

**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  
TECNICA DELLE COSTRUZIONI MECCANICHE  
Realizzato in collaborazione con la ANDALÒ GIANNI S.r.l.**

**CONFRONTO DELLA RESISTENZA A FATICA DI  
PROVINI INTAGLIATI MEDIANTE FRESATURA O  
ELETTROEROSIONE**

**Candidato:  
ANDREA CRISTIANI**

**Relatore:  
GIANGIACOMO MINAK**

**Anno Accademico 2013/2014  
Sessione II**



# Indice

Introduzione . . . . .	1
<b>Capitolo 1 - La fatica</b>	
1.1 - Cenni storici . . . . .	3
1.2 - Il fenomeno della fatica . . . . .	4
1.3 - Micromeccanismi della rottura a fatica . . . . .	5
1.3.1 - La nucleazione . . . . .	5
1.3.2 - La propagazione . . . . .	7
1.3.3 - La rottura finale . . . . .	9
1.4 - Tipi di sollecitazione e rapporto di carico . . . . .	10
1.5 - La curva di Wöhler . . . . .	13
<b>Capitolo 2 - Fattori che influenzano la vita a fatica</b>	
2.1 - Coefficiente di concentrazione a fatica delle tensioni . . . . .	15
2.1.1 - Fattore di forma . . . . .	15
2.1.2 - Sensibilità all'intaglio . . . . .	16
2.1.3 - Coefficiente di concentrazione effettivo . . . . .	17
2.1.4 - Finitura superficiale . . . . .	18
2.2 - Microstruttura e dimensione dei grani . . . . .	18
2.3 - Trattamenti . . . . .	19
2.3.1 - Incrudimento . . . . .	19
2.3.2 - Trattamenti termici e termochimici . . . . .	19
2.3.3 - Trattamenti meccanici . . . . .	19
2.3.4 - Rivestimenti . . . . .	19
2.4 - Ambiente . . . . .	20
2.4.1 - Corrosione . . . . .	20
2.4.2 - Temperatura . . . . .	20
2.5 - Frequenza . . . . .	20
2.6 - Dimensioni . . . . .	21
<b>Capitolo 3 - Le prove sperimentali</b>	
3.1 - Svolgimento e metodi . . . . .	23
3.2 - Tipi di sollecitazione e macchinari per i test . . . . .	24
3.2.1 - Flessione rotante . . . . .	24
3.2.2 - Flessione piana . . . . .	25
3.2.3 - Trazione-compressione . . . . .	26
3.2.3.1 - Macchina elettromeccanica . . . . .	26
3.2.3.2 - Macchina servoidraulica . . . . .	27
3.2.3.3 - Macchina risonante . . . . .	28

<b>Capitolo 4 - Caso di studio</b>	
4.1 - Propositi . . . . .	29
4.2 - I provini . . . . .	29
4.2.1 - La geometria . . . . .	30
4.2.2 - I materiali . . . . .	32
4.2.3 - Calcolo del fattore $K_f$ . . . . .	32
4.2.4 - Lavorazioni e rugosità . . . . .	38
4.3 - La prova di laboratorio . . . . .	42
4.3.1 - La macchina . . . . .	42
4.3.2 - Le condizioni di lavoro . . . . .	44
4.3.3 - Il procedimento . . . . .	45
4.3.3.1 - Ricerca della cricca con liquidi penetranti . . . . .	47
4.3.3.2 - Ispezione visiva della superficie di frattura . . . . .	50
4.3.3.3 - Prove di durezza . . . . .	51
4.3.4 - La raccolta dei dati . . . . .	52
4.4 - Interpretazione dei dati ottenuti . . . . .	54
4.4.1 - La costruzione delle curve di Wöhler . . . . .	54
4.4.2 - Il confronto delle curve costruite . . . . .	59
<b>Capitolo 5 - Conclusioni</b> . . . . .	61
<b>Bibliografia</b> . . . . .	63

# Introduzione

Lo scopo di questa tesi è quello di decretare quale tipo di lavorazione tra elettroerosione e fresatura sia la più adatta per la realizzazione di particolari meccanici soggetti a carichi affaticanti. Sono stati realizzati provini di due diversi materiali per verificare se l'entità del beneficio, ottenuto con una delle due lavorazioni, risenta del tipo di materiale.

I provini presentano un intaglio che rappresenta una zona critica sia per la lavorazione sia per la resistenza a fatica. In questo punto avviene infatti l'innesco della cricca che porta a rottura il pezzo.

Sono state effettuate prove con la stessa serie di livelli di carico, ove possibile, per ogni combinazione di materiale/lavorazione in modo da ottenere, per interpolazione, dei grafici confrontabili tra loro.



### 1.1 - Cenni storici

Le prime ricerche sistematiche sul fenomeno della fatica si devono ad un ingegnere ferroviario tedesco, August Wöhler (figura 1.1.a), il quale tra il 1852 e il 1870 indagò su alcune, apparentemente inspiegabili, rotture di assali ferroviari (figura 1.1.b).



Fig 1.1.a - *August Wöhler, 1819-1914*

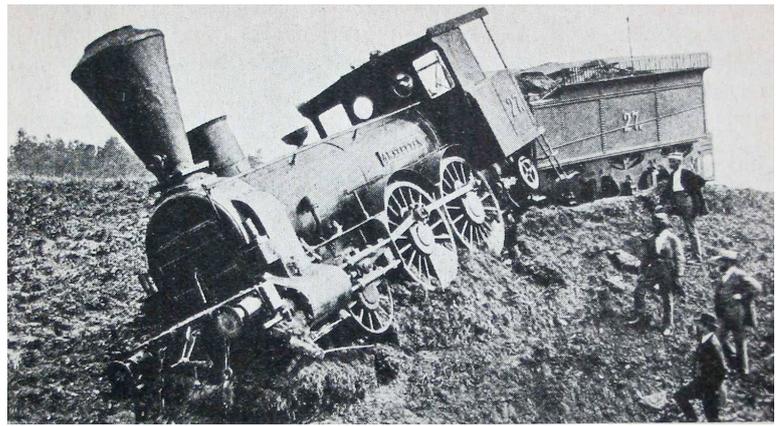


Fig 1.1.b - *Locomotiva deragliata ad Amstetten (Austria) il 19 ottobre 1875 a causa del cedimento di un assale.*

L'ampiezza delle indagini e l'accurata interpretazione dei risultati, costituiscono ancora oggi un valido fondamento nello studio fenomenologico della fatica. Le peculiarità delle rotture che egli indagò con le sue ricerche furono le seguenti:

- La rottura del materiale avviene per tensioni inferiori a quella corrispondente al carico di rottura statico ( $\sigma_R$ ) se questo viene sollecitato con azioni ripetute nel tempo.
- Il numero di cicli per pervenire a rottura ( $N$ ) è tanto maggiore quanto minore è l'ampiezza di oscillazione della tensione ( $\sigma_a$ ).
- La tensione può oscillare indefinitamente entro un certo valore ( $\sigma_{LF}$ ) senza produrre la rottura del materiale. Questo livello di carico viene detto tensione limite di fatica.

Dalle prove sperimentali che condusse, Wöhler ricavò una serie di curve su base statistica che ancora oggi prendono il nome di *Diagrammi di Wöhler* e costituiscono lo strumento base per la progettazione di componenti sollecitati a fatica.

## 1.2 - Il fenomeno della fatica

La fatica è un fenomeno *progressivo, permanente e localizzato* che provoca fratture di tipo fragile anche su materiali duttili.

Essa interessa la stragrande maggioranza dei campi di applicazione della meccanica, in particolare dove vi sia un'applicazione di carico ciclica o comunque variabile nel tempo. È piuttosto insidiosa in quanto un pezzo soggetto a carichi affaticanti può giungere a rottura anche se il carico massimo è molto inferiore al limite di snervamento e costituisce infatti la causa principale di rottura dei componenti meccanici in esercizio.

Tale fenomeno si compone di tre fasi principali: la nucleazione della cricca, il suo accrescimento e la rottura finale del pezzo che avviene in modo improvviso.

Dal punto di vista morfologico le rotture per fatica si differenziano dalle altre per la loro superficie caratterizzata dalla presenza di almeno due zone distinte: una piuttosto liscia, solcata da linee concentriche o sostanzialmente parallele tra loro (zona scura in figura 1.2.a) e una opaca a grana cristallina, più ruvida (zona più chiara in figura 1.2.a). La prima, che parte dal punto in cui si è innescata la cricca di fatica, è dovuta alla propagazione della cricca stessa, mentre la seconda corrisponde alla zona della rottura di schianto che si verifica quando il carico applicato diventa superiore a quello consentito dalla sezione resistente residua.

Un'altra caratteristica di questa forma di rottura è quella di non essere generalmente accompagnata da una deformazione plastica evidente a livello macroscopico pertanto il cedimento avviene improvvisamente senza evidenti segni premonitori.



Fig. 1.2.a - *Superficie di rottura per fatica di una pala dell'elica di un'imbarcazione.*

## 1.3 - Micromeccanismi della rottura a fatica

Nei processi di fatica si passa senza discontinuità da una fase iniziale caratterizzata dal danno incipiente a livelli submicroscopici ad una fase successiva caratterizzata dalla propagazione delle fessurazioni a livelli microscopici e macroscopici.

### 1.3.1 - La nucleazione

Vi sono diversi fattori che concorrono alla nucleazione della cricca ma tutti sono riconducibili alle interazioni tra i grani o tra le fasi presenti nel materiale.

Differenti combinazioni di bande di scorrimento e incongruenze elastoplastiche tra i grani o tra le fasi innescano la formazione della cricca. La nucleazione viene dunque governata dalle deformazioni plastiche ripetute nel tempo che sono dovute al movimento di dislocazione nel reticolo cristallino del materiale.

Sulla superficie dei pezzi soggetti a carichi affaticanti sono presenti estrusioni ed intrusioni di materiale (figura 1.3.1.a): si tratta di sporgenze ed intagli delle dimensioni di  $0,1 \div 1 \mu\text{m}$ . Essi si generano a causa dello slittamento permanente dei piani di maggiore scorrimento dei cristalli meglio orientati rispetto alla direzione di applicazione del carico. Si tratta di un fenomeno irreversibile poiché localmente il materiale incrudisce e non permette uno scorrimento di ritorno dei piani in campo elastico.

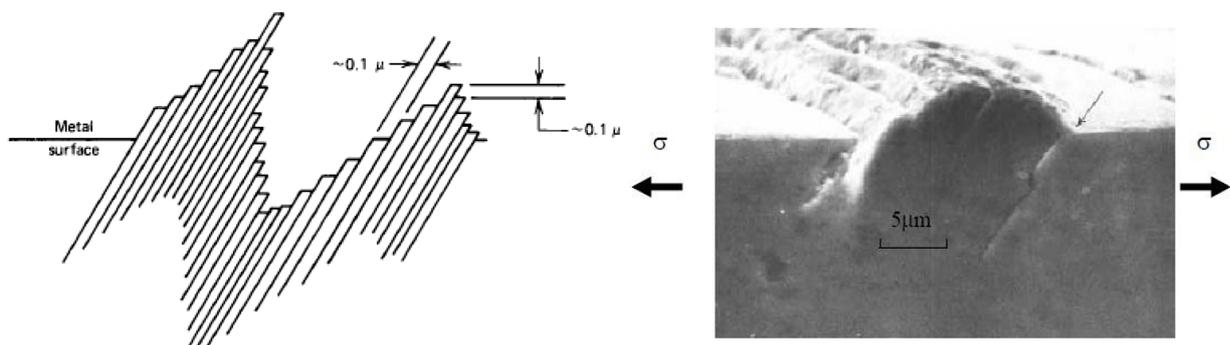


Fig. 1.3.1.a - Schematizzazione di estrusioni ed intrusioni sulla superficie di materiale soggetto a carico affaticante e relativa fotografia al microscopio.

Le irregolarità così createsi sulla superficie rappresentano punti critici in cui avviene una concentrazione tensionale che favorisce la nucleazione di microcricche.

Quando la dimensione, combinata alla geometria, di una microcricca raggiunge un valore critico, termina la fase di nucleazione ed ha inizio la seconda fase, quella di propagazione del danno.

La frattura avanzerà inizialmente lungo la direzione di questa microcricca “critica” mentre le altre microcricche generatesi arresteranno il loro avanzamento.

Inizialmente le microfessurazioni sono orientate come i piani lungo i quali avviene lo scorrimento dunque nella direzione delle massime tensioni tangenziali. Successivamente il difetto tende a propagarsi in direzione ortogonale a quella di applicazione del carico (figura 1.3.1.b).

In genere la nucleazione del difetto avviene in superficie poiché questa presenta inevitabilmente zone non perfettamente lisce che creano fin da subito delle concentrazioni di tensione. Inoltre, se la sollecitazione ciclica è di tipo torsionale o flessionale, è proprio in corrispondenza della superficie che si hanno i valori di tensione più elevati.

In particolari condizioni può tuttavia accadere che la nucleazione avvenga in punti del componente non esposti. Ad esempio condizioni che sollecitano il materiale a compressione, come può avvenire sulle piste di un cuscinetto, generano spesso il distacco di porzioni di materiale poiché la cricca parte in profondità per avanzare verso la superficie. Ma anche una semplice inclusione o una porosità non esposta può creare una concentrazione di tensioni tale da innescare la frattura.

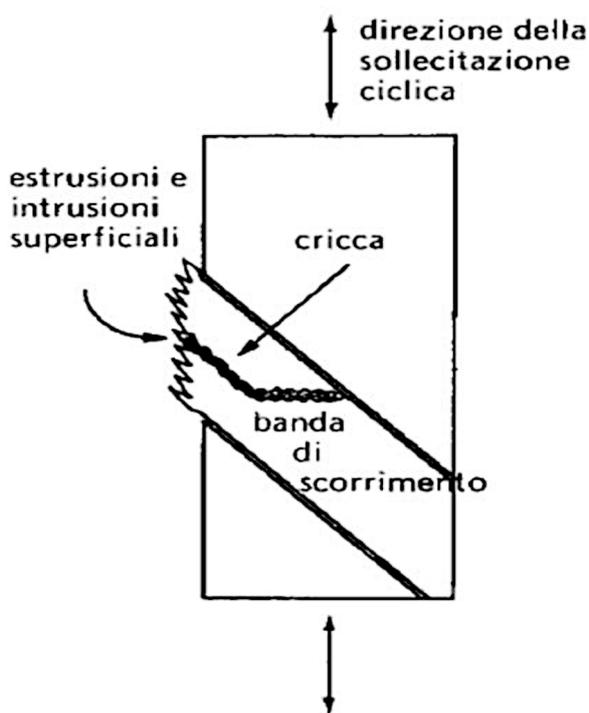


Fig 1.3.1.b - Schema di nucleazione e propagazione della cricca.

### 1.3.2 - La propagazione

Come accennato in precedenza, la cricca tende ad avanzare propagandosi lungo il piano ortogonale alla direzione di applicazione del carico. Ciò risulta maggiormente vero se il componente non è di piccole dimensioni.

Il meccanismo di propagazione è legato alle deformazioni plastiche che avvengono in fondo alla cricca quando questa viene “aperta” dalla sollecitazione.

Nel momento in cui viene a mancare il carico la cricca si “richiude” ma il fondo della gola risulta essere avanzato rispetto alla precedente sollecitazione poiché si è allargato e deformato plasticamente (figura 1.3.2.a).

Questo meccanismo risulta piuttosto stabile nel tempo se anche il carico varia con costanza e l'avanzamento della cricca risulta circa lo stesso per ogni applicazione del carico. Va tuttavia precisato che non risulta ben chiaro se un singolo avanzamento della cricca corrisponda ad una singola applicazione della forza piuttosto che ad un “pacchetto” di applicazioni di carico.

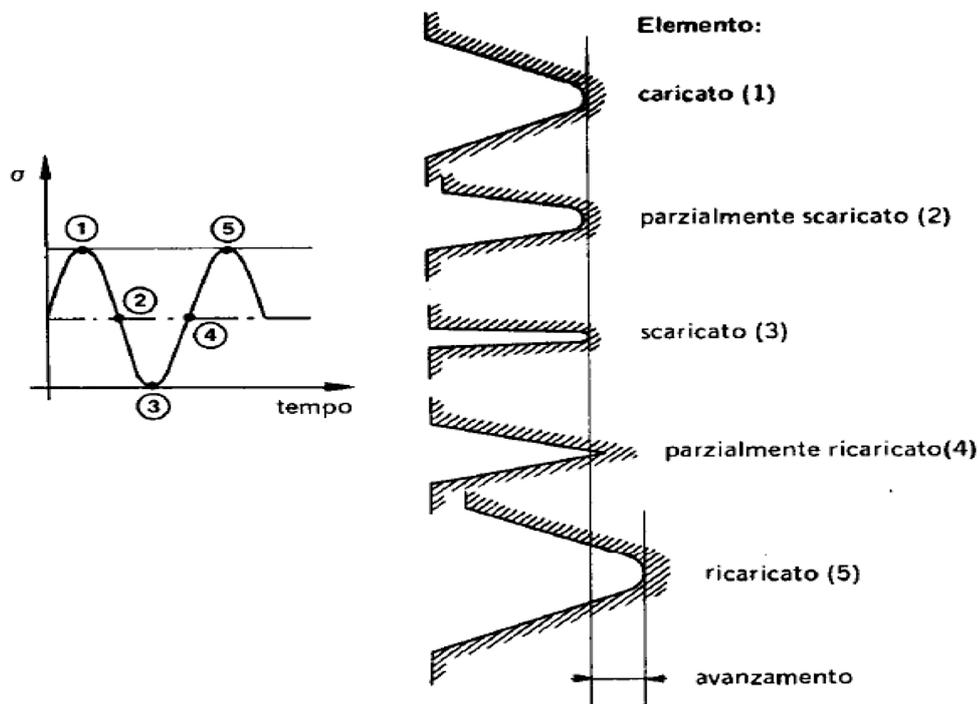


Fig. 1.3.2.a - Grafico di una sollecitazione ciclica con relativo schema di avanzamento della cricca nel materiale.

I singoli avanzamenti della cricca risultano solitamente visibili, con l'ausilio di un microscopio elettronico, sulla superficie di rottura corrispondente alla zona di propagazione del danno a patto che questa non venga danneggiata nel momento del cedimento di schianto. Le linee concentriche o parallele che li individuano vengono chiamate *striature* (figura 1.3.2.b) e non vanno confuse con le *linee di spiaggia* (figura 1.3.2.c) visibili ad occhio nudo; queste ultime sono causate da una variazione delle condizioni di esercizio del componente durante la propagazione della cricca.

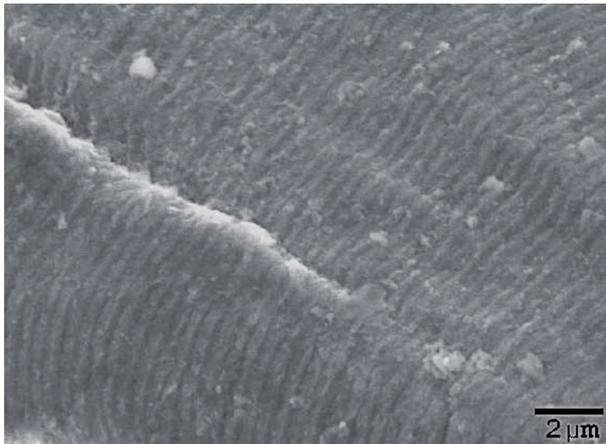


Fig. 1.3.2.b - *Striature sulla superficie di propagazione della cricca in un componente di alluminio.*



Fig. 1.3.2.c - *Linee di spiaggia sulla superficie di propagazione della cricca.*

Nella pratica è infatti raro che un componente meccanico venga sollecitato a fatica da un carico ciclico ad ampiezza costante. In generale sia l'ampiezza che il valore medio della sollecitazione sono variabili nel tempo e ad una sollecitazione più intensa corrisponde un maggiore accumulo del danno, ovvero una più rapida propagazione della cricca.

### 1.3.3 - La rottura finale

Il processo di danneggiamento a fatica culmina con la rottura finale. Quando la sezione resistente residua risulta tale da generare una tensione pari a quella di rottura del materiale, il componente cede durante l'applicazione del carico.

L'aspetto della zona interessata dal cedimento di schianto è ruvido, irregolare ed opaco e presenta le caratteristiche morfologiche di una rottura di tipo fragile (zona superiore in figura 1.3.3.a).

Il rapporto tra l'estensione della zona di propagazione e quella della zona del cedimento è proporzionale all'entità della tensione a cui era sottoposto il materiale; in particolare maggiore è la tensione, minore sarà l'area della superficie di propagazione.

