

APPLICAZIONE DI UN MODELLO PER LA CORROSIONE-FATICA ALLA PREVISIONE DI VITA PER COMPONENTI D'IMPIANTO: DESCRIZIONE DI UN PROGRAMMA IN CORSO.

G.GABETTA, C.RINALDI
CISE, Tecnologie Sperimentali, Segrate, Milano.

1. INTRODUZIONE.

Quando un componente d'impianto che lavora in ambiente acquoso, contiene un difetto ed e' sottoposto a carichi variabili nel tempo (fatica), il difetto puo' propagare sotto l' azione combinata della fatica meccanica e dei processi corrosivi, fino a provocare la rottura del componente con conseguenze che possono essere gravose in termini sia economici che di sicurezza. E' percio' importante poter effettuare una previsione di vita per un componente, una volta nota la presenza di difetti.

Le problematiche relative alla velocita' di crescita delle cricche in presenza di ambiente aggressivo vengono studiate nell'ambito della corrosione-fatica; in generale, vengono effettuate in laboratorio campagne di prove volte a caratterizzare il comportamento di un determinato materiale nell'ambiente di esercizio; tramite i dati ottenuti (curve di Paris), conoscendo la storia di carico, si possono valutare la frequenza dei controlli non distruttivi e il tempo di vita a rottura previsto per il componente.

Questo tipo di previsione viene solitamente effettuato utilizzando codici di calcolo che permettono di trasferire i dati di laboratorio ai casi reali di esercizio, tramite l'utilizzo di modelli teorici. Lo sviluppo di tali codici e' particolarmente complesso nel caso di corrosione-fatica, dato il grande numero di variabili, sia chimiche che meccaniche, di cui occorre tener conto.

Un codice che permette di stimare la lunghezza di una cricca che cresce per fatica (COVASTOL) e' stato messo a punto al CCR Euratom di Ispra (Va), e permette, tra l'altro, l'integrazione di una curva di Paris che descriva il comportamento a fatica di un materiale in un determinato ambiente.

E' inoltre in corso sempre al CCR Euratom di Ispra, presso la divisione SER (ing.A.Lucia, rif. 1), un programma di prove di fatica in acqua a temperatura ambiente, su vessel di reattore nucleare tipo PWR in scala 1:5. Questi componenti , che contengono

alcuni difetti inseriti in sede di fabbricazione, vengono ciclati in acqua con livello di sforzo e frequenza variabili, allo scopo di verificare la propagazione dei difetti e di confrontarne l'andamento con le previsioni ottenute tramite l'uso del COVASTOL. Durante le prove vengono effettuati controlli non distruttivi con varie tecniche, in modo da avere qualche elemento sulla velocità di propagazione delle cricche in esame. Al termine della prova, la zona criccata viene rimossa dal vessel e la superficie della cricca osservata.

Il CISE e' intervenuto in questo programma per contribuire a generare dati su campioni e per esaminare al SEM la superficie di frattura di una cricca formatasi sull'angolo del bocchello (2). E' stato inoltre recentemente formalizzato un programma finanziato dall'EPRI e a cui collabora l'Euratom, con lo scopo di esaminare i risultati ottenuti sul vessel in scala da un punto di vista che fino ad ora era stato trascurato. Il programma si prefigge in ultima analisi un'attivita' di verifica dell'applicabilita' dei risultati delle prove su campione al comportamento dei componenti reali.

Questo lavoro intende descrivere le attivita' previste, indicando in particolare come i risultati ottenuti durante attivita' precedenti hanno portato alla formulazione di questa proposta di lavoro.

2. STATO DELL' ATTIVITA'

2.1. CORROSIONE-FATICA: IL MODELLO DI SOVRAPPOSIZIONE.

Il comportamento a corrosione-fatica dei materiali puo' essere descritto tramite alcuni modelli ben noti. In particolare, si intende nel seguito riferirsi al modello di sovrapposizione, schematizzato in Fig.1.

