

## **EFFETTO DELLE TENSIONI RESIDUE SU INNESCO E PROPAGAZIONE DI CRICCHE IN ALBERO ELICOTTERISTICO SOGGETTO A DANNO BALISTICO**

D. Colombo, M. Giglio

*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via la Masa 34 – 20156 Milano*  
e-mail: [daniele.colombo@polimi.it](mailto:daniele.colombo@polimi.it), [marco.giglio@polimi.it](mailto:marco.giglio@polimi.it)

### **SOMMARIO**

Il presente lavoro ha come oggetto di studio un albero di trasmissione della linea del rotore di coda di un elicottero danneggiato in seguito all'impatto di un proiettile 7.62 NATO. In particolare, l'attenzione è posta sull'effetto che le tensioni residue, generate dalla perforazione, hanno sulla vita residua del componente. A causa delle manovre effettuate dal pilota, l'albero risulta soggetto a variazione della coppia trasmessa e dal danno si originano cricche di fatica che possono causare il cedimento del componente. La propagazione delle cricche è influenzata dalle tensioni residue presenti nella zona limitrofa al danno. Nel lavoro viene studiato l'effetto che le tensioni residue hanno sia sull'innesco delle cricche che sulla loro successiva propagazione a fatica.

### **ABSTRACT**

The aim of this paper is the determination of the effect of the residual stresses on the life of a helicopter tail rotor shaft damaged by the impact of a 7.62 NATO projectile. These stresses are induced in the material close to the damage by the plastic deformations caused by the impact. Due to the flight manoeuvres, the shaft is subjected to a variable torque and consequently fatigue cracks develop from the damage which can cause the failure of the component. The crack propagation is influenced by the residual stresses in the area close to the damage. This aspect is studied in the present work and the effect of these stresses both on the crack initiation and propagation is shown.

### **1. INTRODUZIONE**

Nella fase di progettazione di un elicottero militare risulta estremamente utile poter prevedere il comportamento del velivolo danneggiato dal fuoco nemico per poterne aumentare l'affidabilità. Questo tipo di verifiche strutturali è spesso richiesto dagli organismi militari in fase di certificazione del velivolo. Il miglioramento della resistenza al danneggiamento balistico dell'elicottero viene ottenuto studiando separatamente il comportamento dei singoli componenti. Nonostante esistano linee guida, molto generali, per affrontare questo tipo di progettazione [1], risulta estremamente difficile reperire in letteratura studi che permettano di quantificare la resistenza balistica di un componente strutturale. La maggior parte del materiale disponibile riguarda semplici lastre colpite in direzione ortogonale [2-5] e in situazioni ideali, come sottolineato da Goldsmith [6]. Risulta pertanto essenziale disporre di una metodologia che permetta di poter prevedere la vita residua dei componenti strutturali dell'elicottero nelle peggiori condizioni di danneggiamento previste.

Il presente lavoro focalizza lo studio su un particolare componente, un albero di trasmissione della linea del rotore di coda di un elicottero, danneggiato in seguito all'impatto di un proiettile 7.62 NATO.

Lo scopo è quello di ricavare la vita residua del componente e di determinare l'effetto che le tensioni residue hanno su di essa. Data la complessità dei fenomeni coinvolti, viene utilizzato un approccio numerico; il lavoro infatti definisce una metodologia numerica che può essere utilizzata per studiare il comportamento di un componente strutturale danneggiato da impatto balistico. Particolare enfasi è posta sullo studio dell'effetto delle tensioni residue sulla vita residua del componente. Infatti l'impatto con il proiettile genera un danno identificabile con la formazione di uno o due fori, a seconda della direzione di avvicinamento e della posizione reciproca del proiettile e dell'albero. La zona limitrofa ai fori risulta fortemente deformata e soggetta a tensioni residue, presenti nel materiale a causa delle forti deformazioni plastiche subite durante l'impatto. Questa zona risulta essere probabile sede di innesco di cricche di fatica dovute alla variazione della coppia torcente trasmessa dall'albero. Ciò è causato sia dai carichi vibratori presenti che dalle manovre effettuate dal pilota durante la sequenza di volo di emergenza successiva all'istante dell'impatto e il volo di ritorno alla base in condizioni di avaria. La vita residua del componente danneggiato è determinata dai tempi di propagazione di queste cricche. Poiché la presenza di tensioni residue influenza sia l'innesco delle cricche che la loro successiva propagazione a fatica, la vita residua del componente dipende in maniera significativa dal valore delle tensioni residue presenti. Nel lavoro che segue verrà pertanto mostrato l'effetto che le autotensioni hanno sul probabile punto di innesco delle cricche e sui percorsi di propagazione delle stesse, con conseguente variazione dei tempi di propagazione rispetto al caso ideale in cui si assume il componente privo di tensioni residue.

