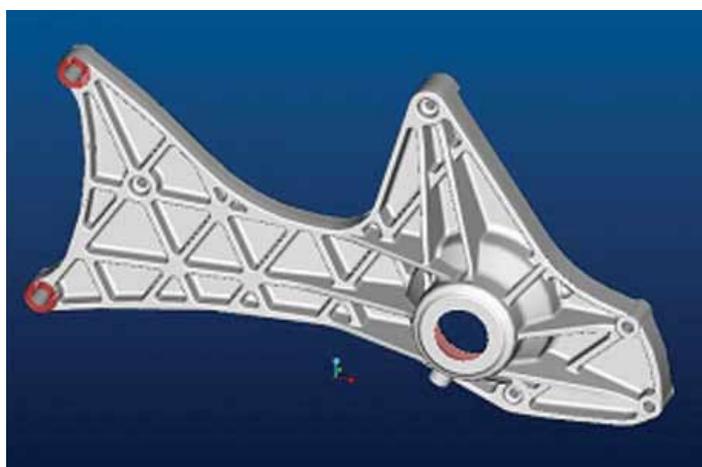


Comportamento a fatica di strutture meccaniche



1. Braccio sospensione in alluminio
presso fuso per motoveicoli.

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, sia per garantire una stima più affidabile degli effettivi fattori di sicurezza in esercizio, in particolare nel caso di applicazioni ad elevato rischio.

D'altro lato, la conduzione di prove su componenti reali, in condizioni rappresentative di quelle in esercizio, impone solitamente la rea-

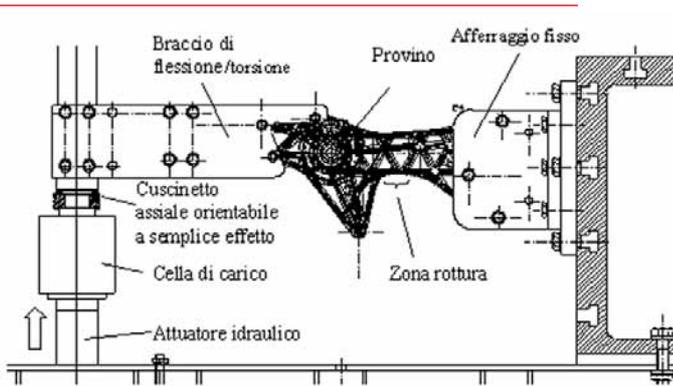
lizzazione ad hoc di procedure e sistemi di prova di elevata complessità.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, dell'Università di Pisa, sono stati recentemente condotti test di fatica in piena scala. In particolare vengono di seguito trattate le sperimentazioni relative a bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso ed ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad elevate prestazioni.

Le prove sui componenti

L'impiego in campo automobilistico e motociclistico di elementi strutturali in alluminio presso fuso si è andato estendendo negli ulti-

Le prove in piena scala a fatica sono indispensabili per verificare l'esatto comportamento in esercizio di strutture meccaniche e avere dati analitici certi, eliminando il consueto empiricismo dalle procedure di calcolo a fatica. Due esempi significativi



2. Schema dell'apparato per prove su bracci sospensione.

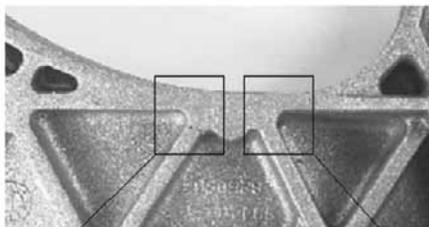


5. Banco prova ingranaggi a ricircolo di potenza e dentature campione utilizzate.

9.000 giri/min. È 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.

