

COMPORTAMENTO A FATICA DI STRUTTURE MECCANICHE IN PIENA SCALA: RISULTATI SPERIMENTALI E PREVISIONE

M. Beghini¹, L. Bertini¹, V. Fontanari², E. Manfredi¹, C. Santus¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione – Università di Pisa (Italy)

² Dipartimento di Ingegneria dei Materiali – Università di Trento (Italy)

E-mail: leonardo.bertini@ing.unipi.it; manfredi@ing.unipi.it, vigilio.fontanari@ing.unitn.it

SOMMARIO

Il lavoro si propone di presentare le principali attività di ricerca svolte, negli ultimi anni, presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) dell'Università di Pisa, anche in collaborazione con l'Università di Trento, nel campo della resistenza a fatica delle strutture meccaniche, in particolare per quanto riguarda la conduzione di "test" su componenti in piena scala e la loro interpretazione.

Viene quindi condotta un'illustrazione di alcune recenti campagne sperimentali (Es.: giunzioni filettate in acciaio, elementi di sospensione in alluminio, ingranaggi ad elevate prestazioni), alla quale segue una descrizione delle attività di caratterizzazione di base e di modellazione condotte al fine di costituire una adeguata base di conoscenze per la interpretazione. Infine, vengono analizzati i risultati ottenuti, evidenziando alcuni problemi aperti, sia sul piano concettuale che su quello applicativo.

1. INTRODUZIONE

Nonostante il rapido incremento nelle prestazioni degli strumenti di calcolo ed il progressivo miglioramento dei modelli di previsione del comportamento a fatica, la conduzione di prove in piena scala rimane tuttora uno strumento indispensabile, sia per la qualificazione e taratura dei modelli stessi relativamente all'effetto di fattori generalmente trattati in modo empirico (fattori di scala, tecnologici, etc.), sia per garantire una stima più affidabile degli effettivi fattori di sicurezza in esercizio, in particolare nel caso di applicazioni ad elevato rischio per la sicurezza umana o ambientale.

D'altro lato, la conduzione di prove su componenti reali in condizioni che possano ritenersi rappresentative di quelle in esercizio impone solitamente la realizzazione "ad hoc" di procedure e sistemi di prova di elevata complessità.

Presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) sono stati recentemente condotti "test" di fatica in piena scala su:

- Aste di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio
- Bracci sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso
- Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad elevate prestazioni.

Nel lavoro vengono brevemente illustrate, per ciascuna tipologia di componente, le specifiche attrezzature sperimentali messe a punto e le principali prove condotte.



Figura 1 – *Macchina a risonanza per prove di flessione alternata*

I risultati ottenuti vengono quindi analizzati criticamente, mediante un confronto “a posteriori” con previsioni basate su modelli numerici e/o analitici e, in alcuni casi, sui risultati di prove condotte su piccoli campioni, cercando di evidenziare alcuni dei problemi che tuttora sembrano impedire la riduzione del margine di incertezza connesso con la previsione del comportamento in esercizio sotto carico ciclico.

2. PROVE SU COMPONENTI IN PIENA SCALA

2.1. Elementi di batterie di perforazione (“Drill Collars” e “Drill Pipes”)

Gli elementi delle batterie di perforazione petrolifera sono soggetti a rilevanti sollecitazioni meccaniche di tipo affaticante, derivanti dall'attraversamento di tratti curvi del pozzo ("dog-legs") [1], da fenomeni di instabilità o da vibrazioni.



Figura 2 – *Macchina a risonanza per prove di flessione rotante*

Con le moderne procedure operative le rotture non sono molto frequenti. Tuttavia, i costi ad esse associati possono essere rilevanti (fino a 15 M€ se si rende necessario l'abbandono del pozzo). La caratterizzazione della resistenza a fatica della batteria riveste quindi una notevole rilevanza tecnica ed economica. I dati ad oggi disponibili sono tuttavia scarsi, soprattutto a causa degli elevati oneri associati alle prove, che richiedono macchine di grande capacità e lunghe durate (fino a $1 \div 2 \cdot 10^7$ cicli).

Presso il DIMNP sono state recentemente progettate e messe a punto [2] macchine a risonanza di diversa capacità e tipologia per la conduzione di prove di fatica in piena scala su elementi di batteria ("Drill Collars", DC, "Drill Pipes", DP), sia in condizioni di flessione alternata che di flessione rotante (Figg. 1 e 2).

Il principio di funzionamento adottato, classico per questo tipo di macchine, prevede che il provino costituisca l'elemento elastico di un sistema vibrante, in cui si inducono oscillazioni forzate in prossimità della risonanza tramite dispositivi meccanici a masse eccentriche.

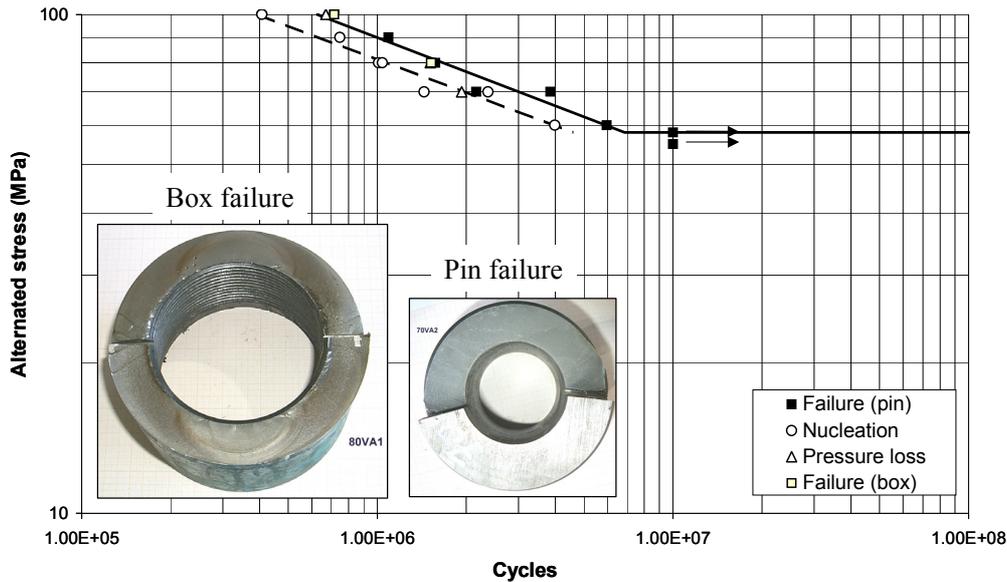


Figura 3 – Curva S-N per flessione alternata con esempi di rotture nella femmina (“Box”) e nel maschio (“Pin”) di giunti filettati tra aste tipo Drill Collar (diametro esterno 170 mm)

E’ in tal modo possibile ottenere momenti flettenti massimi di circa 150 kNm su tubi di 220 mm di diametro.