## 2. SIMULAZIONE DELL'IMPATTO

Al fine di ricavare la configurazione danneggiata dell'albero e il campo di tensioni residue nel materiale, risulta indispensabile simulare l'impatto del proiettile nella condizione più gravosa prevista. La configurazione di impatto può essere individuata dai due parametri indicati in figura 1. In precedenti lavori degli stessi autori [7-9], è stato mostrato come la condizione di impatto più gravosa sia individuata da un angolo di inclinazione del proiettile prossimo a  $45^\circ$  e un offset pari al valore critico, definito come differenza tra il raggio esterno dell'albero e il raggio esterno del proiettile. Poiché l'albero considerato nelle simulazioni ha diametro esterno nominale pari a 100 mm (spessore 2 mm, materiale Al 6061-T6) e si considera un proiettile 7.62 NATO (diametro esterno nominale 6,6 mm, velocità di avanzamento allo sparo lungo il suo asse pari a 845 m/s e velocità di rotazione di 750 giri/min), l'offset critico risulta pari a 46 mm circa. Per poter ricavare in maniera precisa il valore dell'angolo di inclinazione che individua la condizione di impatto peggiore, sono state condotte diverse simulazioni numeriche di impatto tramite metodo agli elementi finiti (figura 2) adottando un angolo compreso tra  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , secondo la modalità descritta dagli autori in precedenti lavori [7-9]. La condizione più gravosa è risultata essere quella individuata da un angolo di  $52^\circ$  e un offset di 46 mm (figura 3). Nella figura sono visibili le tensioni residue presenti nel componente dopo la rimozione della coppia torcente. Il bordo del foro è stato rettificato in direzione radiale in modo tale da avere i possibili fronti di innesco delle cricche disposti regolarmente, come spiegato meglio nel seguito.

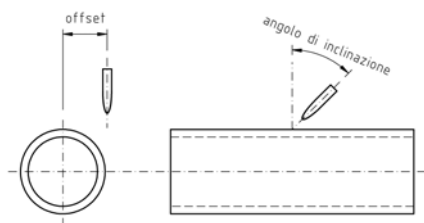


Fig. 1 – Parametri per l'individuazione della configurazione di impatto più pericolosa

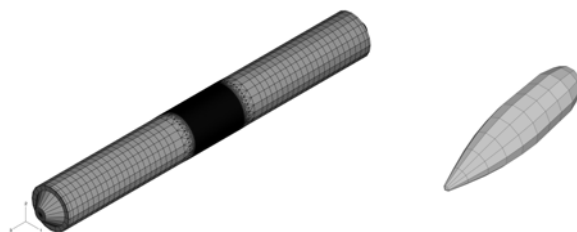


Fig. 2 – Modelli ad elementi finiti dell'albero e del proiettile (non in scala)

La simulazione dell'impatto viene condotta con albero sottoposto a coppia torcente; solo dopo l'impatto la coppia viene rimossa in modo tale da ricavare le tensioni residue presenti. I modelli ad elementi finiti adottati (figura 2) sono costituiti da elementi solidi a 8 nodi ad integrazione ridotta. La dimensione degli elementi dell'albero passa da  $0,75 \times 0,75 \times 0,45$  mm nella zona infittita (4 elementi lungo lo spessore) a  $14,9 \times 21,1 \times 1,8$  mm nella zona più rada (1 solo elemento lungo lo spessore) per un totale di 163748 elementi e 200033 nodi. La mesh del proiettile è invece stata creata più rada a causa dell'ipotesi di rigidità adottata [7-9] ed è costituita da soli 240 elementi e 263 nodi. La dimensione media dell'elemento del proiettile è pari a  $3 \times 1 \times 0,5$  mm.

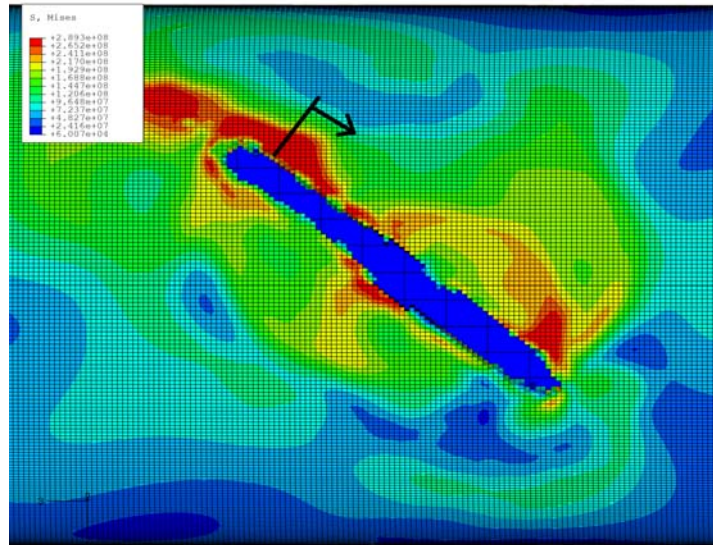


Fig. 3 – Configurazione danneggiata con bordo rettificato. Sono rappresentate le tensioni residue dopo la rimozione della coppia torcente in termini di sforzo equivalente di von Mises [Pa]. La freccia indica l'origine e l'orientamento dell'ascissa curvilinea utilizzata in figura 5.

