

## APPLICAZIONE DEL CRITERIO “VITA SICURA” AI TUBI PER CILINDRI IDRAULICI

M. Cristea<sup>a</sup>, H. Desimone<sup>b</sup>, S. Beretta<sup>c</sup>, E. Paravicini Bagliani<sup>d</sup>

*a, b, d: Tenaris Dalmine R&D Center, via Levate 2 - 24044, Dalmine (BG), e-mail: [mcristea@dalmine.it](mailto:mcristea@dalmine.it); [hdesimone@dalmine.it](mailto:hdesimone@dalmine.it); [epbagliani@tenaris.com](mailto:epbagliani@tenaris.com)*

*c Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, via La Masa 34 – 20156 Milano, e-mail: [stefano.beretta@polimi.it](mailto:stefano.beretta@polimi.it)*

### SOMMARIO

Certe tipologie di recipienti in pressione, come i cilindri idraulici per macchine movimento terra, sono soggetti nella loro vita ad un alto numero di cicli a fatica e devono, allo stesso tempo, assicurare un'elevata resistenza contro i sovraccarichi; questi possono essere dovuti tanto a cause accidentali che ad un uso non corretto della macchina e possono verificarsi in ogni momento della vita del componente. E quindi fondamentale la valutazione dell'integrità strutturale utilizzando i concetti della meccanica della frattura elasto - plastica e del collasso plastico.

L'influenza della propagazione delle cricche in presenza di sovraccarichi sull'integrità dei cilindri idraulici determina il massimo difetto ammissibile per una progettazione di tipo “safe life”. In questo contesto, la presente memoria analizza l'effetto delle caratteristiche del materiale (come tenacità, sensibilità ai difetti, ecc) e della progettazione del cilindro sull'integrità strutturale e sul modo di cedimento dello stesso.

### ABSTRACT

Pressure vessels, such as hydraulic cylinders, are one of the typical examples for the application of structural integrity concepts based on fracture mechanics. In particular hydraulic cylinders are often subjected to high cycle fatigue and, in the same time, they have also to ensure high static capacity against overloads (which are induced both by accidents' or machine misuse) which can occur anytime in component life. In the same time it's also very important to keep into account the detrimental effect of defects and inclusions on fatigue strength. This paper starts with an engineering critical assessment based on fracture mechanics concepts and plastic collapse theory. The assessment method is validated by experimental burst pressure test. In the second part of this paper, this traditional approach is integrated with an assessment of the influence of fatigue crack growth and overloads on the structural integrity of pressure vessels.

### 1. INTRODUZIONE

I cilindri idraulici sono recipienti in pressione generalmente adottati come attuatori nei sistemi oleodinamici (per esempio, sulle macchine movimento terra o sulle gru). Le operazioni tipiche di questi componenti meccanici implicano di solito una sollecitazione a fatica ad alto numero di cicli e possono essere sottoposti a stati estremi di sollecitazione o a sovraccarichi accidentali.

Le attuali normative [1-4] richiedono la valutazione del comportamento a fatica dei tubi usando due metodi diversi a seconda della presenza o assenza di una cricca/difetto. A seguito di precedenti attività di ricerca [5], nel presente lavoro si prendono in considerazione la presenza dei difetti e la loro influenza sulla resistenza a fatica. L'analisi è basata sulla meccanica della frattura elastica lineare (“LEFM”) che considera i meccanismi microstrutturali di propagazione delle cricche lunghe, cioè le

cricche la cui lunghezza è tale che la transizione tra la nucleazione e propagazione avviene in modo completo [6].

Oltre la configurazione dei difetti proposta dalle normative (che principalmente si riferiscono alle soluzioni di Stress Intesity Factors (SIF) proposta da Newman Rau [7]), alcuni studi recenti si sono concentrati sulla evoluzione morfologica della cricca col crescere della stessa [8-10].

La maggior parte dei componenti e delle strutture ingegneristiche sono soggetti a sovraccarichi durante il servizio. È ben noto che l'applicazione di un sovraccarico può condurre ad un abbassamento della velocità di propagazione, che può persino culminare nell'arresto della cricca. Ciò è attribuito principalmente alla formazione di uno sforzo residuo di compressione all'interno della zona plastica introdotta dal sovraccarico. Inoltre, nei componenti soggetti a carichi variabili, le cricche propagano sotto ampiezza variabile piuttosto che sotto ampiezza costante. Quindi, la determinazione dell'effetto di un sovraccarico è essenziale per una previsione accurata della vita a fatica, soprattutto quando l'aspettativa di vita basata su carichi ad ampiezza costante risulta già altamente conservativa.