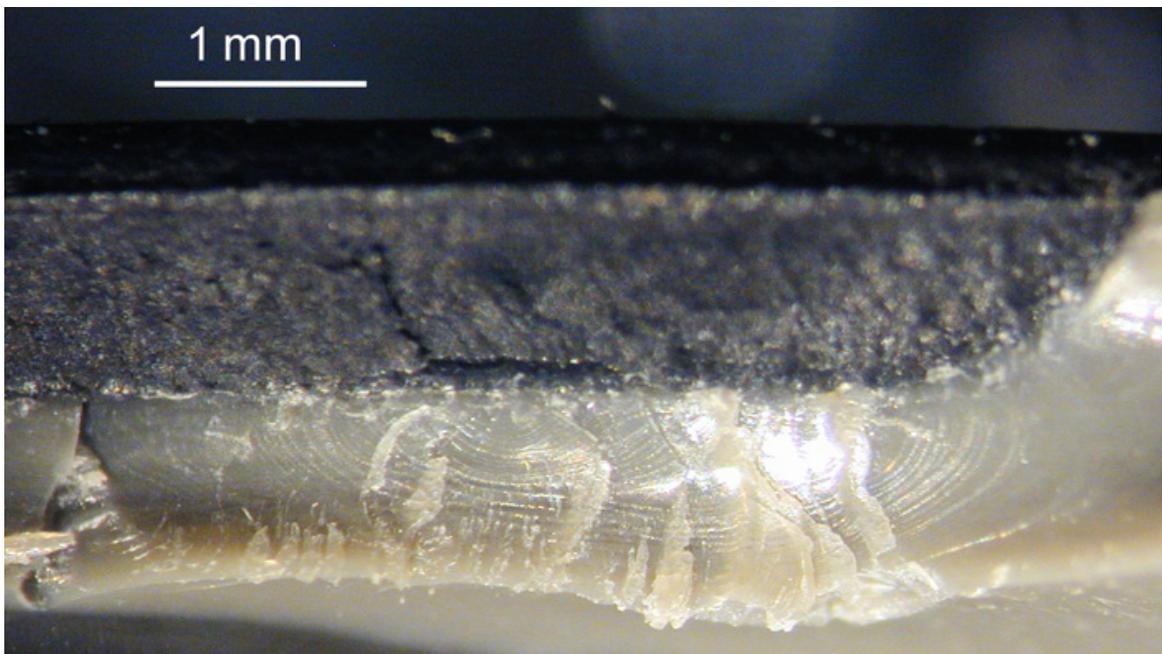


Fig. 1.3.3.a - *Superficie interessata da rottura a fatica. Si notano le differenze morfologiche tra la zona inferiore (propagazione) e superiore (rottura di schianto).*

## 1.4 - Tipi di sollecitazione e rapporto di carico

Le rotture per fatica si possono verificare in svariate condizioni e per differenti tipi di sollecitazione, ad esempio trazione alternata, compressione alternata, trazione-compressione, flessione alternata e torsione alternata. Il carico può variare casualmente o in modo regolare, con forma d'onda sinusoidale, quadrata o di qualsiasi altro tipo (figura 1.4.a).

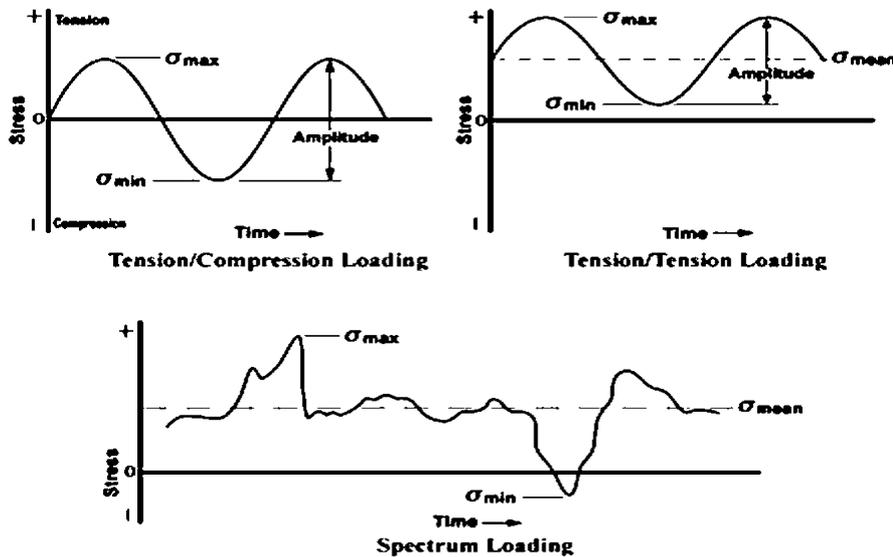


Fig 1.4.a - *Forme d'onda sinusoidali ideali (in alto) e possibile forma d'onda reale (in basso).*

Il carico può oscillare in modo simmetrico intorno al valore zero o intorno ad un valore diverso da zero (figura 1.4.b).

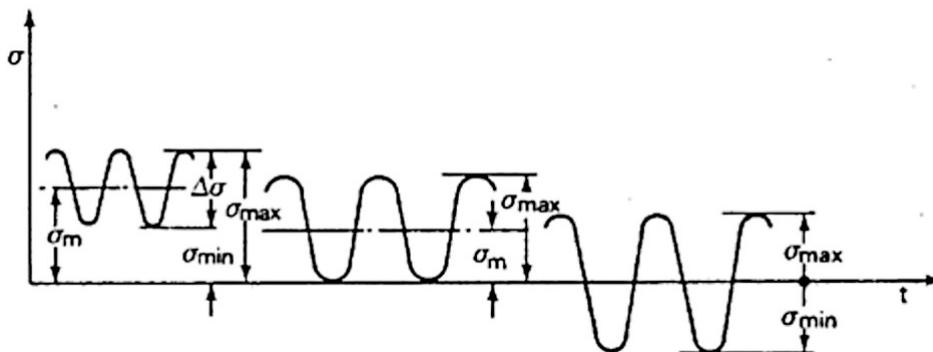


Fig. 1.4.b - *Differenti tipi di carico: onda simmetrica di trazione pulsata, onda simmetrica di trazione a zero, onda simmetrica di trazione-compressione.*

Il comportamento a fatica di un materiale dipende pertanto dal valore minimo della tensione ( $\sigma_{min}$ ), dal valore massimo ( $\sigma_{max}$ ), dal loro rapporto R, dal valore medio ( $\sigma_m$ ) e dall'ampiezza ( $\sigma_a$ ) definiti come:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \qquad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \qquad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Il rapporto R è detto *rapporto di carico* ed è indicativo del tipo di sollecitazione:

Se  $R=1$  significa che la tensione massima e minima si equivalgono pertanto siamo in presenza di una sollecitazione statica di trazione o di compressione.

Se  $R=-1$  significa che le due tensioni hanno lo stesso modulo e segni opposti; si tratta dunque di una sollecitazione simmetrica alternata di trazione-compressione.

Se  $R=0$  significa che la tensione minima è nulla perciò il ciclo di carico presenta una trazione pulsata che si annulla ad ogni ciclo.

Se  $R=-\infty$  significa che la tensione massima è nulla e la minima è negativa; ciò si traduce in un ciclo di compressione pulsata che si azzera ad ogni ciclo.

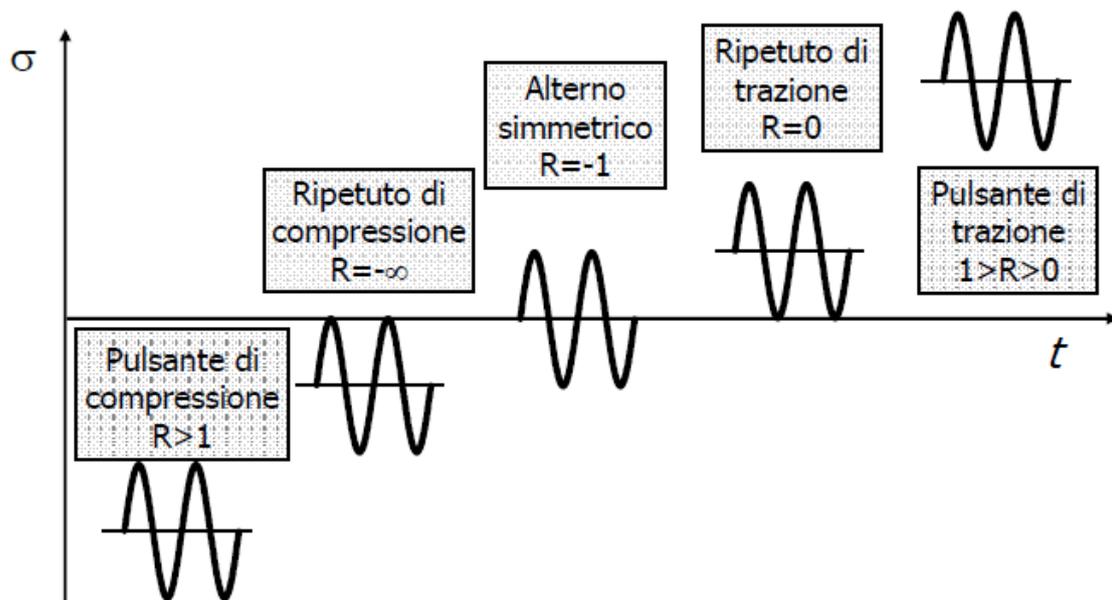


Fig 1.4.c - *Differenti valori del parametro R e relative tipologie di carico.*

Le tensioni media ( $\sigma_m$ ) e alternata ( $\sigma_a$ ) giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della resistenza a fatica di un componente. Esse sono inversamente dipendenti l'una dall'altra. In particolare all'aumentare della  $\sigma_m$  deve diminuire la  $\sigma_a$  affinché la vita a fatica del materiale rimanga la stessa. In fase di progettazione, per tenere conto della considerazione appena fatta, viene impiegato il diagramma di Goodman-Smith, detto più semplicemente diagramma GS (figura 1.4.d). Si tratta di un grafico sul piano  $\sigma_m$ - $\sigma_{max}$  che individua un'area all'interno della quale il materiale risulta in sicurezza, ovvero non perviene a rottura per fatica. La curva superiore del grafico individua la  $\sigma_{max}$  mentre quella inferiore individua la  $\sigma_{min}$ . La tensione media  $\sigma_m$  si legge invece sulla retta centrale passante per l'origine. Muovendosi sull'asse delle ascisse si individuano le diverse combinazioni di carico: si tratta di *carichi isoaffaticanti*.

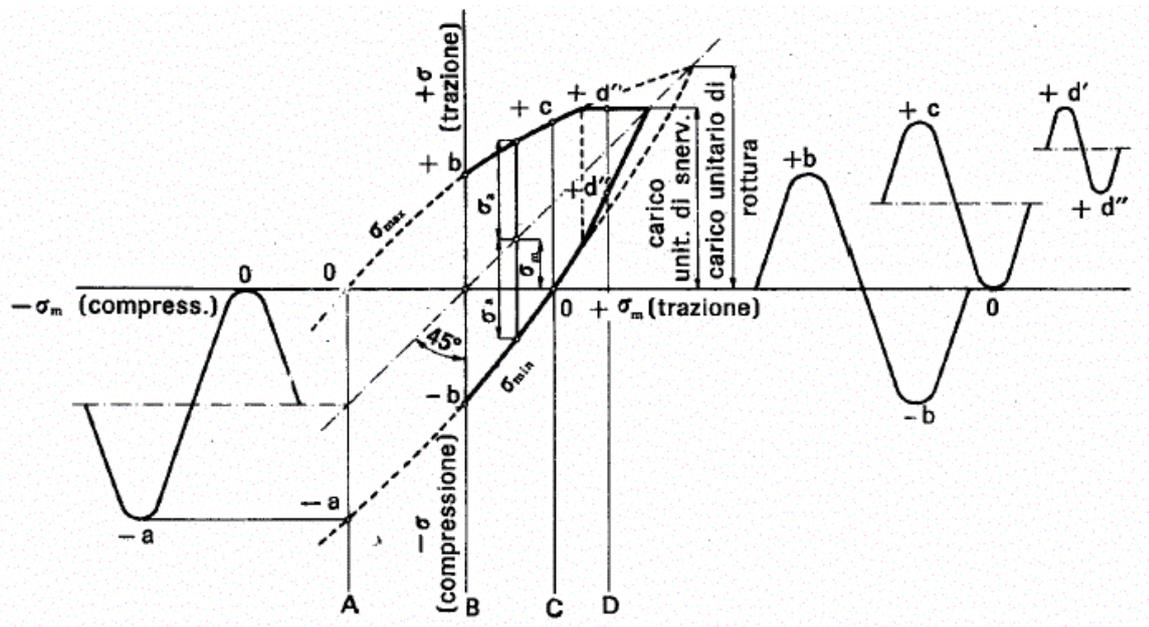


Fig. 1.4.d - Diagramma GS e corrispondenti curve di carico isoaffaticanti.

## 1.5 - La curva di Wöhler

La curva di Wöhler (figura 1.5.a) è un grafico su base statistica che descrive il comportamento di un provino sottoposto ad un carico ciclico sinusoidale a valore medio costante. Essa mette in relazione la tensione alterna  $\sigma_a$  con il numero di cicli  $N$  che portano il provino a cedimento.

Per definire una curva di Wöhler è dunque necessario definire il rapporto di carico  $R$  del ciclo di fatica. La configurazione più comune prevede  $R=-1$  poiché è quella caratteristica di una prova di flessione rotante.

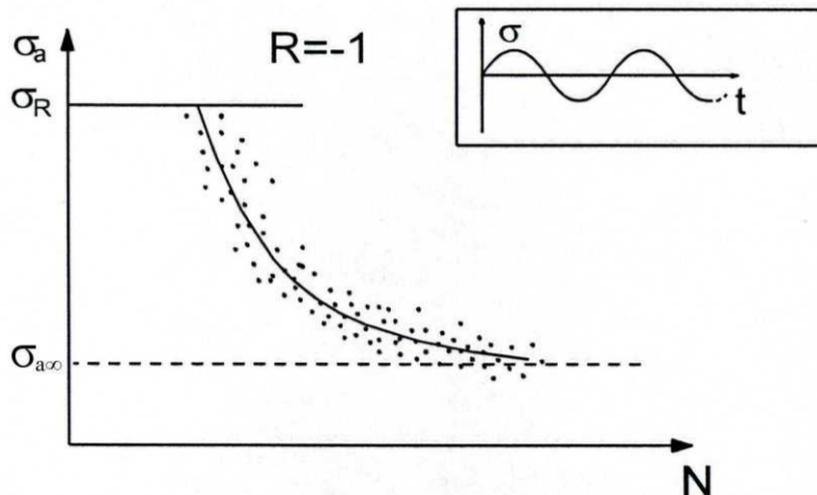


Fig. 1.5.a - *Curva di Wöhler in coordinate non logaritmiche ottenuta con rapporto di carico  $R=-1$*

Bisogna sottolineare che, seppur sottoposti allo stesso carico, i provini non si romperanno tutti dopo lo stesso numero di cicli ma seguiranno una distribuzione normale in coordinate logaritmiche. Per costruire il diagramma di Wöhler è dunque necessario ripetere varie prove allo stesso livello di carico. Si varierà poi il livello di carico effettuando altre prove con questa configurazione. Se per ogni configurazione si fa una media dei cicli di vita a rottura e si congiungono tali valori medi, si ottiene una curva di Wöhler al 50% (figura 1.5.b). Ciò significa che i valori di tensione che si leggono su questa curva forniscono una probabilità di sopravvivenza del 50% al corrispondente numero di cicli. Questo spiega la natura statistica del grafico. In fase di progettazione dei componenti meccanici, per ovvi motivi, le curve più utilizzate sono quelle relative al 90% o 99% di probabilità di sopravvivenza.

Visto l'elevato numero di cicli che si raggiunge e dato che il diagramma può essere semplificato dal punto di vista matematico, nella maggior parte dei casi le curve di Wöhler vengono rappresentate in coordinate bi-logaritmiche (figura 1.5.c).

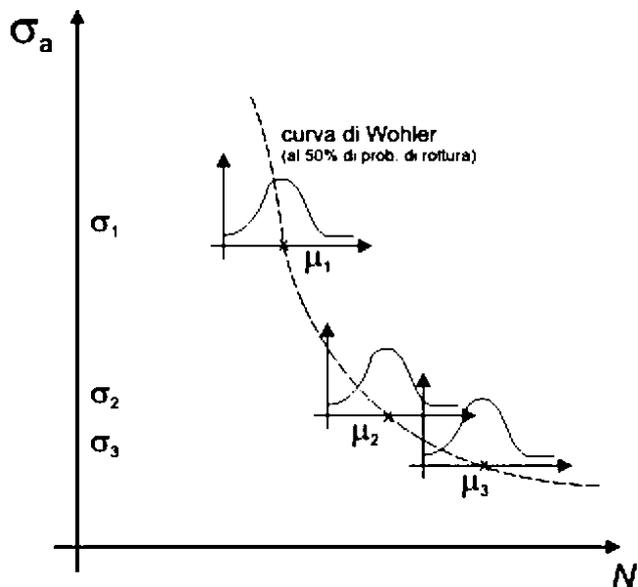


Fig 1.5.b - Curva di Wöhler al 50% ottenuta congiungendo i valori medi dei cicli di vita ad ogni livello di carico.

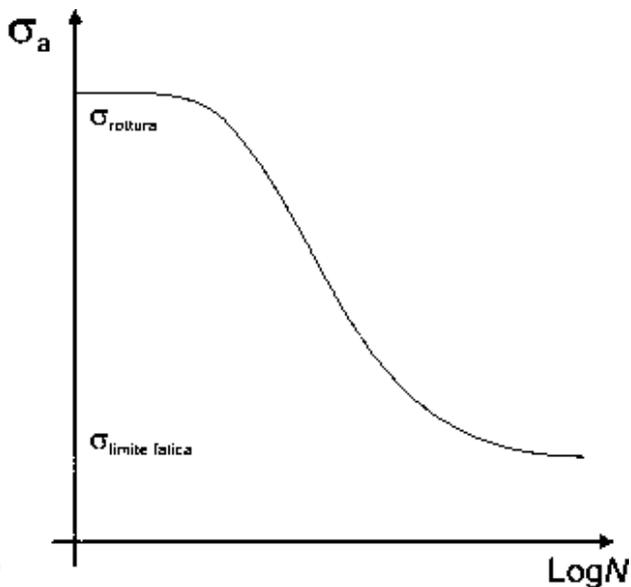


Fig 1.5.c - Curva di Wöhler in coordinate bi-logaritmiche.

Si può notare che la curva (figura 1.5.c) presenta un limite superiore coincidente con la tensione di rottura  $\sigma_R$  ed uno inferiore corrispondente al limite di fatica  $\sigma_{LF}$ . Il primo tratto della curva individua la zona di fatica *oligociclica* ed è compreso tra 0 e  $10^3 \div 10^4$  cicli.

La zona centrale, quella compresa tra  $10^3 \div 10^4$  e  $10^6$  cicli, individua il campo di fatica ad alto numero di cicli ed è il tratto che varia più rapidamente. In scala bi-logaritmica questo tratto ha un andamento lineare descritto dalla legge di Basquin:

$$N\sigma_a^K = cost$$

L'esponente  $K$  rappresenta la pendenza della retta ed è importante per il calcolo della vita residua a fatica: maggiore è  $K$ , minore è la pendenza della retta e maggiore sarà il numero di cicli necessario per raggiungere la rottura.

L'ultima zona corrisponde infine ad un numero di cicli superiore a  $10^6$  ed individua il limite di fatica. Ciò significa che se il materiale viene sottoposto ad una tensione inferiore a quella individuata da questo tratto, il provino non si romperà.

## Fattori che influenzano la vita a fatica

### 2.1 - Coefficiente di concentrazione a fatica delle tensioni

La geometria di un componente unita alle caratteristiche del materiale impiegato per la sua realizzazione, danno origine a molteplici configurazioni tensionali che possono peggiorarne la resistenza a fatica.

#### 2.1.1 - Fattore di forma

Per motivi funzionali molti organi meccanici presentano forme particolari che variano bruscamente dando origine a zone critiche (figura 2.1.1.a). In questi punti si verifica un aumento dello stato tensionale che localmente diventa triassiale. Una filettatura, una sede per chiavetta, un foro, una variazione di diametro, una saldatura, una gola o semplicemente il profilo della base del dente di una ruota dentata possono innalzare il valore della tensione nominale  $\sigma_n$  fino ad un valore massimo locale  $\sigma_{locale}$  superiore di 3÷4 volte rispetto a quello nominale.

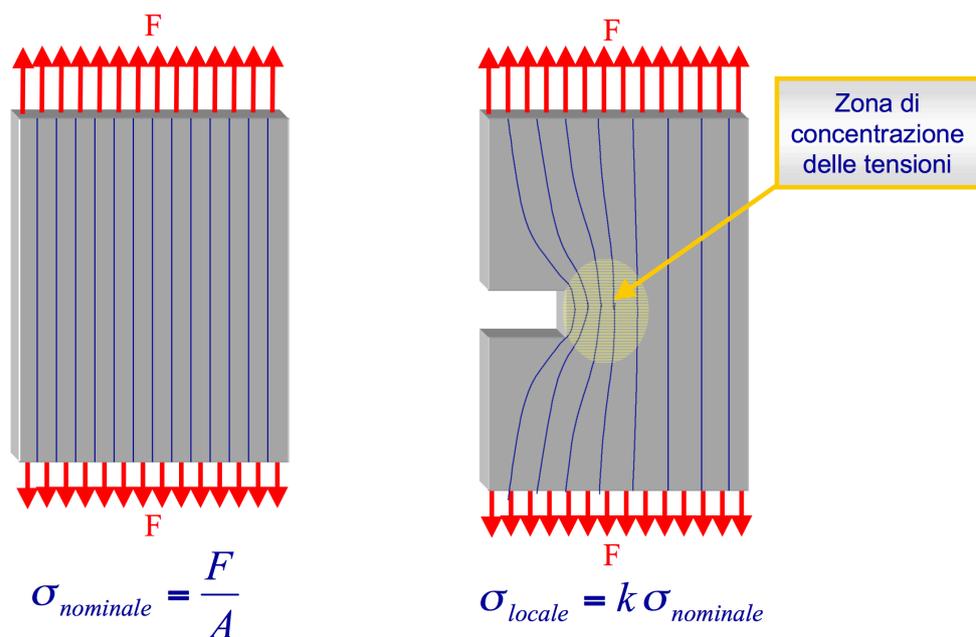


Fig. 2.1.1.a - Zona critica generata da un intaglio alla base del quale si verifica una concentrazione di tensione.