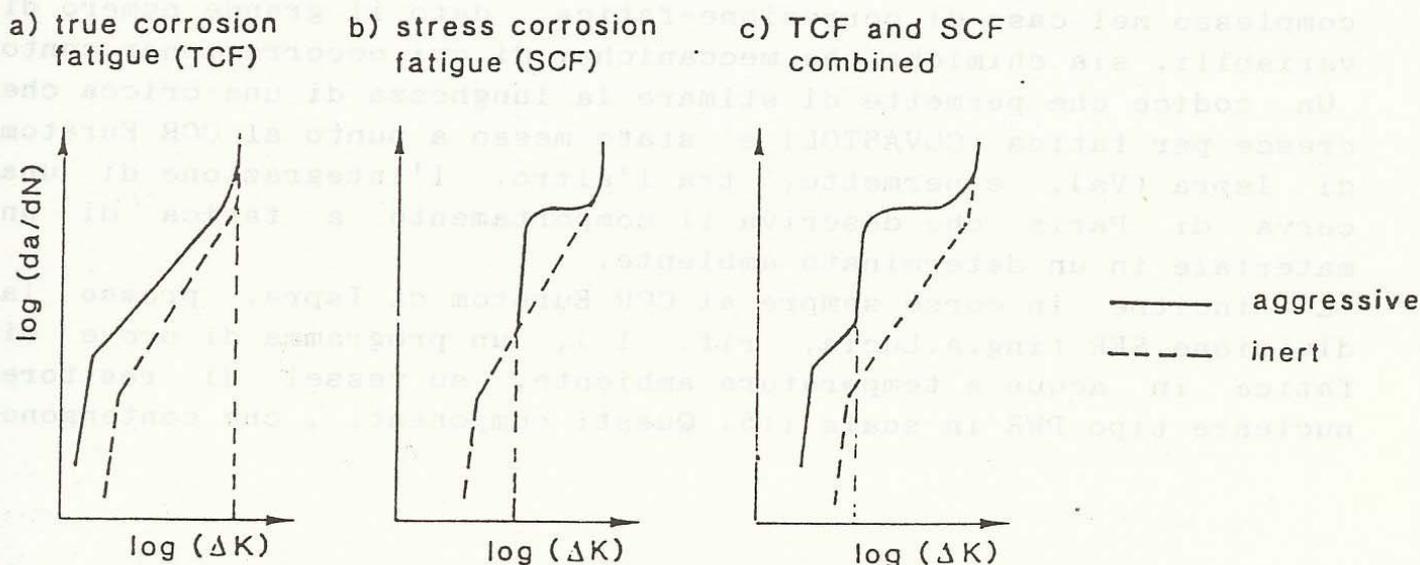


Fig.1: Modello di sovrapposizione (3).

Questo modello parte dall'ipotesi che l'effetto complessivo delle condizioni di carico e dell'ambiente aggressivo possa essere visto come somma di alcuni componenti diversi:

- fatica meccanica
- 'vera corrosione fatica' (TCF)
- tensocorrosione (SCC)

Le prime due componenti possono essere descritte da curve logaritmiche (legge di Paris), in cui si evidenzia che la velocità di crescita è una funzione del ΔK applicato; la componente di tensocorrosione ha invece la caratteristica di dipendere dal tempo: in altre parole, la velocità di crescita di un difetto, dovuta a fenomeni di tensocorrosione, è costante nel tempo. Questo provoca in particolare un ben definito effetto della frequenza di applicazione del carico. $\left(\left(\frac{da}{dN} \right)_{SCC} = \left(\frac{da}{dt} \right)_{SCC} \cdot T \right)^{(*)}$

Per quanto riguarda l'acciaio da vessel nucleare provato in condizioni che simulano l'ambiente di reattore, è stata evidenziata la presenza di tutti e tre questi componenti. Il comportamento di questo materiale può quindi essere schematizzato con il grafico in Fig.1 (c).

