

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In ING-IND/14 Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine

**IL FENOMENO DEL FRETTING IN ELEMENTI ALBERO-
MOZZO SOGGETTI A FLESSIONE ROTANTE INDAGATO
TRAMITE CONTROLLI NON DISTRUTTIVI E ANALISI AL
MICROSCOPIO**

CANDIDATO

Fabio Grassi

RELATORE

Prof. Ing. Giorgio Olmi

CORRELATORI

Prof. Ing. Dario Croccolo

Prof. Ing. Massimiliano De Agostinis

Anno Accademico 2013/2014

Sessione I

“Al suo livello più profondo, la realtà è la matematica della natura”

Pitagora

INDICE

INTRODUZIONE	Pag. 7
CAPITOLO 1: Il fenomeno del fretting	Pag. 8
1.1 Introduzione	Pag. 8
1.2 Sviluppo del fretting	Pag. 9
1.3 Morfologia superficiale del fretting e scopo del lavoro	Pag. 11
CAPITOLO 2: Materiali e metodi	Pag. 14
2.1 Provini shaft-hub	Pag. 14
2.2 Verifica della durezza del materiale	Pag. 19
2.3 Realizzazione accoppiamenti	Pag. 20
CAPITOLO 3: Prove di fatica a vita interrotta	Pag. 23
3.1 La macchina di Moore	Pag. 23
3.2 Dati di partenza	Pag. 24
3.2 Esecuzione delle prove	Pag. 28
CAPITOLO 4: Decapaggio e prima osservazione	Pag. 31
4.1 Osservazione immediata	Pag. 31
4.2 Decapaggio dei provini	Pag. 33
4.3 Osservazione al microscopio ottico di Forlì	Pag. 34
CAPITOLO 5: Analisi con liquidi penetranti	Pag. 39
5.1 Caratteristiche dei liquidi penetranti	Pag. 39
5.2 Ispezione con liquidi penetranti	Pag. 41
CAPITOLO 6: Seconda osservazione al microscopio	Pag. 48
6.1 Taglio dei provini	Pag. 48
6.2 Osservazione con microscopio multifocale	Pag. 49
6.3 Lucidatura e ultima osservazione al microscopio	Pag. 52
CAPITOLO 7: Conclusioni	Pag. 54
BIBLIOGRAFIA	Pag. 56
RINGRAZIAMENTI	Pag. 57

INTRODUZIONE

La presente tesi è stata sviluppata all'interno del laboratorio Hangar presso la sede di Forlì della Scuola di Ingegneria e Architettura e al dipartimento di Ingegneria Industriale di Bologna.

L'obiettivo dello studio è quello di analizzare l'influenza del fretting nella propagazione di cricche in provini albero-mozzo soggetti a prove di fatica a flessione rotante.

Lo studio di questo fenomeno è stato iniziato con un'analisi del picco di pressione all'estremità del mozzo (e di conseguenza del fattore di concentrazione delle tensioni) al FEM, per poi essere seguito dalla realizzazione di provini albero-mozzo (shaft-hub) da sottoporre a prove di fatica a flessione rotante fino a rottura. È stata dunque ricavata la relativa curva di Wöhler e il coefficiente di concentrazione delle tensioni. In tal modo è stato possibile notare la differenza tra quanto previsto tramite l'analisi numerica e i risultati sperimentali, che si sono discostati da quelli teorici probabilmente per la presenza di un ulteriore fenomeno. Sono state analizzate quindi le superfici di frattura, quelle esterne degli alberi e quelle interne dei mozzi, e sono stati notati dei difetti superficiali la cui morfologia è compatibile con il fenomeno del fretting.

A partire dai risultati ottenuti in precedenza, si procederà quindi alla sperimentazione su altri provini albero-mozzo, quanto più possibile simili a quelli precedenti, allo scopo di individuare cricche in fase di propagazione per valutare meglio le cause del decremento della vita a fatica e poter rilevare le caratteristiche dell'usura da fretting sulla superficie del pezzo sollecitato.

Capitolo 1

IL FENOMENO DEL FRETTING

1.1 Introduzione

Il fenomeno dell'usura per strisciamento o fretting è il risultato di microscopici movimenti tra le parti strettamente accoppiate fra loro [1], e si può verificare in varie condizioni di lavoro, con materiali ferrosi o meno, in particolare quando l'accoppiamento realizzato non permette moto relativo tra le due parti. Tale fenomeno si verifica per oscillazioni superiori ai 20 μm , mentre oltre ai 50 μm l'usura tribossidativa può causare dei malfunzionamenti come la perdita di interferenza nell'accoppiamento. Contemporaneamente però la formazione di uno strato di ossido compattato impedisce la formazione di cricche superficiali [1]. Ulteriori fattori che influiscono sul fretting sono l'attrito e l'ampiezza di oscillazione, entrambi direttamente proporzionali alla quantità di materiale asportato per usura.

Il fretting non è stato ancora oggetto di tanti studi, poiché esso accompagna la sollecitazione a fatica, ed è sempre risultato secondario ad esso, sebbene in determinate situazioni (come nel caso specifico accoppiamenti per interferenza) risulti preponderante, abbassando notevolmente la vita a fatica dei componenti.

Dai risultati degli studi di Nishioka e Hirakawa [2] si hanno a disposizione alcune informazioni in merito, sebbene questo ambito sia stato ancora poco indagato.

Per questi studi sono stati realizzati due dispositivi meccanici atti rispettivamente alla misura dell'ampiezza di oscillazione e alla

sollecitazione per fretting (un provino di forma planare è stato inserito tra due ganasce, e poi sottoposto a un momento flettente alternato, così da creare strisciamento tra le parti).

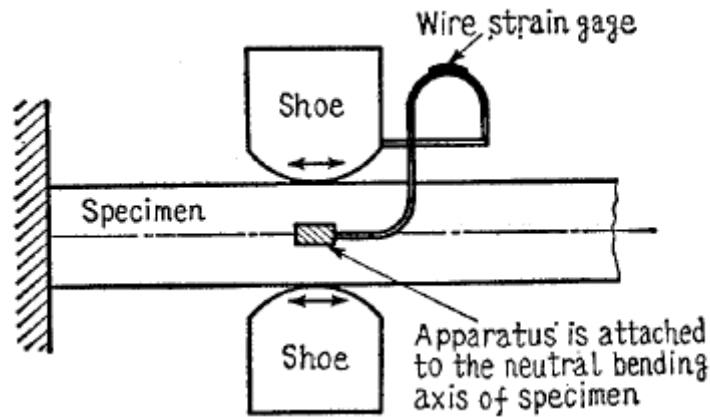


Figura 1: configurazione del provino e delle ganasce per l'esecuzione della sollecitazione da fretting[2].

1.2 Sviluppo del fretting

I primi risultati a disposizione riguardano l'evolversi del fenomeno con l'aumento del numero di cicli di lavoro, in particolare si sono distinte tre fasi: una prima fase in cui l'ampiezza di oscillazione cresce velocemente, una seconda in cui si stabilizza a un certo valore e una terza in cui cresce ulteriormente.

Questo fatto è spiegato in [3] come segue: inizialmente l'oscillazione tra le parti è elevata a causa del fatto che i materiali sono a contatto solo sulle asperità, ma con l'aumentare del numero di cicli si creano microsaldature, si forma dell'ossido e viene asportato del materiale che, frapponendosi tra le due superfici, ne limita l'oscillazione. Poi, quando il numero di cicli diventa molto elevato, la pressione di accoppiamento tende a calare e l'oscillazione ricomincia a salire. In questa fase si ha inoltre un

allargamento della zona usurata, che tende a propagarsi verso le zone più interne dell'accoppiamento.

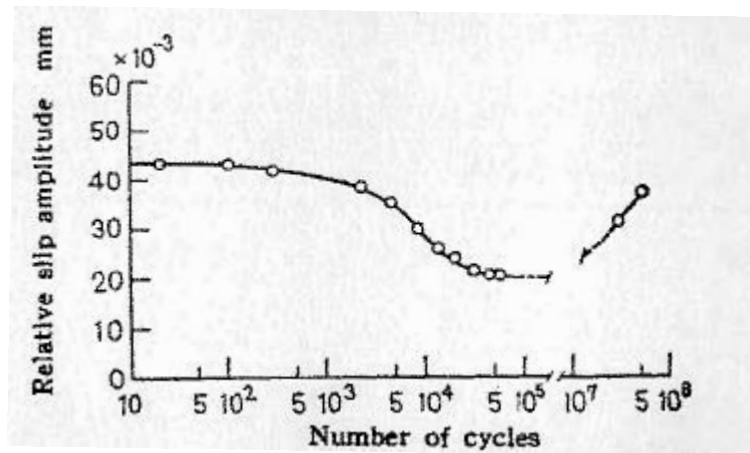


Figura 2: andamento dell'ampiezza di oscillazione in funzione del numero di cicli[3].

E' stato inoltre dimostrato che la frequenza di oscillazione non influenza negativamente la vita a fatica, poiché il fretting è causato da sollecitazioni meccaniche, che non variano all'aumentare della temperatura.

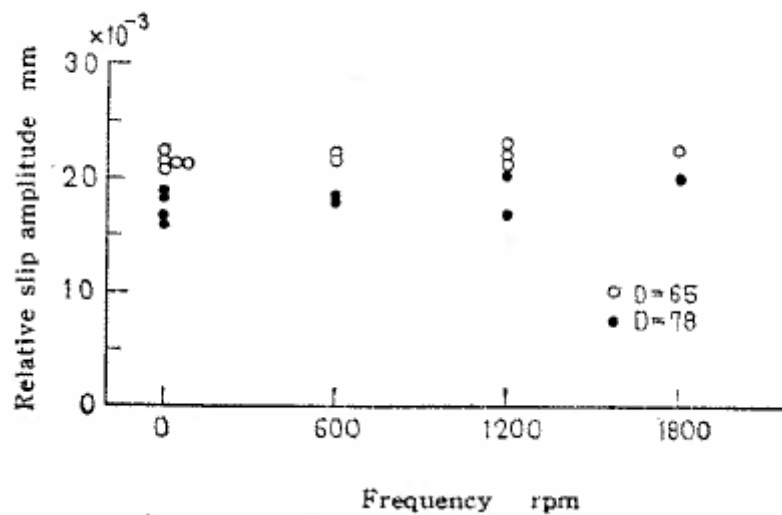


Figura 3: andamento dell'ampiezza di oscillazione in funzione della frequenza di oscillazione. Da notare che il valore resta circa costante[3].

Infine si è verificato che le dimensioni influenzano negativamente la vita a fatica di provini sottoposti a questo tipo di sollecitazione, in particolare l'ampiezza di oscillazione di provini aventi stesso rapporto tra diametro

esterno dell'albero e interno del mozzo, e stesso rapporto tra tensione applicata e modulo di Young del materiale, è linearmente crescente con il diametro dell'albero.

1.3 Morfologia superficiale del fretting e scopo del lavoro

Dal punto di vista “diagnostico” è possibile riconoscere una superficie che è stata sottoposta al fretting, poiché presenta delle caratteristiche peculiari. In particolare nel caso dell'accoppiamento albero-mozzo utilizzato nel lavoro di sperimentazione di cui tratta questa tesi, la superficie interessata è quella di interfaccia tra albero e mozzo, ovvero nella parte iniziale dell'accoppiamento. Questo si spiega con la teoria di Lamè, che prevede un picco di pressioni in questa zona.