Il livello di carico viene controllato con un sistema “closed loop” agente sull’ampiezza dell’eccitazione, in grado di garantirne la costanza al variare della rigidezza del provino con il progredire della rottura.

La presenza di una frattura può essere rilevata con varie tecniche, quali la variazione del fattore di amplificazione dinamica [2] e la perdita di tenuta della cavità interna del provino. In entrambi i casi, è possibile rilevare la presenza di fessure aventi una estensione di circa 10-15 mm.

In alcune prove sono stati inseriti, una volta rilevata la presenza del difetto, cicli di marcatura finalizzati ad ottenere informazioni concernenti la sua velocità di avanzamento e l’evoluzione del fronte di frattura.

Si è riscontrato che per elementi in acciaio la fase di propagazione tende a costituire una parte rilevante della vita a fatica (50-70%), mentre per l’alluminio questa frazione tende a ridursi considerevolmente a

causa della minore tenacità del materiale.

La Fig. 3 riporta due tipici esempi di rotture per flessione alternata, osservati giunzioni filettate coniche tra aste tipo “Drill Collar” NC50 (diametro esterno 170 mm), avvenute nella femmina (“Box”) e nel maschio (“Pin”) e la relativa curva S-N..

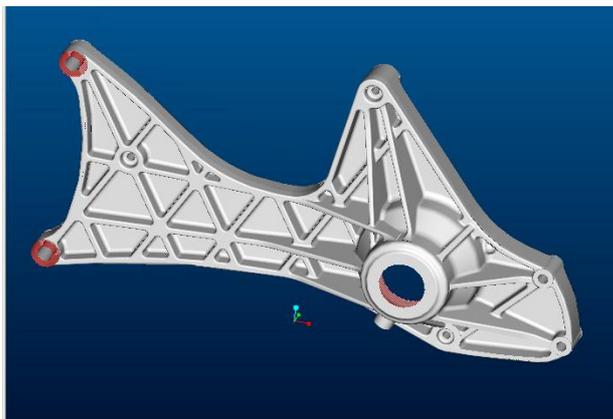


Figura 4 – Braccio sospensione in alluminio presso fuso per motoveicoli.

2.2. Bracci sospensioni motociclistiche in alluminio presso-fuso

L’impiego in campo automobilistico e motociclistico di elementi strutturali in alluminio presso fuso si è andato estendendo negli ultimi anni, rendendo necessaria [3-7] la qualificazione di procedure per la previsione del comportamento a fatica in esercizio.

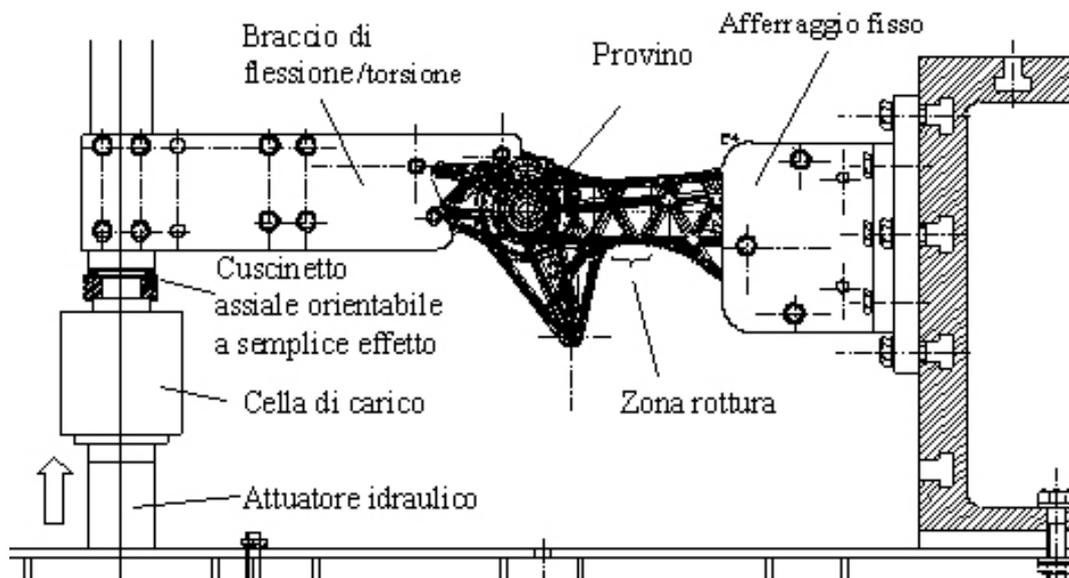


Figura 5 – Schema dell'apparato per prove su bracci sospensione.

Lo studio ha riguardato in particolare il braccio sospensione posteriore di uno scooter di media cilindrata (Fig. 4).

Le prove in piena scala sono state condotte utilizzando un apposito telaio di afferraggio,

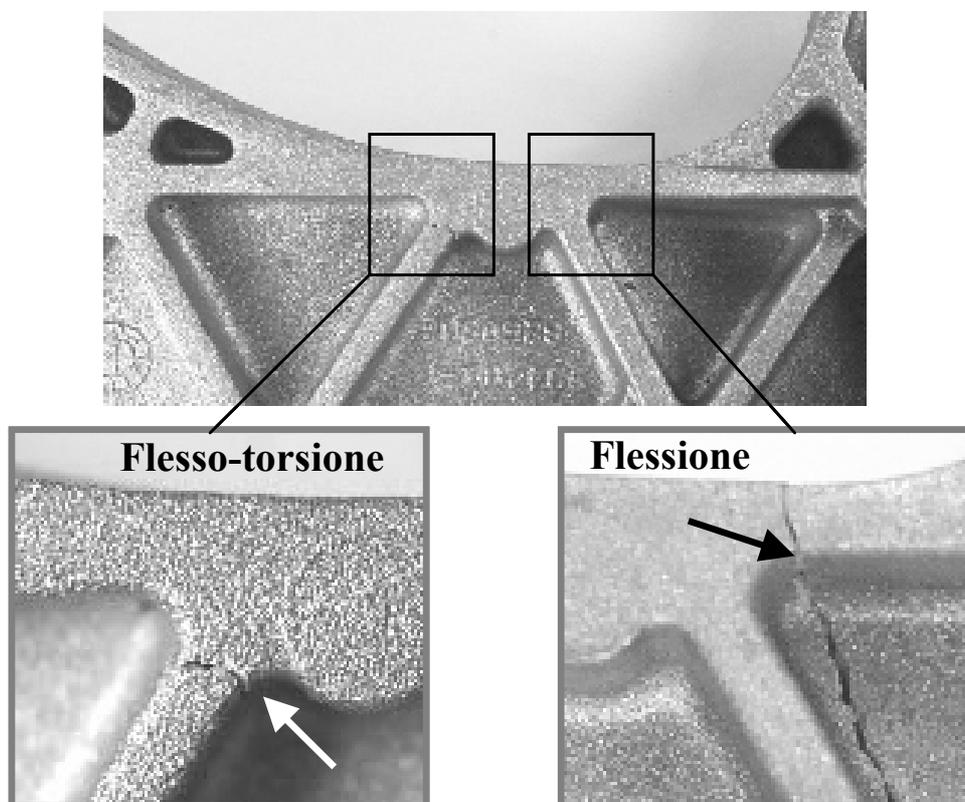


Figura 6 – Localizzazione delle rotture nelle prove di flesso-torsione e di flessione (le frecce indicano gli inneschi)

