativamente discosta dal valore nullo.

Per visualizzare quanto detto, si esemplificano nelle Fig. 13÷15 due casi di curve contenenti gruppi di punti irregolari, nei quali la distribuzione dei residui è asimmetrica e presenta una media sbilanciata.

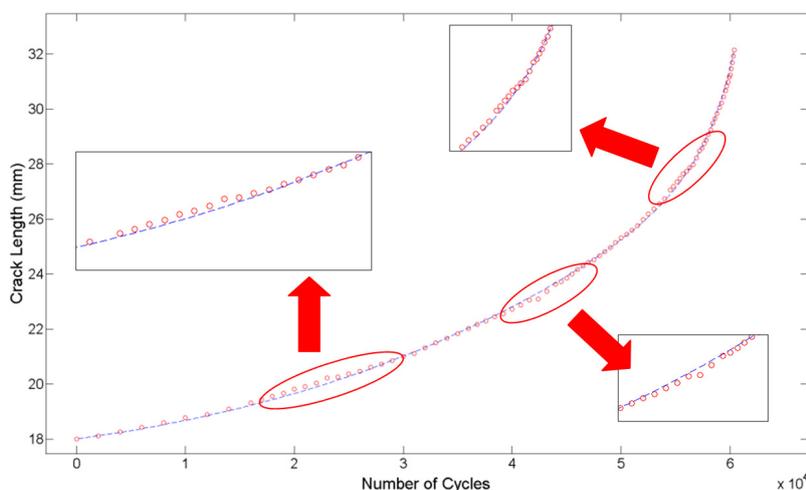


Figura 13: Interpolazione di una delle curve del *set* di Virkler.

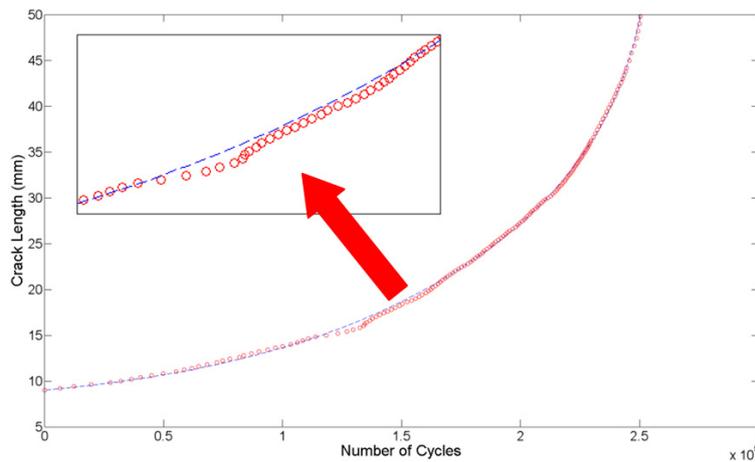


Figura 14: Interpolazione di una delle curve del set di Wu &amp; Ni.