Per poter osservare tale superficie con occhio critico, è stato necessario essere a conoscenza dei seguenti punti chiave.

Innanzitutto vi è la formazione di uno strato di ossido molto marcato nella zona di contatto per interferenza. A dimostrazione di ciò in questa tesi qualche capitolo più avanti verrà descritto il metodo adottato per la rimozione di questo strato, che può influenzare negativamente l'osservazione della superficie di frattura.

Ulteriore caratteristica è la presenza di cavità approssimativamente circolari nel tratto utile (ovvero la zona in cui si ipotizza sia avvenuto effettivamente lo strisciamento relativo), date dal materiale asportato per usura. Si era ipotizzato inizialmente che fossero queste cavità a creare una concentrazione di tensioni che abbassasse la vita a fatica, ma è stato dimostrato in [4] che essa è influenzata principalmente dalla pressione di

accoppiamento e dalla tensione media applicata, non dal coefficiente di concentrazione delle tensioni.

Ultima caratteristica è quella di presentare delle microcricche innescate su tutta la superficie di contatto, disposte in diagonale rispetto a quest'ultima, ma che non si propagano e non portano il pezzo a rottura. Tali cricche sono definite come “cricche secondarie” e rimangono nella zona più esterna al pezzo, proprio a causa del fatto che il fretting è un fenomeno superficiale. La direzione obliqua è dovuta alla presenza dell'attrito.

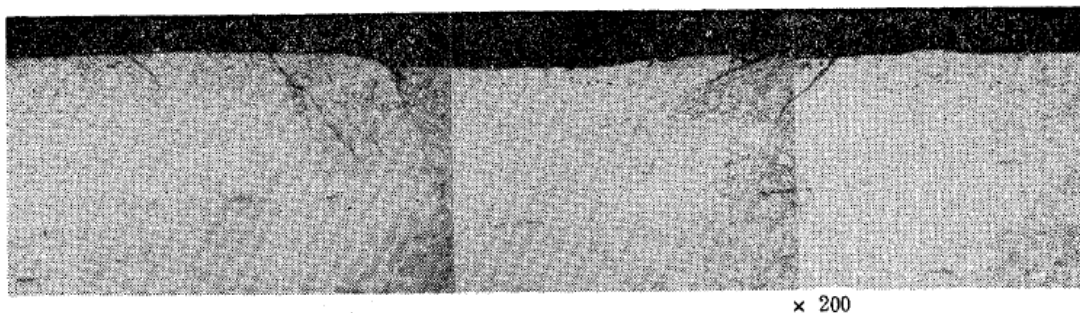


Figura 4: sezione trasversale di un provino rotto[4]. Da notare le cricche in direzione obliqua.

Lo scopo del lavoro di sperimentazione svolto presso il laboratorio Hangar con sede a Forlì della Facoltà di Ingegneria e Architettura è stato quindi quello di individuare i precedenti fenomeni sulle superfici dei provini analizzati, in particolare si è cercato di trovare le microcricche disposte obliquamente rispetto alla superficie, cosa che è stata possibile solo in uno dei 15 provini di partenza.

In questa fase si è voluto interrompere le prove di fatica prima della rottura di schianto del provino, in maniera tale da poter poi osservare, mediante l'utilizzo di fluidi penetranti, dei punti in cui si è presentato un innesco di frattura. Una volta individuati è stato poi possibile stabilire un piano longitudinale ottimale su cui andare a sezionare il provino, per esaminare la superficie interna dell'albero.

Tale analisi quindi ha permesso di stabilire se effettivamente è presente il fretting come fattore influenzante la vita a fatica di un accoppiamento di tal genere, e di osservarne gli effetti di cui si è a conoscenza dagli studi di Nishioka e Hirakawa[2].

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 Provini shaft-hub

I provini sono costituiti da due pezzi separati (albero e mozzo), che vengono poi accoppiati a caldo per interferenza. Si è partiti inizialmente con 15 provini di questo genere.

L'accoppiamento di questo tipo permette di mantenere inalterata la rugosità superficiale dei due componenti e di trasmettere elevate forze tangenziali, sfruttando la pressione di accoppiamento che si sviluppa (proporzionale al valore di interferenza fra i due diametri).

Una volta stabilita la geometria del provino (figura successiva) e il materiale (C40 trafilato), il valore di interferenza che garantisce la pressione di accoppiamento desiderata (100 MPa) è stato determinato sfruttando la teoria di Lamè, e il risultato è stato di 0.02 mm.

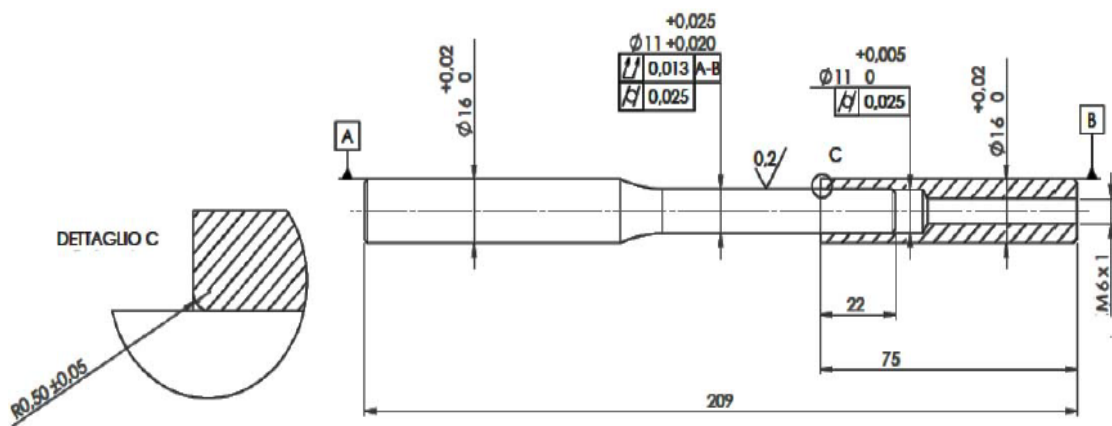


Figura 5: provino shaft-hub.

Il foro del mozzo è filettato all'estremità opposta all'interfaccia di accoppiamento, per permettere l'inserimento di una vite di battuta. Tale vite garantirà quindi una profondità di inserimento dell'albero nel mozzo pari a 22 mm.

Inizialmente si è proceduto alla marcatura di ciascun pezzo con una penna elettrica con sigle S e H per alberi e mozzi rispettivamente, con numeri da 35 a 49.

Prima dell'accoppiamento (effettuato presso la sede di Bologna) è stato necessario sottoporre ciascun provino ad un controllo dimensionale al fine di verificare che il costruttore avesse rispettato correttamente le specifiche da disegno. In particolare la normativa per l'esecuzione di prove di fatica di questo tipo impone che la rugosità superficiale degli alberi sia molto bassa nel tratto utile di rottura del provino.

Per rilevare la misura del diametro interno dei mozzi (hub) è stato utilizzato un micrometro per interni (sensibilità 0.005 mm), mentre per la rugosità superficiale degli alberi (shaft) un rugosimetro. Ogni componente è stato sottoposto a due misure: la prima all'interfaccia dell'accoppiamento, la seconda ad una profondità di 22 mm da essa.

I risultati sono riportati nelle due tabelle seguenti:

	Numero	Misura 1 [mm]	Misura 2 [mm]	Media [mm]
S	49	11,012	11,013	11,013
S	46	11,015	11,014	11.015
S	47	11,014	11,014	11.014
S	36	11,015	11,015	11.015
S	37	11,015	11,015	11.015
S	39	11,014	11,015	11.014
S	35	11,016	11,016	11.016
S	43	11,015	11,016	11.016
S	42	11,018	11,017	11.018
S	45	11,016	11,017	11.017
S	38	11,018	11,018	11.018
S	41	11,020	11,018	11.019
S	44	11,018	11,018	11.018
S	48	11,017	11,018	11.018
S	40	11,016	11,020	11.018

Tabella 1: misure shaft.

	Numero	Misura 1 [mm]	Misura 2 [mm]	Media
H	36	11,005	11,025	11,015
H	41	11,005	11,005	11,005
H	45	11,005	11,005	11,005
H	46	11,005	11	11,003
H	35	11,010	11,010	11,010
H	39	11,010	11,01	11,010
H	40	11,010	11,01	11,010
H	42	11,010	11,02	11,015
H	43	11,010	11,01	11,010
H	44	11,010	11,010	11,010
H	47	11,010	11,015	11,013
H	48	11,010	11,010	11,010
H	37	11,015	11,005	11,010
H	49	11,015	11,040	11,028
H	38	11,025	11,025	11,025

Tabella 2: misure hub.

Albero	R_a Misura 1 [μm]	R_a Misura 2 [μm]	R_a Misura 3 [μm]	R_a Media [μm]	Deviazione Standard [μm]
S49	0,34	0,38	0,25	0,29	0,046
S46	0,22	0,23	0,24	0,23	0,010
S47	0,40	0,43	0,45	0,427	0,025
S36	0,28	0,26	0,26	0,267	0,012
S37	0,40	0,28	0,28	0,320	0,069
S39	0,38	0,37	0,32	0,357	0,032
S35	0,38	0,38	0,39	0,383	0,006
S43	0,31	0,30	0,27	0,293	0,021
S42	0,38	0,41	0,41	0,400	0,017
S45	0,44	0,42	0,36	0,407	0,042
S38	0,28	0,27	0,34	0,297	0,038
S41	0,30	0,27	0,26	0,277	0,021
S44	0,48	0,5	0,53	0,503	0,025
S48	0,32	0,32	0,32	0,32	0,000
S40	0,34	0,27	0,45	0,353	0,091

Tabella 3: valori di rugosità (R_a) degli alberi.

Sono stati in seguito scartati i componenti di provini con dimensioni meno consone allo scopo, ovvero S46 e H49, che risultavano essere rispettivamente l'albero con diametro minimo e il mozzo con diametro massimo e non avrebbero garantito l'interferenza desiderata.

2.2 Verifica della durezza del materiale

Si è poi proceduto alla misura della durezza superficiale su uno dei 15 provini, in particolare l'albero S49 e il mozzo H38, per verificare che le caratteristiche del materiale utilizzato corrispondessero effettivamente a quelle previste dallo studio effettuato in precedenza.

Sono stati scelti questi due componenti in particolare perché sono poi stati uniti a formare un accoppiamento con gioco, a puro valore dimostrativo.

La prova di durezza Rockwell si distingue dalle altre in particolare per la sua rapidità e la lettura diretta. Il provino viene posto al di sotto di una punta metallica (generalmente conica, sferica in caso si tratti di prova di durezza Brinell) e gli viene applicato un precarico. Successivamente viene applicato il carico di prova, e dopo un certo lasso di tempo viene tolto. La misura della durezza superficiale è ottenuta tramite la valutazione della penetrazione residua della punta metallica sulla superficie del pezzo in esame.

In tabella si riportano le condizioni di prova standard su materiali ferrosi:

Angolo di apertura cono di diamante	Forza di precarico [N]	Forza addizionale [N]	Tempo di applicazione del carico
120°	98 (10 kg)	1470 (150 kg)	10 s

Tabella 4: valori prova di durezza standard.

Le misure sono state effettuate su tre giaciture differenti per ciascuno dei due componenti del provino, per garantire una valutazione più uniforme possibile.

In tabella si riportano i risultati ottenuti:

	HRC 1	HRC 2	HRC 3	Media
S49	16.9	17.2	18.3	17.5
H38	17.3	16.1	17.4	16.9

Tabella 5: misure di durezza Rockwell.