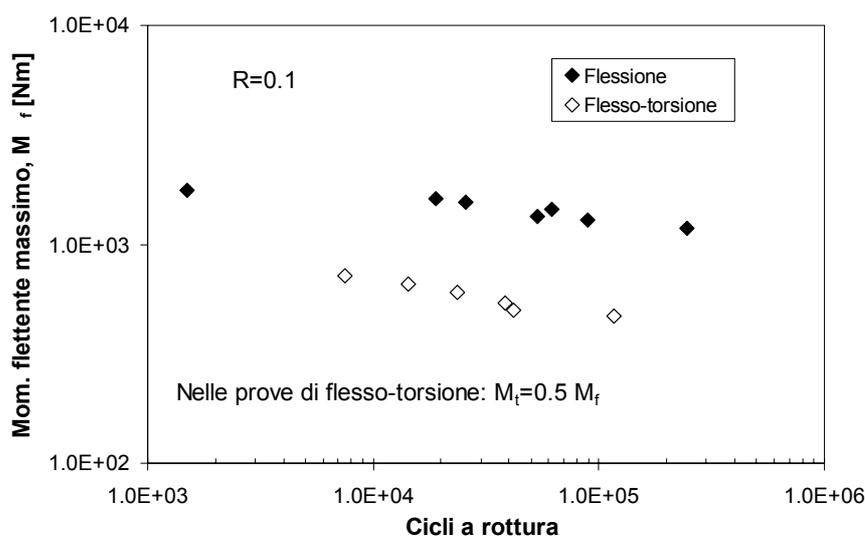


Figura 7 – Risultati delle prove su bracci sospensione.

passando dalle prove di flessione a quelle di flessio-torsione (Fig. 6). In entrambi i casi, la dimensione del difetto in grado di provocare il cedimento finale è risultata piuttosto piccola (circa 10 mm), indicando una limitata influenza della fase di propagazione sulla vita totale del pezzo.

I risultati delle prove di fatica in piena scala sono riportati in Fig. 7, in cui viene rappresentato il momento flettente applicato in funzione del numero di cicli a rottura. Si nota come la contemporanea applicazione di una torsione tenda a ridurre, come era da attendersi, la resistenza del pezzo.

2.3 Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad elevate prestazioni

Nell'ambito di una collaborazione tra l'Università di Pisa e AVIO Propulsione aerospaziale SpA di



Figura 8 - Banco prova ingranaggi a ricircolo di potenza e dentature campione utilizzate



Figura 9 – Esempio di rottura anomala di un dente.

Torino (già FIAT Aviazione SpA.) è stato creato presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa. un Centro Ricerche sulle Trasmissioni Meccaniche a tecnologia avanzata (CRTM) dotato di alcuni banchi prova di elevate prestazioni, di cui uno per prove su ingranaggi cilindrici (Figura 8).

Il banco si basa su di un principio di funzionamento “a ricircolo di potenza”, in modo da ridurre la potenza dissipata per la prova. Esso può

sviluppare una potenza meccanica trasmessa dagli ingranaggi in condizione di prova fino a 950 kW ad una velocità di rotazione massima pari a 9000 giri/1'.

E' attualmente in corso una campagna di prove per la caratterizzazione della resistenza di ingranaggi per applicazioni aeronautiche realizzati con due diversi materiali e con varie modifiche di profilo . In particolare sono previste: prove di rottura per fatica dei denti (bending), prove di fatica superficiale (pitting) ed infine prove di usura adesiva o grippaggio (scuffing).

Nella Fig. 9 è riportato un esempio di rottura ottenuto su uno degli ingranaggi attualmente sotto “test”.

3. ANALISI ED INTERPRETAZIONE

I risultati delle prove condotte sui componenti in piena scala sono stati confrontati “a posteriori” con le previsioni ottenibili tramite modelli di calcolo.

A tale scopo, si è applicata in tutti i casi, con alcune varianti che saranno evidenziate nel seguito, la classica procedura generale mostrata nella Fig. 10, che prevede i seguenti passi principali:

- Analisi dello stato di tensione “locale” agente nelle zone più sollecitate del componente al fine di determinare l'effettivo ciclo di tensione cui il materiale viene sottoposto
- Utilizzo di modelli di comportamento del materiale ad innesco che, in base all'effettivo ciclo di tensione (in generale pluri-assiale) ed alle curve di resistenza a fatica (S-N) del materiale, consentano di ottenere una previsione del numero di cicli richiesti per l'innesco della rottura per fatica.
- Valutazione, in base ad analisi ad EF o tramite modelli analitici (Es. “Weight Functions”) del valore del Fattore di Intensificazione degli Sforzi (FIS), K_1 e del relativo ciclo.
- Utilizzo di modelli di crescita di fratture per fatica per valutare, in base anche alle curve di velocità di avanzamento (FCGR) del materiale, il numero di cicli richiesto per la rottura.

E' inoltre necessario considerare che, come noto, il comportamento ad innesco del materiale è fortemente influenzato da una serie di fattori (alcuni dei quali sono indicati nella Fig. 10), che gli attuali modelli non sono in grado considerare in modo esplicito. Di tali effetti si tiene conto, tradizionalmente, attraverso fattori correttivi di natura sostanzialmente empirica in quanto, pur esistendo in molti casi delle accettabili interpretazioni fenomenologiche, non è stato sinora possibile derivare veri e propri modelli fisici in grado di fornire interpretazioni quantitative.

