

## **FAILURE ANALYSIS DI UN ROTORE DI ALTERNATORE CON UNA PROFONDA CRICCA TRASVERSALE**

C. Rinaldi, CISE Tecnologie Innovative, Segrate  
R. Crudeli, ENEL-DPT/VDT-STE, Pisa

**PAROLE CHIAVE:** rotore di alternatore, failure analysis, fatica, frattografia, linee di spiaggia, striature.

### **SOMMARIO**

Il lavoro descrive i risultati della failure analysis svolta su un rotore di alternatore, indice della presenza di una cricca. Dopo la sua apertura essa è risultata trasversale, di profondità superiore al 60% della sezione, cresciuta per fatica altociclica. L'analisi frattografica è stata finalizzata in primo luogo a spiegarne l'origine; è stato individuato il difetto di partenza e sono state analizzate le sollecitazioni presenti sia in direzione longitudinale (dovute alla flessione rotante), sia in direzione radiale (dovute al carico degli avvolgimenti e alla forza centrifuga). Dai calcoli di meccanica della frattura il difetto è risultato critico per la crescita a fatica, non nelle condizioni normali di funzionamento, ma sotto l'azione di sollecitazioni anomale subite dal componente nelle fasi iniziali dell'esercizio.

In secondo luogo si è chiarito come mai la crescita di una fessura così estesa sia stata rilevata solo quando le sue dimensioni sono diventate enormi. Per far questo è stata ricostruita l'evoluzione temporale della cricca, associando le linee di spiaggia (beach marks) osservabili sulla superficie di frattura con la storia di esercizio del componente; si è potuto stabilire che essa ha impiegato vari anni a crescere da alcune decine di millimetri di profondità fino alla attuale dimensione. Inoltre dalla valutazione delle velocità medie di propagazione si è potuto concludere che la maggior parte dell'avanzamento della cricca trasversale è avvenuto non durante l'esercizio, ma durante il passaggio nelle critiche, nel corso dei transitori. Proprio per questo non è stato possibile rivelare la presenza della cricca nè con il monitoraggio delle vibrazioni in dotazione alla centrale (che viene riazzerato ad ogni fermata), nè con le misure di apparecchiature più sofisticate, perchè effettuate troppo sporadicamente. Solo quando la enorme estensione della cricca l'ha resa capace di crescere a velocità nettamente sopra soglia anche a regime, sotto le sollecitazioni di esercizio, il monitoraggio on-line ne ha potuto rivelare la presenza.

## INTRODUZIONE

In questo lavoro viene presentata l'attività di failure analysis svolta da CISE ed ENEL su un rotore di alternatore ritirato dal servizio dopo circa 131000 ore di esercizio e 400 transitori di avviamento e fermata, a causa di un improvviso forte aumento di ampiezza delle vibrazioni durante la rotazione a regime. Una serie di controlli ultrasonori con gli avvolgimenti in-situ rivelò la presenza di una estesa fessura trasversale nella zona tra la cappa e il ventilatore. Anche uno studio di simulazione analitica del comportamento dinamico del rotore con una cricca confermò il risultato dei controlli. Dopo aver smontato gli avvolgimenti la fessura divenne visibile sulla superficie esterna del rotore, con uno sviluppo di più di 180° (v. Fig. 1).

Una fetta del rotore contenente la fessura è stata tagliata via dal componente e sottoposta a ulteriori più accurate analisi con gli ultrasuoni, per localizzare meglio la sua posizione. Quindi il pezzo è stato ridotto di dimensioni il più possibile ed è stato poi aperto per fatica su una macchina servoidraulica da 250t, con bassi carichi, senza danneggiare gli apici della cricca.

Le analisi sono state svolte con i metodi frattografici e metallografici classici (microscopia ottica e elettronica a scansione); le valutazioni si sono basate anche sui risultati di calcoli agli elementi finiti svolti dal costruttore /1/ e sono state finalizzate a comprendere le cause che hanno portato alla crescita della fessura e i motivi che hanno impedito per lungo tempo ai controlli in linea di rivelarne la presenza.

## RISULTATI DELLA FAILURE ANALYSIS

In Fig.2 è mostrata la superficie di frattura della cricca; essa è cresciuta per fatica ad alto numero di cicli, come indicato sia dal suo aspetto liscio e opaco, sia dalle numerose linee di spiaggia (beach marks = B.M.); la forma ellittica e concentrica di queste indica chiaramente che la posizione dell'innesco è al fondo della cava tra il primo dente e l'espansione polare.