2.3 Realizzazione accoppiamenti

Infine, una volta stabilite le dimensioni dei provini e verificate le caratteristiche meccaniche del materiale, si è proceduto all'accoppiamento a caldo per interferenza, eseguito presso il laboratorio del dipartimento di Ingegneria Industriale nella sede di Bologna. Gli accoppiamenti sono stati stabiliti tentando di mantenere più uniforme possibile il valore dell'interferenza, compatibilmente con le dimensioni dei componenti a disposizione.

Segue una tabella complessiva, in cui si riportano le misure di alberi e mozzi, ordinati secondo l'accoppiamento stabilito, e i relativi valori dell'interferenza.

Albero	Mozzo	Interferenza [mm]
S 35	H 35	0.006
S 36	H 41	0.010
S 37	H 45	0.010
S 38	H 43	0.008
S 39	H 46	0.010
S 40	H 37	0.005
S 41	H 44	0.008
S 42	H 40	0.007
S 43	H 39	0.006
S 44	H 47	0.008
S 45	H 42	0.007
S 47	H 36	0.009
S 48	H 48	0.008

Tabella 6: accoppiamenti albero-mozzo.

Per il montaggio a caldo si è seguito il protocollo seguente:

- 1- Sistemazione della vite di battuta: tale vite è utilizzata per garantire una profondità di inserimento di 22 mm. Il dado in figura serve per bloccare la vite una volta raggiunta la posizione desiderata.

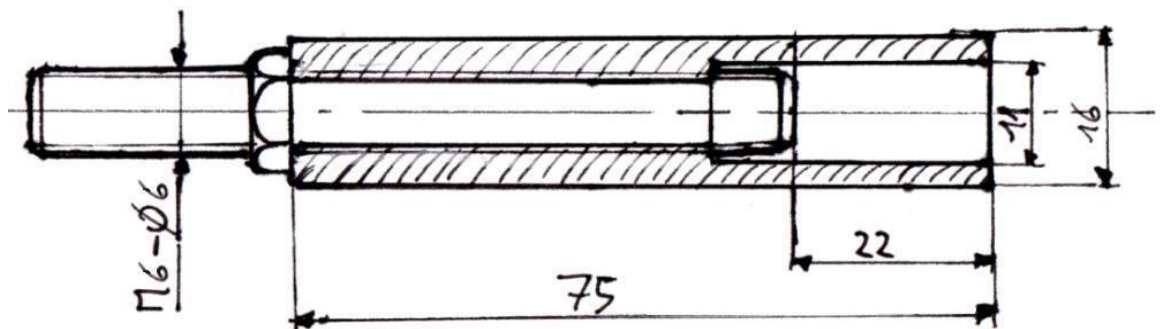


Figura 6: vite di battuta.

- 2- Fissaggio dell'albero in morsa: è importante che l'albero sia perfettamente verticale per non creare ostacoli all'accoppiamento.
- 3- Riscaldamento della boccia: la boccia è stata riscaldata fino a 400°C e mantenuta a questa temperatura per circa 30 minuti, in modo da ottenere una dilatazione sufficiente per l'accoppiamento.

- 4- Calettamento della boccola nell'albero: è importante fare in modo che albero e mozzo siano perfettamente allineati.
- 5- Raffreddamento in aria: è necessario effettuare un raffreddamento lento per non rischiare di temprare il materiale con la conseguente modifica delle caratteristiche meccaniche.

La realizzazione degli accoppiamenti, tuttavia, ha riscontrato delle problematiche. Solo 8 dei 14 provini rimanenti sono stati accoppiati con successo, in particolare sono stati effettuati S39-H46, S47-H36, S44-H47, S41-H44, S48-H48, S38-H43, S43-H39, S40-H37.

Capitolo 3

PROVE DI FATICA A VITA INTERROTTA

3.1 La macchina di Moore

La macchina per la prova di fatica a flessione rotante è costituita da un supporto con due mandrini (di cui uno regolabile), sui quali va poi a inserirsi il provino, la cui rotazione è indotta da un motore elettrico. Le velocità di rotazione raggiunte sono molto elevate, fino a 3500 rpm.

Al di sotto della struttura è presente una puleggia di rinvio, alla quale è collegato un pacco pesi che funge da carico applicabile o meno a seconda della posizione della manovella di regolazione. Questa struttura garantisce la realizzazione di un momento flettente costante lungo tutto il provino, e la rotazione di quest'ultimo ne fa variare nel tempo il piano di applicazione.

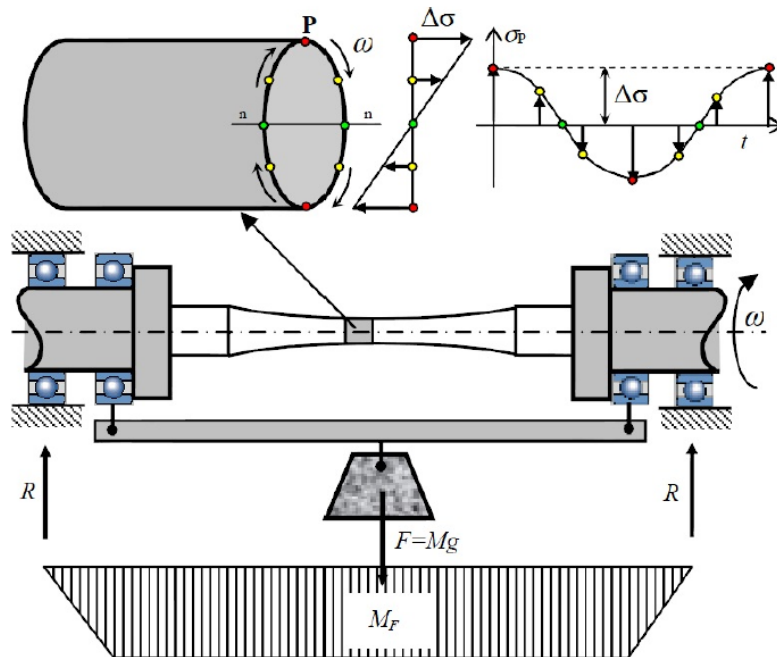


Figura 7: configurazione della sollecitazione nella prova di fatica a flessione rotante: momento flettente costante su tutto il provino.

La strumentazione di comando presenta un conta cicli , il pulsante di accensione/spegnimento e una manopola per la regolazione della velocità di rotazione.

Quando il provino si rompe, viene a mancare la connessione fra mandrino e contromandrino; il mandrino, spinto dai pesi, va a premere l'interruttore di switch sottostante, fermando la prova e bloccando il conta cicli.

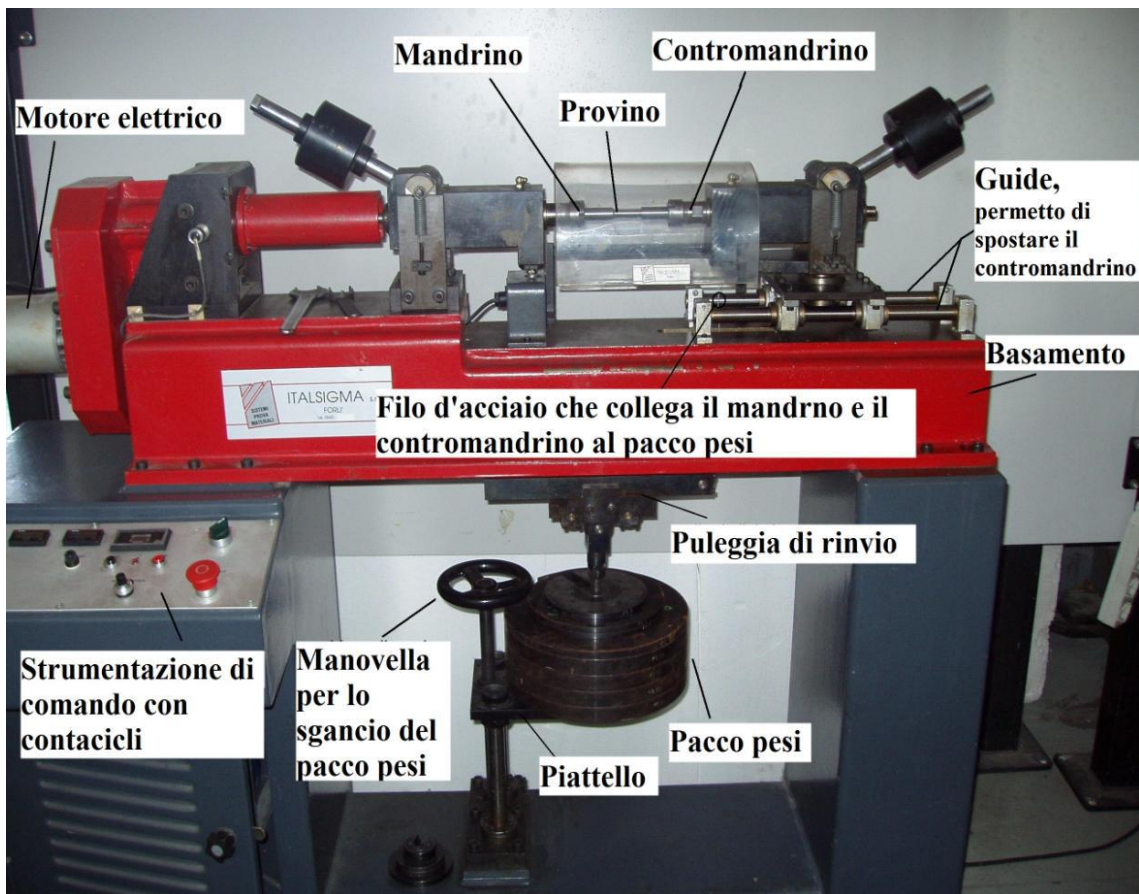


Figura 8: macchina di Moore per prove di fatica a flessione rotante.

3.2 Dati di partenza

Una volta realizzato l'accoppiamento forzato si è proceduto all'esecuzione delle prove di fatica tramite l'utilizzo della macchina di Moore presente nel laboratorio Hangar della II facoltà di ingegneria con sede a Forlì.

Degli otto provini a disposizione, uno è stato portato a rottura, mentre gli altri sette sono stati sottoposti a un numero di cicli determinato in base alla curva di Wöhler a disposizione, in modo tale da poter osservare, al termine della prova, delle cricche in fase di propagazione.