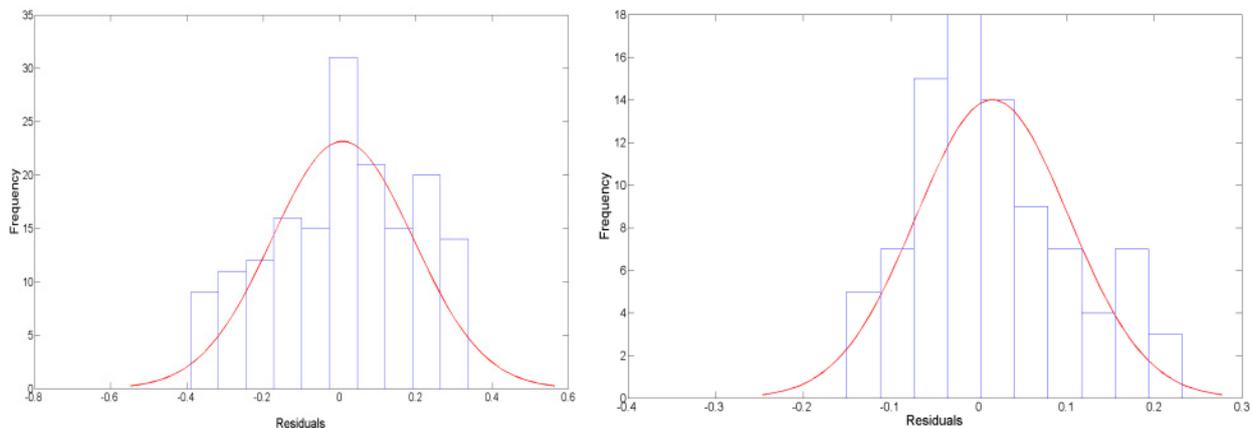


Figura 15: PDF dei residui.

Ciononostante, l'interpolazione effettuata col modello (1) risulta “visivamente” buona in entrambi i casi e il relativo coefficiente di determinazione,  $R^2$ , è prossimo all'unità.

Ne deriva che se il *test* di normalità della distribuzione dei residui non è superato, ciò è da attribuirsi alla presenza di dati sperimentali anomali concentrati in regioni poco estese del *set* di appartenenza. Pertanto, quello che può sembrare una prova di insufficiente capacità d'interpolazione da parte del modello proposto può diventare un utilissimo strumento per verificare se in un set di dati sperimentali sono presenti anomalie di distribuzione di alcuni di essi.

Questa circostanza può essere vantaggiosamente utilizzata per filtrare i dati sperimentali, ossia per eliminare tutti quei dati che si scostano in maniera eccessiva o anomala dal trend naturale, unico, seguito dagli altri punti dello stesso set, come unica deve essere la legge fisica che caratterizza il fenomeno della crack propagation in ciascun materiale privo di singolarità geometriche e di disomogeneità strutturali.

Questa lettura dei dati di prova consente di massimizzare e migliorare le informazioni ottenibili dalla sperimentazione e, nel caso specifico, di migliorare l'accuratezza delle stime dei parametri del modello, utilizzando tutti i dati disponibili.

## CONFRONTO TRA I DUE MODELLI

**N**on può mancare a questo punto un breve raffronto tra le potenzialità del modello a cinque parametri qui presentato e quello a tre parametri [9] dal quale il nuovo modello è stato derivato, per evidenziarne qualche analogia o differenza.

Un primo confronto può essere stabilito analizzando le rappresentazioni, in Fig. 16, dei dati grezzi dei 3 *set* di Ghonem e Dore e delle relative curve interpolanti costruite con i due modelli. Si può notare che in entrambi i casi i risultati



dell'interpolazione sono accettabili. Tuttavia, il modello a 5 parametri riesce ad adattarsi meglio al trend dei punti sperimentali.

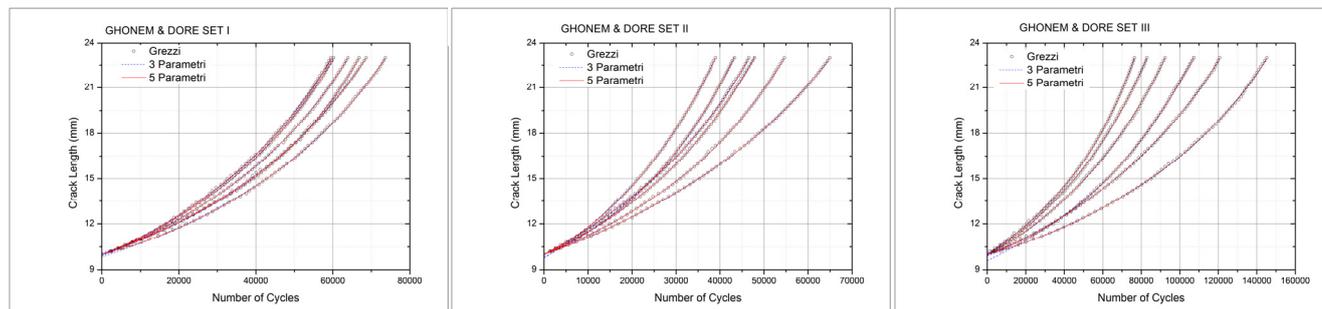


Figura 16: Interpolazione dei dati di Ghonem e Dore con i modelli a tre (linea a tratti) e a cinque parametri (linea continua).