Lo scopo di questo studio è discutere l'applicazione e di un metodo di ECA (Engineering Critical Assessment) basato sulle analisi "fitness for service" dei tubi per cilindri idraulici. La procedura utilizzata è basata sul metodo FITNET, validato attraverso risultati sperimentali con prove "full scale". Nella seconda parte, il metodo è integrato con una analisi di propagazione delle cricche a fatica, determinando le classiche curve SN per diverse dimensioni del difetto e condizioni di carico. Infine, con questi dati si analizza l'influenza dei difetti iniziali e dei sovraccarichi sulla durata della vita sicura del cilindro idraulico.

## 2. MATERIALE

Nel presente lavoro il materiale considerato è un acciaio a basso tenore di carbonio con un carico di snervamento di 580 MPa, carico di rottura 680 MPa e un allungamento a rottura del 14%. Il fattore di intensità degli sforzi di soglia per le cricche lunghe è  $\Delta K_{th,LC} = 7,32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Allo scopo di applicare la metodologia "fitness for purpose" che sarà presentata nella sezione 3, la resistenza a frattura del materiale a temperatura ambiente è stata determinata sperimentalmente [11] utilizzando una macchina servoidraulica universale MTS 810. I risultati hanno dimostrato un comportamento di tipo "pop in" nel materiale. Secondo la definizione della norma ASTM 1820 [11] il "pop-in" corrisponde ad un aumento improvviso nello spostamento accompagnato, generalmente, da una diminuzione in termini di forza (si veda figura 1). Si sono fatte diverse prove trovando un valore medio della tenacità in termini di  $J_{mat} = 15,5 \text{ [KJ/m}^2\text{]}$ . È opportuno segnalare che i risultati sperimentali corrispondono alla parte "lower shelf" della curva di transizione di tenacità del materiale.

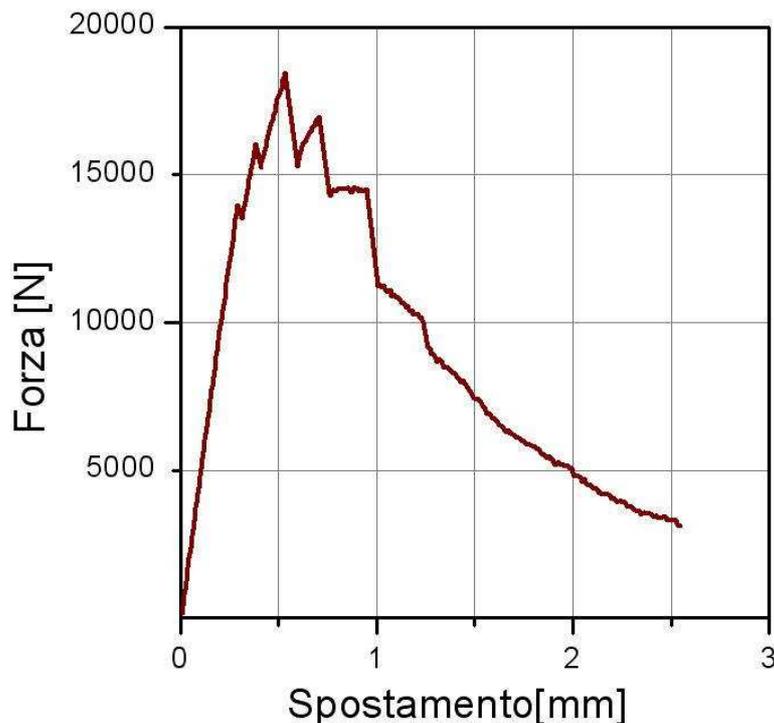


Figura 1 - Curva carico-spostamento caratterizzato dal "pop-in".

