

**IGF 11 - XI Convegno Nazionale  
Gruppo Italiano Frattura  
Brescia, 4-6 luglio 1995**

**DANNEGGIAMENTO PER FATICA DI UNA GIRANTE TRIDIMENSIONALE DI  
UN COMPRESSORE CENTRIFUGO.**

**E. Giorni, M. Innocenti**

**Nuovo Pignone - Laboratorio Metallurgico e Tecnologico - Via F. Matteucci n° 2  
50127 Firenze**

**Sommario.**

Il controllo del rotore multistadio di un compressore centrifugo, eseguito dopo il suo arresto avvenuto per vibrazioni eccessive, ha individuato il danneggiamento del bordo ingresso di alcune pale di una girante tridimensionale realizzata per saldatura con acciaio forgiato al cromo-molibdeno. I controlli non distruttivi e distruttivi eseguiti sulla girante hanno permesso di individuare nella fatica ad alto numero di cicli il meccanismo di frattura e di escludere anomalie nel materiale o nel processo di produzione. Inoltre l'esame delle condizioni di funzionamento del compressore unitamente ad alcune considerazioni di meccanica della frattura hanno consentito di attribuire l'origine del danno al pompaggio, verificatosi nelle ultime ore di funzionamento per errata conduzione dell'impianto.

**Introduzione.**

Nel presente lavoro si descrivono i risultati emersi nel corso di un'indagine frattografica di una girante tridimensionale (3D) appartenente ad un compressore centrifugo installato in una stazione di pompaggio per gas naturale. Il danno che ha interessato alcune pale della girante è stato rilevato dopo 10 giorni di marcia del compressore a seguito di un arresto causato da eccessive vibrazioni dell'albero. Nelle ultime ore il compressore aveva marciato in condizioni di pompaggio, al di fuori del campo caratteristico previsto dal progetto, alla velocità di 7900 rpm.

**Fabbricazione della girante.**

La girante 3D del tipo chiuso, di diametro 660 mm, è costruita utilizzando due dischi di acciaio forgiato in 2 1/4Cr1Mo. Le pale del disco, ottenute per fresatura, sono saldate al controdisco con procedimento automatico TIG (tungsten inert gas) e manuale con elettrodo rivestito (vedi fig. n° 1).

Le proprietà meccaniche della girante, conferite con trattamento termico di bonifica, sono le seguenti:

|                     | R (MPa) | R 0.2% (MPa) | A % | KCU (J/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|---------|--------------|-----|--------------------------|
| Richiesto           |         | 637÷735      |     | ≥39                      |
| Controdisco girante | 749     | 640          | 21  | 198                      |
| Disco girante       | 767     | 653          | 24  | 200                      |

Le proprietà meccaniche dei giunti, eseguiti con procedimento manuale ed automatico di saldatura e determinate nel corso delle attività di qualifica, sono del tutto simili a quelle del materiale base.

### **Attività d'indagine.**

#### ***Esame visivo.***

Sulla girante preliminarmente è stato effettuato un esame visivo; non sono state rilevate impronte, abrasioni generate da corpi estranei entrati accidentalmente nel compressore. Si è rilevata invece la presenza su quattordici pale, lato aspirazione, di una cricca localizzata in corrispondenza della saldatura manuale.

Una sola pala è risultata piegata e criccata su ambedue i lati, disco e controdisco, com'è osservabile nella foto n° 1.

#### ***Controlli non distruttivi (PT, MT wet).***

Sono stati condotti dei controlli non distruttivi mediante liquidi penetranti rossi ed un esame magnetoscopico ad umido con polvere fluorescente.

Le estensioni delle cricche rilevate sulle pale con LP sono risultate comprese fra 30 e 150 mm (vedi foto n° 2).

Il controllo magnetoscopico ad umido ha confermato il tipo e l'estensione dei difetti evidenziati con il precedente esame (vedi foto n° 3).

Solo tre delle diciassette pale sono risultate esenti da cricche.

#### ***Esame dimensionale.***

Il controllo dimensionale ha confermato le misure rilevate in fase di collaudo finale della girante. Il particolare quindi, a seguito del danno non ha subito deformazioni permanenti apprezzabili.