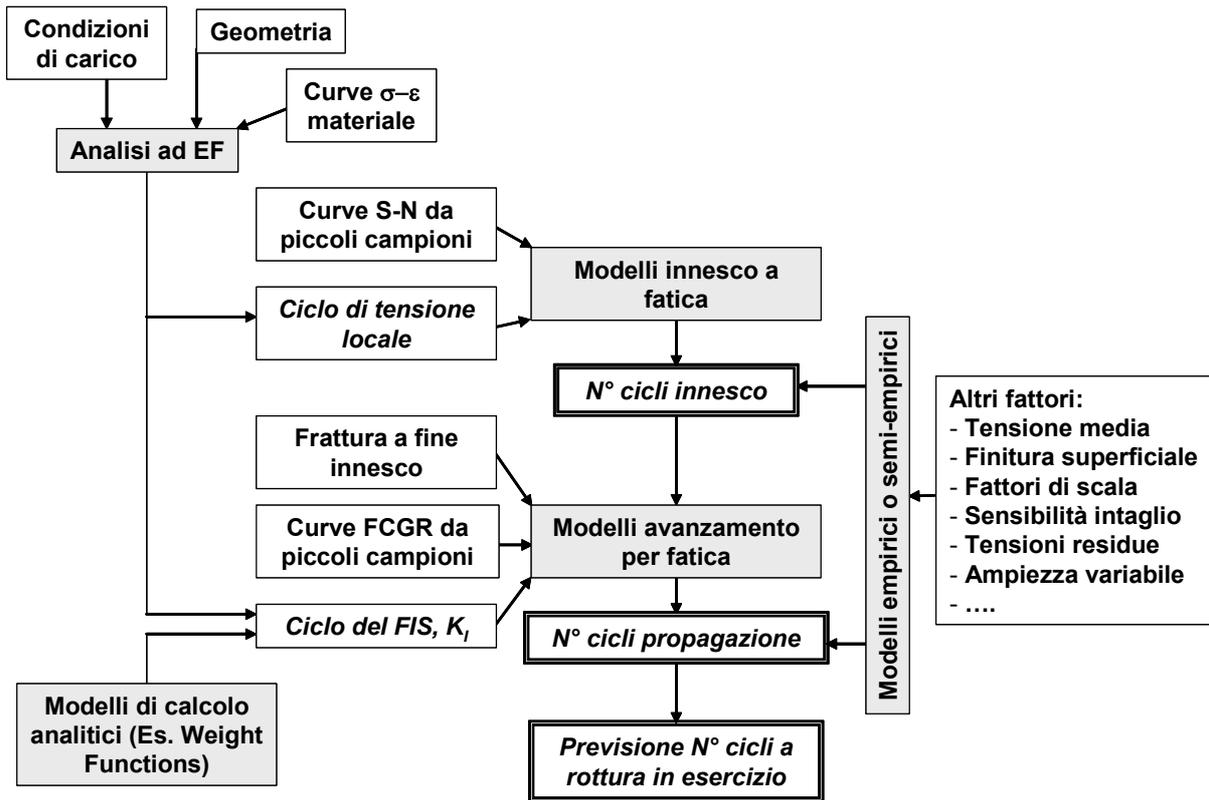


Figura 10 – Schema di procedura per l'analisi della resistenza a fatica di componenti

3.1. Elementi di batterie di perforazione

L'interpretazione dei risultati ottenuti per questo genere di componenti si è basata, in primo luogo, su di un'analisi ad EF condotta con modelli assialsimmetrici (Fig. 11). Sono state considerate due diverse condizioni di carico, quella legata al pre-serraggio iniziale e quella dovuta al momento flettente alterno applicato in sede di prova.

Le analisi ad EF hanno evidenziato come il pre-serraggio iniziale, unito al carico massimo di prova, produca nelle zone più sollecitate (la radice di alcuni filetti) tensioni superiori al livello di snervamento. L'effettivo ciclo di tensione agente in tali zone nel corso della prova è stato quindi stimato in maniera approssimata, facendo uso dapprima di un modello assialsimmetrico operante in campo elastoplastico per stimare le tensioni massime agenti nel ciclo, e quindi di un modello elastico basato su elementi di Fourier per determinare l'ampiezza del ciclo stesso.

Dato che la fase di propagazione, almeno per le aste in acciaio, occupa una frazione rilevante della vita totale, si è reso necessario stimarne l'effettiva entità, a partire da un difetto iniziale che fosse fisicamente ragionevole assumere come risultato della fase di innesco (largamente inferiore, quindi, al minimo difetto rilevabile). La stima stessa è stata condotta con la tecnica delle "Weight Functions".

Infine, il comportamento meccanico del materiale è stato caratterizzato con i seguenti tipi di prove:

- Trazione
- Fatica assiale su provini lisci ($R=-1$, $0 \div 0.7$)
- Fatica assiale su provini intagliati (raggio di fondo intaglio $r=0.5, 1, 1.5$)
- Fatica a flessione su 4 punti ($R=0.1$) su provini aventi estratti dalla filettatura.

I principali problemi incontrati e le ipotesi che si sono rese necessarie nella interpretazione dei dati sperimentali sono:

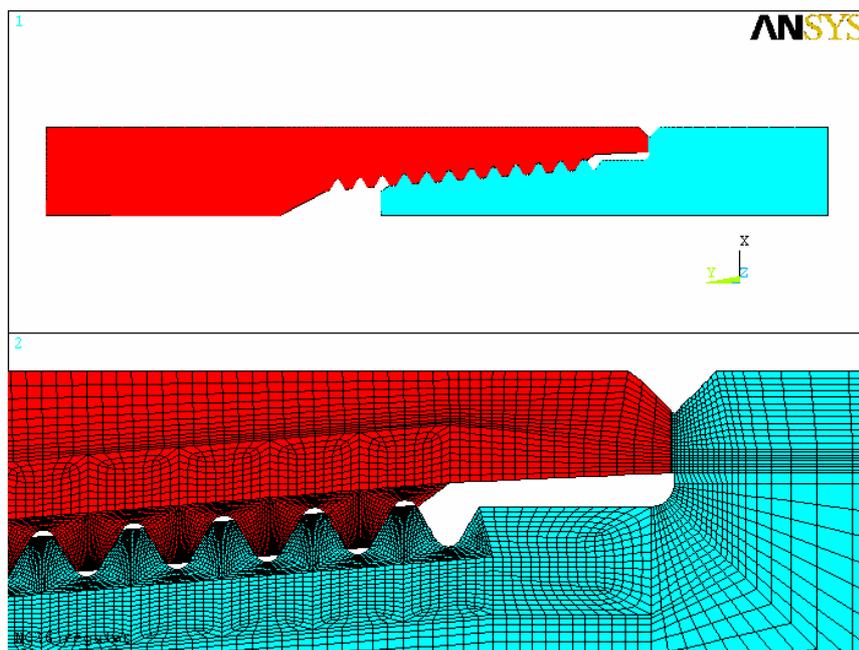


Figura 11 – Modello ad EF della giunzione filettata tra aste DC: l’analisi del pre-serraggio è stata condotta in campo elasto-plastico con elementi solidi assialsimmetrici, quella della flessione in campo elastico lineare con elementi armonici