### 3. FITNESS FOR PURPOSE

In questa sezione si presenta il metodo FITNET (**F**itness for service **N**etwork) [1] basato sul principio che il cedimento avviene quando il carico applicato per avere una certa estensione della cricca supera la resistenza del materiale. La metodologia usata è basata sul "fracture criterion": per una dimensione nota del difetto è possibile determinare il carico critico che fa partire la frattura e/o per un dato valore di carico, prevedere il difetto critico.

Durante la produzione, ma anche nell'esercizio dei componenti metallici, si possono formare dei difetti. Nel caso dei componenti meccanici critici dal punto di vista della sicurezza, è opportuno applicare una procedura che definisce l'idoneità al servizio (Fitness for service) basata sui principi della meccanica della frattura in modo da consentire una valutazione attendibile dei difetti. Sebbene alcune procedure di questo tipo siano già disponibili (ad es. BS7910, API579), esiste l'esigenza di una procedura unificata a livello europeo. Per soddisfare tale esigenza è stato creato un network tematico europeo, FITNET (**F**itness for service **N**etwork).

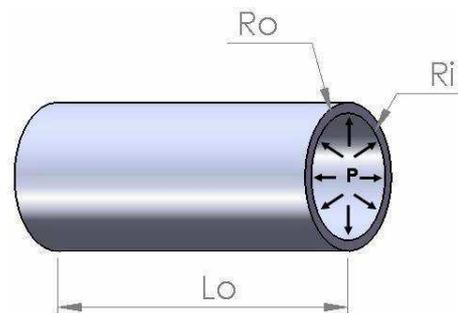
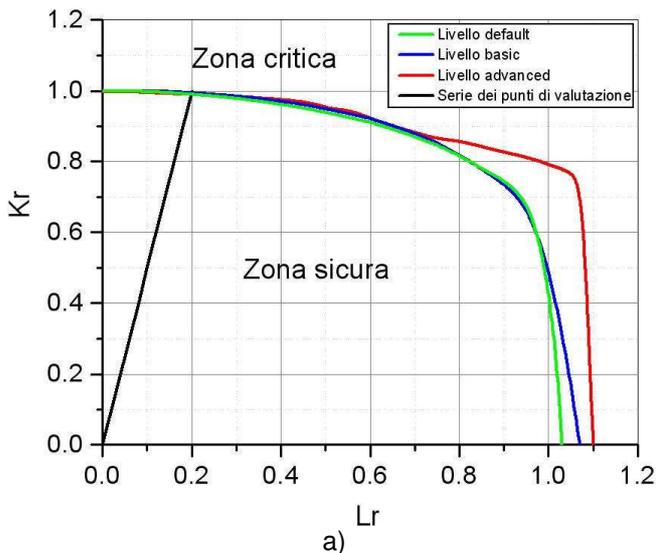


Figura 2 – a) Livelli procedura FITNET; b) Modello geometrico considerato.

#### 3.1 FITNET – modello statico

La procedura FITNET è stata applicata allo scopo di una valutazione dal punto di vista dell'integrità strutturale delle strutture metalliche soggette a carichi variabili. Il metodo è basato su tecniche che trattano l'inevitabile presenza dei difetti (conosciuti o ipotizzati) nella struttura, assieme ad un'eventuale propagazione (dovuta a meccanismi come fatica, scorrimento, corrosione, etc.).

Il carico applicato può essere introdotto come un carico singolo, ad esempio una forza di trazione, un momento flettente o una pressione interna. Nel presente caso, i cilindri idraulici sono soggetti a pressione interna. Allo scopo di ottenere il difetto critico sostenuto dal componente, le analisi sono state eseguite per differenti valori di pressione interna.

La procedura FITNET offre un range di analisi (default, basic, advanced) basate sul livello di conoscenza della caratterizzazione meccanica del materiale, ogni livello essendo meno conservativo rispetto a quello precedente. In questo modo un risultato non accettabile per un certo livello, può diventare accettabile per quello superiore. Le analisi sono basate su diverse espressioni matematiche, in funzione del livello utilizzato, che definiscono il diagramma FAD (Failure assessment diagram) [1], determinato da  $L_r$  sull'asse x, calcolato come rapporto tra il carico applicato e il carico di snervamento del materiale, e da  $K_r$  sull'asse y, definito dal rapporto tra il fattore d'intensificazione degli sforzi applicato e la resistenza a frattura del materiale. In fig. 2.a sono state riportate le curve corrispondenti ai tre livelli di analisi che delimitano le due regioni: sicura e critica. Nel presente caso di studio, è stato considerato un cilindro idraulico sottoposto a pressione interna, con raggio interno  $R_i = 90$  mm, e raggio esterno  $R_o = 105$  mm (fig 2.b). Le analisi sono state effettuate per il livello "default" sulla base delle equazioni sotto riportate (eq. 2). Inoltre, si considera un difetto superficiale semi-ellittico con rapporto  $a/c = 0,2$  (profondità del difetto/semilunghezza del difetto).