L'attività svolta al CISE su campioni di questo materiale ha permesso di evidenziare l'effetto della frequenza, dovuto alla presenza della componente di tensocorrosione (4); è stato inoltre osservato che la componente di tensocorrosione è presente quando il fattore di intensificazione degli sforzi supera un valore critico. Questo concetto, già noto ai corrosionisti per le prove su campioni intagliati (5), in cui è stato evidenziato che la tensocorrosione si innesca soltanto quando il K supera il valore K_{ISCC} , caratteristico del materiale, non può però a nostro avviso essere trasposto semplicemente alla situazione della corrosione-fatica. Si dovrebbe infatti prevedere un comportamento come quello schematizzato in Fig.2 (6), dove a basse frequenze corrispondono velocità di crescita molto superiori a quelle dovute alla pura componente meccanica, soprattutto a valori bassi di ΔK applicato. Quanto osservato su acciaio da vessel, invece, porta piuttosto ad ipotizzare che il valore di ΔK critico sia a sua volta una funzione della frequenza, come indicato in Fig.3. Trascurando in questa sede le implicazioni di quanto affermato e la discussione sulla validità di questa teoria, che peraltro è confermata dai dati sperimentali, importa a questo punto evidenziare che nel caso qui descritto, come conseguenza delle ipotesi fatte, la possibilità di scomporre la velocità di crescita di un difetto nelle sue componenti più semplici^(*) ci permette di correlare tra di loro prove effettuate con tecniche diverse, (prove su campioni lisci e intagliati, in controllo di

(*) Se T = tempo di salita del ciclo di carico:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_{TCF} + \left(\frac{da}{dt} \right)_{SCC} \cdot T$$

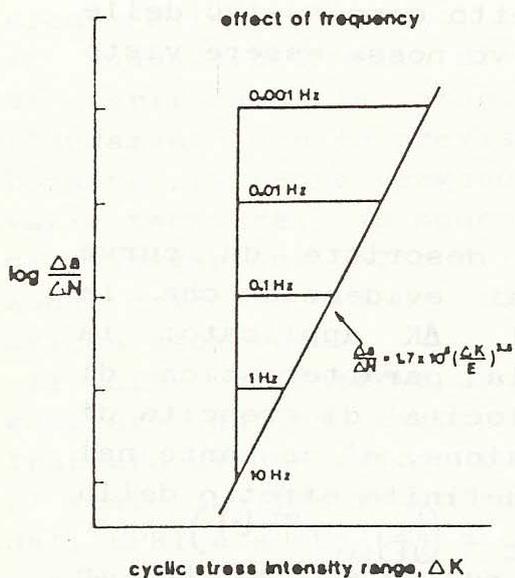


Fig. 2

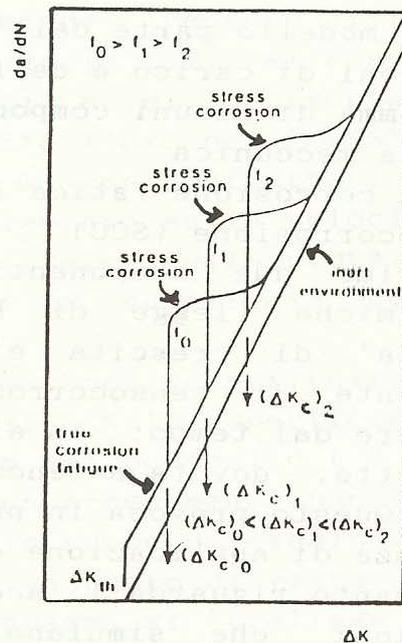


Fig. 3

carico o in controllo di deformazione, con carichi variabili in modo ciclico o monotono) e di utilizzare i diversi tipi di risultati per una previsione di vita relativa ad un componente. La verifica della validita' di questo approccio permetterebbe inoltre di estendere il metodo di previsione di vita ad altri materiali e ad altri manufatti di interesse.

2.2. RISULTATI SPERIMENTALI SU CAMPIONI DI A533B.

L' attivita' sperimentale su acciaio da vessel A533B e' in corso al CISE dal 1979; essa e' stata svolta nell'ambito di un contratto ENEL/CRTN sulla sicurezza dei reattori nucleari ed e' stata caratterizzata tra l'altro dalla collaborazione con un gruppo internazionale (ICCGR) che ha permesso l'accesso ad una grande quantita' di dati, nonche' lo scambio di informazioni con quasi tutti i laboratori impegnati, nel mondo, sulla corrosione-fatica degli acciai da vessel. I risultati ottenuti in questo ambito sono descritti in numerose pubblicazioni tra cui in particolare si possono segnalare gli atti di due conferenze IAEA (7,8).

