

RESISTENZA A FATICA E QUALITÀ SUPERFICIALE DI FILI PER FUNI

S. Beretta, M. Boniardi

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci 32 - 20133 Milano (MI)*

SOMMARIO: Nel presente lavoro viene discusso un modello di previsione della resistenza a fatica di fili per funi. Tale metodologia si basa sulla descrizione del cedimento per fatica dei fili in termini di propagazione dei difetti superficiali dovuti alle operazioni tecnologiche di trafilatura. Il limite di fatica viene correlato alla popolazione dei difetti superficiali ed alle caratteristiche meccaniche cicliche del materiale, espresse in termini di snervamento ciclico e soglie di propagazione delle cricche. Il modello è stato applicato all'analisi della resistenza a fatica di due differenti fili in acciaio eutettoidico, di cui uno zincato, abitualmente impiegati nel campo funiviario. I risultati ottenuti hanno permesso una generalizzazione del modello che può quindi essere proposto per l'analisi qualitativa di questi particolari componenti meccanici.

PAROLE CHIAVE: fatica, fili, acciaio eutettoidico, difetti, previsione resistenza

INTRODUZIONE

I fili per fune ottenuti mediante operazioni di trafilatura occupano una posizione peculiare nel campo della resistenza a fatica, in quanto a fronte di caratteristiche meccaniche molto elevate ($R_m=1200-2000$ MPa per applicazioni comuni) hanno un limite di fatica estremamente basso, pur non essendo classificabili come materiali "fragili". Questo ha suggerito che all'origine del cedimento per fatica vi fossero dei difetti superficiali. Il primo ad avere descritto questi difetti è stato Verpoest (Verpoest *et alii* 1985) che, analizzando fili eutettoidici per fune di diametro 1÷2 mm, ha mostrato come l'origine del cedimento per fatica sia costituita dai difetti superficiali (cavità, solchi, ripiegature con dimensioni 5-20 μm) dovuti alle operazioni tecnologiche. Verpoest aveva inoltre fornito, sulla base del rilievo del ΔK_{th} di tutti i fili esaminati, una descrizione qualitativa del limite di fatica dei fili, assimilando tali difetti a cricche lunghe. Sulla base di tale impostazione da parte degli Autori (Beretta *et alii*, 1994) era stato analizzato il comportamento di un filo per fune ($\varnothing=0.85$ mm), sulla base della curva di propagazione di cricche lunghe, per mezzo di una metodologia Equivalent Initial Flaw Sizes (Wanhill, 1986). In tale approccio i difetti equivalenti sovrastimavano la dimensione degli effettivi siti di nucleazione, poichè il modello non teneva conto del cosiddetto "short crack problem" (Miller, 1982). Solo l'analisi della propagazione delle cricche corte ha successivamente permesso (Beretta e Matteazzi, 1996) di fornire una descrizione completa dell'intero diagramma S-N di un filo per fune ($\varnothing=2$ mm) in termini di propagazione degli effettivi difetti superficiali estremi. Il risultato più rilevante di tale lavoro è stato mostrare come la risposta a fatica dei fili si collochi su livelli di sforzo,

vicini ai limiti di applicazione della LEFM, per i quali la velocità di propagazione delle cricche può essere descritta con modelli EPFM. In particolare il modello che meglio descrive la relazione tra soglia di propagazione (ΔK_{th}) e dimensione della frattura è il modello di El-Haddad (El-Haddad et alii, 1979; Beretta, 1996). Tali risultati offrono la possibilità di prevedere il diagramma S-N, ed in particolare il limite di resistenza fatica, di un generico filo considerando le proprietà intrinseche del materiale (ΔK_{th} e curve di propagazione) e l'effetto del processo tecnologico di ottenimento (la popolazione dei difetti indotti dalla trafilatura).

Lo scopo di questo lavoro è esplorare la possibilità di generalizzare la metodologia di analisi esposta in (Beretta e Matteazzi, 1996) applicandola alla previsione del limite di fatica di due diversi fili per fune. L'obiettivo è di particolare interesse ed attualità in quanto permette di impostare un'analisi della resistenza a fatica dei fili a partire dal controllo della difettosità e qualità superficiale dei fili stessi. Ciò risulta particolarmente innovativo considerando che i fili per fune, a fronte di applicazioni la cui caratteristica dominante è la presenza di sforzi ciclici, non hanno prescrizioni normative relative alla resistenza a fatica.