### 3. STUDIO DELL'INNESCO DELLE CRICCHE

Per poter valutare l'influenza delle tensioni residue sull'innesco delle cricche dai bordi del danno, sono state condotte simulazioni numeriche considerando due distinte configurazioni dell'albero danneggiato. La prima configurazione, definita *configurazione reale*, coincide con quella restituita dalla simulazione di impatto; la seconda, definita *configurazione ideale*, è identica alla prima tranne per il fatto che le tensioni residue sono state rimosse dal modello ed il materiale è stato assunto non deformato. Pertanto in questa configurazione è stata mantenuta solamente la geometria del danno. Inoltre, essendo l'albero sottoposto a torsione, è naturale aspettarsi che i punti di innesco delle cricche cambino al variare dell'orientazione del danno rispetto all'asse dell'albero o, in modo equivalente, al variare del verso della coppia a pari orientazione del danno. Pertanto, per poter definire l'influenza di questo secondo parametro sull'innesco delle cricche, per ognuna delle due configurazioni adottate sono state condotte analisi cambiando il verso della coppia torcente applicata ma mantenendo inalterata l'orientazione del danno. Lo studio dell'innesco delle cricche e della successiva propagazione è stato condotto adottando alcune semplificazioni. Dato l'esiguo spessore dell'albero, è stato scelto di tralasciare la simulazione dettagliata della fase di innesco e di iniziare con una cricca già formata, di lunghezza ridotta, con fronte esteso lungo tutto lo spessore; per lo stesso motivo, il fronte di cricca rettilineo e diretto radialmente rispetto all'albero è stato considerato tale per tutta la durata della propagazione a fatica. Di conseguenza, è stato assunto come rappresentativo del comportamento della cricca il valore medio delle grandezze calcolate nei diversi punti del fronte della cricca. In base a queste considerazioni, il bordo del danno generato dal proiettile, che risulta irregolare lungo lo spessore dell'albero, è stato linearizzato tramite una rettifica in direzione radiale in modo tale da ottenere i potenziali fronti di innesco rettilinei e diretti radialmente, come ipotizzato in precedenza (figura 4). Questa operazione è stata condotta in maniera automatica tramite algoritmi appositamente ideati ed implementati [8,10-12]. Grazie alle ridotte dimensioni degli elementi nella zona infittita della mesh, questo processo non altera significativamente la geometria e le dimensioni del danno. Lo studio dell'innesco delle cricche è stato condotto considerando tutti i possibili fronti radiali lungo il bordo del danno (fronti radiali lungo lo spessore evidenziato in grigio di figura 4). Per ognuno di essi, in base alle ipotesi prima esposte, è stata introdotta una cricca già formata di lunghezza iniziale pari a 1,27 mm, corrispondente alla dimensione di cricca da utilizzare nelle verifiche *damage tolerant* in campo aeronautico, e sono stati valutati i tre fattori di intensità degli sforzi  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ . Poiché in tutti i casi analizzati il valore di  $K_I$  è risultato superiore almeno di un ordine di grandezza al valore di  $K_{II}$  e  $K_{III}$ , solo il modo I di apertura è stato preso in considerazione. Il risultato di questo processo è riassunto in un grafico che mostra l'andamento del  $K_I$  in funzione della posizione sul fronte di cricca, misurata tramite un'ascissa curvilinea lungo il bordo del danno (figura 5). Il grafico mostra in maniera molto chiara che esistono due fronti che esibiscono un massimo locale del valore di  $K_I$ , il

primo a circa 80 mm di ascissa curvilinea mentre il secondo a circa 160 mm. E' da questi fronti che risulta maggiormente probabile l'innesco della cricca.

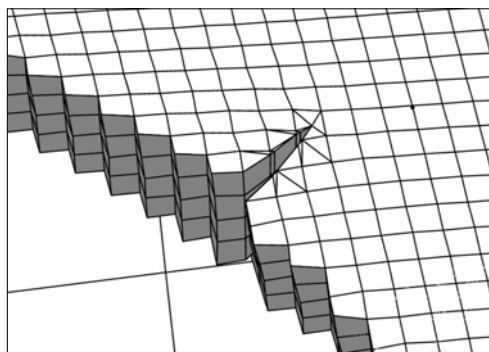


Fig. 4 – Esempio di bordo rettificato (in grigio gli elementi lungo lo spessore dell'albero) e di cricca iniziale. Configurazione deformata con spostamenti amplificati.