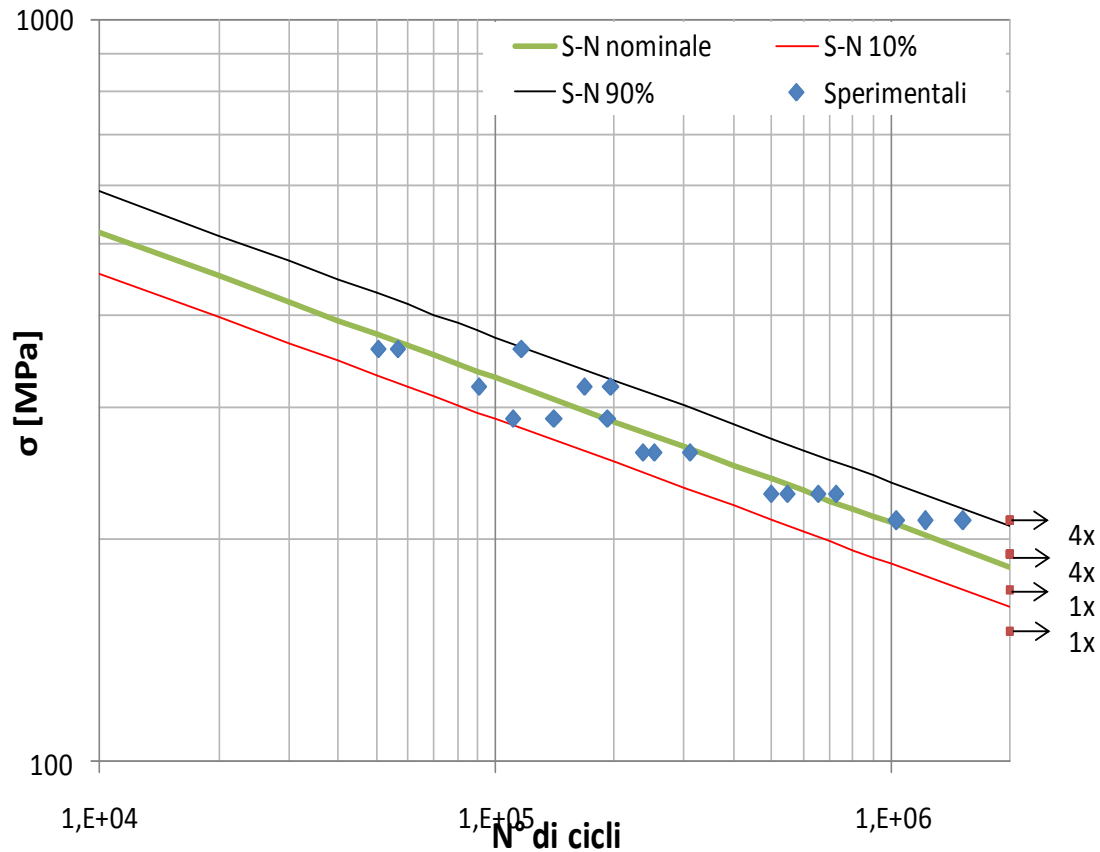


Figura 9: curva di Wöhler di riferimento.

I provini sono stati dapprima inseriti sul supporto, regolando quindi la posizione del contromandrino, e poi fatti ruotare a una velocità limitata al fine di misurarne l'eccentricità con un comparatore. Un valore troppo elevato di eccentricità infatti avrebbe comportato oscillazioni troppo elevate, influenzando negativamente sull'esecuzione della prova. Inoltre, non essendo la macchina di Moore provvista di morsa autocentrante, tale

misurazione è stata necessaria anche per controllare che il montaggio fosse stato eseguito correttamente.

L'eccentricità "e" è definita come la distanza tra l'asse di rotazione del mandrino della macchina e l'effettivo asse del provino montato su di essa. Le condizioni ideali sono che essa sia nulla, in modo che il provino ruoti perfettamente attorno al proprio asse; un valore di eccentricità troppo elevato provoca uno squilibrio dinamico.

I livelli di tensione utilizzati sono due: 260 e 230 MPa. Il provino portato a rottura (S41-H44) è stato sollecitato con un carico di 260 MPa, per un totale di 484.107 cicli.

I valori del carico da applicare sul portapesi sono stati ricavati dal calcolo della tensione massima:

$$\sigma_{max} = \frac{M_f}{W_f}$$

Con:

$$W_f = \frac{\pi d^3}{32}$$

modulo di resistenza flessionale della trave, d diametro del provino.

Essendo:

$$M_f = \frac{F}{2}L$$

con L lunghezza del mandrino (ovvero il braccio della forza), uguagliando la forza totale applicata alla massa del carico moltiplicata per l'accelerazione di gravità, si ottiene il valore in kg del peso totale.

$$F = 2 \frac{M_f}{L} = M_{tot}g$$

Da cui poi si ricava la massa da applicare, sottraendovi la massa del piattello.

$$m = M_{tot} - M_{piatt}$$

In tabella si riportano i valori dei carichi applicati a ciascun livello di tensione, con riferimento alla curva di Wöhler relativa alla probabilità di rottura del 10%:

N<327000	10%	Unità di misura	N<175000	10%	Unità di misura
σ_{max}	230	MPa	σ_{max}	261	MPa
d	11,0	mm	d	11,0	mm
W	131	mm ³	W	131	mm ³
$m_{Tot (x2)}$	43,781	kg	$m_{Tot (x2)}$	49,682	kg
m piatt	1,300	kg	m piatt	1,300	kg
da applicare	42,481	kg	da applicare	48,382	kg
carico permanente	0,000	kg	carico permanente	0,000	kg

Tabella 7: carichi utilizzati.

3.3 Esecuzione delle prove

Le prove di fatica sono state eseguite su ciascun provino seguendo il procedimento descritto:

- 1- Montaggio del provino sui mandrini e serraggio dello stesso mediante l'utilizzo delle ghiera presenti.
- 2- Azzeramento di tutti i parametri della strumentazione di comando.
- 3- Avvio della rotazione a bassa velocità, per poi misurare l'eccentricità del provino con un comparatore, e inoltre per favorire un corretto allineamento dell'asse del provino con quello dei mandrini.
- 4- Caricamento dei pesi stabiliti sul piattello e allineamento della puleggia con la mezzeria del provino.
- 5- Azzeramento del conta cicli e messa in rotazione del provino. Il piattello porta pesi va subito abbassato per far sì che i pesi vadano a gravare sul provino. La velocità di rotazione va aumentata subito fino a circa 3000 rpm.
- 6- Attesa del raggiungimento del numero di cicli desiderato, o in alternativa della rottura del provino se avviene.
- 7- Azzeramento della velocità di rotazione, rilevamento del numero di cicli raggiunto e spegnimento della macchina.
- 8- Smontaggio del provino.

Una volta eseguita la prova, se a rottura, si può procedere alla misura del peso del provino rotto. Un'eventuale variazione del valore può essere dovuta all'asportazione di materiale per fretting.

L'immagine seguente rappresenta il provino S41-H44, portato a rottura con una tensione di 261 MPa dopo 484.107 cicli. E' possibile notare differenti inneschi di frattura e una zona interna in cui è avvenuta la rottura di schianto, che si può notare essere molto estesa a causa del fatto che il carico applicato era alto.

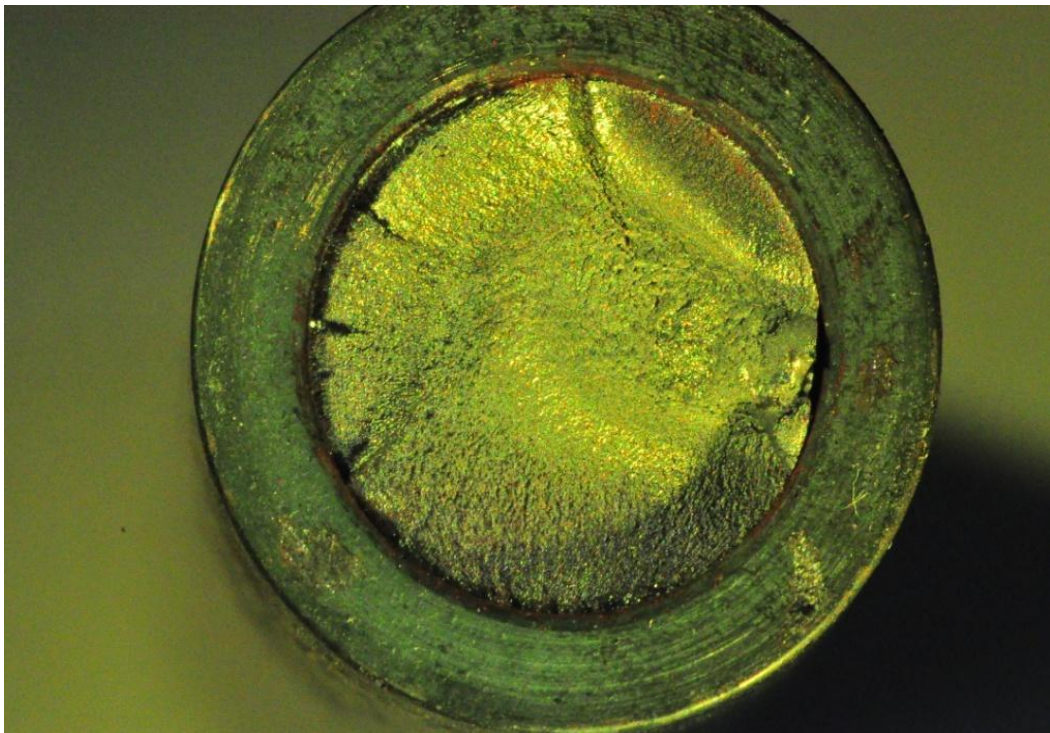


Figura 10: superficie di frattura del provino S41H44.

Infine si riporta una tabella complessiva con eccentricità, carico applicato e vita complessiva dei provini:

PROVINO	DATA e ORA	GIRI (rpm)	CARICHI	VITA [cicli]	NOTE
S44H47 ecc.:0.035	21/03/2014 9.00	3000 3200 a fine prova	Pesi [kg]: 42.5	1.100.182	Prova fermata al raggiungimento di 1,100,182 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 230		
S41H44 ecc.:0.05	21/03/2014 16.20	3000	Pesi [kg]: 48.4	484.107	Rottura dopo 484,107 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 261		
S38H43 ecc.:0.07	24/03/2014 10.00	3000	Pesi [kg]: 48.4	224.248	Prova fermata al raggiungimento di 224,248 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 261		
S48H48 ecc.: 0.04	24/03/2014 12.00	3000	Pesi [kg]: 42.5	502.603	Prova fermata al raggiungimento di 502,603 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 230		
S39H46 ecc.: 0.08	24/03/2014 15.30	3000	Pesi [kg]: 42.5	549.913	Prova fermata al raggiungimento di 549,913 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 230		
S47H36 ecc.:0.20	25/03/2014 9.15	3000	Pesi [kg]:48.4	220.515	Prova fermata al raggiungimento di 220,515 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]: 261		
S43H39 ecc.:0.11	26/03/2014	3000	Pesi [kg]:42.5	800.051	Prova fermata al raggiungimento di 800,051 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]:230		
S40H37 ecc.:0.05	27/03/2014 11.45	3000	Pesi [kg]:42.5	868.493	Prova fermata al raggiungimento di 868,493 cicli
			(+ portapesi kg 1.3)		
			Tens. [MPa]:230		

Tabella 8: diario complessivo delle prove di fatica a vita interrotta.

Capitolo 4

DECAPAGGIO E PRIMA OSSERVAZIONE

4.1 Osservazione immediata

Una volta eseguite le prove di fatica, si è proceduto al disaccoppiamento dei provini, in modo da poter valutare la superficie interessata sugli alberi, ovvero l'interfaccia di accoppiamento albero-mozzo.

I sette provini rimanenti sono stati oggetto di una prima analisi, immediatamente successiva alla precedente.

Si è utilizzato il microscopio ottico presente nel laboratorio Hangar della sede di Forlì della Scuola di Ingegneria e Architettura.

Questa prima osservazione ha permesso di rilevare subito alcune cricche, e inoltre di notare numerose tracce di ossidazione, compatibili con il fenomeno del fretting.

Il provino che ha mostrato in maniera migliore queste caratteristiche è stato l'albero S38, di cui si riportano alcune immagini:



Figura 11: cricca individuata sul provino S38, con ingrandimento 25x, $\sigma=261$ MPa, $N=224.248$ cicli.