MODELLO DI PREVISIONE DELLA RESISTENZA A FATICA

Un moderno approccio al problema della stima della resistenza a fatica in un componente contenente difetti consiste nell'assimilare questi difetti a cricche, calcolando quindi lo sforzo ciclico al quale queste cricche-equivalenti non propagano (Murakami e Endo 1986). Poichè per le cricche corte la soglia di propagazione dipende dalla dimensione della cricca stessa, questo tipo di approccio impone di descrivere correttamente l'andamento di ΔK_{th} .

I risultati ottenuti hanno mostrato come il diagramma di Kitagawa, esprimente la relazione tra soglie di propagazione e dimensione delle fratture, possa nel caso dei fili (fig. 1) essere ben descritto dal modello di El-Haddad (El Haddad et alii, 1979). Tale modello è stato perciò assunto come base per la previsione della resistenza a fatica dei fili. I parametri necessari a definire la curva mostrata in fig.1 sono il limite di fatica teorico del materiale

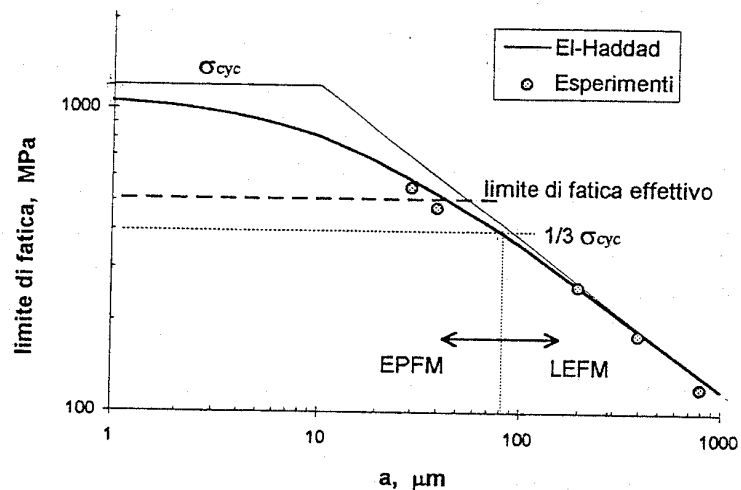


Fig. 1 - Diagramma di Kitagawa di fili eutettoidici (Beretta e Matteazzi, 1996)

esente da difetti (σ_{lim}) ed il ΔK_{th} corrispondente alle cricche lunghe ($\Delta K_{th,lc}$). A causa della inevitabile presenza di difetti dovuti alle operazioni di trafilatura, il limite di fatica teorico σ_{lim} dei fili, non può essere ricavato con prove di fatica convenzionali. Per

ricavare tale parametro è necessario ricorrere alla definizione, peraltro confermata da dati sperimentali (Beretta et alii 1997), fornita da Miller che ha proposto di considerare σ_{lim} corrispondente allo snervamento ciclico σ_{cyc} (Miller 1993). In relazione al secondo parametro da utilizzare per definire la curva di El-Haddad, si osserva che i valori di $\Delta K_{th,lc}$ in fili per fune in acciaio eutottoidico sono stati oggetto di ampie rassegne bibliografiche e discussione critica da parte di Verpoest (Verpoest et alii, 1985) e LLorca (LLorca e Sanchez-Galvez, 1987, 1989). I risultati di tali studi permettono di ottenere ΔK_{th} a partire dalla resistenza meccanica del filo stesso.

Una volta nota la relazione tra limite di fatica e dimensione dei difetti, è quindi possibile valutare il limite inferiore della resistenza a fatica di un lotto di componenti sulla base della stima del maggior difetto rilevabile (Murakami *et alii*, 1994).

Nel seguito si presenta l'applicazione di quanto sopraesposto all'analisi della resistenza a fatica di due differenti fili in acciaio eutettoidico, di cui uno zincato, abitualmente impiegati nel campo funiviario.

SPERIMENTAZIONE

Materiali

L'attività sperimentale è stata svolta su due fili in acciaio eutettoidico prelevati da due funi di corrente impiego industriale. Il primo filo (d'ora in avanti denominato FILO 1) aveva un diametro nominale di 1,1 mm ed era rivestito con uno strato di zinco dello spessore di 40-50 μm ; il filo proveniva da una fune non esercita tipo Seale a 114 fili con avvolgimento destro avente un diametro nominale di 16 mm.

Il secondo filo (d'ora in avanti denominato FILO 2) aveva un diametro di 0,9 mm e non presentava alcun rivestimento; il filo proveniva anch'esso da una fune non esercita tipo Seale a 114 fili con avvolgimento destro avente un diametro nominale di 20 mm.