Questo aumento di tensione plasticizza localmente il materiale il quale non riesce a contrarsi (come vorrebbe invece l'effetto Poisson) per congruenza con la materia circostante.

Per questo motivo si ricorre al cosiddetto *fattore di forma* o *fattore d'intaglio teorico*  $K_t$  definito come il rapporto tra la tensione massima causata dall'intaglio e la tensione nominale circostante:

$$K_t = \frac{\sigma_{locale}}{\sigma_n}$$

Questo fattore dipende dalla geometria del componente (tipo di variazione di forma, rapporti dimensionali, ecc.) e dal tipo di sollecitazione a cui tale componente viene sottoposto. Per uno stesso provino il fattore d'intaglio teorico a flessione sarà dunque diverso dal fattore d'intaglio teorico a trazione. Per le geometrie e sollecitazioni più comuni i valori di  $K_t$  si trovano tabulati.

Il fattore d'intaglio teorico *non dipende dal tipo di materiale*. Per tenere conto delle caratteristiche del materiale si introduce un altro parametro.

### 2.1.2 - Sensibilità all'intaglio

Materiali differenti si comportano in modo diverso in presenza di intagli. Per questo viene definito il parametro  $q$  detto *sensibilità all'intaglio* come:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}}$$

Si tratta della cosiddetta relazione di Neuber in cui  $r$  indica il raggio di raccordo dell'intaglio espresso in pollici e  $\sqrt{\rho}$  è una caratteristica del materiale che diminuisce all'aumentare della tensione di rottura (figura 2.1.2.a).

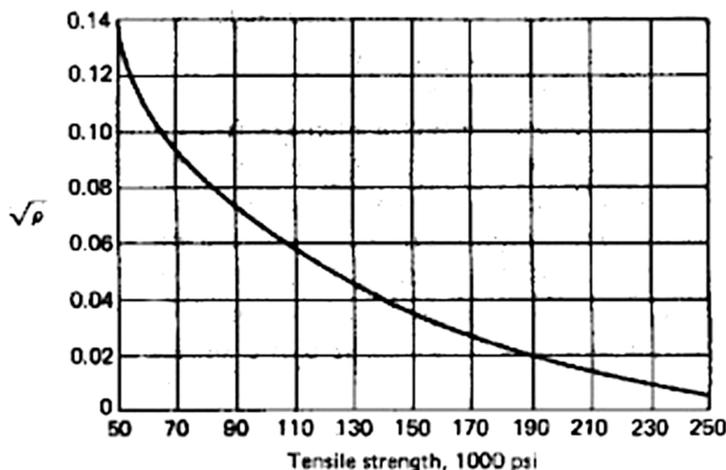


Fig. 2.1.2.a - Andamento di  $\sqrt{\rho}$  all'aumentare della tensione di rottura del materiale (acciai).

È immediato capire che all'aumentare della tensione di rottura (materiali più prestazionali) aumenta anche la sensibilità all'intaglio (figura 2.1.2.a). Si può infatti pensare che un materiale meno prestazionale sia ricco di per sé di difetti e che quindi risenta meno di un "ulteriore difetto" rappresentato appunto dall'intaglio. Il parametro  $q$  permette quindi di quantificare la "gravità" di un intaglio a seconda del materiale e di ridurre quindi l'influenza di  $K_t$  nel caso di materiali duttili o comunque poco prestazionali.

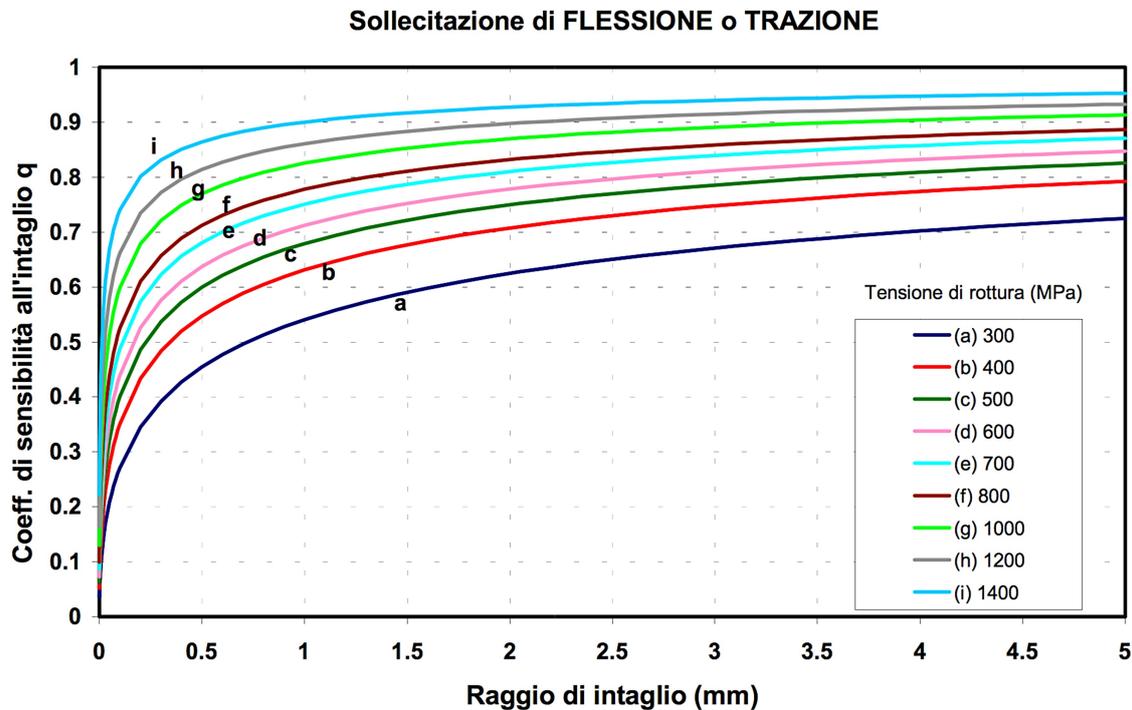


Fig 2.1.2.a - Valori di  $q$  in funzione di  $r$  e di  $\sigma_R$  per gli acciai.

### 2.1.3 - Coefficiente di concentrazione effettivo

Alla luce di quanto detto possiamo definire il *coefficiente di concentrazione effettivo a fatica delle tensioni* indicandolo con  $K_f$  e definendolo come il rapporto tra il limite di fatica del provino senza intaglio e quello del provino intagliato. Tale coefficiente può essere calcolato con la seguente relazione:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Si può così affermare che la variazione di resistenza a fatica dipende sia dalla geometria dell'intaglio e del componente, sia dalle caratteristiche del materiale.

## 2.1.4 - Finitura superficiale

Il grado di finitura superficiale ha una forte influenza sulla resistenza a fatica poiché le cricche si innescano spesso a partire dalla superficie esterna del componente. Le irregolarità superficiali (rugosità) costituiscono punti di concentrazione delle tensioni e quindi potenziali punti di innesco della cricca. Si intuisce facilmente che migliore è il grado di finitura superficiale migliore risulta la resistenza a fatica del componente. Esistono fattori correttivi per il calcolo della resistenza a fatica che tengono conto della rugosità superficiale. La tabella in figura 2.1.4.a illustra l'andamento di tale fattore in funzione della resistenza del materiale e del tipo di lavorazione (e quindi della rugosità).

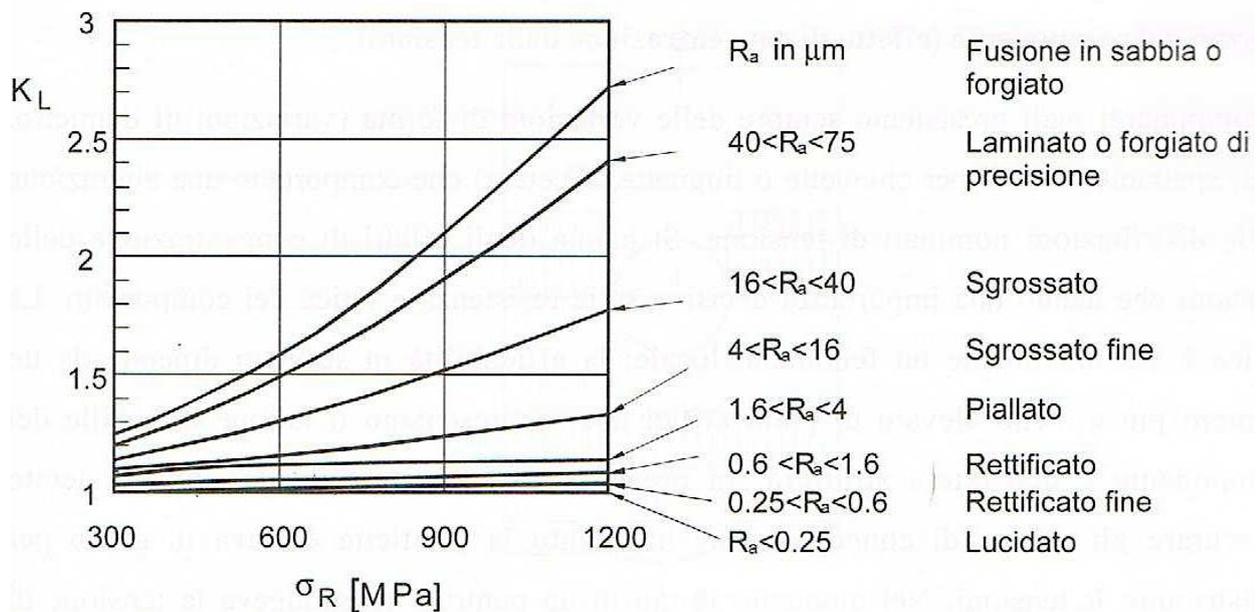


Fig 2.1.4.a - Andamento del coefficiente correttivo in funzione della resistenza del materiale e della finitura superficiale del componente.

## 2.2 - Microstruttura e dimensione dei grani

In generale, a parità di tensione di rottura, una struttura aciculare resiste peggio a fatica rispetto ad una struttura globulare poiché una forma tondeggianti delle particelle riduce le concentrazioni di tensione.

Per quanto riguarda invece la dimensione del grano cristallino, la sua influenza è piuttosto variabile e generalmente modesta. Si può comunque affermare che nei metalli non ferrosi e negli acciai ricotti, l'affinamento del grano aumenta il carico di rottura migliorando la resistenza a fatica.

## 2.3 - Trattamenti

Ciò che apporta un beneficio per la resistenza a fatica è la generazione di *tensioni residue di compressione* poiché queste tendono a “chiudere” le cricche che si innescano durante la sollecitazione ciclica.

### 2.3.1 - Incrudimento

L’incrudimento ha notevoli effetti sulle proprietà meccaniche dei materiali aumentandone la tensione di rottura e quella di snervamento, nonché la durezza, ma diminuendone le proprietà di duttilità e tenacità sia statica che dinamica. Inoltre, l’incrudimento induce un aumento del limite di rottura percentualmente inferiore all’incremento del limite di snervamento e induce una elevata difettosità in termini di microcricche in condizioni di deformazione elevata. Pertanto è fortemente sconsigliato avvalersi dell’incrudimento per elevare la resistenza a fatica di componenti metallici destinati ad un utilizzo dinamico.

### 2.3.2 - Trattamenti termici e termochimici

Trattamenti come la tempra, la cementazione e la nitrurazione producono un aumento della durezza superficiale del materiale e generano tensioni residue di compressione, quindi benefiche. Si può pertanto affermare che tali trattamenti migliorano il comportamento a fatica dei componenti ai quali vengono applicati.

### 2.3.3 - Trattamenti meccanici

I metodi più utilizzati nell’industria per introdurre degli stati di sforzo residui in compressione nei materiali sono la rullatura a freddo e la pallinatura; entrambe producono superficialmente delle deformazioni plastiche locali. L’effetto di tali trattamenti si sente in particolar modo ad elevato numero di cicli mentre per prove di fatica oligociclica il loro effetto è trascurabile.

### 2.3.4 - Rivestimenti

I rivestimenti metallici superficiali, in particolar modo se duri, generano tensioni residue di trazione e risultano pertanto peggiorare il comportamento a fatica del materiale rivestito. Nel momento in cui si innesca una cricca, la presenza del rivestimento tende ad accelerare i processi di propagazione e corrosione.

## 2.4 - Ambiente

I componenti meccanici si trovano spesso ad operare in situazioni ben diverse da quelle che caratterizzano una prova controllata di laboratorio. L'ambiente esterno può influenzare fortemente la vita a fatica di un componente alterandone le proprietà meccaniche. I fattori più comuni che possono variare alterando la resistenza di un materiale sono un ambiente corrosivo e la temperatura di esercizio.

### 2.4.1 - Corrosione

Un ambiente corrosivo costituisce un grosso problema per la vita a fatica poiché una superficie corrosa presenta una rugosità elevata e quindi una più elevata probabilità di innesco della cricca. Inoltre l'avanzare della cricca espone all'ambiente corrosivo nuovo materiale vergine che si ossiderà riproponendo il processo appena descritto. Si innesca un meccanismo autoesaltante che per alcuni materiali porta alla scomparsa del limite di fatica.

### 2.4.2 - Temperatura

Un'elevata temperatura tendenzialmente riduce la resistenza del materiale e quindi la sua vita a fatica, ma di questo fattore ne risentono soprattutto materiali plastici o polimerici.

## 2.5 - Frequenza

Dalle prove di laboratorio svolte risulta che la frequenza non incida sulla vita a fatica del componente a patto di non superare i 100 Hz. Ciò viene spiegato dal fatto che un aumento di frequenza causa un aumento di temperatura ma sottopone il materiale al carico per un tempo più breve e questi due fenomeni si compensano a vicenda. Superando invece il valore di 100 Hz, l'aumento di temperatura non viene più compensato e la resistenza a fatica peggiora. È dunque opportuno prevedere sistemi di raffreddamento per componenti soggetti a carichi ciclici ad elevata frequenza.

## 2.6 - Dimensioni

Le dimensioni del componente soggetto a carichi affaticanti sono un parametro fondamentale per il calcolo della sua resistenza a fatica a causa del cosiddetto effetto di scala. Banalmente dimensioni maggiori corrispondono ad un maggior numero di difetti. Se infatti si raddoppia la superficie raddoppiano in numero i difetti superficiali e quindi i punti di possibile innesco della cricca. Inoltre la buona costruzione di pezzi di grandi dimensioni risulta difficoltosa rispetto a quella di piccoli particolari.

Altro fenomeno che si verifica all'aumentare delle dimensioni è un calo del gradiente di tensioni. Si tratta di un fenomeno peggiorativo della resistenza a fatica in quanto sottopone un volume maggiore di materiale ad alta tensione rispetto ad una condizione a gradiente elevato e quindi aumenta una probabilità di innesco della cricca anche all'interno del pezzo.



### 3.1 - Svolgimento e metodi

I test sulla resistenza a fatica prevedono la sollecitazione ciclica di provini realizzati ad hoc sottoponendoli al carico desiderato fino al raggiungimento della rottura. Si registrano i dati della prova che sono costituiti dalla forza applicata (e quindi la relativa tensione generata nel materiale) e dal numero di cicli al quale il pezzo è sopravvissuto. Si ripetono varie prove allo stesso livello di carico in modo da ottenere un numero tale di risultati da permettere di decretarne un valore medio. Le prove di fatica soffrono infatti di una certa dispersione dei risultati che aumenta al diminuire del carico. Una volta effettuato un numero sufficiente di prove, si varia il carico ripetendo altrettante prove e così via. L'obiettivo è generalmente quello di costruire una curva di Wöhler per interpolazione di punti in modo da caratterizzare la tipologia di provino. Nel caso si voglia caratterizzare un materiale ci si deve attenere alla normativa per la costruzione dei provini.

Si tratta pertanto di prove che richiedono molto tempo specialmente se si vogliono ottenere dati piuttosto precisi circa il limite di fatica. Proprio per questo motivo è stato ideato il *metodo Staircase*. Tale procedura prevede l'impiego di una ventina di provini identici; si cerca di stabilire quale debba essere il numero di cicli corrispondente al limite di fatica (generalmente  $10^6$  cicli), si fissa il "passo", ovvero il  $\Delta\sigma$  di cui verrà variato il carico tra una prova e quella successiva, si stima quale possa essere la tensione corrispondente al limite di fatica e si assume tale valore come primo livello di carico. Se il provino sopravvive a tale livello di carico si svolge la prova successiva incrementando di un passo il valore della tensione. Se invece non dovesse sopravvivere, per la prova successiva la tensione verrà decrementata di un passo. Si raggiunge così una situazione piuttosto stabile attorno a due valori di tensione. Al termine della prova si procede al conteggio dei provini sopravvissuti e rotti ai corrispondenti livelli di carico. Con questi dati si effettua poi un calcolo statistico per decretare quale sia il valore della  $\sigma_{LF}$ . Essendo la fatica un fenomeno cumulativo, risulta importante cambiare provino ad ogni test poiché, anche se quest'ultimo non si è rotto, potrebbe comunque essere danneggiato e quindi non presentare la stessa resistenza di un provino vergine.

## 3.2 - Tipi di sollecitazione e macchinari per i test

Esistono diverse tipologie di macchinari che riproducono differenti tipi di sollecitazione sui provini. Di seguito sono riportate le più diffuse.

### 3.2.1 - Flessione rotante

Le prove di flessione rotante sono probabilmente le più comuni in quanto la macchina ed i relativi controlli sono piuttosto semplici ed economici. Si possono raggiungere frequenze elevate con costi contenuti. La macchina utilizzata per effettuare tali prove è la macchina di Moore (figura 3.2.1.a) che presenta lo schema di carico rappresentato in figura 3.2.1.b.



Fig. 3.2.1.a - *Macchina di R.R. Moore per prove di flessione rotante.*

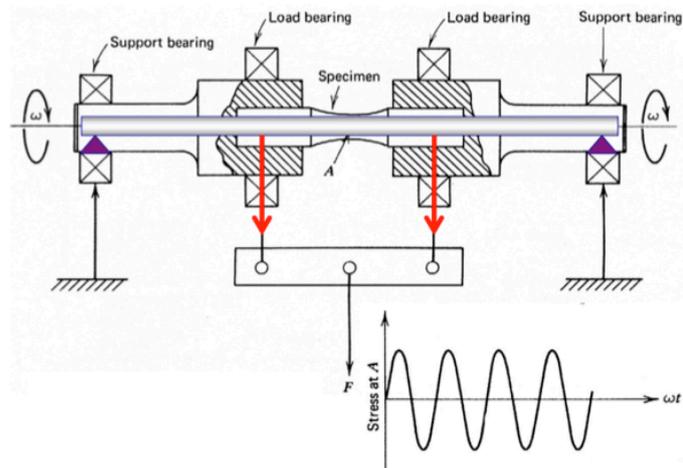


Fig. 3.2.1.b - *Schema di carico della macchina di Moore.*

La struttura di questa macchina, pur essendo semplice, consente di generare sul provino uno sforzo di flessione pura costante su tutta la sua lunghezza. Il carico viene “appeso” ai due cuscinetti centrali mentre le reazioni vincolari sono date dai due cuscinetti esterni.

Analizzando la disposizione dei vincoli e delle forze applicate si ricavano i diagrammi in figura 3.2.1.c

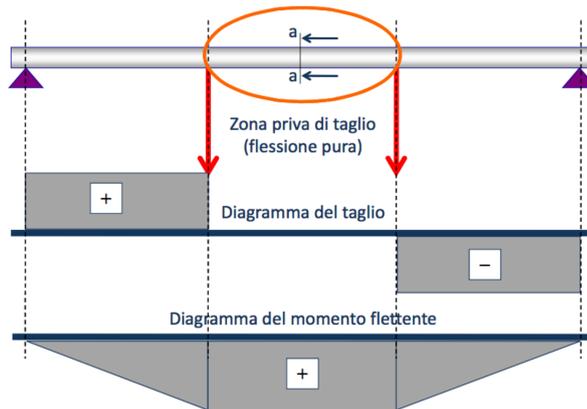


Fig. 3.2.1.c - *Diagrammi di taglio e momento flettente agenti su di un provino montato nella macchina di Moore.*

Al fine di innescare la cricca in un punto prestabilito si possono realizzare provini rastremati; in questo modo, essendo il momento costante, il danno si verificherà in corrispondenza della sezione minore.

### 3.2.2 - Flessione piana

Come la macchina di Moore, le macchine per prove di flessione piana risultano piuttosto economiche. I provini adottati sono a sezione rastremata in modo da ottenere valori di tensione costanti sulla lunghezza del pezzo. Il carico viene infatti applicato ciclicamente ad un'estremità del provino mentre l'altra è vincolata alla macchina. Nella figura 3.2.2.a è rappresentato lo schema di funzionamento di una macchina di questo genere con azionamento meccanico.