## DIFETTO ORIGINE: NATURA, DIMENSIONI E POSIZIONE

Come evidente in Fig.3 un difetto emerge alla radice del dente; esso è ben visibile per le sue dimensioni notevoli e il suo aspetto in parte liscio e lucido e in parte rugoso e opaco; le analisi al microscopio elettronico a scansione e al microscopio metallografico in sezione hanno indicato che si tratta di un difetto di forgiatura, precisamente di una ricalcatura contenente numerosi ossidi (v. Fig.4); a seguito della lavorazione meccanica del rotore, esso è affiorato al fondo della cava in parte parallelamente all'asse del rotore (3mm) e in parte attraverso la cava stessa trasversalmente (per una lunghezza di circa 3mm). Il tratto affiorante a fondo cava è posto tra 6 e 9mm dalla faccia dei denti (iron end) in direzione assiale, come indicato in Fig. 5. Il difetto penetra in direzione obliqua assial-radiale entro il rotore per circa 30mm; le sue proiezioni sui piani normali alle sollecitazioni radiale e longitudinale attive in quella regione sono mostrate nello schizzo di Fig. 6.

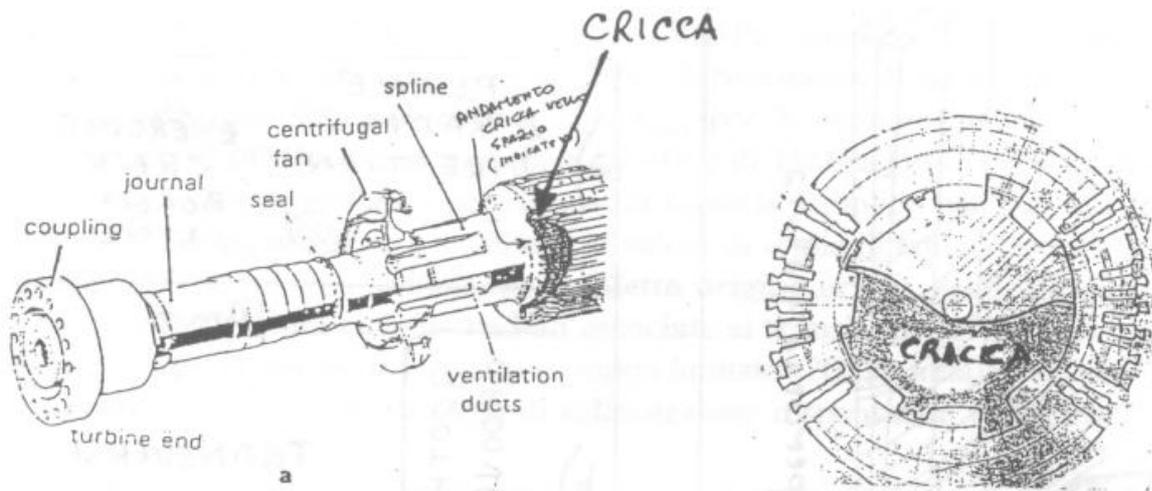


Fig.1 Schizzo del rotore con la profonda fessura trasversale.