In tabella I sono riportate le caratteristiche meccaniche (media di tre prove) ricavate da curve di trazione monotone e la microdurezza Vickers (media di tre prove) per i due fili esaminati.

Tabella I: Caratteristiche meccaniche e microdurezza ($m-s$) per i due fili oggetto dell'indagine

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A%	Z%	HV
FILO 1	1713 \pm 9,9	1947 \pm 33,5	1,56 \pm 0,1	51,8 \pm 3,1	630 \pm 7,8
FILO 2	1890 \pm 19,3	2120 \pm 18,5	1,1 \pm 0,1	55,6 \pm 0,8	590 \pm 10,1

Oltre alle curve di trazione monotone sono state ricavate le curve cicliche (rapporto di carico $R = 0$) per determinare lo snervamento ciclico che, come osservato nel modello di previsione della resistenza a fatica, può essere assunto come limite di fatica del materiale idealmente esente da difetti.

Entrambi i fili mostrano un addolcimento ciclico (strain softening) come osservabile dal confronto, ad esempio, tra la curva di trazione monotona e la curva ciclica del FILO1 (vedi figura 2). I valori dello snervamento ciclico, misurati come $R_{p0,05}$, sono risultati pari a 1250 MPa per il FILO 1 e 1327 MPa per il FILO 2.

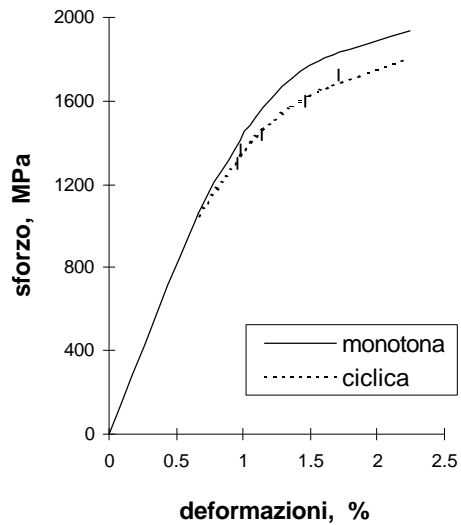


Fig. 2- Curva di trazione monotona e curva ciclica del FILO1.

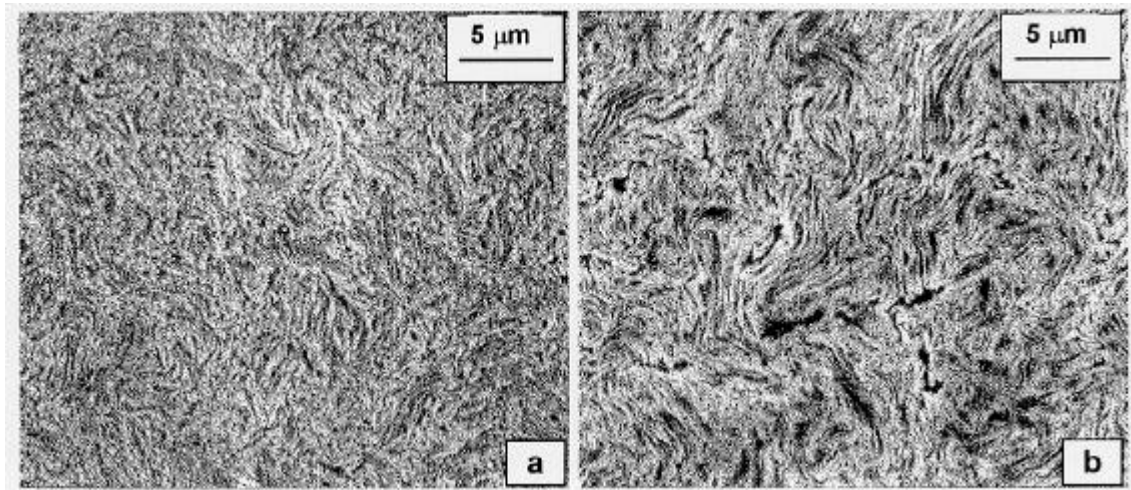


Fig. 3- Microstruttura dei fili: a) FILO1; b) FILO2.