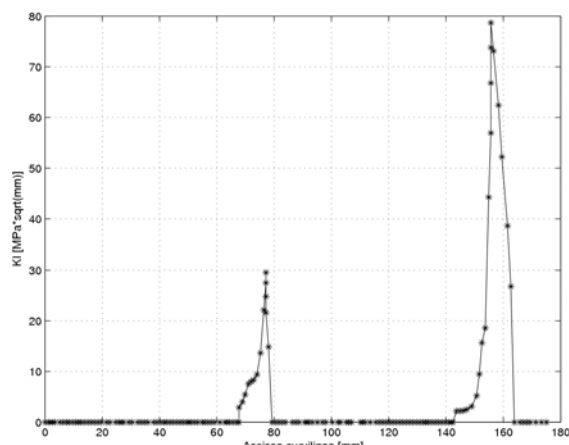


Fig. 5 – Esempio di andamento del fattore di intensità degli sforzi lungo il bordo del foro (caso di assenza di tensioni residue e coppia torcente positiva)

Come già descritto, lo studio dell'innesco è stato effettuato per la configurazione ideale e per la configurazione reale. Per la configurazione ideale, è stata utilizzata una coppia torcente applicata nominale pari a 100 Nm; grazie alla linearità del modello, i risultati sono indipendenti dal valore di coppia utilizzato. Nel caso di configurazione reale sono stati invece applicati due valori differenti di coppia: 100 Nm, come nel caso ideale, e 1000 Nm. Il primo valore di coppia è stato scelto in modo tale da generare nell'albero uno stato di sforzo molto più basso rispetto al valore delle tensioni residue presenti, mentre nel secondo caso la coppia applicata genera uno stato di sforzo paragonabile al valore delle tensioni residue. In ognuno di questi tre casi la coppia è stata applicata in entrambi i versi in modo tale da mettere in evidenza il diverso comportamento del danno e delle cricche che da esso possono propagare, come evidenziato in figura 6.

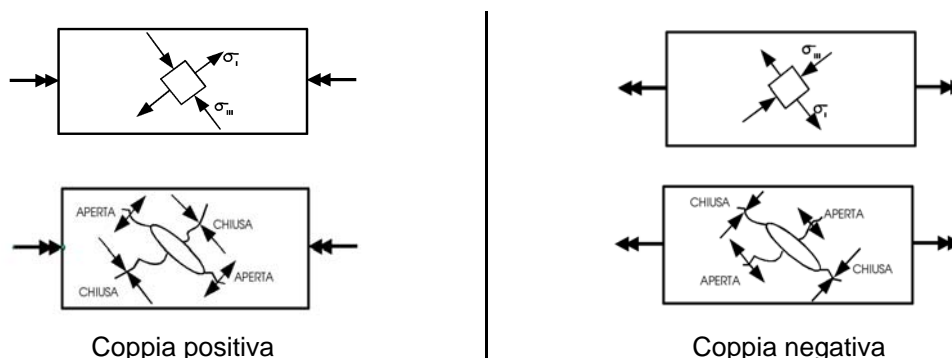
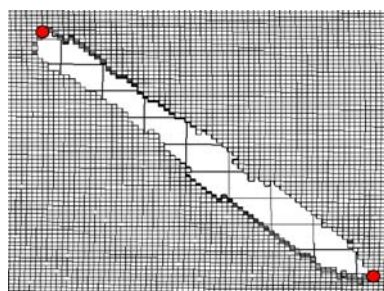


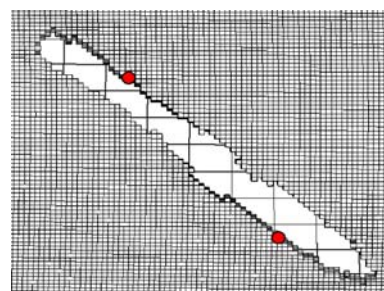
Fig. 6 – Convenzioni di segno assunte per individuare il verso delle coppie applicate all'albero ed effetto sulle cricche che si possono sviluppare dal danno

I risultati dello studio relativo all'innesco sono visibili in figura 7. Nel caso di albero integro o, idealmente, nel caso in cui il danno, in assenza di tensioni residue, non influisce sulla distribuzione di sforzo dovuta alla torsione, le cricche si innescano teoricamente come indicato in figura 6 (si innesca solamente la cricca indicata con "aperta"). In realtà il danneggiamento modifica localmente lo stato di sforzo indotto dalla torsione ed è lecito aspettarsi una modifica dei punti di innesco rispetto a quelli dovuti alla pura torsione. Questa situazione è evidenziata nella configurazione ideale indicata in figura 7: mentre per coppia positiva i punti di innesco delle cricche coincidono con quelli previsti dalla pura torsione (figura 6), l'effetto di disturbo del danno risulta evidente per la coppia negativa.