#### ***Prove estensimetriche dinamiche.***

Sono state misurate le frequenze critiche di vibrazione del bordo di attacco di due pale non danneggiate, allo scopo di individuare il campo di funzionamento del compressore che poteva dar luogo ad una eccitazione critica da parte del diffusore posto a valle della girante. Queste sono risultate comprese fra 1450 Hz e 1500 Hz. La frequenza di eccitazione data

dalle dodici pale del diffusore coincide con quella naturale delle pale della girante per una velocità di rotazione compresa fra 7250 e 7500 rpm.

### ***Esame frattografico.***

Sono state esaminate le superfici di frattura di due pale in posizioni diametralmente opposte. Dopo aver liberato la frattura dal resto della pala più danneggiata e dopo aver aperto la cricca presente nell'altra pala mediante raffreddamento in azoto liquido, le superfici di rottura sono state osservate al microscopio stereoscopico e successivamente al microscopio elettronico a scansione. La superficie di frattura della prima pala si presenta ricalcata, si rileva macroscopicamente una morfologia tipica delle rotture avvenute per fatica. L'azione di ricalcatura (strisciamento) ha impedito di ottenere ulteriori dettagli microfrattografici inerenti alle modalità di rottura. Gli inneschi sono avvenuti probabilmente in prossimità del bordo pala disco e controdisco e si sono propagati parallelamente, per circa 70 mm. e 45 mm. dopodiché si è verificato un cambiamento di direzione con propagazione radiale che ha interessato la quasi totale larghezza della pala.

Per quanto concerne la morfologia di frattura della seconda pala, più significativa ai fini dell'indagine, si segnala quanto segue: la rottura si è propagata per circa 70 mm. dal bordo pala raggio di raccordo pala-controdisco; presenta macroscopicamente un aspetto tipico di frattura avvenuta per fatica, sono rilevabili diversi punti d'innescio e linee di riposo. Tutti gli inneschi sono localizzati su lato intradosso della pala. La propagazione della rottura per fatica è avvenuta in direzione longitudinale rispetto all'asse della pala e non ha interessato l'intero spessore. La frattura in "A", vedi foto n° 4 è la prima ad essersi innescata e non è dovuta ad un unico punto d'innescio bensì a diversi inneschi localizzati in corrispondenza della pala dove si ha il minor spessore. Dopo la terza linea di riposo la frattura presenta una morfologia associabile ad una maggiore velocità di propagazione della rottura, conseguente ad un ulteriore innesco presente nell'area "C" della foto precedente. La zona "D" è dovuta a più inneschi presenti su entrambi i lati della pala ed è caratterizzata da un andamento molto frastagliato tipico di rotture secondarie. Infine nella zona "B" che corrisponde ad una propagazione veloce della rottura si rilevano morfologie miste di tipo transgranulari ed intergranulari. A più elevati ingrandimenti si osservano all'interno delle zone precedentemente citate "A", "C" e "D", le caratteristiche striature di fatica com'è osservabile nelle foto n° 5, 6 e 7 eseguite rispettivamente nella parte iniziale di propagazione (foto n° 5 e 6) e terminale della rottura (foto n° 7).

In seguito sono state esaminate altre due superfici di frattura che presentavano la maggior estensione del difetto ( $\approx 100$  mm.). La morfologia macroscopica delle fratture risulta paragonabile a quanto rilevato sulle due precedenti pale. Anche in questo caso le rotture sono tipiche di fratture avvenute per fatica ad alto numero di cicli con inneschi localizzati in corrispondenza del lato intradosso bordo di attacco pala-controdisco.