Resistenza a fatica

I fili sono stati sottoposti a prove di fatica assiale pulsante (rapporto di carico $R = 0$) per la determinazione della curva di Wöhler. Le prove sono state condotte su una macchina con capacità di 3000 N ad una frequenza di 30 Hz, usando provini con una lunghezza di 100 mm. Il limite di fatica è stato misurato utilizzando il metodo stair-case breve sulla base di 11 provini (Dixon e Massey, 1969) interrompendo le prove ad una durata minima di $8 \cdot 10^6$ cicli. Le curve di Wöhler per i due fili sono presentate in figura 4; il limite di fatica è risultato pari a 554 MPa per il FILO 1 e 510 MPa per il FILO 2.

Le superfici di frattura dei provini utilizzati per le prove di fatica sono state osservate al SEM evidenziando, per entrambi i fili esaminati, la tipica morfologia costituita da strappi interperlitici altrove definita come “tearing topography surface” (Gray *et alii*, 1985).

Particolare è risultato invece l'aspetto alla frattura dello strato zincato del FILO 1 (vedi figura 5). Lo strato zincato mostra infatti una frattura fragile di tipo intergranulare, segno questo di una mancata collaborazione da parte del rivestimento alla resistenza a fatica della massa metallica sottostante.

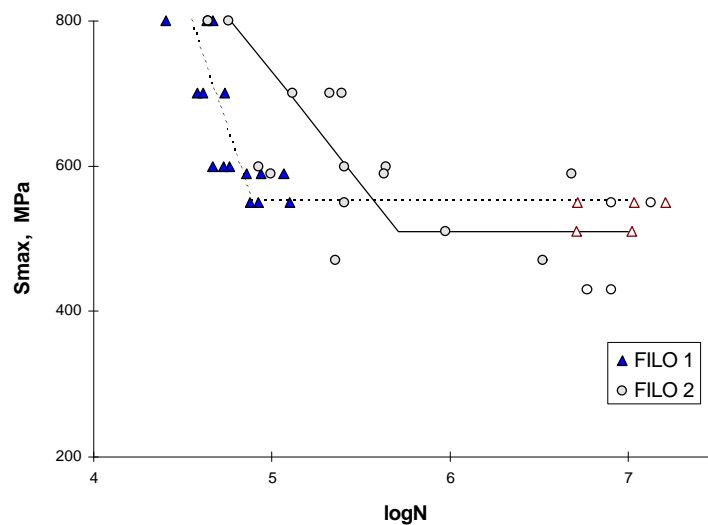


Figura 4 Diagramma S-N dei due fili esaminati: i simboli aperti indicano le prove interrotte

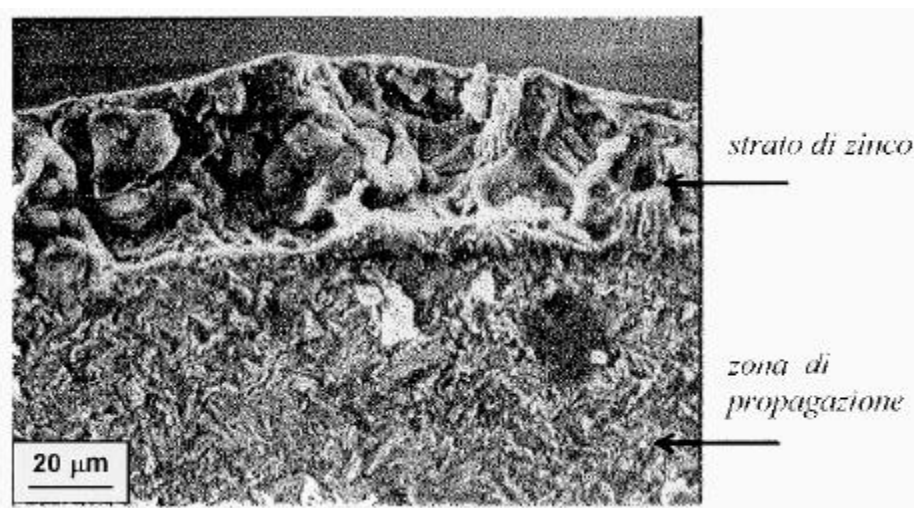


Figura 5 - Frattografia tipica del FILO1: si evidenzia la rottura intergranulare dello strato di Zn e la morfologia TTS della zona di propagazione, tipica degli acciai eutetoidici

Difettologia

La rilevazione dei difetti è stata eseguita su sezioni longitudinali lappate della lunghezza di 20 mm. L'esame al microscopio ottico ha permesso di individuare una notevole quantità di difetti prossimi alla superficie del filo.

Le tipologie di difetti osservati sono riconducibili a due tipiche morfologie: difetto tipo cricca (fig. 6) e difetto tipo ripiegatura (fig. 7).