Figura 12: cricca individuata sul provino S38, con ingrandimento 50x, $\sigma=261$ MPa, $N=224.248$ cicli.

E' stato possibile notare il fatto che tutti i provini presentavano uno strato di ossido non indifferente nel tratto utile, ovvero nella zona di interfaccia dell'accoppiamento albero-mozzo. Si è quindi dovuto procedere ad una disossidazione in più fasi, per poter distinguere meglio le superfici di

frattura da quelle che erano semplici zone rovinate dall'ossidazione progressiva, dovuta probabilmente alla presenza del fretting.

4.2 Decapaggio dei provini

Si è quindi proceduto al decapaggio dei provini immergendoli per un certo tempo in uno sgrassante (Prodotto: Velnet-Solnet, Produttore: Cigiemme, Milano), ma si è notato che non è stato sufficiente ad ottenere una buona pulitura superficiale.

Infatti a causa dell'accoppiamento forzato, avvenuto scaldando le boccole fino a una temperatura di 400 °C per dilatarle, si sono creati degli ossidi che depositandosi sulla superficie dell'albero hanno formato uno strato che è stato necessario rimuovere, al fine di ottenere una superficie più pulita e facilmente analizzabile sia al microscopio che tramite i liquidi penetranti.

Per l'eliminazione dello strato di ossido i provini sono stati inseriti in una vasca ad ultrasuoni, immersi in una soluzione acida creata con acqua e acido citrico concentrato al 99.97% (che può essere sostituito da del succo di limone) , raggiungendo una concentrazione totale del 10%. Dopo circa 20 minuti in cui sono stati mantenuti alla temperatura di 40 °C, sono stati tolti ed asciugati, per poi essere sottoposti ad una prima analisi al microscopio ottico.



Figura 13: provini dopo lo sgrassaggio.

4.3 Osservazione al microscopio ottico di Forlì

Questa osservazione, effettuata presso l'hangar della sede della facoltà di ingegneria di Forlì, ha presentato subito qualche risultato, in particolare è stato possibile individuare degli inneschi di frattura nei provini S38, S43, S47 ed S48.

Si riportano le immagini più significative:

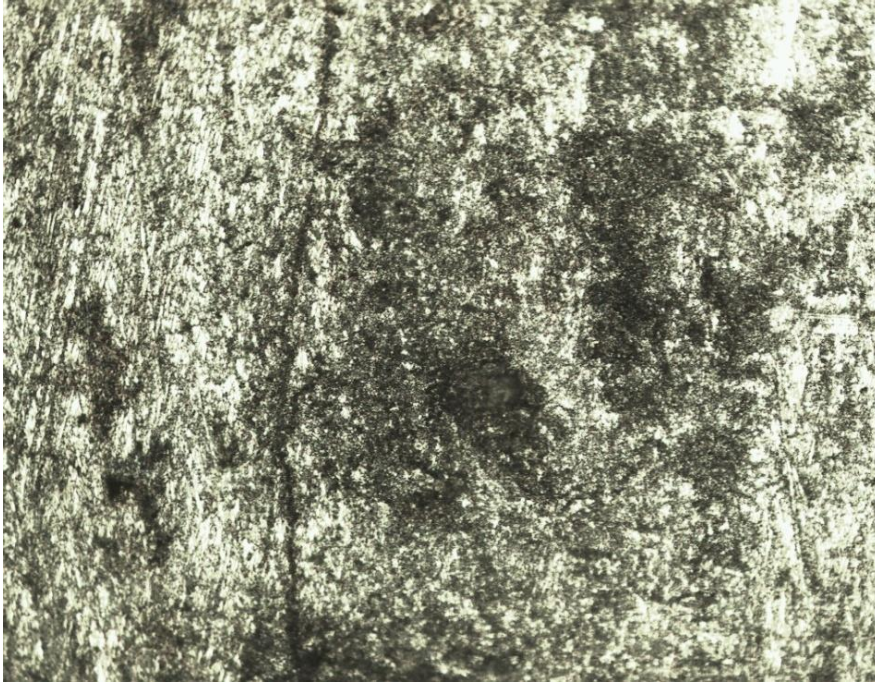


Figura 14: provino S38, ingrandimento 10x, $\sigma=261$ MPa, $N=224.248$ cicli.



Figura 15: provino S38, ingrandimento 50x, $\sigma=261$ MPa, $N=224.248$ cicli.



Figura 16: provino S38, ingrandimento 50x, $\sigma=261$ MPa, N=224.248 cicli.



Figura 17: provino S43, ingrandimento 20x, $\sigma=230$ MPa, N=800.051 cicli.



Figura 18:provino S47, ingrandimento 20x, $\sigma=261$ MPa, N=220.515 cicli.



Figura 19: provino S48, ingrandimento 50x, $\sigma= 230$ MPa, N=502.603 cicli.

Con le superfici più pulite e in assenza di ossidi e' stato possibile quindi individuare alcune cricche in fase di propagazione, posizionate prevalentemente in direzione circonferenziale, principalmente nei provini sottoposti al carico più alto.

L'albero S38 in particolare ha mostrato tre cricche distinte molto evidenti, e dunque è stato di superiore interesse rispetto agli altri anche nelle fasi successive della sperimentazione.

Capitolo 5

ANALISI CON LIQUIDI PENETRANTI

5.1 Caratteristiche dei liquidi penetranti

L'ispezione con liquidi penetranti risulta un metodo di controllo non distruttivo molto versatile, per via della sua affidabilità (sono individuabili anche cricche dell'ordine di 1 μm) e possibilità di utilizzo su materiali di tipologie molto diversificate. Unici punti a sfavore risultano il fatto che sia un metodo in grado di rilevare solo cricche o difetti superficiali, e che il pezzo campione, affinché la verifica riporti un risultato attendibile, non deve risultare troppo poroso o presentare una rugosità superficiale troppo elevata.

Questo metodo di controllo sfrutta il fenomeno della capillarità, il quale si presenta in determinate condizioni e caratteristiche del liquido utilizzato. Tale liquido, infatti, deve rispondere alle seguenti caratteristiche:

- essere facilmente rimuovibile;
- essere in grado di mantenere in soluzione sostanze fluorescenti o coloranti, mantenendone il colore e la brillantezza al fine di rendere evidente la cricca individuata;
- essere chimicamente e fisicamente stabile;
- avere una buona capacità di “bagnare” le superfici con cui è a contatto.

L'ultima caratteristica citata è descrivibile in maniera molto efficace dal valore dell'angolo θ , tra il liquido e la superficie che ne è a contatto. Per alti valori di θ ($> 90^\circ$) il fluido presenta alte forze di coesione molecolare e

di conseguenza alte tensioni superficiali, dunque non bagna la superficie (come caso estremo si pensi al mercurio, fino a qualche anno fa largamente utilizzato anche per termometri casalinghi, che in caso di rottura di uno di questi ultimi tendeva a spargersi nell'area sottostante formando le caratteristiche “palline”, limitando quindi al massimo la zona di contatto). Per bassi valori di θ ($<90^\circ$) il fluido invece tende ad aderire alla superficie, bagnandola.

La capillarità, ovvero la risalita di un fluido attraverso un tubo di piccole dimensioni, è favorita se il fluido presenta delle basse forze di coesione, caratteristica fondamentale per un liquido penetrante. In tal caso il menisco di fluido formatosi all'interno del tubo presenterà la concavità rivolta verso l'alto (anche quest'ultima quantificabile con l'ampiezza dell'angolo θ), contrariamente a quanto avviene per fluidi con tensioni superficiali maggiori.

Ulteriore condizione, ovviamente, perché si proceda con un controllo in maniera adeguata, è che la superficie in cui si vuole individuare la cricca (o difetto) sia pulita.

Il metodo di applicazione prevede un'iniziale pulizia del pezzo in esame, l'utilizzo del fluido penetrante sulla superficie e successivamente l'applicazione di un emulsionante, a cui seguono il lavaggio in acqua e la visualizzazione delle cricche mediante una lampada a infrarossi (anche detta a “luce nera”).

5.2 Ispezione con liquidi penetranti

In seguito allo sgrassaggio dei provini e alla rilevazione delle prime cricche (in particolare si è distinto il provino S38 per la presenza di più inneschi di frattura), si è proceduto con l'applicazione del fluido penetrante su ogni tratto utile di ciascun campione, e si sono attesi 15 minuti circa per permettere al fluido di inserirsi correttamente nelle cricche.



Figura 20: applicazione del liquido penetrante fluorescente.

Successivamente è stato applicato un agente emulsionante che rendesse il liquido idrosolubile e si sono lavati i provini con acqua.



Figura 21: applicazione dell'agente emulsionante.

Il tempo di applicazione dell'emulsionante è stato cronometrato (circa 30 secondi) per non correre il rischio che anche la parte di fluido penetrata all'interno della cricche venisse asportata dal lavaggio con acqua.

Una volta che i provini sono stati asciugati (prima in aria e poi delicatamente con carta), gli è stato applicato lo sviluppatore (Prodotto:Rotrivel U White W. Produttore: Cigiemme, Milano), che essendo in forma di polvere secca ha la caratteristica di assorbire il liquido penetrante dal difetto e di allargarne le dimensioni, aumentandone la visibilità rispetto allo sfondo.



Figura 22: applicazione dello sviluppatore.

Dopo un'attesa di altri 15 minuti circa è stato possibile osservare le cricche in una camera oscura, con una lampada a ultravioletti (Lampada di Wood, Prodotto: RV Spot. Produttore: Cigiemme, Milano) che rende visibili i fluidi penetranti.

Di seguito sono riportate le immagini più significative relative all'osservazione in camera oscura.

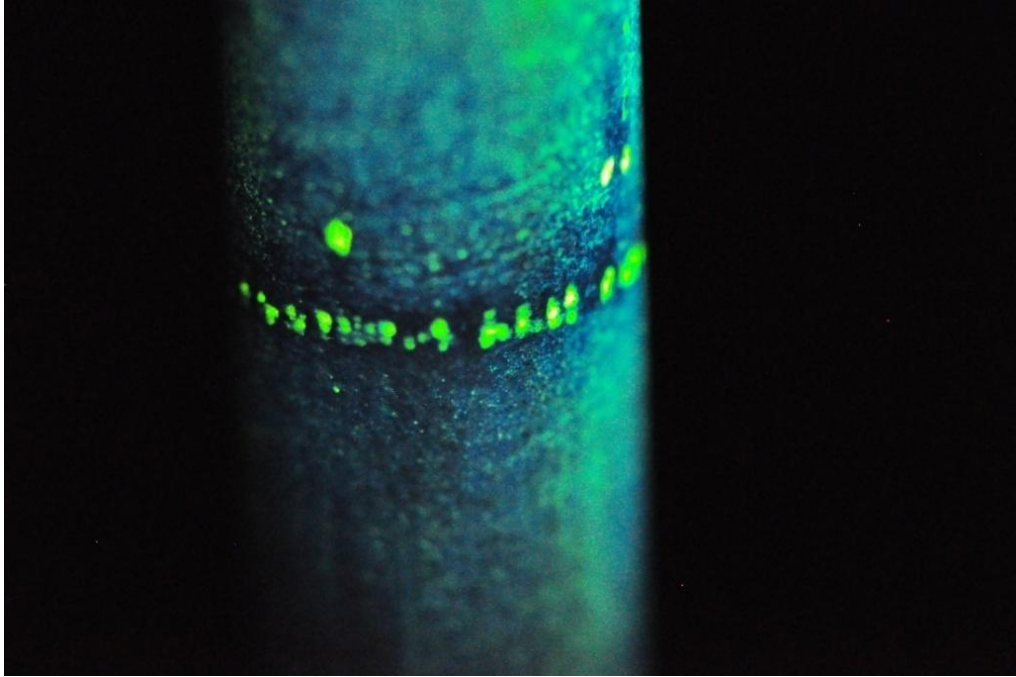


Figura 23: Provino S40, $\sigma=230$ MPa, $N= 868.493$ cicli. I difetti sono evidenziati da tanti puntini distribuiti lungo la circonferenza.