Nella Fig. 17, ove sono riportati i dati di Virkler e di Wu e Ni e di GPP con le relative interpolazioni, sono individuabili i limiti del modello a tre parametri e l'elevata accuratezza d'interpolazione del modello a cinque parametri.

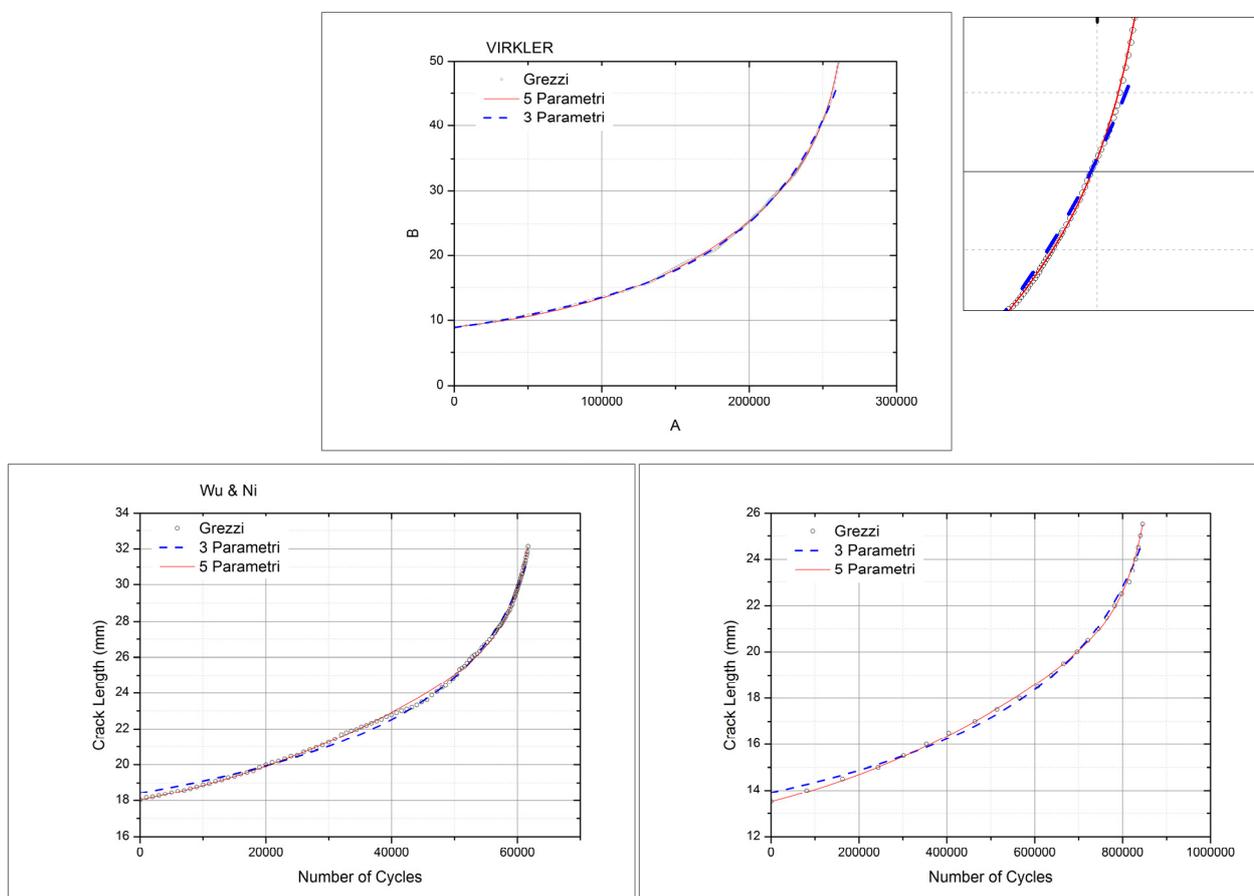


Figura 17: Interpolazione dei dati di Virkler, Wu & Ni e MPP con i modelli a tre (linea a tratti) e a cinque parametri (linea continua).