Il parametro geometrico utilizzato per campionare i difetti è loro la profondità, misurata a partire dalla superficie esterna del filo. Nel caso del FILO1 tale valore è stato depurato dello spessore locale dello strato zincato nell'ipotesi, suffragata dall'indagine frattografica, che tale strato collabori poco alla resistenza a fatica.

Poichè il cedimento per fatica è controllato dal massimo difetto presente in una data porzione di filo, il campionamento dei difetti deve essere eseguito rilevando il difetto massimo su prefissate aree di controllo (Murakami *et alii*, 1994).

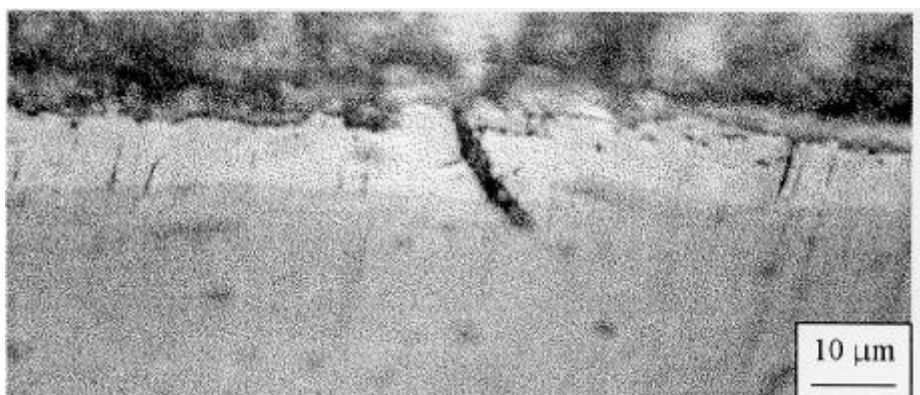


Figura 6 - Esempio della morfologia tipica di un difetto assimilabile ad una cricca.

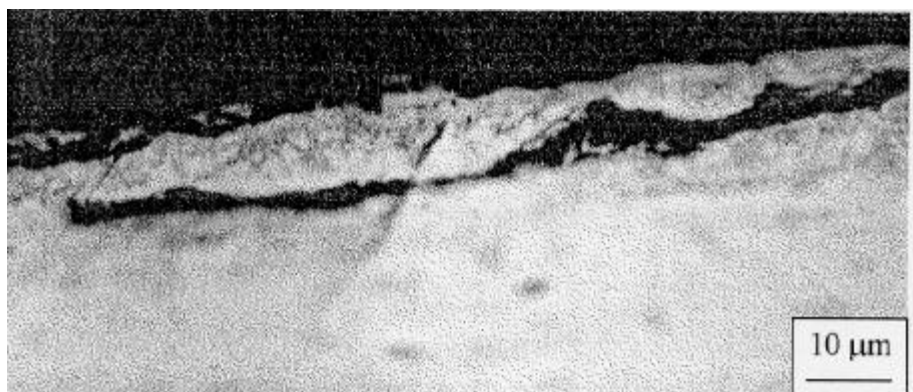


Figura 7 - Esempio della morfologia tipica di una ripiegatura.

Il rilevamento è stato quindi effettuato registrando la profondità dei massimi difetti su spezzoni di filo della misura di 20 mm. In accordo con le dimensioni medie dei difetti rilevati e le indicazioni di Murakami (Murakami, 1994), si è assunto che la profondità controllata fosse 0.01 mm, corrispondente ad una superficie di controllo $S_o = 0.2 \text{ mm}^2$.

I campioni dei difetti sono quindi analizzati mediante la distribuzione Largest Extreme Value (Gumbel, 1957). I valori dei parametri caratteristici (λ, δ) della distribuzione sono stati calcolati interpolando i dati con il metodo ML (Beretta 1995).

Nelle figure 8 e 9 sono riportate su carta di probabilità le popolazioni dei difetti rilevati e la distribuzione interpolante. Si può notare come i difetti sul FILO2 siano mediamente più profondi (circa 6 μm) di quelli rilevati sul FILO1.

STIMA DELLA RESISTENZA A FATICA

Per stimare il limite di fatica di un pezzo contenente difetti come lo sforzo ciclico al quale i difetti non propagano è necessario calcolare il fattore d'intensità degli sforzi all'apice dei difetti stessi. Nel caso dei fili per fune le numerose osservazioni sperimentali (Verpoest et

alii, 1985; Beretta et alii, 1994; Beretta e Matteazzi, 1996) concordano nel mostrare come la forma delle microcricche sia semicircolare nelle fasi iniziali della propagazione.