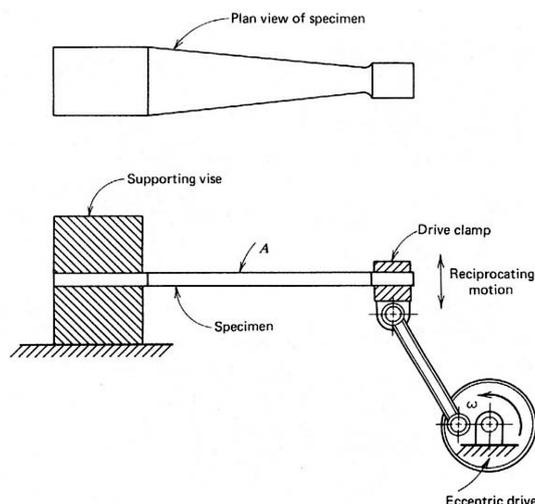


Fig 3.2.2.a - *Schema di funzionamento di una macchina per prove di fatica a flessione piana con azionamento meccanico.*

### 3.2.3 - Trazione-compressione

Le prove di fatica con carichi di trazione-compressione risultano più costose in quanto necessitano di macchine più complesse e precise. Di seguito sono descritte le tre tipologie più diffuse.

#### 3.2.3.1 - Macchina elettromeccanica

Si tratta di un macchinario con azionamenti elettrici (motori elettrici lineari) impiegato principalmente per prove di trazione. Occasionalmente può essere impiegata per prove di fatica con rapporto di carico positivo. Non è possibile effettuare prove con inversione del carico poiché si presenterebbero problemi legati alla presenza dei giochi e degli attriti di primo distacco in corrispondenza del punto morto. Ciò è dovuto al fatto che il moto viene trasmesso mediante un sistema vite-madrevite e ingranaggi.

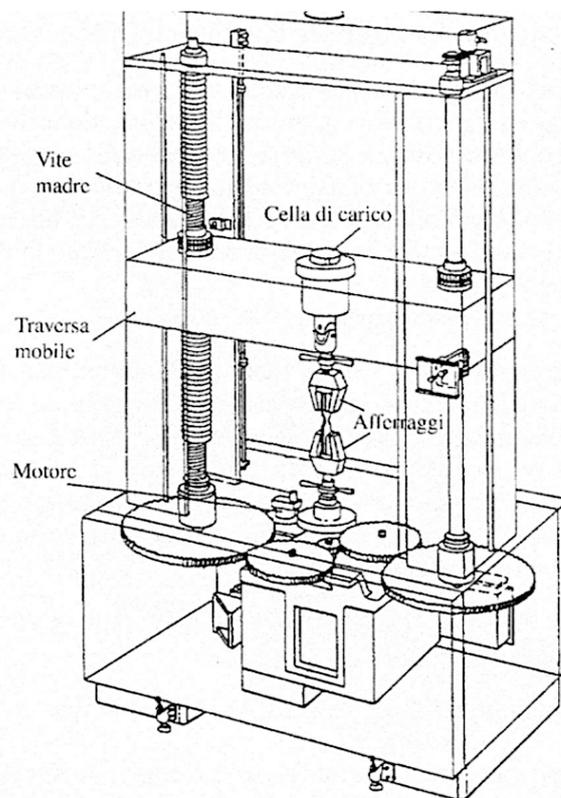


Fig. 3.2.3.1.a - *Schema costruttivo di una macchina elettromeccanica.*

### 3.2.3.2 - Macchina servoidraulica

Le macchine servoidrauliche, più costose di quelle precedentemente descritte, risultano idonee anche per lo svolgimento di prove di fatica con rapporti di carico negativi poiché il moto viene imposto da un meccanismo servoidraulico; i limiti prestazionali sono imposti dalla servovalvola e comunque non si va oltre frequenze di 50 Hz. Queste macchine necessitano di un impianto di refrigeramento per l'olio in quanto la sua temperatura operativa non deve mai superare i 43°C. Generalmente maggiore è il carico ciclico applicato, minore risulta la frequenza alla quale tale carico può essere imposto.

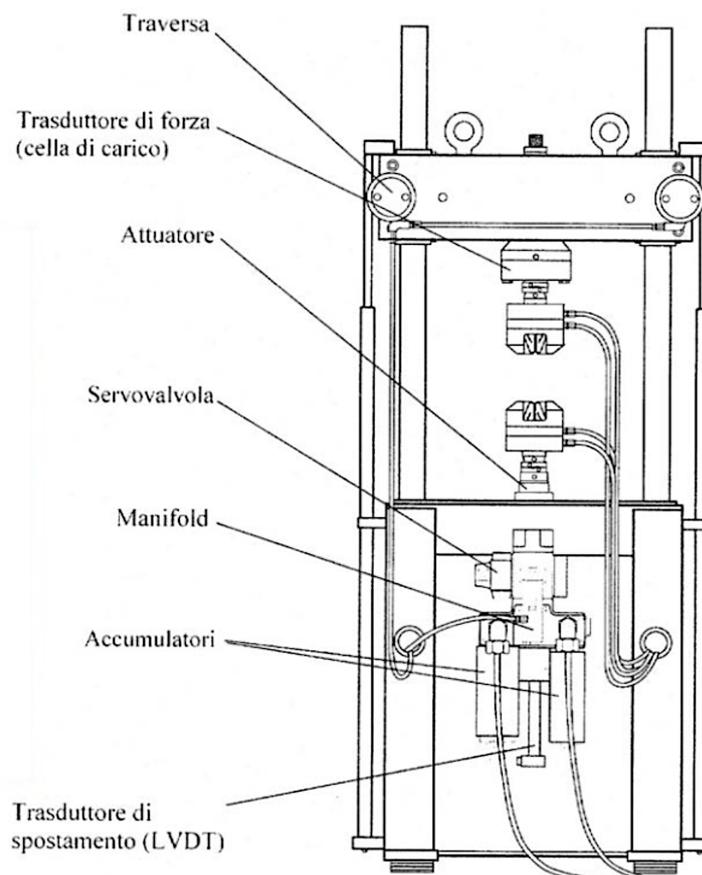


Fig. 3.2.3.2.a - *Schema costruttivo di una macchina servoidraulica.*

### 3.2.3.3 - Macchina risonante

Le frequenze d'esercizio di questi macchinari possono raggiungere l'ordine dei kHz (frequenze ultrasoniche). Essi sfruttano la frequenza di risonanza propria di un componente per generare sollecitazioni cicliche. La macchina consta di un sistema di eccitazione del provino ed il moto viene imposto da un elettromagnete. Quando si innesca la cricca la frequenza propria di risonanza del pezzo varia e la macchina si ferma poiché il sistema non risulta più equilibrato. Altro limite di queste macchine è che non riescono a mandare in risonanza provini realizzati con materiali duttili. Tuttavia i costi di gestione risultano contenuti poiché, una volta mandato in risonanza il provino, è necessaria poca energia per mantenere l'equilibrio raggiunto. Queste macchine vengono impiegate per test ad elevatissimo numero di cicli poiché riducono drasticamente i tempi della prova come si può vedere dai dati riportati nella tabella in figura 3.2.3.3.a.

Cicli di carico	Test convenzionale 100 Hz	Test ultrasonico 20KHz
$10^6$	≈ 2.8 ore	≈ 50 sec
$10^7$	≈ 28 ore	≈ 9 min
$10^8$	≈ 12 giorni	≈ 1.4 ore
$10^9$	≈ 120 giorni	≈ 14 ore
$10^{10}$	≈ 3.2 anni	≈ 6 giorni

Fig. 3.2.3.3.a - Confronto tra i tempi necessari per sottoporre un provino allo stesso numero di cicli con macchina convenzionale e con macchina risonante.

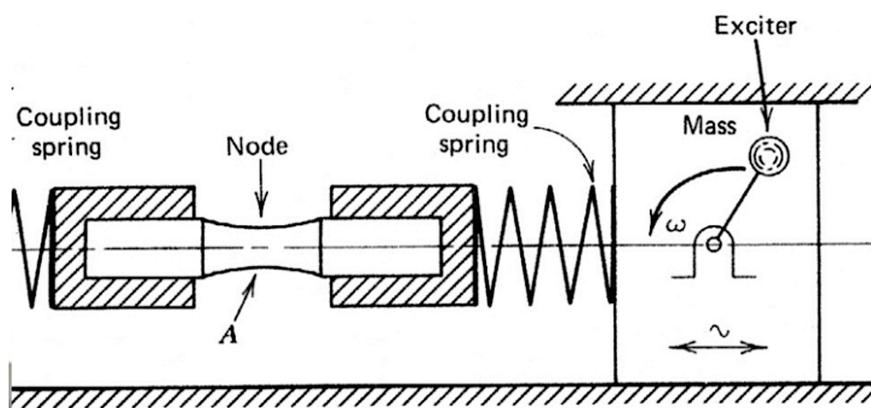


Fig. 3.2.3.3.b - Principio di funzionamento di una macchina risonante.

## 4.1 - Propositi

Il caso di studio in questione tratta di una problematica di interesse aziendale riguardante i benefici apportati da una lavorazione con macchina EDM rispetto ad una convenzionale asportazione di truciolo mediante fresa. In particolare ci si è concentrati sulla realizzazione di una gola di  $45^\circ \pm 1^\circ$  con raggio di raccordo pari a  $0,25 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ . Questa geometria costituisce volutamente il punto critico dei provini poiché rappresenta una difficoltà costruttiva e allo stesso tempo una zona di concentrazione delle tensioni. Il proposito di questa indagine di laboratorio è quello di decretare se una lavorazione possa conferire una migliore resistenza a fatica rispetto all'altra.

## 4.2 - I provini

La natura non convenzionale di questa prova ha portato alla realizzazione di provini dalla forma particolare. In figura 4.2.a è riportata l'assonometria di un provino per dare l'idea delle sue sembianze.

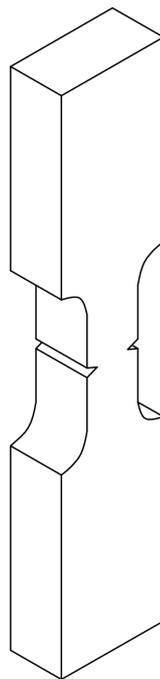


Fig. 4.2.a - Assonometria isometrica dei provini  
impiegato per il test.

### 4.2.1 - La geometria

Le decisioni riguardanti la geometria non convenzionale dei provini sono state prese in accordo con il relatore dell'elaborato, con il tecnico del laboratorio e con l'azienda che li ha realizzati e per la quale sono state svolte le prove.

L'azienda ha espresso interesse verso provini di forma squadrata per poter riprodurre una specifica forma dell'intaglio. Provini cilindrici sono stati esclusi poiché l'intaglio doveva avere un andamento rettilineo e non circolare. Le dimensioni sono state calcolate, conoscendo la massima forza applicabile  $F_{max}$  dalla macchina impiegata per i test, in modo da ottenere una sezione resistente,  $A$ , tale da generare delle tensioni all'interno del range di interesse. Non è stato considerato, ai fini del calcolo di dimensionamento, il fattore di concentrazione delle tensioni causato dalla presenza dell'intaglio per conservare un certo margine di sicurezza. Di seguito viene riportato il semplice calcolo di dimensionamento della sezione resistente  $A$ :

$$\begin{aligned} F_{max} &= 60 \text{ kN} \\ \sigma_R &\approx 1000 \text{ MPa} \\ A &= \frac{F_{max}}{\sigma_R} = \frac{60\,000}{1000} = 60 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Conoscendo la geometria dell'intaglio, una V di 45° profonda 2 mm, si ricavano le dimensioni del tratto operativo del provino, ovvero il tratto in cui si ha uno stato tensionale piano.

L'ultimo dimensionamento riguarda invece gli afferraggi; la macchina a disposizione per le prove ha degli afferraggi di tipo meccanico ad attrito radente che necessitano di una certa superficie di contatto per trasmettere correttamente il carico. Le estremità dei provini presentano pertanto una forma atta a massimizzare la superficie di contatto con gli afferraggi. Ne risulta così la tipica forma "ad osso di cane".

Di seguito viene riportato il disegno tecnico del provino consegnato all'azienda (figura 4.2.1.a):

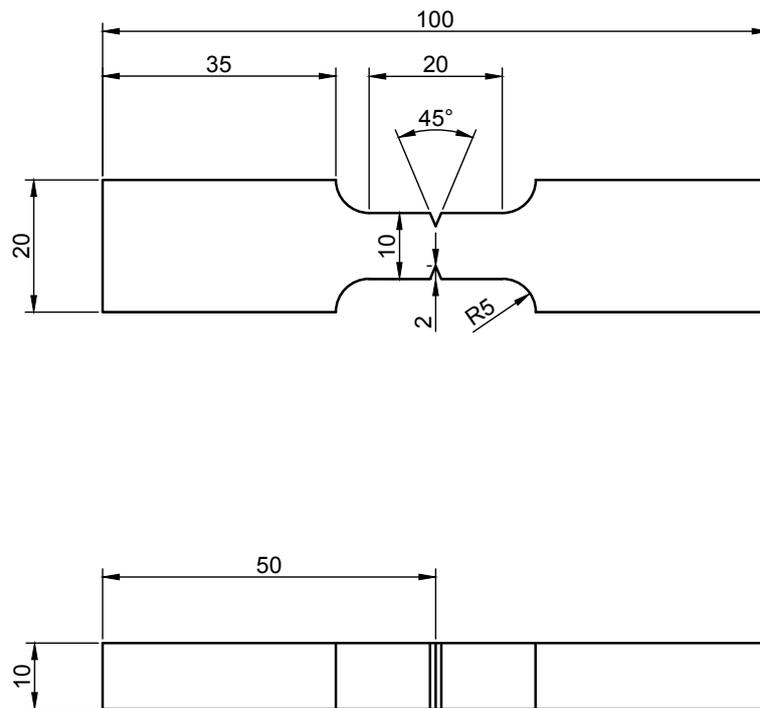


Fig. 4.2.1.a - *Disegno tecnico del provino impiegato per i test di fatica.*

Nel disegno non sono indicati smussi, tolleranze dimensionali, rugosità e raggio di raccordo in fondo alla gola poiché questi parametri sono stati concordati a voce con l'azienda in base alle sue esigenze.



Fig. 4.2.1.b - *Provino in acciaio realizzato a fresa impiegato per le prove.*

## 4.2.2 - I materiali

Al fine di estendere i risultati di questa prova e per capire se un materiale può essere più sensibile ad un tipo di lavorazione rispetto ad un altro, si è scelto di confrontare le due lavorazioni su due diversi tipi di materiale: un acciaio inossidabile (X30Cr13 bonificato) ed un titanio (Ti6Al4V).

Le tensioni di rottura misurate dall'azienda corrispondono a 865 MPa per l'acciaio ed a 1030 MPa per il titanio. Questi parametri sono stati impiegati per il calcolo preliminare delle tensioni da applicare durante la prova.

## 4.2.3 - Calcolo del fattore $K_f$

Conoscendo la geometria del provino e le caratteristiche del materiale con cui è realizzato, è possibile calcolare il fattore di concentrazione a fatica delle tensioni.

La verifica della geometria dell'intaglio è stata fatta con l'ausilio di un microscopio ottico e di un opportuno programma dedicato. Tale programma permette di disegnare sull'immagine acquisita al microscopio forme geometriche di dimensioni controllate con precisione. In questo modo è possibile ottenere una misurazione accurata della forma fotografata.

Le misure dichiarate dall'azienda sono risultate molto attendibili come si può apprezzare in figura 4.2.3.a

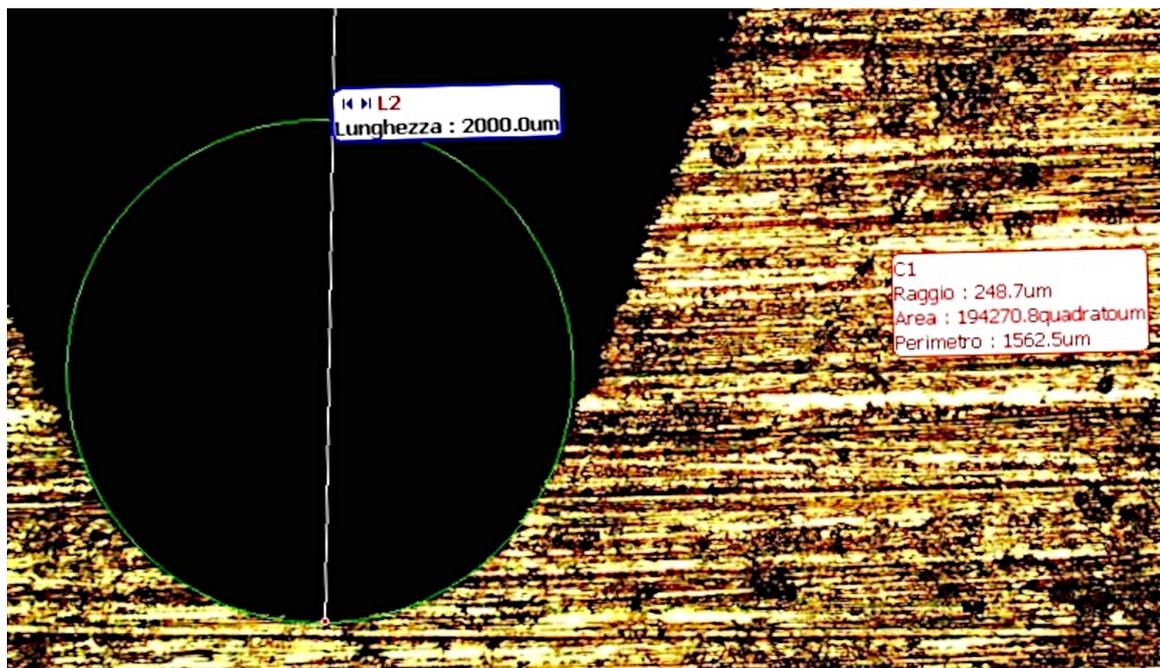


Fig. 4.2.3.a - Misurazione della geometria dell'intaglio (raggio di raccordo in rosso e profondità in nero, misure in  $\mu\text{m}$ ).

Nella figura 4.2.3.a è possibile apprezzare la circonferenza disegnata sull'immagine del profilo del raggio di raccordo. Dimensionandola in modo da renderla perfettamente tangente al raccordo si ottiene la misura precisa del raggio che in questo caso risulta pari a 248,7  $\mu\text{m}$  corrispondenti a 0.249 mm. Stessa cosa è stata fatta per misurare la profondità della gola la cui misura, pari a 2000  $\mu\text{m}$ , è riportata nell'etichetta blu in figura 4.2.32.a. In questo caso invece di una circonferenza sono stati tracciati dei segmenti opportunamente disposti.

In un primo momento è necessario calcolare il fattore di concentrazione teorico che, come detto, è un coefficiente puramente geometrico e non tiene conto del tipo di materiale. Per il calcolo di tale fattore sono state utilizzate formule empiriche riportate nelle tabelle in figura 4.2.3.b e in figura 4.2.3.c.

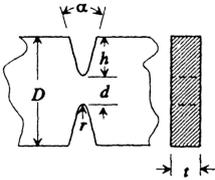
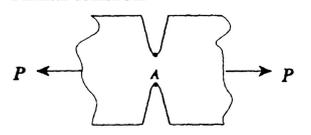
TABLE 6-1 (continued) STRESS CONCENTRATION FACTORS: Notches and Grooves																		
<p>5. Opposite single V-shaped notches in finite-width plate</p> 	<p>Axial tension</p> 	$\sigma_{\max} = \sigma_A = K_t \sigma_{\text{nom}}, \quad \sigma_{\text{nom}} = P/td$ <p>For <math>2h/D = 0.398</math> and <math>\alpha &lt; 90^\circ</math>,  <math>2h/D = 0.667</math> and <math>\alpha &lt; 60^\circ</math>:</p> $K_t = K_{tu}$ <p><math>K_{tu}</math> is the stress concentration factor for U-shaped notch and <math>\alpha</math> is notch angle in degrees. Otherwise,  <math>K_t = C_1 + C_2\sqrt{K_{tu}} + C_3K_{tu}</math>.</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th></th> <th><math>2h/D = 0.398, 90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 3.5</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_1</math></td> <td><math>5.294 - 0.1225\alpha + 0.000523\alpha^2</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_2</math></td> <td><math>-5.0002 + 0.1171\alpha - 0.000434\alpha^2</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_3</math></td> <td><math>1.423 - 0.01197\alpha - 0.000004\alpha^2</math></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th></th> <th><math>2h/D = 0.667, 60^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 2.8</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_1</math></td> <td><math>-10.01 + 0.1534\alpha - 0.000647\alpha^2</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_2</math></td> <td><math>13.60 - 0.2140\alpha + 0.000973\alpha^2</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_3</math></td> <td><math>-3.781 + 0.07873\alpha - 0.000392\alpha^2</math></td> </tr> </tbody> </table>		$2h/D = 0.398, 90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 3.5$	$C_1$	$5.294 - 0.1225\alpha + 0.000523\alpha^2$	$C_2$	$-5.0002 + 0.1171\alpha - 0.000434\alpha^2$	$C_3$	$1.423 - 0.01197\alpha - 0.000004\alpha^2$		$2h/D = 0.667, 60^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 2.8$	$C_1$	$-10.01 + 0.1534\alpha - 0.000647\alpha^2$	$C_2$	$13.60 - 0.2140\alpha + 0.000973\alpha^2$	$C_3$	$-3.781 + 0.07873\alpha - 0.000392\alpha^2$
	$2h/D = 0.398, 90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 3.5$																	
$C_1$	$5.294 - 0.1225\alpha + 0.000523\alpha^2$																	
$C_2$	$-5.0002 + 0.1171\alpha - 0.000434\alpha^2$																	
$C_3$	$1.423 - 0.01197\alpha - 0.000004\alpha^2$																	
	$2h/D = 0.667, 60^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ, 1.6 \leq K_{tu} \leq 2.8$																	
$C_1$	$-10.01 + 0.1534\alpha - 0.000647\alpha^2$																	
$C_2$	$13.60 - 0.2140\alpha + 0.000973\alpha^2$																	
$C_3$	$-3.781 + 0.07873\alpha - 0.000392\alpha^2$																	

Fig. 4.2.3.b - Calcolo del fattore di concentrazione delle tensioni per una barra di sezione rettangolare con doppio intaglio a V.