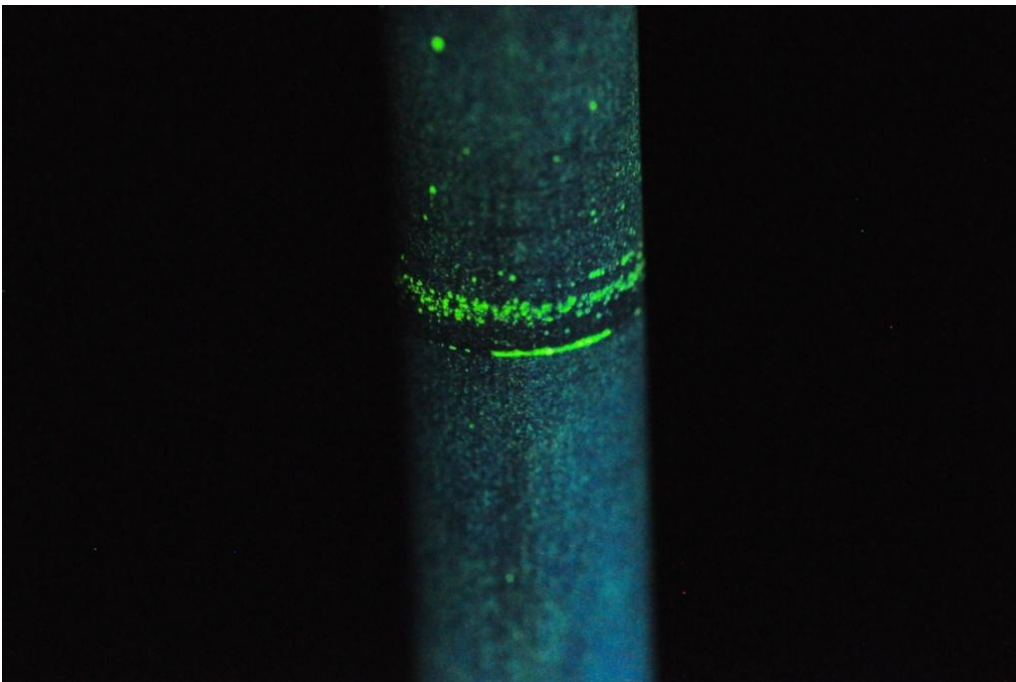


Figura 24: Provino S47, $\sigma=261$ MPa, $N = 220.515$ cicli. Presenta una cricca lunga e ben marcata e tanti puntini distribuiti sulla circonferenza.

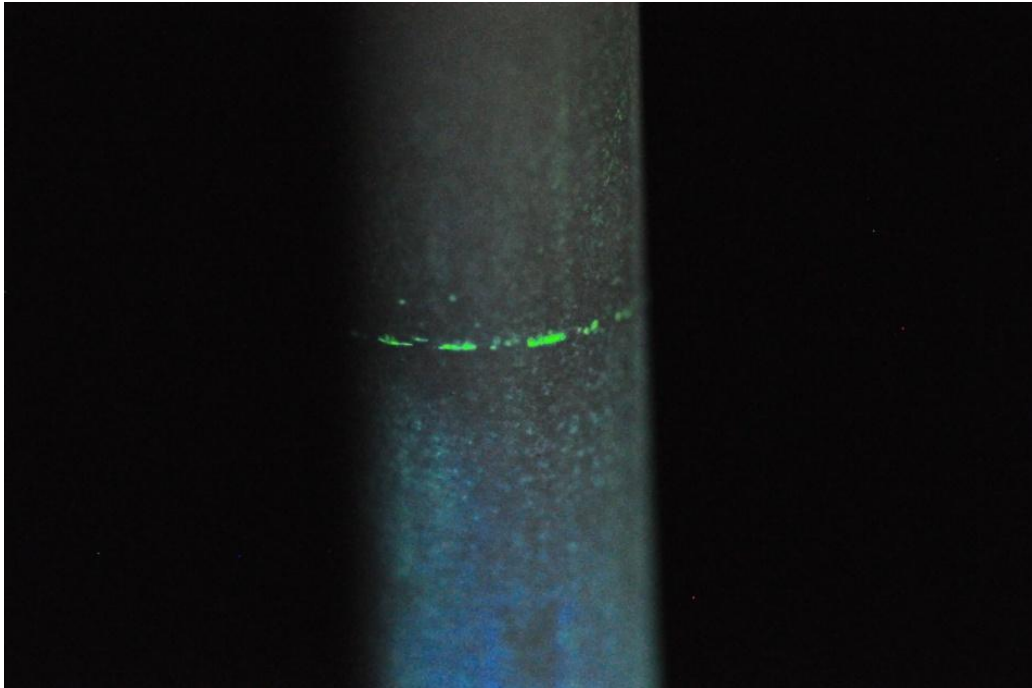


Figura 25: Provino S38, $\sigma=261$ MPa, $N = 224.248$ cicli. Presenta tanti puntini su quasi tutta la circonferenza.

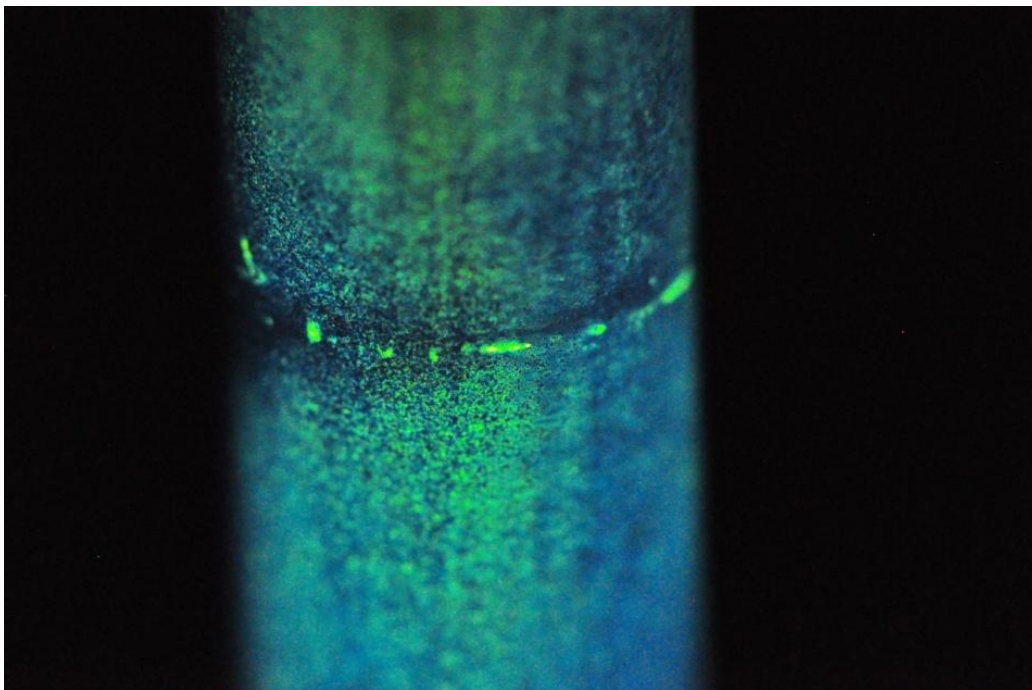


Figura 26: Provino S48, $\sigma=230$ MPa, $N = 502.603$ cicli. Difetti distribuiti come i precedenti.

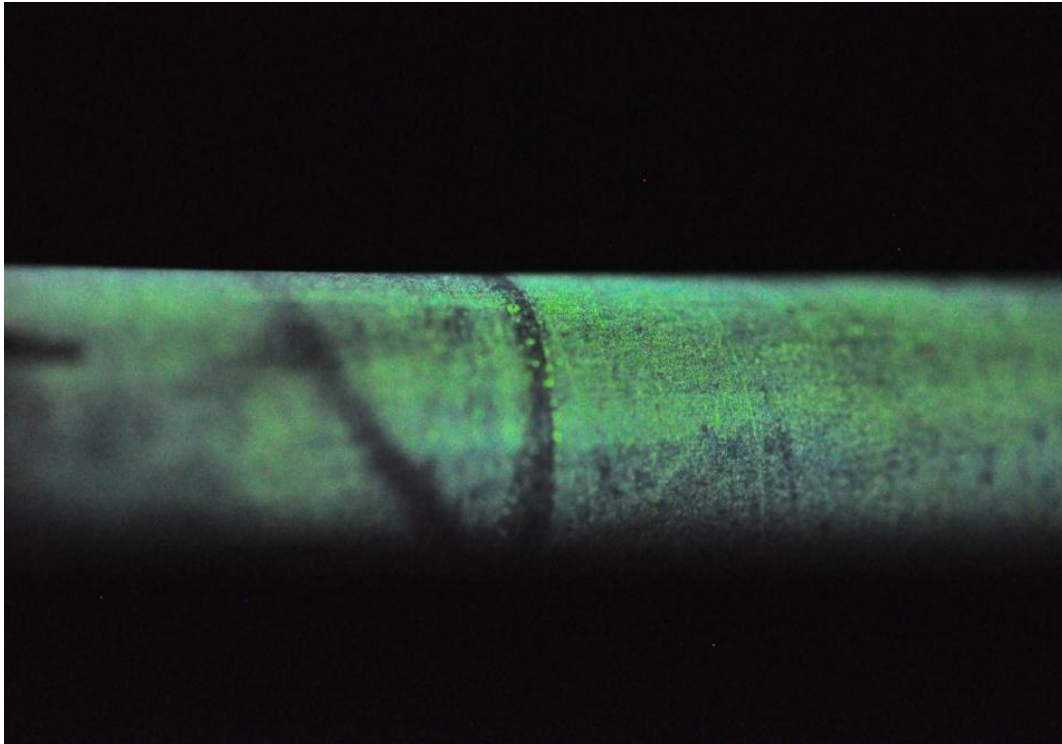


Figura 27: Provino S43, $\sigma=230$ MPa, $N = 800.051$ cicli. Presenta puntini in una zona limitata della circonferenza.

Gli alberi S44 e S39 non hanno presentato difetti o cricche in fase di propagazione.

Grazie all'applicazione dei liquidi penetranti è stato possibile ridurre il numero di provini da sottoporre ad un'ulteriore analisi a cinque, poiché sui restanti due (S44 e S39) non sono stati trovati inneschi di frattura.

Da notare è la presenza di questi “puntini” su tutti i provini, circoscritti al tratto utile di questi ultimi. Essi possono ragionevolmente evidenziare le zone in cui del materiale è stato asportato a causa del fretting, corrispondendo alle cavità descritte nel capitolo iniziale di questa tesi.

I liquidi penetranti sono quindi serviti a individuare le microcricche in fase di propagazione. Questa localizzazione di conseguenza è stata utile per stabilire un piano longitudinale lungo il quale sezionare il provino.