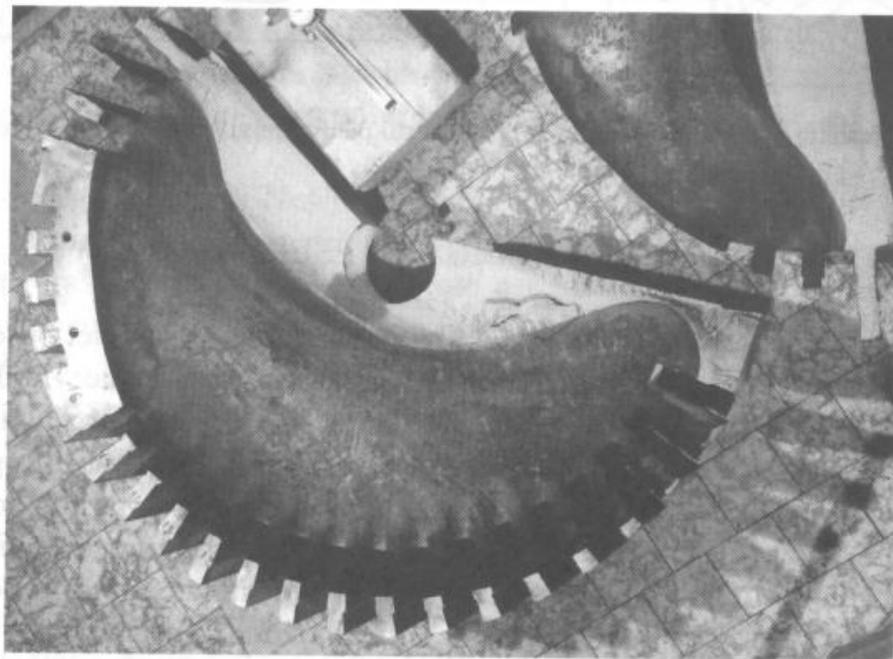


Fig.2 Aspetto complessivo della superficie di frattura della cricca, dopo l'apertura in laboratorio

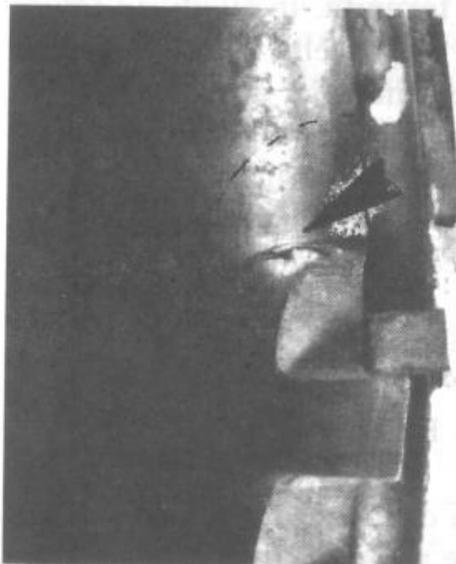


Fig. 3 Difetto origine e prima linea di spiaggia

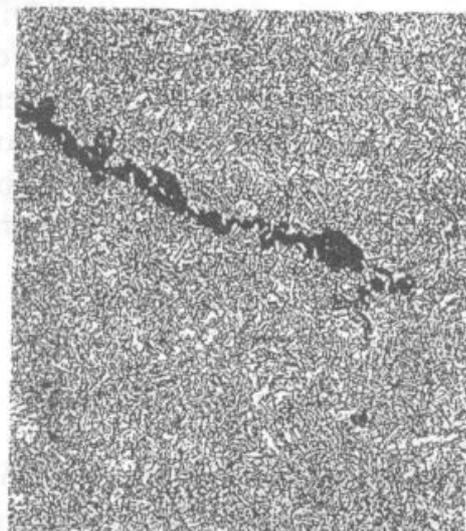


Fig.4 Aspetto della ripiegatura in sezione

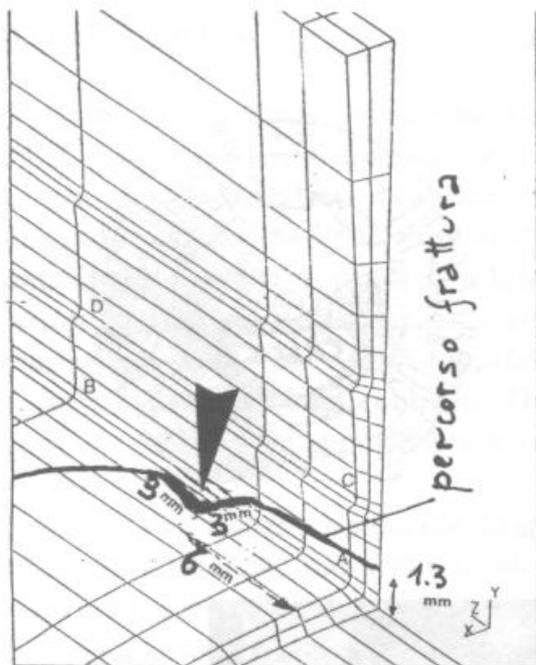


Fig.5 Posizione del difetto origine.