Per quanto riguarda la previsione di vita, dai risultati ottenuti e' stato possibile ricavare:

-1' equazione della 'curva di base duttile', che rappresenta la velocita' di crescita dovuta a 'vera corrosione fatica', a diverse temperature. Questa curva, piu' alta di quella che si riferisce semplicemente alle prove in ambiente inerte, e' stata confermata

tramite prove su materiale a basso contenuto di Zolfo ed e' mostrata in Fig. 4.

-il valore della velocita' di crescita per tensocorrosione relativa alla condizione di particolare aggressivita' per impurezze; queste condizioni di prova non possono essere considerate come rappresentative di quelle esistenti in un reattore nucleare, ma non possono essere escluse all'apice di una cricca in un materiale ad alto contenuto di zolfo; la velocita' di crescita, pari a 10^{-4} mm/sec., e' stata ricavata dai risultati mostrati in Fig. 5. (6).

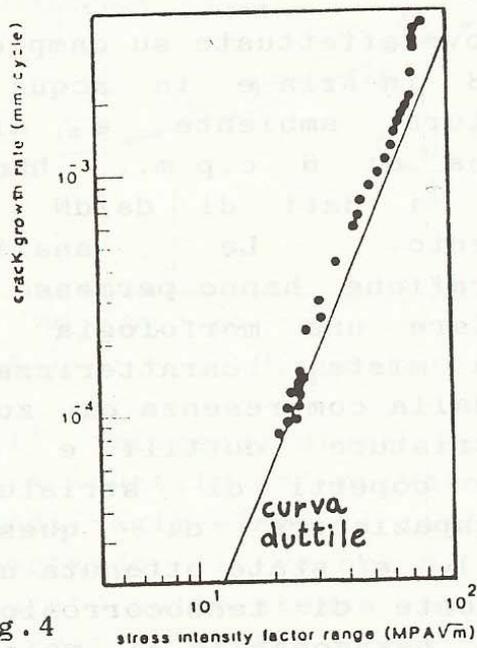


Fig. 4

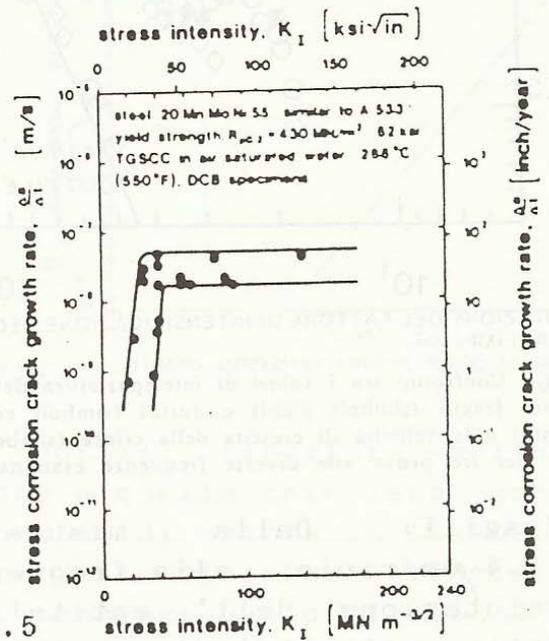
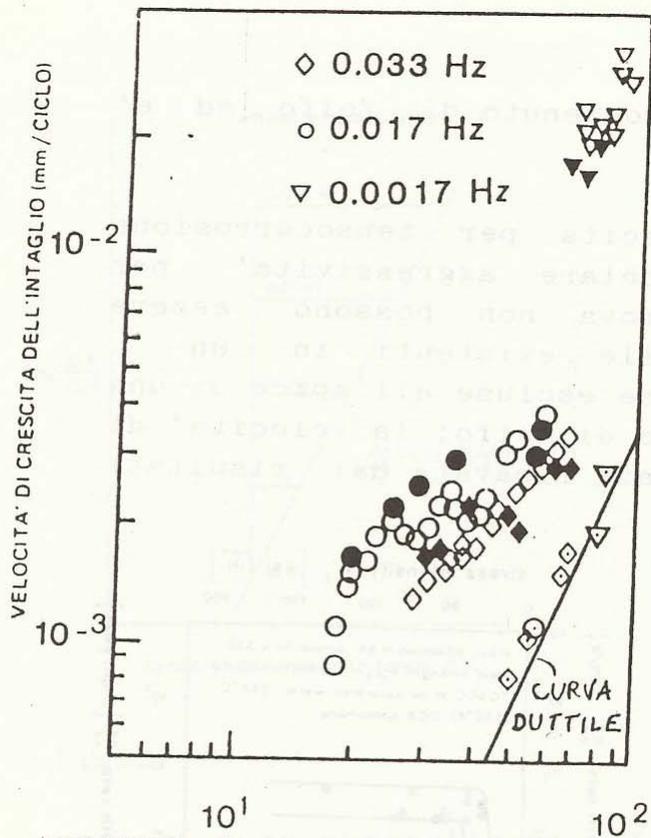