Configurazione ideale

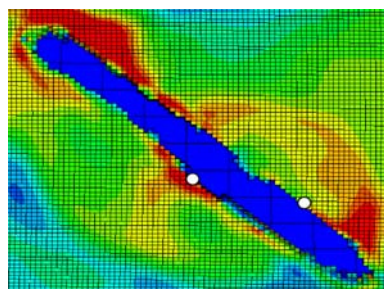


Coppia +100 Nm

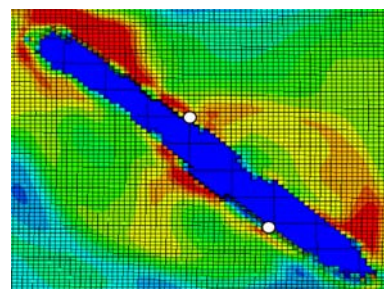


Coppia -100 Nm

Configurazione reale

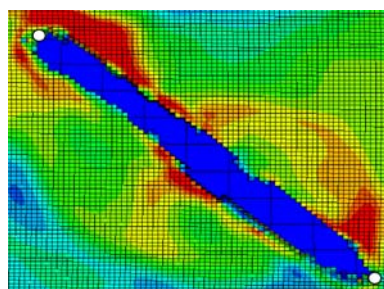


Coppia +100 Nm

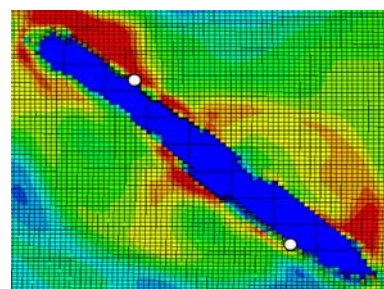


Coppia -100 Nm

Configurazione reale



Coppia +1000 Nm



Coppia -1000 Nm

Fig.7 – Punti di innesco delle cricche per le diverse configurazioni e coppie considerate. Nella configurazione reale sono rappresentate le tensioni residue già visibili nella figura 3.

Nel caso di presenza di tensioni residue (configurazione reale), lo stato di sforzo dovuto alla torsione viene modificato ulteriormente nella zona limitrofa al danno. Se lo sforzo indotto dalla torsione è basso rispetto al valore delle tensioni residue, il punto di innesco delle cricche è determinato unicamente dalle autotensioni e dall'effetto di disturbo del danno già evidenziato nel caso ideale. Questo caso è visibile nella configurazione reale con coppia di +/- 100 Nm di figura 7: i punti di innesco si sono spostati completamente rispetto alla configurazione ideale. Nel caso in cui la coppia applicata genera uno stato di sforzo paragonabile alle tensioni residue, l'effetto di quest'ultime sulla determinazione del punto di innesco risulta tanto più trascurabile quanto più alta è la coppia applicata. Questo caso è visibile nella configurazione reale con coppia di +/- 1000 Nm di figura 7: i punti di innesco delle cricche sono coincidenti con quelli della configurazione ideale. Si può pertanto concludere che l'effetto delle tensioni residue sulla determinazione dei punti di innesco è limitato al caso in cui lo sforzo indotto dai carichi applicati al componente è notevolmente inferiore rispetto ai valori delle tensioni residue stesse. In caso contrario, lo studio dell'innesco può essere condotto trascurando la presenza delle tensioni residue, con notevole riduzione dei tempi di calcolo.

#### 4. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DELLE CRICCHE

Nella successiva fase del lavoro, è stato valutato l'effetto delle tensioni residue nella fase di propagazione delle cricche. Per ognuna delle cricche individuate durante lo studio dell'innesco, sono state condotte simulazioni di propagazione per ricavare i percorsi di propagazione e il valore del fattore di intensità degli sforzi in funzione della lunghezza di cricca; in questa fase non è stata considerata alcuna legge di propagazione. La simulazione è stata condotta per avanzamenti discreti rettilinei. Ad ogni avanzamento la direzione di propagazione è stata valutata tramite il criterio di massimizzazione del J-integral (*direction of maximum strain energy release rate*). Come evidente già

nella fase di innesco, le simulazioni hanno mostrato che la cricca propaga in modo I; infatti, i valori di  $K_{II}$  e  $K_{III}$  sono risultati notevolmente inferiori rispetto a quelli di  $K_I$ . In figura 8 sono mostrati i percorsi di propagazione per i diversi casi di figura 7.