#### CORRELAZIONE TRA I PARAMETRI DEL MODELLO

Per esaminare la possibilità di ridurre il numero dei parametri presenti nel modello proposto, è stato effettuato un *test* per verificare se le stime dei cinque parametri ottenute da ciascun *set* fossero statisticamente tra loro correlabili. Allo scopo, è stato impiegato il *test* di Kendall [14] con la limitazione di accettare solo le correlazioni che



verificassero l'ipotesi di "correlazione forte" tra le stime, ossia quelle il cui coefficiente caratteristico  $\varrho$  fosse compreso tra 0,7 ed 1.

Nei diagrammi di fig. 18, 19 e 20 sono riportate le coppie di parametri del modello che hanno superato il *test* per tutti i *set* di dati esaminati.

Naturalmente, su queste *statistical relationships* occorrerebbe approfondire le indagini, estendendo la sperimentazione ad altri materiali e ad altre condizioni di carico.

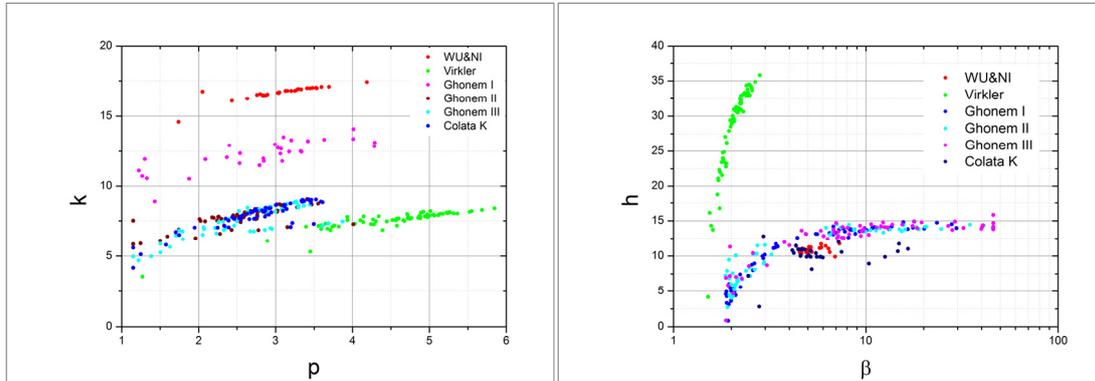


Figura 18: Correlazione tra i parametri  $p$  e  $k$  (sinistra) e  $\beta$  ed  $h$  (destra)

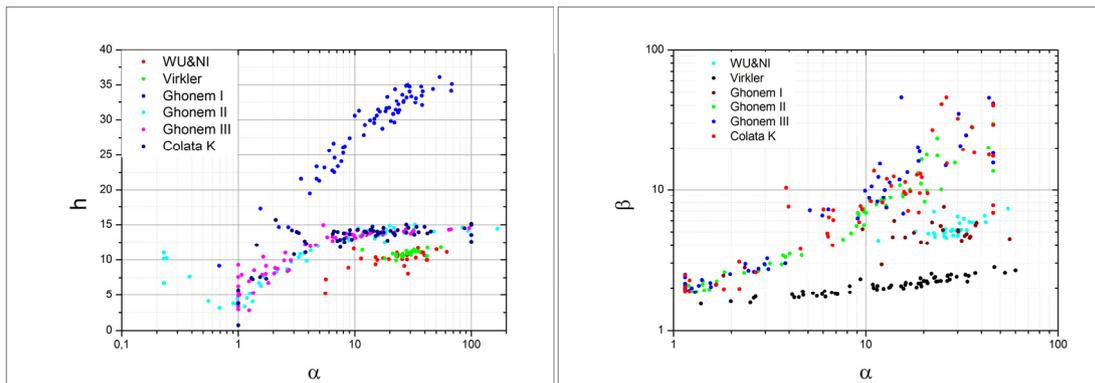


Figura 19: Correlazione tra i parametri  $\alpha$  e  $h$  (sinistra) ed  $\alpha$  e  $\beta$  (destra)