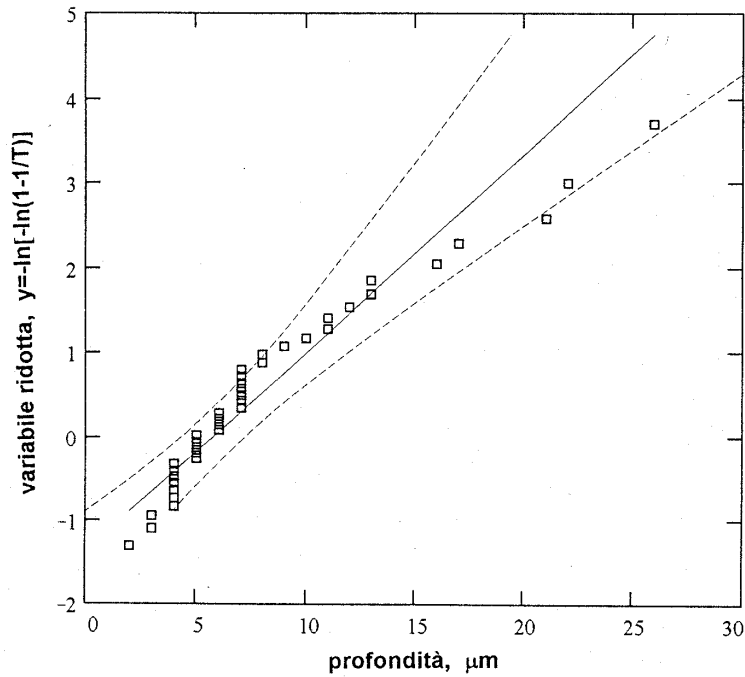


Figura 8 - Popolazione delle profondità dei difetti rilevati sul FILO1.

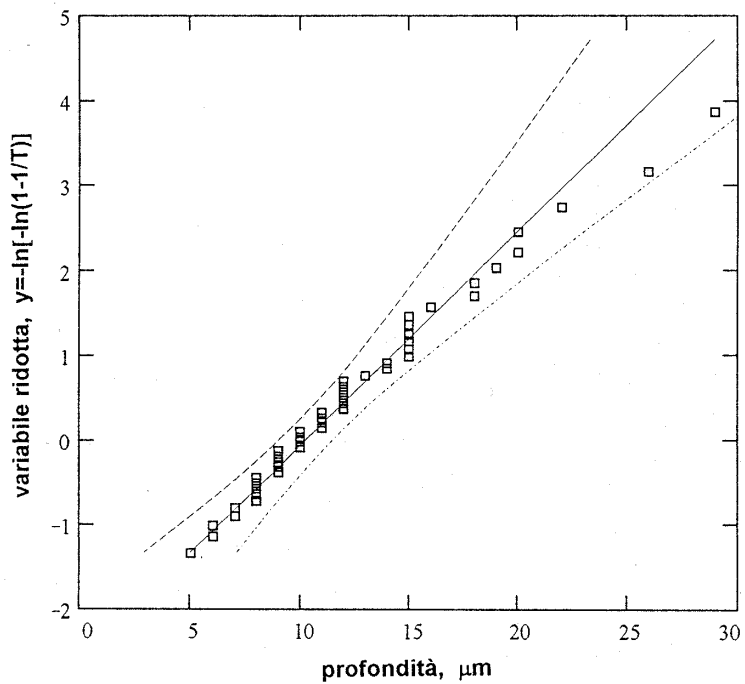


Figura 9 - Popolazione dei difetti rilevati sul FILO2.

Il valore massimo del SIF lungo il fronte di una tale cricca può essere calcolato come (Murakami e Endo, 1986; Tanaka e Akiniwa, 1997):

$$\Delta K = 0.728 \cdot \Delta S \cdot \sqrt{p \cdot a} \quad (1)$$

dove a è la profondità del difetto. Il parametro a_o , detto di El-Haddad, che rappresenta la dimensione fittizia di una cricca lunga che non propaga allo sforzo ciclico σ_{lim} , è quindi espresso dalla relazione:

$$a_o = \left(\frac{\Delta K_{th,lc}}{0.728 \cdot S_{lim}} \right)^2 \cdot \frac{1}{p} = \left(\frac{\Delta K_{th,lc}}{0.728 \cdot S_{cyc}} \right)^2 \cdot \frac{1}{p} \quad (2)$$

Considerando che dalle relazioni di Verpoest e LLorca si può stimare un $\Delta K_{th,lc}$ per le cricche lunghe ($R=0$) di 4 Mpa \sqrt{m} per il FILO1 e di 3.7 MPa \sqrt{m} per il FILO2, ne risulta che il parametro a_o vale 6.15 μm per FILO1 e 4.67 μm per FILO2.