A tal scopo sono stati marcati i pezzi nei punti da cui far partire il taglio.

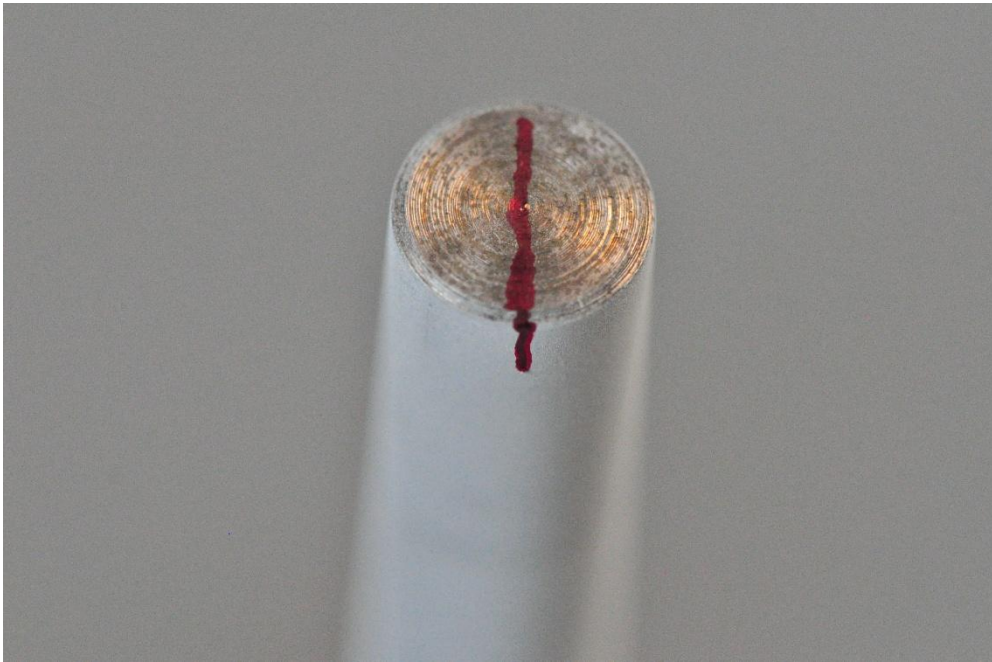


Figura 28: provino marcato pronto per essere sezionato longitudinalmente.

Capitolo 6

SECONDA OSSERVAZIONE AL MICROSCOPIO

6.1 Taglio dei provini

L'osservazione dei provini tramite l'utilizzo dei liquidi penetranti ha permesso di individuare un piano lungo il quale sezionare gli alberi, al fine di poter esaminare la superficie di innesco della frattura e di poter valutare l'influenza del fretting.

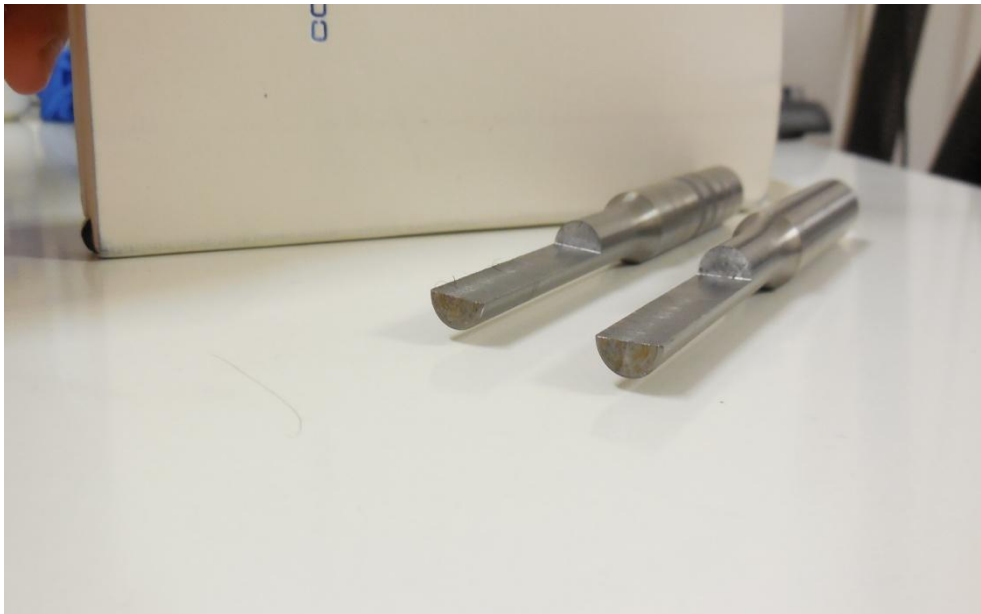


Figura 29: provini sezionati longitudinalmente.

Il taglio è stato eseguito nel laboratorio Hangar della sede di Forlì della scuola di Ingegneria e Architettura.

6.2 Osservazione con microscopio multifocale

In seguito è stata effettuata un'osservazione con il microscopio digitale multifocale a disposizione presso la sede di Bologna, ovvero un "Hirox KH-7700". Questo particolare dispositivo permette la messa a fuoco su più piani contemporaneamente, garantendo un'osservazione più nitida del pezzo esaminato.

E' stata esaminata la superficie periferica dell'albero, così da poter individuare la zona in cui il materiale è stato asportato per fretting, oltre che alla consueta parte di ossido formatasi.

Le seguenti immagini rappresentano i risultati ottenuti, si possono notare le zone usurate, di dimensioni dell'ordine del decimo di millimetro. Questa configurazione è compatibile con la presenza del fretting.

I provini più significativi sono risultati essere gli alberi S38 e S43. Le lunghezze L1, L2 e L3 indicano le ampiezze delle zone usurate, che sono risultate piuttosto estese, in particolare nell'albero S38 (posto a una tensione più alta).

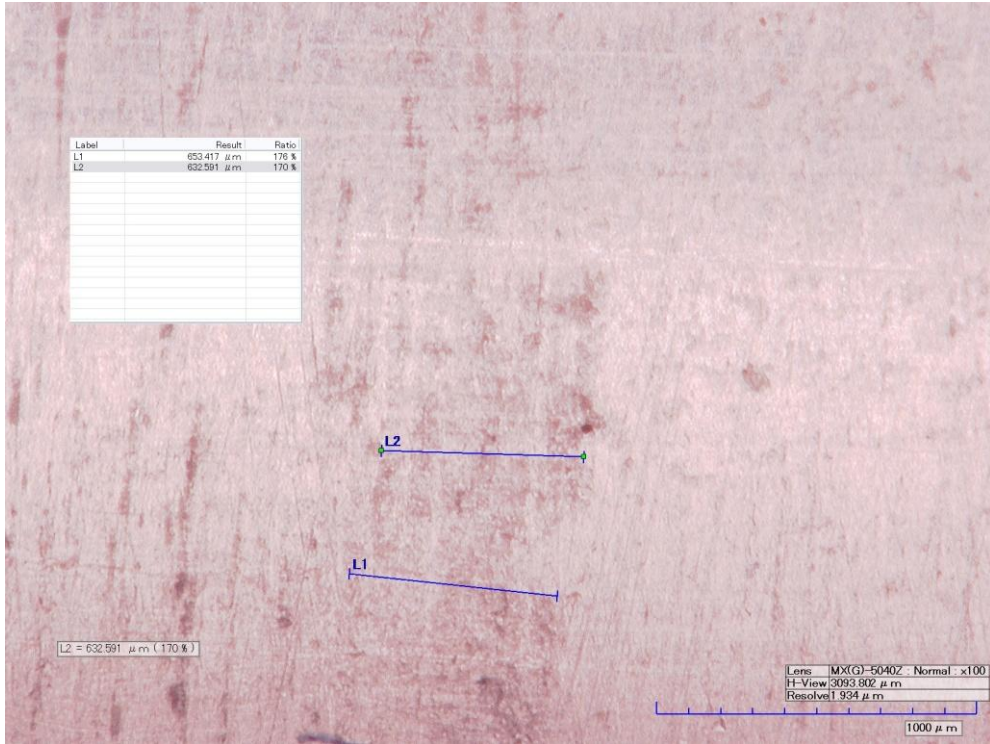


Figura 30: Provino S48, $\sigma=230$ MPa, $N = 502.603$ cicli, $L1=653.417$ μm ,
 $L2=632.591$ μm .

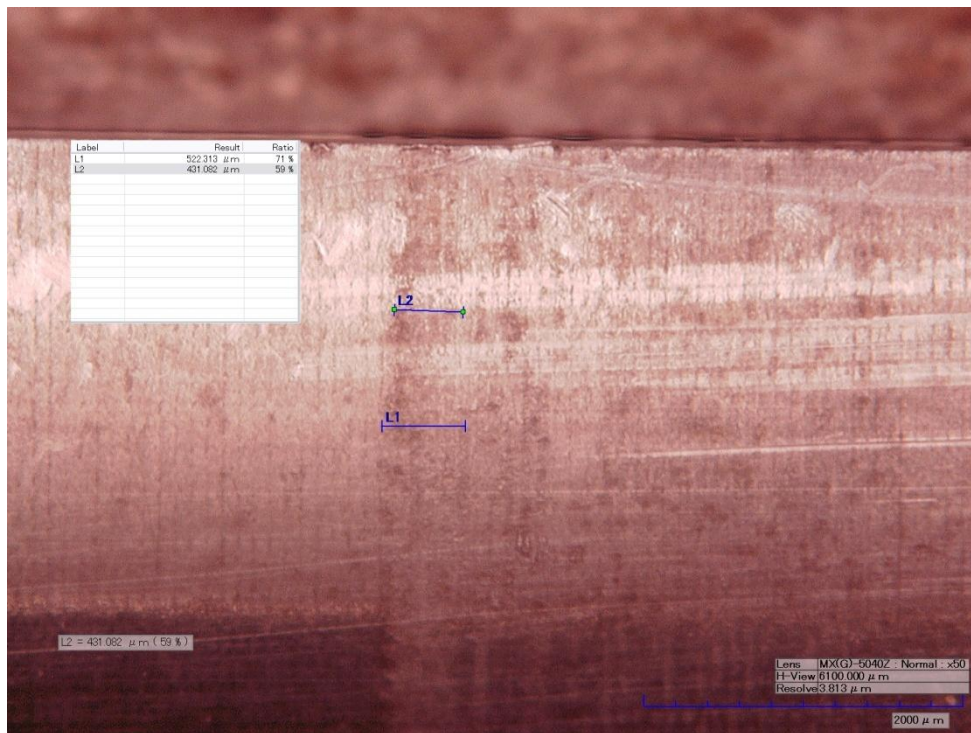


Figura 31: Provino S43, $\sigma=230$ MPa, $N = 800.051$ cicli, $L1=522.313$ μm ,
 $L2=431.082$ μm .

