



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA**

**TESI DI LAUREA**

**ANALISI SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA A FATICA DI UN  
ACCIAIO INOSSIDABILE CON APPROCCIO ENERGETICO**

Relatori: Prof. Ing. Giovanni Meneghetti

Dott. Ing. Mauro Ricotta

Laureando: Luca Negrisolò

ANNO ACCADEMICO 2012-2013



*Ai miei genitori e fratelli*



CAPITOLO1: ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA ATTRAVERSO L'APPROCCIO BASATO SULL'ENERGIA DISSIPATA DAL MATERIALE .....	7
1.1 INTRODUZIONE.....	7
1.2 MODELLI ENERGETICI .....	8
1.2.1 Modello Feltner-Morrow-Halford (F.M.H.) [8].....	8
1.2.2 Modello Kaleta [9] .....	9
1.2.2 Modello Meneghetti 2007 [1],[2].....	9
1.3 OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO DI TESI .....	17
CAPITOLO2: ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA ASSIALE .....	19
2.1 DESCRIZIONE DELLA PROVA .....	19
2.2 MATERIALE .....	20
2.3 PROVINI .....	26
2.4 PREPARAZIONE DEI PROVINI .....	26
2.5 DISPOSIZIONE DEL CENTRO DI LAVORO E DESCRIZIONE DELLA MACCHINA MFL ASSIALE..	28
2.5.1 Disposizione del centro di lavoro .....	28
2.5.2 Descrizione della macchina .....	29
2.5.3 Descrizione del software che controlla la macchina .....	33
2.5.4 Descrizione dei comandi fondamentali .....	35
2.6 PROTOCOLLO DI PROVA A FATICA SU MFL ASSIALE.....	37
2.6.1 Accensione e preparazione della macchina .....	37
2.6.2 Montaggio provino .....	41
2.6.3 Impostazione parametri di prova .....	43
2.6.4 Configurazione e gestione del sistema di acquisizione di temperatura.....	45
2.6.5 Esecuzione della prova .....	47
2.6.6 Montaggio estensometro .....	48
2.6.7 Esecuzione dei raffreddamenti.....	49
2.6.8 Smontaggio e spegnimento.....	52

CAPITOLO3: VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO.....	55
3.1 PREMESSA.....	55
3.2 APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE .....	56
3.2.1 Andamenti delle rigidzze durante le prove a R-1.....	57
3.2.2 Risultati delle prove assiali a R-1.....	62
3.2.3 Andamenti delle rigidzze durante le prove a R0,1.....	63
3.2.4 Risultati delle prove assiali a R0,1.....	66
3.2.5 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di ampiezza di tensione.....	68
3.3 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA .....	69
3.3.1 Determinazione del parametro densità di energia dissipata Q.....	69
3.3.2 Andamenti dell'energia dissipata nelle prove a R-1 .....	73
3.3.3 Risultati delle prove assiali a R-1 in termini di energia dissipata.....	75
3.3.4 Andamenti dell'energia dissipata nelle prove a R0,1.....	77
3.3.5 Risultati delle prove assiali a R0,1 in termini di energia dissipata .....	80
3.3.6 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di energia dissipata Q .....	81
3.4 CONFRONTO CON PRECEDENTI RISULTATI SPERIMENTALI.....	82
3.4.1 Materiale e metodi utilizzati in AIAS [3] .....	82
3.4.2 Approccio in termini di tensione netta .....	83
3.4.3 Approccio in termini di densità di energia dissipata.....	86
3.5 CONCLUSIONI.....	89

CAPITOLO4: INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO NELLO STUDIO DELLA VITA A FATICA IN TERMINI DI DENSITÀ DI ENERGIA DISSIPATA.....	91
PREMESSA.....	91
4.1 MATERIALE E METODI.....	91
4.2 CONFRONTO DEI RISULTATI DELLE DIVERSE CAMPAGNE DI PROVE.....	94
4.2.1 Approccio in termini di tensione netta .....	94
4.2.2 Approccio in termini di densità di energia dissipata.....	97
4.3 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO .....	101
4.3.1 Influenza del rapporto di ciclo nei dati tratti da precedenti lavori di tesi [6].....	101

4.3.2	Influenza del rapporto di ciclo nei dati relativi al presente lavoro di tesi.....	114
4.3.3	Influenza del rapporto di ciclo: confronto tra le diverse campagne di prove .....	117
4.4	INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO: VALUTAZIONE DEL RAFFREDDAMENTO ADIABATICO .....	120
4.4.1	Descrizione del metodo.....	120
4.4.2	Protocollo di prova per la determinazione della costante $\Delta T/\Delta\sigma$ .....	122
4.4.3	Risultati del metodo basato sulla determinazione del raffreddamento adiabatico ...	130
4.5	CONCLUSIONI .....	132
CAPITOLO5:	ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA SU MACCHINA MFL TORSIONALE .....	137
5.1	DESCRIZIONE DELLA PROVA .....	137
5.2	DISPOSIZIONE DEL CENTRO DI LAVORO E DESCRIZIONE DELLA MACCHINA DI PROVA MFL TORSIONALE .....	137
5.2.1	Disposizione del centro di lavoro .....	137
5.2.2	Descrizione della macchina .....	138
5.3	PROTOCOLLO DI PROVA SU MACCHINA MFL TORSIONALE.....	140
5.3.1	Accensione e preparazione della macchina .....	140
5.3.2	Impostazione dei parametri di prova .....	146
5.3.3	Configurazione e gestione del sistema di acquisizione di temperatura.....	148
5.3.4	Esecuzione della prova .....	151
5.3.5	Esecuzione dei raffreddamenti.....	151
5.3.6	Smontaggio e spegnimento.....	154
CAPITOLO6:	VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA TORSIONALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO .....	155
6.1	PREMESSA .....	155
6.2	APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE.....	156
6.2.1	Andamenti delle rigidzze durante le prove a R-1 .....	156
6.2.2	Risultati delle prove torsionali a R-1.....	160
6.2.3	Andamenti delle rigidzze durante le prove a R0,1 .....	161

6.2.4 Risultati delle prove torsionali a R0,1 .....	163
6.2.5 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di ampiezza di tensione .....	165
6.3 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA .....	166
6.3.1 Andamento dell'energ dissipata nelle prove torsionali a R-1.....	167
6.3.3 Risultati delle prove assiali a R-1 in termini di energia dissipata.....	168
6.3.4 Andamento dell'energia dissipata nelle prove a R0,1.....	169
6.3.5 Risultati delle prove torsionali a R0,1 in termini di energia dissipata.....	171
6.3.6 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di energia dissipata Q.....	173
6.4 CONCLUSIONI.....	174
CAPITOLO7: VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE NELLO STUDIO DELLA RESISTENZA A FATICA DI UN ACCIAIO INOSSIDABILE AISI304L .....	175
7.1 PREMESSA.....	175
7.2 EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE PER PROVE A RAPPORTO DI CICLO R-1.....	175
7.2.1 Confronto prove assiali-torsionali in termini di ampiezza di tensione .....	175
7.2.2 Confronto prove assiali-torsionali in termini di energia dissipata per ciclo .....	178
7.3 EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE PER PROVE A RAPPORTO DI CICLO R0,1.....	181
7.3.1 Confronto prove assiali-torsionali in termini di ampiezza di tensione .....	181
7.3.2 Confronto prove assiali-torsionali in termini di energia dissipata per ciclo .....	183
7.4 METODO BASATO SULLA DETRMINAZIONE DEL RAFFREDDAMENTO ADIABATICO APPLICATO A TUTTE LE PROVE DI TRAZIONE E TORSIONE.....	184
7.5 CONCLUSIONI.....	186
CAPITOLO8: CONCLUSIONI .....	187
APPENDICE A: RISULTATI PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R-1.....	191



APPENDICE B: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R0,1.....	245
APPENDICE C: RISULTATI PROVE TORSIONALI A RAPPORTO DI CICLO R-1 .....	281
APPENDICE D: RISULTATI PROVE TORSIONALI A RAPPORTO DI CICLO R0,1.....	305
BIBLIOGRAFIA .....	329



## CAPITOLO 1

### ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA ATTRAVERSO L'APPROCCIO BASATO SULL'ENERGIA DISSIPATA DAL MATERIALE

#### 1.1 INTRODUZIONE

L'energia dissipata per unità di volume e per ciclo  $Q$  è stata recentemente proposta in [1] come indicatore del danneggiamento a fatica. L'approccio che utilizza questo parametro per caratterizzare il materiale è un'evoluzione delle tecniche termografiche che si basano su una misura di temperatura superficiale eseguita a stabilizzazione avvenuta. La ragione per cui l'energia specifica viene ritenuta un parametro più promettente rispetto alla temperatura è che quest'ultima non può essere adottata per geometrie e condizioni di test che differiscono da quelle di riferimento.

Questo aspetto ha portato allo sviluppo di nuovi approcci energetici in grado di considerare un parametro che risulta indipendente dalle condizioni di prova e che allo stesso tempo sia facile da misurare. Se si considera un componente meccanico sottoposto a sollecitazioni di fatica si può affermare che dell'energia meccanica specifica spesa per un ciclo di carico-scarico  $W$ , che corrisponde all'area di un ciclo d'isteresi, una parte  $\Delta U$  viene immagazzinata dal materiale e sarà responsabile di un aumento della sua energia interna mentre una parte  $Q$  viene smaltita sotto forma di calore all'ambiente esterno. Si può dunque scrivere in forma del tutto generale una relazione del tipo:

$$W = Q + \Delta U \quad (1.1)$$

La suddivisione che subisce l'energia  $W$  risulta essere, per un certo tipo di materiale, sempre la stessa indipendentemente dalla frequenza di applicazione del carico e dalle condizioni al contorno. Questo aspetto comporta che il valore di  $Q$  resti costante e sia la temperatura del pezzo a variare in funzione delle condizioni al contorno, meccaniche e termiche, per permettere al materiale stesso di smaltire sempre la stessa quantità di calore. Facendo un esempio, in un materiale sottoposto ad un livello di tensione, con una certa frequenza e ad una certa temperatura ambiente, la temperatura del componente si stabilizzerà ad un certo valore. Se si innalza la frequenza di prova la potenza termica prodotta sarà superiore e la temperatura del provino aumenterà in modo da riuscire a smaltire la stessa quantità di calore prodotta per ciclo.

Detto dei vantaggi dei metodi energetici rispetto alle tecniche termografiche si descrive più nel dettaglio nel paragrafo successivo l'approccio su cui si basa il presente lavoro.

## 1.2 MODELLI ENERGETICI

Esistono diversi approcci riguardanti l'analisi della fatica dei materiali che sono basati sulle misure sperimentali dell'energia e ognuno di questi assume una particolare forma di energia come parametro caratteristico del danneggiamento a fatica. I più importanti sono elencati di seguito:

- Modello "Feltner-Morrow-Halford"
- Modello "Kaleta"
- Modello "Meneghetti 2007"

### 1.2.1 Modello Feltner-Morrow-Halford (F.M.H.) [8]

Questo modello considera come parametro indice di danneggiamento a fatica l'energia meccanica spesa  $W$ , ovvero il lavoro di deformazione plastica non recuperabile misurato attraverso l'area del ciclo di isteresi. Esso può essere espresso con la relazione:

$$W = \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.2)$$

dove  $\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}$  sono le componenti di tensione e deformazione rispettivamente. Una volta trovata l'energia meccanica la si correla con il numero di alternanze a rottura in un grafico doppio logaritmico come mostrato in figura 1.1 a titolo di esempio [2] per un acciaio inossidabile AISI304L.

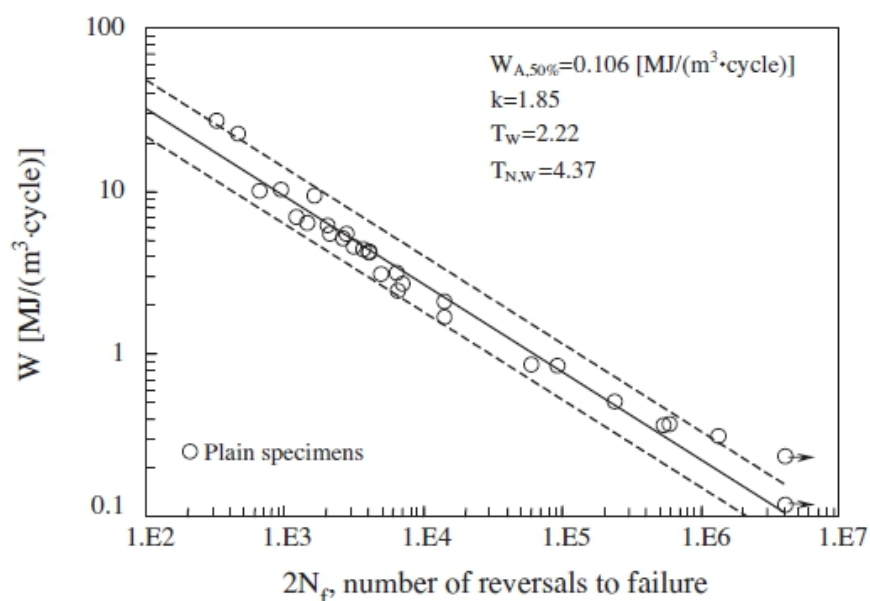


Figura 1.1 Grafico indicativo energia meccanica specifica - alternanze per l'acciaio AISI304L [2]

Il grafico può quindi essere utilizzato come una curva di progetto per stimare la vita a fatica di un componente dello stesso acciaio e soggetto allo stesso tipo di carico. Il limite di tale procedura è che la tensione  $\sigma(t)$  in un generico punto intagliato non può essere trovata direttamente ma solo tramite calcolo, simulazione FEM o partendo dalle deformazioni, comportando che l'energia meccanica  $W$  non può essere direttamente misurata nel punto critico del componente ma sarà sempre una misura indiretta affetta da limiti di precisione ed affidabilità che ne derivano.