La relazione che esprime il limite di fatica al variare della profondità del difetto risulta quindi espressa dalla relazione:

$$\Delta S_{th} = S_{cyc} \cdot \sqrt{\frac{a_o}{a_o + a}} \quad (3)$$

Sulla base di tale relazione è possibile stimare il limite inferiore della resistenza a fatica di una serie di componenti considerando la dimensione del difetto che ricorre mediamente una volta ogni componente o una volta ogni lotto di componenti (Murakami et alii, 1994). Detta S la superficie esterna di uno spezzone di filo soggetto alle prove di fatica, il *periodo di ritorno* del difetto che ricorre una volta ogni filo risulta $T_1=S/S_o$. Considerando un lotto di 10 provini, il *periodo di ritorno* del difetto che ricorre una volta ogni lotto di componenti risulta $T_{10}=10 \cdot S/S_o$. Conoscendo i parametri caratteristici delle distribuzioni dei difetti è possibile ricavare la dimensione dei difetti corrispondenti a T_1 e T_{10} , che introdotti nella eqn. 3 permettono di ricavare le stime dei limiti inferiori della resistenza a fatica. I risultati riassuntivi dell'analisi sono riportati in Tab.II e, come osservabile dalla fig. 10, sono in buon accordo con i risultati delle prove sperimentali. In particolare si può notare come le stime del limite inferiore della resistenza a fatica corrispondenti al difetto con tempo di ritorno di un filo - $S_{th}(T_1)$ - siano, per entrambi i fili, coincidenti con l'estremo inferiore della banda di dispersione dei dati sperimentali.

Tabella II - Risultati della stima della resistenza a fatica

	ΔK_{thlc} [MPa \sqrt{m}]	difetto T_1 [μm]	difetto T_{10} [μm]	$\sigma_{th}(T_1)$ [MPa]	$\sigma_{th}(T_{10})$ [MPa]
FILO1	4	31.2	39.0	507	461
FILO2	3.7	37.5	46.2	441	402

CONCLUSIONI

Le analisi svolte hanno permesso di ottenere stime affidabili della resistenza a fatica di due diversi fili per fune in acciaio eutettoidico, permettendo di descrivere la resistenza a fatica in termini di soglia di propagazione dei difetti superficiali connessi alle operazioni tecnologiche. In particolare lo studio ha permesso di analizzare, con lo stesso modello interpretativo, anche il caso di un filo zincato. Più in generale il modello qui descritto riassume lo stato attuale dell'arte della resistenza a fatica dei fili, permettendo di valutare

la resistenza a fatica di questi componenti sulla base del campionamento dei difetti superficiali e del rilievo delle caratteristiche meccaniche statiche e cicliche.

Un approccio di questo tipo, che evidenzia l'incidenza del processo tecnologico sulla resistenza a fatica, può risultare pertanto utile per il controllo di qualità dei fili stessi.