$$f(L_r) = \left[ 1 + \frac{1}{2} L_r^2 \right]^{-0.5} \left[ 0,3 + 0,7 \exp(\mu L_r^2) \right]$$

$$\mu = \min \begin{bmatrix} 0,001 \frac{E}{\sigma_y} \\ 0,6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_{r \max} = 1 + \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_m}{\sigma_y} \right]$$

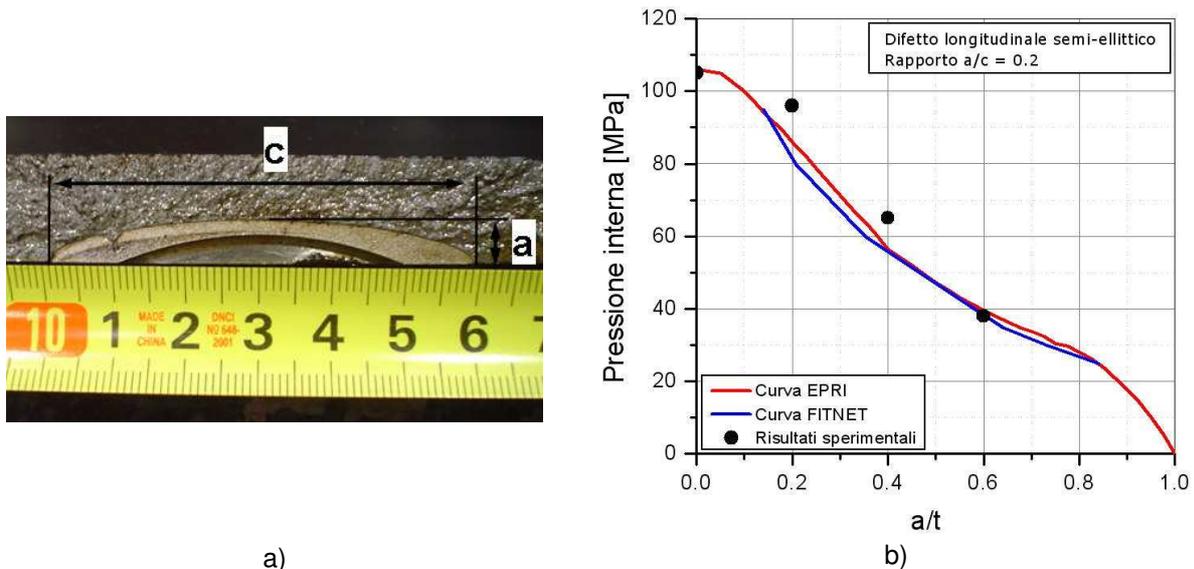


Figura 3 – Difetto artificiale e valutazione dell'integrità strutturale: a) Superficie della frattura dopo il test; b) Confronto tra la predizione teorica ed i risultati sperimentali.

Sono state determinate le coppie pressione interna critica e difetto critico per un vasto range di pressioni (fig. 3) e si è utilizzato come confronto il metodo EPRI [12]. I risultati riportati nella fig. 3.b dimostrano un ottimo accordo tra i due metodi.

### 3.2 Prove sperimentali – pressione a scoppio

Entrambi i metodi descritti nella sezione 3.1 sono stati validati attraverso prove sperimentali fino a scoppio ("burst pressure tests") su tubi lisci e intagliati artificialmente [12]. Nel caso dei tubi intagliati, i difetti sono stati realizzati artificialmente con il metodo EDM (Electro Discharge Machining) nella mezzeria del tubo. Tali difetti sono stati realizzati con profondità pari al 20%, 40% e 60% dello spessore del tubo. I risultati sperimentali sono stati riportati nella figura 3.b e dimostrano un ottimo accordo con le predizioni teoriche.