Fig. 5

La conferma della validita' del modello di sovrapposizione e' stata ottenuta tramite i risultati delle osservazioni frattografiche, sia qualitative che quantitative (9). Sostanzialmente sono state individuate due morfologie distinte, dette "duttile" e "fragile", associate ai due meccanismi di frattura in gioco (vera corrosione-fatica e tensocorrosione in Fig. 1). Ciascuna morfologia di frattura e' caratterizzata da striature di tipo diverso, la cui interspaziatura e' risultata ben correlata alla rispettiva componente della velocita' di crescita della cricca. Mentre l'interspaziatura delle striature duttili dipende dal ΔK , a qualsiasi frequenza del ciclo di carico, l'interspaziatura delle striature fragili dipende fortemente dalla frequenza del ciclo di carico e solo lievemente dal ΔK applicato (vedi Fig. 6). I valori di interspaziatura delle striature duttili cadono sulla curva di base duttile di Fig. 4, mentre quelli delle striature fragili corrispondono abbastanza



VARIAZIONE DEL FATTORE DI INTENSIFICAZIONE DEGLI SFORZI ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

Fig. 6. Confronto tra i valori di interspaziatura delle striature fragili (simboli pieni) e duttili (simboli con il punto) e le velocità di crescita della cricca (simboli vuoti) per tre prove alle diverse frequenze esaminate

fragili. Dalla misura dell'interspaziatura di queste ($1.4 \mu\text{m}/\text{ciclo}$, alla frequenza di 6 c.p.m.), e' stata ottenuta una valutazione dell' entita' della componente di tensocorrosione della velocità di crescita della cricca paragonabile ai valori calcolati dai dati macroscopici di da/dN elaborati secondo il modello di sovrapposizione: in termini temporali $da/dt \approx 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$.

2.4. CRICCA D' ANGOLO IN UN BOCHELLO DEL VESSEL (SCALA 1:5)

Una prima applicazione dei concetti fin qui esposti e' stata fatta nello studio di una cricca d' angolo cresciuta per corrosione fatica da un difetto del cladding in uno dei bocchelli del vessel in scala 1:5. In base alla storia di carico, ben nota in questo tipo di prove, e' stato possibile ricavare da calcoli agli elementi finiti i valori di $K(a)$; dalla misura dei beach marks (effettuati con variazioni ad hoc del rapporto R) sulla superficie di frattura, e' stata ricostruita a posteriori la curva $a(N)$, mostrata in Fig. 7. Le numerose variazioni di frequenza effettuate hanno reso interessante l' utilizzo del modello di sovrapposizione per una piu' corretta spiegazione dei risultati. Le analisi frattografiche hanno confermato la compresenza dei due meccanismi di vera corrosione-fatica e di tensocorrosione; alcune misure di interspaziatura delle striature duttili e fragili hanno

bene ai valori massimi di velocità di crescita previsti utilizzando il modello di sovrapposizione.