I parametri geometrici del nostro intaglio secondo il criterio utilizzato dalla tabella risulta essere:

$$\frac{2h}{D} = \frac{2 \cdot 2}{10} = 0,4$$

$$\alpha = 45^\circ$$

Come suggeriscono le condizioni evidenziate in rosso nella tabella in figura 4.2.3.b, si ricade nel caso di intaglio ad U ( $K_t=K_w$ ). Ciò significa che la concentrazione di tensione dovuta al nostro intaglio sagomato a V è la stessa data da un intaglio ad U.

Di seguito, in figura 4.2.3.c, è riportata la tabella per il calcolo del fattore d'intaglio teorico relativa all'intaglio ad U:

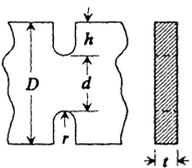
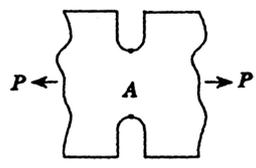
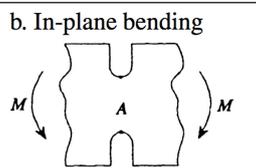
<p>2. Opposite single U-shaped notches in finite-width plate</p> 	<p>a. Axial tension</p> 	$\sigma_{max} = \sigma_A = K_t \sigma_{nom}, \quad \sigma_{nom} = P/t d$ $K_t = C_1 + C_2 \frac{2h}{D} + C_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + C_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th><math>0.1 \leq h/r &lt; 2.0</math></th> <th><math>2.0 \leq h/r \leq 50.0</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_1</math></td> <td><math>0.955 + 2.169\sqrt{h/r} - 0.081h/r</math></td> <td><math>1.037 + 1.991\sqrt{h/r} + 0.002h/r</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_2</math></td> <td><math>-1.557 - 4.046\sqrt{h/r} + 1.032h/r</math></td> <td><math>-1.886 - 2.181\sqrt{h/r} - 0.048h/r</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_3</math></td> <td><math>4.013 + 0.424\sqrt{h/r} - 0.748h/r</math></td> <td><math>0.649 + 1.086\sqrt{h/r} + 0.142h/r</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_4</math></td> <td><math>-2.461 + 1.538\sqrt{h/r} - 0.236h/r</math></td> <td><math>1.218 - 0.922\sqrt{h/r} - 0.086h/r</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>for semicircular notch (<math>h/r = 1.0</math>)  <math>K_t = 3.065 - 3.472 \left(\frac{2h}{D}\right) + 1.009 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + 0.405 \left(\frac{2h}{D}\right)^3</math></p>		$0.1 \leq h/r < 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$	$C_1$	$0.955 + 2.169\sqrt{h/r} - 0.081h/r$	$1.037 + 1.991\sqrt{h/r} + 0.002h/r$	$C_2$	$-1.557 - 4.046\sqrt{h/r} + 1.032h/r$	$-1.886 - 2.181\sqrt{h/r} - 0.048h/r$	$C_3$	$4.013 + 0.424\sqrt{h/r} - 0.748h/r$	$0.649 + 1.086\sqrt{h/r} + 0.142h/r$	$C_4$	$-2.461 + 1.538\sqrt{h/r} - 0.236h/r$	$1.218 - 0.922\sqrt{h/r} - 0.086h/r$
		$0.1 \leq h/r < 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$														
$C_1$	$0.955 + 2.169\sqrt{h/r} - 0.081h/r$	$1.037 + 1.991\sqrt{h/r} + 0.002h/r$															
$C_2$	$-1.557 - 4.046\sqrt{h/r} + 1.032h/r$	$-1.886 - 2.181\sqrt{h/r} - 0.048h/r$															
$C_3$	$4.013 + 0.424\sqrt{h/r} - 0.748h/r$	$0.649 + 1.086\sqrt{h/r} + 0.142h/r$															
$C_4$	$-2.461 + 1.538\sqrt{h/r} - 0.236h/r$	$1.218 - 0.922\sqrt{h/r} - 0.086h/r$															
<p>b. In-plane bending</p> 	$\sigma_{max} = \sigma_A = K_t \sigma_{nom}, \quad \sigma_{nom} = 6M/d^2 t$ $K_t = C_1 + C_2 \frac{2h}{D} + C_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + C_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th><math>0.1 \leq h/r &lt; 2.0</math></th> <th><math>2.0 \leq h/r \leq 50.0</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_1</math></td> <td><math>1.024 + 2.092\sqrt{h/r} - 0.051h/r</math></td> <td><math>1.113 + 1.957\sqrt{h/r}</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_2</math></td> <td><math>-0.630 - 7.194\sqrt{h/r} + 1.288h/r</math></td> <td><math>-2.579 - 4.017\sqrt{h/r} - 0.013h/r</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_3</math></td> <td><math>2.117 + 8.574\sqrt{h/r} - 2.160h/r</math></td> <td><math>4.100 + 3.922\sqrt{h/r} + 0.083h/r</math></td> </tr> <tr> <td><math>C_4</math></td> <td><math>-1.420 - 3.494\sqrt{h/r} + 0.932h/r</math></td> <td><math>-1.528 - 1.893\sqrt{h/r} - 0.066h/r</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>for semicircular notch (<math>h/r = 1.0</math>)  <math>K_t = 3.065 - 6.637 \left(\frac{2h}{D}\right) + 8.229 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 3.636 \left(\frac{2h}{D}\right)^3</math></p>		$0.1 \leq h/r < 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$	$C_1$	$1.024 + 2.092\sqrt{h/r} - 0.051h/r$	$1.113 + 1.957\sqrt{h/r}$	$C_2$	$-0.630 - 7.194\sqrt{h/r} + 1.288h/r$	$-2.579 - 4.017\sqrt{h/r} - 0.013h/r$	$C_3$	$2.117 + 8.574\sqrt{h/r} - 2.160h/r$	$4.100 + 3.922\sqrt{h/r} + 0.083h/r$	$C_4$	$-1.420 - 3.494\sqrt{h/r} + 0.932h/r$	$-1.528 - 1.893\sqrt{h/r} - 0.066h/r$	
	$0.1 \leq h/r < 2.0$	$2.0 \leq h/r \leq 50.0$															
$C_1$	$1.024 + 2.092\sqrt{h/r} - 0.051h/r$	$1.113 + 1.957\sqrt{h/r}$															
$C_2$	$-0.630 - 7.194\sqrt{h/r} + 1.288h/r$	$-2.579 - 4.017\sqrt{h/r} - 0.013h/r$															
$C_3$	$2.117 + 8.574\sqrt{h/r} - 2.160h/r$	$4.100 + 3.922\sqrt{h/r} + 0.083h/r$															
$C_4$	$-1.420 - 3.494\sqrt{h/r} + 0.932h/r$	$-1.528 - 1.893\sqrt{h/r} - 0.066h/r$															

Fig. 4.2.3.c - Calcolo del fattore di concentrazione delle tensioni per una barra di sezione rettangolare con doppio intaglio ad U.

I parametri  $h, r, D, d$  sul nostro provino misurano rispettivamente 2mm, 0,25mm, 10mm e 6mm.

Si procede ricavando il parametro  $h/r$  richiesto dalla tabella necessario ad individuare la colonna di formule da seguire, che risulta pari a

$$\frac{h}{r} = \frac{2}{0,25} = 8$$

In seguito, inserendo il valore appena calcolato nelle relazioni sotto riportate, si ricavano i parametri  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  necessari per il calcolo di  $K_t$ :

$$C_1 = 1,037 + 1,991 \sqrt{\frac{h}{r}} + 0,002 \frac{h}{r} = 6,6844$$

$$C_2 = -1,886 - 2,181 \sqrt{\frac{h}{r}} - 0,048 \frac{h}{r} = -8,4388$$

$$C_3 = 0,649 + 1,086 \sqrt{\frac{h}{r}} + 0,142 \frac{h}{r} = 4,8567$$

$$C_4 = 1,218 - 0,922 \sqrt{\frac{h}{r}} - 0,086 \frac{h}{r} = -2,0778$$

La relazione empirica fornita dalla tabella per il calcolo di  $K_t$  è:

$$K_t = C_1 + C_2 \frac{2h}{D} + C_3 \left(\frac{2h}{D}\right)^2 + C_4 \left(\frac{2h}{D}\right)^3 = 3,953$$

Un valore di  $K_t$  pari a 3,953 in linea teorica significa che, se il provino è soggetto ad uno sforzo di trazione, in prossimità del fondo dell'intaglio il valore della tensione è quasi 4 volte superiore al valore nominale. Il valore nominale è quello che si avrebbe su un provino non intagliato.

Come spiegato nel capitolo 2 la sensibilità all'intaglio varia a seconda del materiale con cui viene realizzato il componente. Per tenere conto di questo fenomeno si ricorre ad un parametro detto appunto *sensibilità all'intaglio* che si può calcolare con la relazione di Neuber riportata di seguito:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}}$$

dove  $r$  indica il raggio di raccordo in fondo alla gola espresso in pollici, pari a 0,00984 e  $\sqrt{\rho}$  è un parametro caratteristico del materiale che, per l'acciaio, è ricavabile dal grafico riportato in figura 4.2.3.d:

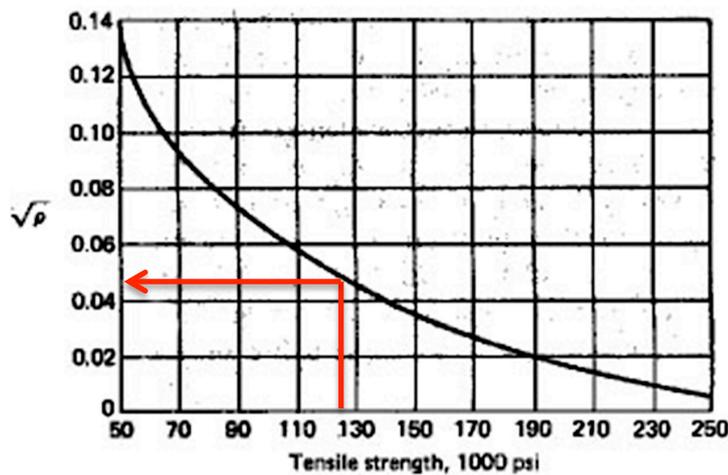


Fig 4.2.3.d - Andamento di  $\sqrt{\rho}$  in funzione della tensione di rottura per gli acciai.

Il grafico riporta i valori della tensione di rottura espressi in kpsi (migliaia di libbre su pollice quadrato). Per effettuare la conversione da MPa a kpsi è sufficiente moltiplicare per 0,1450377.

$$\sigma_{R \text{ acciaio}} = 865 \text{ MPa} = 865 \cdot 0,1450377 \text{ kpsi} = 125,5 \text{ kpsi}$$

Dal grafico in figura 4.2.3.d, come indicato dalla freccia rossa, si ricava il valore di  $\sqrt{\rho}$  che risulta pari a 0,045. Sostituendo tale valore nella relazione di Neuber per il calcolo della sensibilità all'intaglio si ottiene:

$$q_{\text{acciaio}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho}{r}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,045}{\sqrt{0,00984}}} = 0,69$$

Per quanto riguarda la sensibilità all'intaglio della lega di titanio Ti6Al4V, il valore di  $q$  è stato ricavato dal grafico riportato in figura 4.2.3.e:

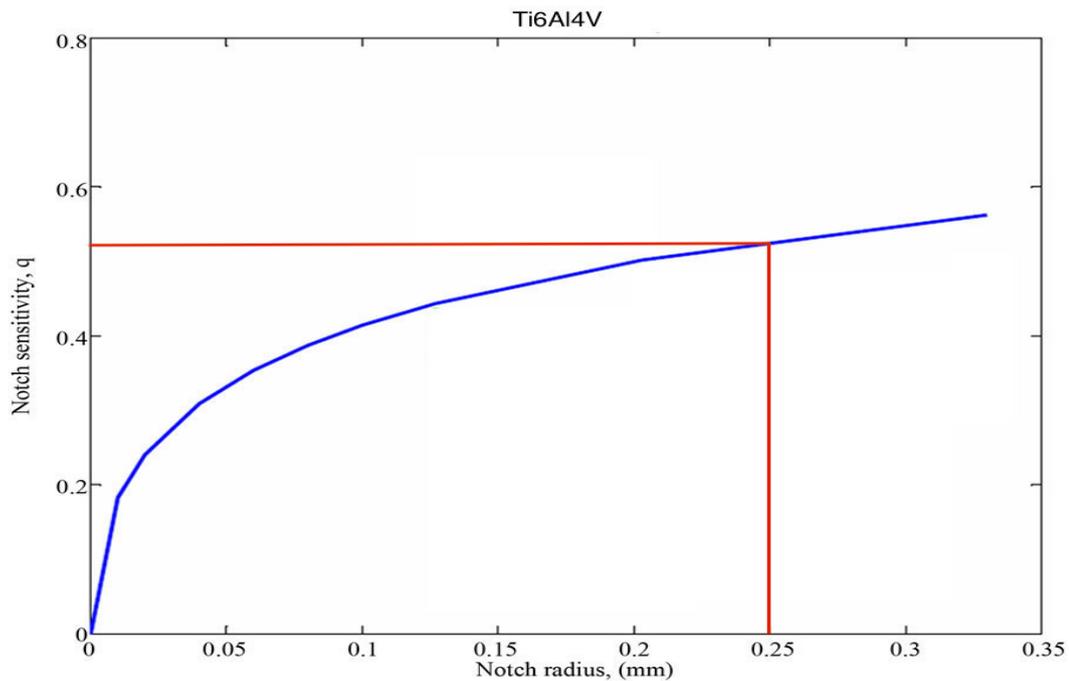


Fig. 4.2.3.e - Sensibilità all'intaglio per la lega di titanio Ti6Al4V.

Dal grafico si ricava il valore di  $q$  per il caso in esame (raggio di raccordo pari a 0,25 mm) che risulta pari a 0,53.

A questo punto è possibile ricavare il fattore di concentrazione a fatica delle tensioni sfruttando la relazione illustrata nel Paragrafo 2.1.3. Per quanto riguarda i provini in acciaio risulta:

$$K_{f,acciaio} = 1 + q_{acciaio}(K_t - 1) = 1 + 0,69(3,953 - 1) = 3,04$$

Per quanto riguarda invece il titanio, risulta:

$$K_{f,titanio} = 1 + q_{titanio}(K_t - 1) = 1 + 0,53(3,953 - 1) = 2,57$$

In linea puramente teorica il limite di fatica dei due materiali si può stimare conoscendo la tensione di rottura ed il fattore di concentrazione a fatica  $K_f$  ma in seguito vedremo come la resistenza a fatica possa essere facilmente influenzata variando il tipo di lavorazione impiegato per realizzare i provini.

#### 4.2.4 - Lavorazioni e rugosità

L'elettroerosione e l'asportazione di truciolo sono due tipologie di lavorazione concettualmente differenti. La prima asporta materiale innalzando localmente la sua temperatura fino al punto di fusione (talvolta di vaporizzazione) grazie ad una scarica di corrente elettrica mentre la seconda "taglia" il materiale mediante un utensile. Trattandosi di tecnologie diverse, anche le caratteristiche che si ottengono sui pezzi differiscono. La prima sostanziale differenza è rappresentata dall'alterazione termica che il processo di elettroerosione genera nello strato superficiale del componente lavorato. Lo strato superficiale di materiale presenta pertanto caratteristiche meccaniche differenti dal nucleo, zona in cui il materiale risulta "vergine" (figura 4.2.4.a). Parte del materiale fuso si deposita infatti sulla superficie generando uno strato duro (struttura martensitica) caratterizzato da tensioni residue di trazione. Lo spessore di tale strato varia a seconda del materiale lavorato pertanto ci si aspetta una sensibilità diversa alla lavorazione a seconda del materiale impiegato.

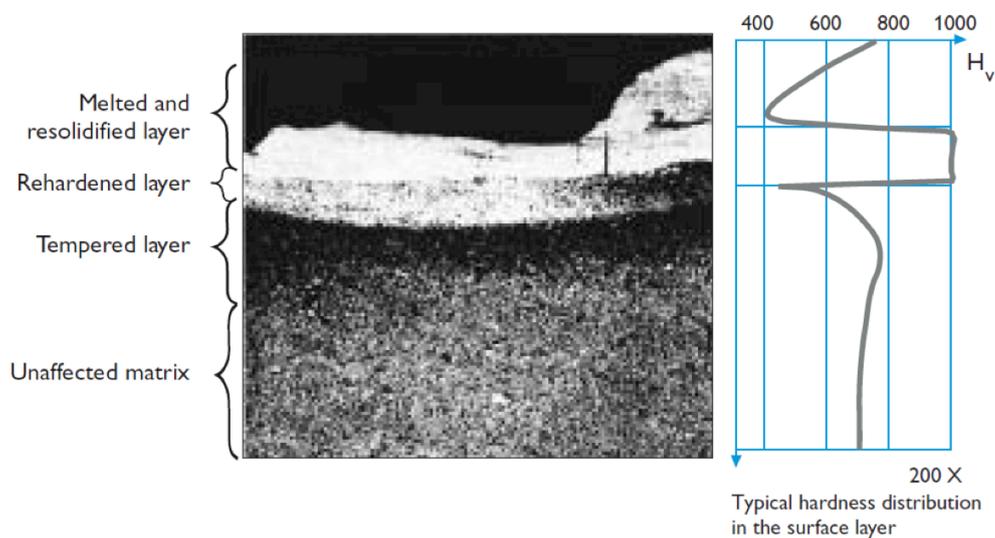


Fig. 4.2.4.a - Sezione di una superficie elettroerosa e relativo andamento della durezza all'aumentare della profondità.

Questo strato presenta spesso difetti diffusi quali microcricche di qualche  $\mu\text{m}$ . Nella fotografia al microscopio elettronico riportata sotto (figura 4.2.4.b) sono visibili difetti superficiali causati da una lavorazione EDM e nella sezione è evidenziata una microcricca profonda circa  $20\ \mu\text{m}$ .

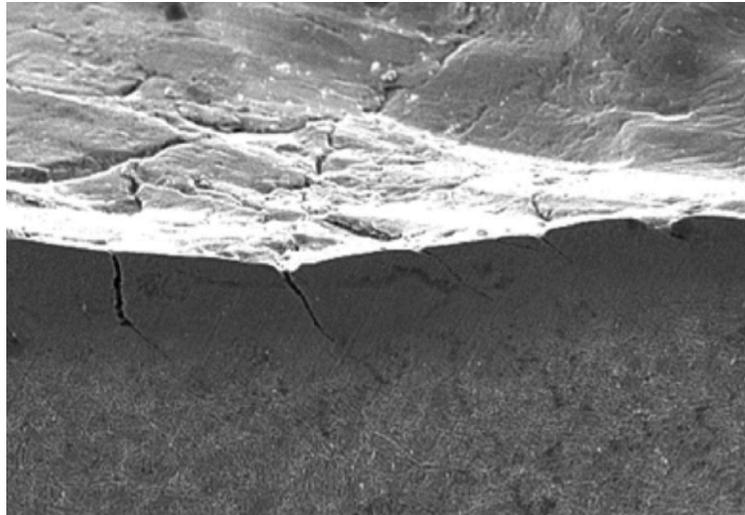
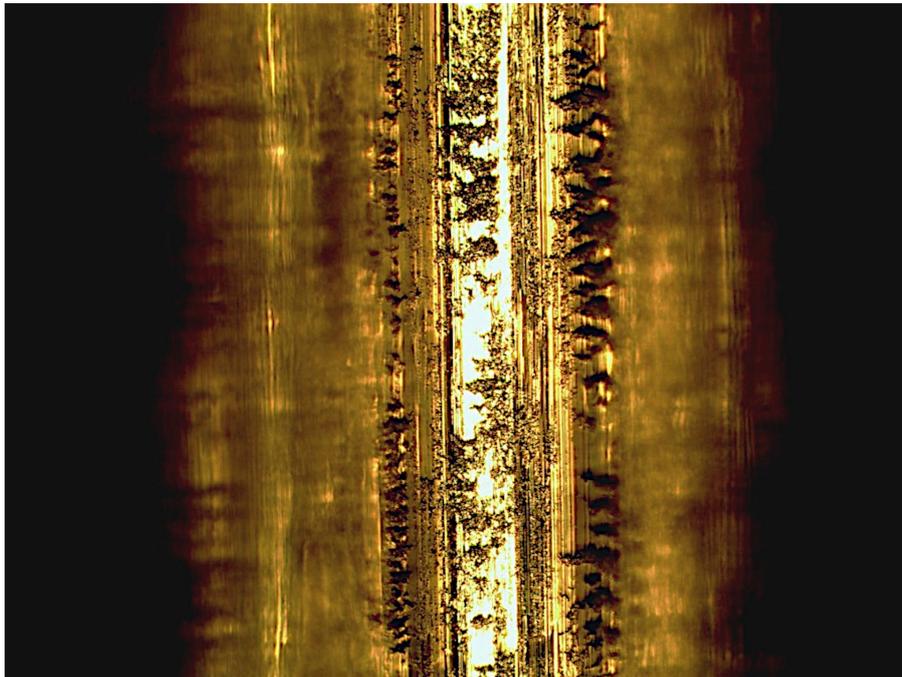


Fig. 4.2.4.b - Difetti superficiali dovuti all'alterazione termica di una lavorazione EDM.