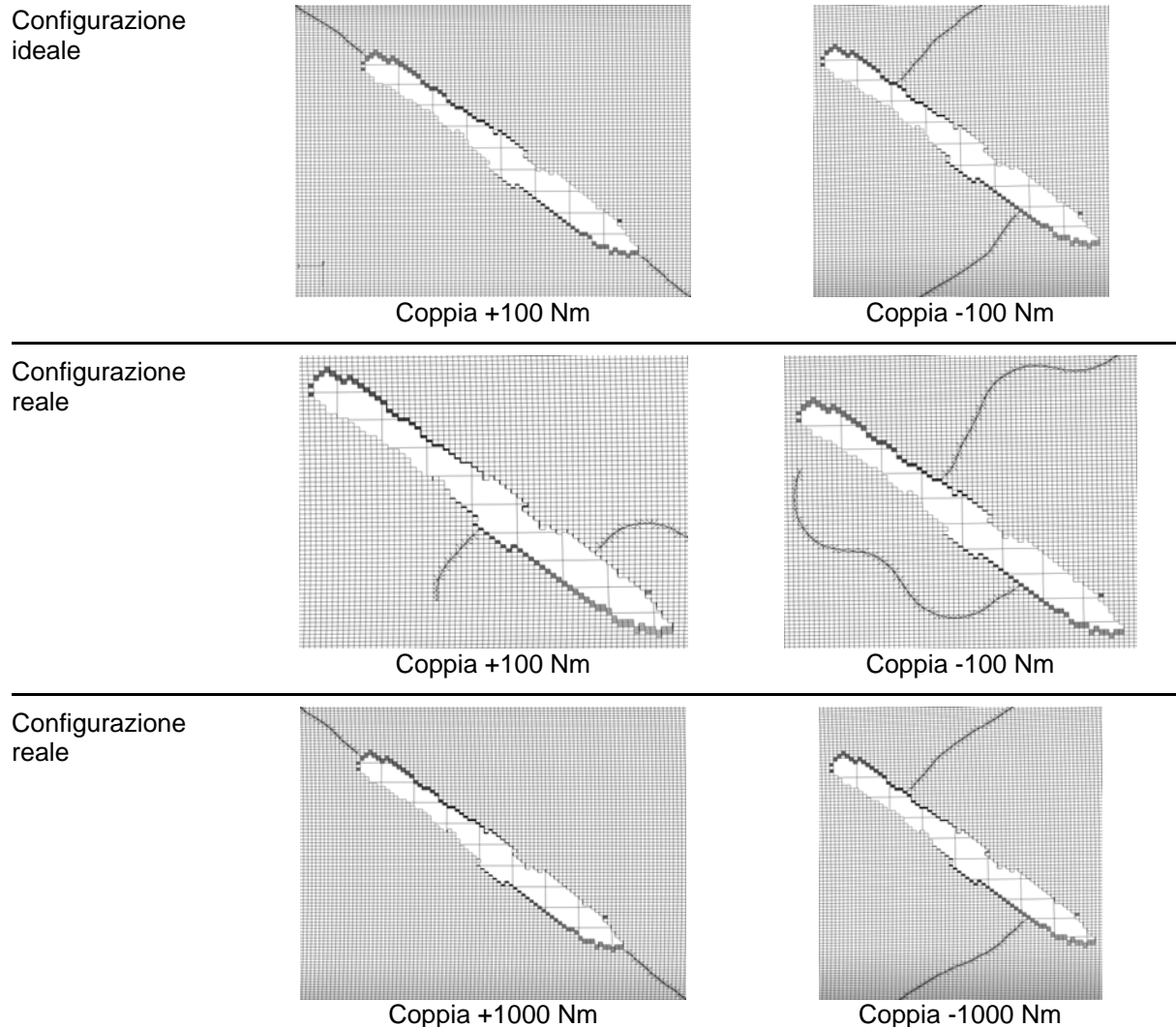


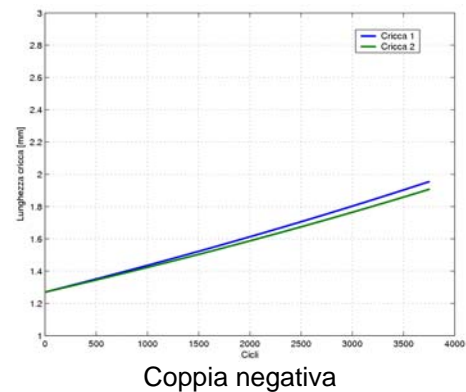
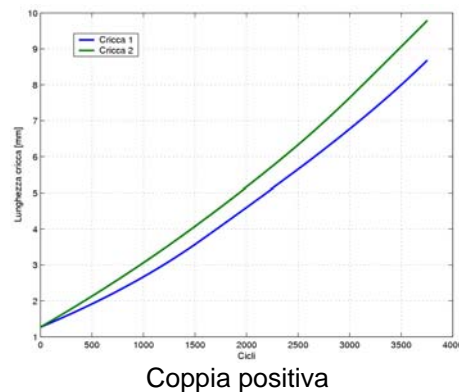
Fig.8 – Percorsi di propagazione delle cricche i cui punti di innesco sono indicati in figura 7