### *1.2.2 Modello Kaleta [9]*

L'autore propone in questo modello che l'energia presa come parametro per la valutazione della vita a fatica sia quella interna immagazzinata dal materiale  $\Delta U$  che è quella effettivamente responsabile del danneggiamento. Tale energia viene determinata come differenza tra l'energia meccanica spesa  $W$  e l'energia convertita in calore  $Q$ . Proprio le modalità di calcolo di  $\Delta U$  rappresentano il limite di questo metodo che richiede particolare accuratezza nell'esecuzione dei test e nell'analisi dei dati perchè, in particolare per medi ed alti cicli, la maggior parte dell'energia meccanica è convertita in calore e come conseguenza l'energia accumulata dal materiale trovata come differenza delle due energie è affetta da grandi incertezze.

### *1.2.2 Modello Meneghetti 2007 [1],[2]*

In questo modello l'autore propone di utilizzare come parametro indice del danneggiamento a fatica quella parte dell'energia meccanica spesa che viene smaltita dal materiale all'ambiente circostante sottoforma di calore  $Q$ . Questo modello è quello che verrà utilizzato in questo lavoro e viene quindi approfondito più nel dettaglio.

Si consideri un materiale sottoposto ad una sollecitazione di fatica e si isoli un volume di controllo  $V$  con normale  $n$  uscente dalla superficie come indicato in figura 1.2.

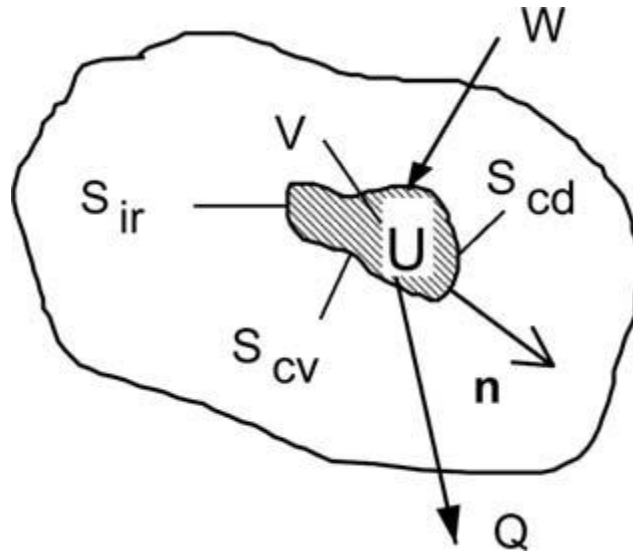


Figura 1.2 bilancio energetico per un materiale sottoposto a fatica [1]

La superficie può essere idealmente suddivisa in tre parti  $S_{cv}$ ,  $S_{cd}$ ,  $S_{ir}$  attraverso le quali il calore è trasferito all'ambiente tramite convezione, conduzione e irraggiamento rispettivamente. La relazione generale (1.1) può essere riscritta in termini di potenza come riporta l'equazione 1.3:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_V (\phi \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}) f dV = \\
 &= \int_V -\lambda \nabla^2 T dV + \int_{S_{cv}} \alpha (T - T_\infty) dS_{cv} + \int_{S_{ir}} k \sigma_n (T^4 - T_\infty^4) dS_{ir} \\
 &\quad + \int_V \left( \rho c \frac{\delta T}{\delta t} + E_p \right) dV
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

dove  $\lambda$  è la conducibilità termica,  $\alpha$  è il coefficiente di convezione,  $k$  è l'emissività della superficie,  $\rho$  è la densità,  $c$  il calore specifico del materiale,  $T_\infty$  è la temperatura ambiente,  $f$  la frequenza della prova,  $\sigma_n$  è la costante di Stephan-Boltzman e  $T(x,y,z,t)$  è il campo di temperatura dipendente dalla posizione e dal tempo.

La variazione di potenza interna, rappresentata dall'ultimo integrale della (1.3), può essere vista come la somma di due contributi: il primo dipende dalla variazione di temperatura nel volume  $V$ , mentre la seconda è la potenza immagazzinata che è quella parte di potenza meccanica che è responsabile dei cambiamenti microstrutturali nel materiale e che inducono alla generazione delle microcricche a fatica.

Per semplificare la trattazione trattiamo il problema monodimensionalmente ad esempio considerando un provino come quello indicato in figura 1.3.

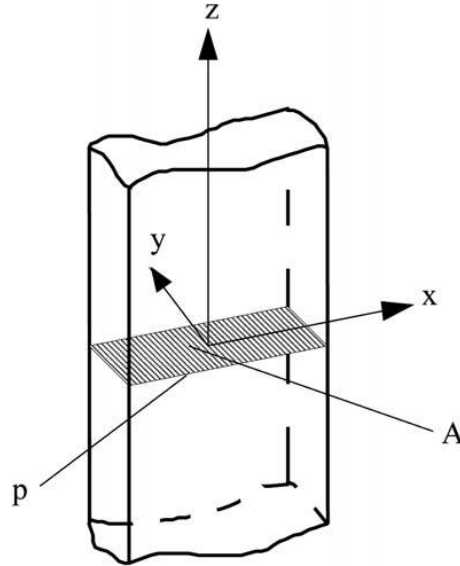


Figura 1.3 provino con area A e perimetro p [1]

La relazione (1.3) può essere riscritta in questo caso come segue:

$$\left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) f = -\lambda \nabla^2 T dV + \alpha(T - T_\infty) \frac{p}{A} + \sum_i k_i l_i \frac{\sigma_n}{A} (T^4 - T_\infty^4) + \left( \rho c \frac{\delta T}{\delta t} + E_p \right) \quad (1.4)$$

Se consideriamo trascurabili gli effetti termo-elastici, che in effetti non sono responsabili dell'energia dissipata in un ciclo di carico scarico, la relazione precedente, applicata dopo un intervallo di tempo sufficientemente lungo da permettere alla temperatura del pezzo di stabilizzarsi, può essere ulteriormente semplificata come segue:

$$\left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = H + E_p \quad (1.5)$$

dove il termine H rappresenta la potenza termica dissipata per unità di volume in conduzione, convezione e irraggiamento. La difficoltà che si presentava inizialmente nel valutare questo parametro era proprio la complessità della sua espressione che viene riportata per completezza dalla (1.6):

$$H = -\lambda \nabla^2 T + \alpha(T - T_\infty) \frac{p}{A} + \sum_i k_i l_i \frac{\sigma_n}{A} (T^4 - T_\infty^4) \quad (1.6)$$

La determinazione di H, e quindi di Q, attraverso questa relazione risulta infatti essere problematica: si richiede infatti la conoscenza di una serie di condizioni al contorno e di parametri relativi al materiale e ai sistemi di trasmissione del calore che ne complicano parecchio la sua valutazione. Inoltre la (1.6) è applicabile solo a sistemi monodimensionali e non è valida dunque neanche per componenti intagliati. Si cerca dunque di valutare l'entità di H (e Q) attraverso una procedura differente per cercare di aggirare le difficoltà appena presentate.

Ripartiamo dunque dalla relazione (1.1), riscrivendola in termini di potenza:

$$W f = \left( \rho c \frac{\delta T}{\delta t} + E_p \right) + H \quad (1.7)$$

Dopo un certo periodo di tempo dell'applicazione della sollecitazione di fatica il materiale raggiunge un equilibrio termico con l'ambiente e la sua temperatura si stabilizza e si mantiene costante nel tempo e per ogni punto del componente. In queste condizioni la (1.7) si può semplificare come segue:

$$W f = E_p + H \quad (1.8)$$

Dove H si ricorda essere la potenza termica dissipata, stimata per un dato punto del componente.

Si supponga ora di fermare la prova di fatica all'istante  $t^*$  e di registrare l'andamento della temperatura in un certo punto. Il risultato della misura sarà del tipo mostrato in figura 1.4 in cui la temperatura stabilizzata del materiale tende alla temperatura ambiente con un certo gradiente.



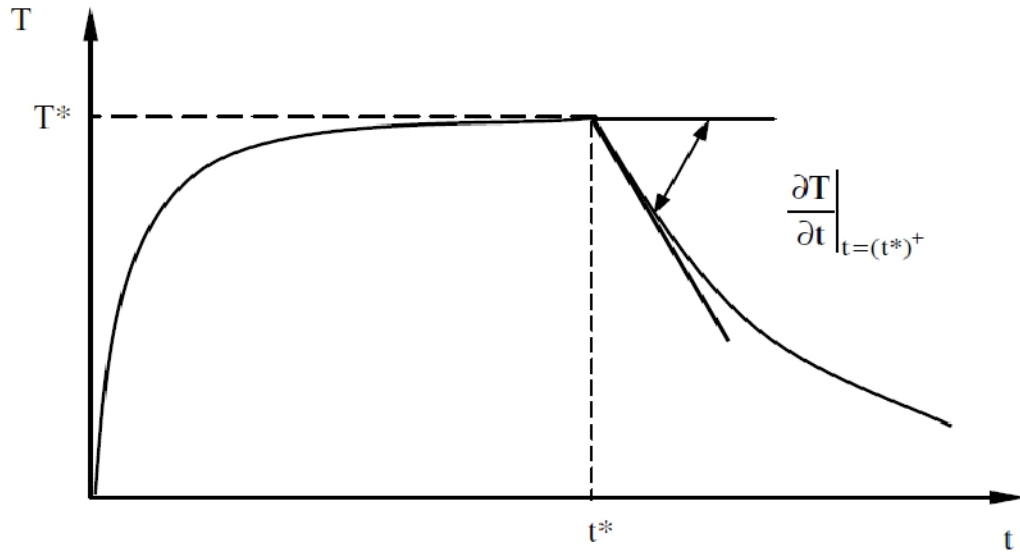


Figura 1.4 esempio di raffreddamento [1]

Si può a questo punto fare una valutazione. Per un punto immediatamente precedente all'istante  $t^*$  vale la relazione in termini di potenza (1.8) in cui la temperatura è costante nel tempo, mentre per un punto immediatamente successivo a  $t^*$  bisogna considerare la relazione generale (1.7) dove però, i termini  $W$  ed  $E_p$  sono nulli in quanto la prova a fatica è stata fermata. Si perviene dunque alla relazione seguente:

$$H = -\rho c \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1.9)$$

Si può affermare che il termine  $H$  determinato con la (1.9) è lo stesso delle equazioni prima considerate poichè il campo di temperatura e le condizioni al contorno non variano nel tempo dopo l'istante  $t^*$ . L'equazione (1.9) appena trovata mostra che, per un dato materiale e in un certo punto del componente, la potenza dissipata per unità di volume  $H$  può essere ricavata attraverso la valutazione del gradiente di raffreddamento osservato dopo che la prova di fatica viene fermata.

L'energia specifica viene conseguentemente ricavata dall'espressione seguente:

$$Q = \frac{H}{f} \quad (1.10)$$

dove  $f$  è la frequenza alla quale viene eseguita la prova a fatica.

Si deduce come questo metodo di valutazione di H (e Q) non richieda che il campo di temperatura sia monodimensionale e questo aspetto consente a tale approccio di poter essere applicato anche ai componenti intagliati. Un ulteriore vantaggio deriva dal fatto che non è necessaria la conoscenza di tutte quelle condizioni al contorno presenti nella (1.3) in quanto l'energia specifica Q, valutata con questo metodo, risulta esserne indipendente.

Per comprendere cosa effettivamente si fa dal punto di vista pratico quando si utilizza l'approccio sopra citato viene riportato un esempio di applicazione del metodo tratto da [2].

Due serie di provini di differente geometria, uno liscio ed uno intagliato, vengono sottoposti a prove di fatica a rapporto di ciclo  $R=-1$  a diverse condizioni di carico. Durante la prova viene misurata la temperatura e quando questa stabilizza, si esegue in vari momenti della vita del provino un raffreddamento interrompendo istantaneamente la prova e continuando a misurare la temperatura. Il risultato di tale misura viene riportato a titolo di esempio nelle figure seguenti:

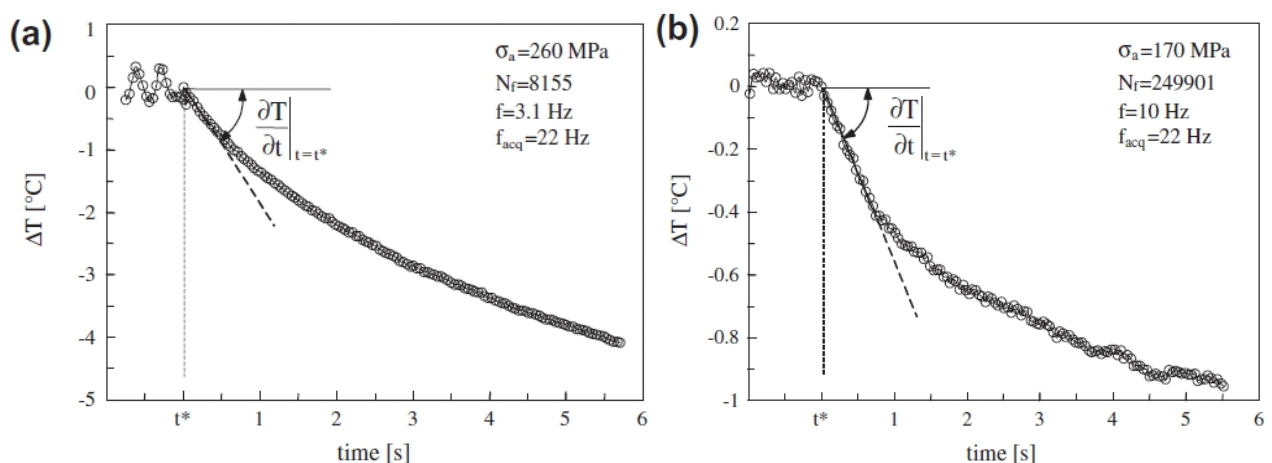


Figura 1.5 grafici Temperatura-tempo di acquisizione per  $R=-1$  dopo che il test a fatica è stato fermato nel caso di test in controllo di deformazione (a) e in controllo di forza (b). [2]

Attraverso la valutazione della pendenza della curva a inizio raffreddamento, ovvero del gradiente, si ricava il valore di H con la (1.9) e quindi di Q con la (1.10). Ripetendo questa misura in momenti diversi della vita di un provino si ottiene per una determinata prova e quindi per un certo livello di carico o per un certo livello di deformazione imposto, un particolare andamento di Q in funzione del numero di cicli eseguiti. Il risultato di queste misurazioni viene riportato di seguito nelle figure 1.6a e 1.6b [2] relative rispettivamente a prove eseguite in controllo di deformazione ed in controllo di forza su un acciaio inossidabile AISI304L.