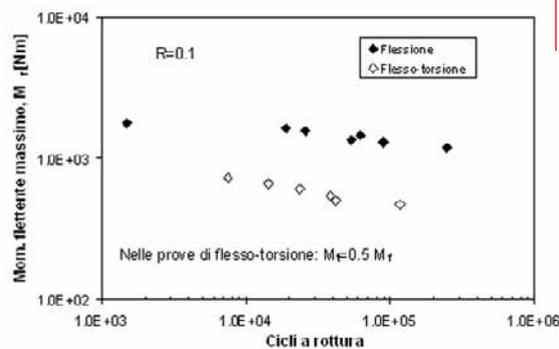
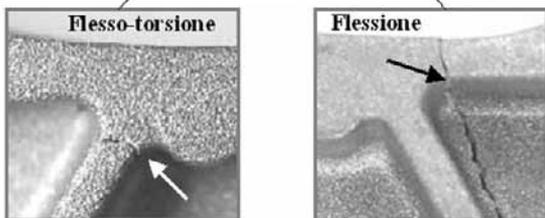
In particolare sono previste: prove di rottura per fatica dei denti (bending), prove di fatica superficiale (pitting) ed infine prove di usura adesiva o grippaggio (scuffing). Nella figura 6 è riportato un esempio di rottura ottenuto su uno degli ingranaggi testati.

6. Esempio di rottura anomala di un dente.



3. Localizzazione delle rotture nelle prove di flessio-torsione e di flessione (le frecce indicano gli inneschi).

4. Risultati delle prove su bracci sospensione.



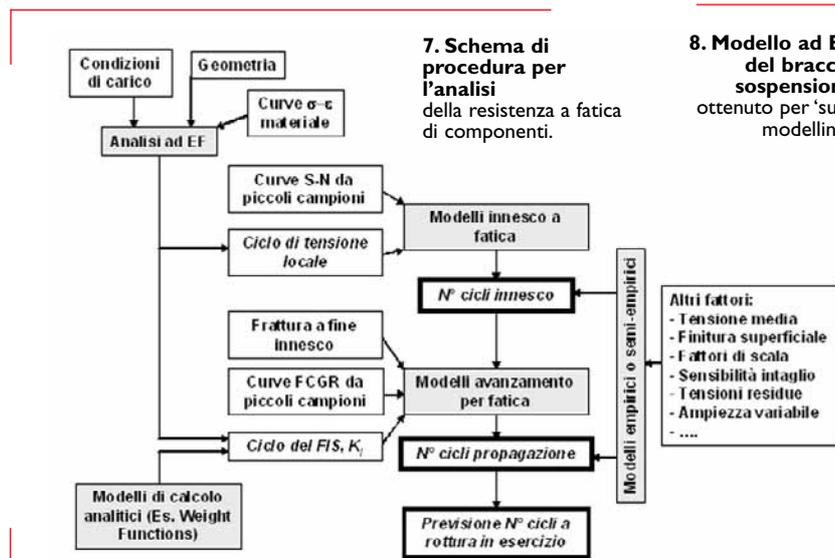
mi anni, rendendo necessaria la previsione del comportamento a fatica in esercizio [1-4]. Lo studio ha riguardato in particolare il braccio sospensione posteriore di uno scooter di media cilindrata (figura 1). Le prove in piena scala sono state condotte utilizzando un apposito telaio di afferraggio, sviluppato a corredo di una macchina di prova elettro-idraulica di tipo Mts (figura 2). Il dispositivo ha consentito di condurre prove di sola flessione e prove in cui si sono applicati in fase un momento flettente, M_f , ed uno torcente $M_t = 0,5 \cdot M_f$. In entrambi i casi si è fatto uso di un fattore $R = M_{min} / M_{max} = 0,1$. Sono state osservate due diverse posizioni del sito di innesco della rottura a fatica passando dalle prove di flessione a quelle di flessio-torsione (figura 3). 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 pro-

pagazione sulla vita totale del pezzo. I risultati delle prove di fatica in piena scala sono riportati in figura 4 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. Di seguito vengono trattate prove su ingranaggi per applicazioni aeronautiche. È stato creato presso il dipartimento di ingegneria meccanica dell'Università di Pisa un centro ricerche sulle trasmissioni meccaniche (Crtm) dotato di alcuni banchi prova di elevate prestazioni, di cui uno per prove su ingranaggi cilindrici (figura 5). 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