2.3. RISULTATI SPERIMENTALI SU CAMPIONI DI A508.

Le prove effettuate su campioni di A508 in aria e in acqua a temperatura ambiente e alla frequenza di 6 c.p.m. , hanno fornito i dati di da/dN di riferimento. Le analisi frattografiche hanno permesso di evidenziare una morfologia di frattura mista, caratterizzata cioè dalla compresenza di zone con striature duttili e di ventagli coperti di striature

dato risultati consistenti con le curve di velocità di crescita previste dal modello di sovrapposizione a partire dai dati ottenuti su campioni (v. Fig. 8). Più precisamente il valore

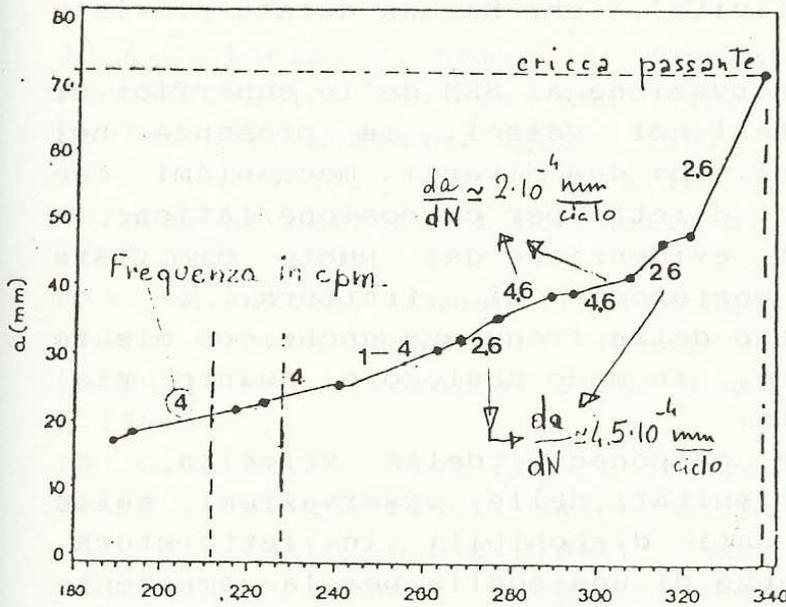


Fig. 7

Migliaia di cicli

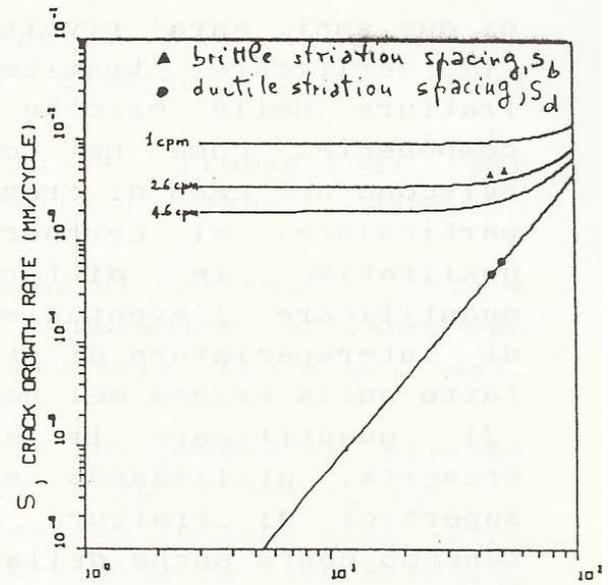


Fig. 8

STRESS INTENSITY FACTOR RANGE (MPA√m)

dell' interspaziatura delle striature duttili riportata sulla curva duttile da' un valore di ΔK analogo a quello calcolato con metodi agli elementi finiti alla profondità di cricca in esame. Riportando il valore di interspaziatura delle striature fragili misurato sullo stessa regione, in corrispondenza dello stesso ΔK sul grafico di Fig. 8 si ottiene buon accordo con la curva limite del modello per la componente di tensocorrosione della velocità di crescita della cricca.

Di conseguenza risulta confermata la presenza di una componente della velocità di crescita dipendente dal tempo; questa dipendenza e' in particolare evidenziata dai cambiamenti di pendenza osservati al variare della frequenza nella curva a/N ricavata dai beach marks (Fig. 7). Questo risultato e' una conferma del fatto che le curve calcolate dal modello (Fig. 3) a partire dai dati ottenuti su campioni costituiscano una base corretta per la trattazione delle cricche cresciute nel componente, a patto che siano attivi gli stessi meccanismi di crescita del difetto.

3. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA' PREVISTA IN AMBITO EPRI.