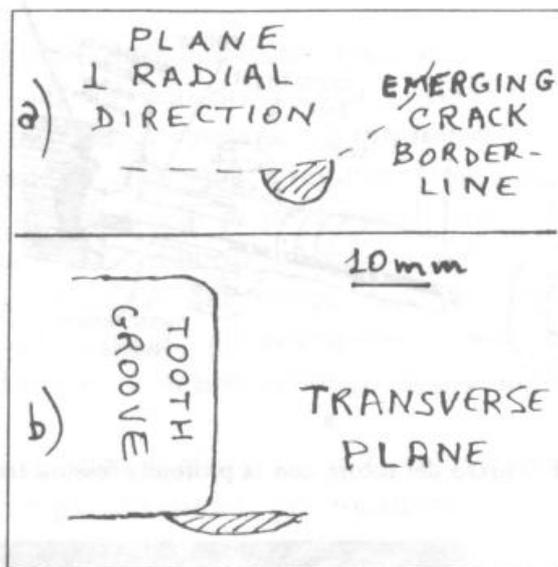


Fig.6 Proiezioni sui piani circonferenziale (a) e trasversale (b)

## DATI SALIENTI TRATTI DALLA STORIA DI ESERCIZIO

A regime il rotore ruota a 3000 giri al minuto e, per effetto del peso proprio, è sollecitato in direzione longitudinale a fatica (flessione rotante: **180000 cicli all'ora**, con  $R = -1$ ). Tale sollecitazione ha intensità decrescente dalla periferia verso il foro. La presenza di uno sbilanciamento residuo (inevitabile in ogni rotore e messo in evidenza dalle vibrazioni) provoca una lieve inflessione del rotore, che genera una sollecitazione costante solo se l'orbita è perfettamente circolare e centrata. Dato che questo non accade e in realtà il rotore ruota con orbite fortemente ellittiche, anche le vibrazioni inducono una sollecitazione pulsante sulle fibre del rotore. In particolare è ragionevole pensare che tali sollecitazioni raggiungano livelli particolarmente elevati nei passaggi alla velocità critica (750rpm) e a metà della velocità critica, **durante i transitori di avviamento e fermata**. In effetti sul rotore in oggetto si misurava una sensibile amplificazione dei livelli vibratori tali da portarli per circa 5 minuti a valori circa doppi di quelli misurati a regime. Perciò si può stimare che per ogni coppia fermata+avviamento il rotore subisca **circa 4000 cicli** di questo genere, con elevate sollecitazioni flessionali in periferia. Nel caso di un imperfetto allineamento tra turbina ed alternatore il livello di sollecitazione pulsante potrebbe essere ulteriormente elevato dal precarico indotto; in tal caso si tratta di cicli ad  $R \neq -1$  /5/.

## CRITICITA DEL DIFETTO PER LA CRESCITA A FATICA

La parte del difetto che giace nel piano normale alla direzione radiale può essere schematizzato (Fig.6a) come un **semiellisse affiorante a fondo cava**, con  $a=5\text{mm}$  e  $2c=7\text{mm}$  e allungato in direzione assiale. Utilizzando il valore massimo calcolato

della sollecitazione radiale a fondo cava (250MPa, secondo /1/) e la formula della cricca semiellittica affiorante in superficie di Newman e Raju per  $1 < a/c < 2$  /2/, si è calcolato un  $\Delta K$  (coincidente con  $K_{\max}$  per R negativi) all'apice del difetto dell'ordine di 24MPa $\sqrt{m}$  in superficie ( $\phi=0$ ) e di 18MPa $\sqrt{m}$  in profondità ( $\phi=90$ ) (in accordo con il risultato ottenuto con la formula semplice per una cricca penny-shaped: 22MPa $\sqrt{m}$ ). Esso è superiore al valore di soglia di fatica misurato su questo acciaio /3/. Se acuto a sufficienza **il difetto origine era in grado di propagarsi, sotto le sollecitazioni cicliche radiali associate ai transitori**; però il numero di cicli di questo tipo (1 per ogni fermata) è troppo limitato (200 in tutta la vita del rotore), per poter considerare questo tipo di sollecitazione responsabile del guasto.

In realtà il difetto è nel complesso più esteso di quasi 4 volte e giace su un piano medio inclinato di circa 30° rispetto al piano normale alla direzione radiale. Una sua parte può aver risentito delle sollecitazioni flessionali longitudinali con  $R=-1$ , indotte dalla rotazione del rotore; la proiezione della parte del difetto affiorante a fondo cava sul piano trasversale ha dimensioni di 15mm in direzione radiale e di circa 3 mm in direzione circonferenziale (con forma simile ad un ellisse molto allungato).