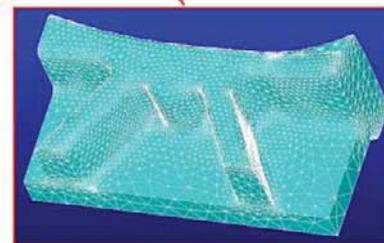
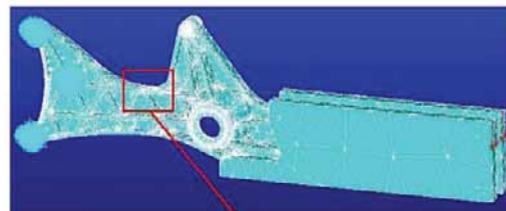


Analisi e interpretazione

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 è stata applicata la procedura generale mostrata nella figura 7. I passi principali sono: analisi dello stato di tensione "locale" agente nelle zone più sollecitate del componente al fine di determinare l'effettivo ciclo di



8. Modello ad EF del braccio sospensione ottenuto per 'sub-modelling'.



9. 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) flessione-torsione.

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) e 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 (per esempio Weight Functions) del valore del Fattore di intensificazione degli sforzi, e del relativo ciclo; utilizzo di modelli di propagazione di fessure per fatica per valutare il numero di cicli richiesto per la rottura.

È inoltre necessario considerare che il comportamento ad innesco del materiale è fortemente influenzato da una serie di fattori di cui si tiene conto, tradizionalmente, attraverso fattori correttivi di natura empirica in quanto non è stato sinora possibile derivare veri e propri modelli fisici in grado di fornire interpretazioni quantitative.

Bracci di sospensione in alluminio

Per quanto riguarda i bracci di sospensione in alluminio l'interpretazione ha fatto uso di un'analisi a EF condotta con modelli tridimensionali basati su di un approccio per sottostrutture (figura 8). 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 materiale è stato caratterizzato con prove di fatica assiale di tra-

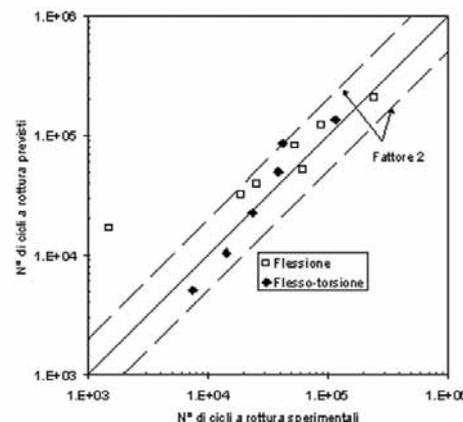
zione su provini lisci ($R = -1; 0; 0,25$).

I problemi riscontrati nell'interpretazione dei dati sperimentali sono stati: l'effetto dello stato superficiale (grezzo di presso-fusione) che 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; forma spaziale piuttosto complessa del componente da cui non è possibile definire razionalmente un vero e proprio raggio di fondo intaglio, al fine di valutare il fattore di intaglio q .

Pertanto è stato 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 flessione-torsione, ottenendo quindi rispettivamente valori di q pari a 0,85

ed 1,0 [5]. 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 flessione-torsione (figura 9). Sulla base delle suddette ipotesi ed assunzioni è stato inoltre possibile ottenere