## 4. SAFE LIFE FOR SERVICE

Applicando la filosofia della progettazione a fatica di tipo "safe life", in questa sezione si presenta un criterio di accettabilità del difetto" basato sulla propagazione di cricche a fatica. L'ipotesi presa in considerazione nelle analisi "safe life for service" presuppone che il componente possa sopravvivere ad un sovraccarico accidentale che può accadere in ogni momento della sua vita.

### 4.1 Analisi di propagazione delle cricche

Allo scopo di determinare le curve SN del materiale ad un rapporto di ciclo  $R = 0$ , sono state eseguite delle analisi di propagazione delle cricche utilizzando il software commerciale AFGROW [13] in quale è stata implementata l'equazione di NASGRO [14]:

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^{n_1} \frac{\left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left( 1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (3)$$

dove  $f$  (Newman closure function) è un parametro che tiene in considerazione l'effetto di ritardo nella propagazione di cricca. Le analisi sono state effettuate per diversi difetti corrispondenti a 1%, 2% e 5% dello spessore del tubo tenendo valida l'ipotesi del rapporto  $a/c = 0,2$ . I risultati sono riportati nella fig. 6. interessante osservare come per un difetto 1% il limite statico in corrispondenza del fattore di sicurezza di 2 è molto simile al valore di vita infinita, mentre al crescere della dimensione del difetto (2%, 5%) si ha una notevole riduzione in termini di sforzo.

#### 4.2 Effetto dei sovraccarichi

Se si ipotizza un sovraccarico pari al 100% (che corrisponde ad un fattore di sicurezza di 2 nel disegno statico), il caso peggiore sarà raggiunto quando questo sovraccarico è inserito alla fine della vita a fatica del componente (si veda fig. 4).

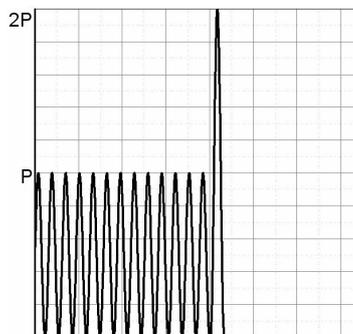


Figura 4 – Distribuzione degli sforzi con la presenza di un sovraccarico alla fine della vita prevista.

Secondo questo semplice schema, la vita sicura è la vita che corrisponde alla sopravvivenza del cilindro ad un sovraccarico 100%, e quindi dovrebbe essere determinata sia in base alle analisi statiche che a fatica. Se per esempio consideriamo una pressione  $P$  di servizio uguale a 35 MPa, è possibile determinare la dimensione permessa  $a_p$  del difetto (si veda fig. 5.a) che corrisponde ad un sovraccarico fino ad un massimo di 70 MPa. La vita sicura del componente sarà pari al numero di cicli necessari affinché la cricca propaghi dal valore iniziale  $a_i$  fino ad  $a_p$  (fig. 5.b). Il valore  $a_f$ , invece, tradotto in numeri di cicli a fatica rappresenta la vita a fatica del cilindro se i sovraccarichi non sono considerati. Naturalmente, accade sempre che il valore di  $a_p$  è minore di  $a_f$ .

Nella fig. 5.b la distanza fra  $a_i$  ed  $a_p$  è chiaramente identificata. Questa distanza corrisponde alla propagazione a fatica ammissibile della cricca iniziale  $a_i$  per avere una vita sicura considerando una pressione di sovraccarico ( $P_{OV} = 70$  MPa che corrisponde ad un  $\sigma_{OV} = 487$  MPa di sforzo di sovraccarico). Nella la stessa figura è rappresentata anche la distanza fra  $a_i$  e  $a_f$ , che corrisponde alla propagazione a fatica per uno stato di carico costante ( $P_{BL} = 35$  MPa,  $\sigma_{BL} = 227$  MPa). Questo genere di analisi è stato effettuato sulle curve effettive di propagazione delle cricche, poiché la forma del difetto cambia durante la propagazione.