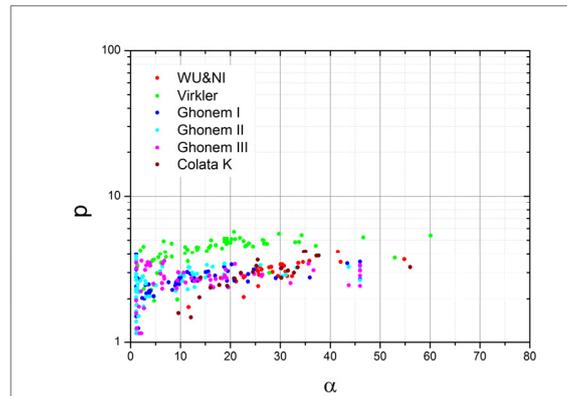


Figura 20: Correlazione tra i parametri  $\alpha$  e  $p$ .

## CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati di sei set di prove di crack propagation e con una metodologia sperimentata in precedenza, è stata derivata la formulazione di un modello analitico a cinque parametri per l'interpolazione dei dati di prova, forniti in termini di lunghezza di cricca in funzione del numero di cicli di carico. Il modello è alternativo alla



tecnica di analisi proposta dalla Normativa ASTM 647 ed è migliorativo rispetto al modello proposto dagli stessi Autori in un precedente lavoro.

E' stato mostrato come il nuovo modello sia capace di interpolare con la necessaria accuratezza un consistente numero di dati sperimentali che si differenziano per tipologia di provino, per materiale e per condizione di carico.

Inoltre, è stato evidenziato come, con un controllo incrociato effettuato mediante il *test* di normalità della distribuzione degli scostamenti dal valore medio e il calcolo del coefficiente di determinazione,  $R^2$ , sia possibile individuare quei gruppi di dati, se presenti, che si scostano in maniera anomala e ininfluenza dal trend di tutti gli altri dati, per eliminarli nella valutazioni dei risultati delle prove.

Sono stati, infine, valutati i parametri del modello e stabilite alcune interessanti correlazioni tra gli stessi, che, dopo affinamenti e ulteriori verifiche mediante una più estesa sperimentazione, potrebbero essere utilmente impiegate per costruire un nuovo modello fenomenologico, al tempo stesso robusto e versatile, per calcolare la velocità di propagazione di una cricca di fatica.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM E 647, Philadelphia, PA, USA, (2011).
- [2] B. Mukherjee, Int. J. of Fracture, 8(4) (1972) 449.
- [3] R. A. Smith, Int. J. of Fracture, 9(3) (1973) 352.
- [4] K.B. Davies, C.E. Feddersen, Int. J. of Fracture, 9 (193) 116.
- [5] J. Polak, Z. Knesl, Int. J. of Fracture, 11 (1975) 693.
- [6] A. De Iorio, D. Ianniello, F. Penta, E. Santoro, In: ECCM 8<sup>th</sup>, Naples, (1998).
- [7] J. Zheng, B. E. Powell, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 20 (9) (1997) 1341.
- [8] J.R. Mohanty, B.B. Verma, P.K. Ray, Int. J. Microstructure and Materials Properties, 5 (1) (2010) 79.
- [9] A. De Iorio, M. Grasso, F. Penta, G.P. Pucillo, Frattura ed Integrità Strutturale, 21 (2012) 21.
- [10] H. Ghonem, S. Dore, Engineering Fracture Mechanics, 17(I) (1987) 1.
- [11] D. A. Virkler, B. M. Hillberry, P. K. Goel, Transactions of the ASME, 101 (1979) 148.
- [12] W.F. Wu, C.C., Ni, Engineering Fracture Mechanics, 74 (2007) 2952.
- [13] A. De Iorio, M. Grasso, F. Penta, G.P. Pucillo, Frattura ed Integrità Strutturale, (submitted)
- [14] M.G Kendall, New York: Hafner Publishing Co (1955).