10. Confronto tra i risultati delle prove e le previsioni per il braccio sospensione.



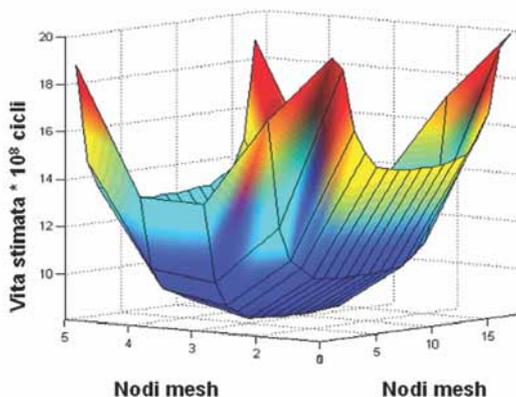
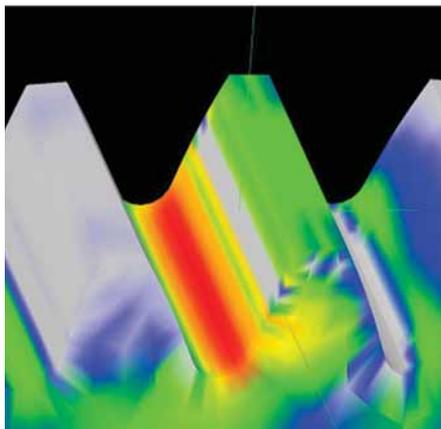
re una ragionevole corrispondenza quantitativa tra le previsioni del modello di calcolo ed i risultati delle prove in piena scala (figura 10).

Ingranaggi per applicazioni aeronautiche

Il calcolo della sollecitazione delle dentature è stato effettuato per mezzo di un programma commerciale (Helical3D, prodotto dalla ANSol) basato su una modellazione ibrida Fem + Meccanica del contatto (figura 11). Tale approccio rende possibile una elevata precisione nei valori di tensione calcolati, grazie soprattutto all'accurata rappresentazione della ripartizione del carico sui denti, ottenuta tenendo conto della loro deformazione e delle modifiche di profilo. Tenendo conto dell'elevate coazioni create sia dal trattamento termico di indurimento superficiale, sia del trattamento di pallinatura, si è ritenuto opportuno applicare criteri di previsione di tipo multiassiale, E. Vidal et al. [6].

Per l'applicazione di tale metodo è stato messo a punto un apposito programma di calcolo, che accetta in ingresso i valori di tensione simulati e le caratteristiche di resistenza a fatica del materiale, curva S-N a Trazione ($R = -1; 0$) e Torsione ($R = -1$). Tuttavia, dato che gli ingranaggi sono sottoposti a trattamenti di indurimento superficiale, la determinazione di affidabili curve di resistenza a fatica tramite prove su provini standard 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 tracciamen-

11. Esempio di analisi delle sollecitazioni del dente condotta con il programma Helical3D.



12. Esempio di valutazione della durata a fatica in corrispondenza dei diversi nodi della "mesh" per un valore fissato della coppia trasmessa.

to di queste curve è stato quindi deciso di utilizzare i valori di resistenza a rottura dedotti dalla durezza del materiale [7].

Si è riscontrata una notevole sensibilità del criterio multiassiale utilizzato rispetto alle curve S-N assunte in ingresso; in particolare, per i materiali considerati, data anche la durata di alcune prove (fino a $25,30 \cdot 10^6$ cicli) si è modellata 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, mediato su 'spot' dell'ordine del mm^2 , negli strati sub-superficiali del dente ($\approx 20\div 30 \mu\text{m}$). Considerando il caso di coppia torcente costante applicata agli ingranaggi, nella zona di raccordo a piede dente, la vita stimata, è risultata pari ad un numero di cicli superiore a 10^8 per tutti i punti critici (figura 12) in accordo con i risultati delle prove effettuate.

Confronto dei risultati

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 caratte-

zzate da una certa arbitrarietà (per esempio la scelta di un modello per l'effetto della tensione media). 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 un'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.

M. Beghini, L. Bertini, E. Manfredi, C. Santus - Dip. di Ing. Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa.

V. Fontanari - Dip. di Ing. dei Materiali, Università di Trento.

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J.A. Bannantine et al., *Fundamentals of metals fatigue analysis*, Prentice Hall, 1990.
- [6] 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.
- [7] R.J. Drago, *Fundamentals of Gear Design*, 1986.