I risultati delle analisi di propagazione per la determinazione delle curve SN sono illustrati nella fig. 6: tre differenti coppie di curve che rappresentano la previsione di vita fatica per le dimensioni corrispondenti dei difetti: 1%, 2% e rispettivamente 5% dello spessore del tubo e le rispettive coppie in presenza di un sovraccarico con fattore di sicurezza 2. interessante osservare che per il difetto 1% dallo spessore del tubo, la differenza fra una pressione di esercizio ed il sovraccarico è relativamente piccola, invece all'aumentare della dimensione del difetto si ha una riduzione drastica della vita sicura a fatica del componente per gli sforzi applicati vicini alla metà dello snervamento del materiale.

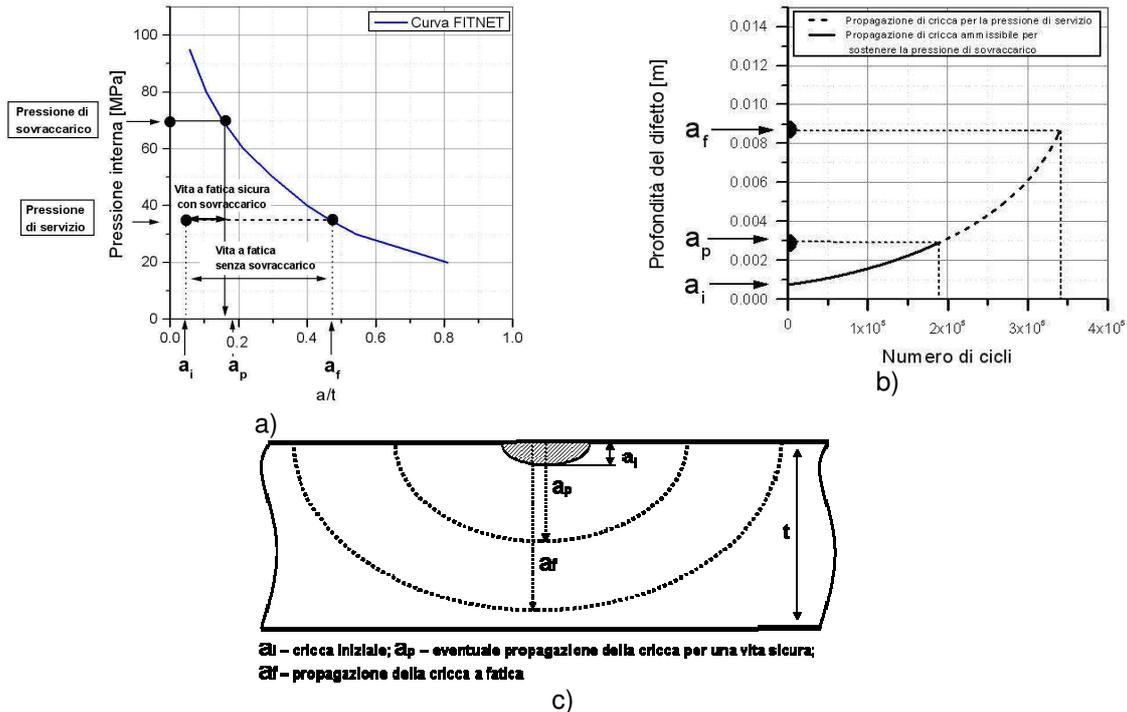


Figura 5 – Analisi di propagazione delle cricche per la vita sicura in presenza dei sovraccarichi: a) Dimensione ammissibile della cricca per sostenere il sovraccarico; b) Profondità della cricca vs. numero di cicli; c) Evoluzione della cricca durante la propagazione.

#### 4.3 Test sperimentali di propagazione delle cricche in presenza dei sovraccarichi.

In questa sezione si descrive l'effetto dei sovraccarichi in prove sperimentali di propagazione a fatica sotto ampiezza di sforzo costante. In effetti, in seguito all'applicazione di un singolo sovraccarico, la zona plastica all'apice della cricca ha un'estensione molto maggiore rispetto alla zona plastica dovuta al carico di ampiezza costante. La cricca, muovendosi in questo campo di tensioni residue negative, "vede" un  $\Delta K$  ancora più piccolo e quindi la velocità di propagazione diminuisce. Questo effetto spiega il cosiddetto fenomeno di ritardo che si osserva nella propagazione di un difetto in seguito alla applicazione di un sovraccarico.