Applicando la formula di Newman e Raju per  $a/c < 1$  /2/, con il valore di  $\Delta\sigma = 20$  MPa $\sqrt{m}$  in direzione longitudinale calcolato in /1/ per la situazione a regime, alla proiezione trasversale del difetto avente  $a=3$ mm e  $c=7.5$ mm si ottiene un valore di  $\Delta K$  variabile tra 1.3 e 1.8MPa $\sqrt{m}$  lungo il suo apice, quindi ben al di sotto della soglia di 8MPa $\sqrt{m}$  misurata per  $R=-1$  su questo materiale/3/: nessuna propagazione può dunque essere avvenuta durante i periodi di normale funzionamento.

Risalendo ai fatti salienti della storia del componente si è trovato che nel periodo del primo avviamento, a causa di alcuni problemi il rotore ha avuto vibrazioni di ampiezza molto maggiore di quella a regime per la quale è stato calcolato il valore di  $\Delta\sigma = 20$  MPa. Più precisamente l'ampiezza delle vibrazioni era 5-6 volte superiore a quella di regime. Se a ciò corrispose un aumento di ampiezza del ciclo di sollecitazione di un fattore circa 6, si può stimare  $\Delta\sigma = 120$  MPa e all'apice del difetto  $\Delta K = 11$  MPa $\sqrt{m}$ , superiore al valore di soglia misurato ad  $R=-1$  pari a 8MPa $\sqrt{m}$  /3/. Dunque **i brevi periodi di rotazione in condizioni anomale all'inizio della storia del rotore possono aver contribuito in modo significativo alla crescita iniziale del difetto di origine** fino a dimensioni tali da poter propagare (come descritto nel seguito).

## FRATTOGRAFIA E RICOSTRUZIONE DELLA STORIA DELLA FESSURA

La fase di propagazione da qualche decina di millimetri a quasi mezzo diametro del rotore è avvenuta per fatica ad alto numero di cicli sotto l'azione delle sollecitazioni flessionali.

La cricca è partita a circa 10mm dal piano frontale, è cresciuta in una prima zona in direzione assial-radiale e poi si è gradualmente orientata in un piano quasi trasversale, nel quale è cresciuta fino al fronte finale, che ha una distanza variabile da circa 50 a 100mm in direzione assiale dal piano frontale del rotore, lato

comando. Confrontando la giacitura della cricca con la schematizzazione delle sollecitazioni ottenuta con gli elementi finiti in /1/, come mostrato in Fig.6, si nota chiaramente il fatto che la cricca nel corpo del rotore ha una giacitura media perpendicolare alla sollecitazione principale locale a regime, come atteso.

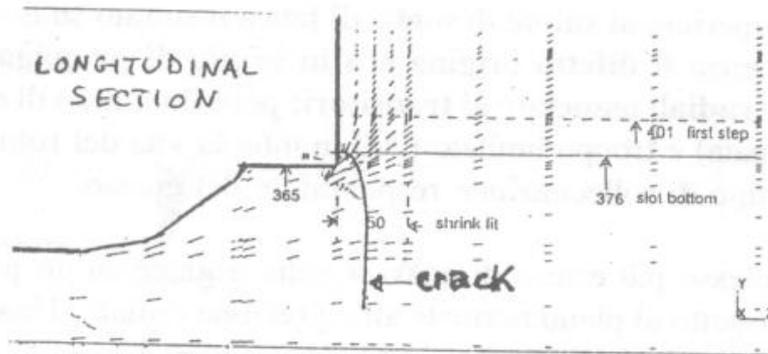


Fig. 6 Schizzo della giacitura della cricca rispetto alla sollecitazione principale attiva durante la rotazione a regime.