E' interessante notare come, nel caso di assenza di tensioni residue (configurazione ideale) e coppia positiva (+100 Nm), i percorsi di propagazione siano sostanzialmente coincidenti con quelli che si avrebbero per albero integro sottoposto solo a torsione (propagazione a  $45^\circ$  rispetto all'asse dell'albero). Nel caso di coppia negativa (-100 Nm) risulta evidente che la presenza del danno influisce solamente sulla prima parte della propagazione, che avviene approssimativamente in direzione ortogonale all'asse principale del foro ( $52^\circ$  rispetto all'asse dell'albero). A una certa distanza dal danno, la sua influenza diventa trascurabile e la propagazione segue un'inclinazione di  $45^\circ$  rispetto all'asse dell'albero, come nel caso di albero integro soggetto a torsione. Questo indica che la propagazione è controllata dalla sola coppia applicata. E' interessante evidenziare anche come in presenza di tensioni residue (configurazione reale) e con coppia bassa (+/-100 Nm), i percorsi di propagazione siano totalmente differenti rispetto alla configurazione ideale. Nel caso di coppia negativa (-100 Nm) una delle due cricche propaga addirittura parallelamente all'asse principale del foro. Questo è dovuto al fatto che la propagazione è controllata esclusivamente dalle tensioni residue e le cricche tendono a seguire le zone con presenza di tensioni residue massime di trazione. Questa situazione, in ogni caso, è sicuramente poco realistica poiché probabilmente il fattore di intensità degli sforzi applicato alla cricca risulta troppo basso per generare una propagazione a fatica. Nel caso in cui la coppia applicata risulta essere maggiore (+/- 1000 Nm), si ritrovano con buona approssimazione i percorsi della configurazione reale. Tale comportamento è dovuto al fatto che l'effetto delle tensioni

residue è limitato alla zona limitrofa al foro e il campo di sforzo indotto dalla coppia è paragonabile a quello dovuto alle autotensioni.

Per poter apprezzare l'effetto delle tensioni residue sui tempi di propagazione delle cricche, è stata applicata una legge di propagazione (legge di NASGRO [13]) ipotizzando un ciclo di fatica torsionale pulsante dallo zero con coppia variabile tra 0 e 1000 Nm. La simulazione è stata condotta per 3750 cicli, coprendo pertanto i 5 minuti di volo successivi all'impatto. I risultati sono riassunti in figura 9 per le diverse configurazioni analizzate. Le cricche, in questo breve periodo di tempo, non portano a cedimento l'albero. È interessante paragonare le due configurazioni iniziando dalla coppia positiva. In questo caso le cricche propagano più velocemente nella configurazione ideale arrivando a poco meno di 10 mm di lunghezza contro i circa 6,5 mm del caso reale. Questo comportamento è spiegabile osservando la distribuzione delle tensioni residue. Per cricca di lunghezza inferiore a circa 3 mm, le tensioni residue presenti sono di trazione e vanno pertanto a sommarsi alle tensioni di trazione indotte dalla coppia applicata. Questo rende la velocità di propagazione nel primo tratto della configurazione reale (coppia positiva) maggiore che nel caso ideale. Oltre i 3 mm di lunghezza, la cricca incontra tensioni residue di trazione di modulo inferiore o tensioni di compressione che inducono un rallentamento nella propagazione rispetto al caso ideale.

Configurazione ideale



Configurazione reale

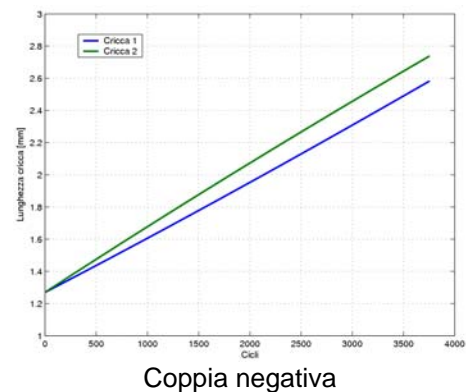
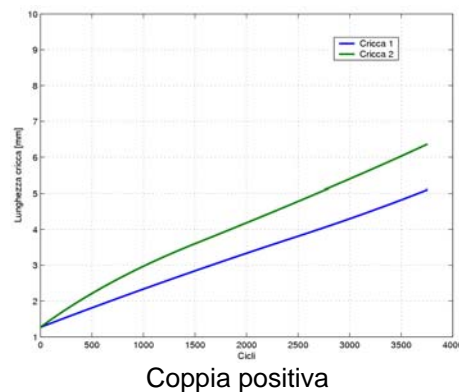


Fig. 9 – Risultati delle simulazioni di propagazione (ciclo di fatica 0-1000 Nm)

La situazione si presenta invece differente per il caso di coppia negativa. Dalla figura 9 risulta evidente che nella configurazione reale le cricche propagano di circa 2,8 mm contro 2 mm del caso ideale, con una differenza di circa il 29%, rapportata alla lunghezza del caso reale. Ciò è dovuto al fatto che, in questo caso, le tensioni residue rimangono di trazione fino a una lunghezza di circa 20 mm, come risulta evidente dal grafico di figura 10 che riporta l'andamento del fattore di intensità degli sforzi per la cricca 2 in funzione della sua lunghezza. Poiché il  $K_{min}$  del ciclo di fatica è calcolato con coppia applicata nulla, il suo segno è indice dell'azione di apertura o chiusura esercitata dalle tensioni residue sulla cricca.