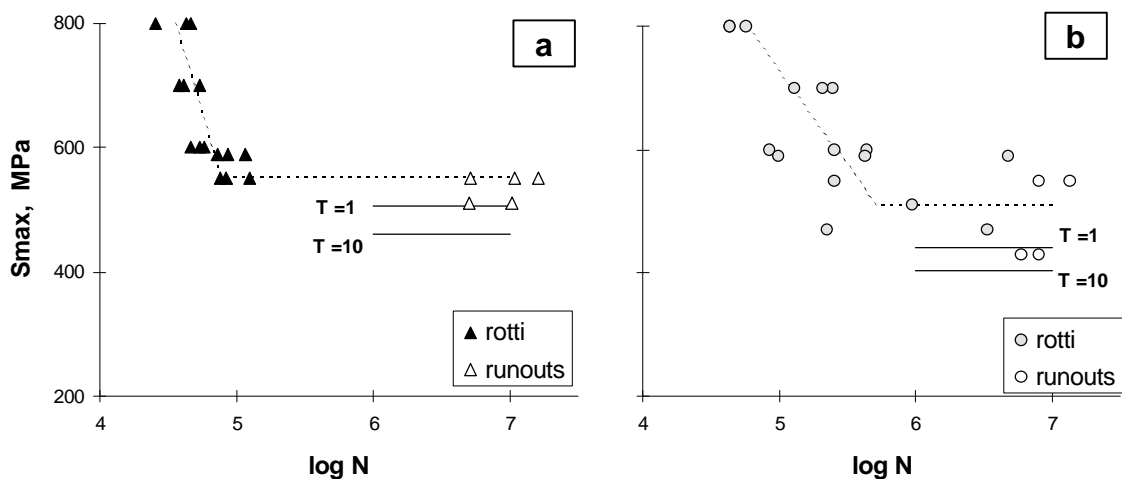


Figura 10 - Confronto tra stime della resistenza a fatica e risultati sperimentali:
a) FILO1; b) FILO2.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i Proff. Balbi e Clerici per l'incoraggiamento a portare a termine questo studio. La ricerca è stata svolta con i fondi MURST 40%-95/96 del Prof. Nicodemi e del Prof. Paolini, cui vanno i nostri ringraziamenti.

Lo studio si è svolto sotto il patrocinio del Comitato di Studio II dell'OITAF.

BIBLIOGRAFIA

Beretta S., 1995, "Appunti di Affidabilità e Sicurezza delle Costruzioni Meccaniche", CUSL, Milano.

Beretta, S., 1996, "Valutazione della resistenza a fatica in presenza di difetti", La Metallurgia Italiana, vol. 88, pp. 377-385.

Beretta, S., Boniardi, M., Matteazzi, S., 1994, "Fatigue Behaviour of Rope Eutectoid Steel Wires", Zeitschrift fur METALLKUNDE, n. 4, pp. 282-287.

Beretta S., Matteazzi S., 1996, "Short cracks propagation in eutectoid steel wires", Int. J. Fatigue, vol. 18, pp. 451-456.

Beretta, S., Blarasin, A., Endo, M., Giunti, T., Murakami, Y., 1997, "Defect tolerant design of automotive components", accettato per la pubblicazione su Int. J. Fatigue.

Dixon, W.J and Massey, F., 1969, "Introduction to Statistical Analysis", McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.

El-Haddad, M.H., Smith, K.N., Topper T.H., 1979, "Fatigue crack propagation of short cracks", *J. Eng. Mater. Tech. ASME Trans.* 101, pp. 42-46.

Gray III G.T., Thompson A.W., Williams J.C., "Influence of microstructure on fatigue crack initiation in fully pearlitic steels". *Met. Trans A*, vol. 16, pp. 753-760.

Gumbel E.J, 1957, "Statistics of Extremes", Columbia University Press, New York.

LLorca, J. e Sanchez-Galvez, V., 1987, "Fatigue Threshold Determination in High Strength Cold Drawn Eutectoid Steels", *Engng. Fract. Mech.*, vol. 26, pp. 869-882.

LLorca, J. e Sanchez-Galvez, V., 1989, "Fatigue Limit and Fatigue Life Prediction in High Strength Cold Drawn Eutectoid Steel Wires", *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol. 12, pp. 31-45.

Miller, K.J., 1982, "The short crack problem", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol. 5, pp. 223-232.

Miller, K.J., "Materials science perspective of metal fatigue resistance", *Mater. Sci. Technology*, vol. 9, pp. 453-462.

Murakami, Y., 1994, "Inclusion rating by statistics of Extreme Values and Its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Tehcnol.*, vol. 99, pp. 345-351.

Murakami, Y. and Endo, M., 1986, "Effect of Hardness and crack geometries on ΔK_{th} of small cracks emanating from small defects", *The Behaviour of Short Fatigue Cracks* (K.J. Miller and E.R. de Los Rios Eds.), MEP, London.

Murakami, Y., Toriyama T., Coudert, E.M., 1994, "Instructions for a new method of inclusion rating and correlation with the fatigue limit", *J. Testing and Eval.*, vol. 22, pp. 318-326.

Tanka, K and Akiniwa, Y., 1997, "Fatigue limit of materials with small defects", *Proc. Conf. Engineering Against Fatigue*, Sheffield.

Verpoest, I., Arnouldt, E., Deruyttere, A., 1985, "The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wires", *Int. J. Fatigue*, vol. 4, pp. 199-214.

Wanhill R., 1986, "Short Cracks in aerospace structures", *The Behaviour of Short Fatigue Cracks* (K.J. Miller and E.R. de Los Rios Eds.), MEP, London.