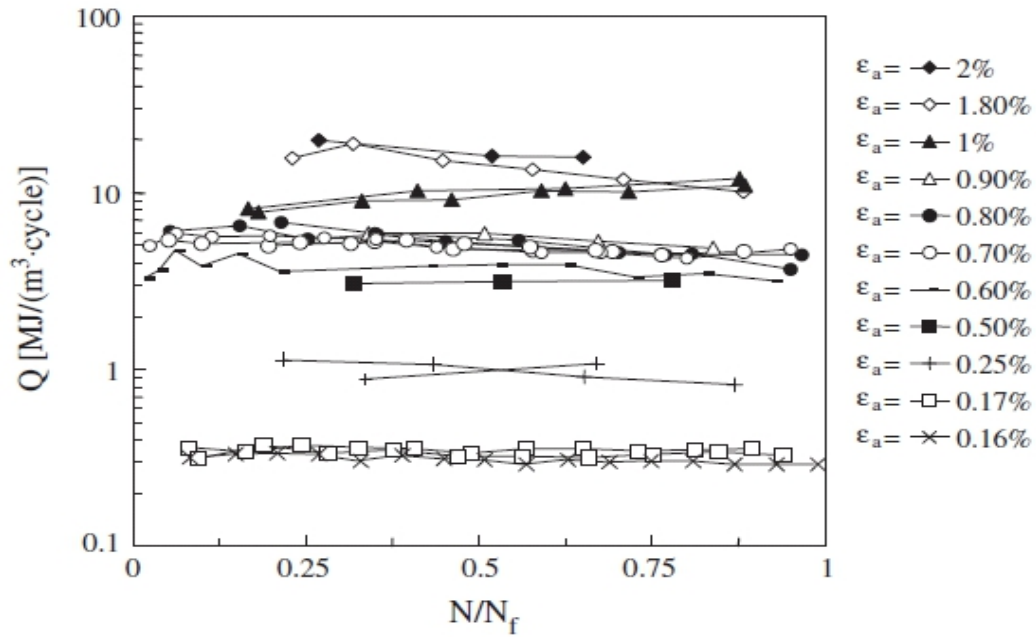


Figura 1.6a esempio di grafici Energia specifica dissipata-frazione della vita a fatica per diversi livelli di deformazione in provini lisci di acciaio inossidabile AISI304L [2]

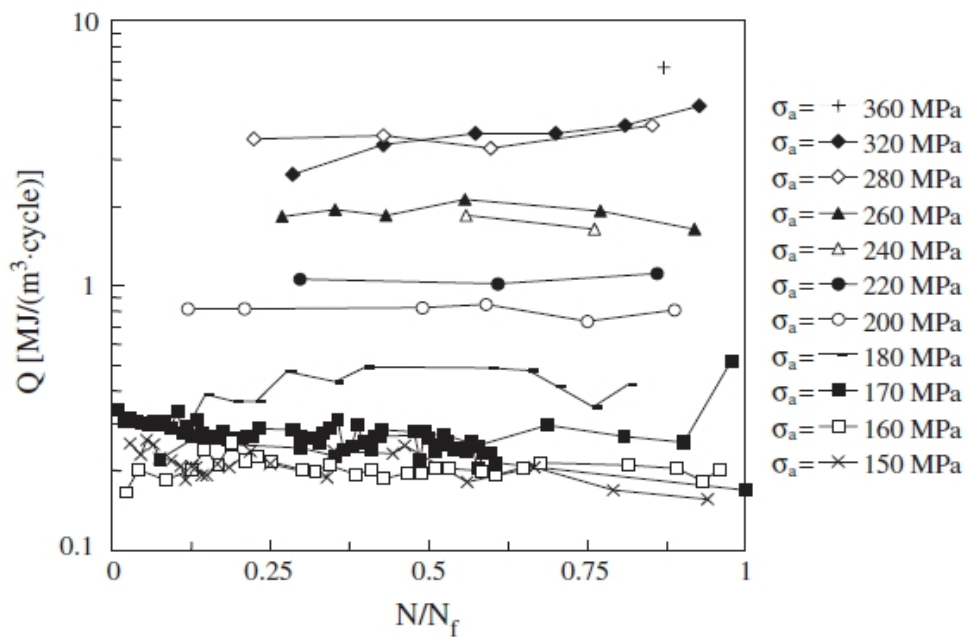


Figura 1.6b esempio di grafici Energia specifica dissipata-frazione della vita a fatica per diversi livelli di carico in provini intagliati di AISI304L [2]

Ciascun provino può dunque essere caratterizzato da un particolare valore dell'energia specifica dissipata  $Q$  e tale parametro può essere utilizzato per la stima della vita a fatica del componente.

Poichè nella realtà sperimentale il valore di  $Q$  non rimane costante durante la prova ma varia entro un certo intervallo si assume come regola per la sua determinazione la seguente: nel caso i valori si presentino con un platò si prende il valore medio di  $Q$  altrimenti si considera il valore misurato al 50% della totale vita a fatica, in accordo con una regola sperimentale che, nel caso in cui si abbiano parametri che variano durante tutta la prova, propone di considerare come rappresentativi quelli a metà vita. Questi valori di  $Q$  così determinati sono infine plottati in un grafico doppio logaritmico in funzione del numero di cicli o alternanze a rottura come mostrato nel grafico di figura 1.7:

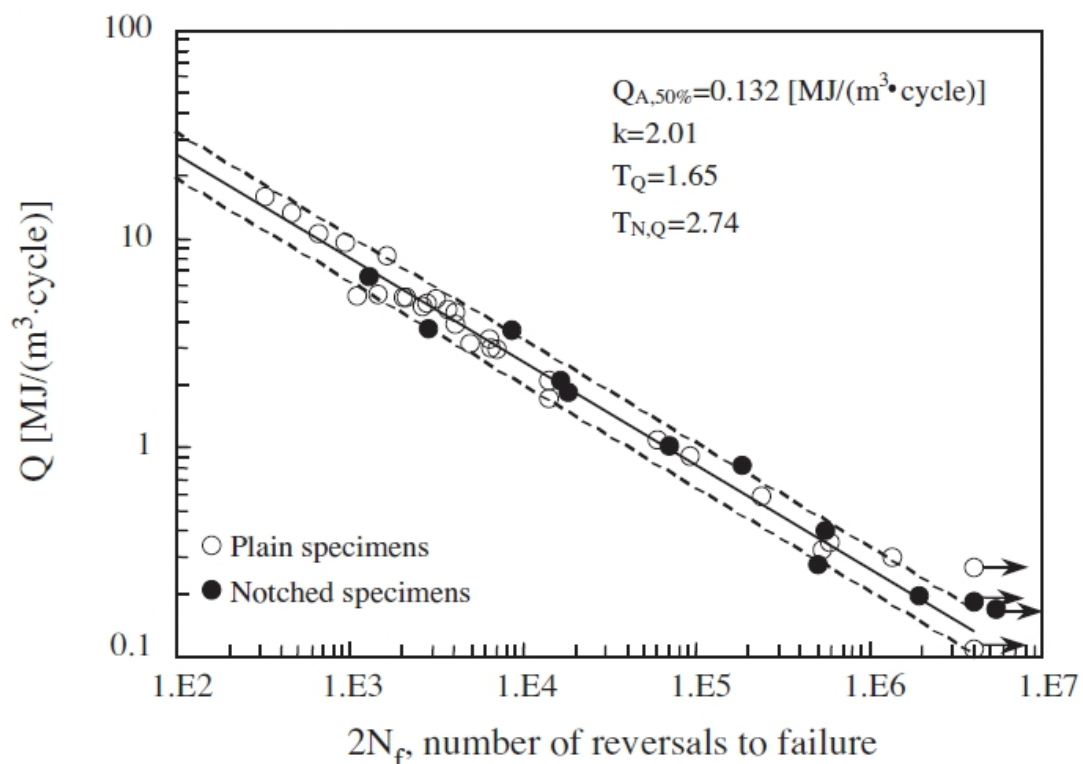


Figura 1.7 sintesi dei risultati della prova a fatica su provini lisci e intagliati in termini di energia specifica rilasciata in un acciaio inossidabile AISI304L [2]

Il grafico di figura 1.7 mostra che i punti sperimentali possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione. La curva al 50% di probabilità di sopravvivenza, così come quelle al 10% e al 90% tratteggiate in figura, risulta essere in un grafico doppio logaritmico una retta a pendenza costante e di equazione del tipo (1.11):

$$Q^k 2N_f = cost \quad (1.11)$$

dove  $2N_f$  è il numero di alternanze a rottura e  $k$  la pendenza della curva. Si deve mettere in evidenza che i dati relativi a provini lisci e quelli relativi ai provini intagliati possono essere riassunti da un'unica curva e questo sta ad indicare che il parametro  $Q$  valutato con il metodo esposto in questo capitolo sia indipendente dalla forma dell'eventuale intaglio presente nel provino e che possa essere definito sperimentalmente per ogni punto del componente. Questa curva quindi potrebbe essere utilizzata come curva di progetto per stimare la vita a fatica di un componente prima dell'innescio di una cricca. Infatti, dato un componente dello stesso materiale e con le stesse condizioni di carico con la quale è stata costruita la curva di figura 1.7 , posizionando su di esso una termocoppia e valutando come precedentemente descritto l'energia specifica dissipata  $Q$  se ne potrà stimare la vita a fatica.

Il vantaggio maggiore di utilizzare questo parametro è quello che permette una misura diretta sul componente in esercizio, in particolare sul punto critico in cui avrà molto probabilmente origine la cricca. La validità del metodo è stata recentemente dimostrata in [3] , dove, una volta evidenziato che l'energia dissipata  $Q$  è indipendente dalle condizioni al contorno ed è dunque un parametro caratteristico per un certo tipo di materiale e per prefissate ampiezze di tensione e tensione media, è stata presentata una sintesi di risultati di prove a fatica a trazione alterna eseguite su provini lisci e intagliati in acciaio inossidabili AISI304L.

La limitazione principale di questo metodo è la sua non estendibilità anche ai casi di tensione media non nulla senza la necessità di una taratura della curva caratteristica per ogni valore della tensione media.

### **1.3 OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO DI TESI**

Questo lavoro di tesi si basa su una serie di prove sperimentali nelle quali dei provini di acciaio inossidabile AISI304L vengono sollecitati a prove di fatica assiali e torsionali. Per le due diverse modalità di sollecitazione verranno eseguite prove a diverso rapporto di ciclo, in particolare verranno eseguite prove a fatica assiale a rapporto di ciclo  $R-1$  e  $R0,1$  e prove di fatica torsionali a rapporto di ciclo  $R-1$  e  $R0,1$ .

I risultati di tutte le prove saranno poi analizzati sia in termini di ampiezze di tensione, utilizzando l'approccio classico sullo studio della fatica, sia in termini energetici attraverso la valutazione del parametro densità di energia dissipata  $Q$ , utilizzando il modello Meneghetti 2007 precedentemente descritto.

Gli obiettivi principali del lavoro sono:

- confermare i vantaggi dell'approccio energetico riscontrati in precedenti lavori, in particolare confrontando i risultati ottenuti con quelli recentemente pubblicati dall'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) [3]

- valutare la possibilità di riassumere i risultati di prove eseguite a diverso rapporto di ciclo in un'unica curva, estendendo la validità dell'approccio energetico anche ai casi di tensione media non nulla senza la necessità di una taratura della curva caratteristica per ogni valore della tensione media
- valutare la possibilità di riassumere i risultati di prove eseguite con diverse modalità di sollecitazione (assiali e torsionali) in un'unica curva di progetto in modo da rendere lo studio della fatica indipendente dal tipo di sollecitazione applicata

L'ottenimento di tutti e tre gli obiettivi attraverso l'approccio energetico renderebbe lo studio del fenomeno della fatica molto più semplice rispetto all'approccio classico basato sulle curve di Woehler in quanto significherebbe rendere indipendente l'analisi dalla geometria del componente, dal tipo di sollecitazione applicata e dalla presenza di una sollecitazione media non nulla.

## **CAPITOLO 2**

### **ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA ASSIALE**

#### **2.1 DESCRIZIONE DELLA PROVA**

Le prove da eseguire consistono nel sottoporre diversi provini dello stesso materiale e con la stessa geometria ad una sollecitazione di fatica a diversi livelli di tensione monitorando l'andamento della temperatura nella sezione minima del provino, ovvero dove la tensione è massima e pari a quella nominale, durante tutta la prova.

Una volta raggiunta la stabilizzazione della temperatura si arresta la prova istantaneamente e si scansiona, al massimo della frequenza di acquisizione, la diminuzione di temperatura nel tempo andando dunque a ricavare il gradiente di raffreddamento, indispensabile per il calcolo dell'energia dissipata dal materiale che è poi l'obiettivo principale delle prove. I raffreddamenti vengono eseguiti durante diverse fasi della vita del provino in modo da poter valutare l'andamento dell'energia dissipata durante tutta la prova.

Per la maggior parte delle prove è stato montato sul provino un estensometro assiale per poter valutare con più precisione sia l'andamento della deformazione e conseguentemente anche della rigidità, sia l'area dei cicli di isteresi che rappresenta l'energia meccanica effettivamente fornita dall'esterno al materiale.

Spesso è stato inoltre utilizzato un ventilatore per poter aumentare la frequenza di prova tra un raffreddamento e l'altro senza che la temperatura del provino superasse i 65°C in modo da non compromettere le proprietà fisiche del materiale.