## 5. CONCLUSIONI

Da quanto esposto si può concludere che, nelle situazioni reali, l'effetto delle tensioni residue può essere trascurato per quanto riguarda la determinazione dei probabili punti di innesco, a patto che lo stato di sforzo indotto dalla coppia esterna risulti paragonabile al valore delle tensioni residue stesse. In questo modo, lo studio dell'innesco può essere condotto nella configurazione ideale con notevole

riduzione dei tempi di calcolo. L'influenza delle tensioni residue risulta invece evidente sui tempi di propagazione a fatica. A seconda del caso analizzato, la stima dei tempi di propagazione potrebbe risultare non conservativa se condotta trascurando l'effetto delle tensioni residue (29% di errore nell'esempio mostrato sopra).

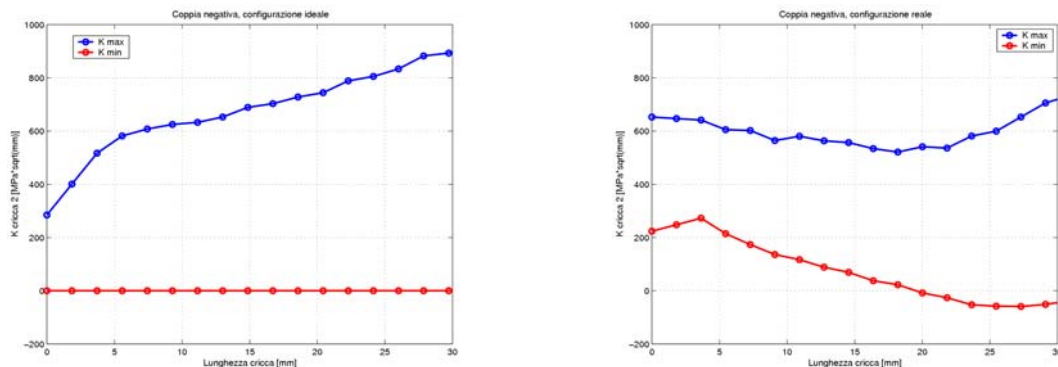


Fig.10 – Andamento del  $K_{max}$  e  $K_{min}$  del ciclo di fatica per la cricca 2 nel caso di coppia negativa (a sinistra la configurazione ideale, a destra la configurazione reale)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] USA Department of Defense, Military Handbook – Survivability, aircraft, nonnuclear, airframe – volume 2, MIL-HDBK-336-2, 1983
- [2] W.J.Stronge, "Impact and perforation of cylindrical shells by blunt missiles", in Metal Forming and Impact Mechanics, pp.289-302, Pergamon Press, Oxford, 1985
- [3] C.Palombi, W.J.Stronge, "Blunt missile perforation of the plates and shells by discing", *Intn. J. of Impact Engng.*, Vol. 7, 1988, pp. 85-100
- [4] X.Ma, W.J.Stronge, "Spherical missile impact and perforation of filled steel tubes", *Intn. J. of Impact Engng.*, Vol. 3, 1, 1985, pp.1-16
- [5] G.G.Corbett, S.R.Reid, S.T.S.Al-Hassani, "Static and dynamic penetration of steel tubes by hemispherically nosed punches", *Intn. J. of Impact Engng.*, Vol. 9, 2, 1990, pp. 165-190
- [6] W.Goldsmith, "Review: non-ideal projectile impact on targets", *Intn. J. of Impact Engng.*, Vol. 22, 1999, pp.95-395
- [7] D.Colombo, M.Giglio, "Projectile penetration in thin cylindrical rotor shaft", in corso di pubblicazione su *Computers & Structures*, 2006
- [8] D.Colombo, "Progettazione di componenti di elicottero in presenza di cricche e difetti", Politecnico di Milano, Tesi di dottorato, Milano, 2005.
- [9] D.Colombo, M.Giglio, "Valutazione del danno balistico su linea rotore di coda di elicottero", AIAS, XXXIV convegno nazionale, Milano, 2005
- [10] D.Colombo, "Metodologie numeriche per la valutazione del danno balistico in componenti elicotteristici", Politecnico di Milano, Tesi di Laurea, Milano, 2001
- [11] D.Colombo, M.Giglio, "A methodology for automatic crack propagation modelling in planar and shell FE models", *Engng, Fracture Mech.*; Vol. 73, 4, 2006, pp. 490-504
- [12] D.Colombo, M.Giglio, A.Manes, "3D fatigue crack propagation analysis of a helicopter component", in corso di pubblicazione su *Int. Journal of Materials and Product Tech.*, 2006
- [13] NASA Johnson Space Center, "*Fatigue crack growth computer program NASGRO version 4.11 - Reference manual*", Houston, Texas, 2004