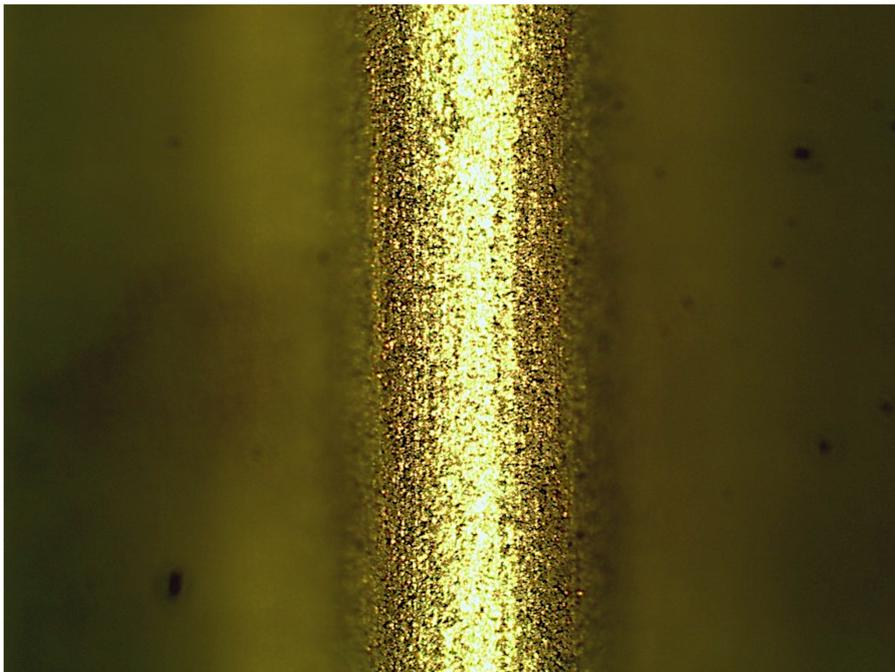
Questa peculiarità è assente nei pezzi realizzati per asportazione di truciolo poiché, sebbene l'attrito causato dall'utensile generi calore, questo viene dissipato in modo efficiente mediante un liquido refrigerante. Inoltre l'asportazione di truciolo è una lavorazione che plasticizza superficialmente il materiale incrudendolo e inducendo tensioni residue di compressione che migliorano localmente le proprietà meccaniche.

La zona termicamente alterata rappresenta dunque un punto a sfavore della tecnologia EDM in particolar modo se vengono lavorati materiali che hanno subito trattamenti termici. D'altro canto però la rugosità superficiale che si ottiene con una lavorazione EDM risulta anisotropa ed estremamente regolare anche nei punti più angusti. Nel nostro caso infatti il punto critico per le lavorazioni è rappresentato dal raggio di raccordo in fondo all'intaglio. In questo punto la rugosità superficiale ottenuta per asportazione di truciolo risulta *anisotropa*, in particolare risulta maggiore in direzione longitudinale e il valore massimo si attesta attorno a  $R_a = 0,3$ . Ciò è dovuto al fatto che l'utensile presenta una direzione di avanzamento e di taglio, caratteristica assente nella tecnologia EDM. Una rugosità longitudinale elevata nel nostro caso costituisce un punto debole per la resistenza a fatica poiché facilita la nucleazione della cricca. La superficie generata da una lavorazione EDM risulta invece isotropa; la rugosità ottenuta, pari a  $0,3$ , è infatti estremamente costante su tutta la superficie ed in tutte le direzioni.

Nelle immagini sotto riportate si può apprezzare la differente morfologia delle superfici ottenute sul raggio di raccordo dell'intaglio con la lavorazione per asportazione di truciolo (figura 4.2.4.c) e con lavorazione EDM (figura 4.2.4.d) sui provini in acciaio.



*Fig.4.2.4.c - Provino in acciaio: superficie sul fondo dell'intaglio ottenuto per asportazione di truciolo fotografata al microscopio.*



*Fig. 4.2.4.d - Provino in acciaio: superficie sul fondo dell'intaglio ottenuto per elettroerosione fotografata al microscopio.*

Le rugosità misurate dall'azienda risultano le medesime nei due casi. Per la lavorazione per asportazione di truciolo si è fatto riferimento alla rugosità in direzione longitudinale poiché è quella che influenza la resistenza a fatica per il tipo di test svolto. Si può apprezzare come la disposizione delle gole dovute alla rettifica generi una successione di potenziali inneschi di cricca tutti paralleli tra loro. La direzione di questi microintagli risulta inoltre ortogonale alla direzione di applicazione del carico sollecitante dunque essi generano una concentrazione di tensione nelle loro estremità inferiori. Sono inoltre presenti zone in cui la superficie risulta particolarmente irregolare; si tratta di punti in cui è stato asportato materiale dalla prima lavorazione grossolana effettuata. La successiva rettifica non è poi andata abbastanza in profondità per omogeneizzare tali avvallamenti. Anche queste irregolarità costituiscono potenziali punti di innesco della cricca.

La superficie ottenuta per elettroerosione presenta invece picchi ed avvallamenti disordinati che, nell'insieme, creano una struttura isotropa non sensibile alla direzione di applicazione del carico.

Gli intagli ottenuti per asportazione di truciolo presentano inoltre un'asimmetria delle estremità dipendente dalla direzione di taglio dell'utensile che lascia delle bave nel punto in cui abbandona il pezzo. Nelle figure sottostanti sono riportati i profili dello stesso intaglio di un provino in acciaio ottenuto per asportazione di truciolo.

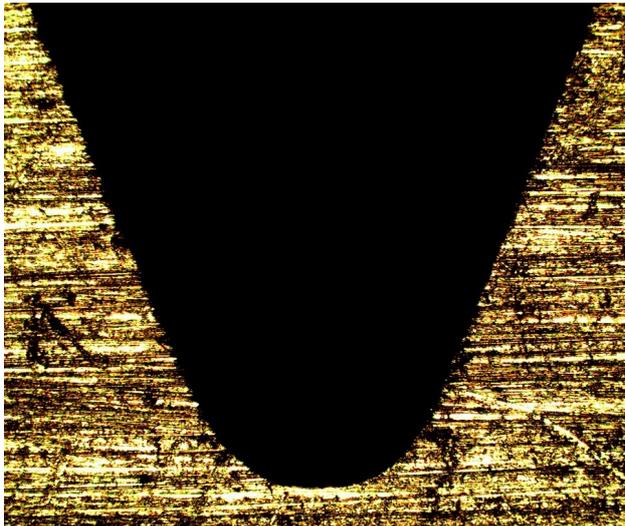


Fig. 4.2.4.e - *Profilo dell'intaglio di un provino in acciaio esente da bave lavorazione*

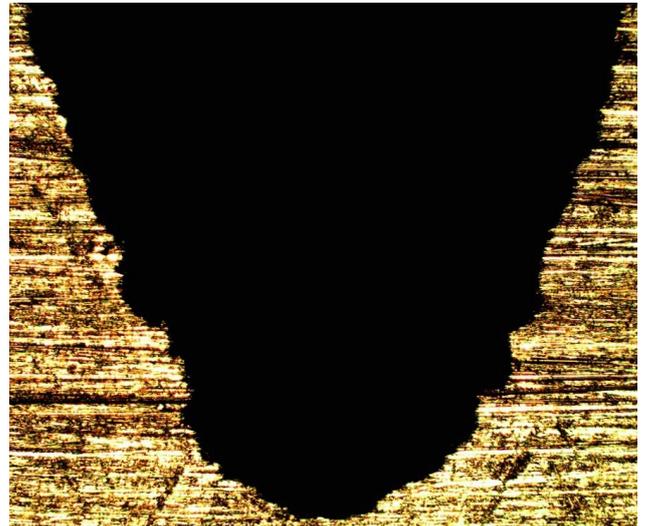


Fig. 4.2.4.f - *Profilo dell'intaglio di un provino in acciaio con bave di lavorazione*

Questa disomogeneità geometrica risulta completamente assente negli intagli dei provini realizzati per elettroerosione.

## 4.3 - La prova di laboratorio

### 4.3.1 - La macchina

Vista la geometria dei provini non assialsimmetrica, le prove sono state svolte con una macchina universale per test di materiali applicando al provino una carico ciclico assiale. Il laboratorio universitario dispone di una macchina servoidraulica Italsigma F PF 100 (figura 4.3.1.a) dalle seguenti caratteristiche:

Forza massima: 100 kN

Pressione di esercizio: 21 MPa

Corsa cilindro: 100 mm

Pressione massima cilindro sollevamento: 7 MPa

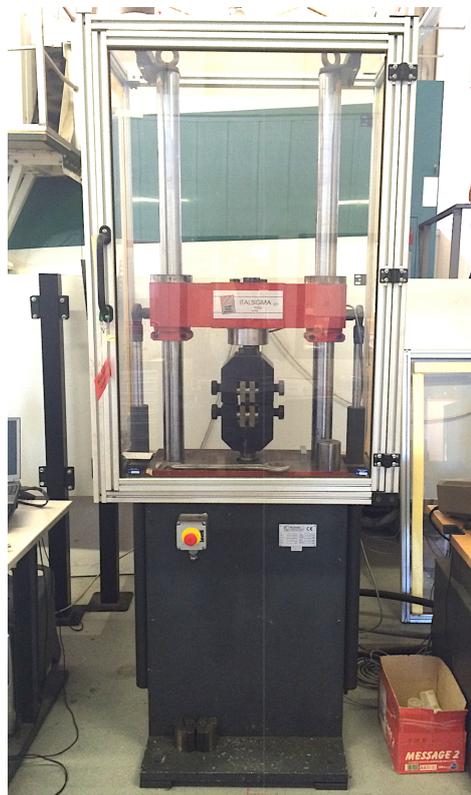


Fig. 4.3.1.a - *Macchina servoidraulica Italsigma impiegata per la prova.*

Le prestazioni della macchina vengono imposte dalla servovalvola che permette di applicare una forza alternata con una frequenza di 40 Hz. Più si aumenta il picco massimo del carico applicato più si deve contenere la frequenza di applicazione della forza. Per il nostro caso di studio si è deciso di applicare il carico con una frequenza di 30 Hz.

La macchina dispone di un software di controllo degli azionamenti che permette di correggere gli errori e gli scostamenti rispetto alla curva di carico ideale. Queste discrepanze dal caso ideale sono dovute alla massa di afferraggi (figura 4.3.1.b) e pistone che, quando messi in movimento, creano forze d'inerzia non trascurabili. Inoltre la viscosità dell'olio, per quanto controllata, varia con la temperatura e concorre ad alterare la curva di carico rispetto al caso ideale.

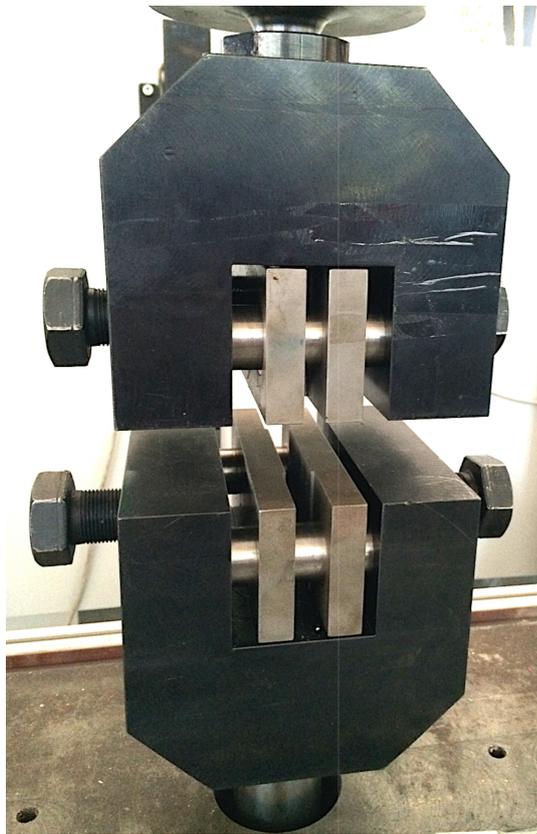


Fig. 4.3.1.b - *Afferraggi impiegati per la prova.*

### 4.3.2 - Le condizioni di lavoro

Le condizioni ambientali nelle quali è stata svolta l'intera prova erano quelle presenti all'interno del laboratorio. La temperatura, piuttosto stabile, si aggirava attorno ai 22°C. I provini non hanno subito variazioni di temperatura significative durante il ciclo di carico poiché la sua frequenza di applicazione era pari a 30 Hz (valore troppo basso per provocare un innalzamento della temperatura del materiale).

Un fattore determinante per il numero di cicli di sopravvivenza del provino è il rapporto di carico  $R$ . Si è scelto di operare nella condizione più gravosa: uno sforzo di trazione alternata; in particolare il valore del carico oscillava da 0 al valore stabilito seguendo una funzione sinusoidale. Il valore del rapporto di carico che descrive tale condizione di lavoro è  $R=0$ . Si tratta della condizione più "gravosa" poiché in questa configurazione la cricca risulta sempre aperta. Se si alternasse invece uno sforzo di trazione ad uno di compressione, durante la seconda fase la cricca verrebbe chiusa e non avanzerebbe. Inoltre, a parità di tensione alternata (dato riportato per la costruzione della curva di Wöhler), un rapporto di carico positivo indica una  $\sigma_{\max}$  più elevata. Il materiale risulta quindi generalmente più sollecitato se sottoposto ad un ciclo con  $R$  non negativo.

### 4.3.3 - Il procedimento

Al fine di ottenere dei risultati validi è necessario prestare attenzione al posizionamento del provino negli afferraggi. È infatti indispensabile che l'asse del provino sia esattamente allineato con l'asse degli afferraggi per scongiurare la generazione di qualsiasi momento flettente e ridurre tutto lo sforzo ad una trazione pura. Il posizionamento è stato effettuato con l'ausilio di un calibro e di blocchetti metallici squadrati per i posizionamenti assiale e trasversale.

Dopo aver posizionato il provino in macchina si procede al settaggio del software installato su un computer collegato (figura 4.3.3.a) impostando il controllo di carico. Si imposta dapprima il carico medio (*offset*) da applicare; tale carico viene applicato gradualmente per scongiurare rotture improvvise del provino. In un secondo momento, dopo aver raggiunto il valore di carico medio, si imposta il valore del carico alternato (*span*) che inizialmente viene applicato con una frequenza minima di 1 Hz. Come per l'offset, anche lo span viene incrementato gradualmente per il medesimo motivo. In ultimo si incrementa gradualmente la frequenza sino al raggiungimento del valore desiderato, nel nostro caso pari a 30 Hz. Durante l'impostazione dei valori appena descritti il tecnico modifica opportunamente i parametri del controllo PID osservando il grafico della funzione di risposta del sistema (in basso in figura 4.3.3.a). La risposta del sistema varia infatti a seconda di molteplici fattori tra i quali la frequenza, il valore del carico medio, il valore del carico massimo e la temperatura dell'olio della macchina.



Fig. 4.3.3.a - Schermata del software di controllo e del PID collegati alla macchina durante lo svolgimento di una prova.

Particolare attenzione va posta nell'impostazione di alcuni valori di sicurezza come ad esempio un limite sullo spostamento. La macchina è infatti in grado di rilevare il carico applicato mediante una cella di carico e lo spostamento del pistone. È possibile impostare un valore massimo di tale spostamento oltre il quale la prova viene considerata conclusa. Quando sopraggiunge la rottura, la macchina continua infatti a spostare il pistone in cerca del carico desiderato. Nel momento in cui il pistone oltrepassa il valore limite impostato, la macchina termina il ciclo e allontana i due afferraggi ponendoli ad una distanza preimpostata (figura 4.3.3.b). In questo modo si riesce anche a preservare la superficie di frattura così da poterla esaminare in un secondo momento.

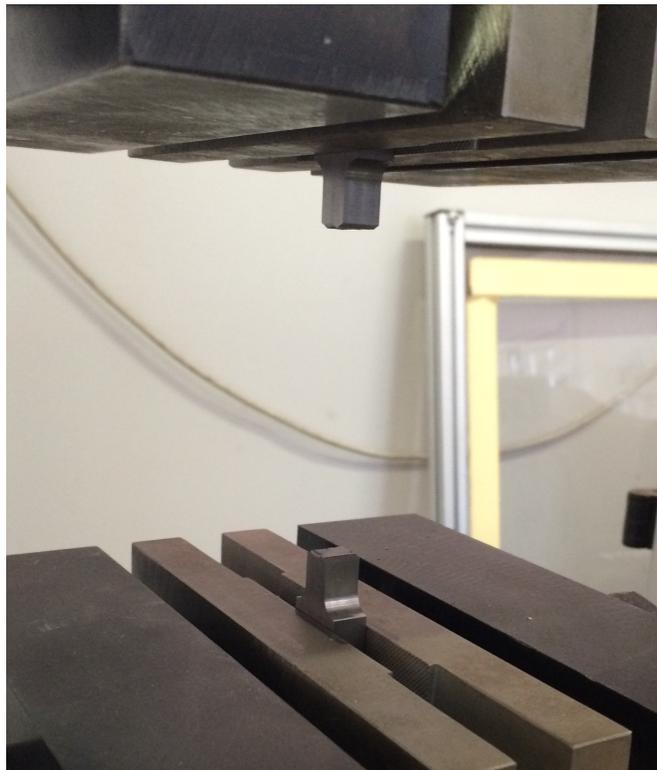


Fig 4.3.3.b - *Provino rotto ancora montato in macchina a fine prova.*

#### 4.3.3.1 - Ricerca della cricca con liquidi penetranti

Durante la il test un provino in acciaio sottoposto ad un carico di 5 kN alternati ha superato il milione di cicli. Si è deciso di interrompere la prova per cercare un'eventuale cricca al fine di capire se assumere tale valore del carico come limite di fatica o se riprendere la prova attendendo la rottura. Infatti nel caso fosse già conclusa la nucleazione della cricca, la rottura sarebbe certamente sopraggiunta.

Il laboratorio ha messo a disposizione materiali e personale per il corretto impiego dei *liquidi penetranti*. Il procedimento necessita infatti di determinate conoscenze al fine di fornire risultati attendibili.

La ricerca della cricca avviene alla base dell'intaglio sul fianco del provino; questo è infatti il punto più sollecitato nel quale avviene la nucleazione della cricca.

Il primo passo del procedimento prevede un'accurata pulizia del provino mediante uno sgrassatore. Una volta pulito il provino da qualsiasi residuo lo si lascia asciugare per poi passare all'applicazione del liquido penetrante (figura 4.3.3.1.a). Si tratta di un liquido oleoso che se illuminato con raggi ultravioletti risulta fluorescente. La penetrazione del liquido avviene per capillarità essendo un liquido che "bagna" il metallo. È perciò necessario lasciare al liquido il tempo necessario per penetrare all'interno dell'eventuale cricca (15 minuti sono sufficienti).

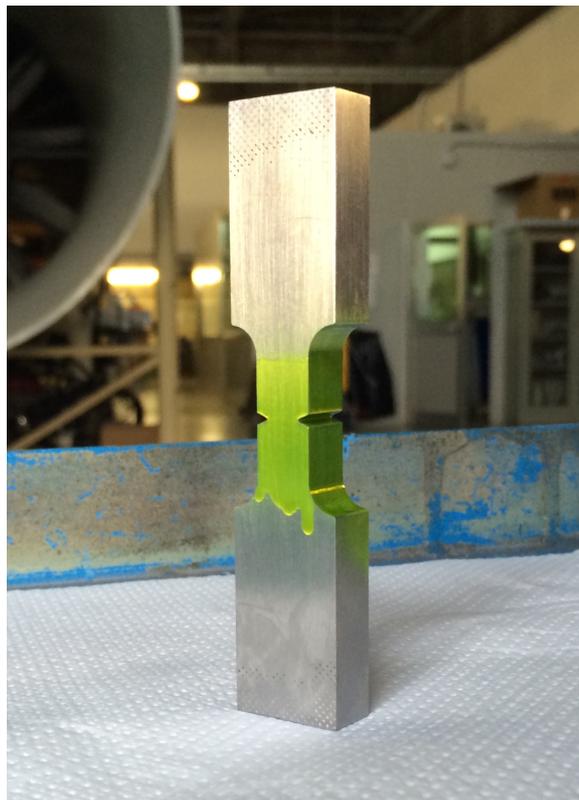


Fig.4.3.3.1.a - *Liquido penetrante applicato sul provino.*

Una volta lasciato al liquido il tempo di penetrare si procede alla rimozione del liquido in eccesso; l'unica parte che deve rimanere bagnata dal liquido è infatti la cricca. Per fare ciò ci si avvale di un *emulsionante*. Si tratta di un detergente schiumoso che rende il liquido lavabile in acqua (figura 4.3.3.1.b).



Fig. 4.3.3.1.b - *Emulsionante applicato sul provino per rendere il liquido penetrante solubile in acqua.*

La pulizia del provino dal liquido penetrante in eccesso richiede accortezza in quanto occorre prestare attenzione a non rimuovere il liquido dall'eventuale cricca. Per tale operazione ci si avvale di uno spruzzino con il quale si proietta il getto d'acqua a 45° rispetto alla superficie sulla quale è presente la cricca. Se si dirigesse il getto a 90° si rischierebbe di rimuovere il liquido anche dalla cricca stessa.