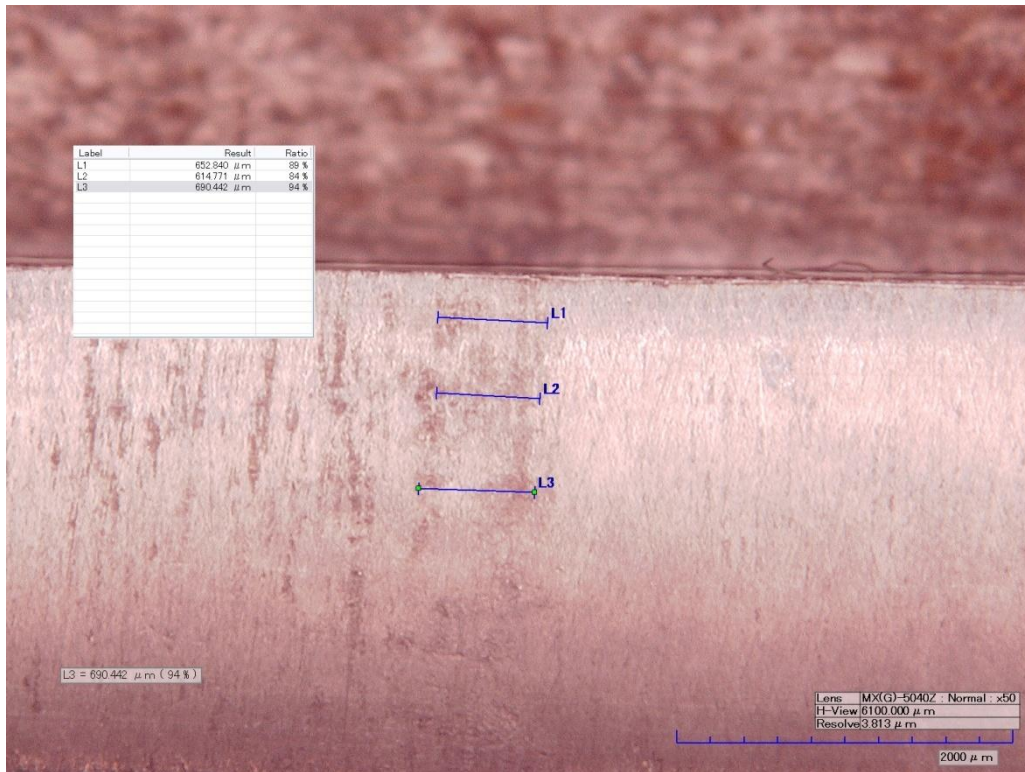


Figura 32: Provino S38, $\sigma=261$ MPa, $N = 224.248$ cicli, $L1=652.840 \mu\text{m}$,
 $L2=614.771 \mu\text{m}$, $L3=690.442 \mu\text{m}$.

E' stato possibile quindi constatare che il provino S38, sottoposto a un carico più alto, ha presentato una zona di usura più estesa ed è stato quindi di maggiore interesse nell'analisi successiva.

6.3 Lucidatura e ultima osservazione al microscopio

Per poter osservare in maniera più approfondita e con ingrandimento superiore le superfici di frattura, così da poter analizzare le microcricche, è stato necessario sezionare ulteriormente i provini in modo da analizzare solo la zona utile e inglobare i pezzi in un polimero per poi sottoporli a più passate di lucidatura.

Il piano di sezione (fresatura) questa volta è stato trasversale, per ottenere in definitiva un semicilindro di piccole dimensioni.

Dopo questa ultima operazione si è utilizzato nuovamente il microscopio ottico, questa volta osservando la superficie laterale dell'albero e cercando di individuare le cricche secondarie dovute al fretting.

Come detto nel paragrafo precedente, il provino S38 ha mostrato i risultati più vicini a quello che ci si aspettava, sebbene in generale le cricche trovate siano state più piccole del previsto, forse a causa dei livelli di tensione troppo bassi.

Si riportano le immagini più significative:

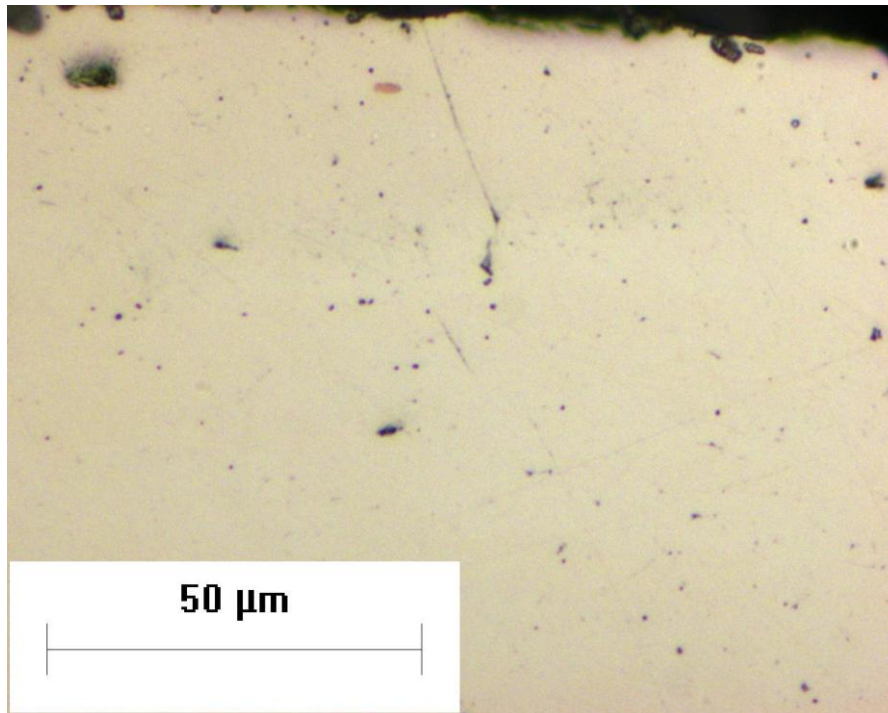


Figura 33: Provino S47, $\sigma=261$ MPa, $N = 220.515$ cicli. Vi è una microcricca in fase di propagazione, con un angolo di circa 60 gradi rispetto al piano di sezione.

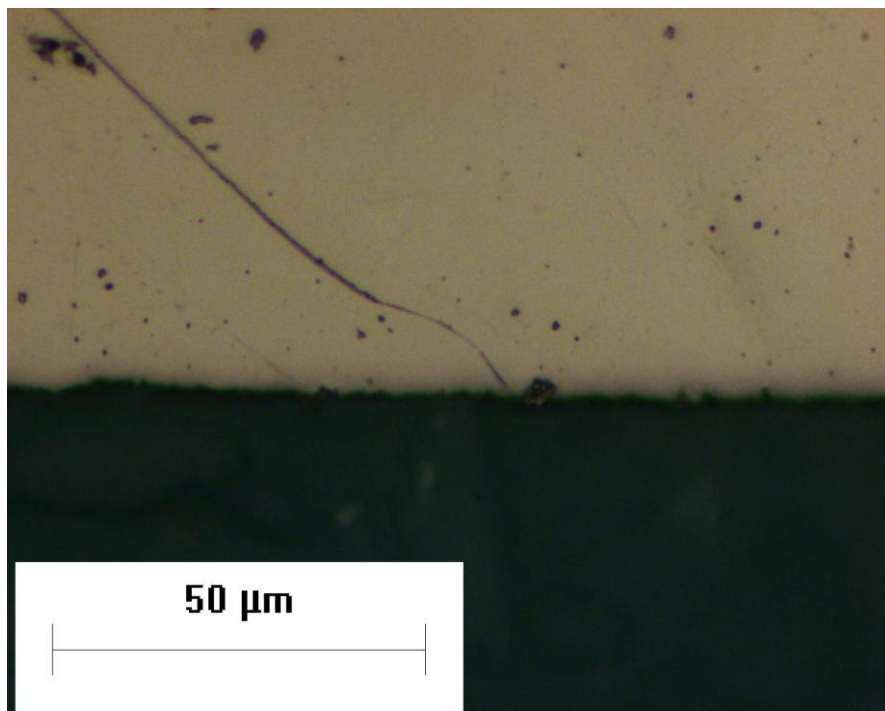


Figura 34: Provino S38, $\sigma=261$ MPa, $N = 224.248$ cicli. Vi è una cricca evidente direzionata con un angolo a 45 gradi rispetto al piano di sezione.

Come detto in precedenza, il provino S38 è risultato essere il provino con microcricche più simili alla configurazione descritta in [4].

Capitolo 7

CONCLUSIONI

Il presupposto del lavoro svolto era quello di individuare meglio le caratteristiche morfologiche dell'usura da fretting sui provini sottoposti alle prove di fatica a flessione rotante, e i risultati sono stati soddisfacenti.

A partire dagli studi di Nishioka e Hirakawa, si è stabilito di creare dei provini appositi per la prova, e montarli sulla macchina di Moore per sottoporli a un certo numero di cicli di carico, senza raggiungere la rottura.

Così facendo, i liquidi penetranti si sono rivelati essere un metodo molto efficace per risolvere il problema dell'individuazione delle cricche, e per stabilire esattamente quale fosse il piano ottimale di sezione longitudinale per poter osservare meglio la superficie periferica dei pezzi.

In seguito, tramite l'utilizzo di microscopi (ottico e multifocale), si è potuto osservare che effettivamente l'aspetto superficiale dei provini risultava corrispondere con le descrizioni e le documentazioni che si avevano a disposizione, per via della presenza importante di ossidi, di cavità approssimativamente circolari (ben evidenziate dai fluidi penetranti), di concavità del tratto utile (dovuta all'asportazione di materiale per usura) e di cricche poste in direzione obliqua.

Si è notato però che queste ultime sono state molto meno evidenti di quanto ci si sarebbe aspettati a partire dalle conoscenze pregresse, probabilmente a causa del tipo di sollecitazione.

Infatti nella macchina per le prove di usura da fretting descritta in [2] il provino, di forma planare, era inserito tra due ganasce e posto in movimento, causando quindi attrito tra le parti.

Nel caso di studio invece è stata utilizzata una macchina per prove di fatica standard a flessione rotante, causa che può aver portato a una formazione meno marcata di cricche secondarie.

Un ulteriore fatto che è stato confermato in questo lavoro è la difficoltà di studio del fenomeno, poiché esso affianca il comportamento a fatica dei componenti in maniera secondaria (sebbene in certi casi comporti un effetto non trascurabile rispetto all'affidabilità di un componente), rendendone quindi meno immediato il riconoscimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Straffellini, *Attrito e usura. Metodologie di progettazione e controllo*.
Milano: Teniche Nuove, 2005.
- [2] K. Nishioka and K. Hirakawa, "Fundamental Investigation of Fretting Fatigue (Part 2, Fretting Fatigue Testing Machine and Some Test Results)," *Bulletin of JSME*, vol. 12, no. 50, pp. 180-187, 1969.
- [3] K. Nishioka and K. Hirakawa, "Fundamental Investigation of Fretting Fatigue (Part 1, On the Relative Slip Amplitude of Press-fitted Axle Assemblies)," *Bulletin of JSME*, vol. 11, no. 45, pp. 437-445, 1968.
- [4] K. Nishioka and K. Hirakawa, "Fundamental Investigation of Fretting Fatigue (Part 3, Some Phenomena and Mechanisms of Surface Cracks)," *Bulletin of JSME*, vol. 12, no. 51, pp.397-407, 1969.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Ing. Giorgio Olmi per la disponibilità e la professionalità con le quali mi ha aiutato nella redazione di questa tesi.

Un ringraziamento altrettanto importante va all'Ing. Massimiliano De Agostinis e all'Ing. Paolo Proli, che si sono dimostrati disponibili e competenti durante le prove in laboratorio.

Ringrazio anche i miei compagni di studio, con i quali ho condiviso l'impegno e la dedizione nella preparazione di tanti esami.

Un ultimo ringraziamento va infine ai miei genitori, che si sono sempre dimostrati disponibili nel sostenermi in questo percorso, anche nei momenti di difficoltà.