Le prove sperimentali sono state eseguite in accordo con ASTM la E 647-00 [15], utilizzando provini C(T) con le seguenti dimensioni: spessore  $B = 20$  mm, larghezza  $W = 40$  mm e cricca iniziale  $a_i = 10$  mm. I provini sono stati ricavati in direzione trasversale. Sono stati sottoposti a test due gradi di acciaio, con simile snervamento ma diversa tenacità. Il rapporto di sforzo è stato  $R = 0,1$ . Durante il test, l'avanzamento della cricca è stato misurato attraverso il metodo della cedevolezza.

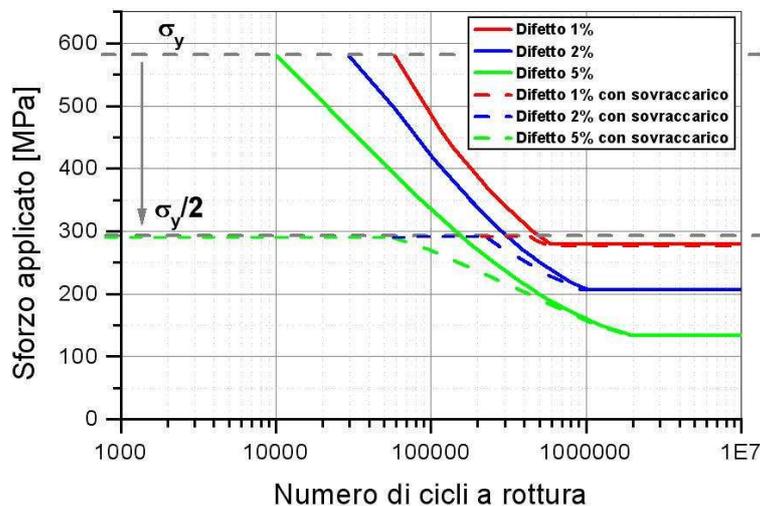


Figura 6 – Coppie delle curve S-N: differenti dimensioni del difetto per differenti condizioni di carico.

Tabella 1 - Riassunto dei test di propagazione con la presenza dei sovraccarichi.

Acciaio PHC 355 SR			
Provino	$\Delta K_{iniziale}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$\Delta K_{sovraccarico}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]	$K_{max\_applicato}$ [MPa $\sqrt{m}$ ]
1	25	50	55.5
2	30	62	68.8
3	38.25	76.5	85
3	39.4	78.8	87.5
Acciaio HT			
1	45	90	100
2	45	90	100
3	67.5	135	150

Nella tab. 1 si presenta un riassunto delle prove. importante notare che tra i due acciai utilizzati, il massimo K applicato sopportato dal provino è stato raggiunto dall'acciaio con alta tenacità, il che spiega i vantaggi di questo tipo di acciai a fronte di sovraccarichi. La figura 7 riporta i risultati della prova di propagazione per il provino 1 (acciaio con n bassa tenacità). Si vedono chiaramente i ritardi attribuiti ai sovraccarichi.

Si osserva allora come l'influenza dei sovraccarichi sia piuttosto complessa. Da una parte riducono la vita di propagazione sicura (si pensi a un unico sovraccarico a fine vita), d'altra parte rallentano la velocità di crescita della cricca.

## 5. CONCLUSIONI

Si è presentato un metodo di valutazione dell'integrità strutturale basato sui concetti della meccanica di frattura elasto-plastica e applicato ai tubi per cilindri idraulici sottoposti a fatica e a sovraccarichi. L'obiettivo è stato di determinare il carico critico e/o la lunghezza critica del difetto per i cilindri idraulici. Il metodo è stato convalidato attraverso prove sperimentali.

Inoltre, è stato analizzato il duplice effetto dei sovraccarichi: applicati a fine vita, hanno un'influenza negativa poiché riducono in modo considerevole la vita sicura, ma se applicati nel corso della vita a fatica danno luogo a un effetto benefico ritardando la velocità di crescita della cricca.

In questo senso, sembra che per arrivare ad una progettazione conservativa ma non sovradimensionata siano necessarie ulteriori ricerche.