- La stima delle tensioni prodotte dal pre-serraggio iniziale è resa difficoltosa dalla sua forte dipendenza dai valori del coefficiente di attrito agente durante il montaggio; nel caso in esame il coefficiente d’attrito è stato stimato, in base a informazioni “euristiche”.
- Durante l’analisi si è osservato come i cicli stimati di tensione tendessero a presentare valori elevati di R (0.7-0.8), situati in una regione del piano σ_m - σ_a relativamente poco studiata, nella quale la caratterizzazione sperimentale presenta molte difficoltà e in cui i modelli classici (Es. Goodman, Gerber) tendono a dare previsioni molto sensibili alla scelta dei rispettivi parametri (Es. tensione rottura) ed a piccole variazioni del livello di tensione; nell’analisi si è fatto uso di un approccio intermedio, direttamente tarato sui dati disponibili.
- La stima del ciclo effettivo di tensione alla radice dell’intaglio è molto complessa e richiederebbe l’impiego di modelli elasto-plastici operanti in campo ciclico appositamente tarati.
- L’analisi dei risultati ha indicato che, nel caso in esame, lo strato superficiale del filetto (sia per quanto riguarda la rugosità che le proprietà meccaniche) gioca un ruolo rilevante nella resistenza; si è tenuto conto di questo effetto in via empirica, sulla base dei risultati forniti dai provini direttamente estratti dalla filettatura.
- Dato che il modello ad EF fornisce direttamente il valore della tensione massima alla radice dell’intaglio, $\sigma_{max,EF} = K_T \sigma_{nom}$, si pone il problema di come tener conto della “sensibilità” del materiale, η ; dato che, nel caso specifico, è ragionevole assumere $\eta \approx 1$ e $K_T \gg 1$, si è calcolata una tensione “efficace” a fatica come:

$$\sigma_{eff} = K_f \cdot \sigma_{nom} = [1 + \eta(K_t - 1)] \cdot \sigma_{nom} \cong \eta \cdot K_t \cdot \sigma_{nom} = \eta \cdot \sigma_{max,EF}$$
- Il valore di η è stato ottenuto dalla curva di dipendenza dal raggio di fondo intaglio ricavata empiricamente dalle prove su provini intagliati, in corrispondenza dell’effettivo valore del raggio di raccordo alla radice del filetto (1 mm).
- Si è tenuto conto degli effetti della multi-assialità dello stato di tensione sulla resistenza ad innesco attraverso il criterio di Sines nelle versioni ampliate e modificate riportate in [9-11].

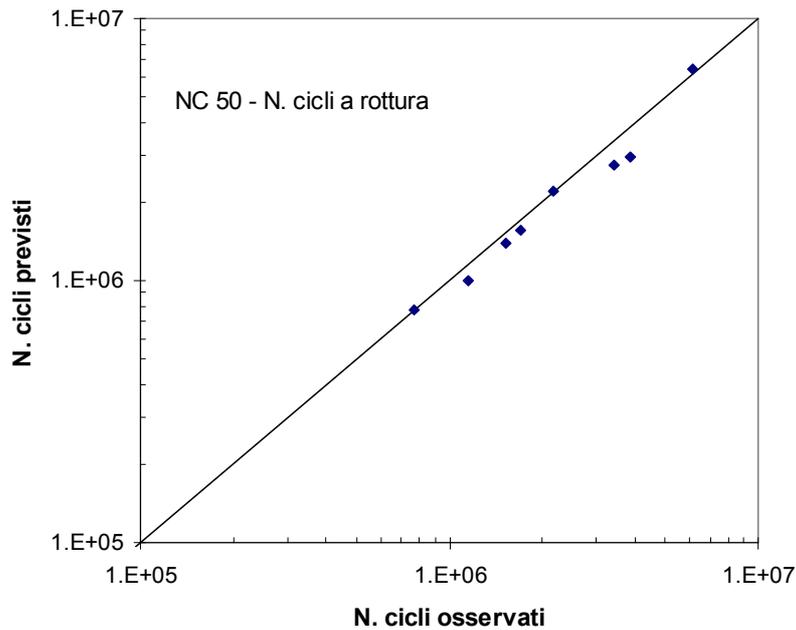


Figura 12 – *Confronto tra numeri di cicli previsti e sperimentali per aste DC*

- La durata della fase di propagazione è fortemente dipendente dal valore iniziale di fessura assunta come risultato della fase di innesco; nell'analisi si è posto $a_0 = 1\text{mm}$.

Sulla base delle suddette ipotesi, certamente ragionevoli sul piano fisico, ma non prive di una certa arbitrarietà, è stato possibile ottenere una ragionevole corrispondenza tra le previsioni del modello di calcolo ed i risultati delle prove in piena scala (Fig. 12).

3.2. Bracci sospensione in alluminio

L'interpretazione ha fatto uso di un'analisi ad EF condotta con modelli tridimensionali basati su di un approccio a sottostrutture (Fig. 13).

Anche in questo caso, le analisi ad EF hanno evidenziato come il carico massimo di prova producesse nelle zone più sollecitate tensioni superiori al livello di snervamento. L'effettivo ciclo di tensione agente in tali zone nel corso della prova è stato quindi stimato in maniera approssimata, facendo uso di una procedura simile a quella citata nel caso delle aste di perforazione.

Dato che la fase di propagazione occupa una frazione non rilevante della vita totale, si è ritenuto ragionevole non tenerne conto.

Il comportamento meccanico del

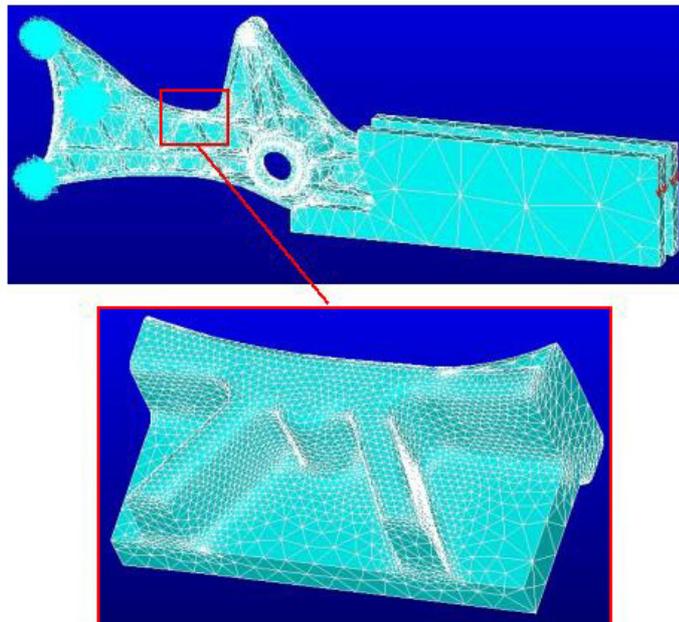


Figura 13 – *Modello ad EF del braccio sospensione ottenuto per "sub-modelling"*

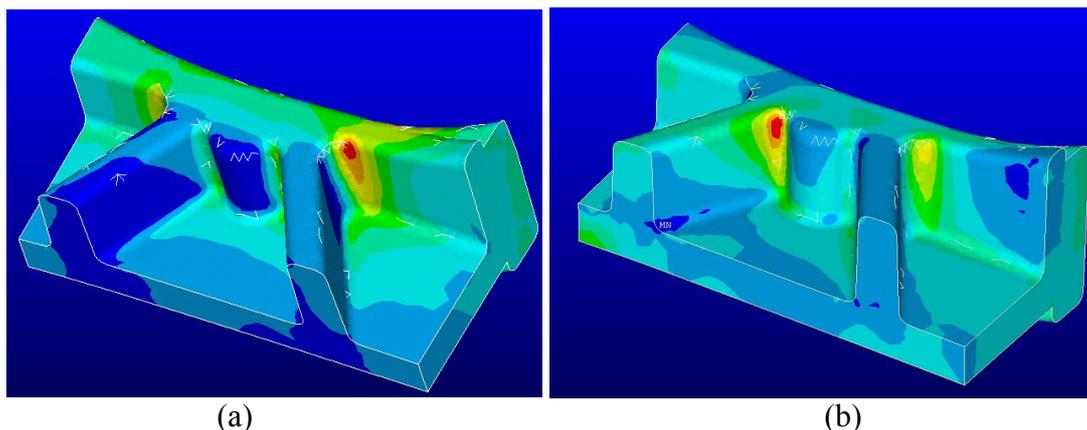


Figura 14 – Distribuzioni di tensione nelle zone di rottura (valori massimi in rosso, minimi in blu) per le due condizioni di prova in piena scala:
(a) flessione, (b) flessio-torsione