### ***Esami micrografici e rilievi di durezza.***

Gli esami micrografici ed i rilievi di durezza sono stati eseguiti sia su campioni prelevati da pale criccate e da pale integre per verificare lo stato strutturale del materiale e la qualità dei

giunti di saldatura. Sono stati ricavati dei provini micrografici in sezione trasversale all'asse della pala in zone iniziali e finali della rottura e una sezione longitudinale in corrispondenza del passaggio tra saldatura automatica e manuale. Esaminando i provini ricavati dalle pale criccate è emerso che le rotture si sono innescate in zone termicamente alterate e si sono propagate interessando a tratti sia la saldatura che il materiale base in zona termicamente alterata. Sui provini non sono stati rilevati difetti di saldatura, il materiale si presenta con un buon grado di omogeneità strutturale infatti risulta difficile in alcune aree valutare la linea di fusione. Queste ultime circostanze sono state confermate anche dai rilievi di durezza eseguiti su materiale base della pala e del controdisco e sul materiale di apporto. Le durezze sono risultate mediamente pari a 230 HV 5, in linea con i carichi a rottura del materiale. Le foto n° 8 e 9 rappresentano delle macrografie dei provini, con riportati anche i valori di durezza, ottenuti dalla dissezione di una delle pale criccate. In una delle pale non criccata oltre ad esaminare la zona di saldatura manuale, è stata posta attenzione alla zona saldata in automatico osservando sia un provino ricavato in longitudinale, e rappresentativo dell'area di passaggio fra i due tipi di saldatura, che un provino ricavato trasversalmente in zona eseguita in automatico. Non sono stati osservati difetti di saldatura ed i rilievi macrografici e di durezza confermano la buona omogeneità strutturale dei riporti di saldatura e del materiale base. Su tutti i campioni micrografici precedentemente osservati è stato effettuato un attacco chimico, con reattivo acido picrico a saturazione più tensioattivo, al fine di mettere meglio in evidenza la linea di fusione e le eventuali segregazioni. È stato possibile nella maggioranza dei casi mettere in risalto la linea di fusione mentre non sono state evidenziate segregazioni di rilievo sia nel materiale base che in quello della saldatura manuale.

#### **Analisi chimica.**

Le composizioni chimiche dei forgiati utilizzati per la realizzazione del disco e del controdisco sono state ricontrollate e sono risultate conformi a quanto riportato nei documenti di collaudo. Quella del deposito di saldatura è risultata conforme al tipo di materiale di apporto prescritto.

|                | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   |
|----------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| Disco          | 0.15  | 0.37 | 0.44 | 0.009 | 0.008 | 2.37 | 0.99 |
| Controdisco    | 0.15  | 0.37 | 0.44 | 0.010 | 0.009 | 2.38 | 0.98 |
| Dep. saldatura | 0.070 | 0.57 | 0.75 | 0.021 | 0.009 | 2.49 | 1.17 |

#### **Commenti agli esami.**

Non sono state rilevate anomalie nello stato metallurgico del materiale base e di quello di saldatura. In corrispondenza delle zone di saldatura manuale ed automatica non sono stati osservati difetti, così come nelle aree di innesco delle rotture; pertanto il danno non è da attribuire né ai materiali utilizzati né ai processi di fabbricazione.

Le fratture sono dovute a carichi ciclici affaticanti e si sono innescate in prossimità del bordo di ingresso pala dove è presente un'area rastremata, nel raccordo al controdisco.

Le rotture si sono generate in aree termicamente alterate mentre le successive propagazioni sono avvenute a tratti interessando sia queste aree che il riporto di saldatura.

### **Considerazioni.**

Il compressore ha lavorato per nove giorni ad una velocità compresa fra 7200 e 7500 rpm (la velocità di lavoro è di 6800 rpm) e per alcune ore in condizioni di pompaggio che hanno generato pulsazioni con frequenza di  $\simeq 30$  Hz. Nel primo periodo il diffusore palettato ha prodotto eccitazioni di frequenze nel campo critico per le pale; tuttavia per la posizione dello stesso rispetto alla girante, difficilmente queste eccitazioni potevano coinvolgere il bordo di attacco delle pale. E' quindi ragionevole collocare nel secondo periodo l'origine del danno subito dal compressore.

L'approccio di frattografia quantitativa che segue conferma quanto sopra detto.

Utilizzando la correlazione esistente fra le spaziature delle strie misurate al SEM ( $\simeq 5$  strie al micron) ed il parametro  $\Delta K/E$  si ottiene dal diagramma riportato in fig. n° 2 un valore di  $\Delta K=40 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ . La velocità di propagazione della cricca, ricavata dal diagramma di fig. n° 3, specifica per l'acciaio 2 1/4Cr1Mo, è dell'ordine di  $3 \cdot 10^{-4}$  mm/ciclo.