Sono state eseguite 15 prove assiali a rapporto di ciclo  $R=-1$  con ampiezze di tensione variabili tra i 240MPa e i 400MPa e 16 prove ad  $R=0,1$  con ampiezze di tensione comprese tra i 200MPa e i 300MPa.

## 2.2 MATERIALE

Il materiale utilizzato per la prova è l'acciaio inossidabile AISI 304L che è stato fornito da Acciaierie Valbruna S.p.A. in barre cilindriche trafilate a freddo di diametro  $\phi = 25\text{mm}$  h9 e lunghezza 3 metri.

Si tratta di un acciaio inossidabile austenitico alto legato la cui composizione chimica prevista, riportata dalla stessa casa fornitrice, è presentata in tabella 2.2.1.

Tabella 2.2.1 Elementi di lega per l'acciaio AISI 304 L , da Acciaierie Valbruna Spa

AISI 304L									
C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Cu %	Ni %	P %	S %	N %
0,013	0,58	1,81	18,00	0,4	0,55	8,00	0,031	0,023	0,080

Le caratteristiche meccaniche e fisiche fornite dal produttore dopo un test allo stato di fornitura per questo materiale sono invece riportate in tabella 2.2.2.

Tabella 2.2.2 Proprietà fisiche e meccaniche per l'acciaio AISI 304 L dopo test allo stato di fornitura , da Acciaierie Valbruna Spa

TEST ALLO STATO DI FORNITURA									
Temp °C	Snerv. <b>Rp 0,2%</b> N/mm <sup>2</sup>	Snerv. <b>Rp 1%</b> N/mm <sup>2</sup>	Resist. <b>Rm</b> N/mm <sup>2</sup>	Allung. <b>A5</b> %	<b>E 4d</b> %	Strizione <b>Z</b> %	<b>RA</b> %	Resilienza <b>KV</b> J	Durezza <b>HB</b> J
min	207	225	517	20	40	-	50	100	140
max			900						235
20	468	521	691	43	45	52	52	168 174 175	230

È stato inoltre eseguito un controllo metallografico presso il laboratorio di analisi metallografiche DTG dell'Università di Padova prendendo come campione un pezzo di materiale tagliato da un provino che ha raggiunto il limite di fatica di 2 milioni di cicli. I risultati dello studio sono riportati qui di seguito. Come si può vedere dalle immagini di figura 2.2a,b, dove è mostrata la sezione longitudinale sede delle analisi, la zona di indagine è stata suddivisa in tre parti che presentano caratteristiche diverse: il bordo, la zona intermedia e la mezzeria. La forma data ai provini per questa campagna di prove, riportata in figura 2.3.1, porta ad avere nella sezione minima un diametro  $\Phi = 15\text{mm}$ . Questa dimensione corrisponde all'estensione della zona di mezzeria (fig. 2.2b). Le caratteristiche della sezione minima dei provini saranno dunque corrispondenti a quelle ricavate per la zona di mezzeria.



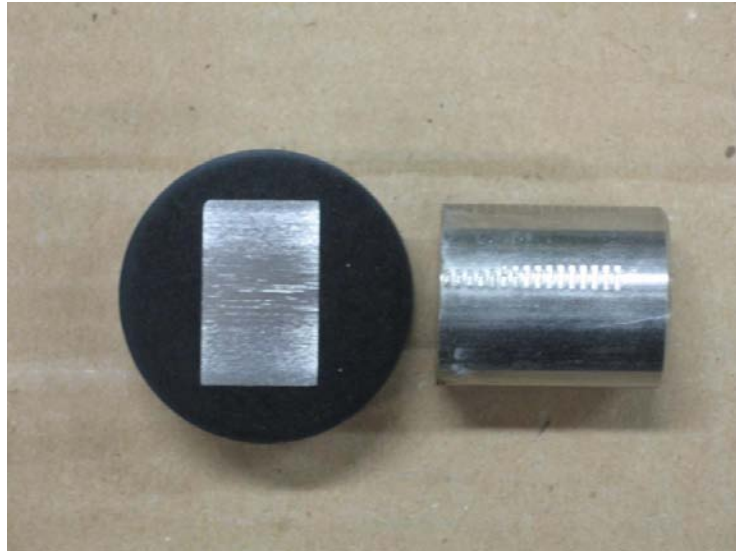


Figura 2.2a Foto della sezione metallografica

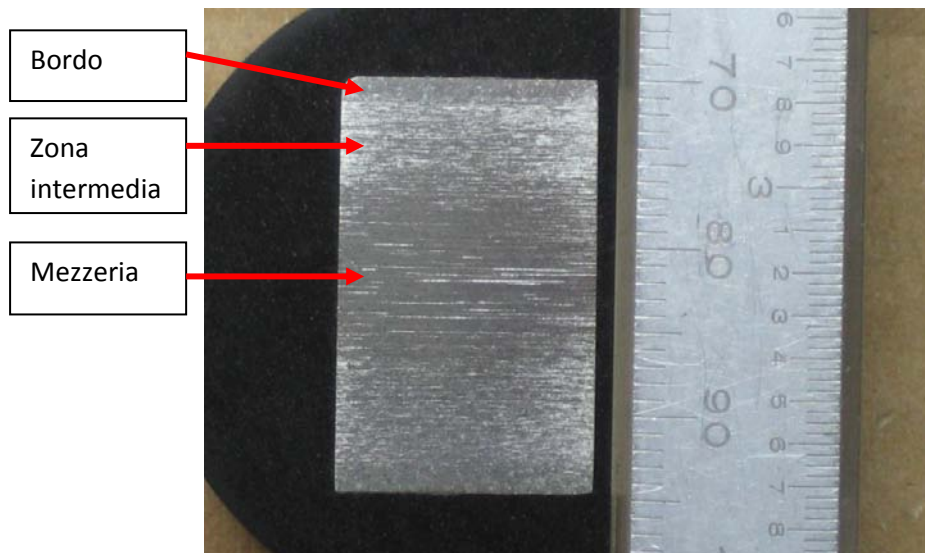
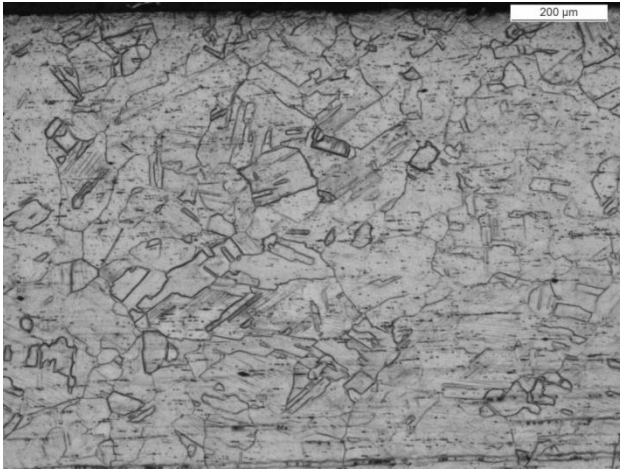


Figura 2.2b In figura si osservano le tre zone interessate dall'indagine

Nella figura 2.2c sono invece riportate le immagini al microscopio con ingrandimenti di 50x e 100x relativi alle tre diverse zone.



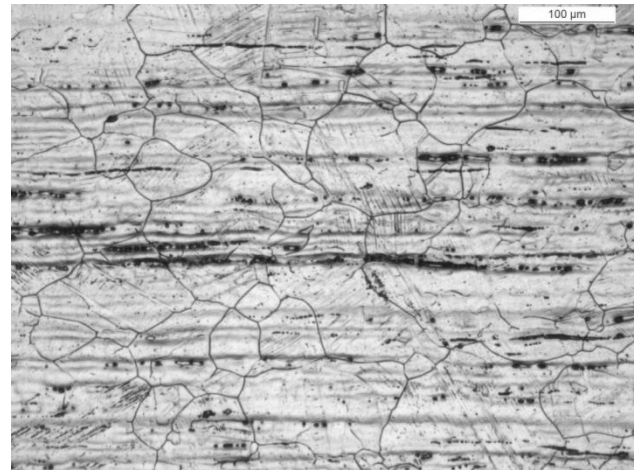
Bordo 50x



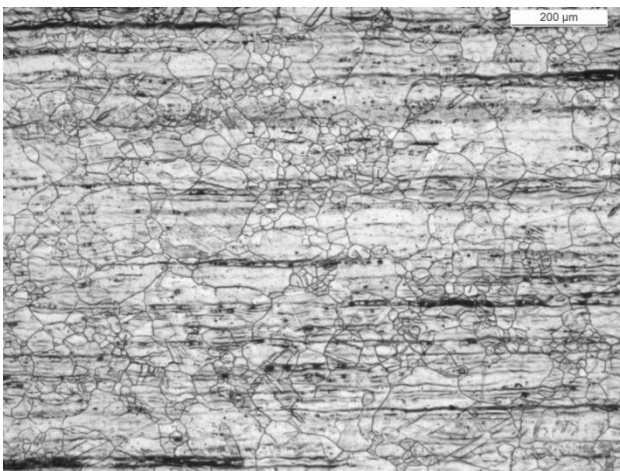
Bordo 100x



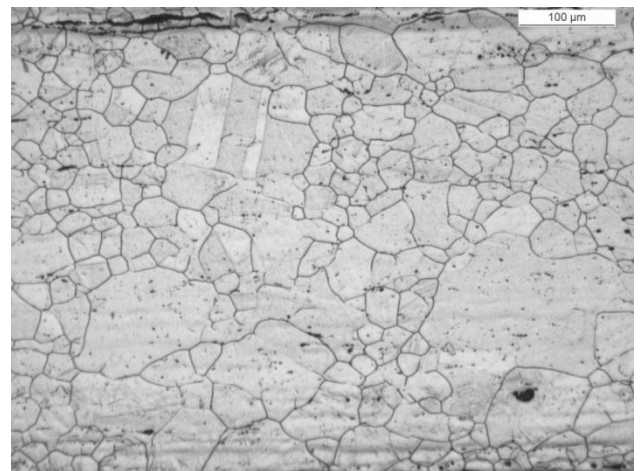
Zona intermedia 50x



Zona intermedia 100x



Mezzeria 50x

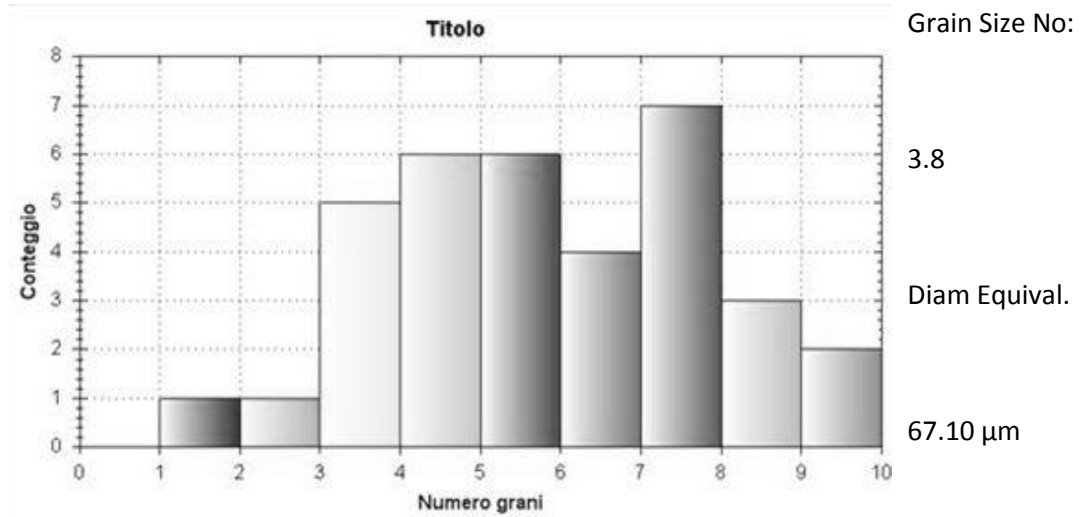


Mezzeria 100x

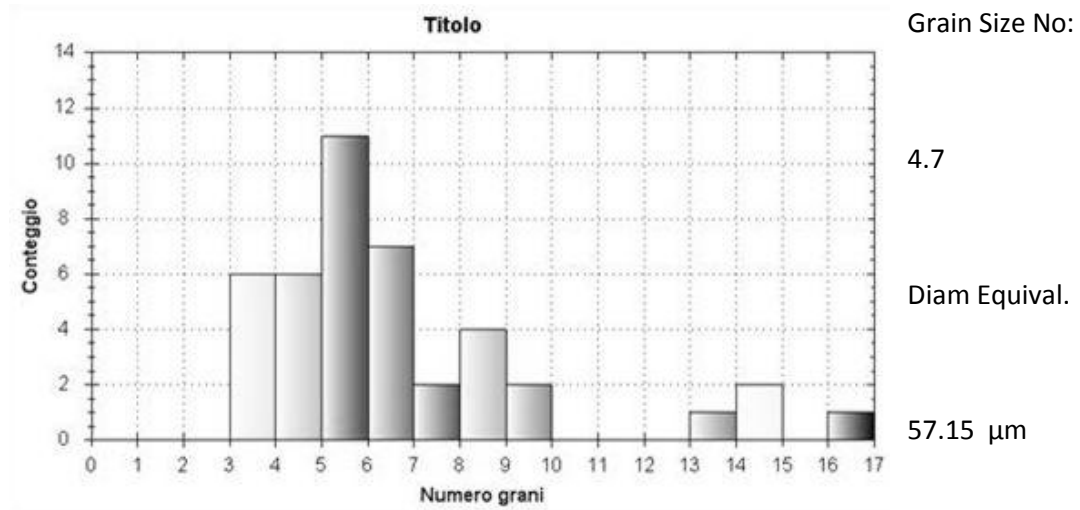
Figura 2.2c Immagini delle tre zone ingrandite al microscopio