materiale è stato caratterizzato con i seguenti tipi di prove:

- Trazione
- Fatica assiale su provini lisci ($R=-1, 0, 0.25$)

I problemi riscontrati e le ipotesi richieste nella interpretazione dei dati sperimentali sono stati sostanzialmente simili a quelli relativi alle aste di perforazione, con le seguenti principali variazioni:

- L'effetto dello stato superficiale (grezzo di presso-fusione) è stato incluso direttamente nella curva di resistenza del materiale, in quanto i provini sono stati ricavati in maniera da mantenere una delle superfici nelle condizioni originali del componente.
- Dato che, nella zona di rottura, la forma spaziale piuttosto complessa del componente non consente di definire razionalmente un vero e proprio raggio di fondo intaglio, al fine di valutare

η , si è analizzato il gradiente di tensione nella direzione di avanzamento del difetto confrontandolo con quello di un corpo cilindrico con intaglio semicircolare. In base a tale confronto, è stato stimato che il gradiente corrisponde ad un raggio di fondo intaglio pari a circa 5 mm per prove in flessione e 10 mm per prove in flessio-torsione, ottenendo quindi rispettivamente valori di η pari a 0.85 ed 1.0 [12].

I risultati hanno dimostrato la capacità del modello ad EF di prevedere con ragionevole accuratezza la localizzazione della rottura nei due distinti casi di flessione e flessio-torsione (Fig. 14). Sulla base delle suddette ipotesi ed assunzioni è stato inoltre possibile ottenere una ragionevole

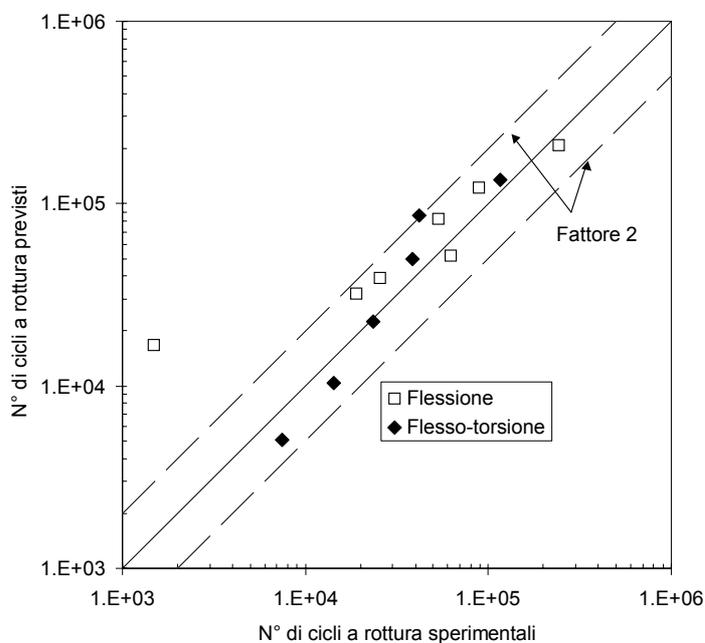


Figura 15 – Confronto tra i risultati delle prove e le previsioni per il braccio sospensione

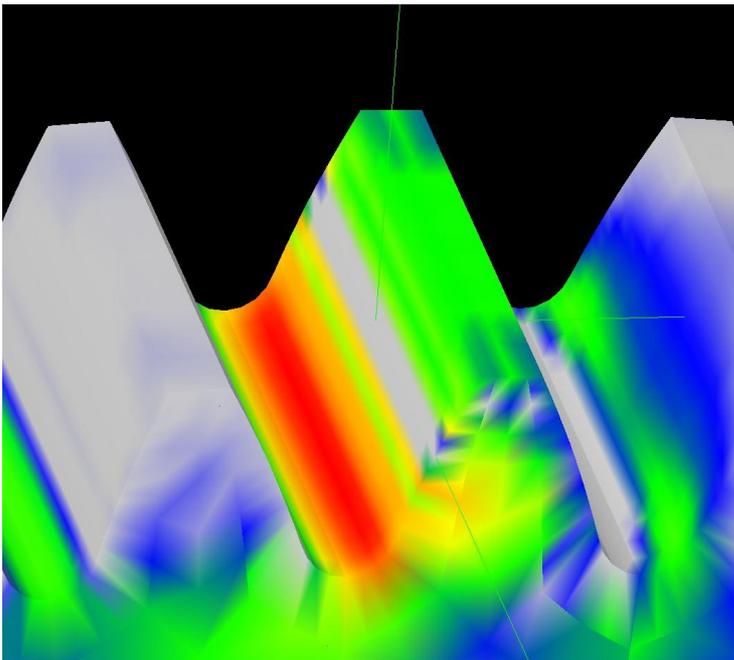


Figura 16 – Esempio di analisi delle sollecitazioni del dente condotta con il programma Helical 3D.

corrispondenza quantitativa tra le previsioni del modello di calcolo ed i risultati delle prove in piena scala (Fig. 15).

3.3. Ingranaggi per applicazioni aeronautiche di elevate prestazioni

Il calcolo della sollecitazione delle dentature è stato effettuato per mezzo di un programma commerciale (Helical 3D della Ansol) basato su una modellazione ibrida FEM + Meccanica del contatto dell'ingranamento dei denti (Fig. 16). Tale approccio rende possibile una elevata precisione nei valori di tensione calcolati, grazie soprattutto alla accurata rappresentazione della ripartizione del carico sui denti,

ottenuta tenendo conto della loro deformazione e delle modifiche di profilo.

La precisione di costruzione della dentatura, di applicazione aerospaziale, e la particolare cura nello scegliere il regime di prova, previo monitoraggio delle vibrazioni a vari regimi, hanno permesso di ritenere modesto l'effetto del sovraccarico dinamico (maggiori studi in questo campo sono peraltro in corso).