E' iniziata alla fine del 1988 al CISE un'attivita', finanziata dall' EPRI (R.P. 2006-21) e in collaborazione con il CCR Euratom di Ispra, che ha lo scopo di analizzare i risultati delle prove su vessel in scala 1:5 (1) alla luce dei risultati ottenuti, al CISE

e presso gli altri laboratori in ambito ICCGR, tramite prove su campione. In particolare l'attività, che ha una durata prevista di due anni, sarà rivolta a:

1) verificare, tramite l'osservazione al SEM delle superfici di frattura delle cricche formatesi nel vessel, la presenza nel componente, come nei campioni, di due diversi meccanismi che agiscono nel caso di crescita di difetti per corrosione/fatica; in particolare, si cercherà di evidenziare dal punto di vista qualitativo le differenti morfologie di frattura, e di quantificare l'eventuale effetto della frequenza anche con misure di interspaziatura di striature, in modo analogo a quanto già fatto sulla cricca del bocchello.

2) quantificare le singole componenti della velocità di crescita, utilizzando sia i risultati delle osservazioni sulle superfici di frattura che i dati disponibili in letteratura, tenendo conto anche della presenza di una soglia per la componente di tensocorrosione, secondo quanto schematizzato in Fig. 3.

3) introdurre nel codice di calcolo COVASTOL il modello di sovrapposizione; a questo scopo si prevede di utilizzare una legge di propagazione della cricca che, anziché considerare solo la dipendenza da dK , introduca nei calcoli anche la componente dipendente dal tempo. Questo richiede non solo la quantificazione delle varie componenti per quanto riguarda il caso in esame (vedi punti 1 e 2), ma anche la messa a punto dell'approccio matematico che introduca nei calcoli il valore di ΔK critico dipendente dalla frequenza.

4) verificare la correttezza della previsione di vita così effettuata, mediante il confronto tra la curva $a(N)$ calcolata e quella sperimentale ricavata dai beach marks presenti sulla superficie di frattura delle cricche cresciute nel vessel.

In conclusione, l'attività descritta è di particolare interesse in quanto può essere considerata un primo passo verso la trasposizione dei risultati che si ottengono in laboratorio per la previsione del comportamento di un componente reale, quando si debbano considerare interazioni complesse tra i carichi applicati, la presenza di difetti e un ambiente aggressivo. Inoltre, i risultati ottenuti durante le attività preliminari permettono di ritenere che l'approccio descritto possa dare buoni risultati nel caso particolare di un vessel in pressione.

BIBLIOGRAFIA

- 1) A.C. Lucia, C. Arman, A. Jovanovic, "Fatigue Crack Propagation, Probabilistic Models and Experimental Evidence", 9th SMiRT Conference, Losanna, Agosto 1987.
- 2) C.Rinaldi, "Frattografia della Cricca Propagatasi per Corrosione Fatica nel Bocchello di un Modello di Vessel", Rapporto CISE 3825, 1987.
- 3) I.M.Austen, "Quantitative Understanding of Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior: Final Report," Commission of European Communities, Technical Steel Research, Brussels, EUR 8560, 1983, p.130.
- 4) G.Gabetta, "The Effect of Frequency in Environmental Fatigue Tests", Fatigue Fract. Mater. Struct. Vol. 10, pp. 373-383, 1987.
- 5) H.R.Smith e D.E.Piper, "Stress Corrosion Testing with Pre-cracked Specimens", in Stress Corrosion Cracking in High Strength Steels and in Aluminum and Titanium Alloys", B.F.Brown, Ed.,NRL, Washington, DC,1972, pp.17-77.
- 6) M.O.Speidel, "Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue of Steels in Hot Water",Proc. of the Int. Conf. on Fatigue, Corrosion Cracking, Fracture Mechanics and Failure Analysis, 2-6 Dec. 1985, Salt Lake City, Utah, U.S.A.,A.S.M., Ed..
- 7) Proceedings of IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, Freiburg, FRG, May 1983.
- 8) Proceedings of Second IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, Sendai, Japan, W.H.Cullen, Ed., USRNC Conference Proceedings NUREG/CP-0067, Apr. 1986.
- 9) C.Rinaldi, "Frattografia Quantitativa su Acciaio A533B C11, Sottoposto a Fatica in Ambiente LWR: Convalida di un Modello per la Corrosione Fatica", La Metallurgia Italiana, Vol.80,pp. 23-31, 1988.