Dopo aver ripulito il provino lo si asciuga e gli si applica un apposito *rivelatore* (figura 4.3.3.1.c). Si tratta di una polvere secca che assorbe il liquido penetrante in modo da “estrarlo” dalla cricca



Fig. 4.3.3.1.c - *Rivelatore bianco applicato sul provino.*

Il provino è così pronto per essere ispezionato mediante una luce ad ultravioletti. Per l'operazione ci si avvale della *lampada di Wood*: si pone il provino in una camera oscura e lo si illumina con tale luce (figura 4.3.3.1.d). Le fuoriuscite di liquido penetrante da un'eventuale cricca risultano visibili grazie alla fluorescenza del liquido.



Fig. 4.3.3.1.d - *Provino in camera oscura illuminato dalla lampada di Wood.*

Il test sul provino in questione non ha rilevato nessun tipo di cricca pertanto il carico è stato assunto come limite di fatica e il provino è stato considerato sopravvissuto. Per rendere l'idea della fluorescenza del liquido penetrante illuminato da ultravioletti si osservi l'immagine in figura 4.3.3.1.e dove un guanto sporco di liquido penetrante è stato posto a fianco del provino.

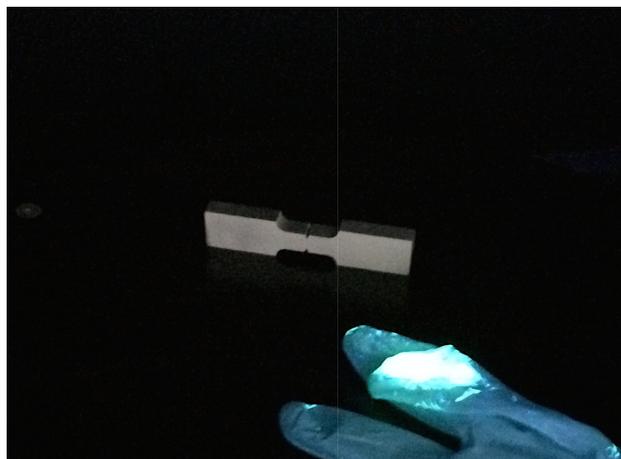


Fig. 4.3.3.1.e - *Confronto tra provino (esente da cricca) e guanto sporco di liquido penetrante.*

#### 4.3.3.2 - Ispezione visiva della superficie di frattura

Come già detto in precedenza, la superficie della frattura di un rottura per fatica presenta caratteristiche inconfondibili. Sono infatti presenti due zone ben distinte che corrispondono alla zona di propagazione della cricca (zona di destra sulla superficie di frattura in figura 4.3.3.2.a) e alla zona della rottura finale di schianto (zona di sinistra più scura sulla superficie di frattura in figura 4.3.3.2.a). La prima si presenta piuttosto liscia e regolare mentre la seconda è cristallina e irregolare. Sui fianchi del provino, in corrispondenza della seconda zona si può apprezzare la deformazione plastica del materiale (evidenziata in rosso nella figura 4.3.3.2.a) avvenuta durante lo snervamento, fenomeno che non si verifica mentre la cricca si propaga se non a livello microscopico.

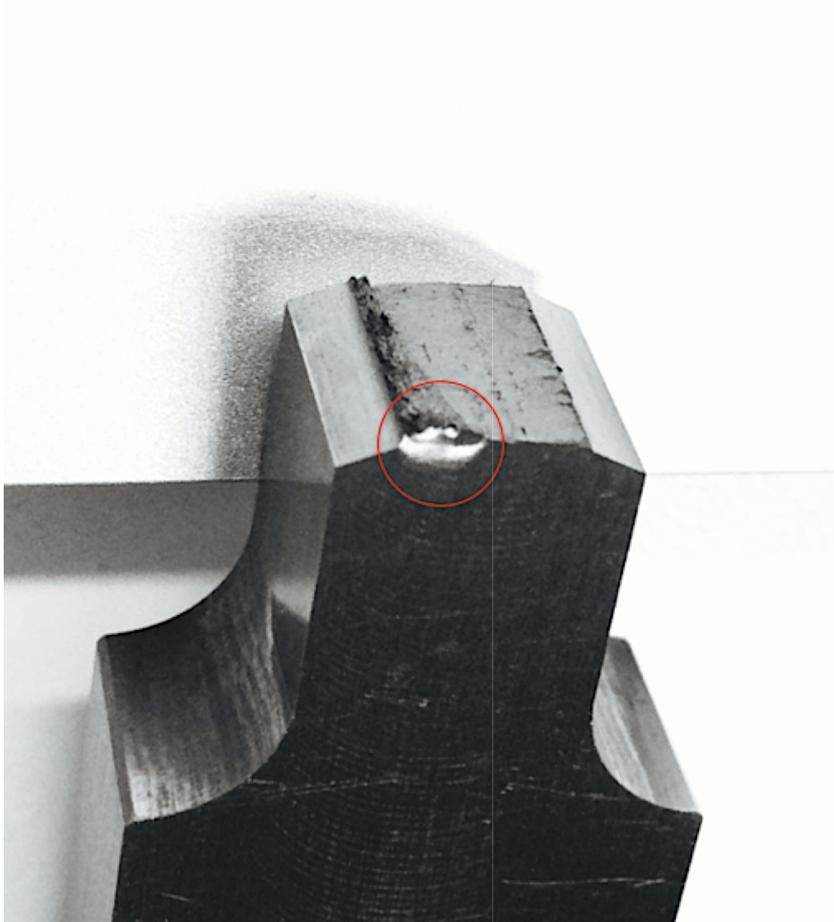


Fig 4.3.3.2.a - *Superficie di frattura del provino AE-8.  
In rosso è evidenziata la zona interessata da  
deformazione plastica.*

#### 4.3.3.3 - Prove di durezza

Per meglio caratterizzare l'intero test sono state svolte delle prove di microdurezza Vickers sui fianchi lavorati degli intagli. L'idea è quella di cercare un'eventuale differenza di durezza superficiale causata dal tipo di lavorazione. Il penetratore utilizzato è piramidale, il carico applicato è di 500 g e il tempo di applicazione del carico è di 10 secondi. La misura della durezza è correlata all'impronta lasciata dal penetratore sulla superficie del materiale, in particolare si ricava dalla misura della diagonale dell'impronta stessa. La misura della lunghezza della diagonale avviene tramite ispezione visiva al microscopio mentre la conversione in durezza Vickers è tabulata e viene fornita assieme allo strumento. Le durezze riportate sono la media dei valori di diverse misure effettuate al fine di avere dati piuttosto precisi.

Da questo test è risultato che le superfici lavorate mediante elettroerosione presentano una durezza inferiore rispetto alla controparte realizzata per asportazione di truciolo sia per quanto riguarda l'acciaio sia per la lega di titanio. In tabella 4.3.3.3.a vengono riportati i valori di durezza misurati:

	FRESATURA	EDM
ACCIAIO	225 HV	215 HV
TITANIO	280 HV	240HV

Tab. 4.3.3.3.a - *Valori di microdurezza superficiale Vickers per ogni combinazione di materiale e lavorazione.*

Il materiale che presenta la maggior differenza di durezza superficiale, con una riduzione del 14% causata dalla lavorazione EDM, è il titanio. L'acciaio presenta una riduzione di durezza superficiale causata dall'elettroerosione ben inferiore che si attesta attorno al 4,5%.

#### 4.3.4 - La raccolta dei dati

I dati collezionati durante la prova sono stati annotati di volta in volta su tabelle riportanti il carico applicato ed il numero di cicli di sopravvivenza. Le sigle che individuano i provini riportano con la prima lettera il tipo di materiale (A per l'acciaio e T per il titanio), con la seconda lettera il tipo di lavorazione (F per fresatura ed E per elettroerosione) mentre il numero individua il provino all'interno del gruppo. Ad esempio il provino contrassegnato con la sigla AF-3 è il provino numero 3 in acciaio con intaglio realizzato per asportazione di truciolo.

Di seguito vengono riportate le tabelle relative ai provini in acciaio.

PROVINO	CARICO	CICLI
AF - 1	$F_a = 12 \text{ kN}$	30 352
AF - 2	$F_a = 8 \text{ kN}$	133 063
AF - 3	$F_a = 5 \text{ kN}$	1 000 000 +
AF - 4	$F_a = 8 \text{ kN}$	168 879
AF - 5	$F_a = 12 \text{ kN}$	29 396
AF - 6	$F_a = 10 \text{ kN}$	41 371
AF - 7	$F_a = 10 \text{ kN}$	46 258
AF - 8	$F_a = 7 \text{ kN}$	332 879
AF - 9	$F_a = 7 \text{ kN}$	367 689
AF - 10	$F_a = 7 \text{ kN}$	236 682
AF - 11	$F_a = 8 \text{ kN}$	283 284

Tab. 4.3.4.a - *Carico e cicli dei provini in acciaio realizzati a fresa.*

PROVINO	CARICO	CICLI
AE - 1	$F_a = 12 \text{ kN}$	20 405
AE - 2	$F_a = 12 \text{ kN}$	26 801
AE - 3	$F_a = 10 \text{ kN}$	39 994
AE - 4	$F_a = 10 \text{ kN}$	36 825
AE - 5	$F_a = 8 \text{ kN}$	93 715
AE - 6	$F_a = 8 \text{ kN}$	122 991
AE - 7	$F_a = 7 \text{ kN}$	156 512
AE - 8	$F_a = 7 \text{ kN}$	288 151
AE - 9	$F_a = 7 \text{ kN}$	155 679

Tab. 4.3.4.b - *Carico e cicli dei provini in acciaio realizzati per elettroerosione.*

Stessa cosa è stata fatta per i provini in titanio:

PROVINO	CARICO	CICLI
TF - 1	$F_a = 12 \text{ kN}$	10 217
TF - 2	$F_a = 8 \text{ kN}$	202 727
TF - 3	$F_a = 8 \text{ kN}$	75 191
TF - 4	$F_a = 8 \text{ kN}$	220 603
TF - 5	$F_a = 10 \text{ kN}$	89 357
TF - 6	$F_a = 10 \text{ kN}$	43 851
TF - 7	$F_a = 7 \text{ kN}$	972 029
TF - 8	$F_a = 7 \text{ kN}$	1 076 340
TF - 9	$F_a = 12 \text{ kN}$	13 141
TF - 10	$F_a = 8 \text{ kN}$	59 489
TF - 11	$F_a = 10 \text{ kN}$	14 734

Tab. 4.3.4.c - *Carico e cicli dei provini in titanio realizzati a fresa.*

PROVINO	CARICO	CICLI
TE - 1	$F_a = 7 \text{ kN}$	32 114
TE - 2	$F_a = 7 \text{ kN}$	33 365
TE - 3	$F_a = 5 \text{ kN}$	1 101 384
TE - 4	$F_a = 6 \text{ kN}$	93 254
TE - 5	$F_a = 6 \text{ kN}$	74 768
TE - 6	$F_a = 5 \text{ kN}$	292 122
TE - 7	$F_a = 8 \text{ kN}$	21 263
TE - 8	$F_a = 8 \text{ kN}$	22 632
TE - 9	$F_a = 5 \text{ kN}$	182 959

Tab. 4.3.4.d - *Carico e cicli dei provini in titanio realizzati per elettroerosione.*

I valori disordinati di carico per le lavorazioni di fresa sono dovuti alla ricerca di un trend da seguire per ottenere dati “leggibili”. I provini realizzati per elettroerosione sono infatti stati testati per secondi e seguendo il trend individuato.

## 4.4 - Interpretazione dei dati ottenuti

Lo scopo della prova è quello di confrontare le resistenze a fatica delle diverse tipologie di provini, pertanto verranno paragonate le varie curve di Wöhler ricavate dai dati sperimentali. Visivamente parlando, se una curva sta al di sopra di un'altra significa che la prima individua una combinazione di materiale/lavorazione più resistente a fatica. Nel caso di un'eventuale intersezione delle curve bisognerà valutare due diversi campi: quello corrispondente alla fatica a basso numero di cicli e quello relativo ad un alto numero di cicli.

### 4.4.1 - La costruzione delle curve di Wöhler

Le prove di fatica comportano intrinsecamente una dispersione dei risultati. Come si può infatti notare, ad esempio per il provino AF-11, i risultati si discostano parecchio dalle aspettative. In questo caso il provino ha sopportato un numero di cicli circa doppio rispetto al trend individuato dagli altri due (AF-2 e AF-4) sottoposti allo stesso carico. Un'anomalia opposta si è invece verificata per il provino AF-10. Questi due provini vengono evidenziati in rosso nel grafico in figura 4.4.1.a mentre in verde è evidenziato il provino AF-3 che ha superato il milione di cicli. Su quest'ultimo provino è stato svolto il test con i liquidi penetranti illustrato nel Paragrafo 4.3.3.1.

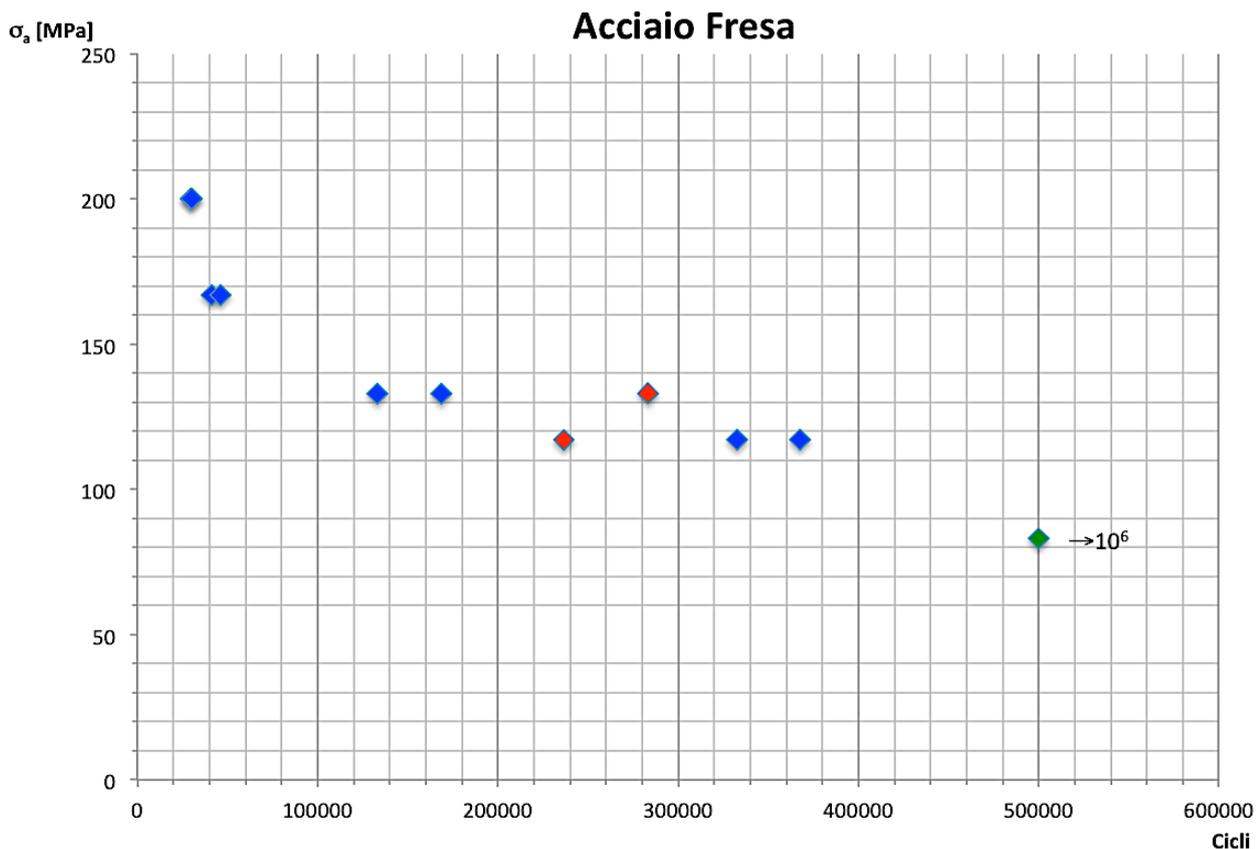


Fig 4.4.1.a - Grafico cicli-tensione alternata per i provini in acciaio lavorati di fresa.

Si intuisce facilmente che i dati ottenuti vanno in un certo senso interpretati escludendo i risultati fuori attesa. Per il tracciamento dei grafici, tali valori, se particolarmente discordanti, vengono trascurati per non “inquinare” i grafici stessi. Verrà comunque tenuto conto di una maggiore o minore dispersione dei risultati al fine di caratterizzare sotto ogni punto di vista una determinata lavorazione su un determinato materiale.

Per ottenere un andamento rettilineo le curve di Wöhler vengono riportate in coordinate bilogartmiche; in questo modo è possibile ottenere le relative leggi di Basquin per meglio caratterizzare ogni combinazione di materiale/lavorazione.

Di seguito, in figura 4.4.1.b e 4.4.1.c, sono riportati i grafici ottenuti dai provini in acciaio, le relative curve di Wöhler e l’equazione della legge di Basquin relativa ad ogni retta interpolante.

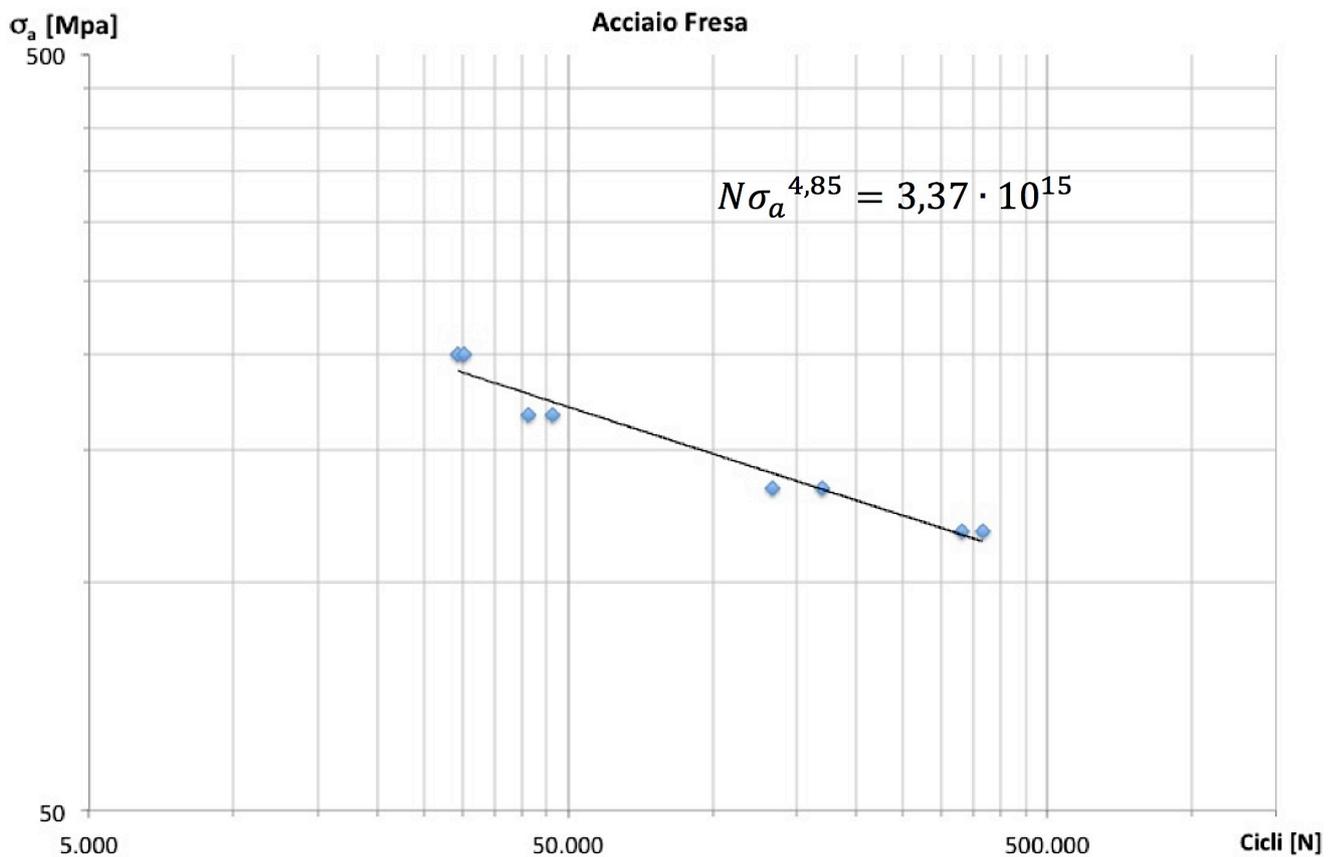


Fig. 4.4.1.b - Curva di Wöhler in coordinate bilogartmiche e relativa legge di Basquin per i provini in acciaio lavorati per asportazione di truciolo.