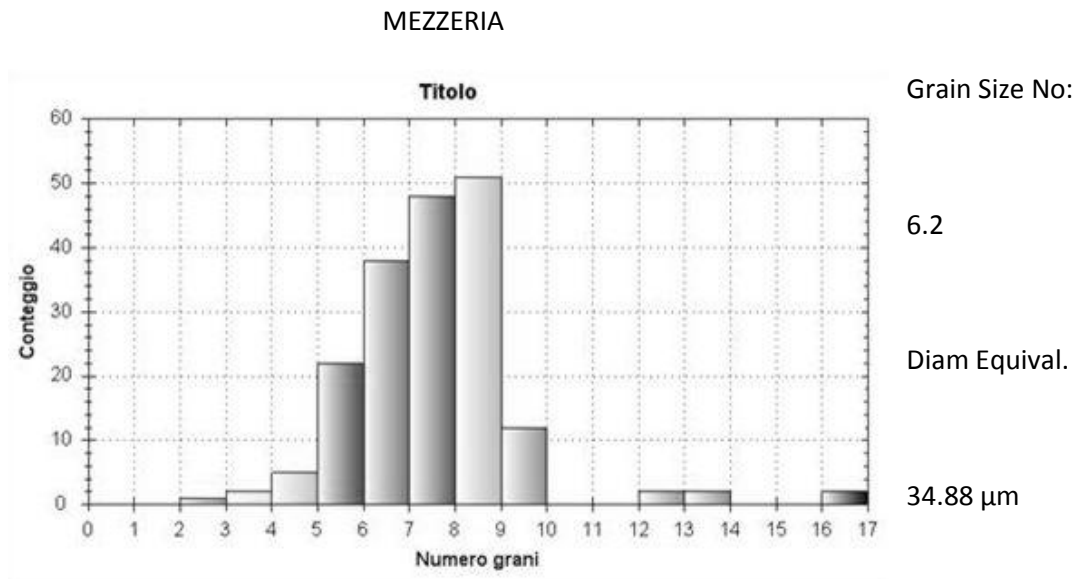
Si è fatta poi una valutazione delle dimensioni grano delle tre zone ricavando per ciascuna il numero dei grani e il diametro equivalente:

**BORDO**



**ZONA INTERMEDIA**





Quello che interessa maggiormente sono i diametri equivalenti dei grani calcolati per le varie zone della sezione analizzata che sono riassunti qui di seguito:

Mezzeria :                   DIAMETRO EQUIVALENTE 34,88 μm  
 Zona intermedia :       DIAMETRO EQUIVALENTE 57,15 μm  
 Bordo :                     DIAMETRO EQUIVALENTE 67,10 μm

Infine è stata misurata la durezza Vickers HV30 per le tre zone di analisi. Sono state effettuate per ciascuna zona 2 misurazioni. Si farà poi riferimento al valor medio:

Mezzeria : HV 30 = 193/205   HV<sub>MEDIA</sub> = 296 HV 30  
 Zona intermedia : HV 30 = 229/229                               HV<sub>MEDIA</sub> = 229 HV 30  
 Bordo : HV 30 = 262/251    HV<sub>MEDIA</sub> = 256 HV 30

Per assicurarsi dei dati forniti dal fornitore sono state eseguite 2 prove statiche in regime elastico per la determinazione del modulo elastico, ed una prova statica per la determinazione della tensione di snervamento  $\sigma_{p0,2}$  e della tensione di rottura. Il risultato della prova statica è riportato nel grafico di figura 2.2d mentre nella successiva tabella 2.2.3 vengono riportati i dati ottenuti. Il valore del modulo elastico è stato ricavato come media dei valori ottenuti dalle due prove.

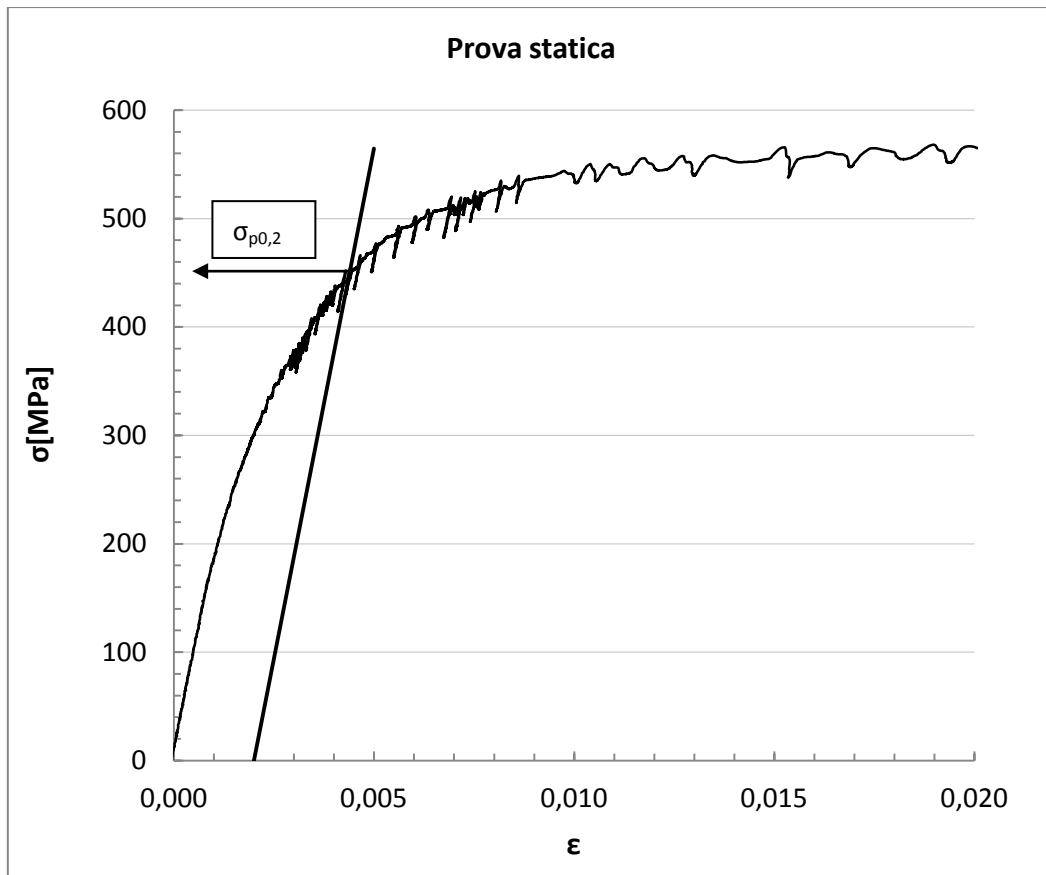


Figura 2.2d Grafico  $\sigma$ - $\epsilon$  nella prova di trazione statica

Tabella 2.2.3 Caratteristiche meccaniche ricavate dalle prove di trazione statica

<b>E [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{p0,2}</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_R</math> [MPa]</b>
<b>192192</b>	<b>450</b>	<b>683</b>

I valori ricavati dalle prove statiche sono compatibili con quelli forniti dalle Acciaierie Valbruna SpA che saranno dunque presi come riferimento in tutto il lavoro di tesi. Vengono riportate per completezza le immagini di un provino rotto staticamente.



Figura 2.2e Immagini della superficie di frattura statica e della zona di strizione

## 2.3 PROVINI

I provini utilizzati nelle prove di fatica sono stati ottenuti da barre di diametro  $\varnothing = 25\text{mm}$  h9, tagliando tondi di lunghezza  $L = 230\text{mm}$  che sono stati successivamente lavorati con il tornio a controllo numerico per ottenere la geometria visibile in figura 2.3.1.

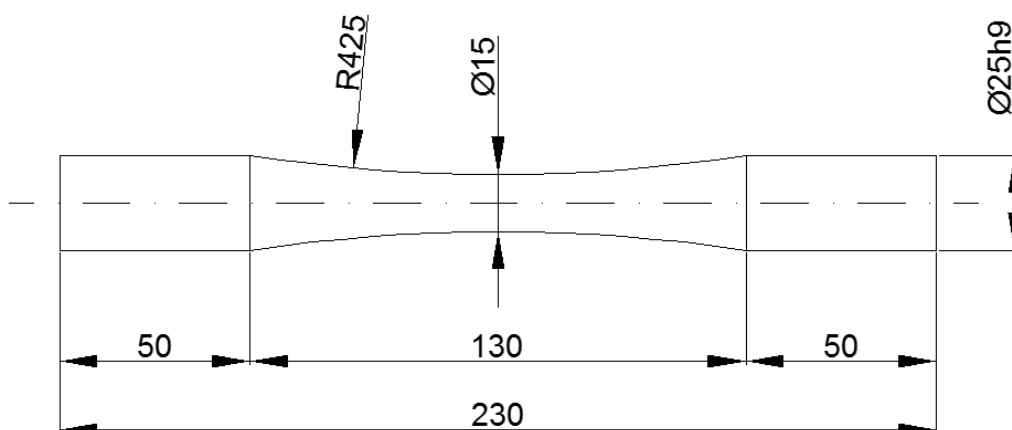


Figura2.3.1 Geometria provini per prove a fatica

La particolare forma a clessidra è stata scelta per la possibilità di poter prevedere la sezione di innesco della cricca. Un raggio così elevato  $R=425\text{mm}$  consente inoltre di avere un coefficiente di concentrazione delle tensioni molto prossimo ad 1 e quindi trascurabile ai fini del calcolo della tensione nella sezione minima. Si riporta in figura 2.3.2 un esempio di provino utilizzato nelle prove.



Figura 2.3.2 Provino utilizzato nella presente campagna di prove

## 2.4 PREPARAZIONE DEI PROVINI

Durante la prova a fatica è necessario effettuare un costante monitoraggio della temperatura del provino in corrispondenza della sezione ristretta dello stesso dove le tensioni sono mediamente più elevate e di conseguenza si ha anche il massimo della generazione termica. Per far ciò si utilizzano delle termocoppie tipo T rame-costantana che vengono incollate direttamente alla superficie del provino attraverso l'utilizzo di colla epossidica conduttiva (Codice RS 186-3616) che si ottiene dalla miscela al 50% in volume di una pasta adesiva ed una pasta indurente come mostrato nella figura 2.4.1.

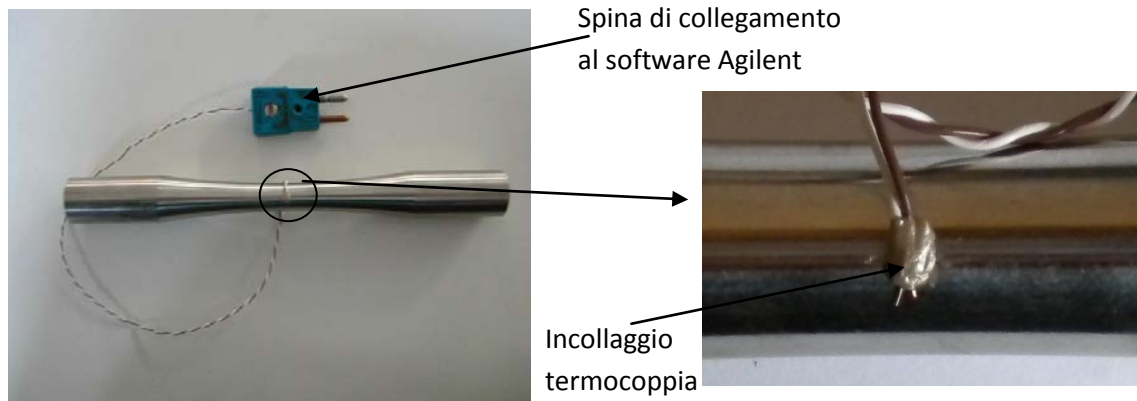


Figura 2.4.1 Provino munito di termocoppia per il monitoraggio della temperatura

La colla ha bisogno di almeno 36 ore a temperatura ambiente per indurirsi ed esercitare la sua funzione, oppure mediante l'utilizzo di un phon ad elevate temperatura sono sufficienti alcuni minuti. È dunque utile applicare preventivamente le termocoppie a più provini in modo da averli già pronti per l'utilizzo. L'altro capo della termocoppia andrà collegato ad una spina che trasferirà i segnali di tensione al dispositivo di acquisizione Agilent Technologies HP 34970° che mostra in tempo reale il valore di temperatura misurato e ne registra l'andamento durante tutta la prova.

## 2.5 DISPOSIZIONE DEL CENTRO DI LAVORO E DESCRIZIONE DELLA MACCHINA MFL ASSIALE

### 2.5.1 Disposizione del centro di lavoro

Le prove a fatica vengono condotte su macchina MFL assiale servo idraulica in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova, che ha una portata massima di 250kN. Per il lavoro è necessario portare in prossimità della macchina tutte le attrezzature indispensabili per l'esecuzione delle prove e che sono indicate in figura 2.5.1a ed elencate di seguito.