Il passaggio alla velocità critica durante i transitori induce una variazione di rapporto R o comunque di ampiezza dei cicli di carico indotti dalla flessione rotante. Si è associato pertanto a ciascun B. M. osservabile sulla superficie di frattura un transitorio (o meglio l'insieme di un arresto e del successivo riavviamento); partendo dal fronte finale verso l'innescò, se ne possono chiaramente contare circa 150 ben distinti. E' stata verificata una buona correlazione tra la storia del rotore (sequenza periodi di esercizio e fermate) e la successione delle linee di spiaggia, fino alla prima visibile a circa 50mm dall'innescò (v. Fig.3). In particolare è stata identificata con sicurezza una fermata della cricca su una parte del fronte (freccia in Fig.2), associata ad una revisione generale del componente con riallineamento. Ciò ha consentito di confermare che la fessura ha impiegato vari anni a raggiungere la metà delle dimensioni finali, ma che nell'ultimo anno si è propagata per più di metà della lunghezza totale.

## STIMA DELLE VELOCITA' MEDIE DI CRESCITA

E' stata poi effettuata una **stima delle velocità medie di crescita della cricca** trasversale; una prima valutazione può essere fatta dividendo la sua estensione dal primo B.M. visibile al fronte finale (circa 160mm) per il numero di cicli corrispondente alle rotazioni a regime del periodo di effettivo esercizio corrispondente: circa 33000 ore, cioè  $5.9 \cdot 10^9$  cicli. Ne risulta una velocità di crescita media di circa  $3 \cdot 10^{-8}$  mm/ciclo, inferiore alla soglia (dalle norme indicata come  $10^{-7}$  mm/ciclo). Ne consegue che **per la maggior parte della sua storia la cricca era quasi ferma durante i periodi di esercizio a regime**. La sua propagazione deve dunque essere avvenuta a causa dei cicli di sollecitazione più elevati indotti dai transitori.

Dal rapporto tra la estensione di cricca suddetta (circa 160mm) e il numero di cicli associabili ai transitori (circa 150 doppie risonanze, equivalenti a circa 600000 cicli)

la velocità risulta dell'ordine di  $3 \cdot 10^{-4}$  mm/ciclo, superiore alla soglia. Da ciò si è potuto concludere che **l'avanzamento della cricca trasversale è avvenuto durante i transitori, e non a regime**; i periodi a regime hanno provocato invece la fermata della cricca e la linea di spiaggia corrispondente. Il monitoraggio continuo delle vibrazioni per essere efficace avrebbe dovuto essere concentrato dunque sull'analisi delle variazioni della risposta dinamica in transitorio.

Nelle Tab. 1 e 2 sono riportati i risultati delle stime di velocità effettuati con questo criterio, a partire dalle sequenze di linee di spiaggia meglio leggibili sulla superficie di frattura. In tab.2 si nota che la cricca tende a diminuire la sua velocità man mano che avanza in direzione radiale verso il foro centrale, in accordo con la ben nota diminuzione della sollecitazione longitudinale; il riallineamento dopo averla momentaneamente fermata ha provocato una situazione che alla lunga l'ha portata a riaccelerare. Dai dati di Tab. 1 risulta invece che la velocità aumenta notevolmente al crescere della profondità di cricca in periferia, laddove la sollecitazione indotta dalla flessione rotante ha la massima intensità.

L'analisi dettagliata dell'ultimo tratto di propagazione dalla parte del fronte dove finiscono i denti rotti e la cricca incontra l'espansione polare, ha consentito di evidenziare che **la cricca ha avanzato nell'ultimo periodo di esercizio** di circa 15mm; si spiega così perchè il monitoraggio continuo ha allora rilevato un aumento di ampiezza delle vibrazioni, a seguito del quale si è deciso di spegnere l'impianto.

## CONTRIBUTO DELLA MICROFRATTOGRAFIA

La superficie di frattura è stata osservata al microscopio elettronico (SEM) con microanalisi solo in tre piccole regioni :