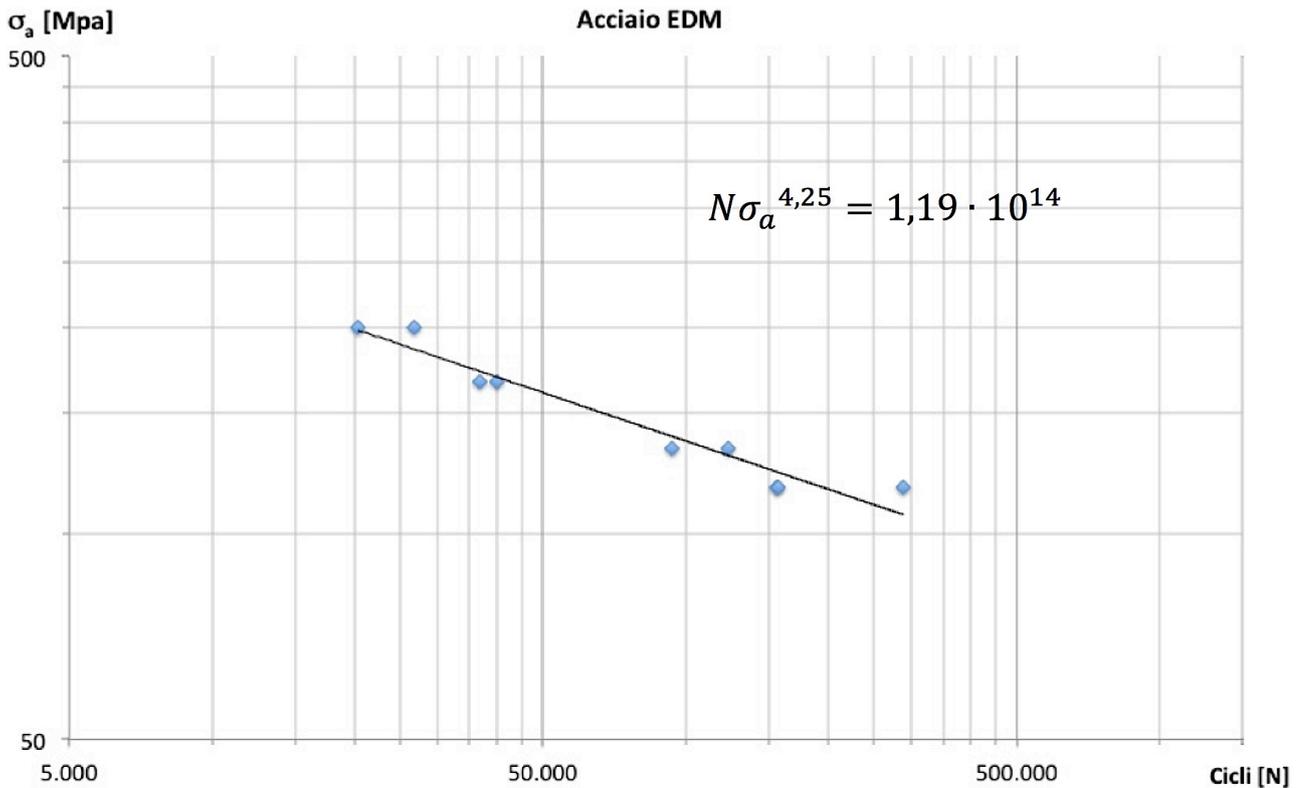


Fig. 4.4.1.c - Curva di Wöhler in coordinate bilogaritmiche e relativa legge di Basquin per i provini in acciaio lavorati per elettroerosione.

Analizzando le due leggi si può dedurre una maggiore pendenza del grafico relativo alla lavorazione per elettroerosione. Nella legge di Basquin infatti l'esponente di  $\sigma_a$  rappresenta la pendenza della retta. In particolare minore è l'esponente maggiore è la pendenza della retta. Tale curva risulta inoltre spostata verso sinistra rispetto alla curva relativa alla lavorazione per asportazione di truciolo. Ciò si traduce in una minore resistenza a fatica dei provini lavorati con tecnologia EDM; tale differenza risulta leggermente più accentuata ad alto numero di cicli proprio perché la retta dei provini ottenuti per elettroerosione è più pendente rispetto all'altra.

Anche per i provini in lega di titanio sono state tracciate per interpolazione le curve di Wöhler in coordinate bilogaritmiche e le relative leggi di Basquin, di seguito riportate in figura 4.4.1.d-e.

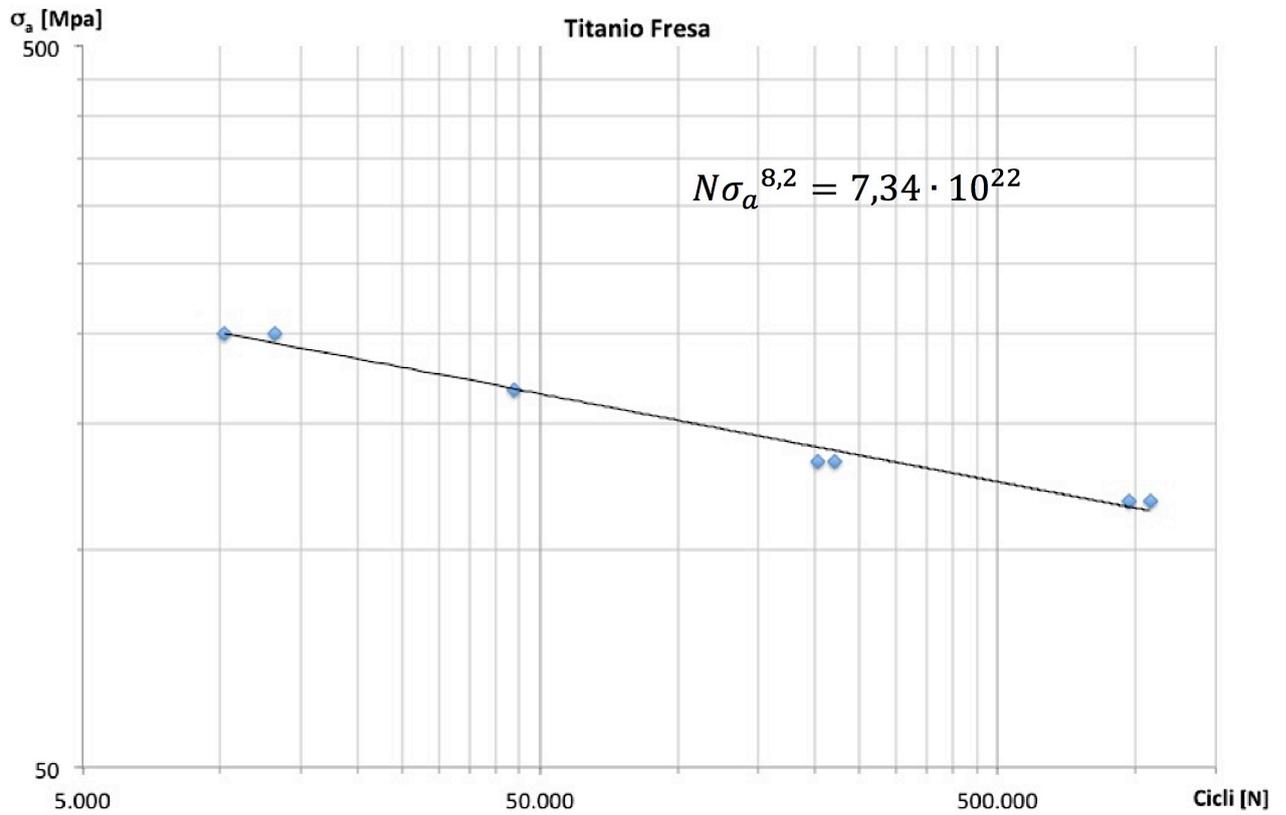


Fig. 4.4.1.d - Curva di Wöhler in coordinate bilogaritmiche e relativa legge di Basquin per i provini in titanio lavorati per asportazione di truciolo.

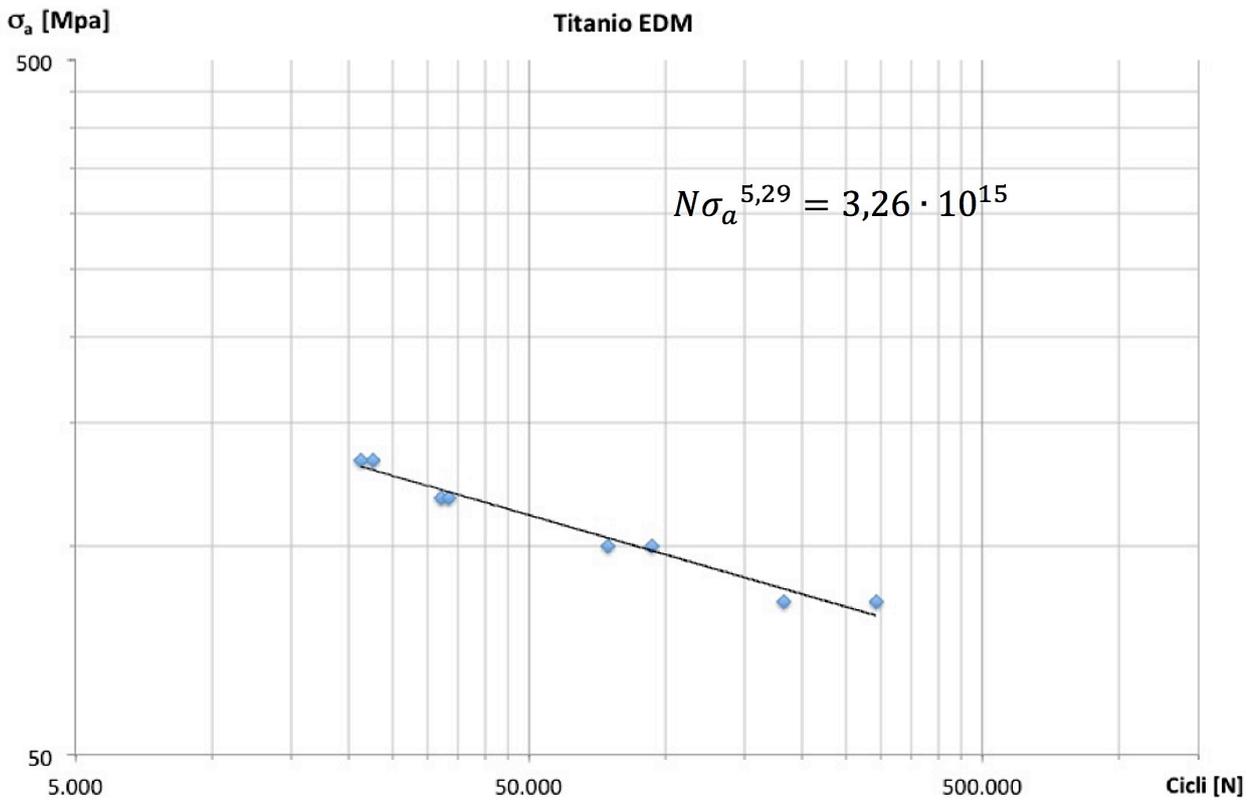


Fig. 4.4.1.e - *Curva di Wöhler in coordinate bilogarithmiche e relativa legge di Basquin per i provini in titanio lavorati per elettroerosione.*

Come per l'acciaio, anche sulla lega di titanio la lavorazione per asportazione di truciolo ha conferito una migliore resistenza a fatica. In questo caso la differenza di pendenza tra le due rette è notevole come lo scostamento verso il basso della curva relativa alla lavorazione EDM.

#### 4.4.2 - Il confronto delle curve costruite

Per quantificare visivamente la differenza tra le resistenze a fatica, i dati sono stati riportati su uno stesso grafico in figura 4.4.2.a per l'acciaio dove i punti relativi ai provini lavorati per elettroerosione sono colorati in rosso mentre quelli relativi ai provini ottenuti per asportazione di truciolo sono colorati in azzurro.

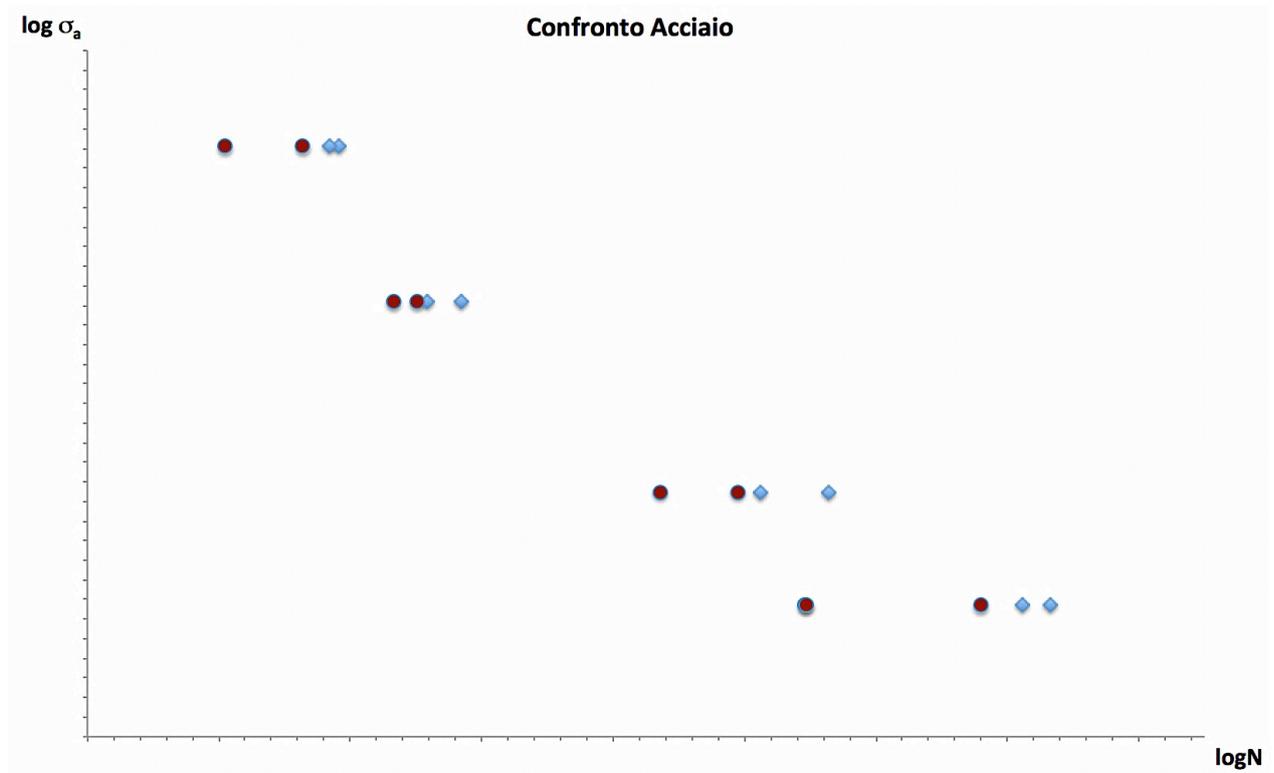


Fig 4.4.2.a - Confronto delle due lavorazioni sullo stesso piano  $\log N - \sigma_a$ ; In rosso è indicata la lavorazione EDM mentre in azzurro è indicata la lavorazione per asportazione di truciolo.

Osservando il grafico appena riportato in figura 4.4.2.a risulta immediato capire che i provini lavorati per asportazione di truciolo hanno sopportato un maggior numero di cicli a parità di livello di carico. È inoltre interessante notare che in nessun caso un provino lavorato per elettroerosione ha sopportato un numero di cicli superiore rispetto all'altra lavorazione.

Per la lega di titanio sono stati ottenuti risultati più dispersi ma comunque indicativi riguardo la resistenza a fatica. Tutti i punti vengono riportati nel grafico in figura 4.4.2.b, colorati in rosso quelli relativi alla lavorazione EDM e in azzurro quelli relativi all'asportazione di truciolo.

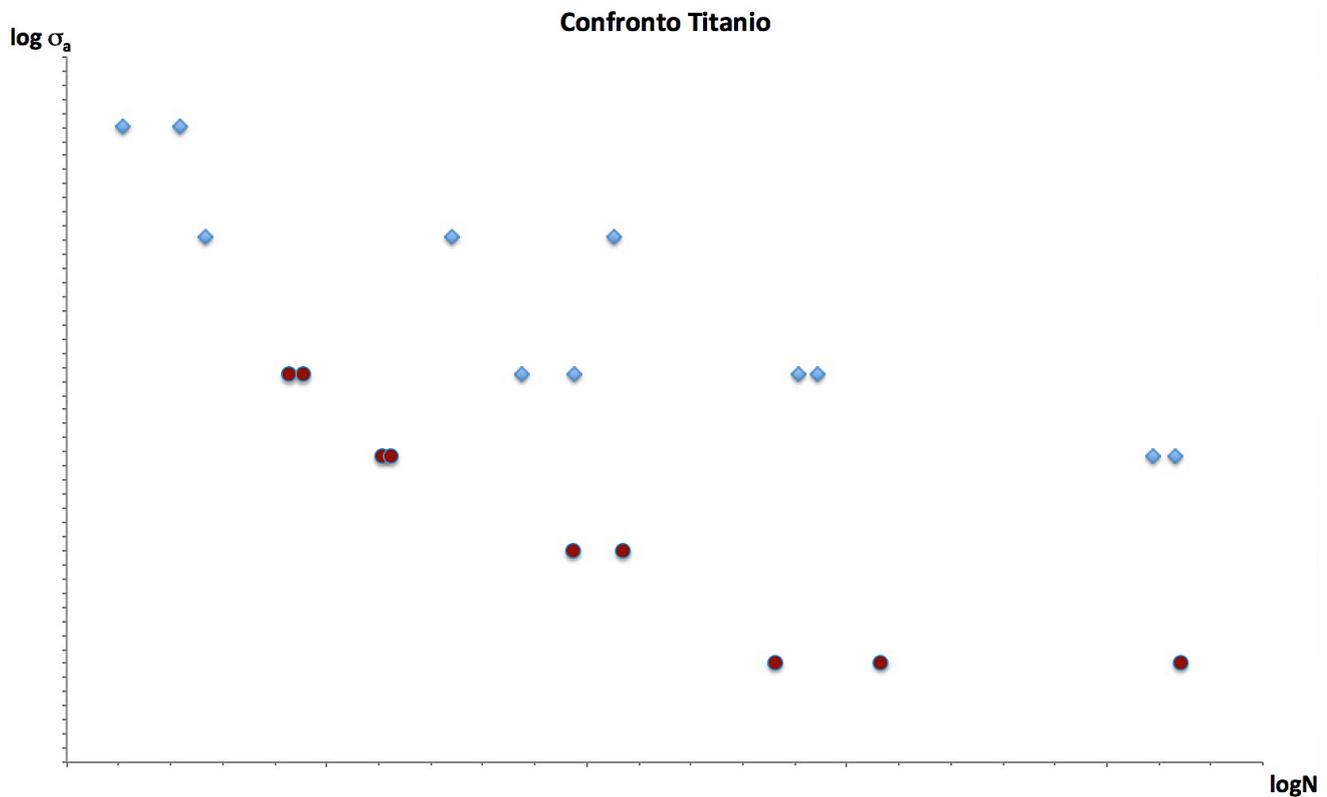


Fig 4.4.2.b - Confronto delle due lavorazioni sullo stesso piano  $\log N - \sigma_a$ ; In rosso è indicata la lavorazione EDM mentre in azzurro è indicata la lavorazione per asportazione di truciolo.

Osservando il grafico appena riportato si nota immediatamente come la lavorazione EDM renda i provini meno resistenti a fatica. Non è stato possibile replicare tutti i livelli di carico impiegati per testare i provini lavorati per asportazione di truciolo in quanto la curva relativa alla lavorazione EDM risulta molto spostata verso il basso. Tuttavia la lavorazione per elettroerosione sembrerebbe rendere i provini molto più omogenei rispetto alla lavorazione per asportazione di truciolo. Questa deduzione deriva dal fatto che per uno stesso livello di carico sono stati ottenuti risultati molto diversi per la lavorazione convenzionale, mentre i provini realizzati con tecnologia EDM hanno sopportato un numero di cicli molto simile a parità di carico applicato.

Anche in questo caso nessun provino realizzato per elettroerosione ha sopportato un numero di cicli maggiore rispetto alla controparte realizzata per asportazione di truciolo.

## Capitolo 5

# Conclusioni

Ricordando il principale scopo della prova, ossia il confronto della resistenza a fatica di provini intagliati mediante fresatura o elettroerosione, si può affermare con sicurezza che *la lavorazione EDM risulta meno indicata, per la realizzazione di particolari soggetti a carichi affaticanti, rispetto alla fresatura convenzionale*. In particolare la lega di titanio Ti6Al4V è risultata molto più sensibile alla lavorazione rispetto all'acciaio inossidabile X30Cr13 bonificato. Tuttavia i provini in titanio intagliati mediante elettroerosione hanno mostrato una maggiore omogeneità nella resistenza a fatica rispetto a quelli intagliati per asportazione di truciolo.

Evidentemente l'alterazione termica causata dalla tecnologia EDM altera, peggiorandole in modo piuttosto rilevante, le caratteristiche meccaniche dei materiali; ciò non avviene con una lavorazione per asportazione di truciolo in quanto l'incrudimento superficiale causato da un utensile convenzionale tende a migliorare le proprietà meccaniche del materiale lavorato.



## Bibliografia

- [1] Manuale dei materiali per l'ingegneria, McGraw-Hill
- [2] Riccardo Baldacci, Scienza delle costruzioni, UTET
- [3] Boller-Seeger, Materials data for cyclic loading, part D, Elsevier
- [4] Dario Croccolo, Lezioni di fondamenti e tecnica della progettazione meccanica, Progetto Leonardo
- [5] Shabnam Hosseini, Fatigue of Ti-6Al-4V, Department of Metallurgy, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
- [6] Dispense universitarie
- [7] Web