Supponendo una velocità di propagazione costante nel tempo si può calcolare il tempo di frattura nelle due diverse condizioni di lavoro del compressore. In particolare facendo riferimento ad una cricca di lunghezza pari a  $\simeq 150$  mm, la massima rilevata, si calcolano tempi di  $\simeq 6$  min. e di  $\simeq 5$  ore rispettivamente per l'eccitazione critica indotta dal diffusore e per la condizione di pompaggio. A quest'ultimo, in base alle condizioni di funzionamento del compressore durante i 10 giorni di marcia, è quindi ragionevole attribuire la causa del danno.

### **Conclusioni.**

Il danneggiamento della girante è stato causato dal prolungato funzionamento del compressore in regime di pompaggio. Questo ha prodotto variazioni di carico sulle pale di intensità tale da portare a nucleazione ed alla propagazione di difetti per fatica.

### **Bibliografia**

Metals Handbook, Ninth Edition, Vol 1 -Properties and selection: Irons and Steel- pag. 660.

Metals Handbook, Ninth Edition, Vol 8 -Mechanical Testing- pag. 484.

Metals Handbook, Ninth Edition, Vol 12 -Fractography-.

Metals Handbook, Ninth Edition, Vol 11 -Failure Analysis and Prevention-.

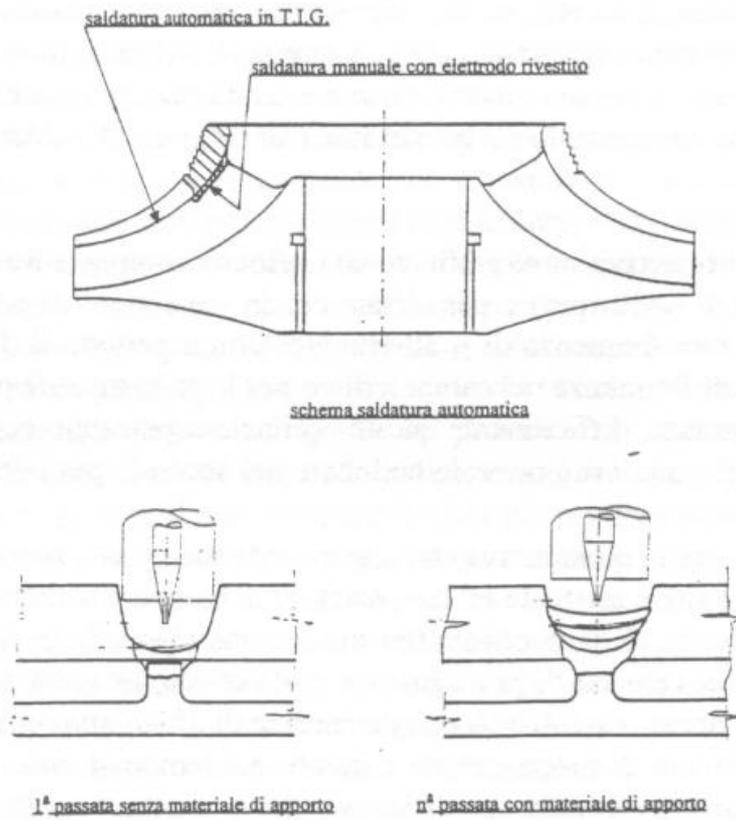


Fig. 1 - Schema di costruzione della girante

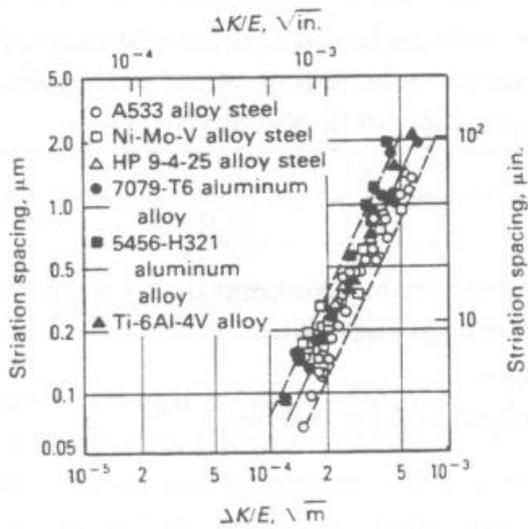


Fig. 2 - Diagramma spaziatura Strie in funzione del  $\Delta K$  normalizzato

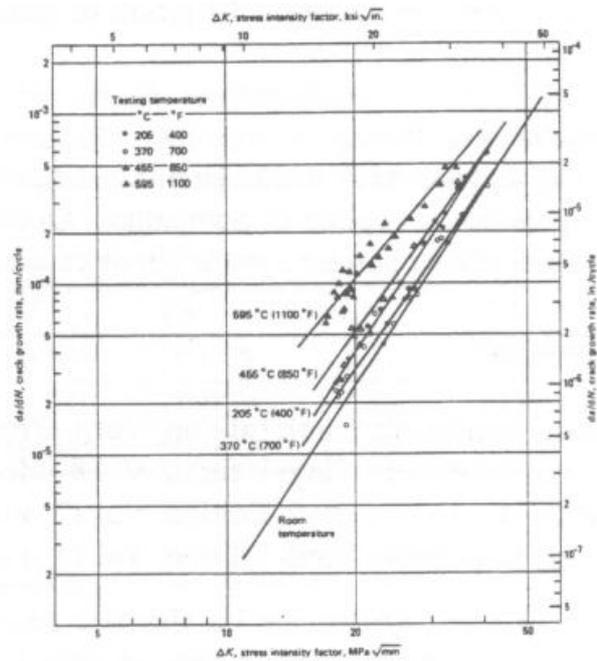


Fig. 3 - Velocità di propagazione cricca

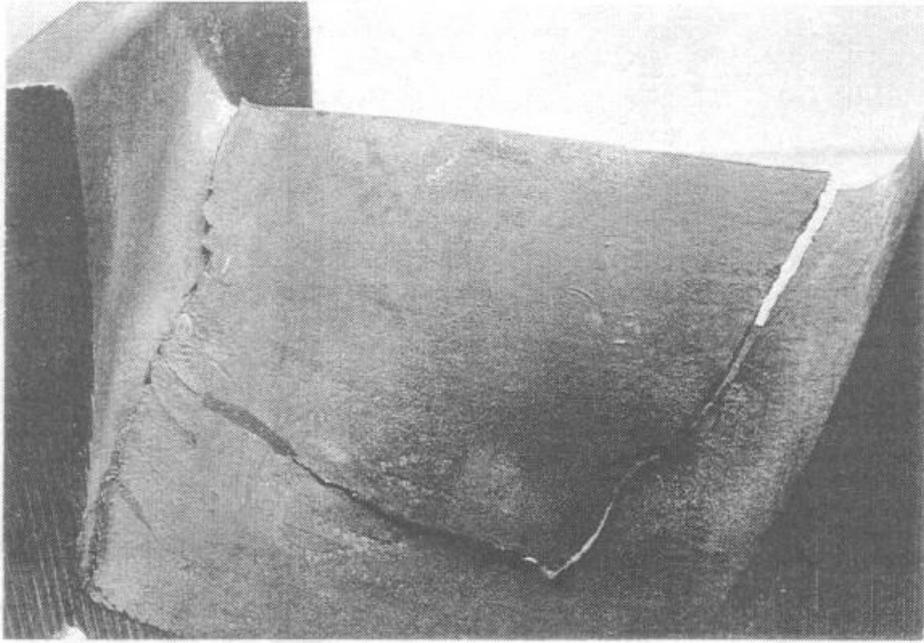


Foto 1 - Pala maggiormente danneggiata

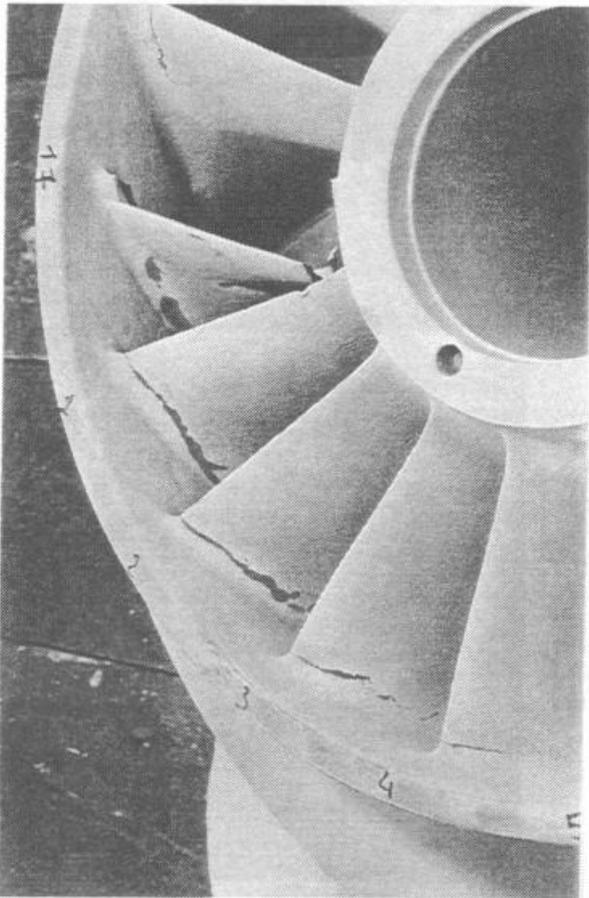


Foto 2 - Esame L.P.