- nella regione dell'innesco per individuare la natura del difetto origine; con la microanalisi EDS si è potuto determinare che i prodotti granulosi presenti sono ricchi in O, Al, Ca, S, Mn;
- nella regione iniziale della propagazione per fatica vicino all'innesco; sono state notate striature molto interspaziate (dell'ordine dei decimi di micrometro), in accordo con all'elevato valore di  $DK$  valutato all'apice del difetto in corrispondenza delle citate sollecitazioni notevoli indotte dall'anomalia di funzionamento iniziale.
- nella regione finale della cricca, in periferia: gli ultimi 40mm prima dell'apice. Sono state individuate ampie regioni intergranulari, indice di un infragilimento notevole del materiale, indotto dal doppio trattamento termico iniziale (utilizzato a volte in passato per migliorare le proprietà del forgiato). L'interspaziatura delle striature nelle regioni transgranulari del tratto finale è di circa 0.5 micron al ciclo, inferiore di un ordine di grandezza alla velocità stimata in Tab.1; notevole è perciò il contributo del meccanismo di distacco intergranulare alla crescita della cricca. Basandosi sulle curve di Paris ottenute su questo materiale [3] e sulla stima dell'ordine di grandezza di  $da/dN$  ottenibile dalla misura dell'interspaziatura delle striature di fatica, è stato stimato che all'apice della cricca durante la rotazione alle velocità critiche nell'ultimo transitorio  $DK_{cf} = 35 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , non molto inferiore alla tenacità misurata a temperatura ambiente sul materiale in esame. Ciò conferma l'utilità estrema dei controlli vibrazionali on-line.

Tab.1 Risultati delle misure macrofrattografiche effettuate sulla controparte della frattura lato rotore, mostrata in Fig.2: valutazioni effettuate in direzione circonferenziale, a circa 20mm dalla base dei denti.

POSIZIONE <sup>+</sup>	$\Delta a$ (mm)*	N° B.M.	densità B.M. (N°/mm)	interspaziatura media B.M. (mm)	da/dN** (mm/ciclo)
prima cava	15-30	14	0.9	1.1	$2.2 \cdot 10^{-4}$
1°d	30-55	9	0.36	2.8	$7.0 \cdot 10^{-4}$
2 e 3° c+d	55-165	25	0.23	4.4	$1.1 \cdot 10^{-3}$
4°- 8° c+d	165-440	53	0.19	5.2	$1.3 \cdot 10^{-3}$
9°-11° c+d	440-605	27	0.16	6.1	$1.5 \cdot 10^{-3}$
12°c -fine	605-825	14	0.06	15.7	$4.0 \cdot 10^{-3}$

<sup>+</sup> si ricorda che ogni cava (c) è ampia 30mm e ogni dente (d) 25mm circa; la numerazione dei denti qui adottata parte dall'innesco, posto nella cava (qui detta prima cava) accanto all'espansione polare. Con il termine fine si è indicato il fronte finale della cricca.

<sup>\*</sup> avanzamento della cricca a partire dall'innesco, in direzione circonferenziale verso il lato dei denti (Fig.2), misurato sempre, anche alla fine, alla radice dei denti stessi.

<sup>\*\*</sup> Velocità medie della cricca in periferia, stimate dividendo l'interspaziatura media della colonna precedente per 4000, pari al numero di cicli di fatica associabili alle vibrazioni di notevole ampiezza del rotore indotte dalla rotazione alla velocità critica, durante i transitori di avviamento ed arresto. Si fa notare che gli stessi valori di interspaziatura divisi per i cicli corrispondenti alla durata media del periodo di esercizio, 200 ore, a 3000rpm tra (36 milioni di cicli), danno valori da/dN superiori alla soglia (dell'ordine di  $5 \cdot 10^{-7}$  mm/ciclo) solo nell'ultimo tratto di propagazione (ultima riga).

Tab.2 Risultati delle misure macrofrattografiche effettuate sulla controparte della frattura lato rotore, mostrata in Fig.2: valutazioni effettuate in direzione radiale a partire dal difetto origine. La doppia riga corrisponde alla fermata della crescita della cricca in direzione radiale, a seguito del riallineamento.

$\Delta a$ (mm)	N° B.M.	densità B.M. (N°/mm)	interspaziatura media B.M. (mm)	da/dN** (mm/ciclo)
60	28	0.47	2.1	$5 \cdot 10^{-4}$
75	47	0.63	1.6	$4 \cdot 10^{-4}$
20	17	0.85	1.2	$3 \cdot 10^{-4}$
41	20	0.49	2.0	$5 \cdot 10^{-4}$
54	21	0.38	2.6	$6 \cdot 10^{-4}$

<sup>\*\*</sup> Velocità medie della cricca in direzione radiale, stimate dividendo l'interspaziatura media della colonna precedente per 4000, pari al numero di cicli di fatica associabili alle vibrazioni di notevole ampiezza del rotore alla velocità critica, durante i transitori di avviamento ed arresto.