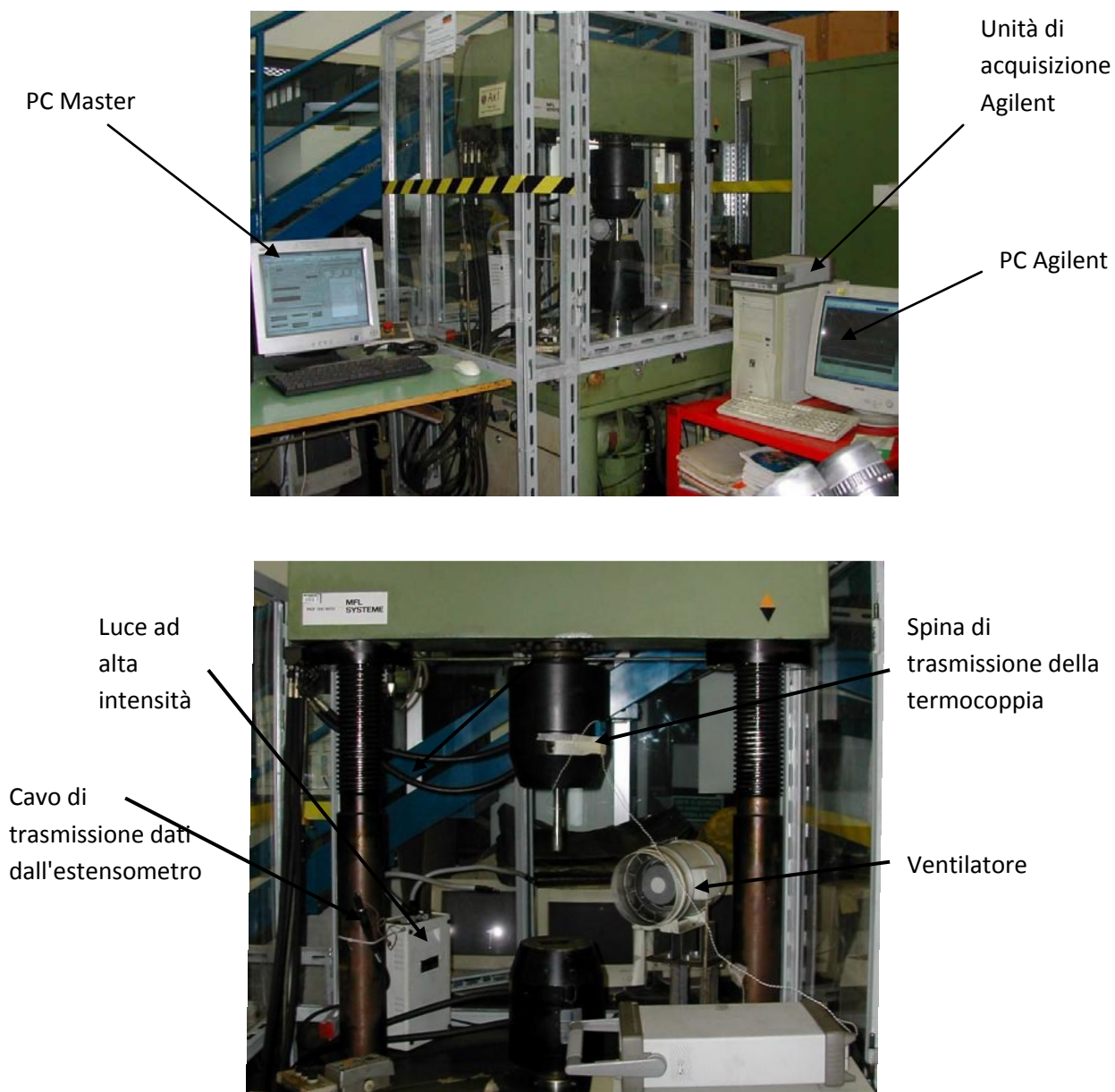


figura 2.5.1a Attrezzature necessarie per l'esecuzione delle prove



- PC Master che utilizza il software MTS Station Manager che controlla la macchina
- PC e acquisitore Agilent che utilizza il software Agilent BenchLink Data Logger per l'acquisizione della temperatura dalla termocoppia
- Ventilatore per l'accelerazione delle prove
- Cavo trasmissione dati dall'estensometro al software MTS Station Manager
- Luce ad alta intensità per controllare la superficie del provino

### 2.5.2 Descrizione della macchina

La macchina di prova MFL assiale è composta principalmente da due ganasce coassiali ad asse verticale una fissa e l'altra mobile. La ganascia fissa è collegata alla traversa superiore che attraverso due accoppiamenti a chiocciola, ben visibili nella figura 2.5.2a, permette la traslazione in direzione verticale per potersi adattare alle diverse dimensioni dei componenti da testare. La ganascia inferiore è invece fissata ad un pistone idraulico ed è la parte mobile che applica effettivamente i carichi di prova a diverse frequenze grazie alla presenza di una servovalvola Moog che comanda i movimenti dell'attuatore.

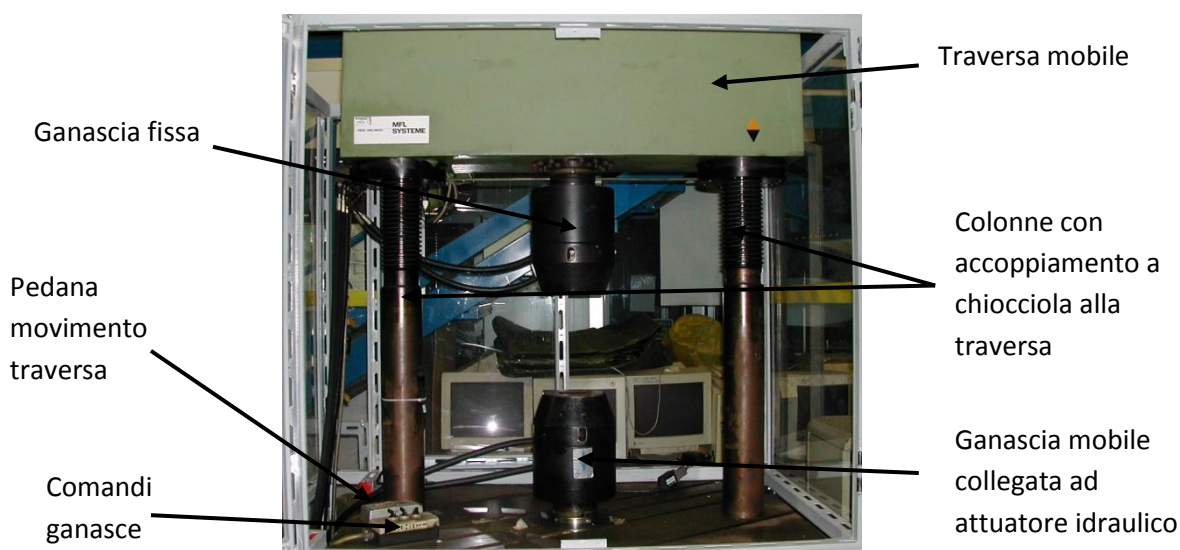


Figura 2.5.2a Componenti della macchina MFL assiale

Vengono descritti di seguito i componenti principali da conoscere per poter effettuare una prova a fatica o statica con MFL assiale.

- Pannello di controllo: è importante sapere che le pompe di alimentazione dei circuiti oleodinamici alimentano sia la macchina MFL assiale qui descritta sia la macchina MFL torsionale che verrà utilizzata nelle prove di torsione. Il pannello di controllo è lo stesso per entrambe le macchine e proprio da qui è possibile

aprire o chiudere uno dei due circuiti attraverso i tasti di commutazione TR1 e TO1 indicati in figura 2.5.2b. Si può quindi utilizzare una sola macchina alla volta e non contemporaneamente.

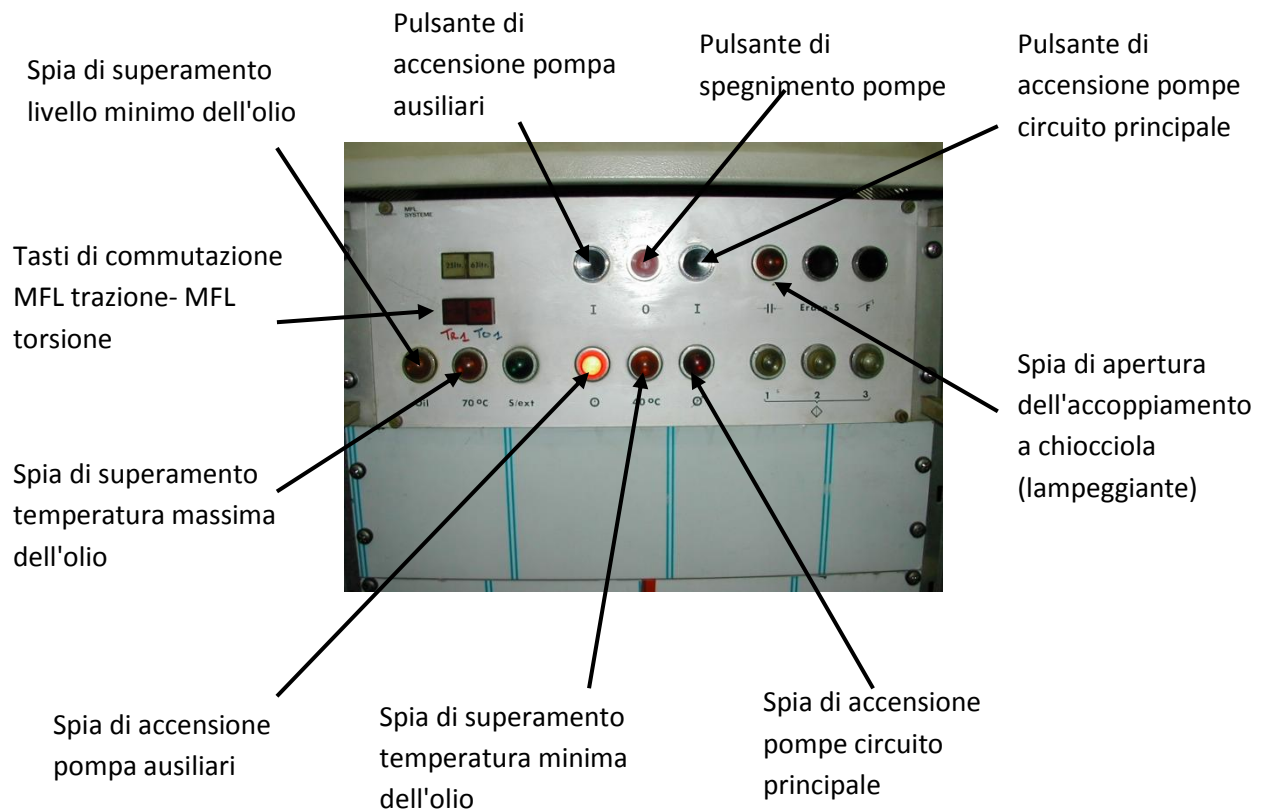


Figura 2.5.2b Pannello di controllo

- Dispositivo locale-remoto: è posto accanto al pannello di controllo, come si vede dalla figura 2.5.2c, e permette di comandare la macchina manualmente (locale) oppure attraverso il software MTS Station Manager (remoto)

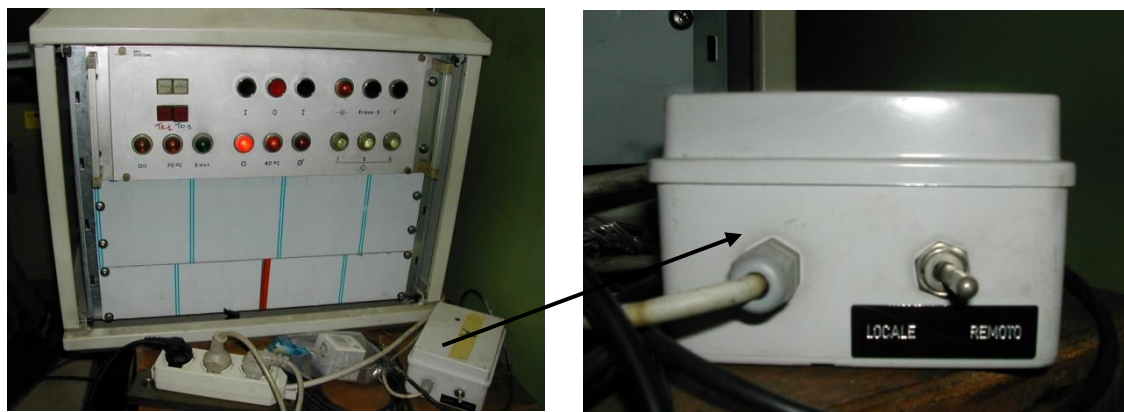


Figura 2.5.2c Dispositivo locale-remoto

Di norma la configurazione locale si utilizza solo nella fase di avviamento mentre durante l'esecuzione delle prove la configurazione è sempre su remoto come verrà meglio spiegato in seguito.