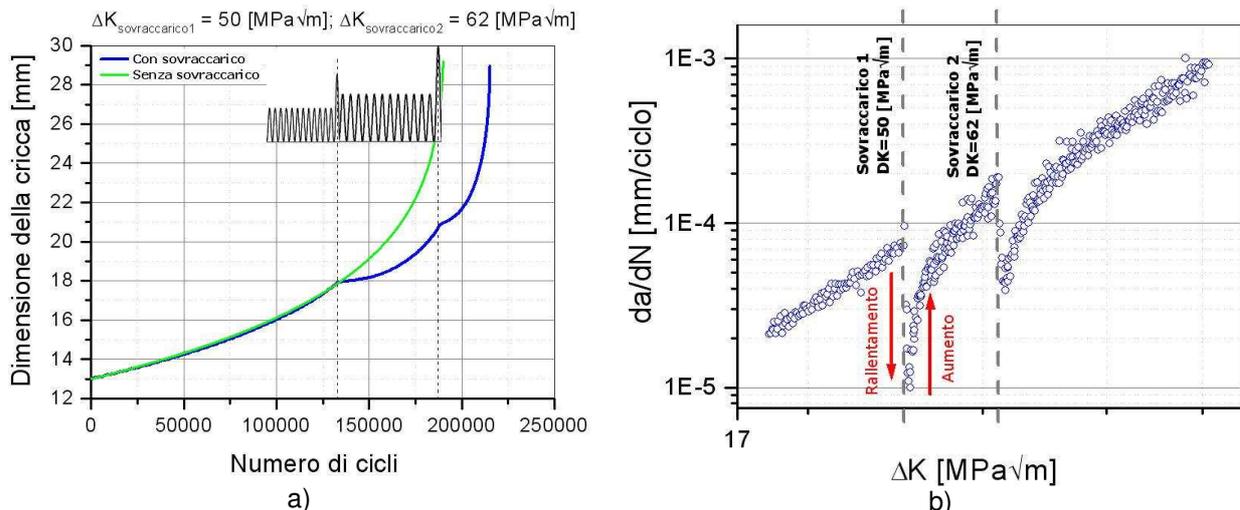


Figura 7 – a) Dimensione della cricca vs. numero di cicli in presenza dei sovraccarichi; b) Risultato test propagazione a fatica in presenza dei sovraccarichi

## RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato pubblicato con il permesso della divisione *Dalmine R&D*, diretta dal Dr. Mario A. Rossi, che gentilmente si ringrazia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] FITNET. European fitness for service procedure, Technical Report TR3, 2003.
- [2] API 579. Fitness for service. API Publishing Service, N.W., Washington, 2000.
- [3] BS 7910. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. BSI, London, 1999.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Rules for in-service inspection of nuclear plant components. Section I, 1997.
- [5] Beretta S, Carboni M, Cristea M, Desimone H, Paravicini E. Fatigue defect tolerant assessment of tubes for hydraulic cylinders. Manuscript in preparation, Int. Jnl. of Pressure Vessels and Piping, 2006.
- [6] ASTM E 647. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, 2002.
- [7] Newman JR, Rau IS (1981). An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack. Eng. Fracture Mechanics. 1981; 15:185-192.
- [8] Carpinteri A, Brighenti R. A three-parameter model for fatigue behaviour of circumferential surface flaws in pipes. Int. Jnl. of Mechanical Sciences. 2000; 42:1255-1269.
- [9] Lin B, Smith RA. Numerical analysis of fatigue growth of external surface cracks in pressurized cylinders. Int. Jnl. of Pressure Vessels and Piping. 1997; 71: 293-300.
- [10] Shlyannikov VN. Fatigue shape analysis for internal surface flaw in a pressurized hollow cylinder. Int. Jnl. of Pressure Vessels and Piping. 2000; 77:227-234.
- [11] ASTM 1820. Standard test method for measurement of fracture toughness, 2005.
- [12] Ernst H. Structural reliability analysis of hydraulic cylinders of PHC 355 SR steel subjected to internal pressure, Technical Report CINI, 2006.
- [13] Harter JA. AFGROW users guide and technical manual. U.S. Air Force Research Laboratory Technical Report AFRL-VA-WP-TR-2006- , Website: <http://afgrow.wpafb.af.mil>, 2006.
- [14] Anonymous. Fatigue crack growth computer program "NASGRO" version 3.0 – reference manual. Technical Report JSC-22267B, NASA, 2001.