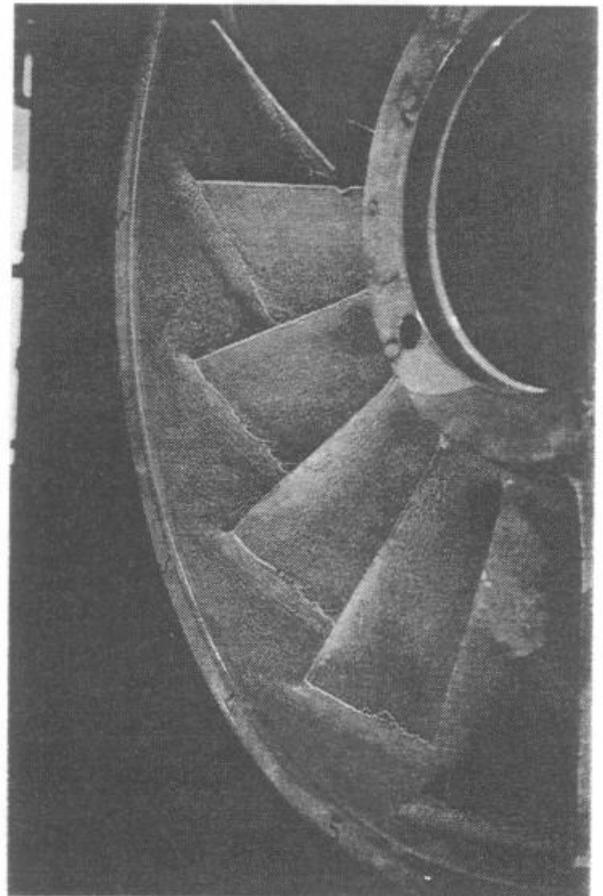


Foto 3 - Esame MT wet

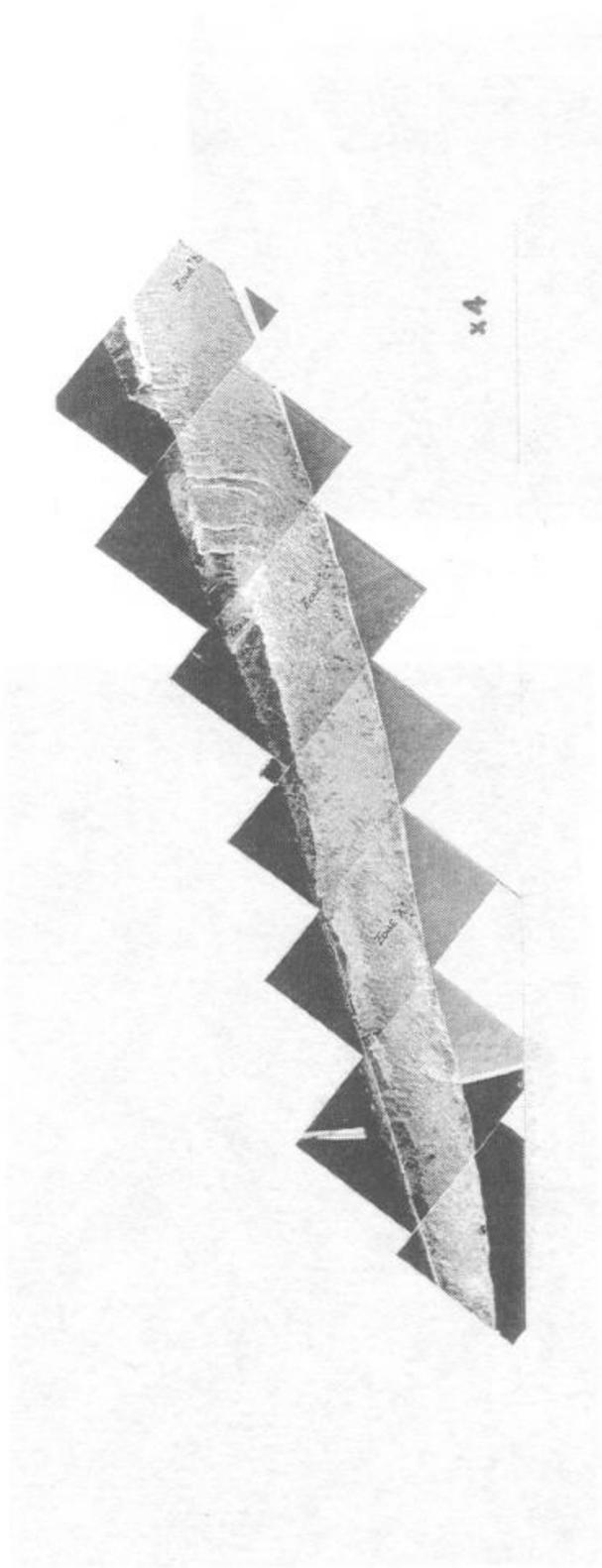


Foto 4 - Superficie di frattura



Foto 5 - Morfologia di frattura  
area iniziale



Foto 6 - Particolare di foto 5