## CONCLUSIONI

Gli esami frattografici e metallografici hanno evidenziato all'origine della frattura un **difetto di forgiatura assimilabile ad una ripiegatura, affiorante a fondo cava** delle dimensioni indicative di 7mm in direzione assiale, 5mm in direzione circonferenziale e 30mm in direzione radiale. Va notato che la dimensione del difetto di origine affiorante a fondo cava è superiore a quanto **rivelabile con i CND**; esso sarebbe stato individuato qualora il rotore fosse stato sottoposto ad un accurato controllo magnetoscopico a fondo cava, nel corso delle operazioni di riavvolgimento del rotore.

Le dimensioni notevoli del difetto e la sua posizione in corrispondenza di una **zona ad elevate sollecitazioni radiali**, insieme ad alcune anomalie iniziali nel comportamento rotatorio della macchina ne hanno causato la crescita.

L'analisi della fase iniziale della propagazione per fatica a partire dal difetto origine è stata basata sui risultati dei calcoli agli elementi finiti disponibili (svolti ad un fondo cava simile a quello a cui affiorava il difetto di origine). Le sollecitazioni sono risultate a fatica trazione-compressione, con  $R = -2.2$ , in regime elastico. I valori di  $DK$  calcolati all'apice del difetto di origine sono risultati superiori ai valori di soglia di fatica misurati in prove di laboratorio ad  $R$  negativi sull'acciaio in esame; perciò esso è risultato **critico per la crescita a fatica**. Comunque il numero ridotto di transitori fa ritenere trascurabile la crescita dovuta a questo tipo di sollecitazione e considerevole invece il contributo delle sollecitazioni longitudinali anomale indotte dai problemi iniziali di discontinuità del film d'olio.

L'analisi macrofrattografica della superficie di frattura ha consentito di individuare una buona correlazione tra le linee di spiaggia presenti sulla superficie di frattura e la storia di esercizio del rotore; ciò ha fornito informazioni piuttosto precise sulla **tempistica di crescita della cricca**.

Le valutazioni delle velocità medie di propagazione ottenute dal rapporto tra l'interdistanza di linee di spiaggia ben visibili e i numeri di cicli a fatica associati ai corrispondenti periodi di esercizio a regime hanno dato valori inferiori a quelli di soglia. L'analoga valutazione effettuata rispetto ai cicli di fatica associati alle vibrazioni del rotore alla velocità critica, hanno dato invece valori molto superiori alla soglia. Ciò ha consentito di concludere che **la maggior parte dell'avanzamento della cricca trasversale è avvenuto durante i transitori** e non durante l'esercizio. Nell'Appendice si riportano alcune osservazioni che chiariscono perchè non è stato possibile rilevare questa crescita lentissima di cricca nè con il monitoraggio delle vibrazioni in dotazione alla centrale, nè con le troppo sporadiche misure di apparecchiature più sofisticate.

Il monitoraggio on line delle vibrazioni, anche nella forma rudimentale in dotazione alla macchina, è comunque risultato molto utile ad evitare il peggio, poichè ha rilevato l'aumento dell'ampiezza delle vibrazioni a regime nell'ultimo periodo di esercizio, durante il quale la cricca era così profonda che il  $DK_{eff}$  è risultato decisamente superiore alla soglia e la sua velocità di crescita è notevolmente aumentata (come riscontrato sulla superficie di frattura).

## BIBLIOGRAFIA

- /1/ G. Ebi and W Rutti, *Failure analysis of cracked Turbigo 4 generator rotor*, Technical Note ABB TN KWDE3 92/26, 1992.
- /2/ J.C. Newman, Jr. e I.S. Raju, *Stress Intensity Factor Equations for cracks in three dimensional finite bodies*, in Fracture Mechanics: 14<sup>th</sup> Symposium-vol.1: Theory and Analysis. ASTM STP 791, J.C. Lewis e G. Sines, Eds., American Society for Testing and Materials, 1983, pp.I-238--I-265.
- /3/ V. Bicego, E. Lucon, C. Rinaldi e R. Crudeli, *Failure Analysis of a generator rotor: fractography and fracturemechanics approach*, Proc. ECF 11, Poitiers, 3-6 Sept. 1996.
- /4/ T. C. Lindley, *Fatigue cracking in power plant*, Proc. FATIGUE 1993, 1767.
- /5/ A. Muszynska, *Shaft vibration versus shaft stress*, Orbit, dec.1989, 4.