Tenendo conto delle elevate coazioni create sia dal trattamento termico di indurimento superficiale, sia dell'eventuale pallinatura, si è ritenuto opportuno applicare criteri di previsione di tipo multiassiale proposto da E. Vidal et al. [13].

Per l'applicazione di tale metodo è stato messo a punto un apposito programma di calcolo, che accetta in ingresso i valori di tensione calcolati tramite Helical 3D e le caratteristiche di resistenza a fatica del materiale, consistenti nelle seguenti curve S-N: Trazione ($R=-1, 0$) e Torsione ($R=-1$).

In questo caso sono state necessarie le seguenti principali ipotesi ai fini della interpretazione dei dati sperimentali:

- Dato che gli ingranaggi sono sottoposti a trattamenti di indurimento superficiale, la determinazione di affidabili curve di resistenza a fatica tramite prove su piccoli provini risulta particolarmente difficoltosa; non è infatti agevole riprodurre su di essi stati metallurgici ed autotensionali analoghi a quelli del dente. Nel caso specifico, per il tracciamento di queste curve è stato quindi deciso di utilizzare [14] i valori di resistenza a rottura dedotti dalla durezza del materiale.
- Si è riscontrata una notevole sensibilità del criterio multiassiale utilizzato, dalle curve S-N assunte in ingresso; in particolare, per i materiali considerati, data anche la durata di alcune prove (fino a $25\div 30 \cdot 10^6$ cicli) si è modellata, secondo il criterio di Haibach, la pendenza della curva bi-logaritmica di Wöhler per numeri di cicli superiori a $2 \cdot 10^6$.
- Si è tenuto conto dello stato di autotensione attraverso misure diffrattometriche ai raggi X, che ne hanno fornito il valore, mediando su "spot" dell'ordine del mm^2 , negli strati sub-superficiali del dente ($\approx 20\div 30 \mu\text{m}$) in alcuni punti; l'andamento nello spessore del dente, non è noto, anche

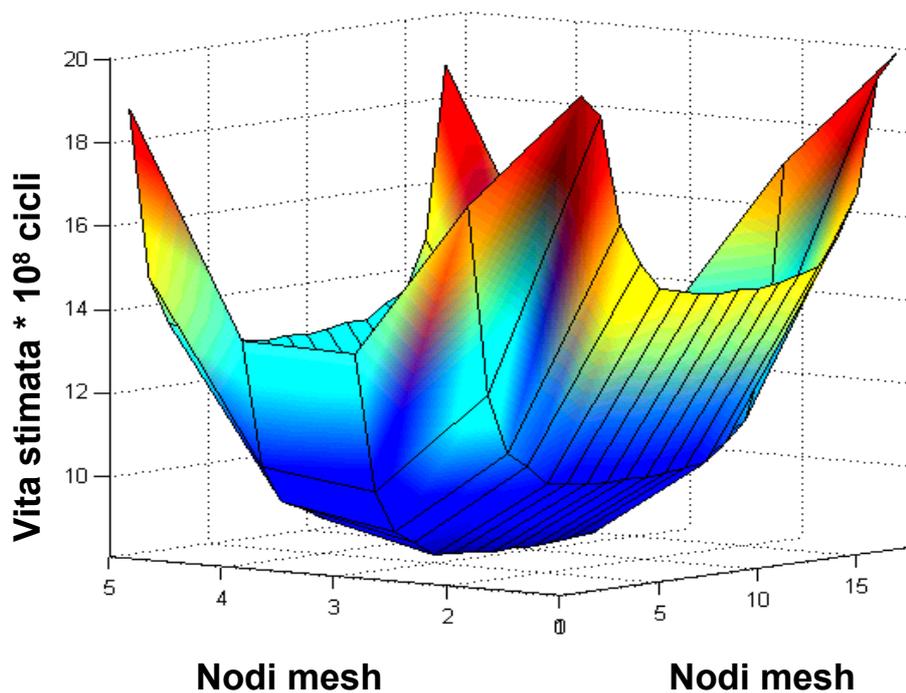


Figura 17 – Esempio di valutazione della durata a fatica in corrispondenza dei diversi nodi della “mesh” per un valore fissato della coppia trasmessa.

se, in base a quanto riportato nella letteratura tecnica, è possibile fare alcune ragionevoli assunzioni.

- Si è tenuto conto, secondo le consuete tecniche semi-empiriche, della finitura superficiale derivante dal processo di lavorazione superficiale, di rettifica, del fondo dente.

Considerando il caso di coppia torcente costante applicata agli ingranaggi, nella zona di raccordo a piede dente, la vita stimata, rispetto alla rottura per flessione ripetuta dei denti dell’ingranaggio, è risultata pari ad un numero di cicli superiore a $1 \cdot 10^8$ per tutti i nodi della mesh, (Fig. 17), in accordo con i risultati delle prove finora effettuate.

4. DISCUSSIONE

In generale, nel confronto tra i risultati di prove condotte su componenti in piena scala e previsioni basate su di una integrazione tra caratterizzazioni di base del materiale, effettuate con prove standard di laboratorio su piccoli provini, e modelli di calcolo analitici o numerici è possibile ottenere, “a posteriori”, una ragionevole concordanza.

Se da un lato questo dimostra la capacità dei modelli di previsione a carattere sostanzialmente semi-empirico al momento disponibili di cogliere tutti gli aspetti principali del fenomeno, dall’altro è necessario riconoscere anche che l’ottenimento di questa concordanza richiede talora l’effettuazione di scelte (es. un specifico modello per l’effetto della tensione media) caratterizzate da una certa arbitrarietà.

In ogni caso, l’affidabilità della previsione “a priori” del comportamento a fatica di un componente meccanico in esercizio non è ancora tale da poter prescindere dall’effettuazione di prove in piena scala, almeno in tutti quei casi in cui sia richiesta una elevata affidabilità. Infatti, per garantire tale affidabilità, i modelli di calcolo richiedono una specifica taratura, che può essere ottenuta solo per confronto con risultati sperimentali su componenti.

I principali problemi che ancora si frappongono all'effettuazione di affidabili previsioni del comportamento a fatica di componenti meccanici sembrano essere riconducibili alle seguenti due principali categorie:

1. Incertezze sull'effettivo stato di tensione del componente
2. Carenze nei modelli di comportamento del materiale
3. Difficoltà nella caratterizzazione di base del materiale

Per quanto riguarda il primo aspetto, si deve riconoscere che nel componente meccanico, specie se di grandi dimensioni, possono verificarsi fenomeni in grado di perturbare lo stato di tensione introducendo incertezze, anche sensibili, sul suo effettivo valore. Esempi di tali fenomeni possono essere:

- Il coefficiente di attrito presente nei collegamenti filettati, che può significativamente influenzare lo stato di tensione prodotto dal pre-serraggio iniziale e che può essere anche variabile da punto a punto sullo stesso collegamento.
- Gli stati di autotensione, tipici dei trattamenti superficiali, ma anche dei componenti saldati, il cui valore effettivo nel componente può essere molto difficile da stimare.
- Variazione da punto a punto delle effettive proprietà, in particolare di resistenza, del materiale, legate, ad esempio, al processo produttivo, a trattamenti superficiali, etc.
- Insorgenza, in particolare in zone molto sollecitate come la radice degli intagli, di complesse storie di carico cicliche in campo elasto-plastico, che possono rendere molto difficile la valutazione dell'effettivo ciclo locale di tensione

Questo aspetto sembra, allo stato attuale, quello maggiormente suscettibile di miglioramenti in tempi brevi, in quanto gli attuali mezzi di calcolo appaiono in grado di rappresentare correttamente fenomeni anche molto complessi, una volta che si rendano disponibili adeguate basi di specifiche conoscenze.