Foto 7 - Morfologia di frattura  
area terminale

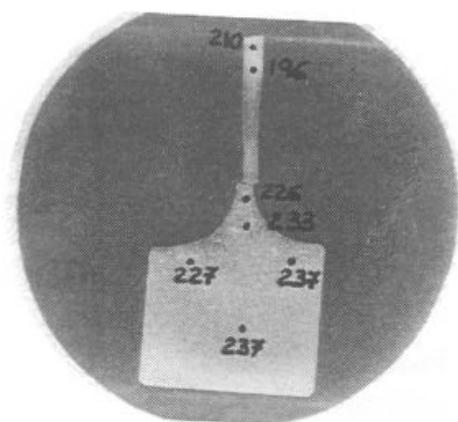


Foto 8 - Aspetto macrografico e rilievi di durezza HV 5

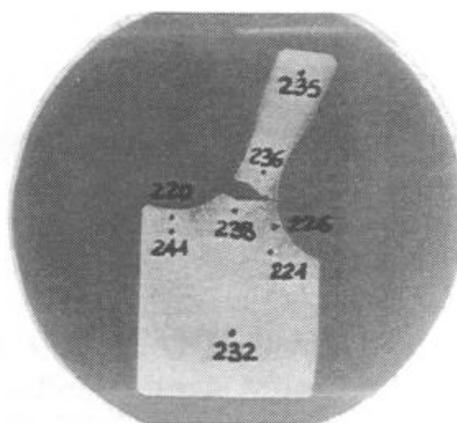


Foto 9 - Aspetto macrografico e rilievi di durezza HV 5