- Ventilatore e rubinetto dell'acqua: all'interno del locale pompe, posto a destra della macchina e visibile in figura 2.5.2d, la temperatura dell'olio che circola attraverso i circuiti deve essere raffreddata in quanto non può superare i 70°C. Questo viene fatto attraverso uno scambiatore acqua-olio, la cui portata d'acqua deve essere variata attraverso un rubinetto posto in fianco alle pompe per permettere all'olio di rimanere nel range di temperatura consentito (40-70°C). Inoltre nella sala è presente un ventilatore di aspirazione che ha la funzione di smaltire il calore prodotto dalle pompe in esercizio e dall'olio proveniente dalle macchine. Questo deve essere sempre acceso quando si accendono le pompe attraverso il tasto posto subito a sinistra della porta di ingresso al locale

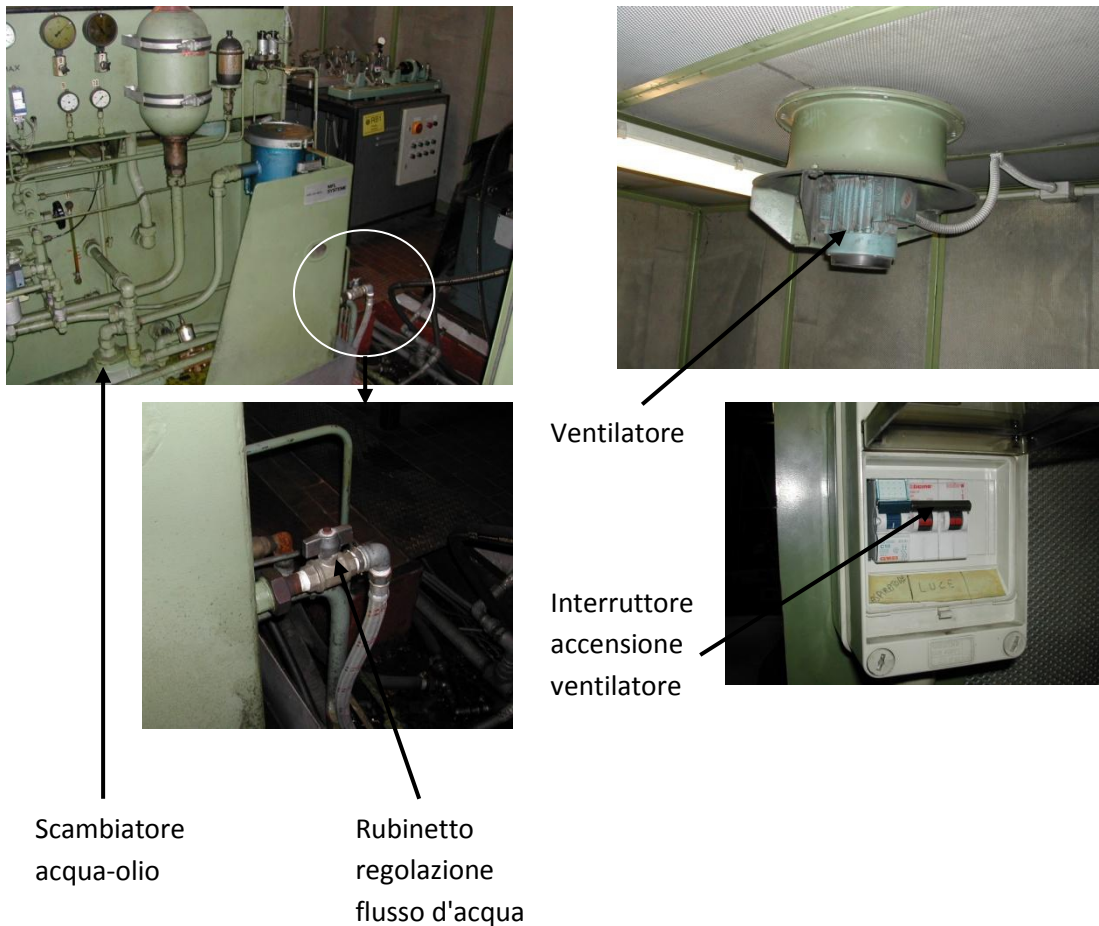


Figura 2.5.2d Rubinetto scambiatore ed aspiratore

- Pedaliera e comando ganasce: sul banco di lavoro della macchina sono presenti una pedaliera e una serie di leve che permettono di comandare il movimento verticale della traversa e la chiusura/apertura delle due ganasce (figura 2.5.2e).

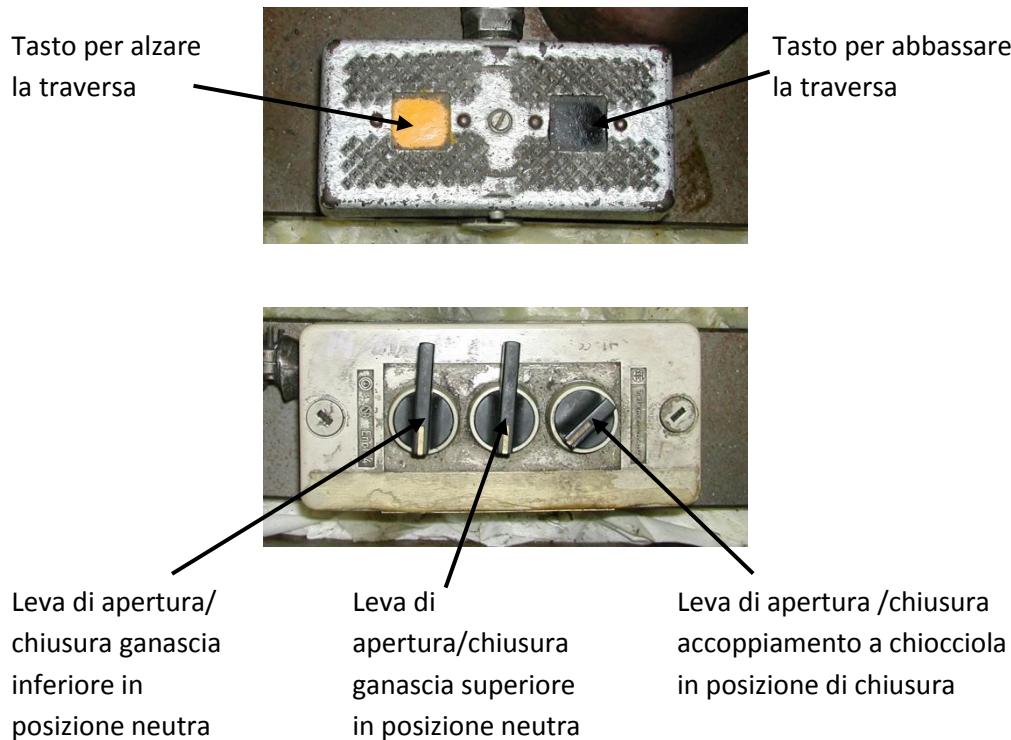


Figura 2.5.2e Pedana di comando per la traversa e leve di comando ganasce

La leva di apertura dell'accoppiamento a chiocciola e del tipo on/off. Può cioè assumere solo 2 posizioni, quella di chiusura (rappresentata in figura 2.5.2e) e quella di apertura che si ottiene ruotando la leva in senso antiorario. La leva deve essere aperta solo quando si deve utilizzare la pedaliera per le operazioni di innalzamento e abbassamento della traversa mentre durante le prove è bene assicurarsi che sia sempre chiusa. Le leve di apertura/chiusura delle ganasce possono invece assumere 3 diverse posizioni. Quella neutra (rappresentata in figura 2.5.2e) alla quale non si verificano movimenti delle ganasce, quella di chiusura, che si ottiene facendo scattare la leva in senso orario e quella di apertura che si ottiene facendo scattare la leva in senso antiorario. È da tenere ben presente che facendo scattare le leve la ganascia corrispondente si chiude o si apre del tutto. Se si vuole invece regolare la chiusura o l'apertura in modo graduale è sufficiente ruotare la leva rispettivamente in senso orario e antiorario senza farla scattare.

### 2.5.3 Descrizione del software che controlla la macchina

La parte di potenza è controllata con il PC posto a sinistra della macchina, denominato PC Master e visibile in figura 2.5.1a, attraverso il software Station Manager che viene avviato direttamente entrando nella cartella MTS TestStar presente sul desktop. Per l'avvio di una prova si rimanda al protocollo di prova descritto di seguito. In questa sezione si vogliono dapprima descrivere i comandi utilizzati e le icone da conoscere per poter eseguire una prova.

Per una migliore comprensione del funzionamento del software si descrivono di seguito i comandi principali e le relative icone dello Station Manager, fondamentali per il controllo della macchina:

La barra Station Controls visibile in figura contiene alcuni dei comandi più importanti:



**Manual Command** : consente di scegliere la modalità di controllo della macchina. È possibile scegliere tra controllo di spostamento e controllo di forza.



**Detectors** : consente di impostare i limiti di spostamento e di forza entro i quali la macchina deve lavorare. Se il segnale di forza o di spostamento, provenienti rispettivamente dalla cella di carico e dal sensore di spostamento(LVDT) della macchina, superano i valori impostati il software blocca istantaneamente la prova togliendo pressione alle pompe principali.



**Auto Offset** : consente di azzerare i segnali di forza, spostamento e deformazione provenienti rispettivamente dalla cella di carico, dall'LVDT e dall'estensometro se presente.

Sotto la barra Station Controls sono presenti i comandi di start/stop della macchina:



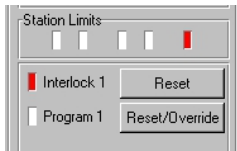
**Program run** : è il tasto di avvio della prova. La macchina inizia ad applicare progressivamente il carico o lo spostamento imposti alla frequenza voluta.



**Program stop** : è il tasto di fermo prova. La macchina porta progressivamente il carico o lo spostamento dal valore di prova a zero.



**Program hold** : è il tasto di arresto prova. La macchina arresta istantaneamente la prova al valore di carico o spostamento in cui si trova nell'istante in cui il tasto viene premuto.



**Reset-Reset/Override** : consentono di resettare eventuali interlock presenti nel programma. Un segnale di interlock, visualizzato da una luce rossa nella barra Station Limits e da un messaggio di errore, indica che uno o più parametri non rispettano i limiti imposti. La presenza di questi segnali non consente l'avvio della macchina. Il tasto Reset/Override consente l'avvio temporaneo anche in presenza di interlock (5 secondi ad ogni clic) ma alla scadenza del tempo non dovrà comunque essere più presente.



**Tasti di Potenza** : possono essere attivati solo in assenza di segnali di interlock o dopo un Reset/Override. Premuti in sequenza, da sinistra a destra, forniscono virtualmente potenza alle pompe. Per procedere con l'effettivo azionamento manuale delle pompe dal pannello di controllo principale (fig. ) il tasto a destra deve essere a luce verde e fissa (non lampeggiante).

Altri icone importanti vengono riportate di seguito:



**Meters** : consente di visualizzare i valori numerici in tempo reale con cui sta operando la macchina. Ad esempio valori massimo e minimo di forza, massimo e minimo di spostamento ecc..



**Scope** : consente di visualizzare in un grafico i valori in tempo reale con cui sta operando la macchina. Ad esempio si possono vedere gli andamenti nel tempo della forza effettivamente applicata e del comando per confrontarli tra loro.



**New Specimen** : consente di creare una cartella di lavoro dove verrà salvato il file.dat contenente i dati di forza, spostamento e deformazioni provenienti dalla cella di carico, dal sensore di spostamento LVDT e dall'estensometro.

Vengono riportati di seguito i comandi e le icone più importanti del MPT Procedure Editor:



**ciclo seno** : consente di impostare i parametri di prova forza massima, forza minima e frequenza.



**acquisizione** : consente di impostare le modalità di acquisizione dei segnali provenienti dalla macchina.



**lucchetto** : per poter avviare la prova è necessario chiudere il lucchetto con un clic sopra la relativa icona. Per poter modificare i parametri il lucchetto deve essere aperto.

#### 2.5.4 Descrizione dei comandi fondamentali

Come anticipato in precedenza, MTS consente di scegliere la modalità di controllo con il quale si vuole comandare/controllare la macchina. Si può controllare la macchina o con riferimento al segnale di forza proveniente dalla cella di carico o con riferimento al segnale di spostamento proveniente dal sensore LVDT che fornisce la posizione dell'attuatore. All'accensione si consiglia di mettersi sempre in controllo di spostamento poiché, essendo la ganaschia inferiore libera di muoversi, non si può prevedere dove il controllo vada a cercare lo zero in forza e il pistone potrebbe uscire per l'intera sua corsa rischiando di urtare la ganaschia superiore. Dalla barra dello Station Controls si clicca dunque sull'icona Manual Command. Viene aperta la finestra visibile in fig. dove, alla voce "Control Mode" è possibile scegliere dal menu a tendina il tipo di controllo che si vuole attivare. Come detto, qui si utilizza il controllo di spostamento. Attenzione che il controllo è effettivamente attivo solo se è presente lo spunto alla voce "Enable Manual Comand" (fig. 2.5.4a).

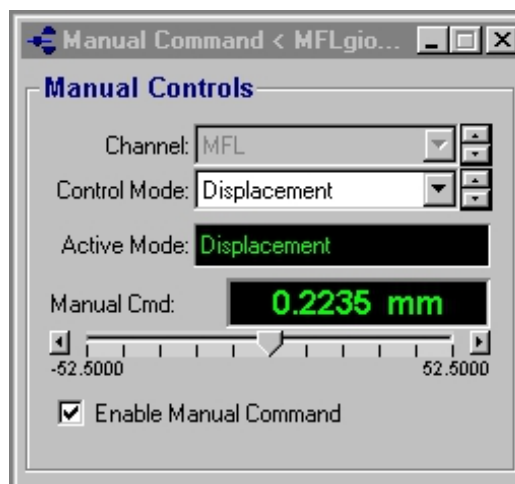


Figura 2.5.4a Finestra relativa al Manual Command

Una volta fornita pressione al circuito principale sarà possibile comandare il movimento dell'attuatore e quindi della ganascia inferiore inserendo il valore di spostamento voluto oppure muovendo il cursore lungo la scala graduata di fig. 2.5.4a. Si vuole far notare che il valore di riferimento di 0.0mm è proprio della configurazione di parametri scelta all'apertura del software e può essere reimpostato in funzione delle esigenze dell'operatore.

Con riferimento all'interfaccia del software MTS che comanda la macchina, visibile in figura 2.5.3a, si vedono delle spie rosse (Interlock) che indicano che la macchina non può partire perchè alcuni parametri non rispettano i valori impostati. MTS permette infatti di impostare i limiti di spostamento e di forza, oltre i quali la macchina viene istantaneamente bloccata spegnendo le pompe principali, attraverso il comando Detectors che apre la finestra visibile in figura 2.5.4b.

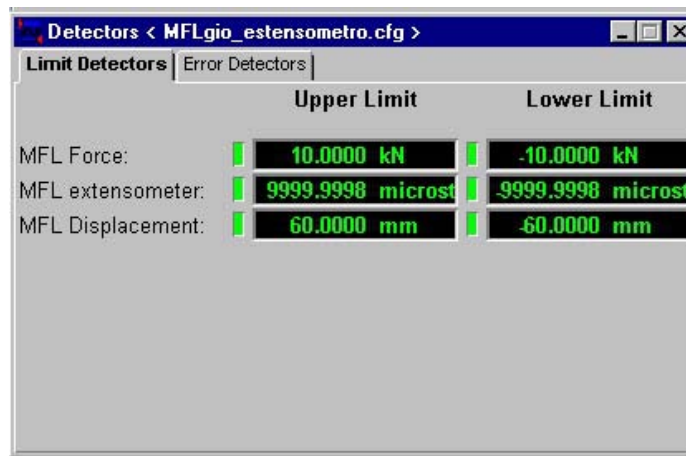


Figura 2.5.4b finestra relativa all'impostazione dei limiti di lavoro (Detectors)

Ricordando che la macchina assume come valori positivi gli spostamenti verso il basso, si consiglia all'avvio di impostare valori dei limiti di spostamento di  $\pm 60,0\text{mm}$  e dei limiti di forza di  $\pm 10,0\text{kN}$  come visualizzato in fig. 2.5.4b. Se si è in controllo di spostamento, com'è stato consigliato, la situazione dello Station Controls, dopo aver impostato i limiti e dopo aver fatto un reset, sarà quella visibile in figura 2.5.4c.