Per quanto riguarda i modelli di comportamento, è necessario riconoscere che quelli attualmente disponibili, pur fornendo ragionevoli capacità predittive per quanto riguarda aspetti specifici, non sono ancora in grado di fornire una soddisfacente rappresentazione fisica del processo di rottura per fatica.

Alcuni importanti aspetti in cui tali modelli sembrano essere carenti, sono:

- Incapacità di tener conto in maniera esplicita dei numerosi fattori che influenzano la resistenza a fatica (Es. tensione media, finitura superficiale, sensibilità all'intaglio o effetto del gradiente di tensione, etc.); questo costringe a tenere conto di tali fattori tramite relazioni semiempiriche specifiche, di dubbia generalità, o a ricorrere a costose sperimentazioni "ad hoc".
- Raccordo tra la fase di innesco e quella di propagazione: nei componenti in piena scala le fasi di innesco e propagazione hanno una rilevanza comparabile ai fini della vita a fatica; al momento non sembrano disponibili affidabili criteri per gestire la transizione dall'una all'altra fase.
- La durata della fase di propagazione è notoriamente molto sensibile alla dimensione iniziale del difetto, assunta come esistente alla fine della fase di innesco; inoltre non sono disponibili qualificati modelli in grado di rappresentare le prime (e quantitativamente più importanti) fasi di avanzamento, che avvengono spesso in condizioni cui si può applicare con difficoltà la MFLE.
- Difficoltà di caratterizzare con provini la resistenza meccanica ed a fatica del materiale di zone spesso ristrette del componente reale, soggette a trattamenti o variazioni superficiali
- Necessità di condurre prove su provini speciali, che riproducano particolari aspetti del componente (es. stato superficiale)

Nel futuro, sembra quindi di fondamentale importanza focalizzare l'attenzione e gli sforzi di ricerca nella messa a punto di modelli del comportamento del materiale che si basino su affidabili modelli fisici (e non su rappresentazioni empiriche o semi-empiriche) del processo di rottura e siano quindi in grado di tener conto direttamente della maggior parte dei fattori che influenzano il processo stesso.

Per quanto riguarda la caratterizzazione di base, spesso il materiale dei componenti reali presenta caratteristiche microstrutturali, composizione chimica e proprietà meccaniche fortemente variabili da punto a punto, che sono difficilmente riproducibili su provini di

piccole dimensioni. Inoltre, esso risulta soggetto a stati di tensione difficilmente riproducibili in forma controllata in condizioni di laboratorio.

Il miglioramento delle capacità di prova, in particolare per quanto riguarda le tecniche di “test” su micro-provini o direttamente su zone ristrette del componente potrebbe essere di grande ausilio nell’ottenere dati di partenza più affidabili per la previsione.

5. CONCLUSIONI

E’ stata condotta una breve disamina delle principali attività di ricerca concernenti la conduzione di prove a fatica su componenti in piena scala condotte in tempi recenti presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione dell’Università di Pisa.

Sono state in primo luogo descritte le principali attrezzature specificamente sviluppate per la conduzione di tali “test” e le relative procedure di prova.

Sono stati quindi analizzati criticamente i risultati ottenuti, proponendo un confronto con modelli di previsione basati su tecniche numeriche o analitiche e, in alcuni casi, su risultati di prove condotte su piccoli campioni.

Sulla base di tale analisi, si è quindi cercato di evidenziare alcuni dei problemi riscontrabili nella previsione del comportamento in esercizio di componenti reali in condizioni di carico ciclico.

Infine, sono stati evidenziati i principali miglioramenti nelle attuali procedure di calcolo ed analisi, che sembrano necessari al fine di ottenere un sensibile miglioramento nella affidabilità delle previsioni stesse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Rabia, Oilwell drilling engin.: principles and practice; Oxford, Graham Trotman, 1985.
- [2] M. Beghini, L. Bertini, et alii, “Una macchina a risonanza per prove di fatica su particolari cilindrici in piena scala”, AIAS’99, XXVIII Conv. AIAS, pp. 519-528.
- [3] C.M. Sonsino, J. Ziese, “Fatigue strength and application of cast aluminium alloys with different degrees of porosity”, *Int. J. Fatigue*, 1993, pp. 75-84.
- [4] B. Skallerud et al., “Fatigue life assesment of aluminium alloys with casting defects”, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 44, 6, 1993, pp. 857-874.
- [5] K. Shiozawa et al., “Crack initiation and fat. crack growth behaviour of squeeze-cast Al-Si alloys”, *Fat. & Fract. Engin. Mat. Struct.*, Vol. 20, 2, 1997, pp. 237-247.
- [6] A.A. Dabayeh et al., “Fatigue of cast aluminium alloys under constant and variable-amplitude loading”, *Int. J. Fatigue*, Vol. 18, 2, 1996, pp. 95-104.
- [7] M.J. Couper at al., “Casting defects and the fatigue behaviour of an aluminium casting alloy”, *Fat. & Fract. Engin. Mat. Struct.*, Vol. 13, 3, 1990, pp. 213-227.
- [8] M. Beghini, L. Bertini et alii. “Comportamento a fatica di un braccio sospensione in alluminio presso fuso”, XXXI Conv. Naz. AIAS, Parma 18-21/9/2002, Sess. G, AIAS
- [9] J.A. Bannantine et al., Fundamentals of metals fatigue analysis, Prentice Hall, 1990
- [10] S. Suresh, Fatigue of materials, Cambridge University Press, 1991.
- [11] AA.VV., SAE Fatigue Design Handbook-3rd Edition, SAE 1997.
- [12] R.C. Juvinall, K.M. Marshek, Fondamenti della progettazione dei componenti delle macchine, Edizioni ETS, Pisa, 1993.
- [13] E. Vidal, B. Kenmeugne et alii, Fatigue Life Prediction of Components using Multiaxial Criteria, Multiaxial Fatigue & Design (A. Pineaud et al. ed.) Mech.Eng. Publ., 1996.
- [14] R.J. Drago, Fundamentals of Gear Design, 1986
- [15] V. Grubisic and A. Simbürger. Fatigue under combined out of phase multiaxial stresses. *Proc. Int. Conf. on Fatigue Test. and Design*, pp. 271-278, London, 1976. Soc.Env. Eng.