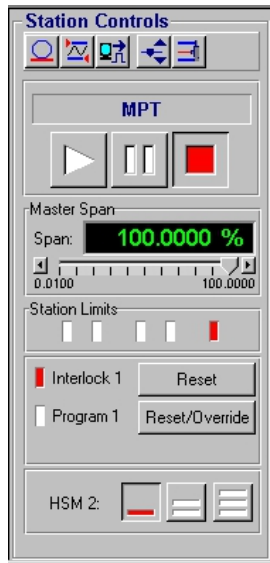


Figura 2.5.4c

Ovvero in controllo di spostamento sarà sempre presente un Interlock dovuto al fatto che l'attuatore, non avendo pressione, si trova in posizione completamente abbassata e il sensore di spostamento LVDT è fuori dal limite inferiore di +60,0mm. Finché l'Interlock è attivo il software non permette l'avvio virtuale delle pompe. C'è però la possibilità di "aggirare" il problema attraverso il comando Reset/Override che, come spiegato in precedenza, permette di effettuare, per un certo periodo di tempo, delle operazioni ignorando l'Interlock. Ad ogni clic sul comando si hanno 5 secondi aggiuntivi per svolgere le azioni necessarie per sollevare il pistone in modo che il sensore LVDT fornisca la corretta posizione dello stesso e l'interlock venga disattivato (ad esempio cliccando 5 volte si hanno  $5 \times 5 = 25$  secondi di tempo). Se si è in configurazione locale (leva locale-remoto) il software non risente degli interlock e quindi dei limiti. Ecco perchè l'avviamento viene fatto in locale.

Per l'effettivo utilizzo dei componenti e del software nell'esecuzione delle prove viene presentato di seguito il protocollo di prova da seguire.

## 2.6 PROTOCOLLO DI PROVA A FATICA SU MFL ASSIALE

### 2.6.1 Accensione e preparazione della macchina

1. Attraverso il computer PC *Master* posto accanto alla macchina (fig. 2.5.1a) aprire il software *Station Manager* con un doppio clic sull'icona *MTS\_TestStar* dal desktop, scegliendo la configurazione di parametri adatta alle modalità della prova che si deve eseguire. In questo lavoro si è seguito il seguente percorso:

*MTS TestStar > Station Manager > MFL Axial > MFLgio\_estensometro.cfg*

con la configurazione di parametri:

*> Giovanni\_estensometro.cfg*

disponibile nel menù a tendina denominato *Parameter Sets* e visibile in figura 2.6.1a.

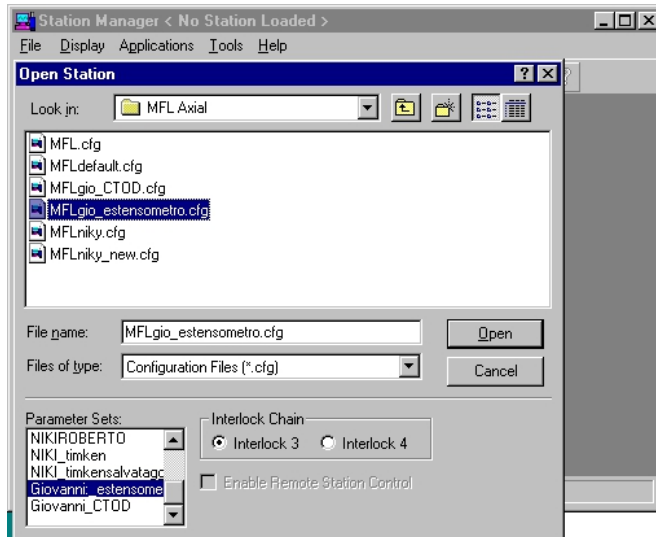


Figura 2.6.1a percorso di apertura del software Station Manager

Nella schermata principale dovranno essere aperte la finestra principale dello *Station Manager* e quella dell' *MPT Procedure Editor*. Dalla finestra *MPT Procedure Editor* si deve scegliere la procedura che si vuole utilizzare. Il percorso da seguire per aprire la procedura voluta è il seguente:

*Open Procedure > C: > tsiim > mpt > Procs > Negrisololo > Trazione\_Forza.000*

Si consiglia inoltre di aprire le finestre di *Scope* e *Meters* per avere un controllo visivo di cosa fa la macchina durante la prova. La schermata completa così ottenuta viene riportata in figura 2.6.1b.

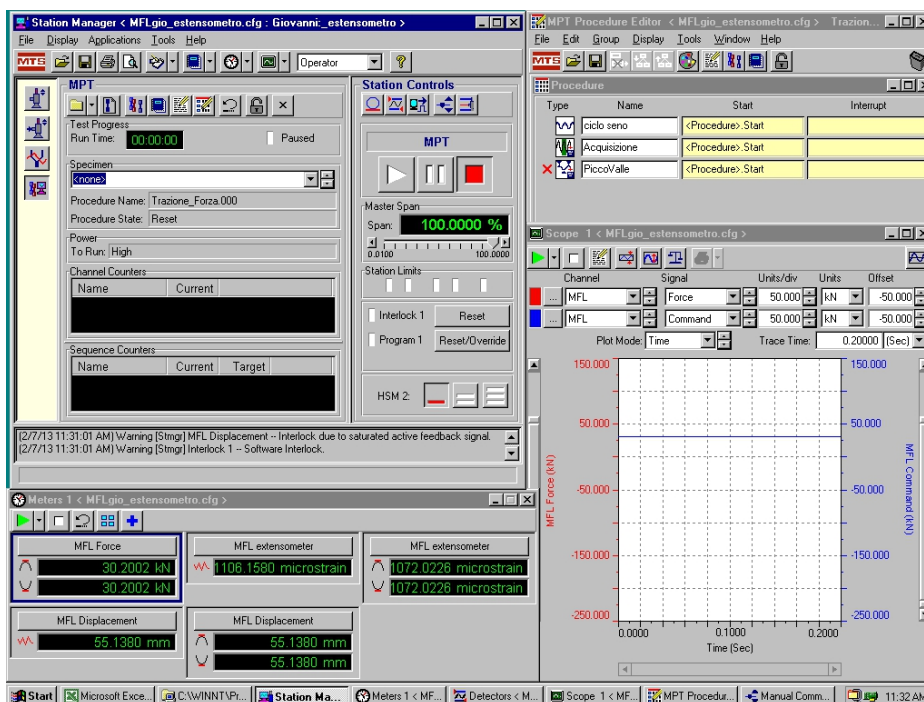


figura 2.6.1b Interfaccia utente prima dell'avvio di una prova

- assicurarsi che la traversa sia alzata abbastanza da restare in sicurezza nel caso di un eccessivo innalzamento del pistone
- il pannello di controllo principale si presenterà come in figura 2.6.1c con la spia della temperatura dell'olio accesa. Posizionare la leva locale-remoto su locale (figura 2.6.1d) e accendere in sequenza la pompa degli ausiliari e le pompe del circuito principale come evidenziato nelle figure 2.6.1e,f. Accendere anche il ventilatore del locale pompe



Figura 2.6.1c Spia temperatura dell'olio



Figura 2.6.1d Leva comando locale-remoto



Figura 2.6.1e Accensione pompa ausiliari



Figura 2.6.1f Accensione pompe principali

- attendere che l'olio superi i 40 °C. A questo punto la macchina spegne automaticamente le pompe principali mentre resta accesa quella relativa agli ausiliari
- dallo *Station Manager* aprire la cartella *Manual Command* relativa alle modalità di controllo della macchina e dal menù a tendina relativo al *Control Mode* scegliere la voce *Displacement* mettendo inoltre lo spunto alla voce *Enable Manual Command* per acquisire il controllo della macchina in spostamento (figura 2.6.1g).

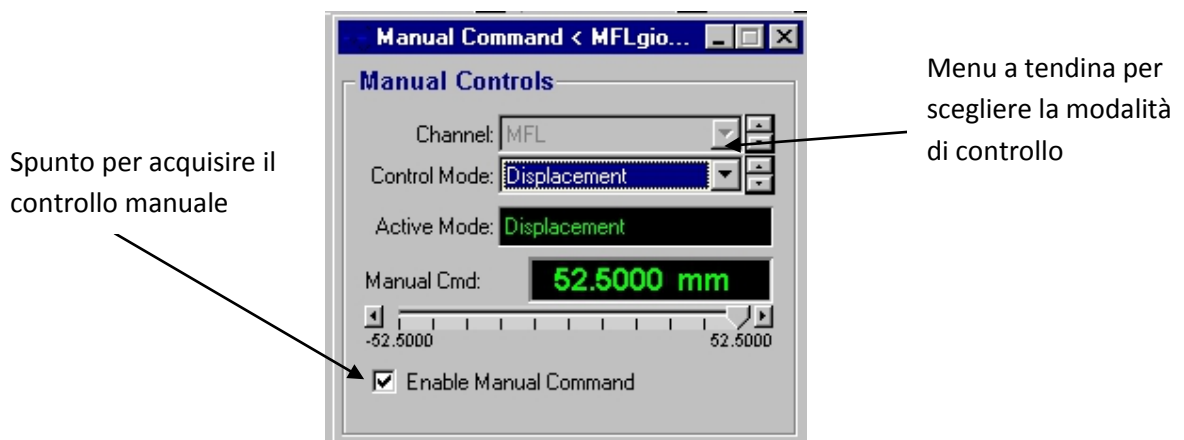


figura 2.6.1g Manual Command

Sulla finestra apparirà il valore numerico della posizione, letta dal sensore LVDT, a cui si trova l'attuatore rispetto al suo riferimento. Si ricorda che valori positivi indicano spostamenti verso il basso mentre valori negativi quelli verso l'alto

- dallo *Station Manager* aprire la finestra *Detectors* relativa ai limiti di macchina (figura 2.6.1h).

All'accensione si consiglia di impostare limiti di forza piccoli, ad esempio  $\pm 10\text{kN}$  e limiti di spostamento ampi e pari a  $\pm 60.0\text{mm}$ .

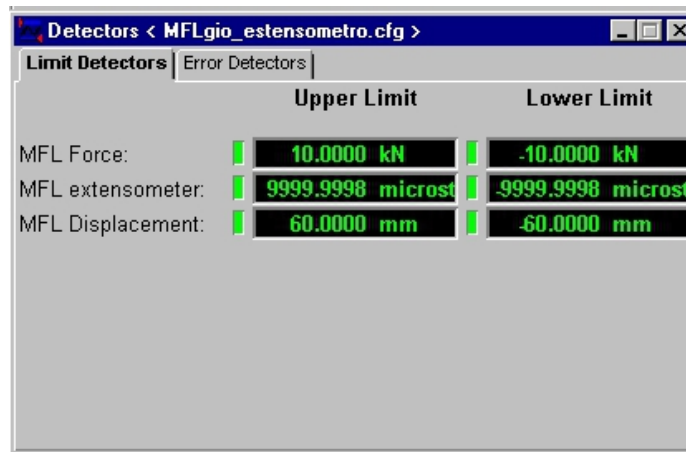


figura 2.6.1h Detectors

I limiti relativi all'estensometro, nel caso questo sia presente, servono per evitare la separazione delle due superfici di frattura del provino fermando la macchina prima che ciò avvenga in modo da prevenire danni all'estensometro stesso. Per le prove ad R-1 si è impostato il valore di  $\pm 10000$  microstrain. Per le prove ad R0,1 invece il limite va modificato durante la prova in quanto si hanno deformazioni molto maggiori dei provini

- dal pannello di controllo riaccendere le pompe del circuito principale e nella finestra *Manual Command* inserire il valore 0.0mm in modo da portare l'attuatore allo zero macchina proprio della configurazione di parametri scelta. Una volta inserito il valore 0.0mm e premuto il tasto invio si vede l'attuatore salire fino alla quota corrispondente allo zero macchina prefissato, com'è mostrato in figura 2.6.1i. Ecco perché prima di dare pressione all'attuatore è importante assicurarsi che la traversa e quindi la ganasce superiore siano ad un'altezza di sicurezza.

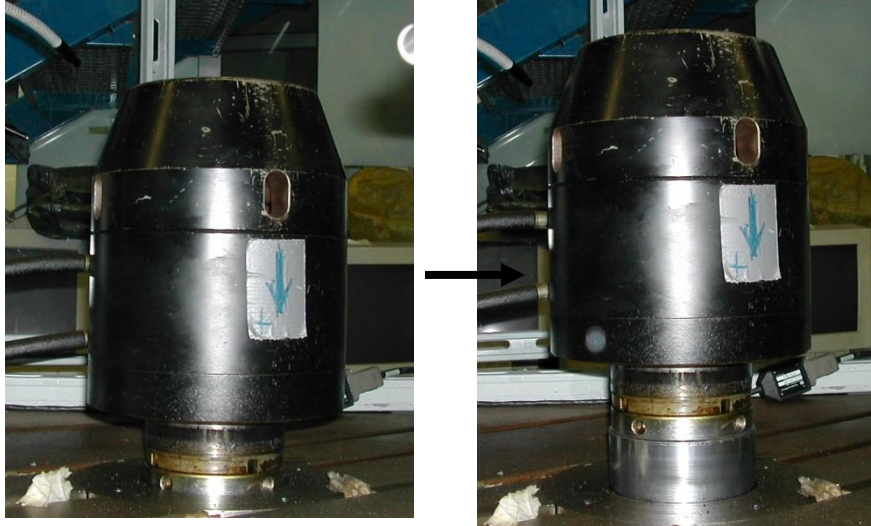


figura 2.6.1i Innalzamento dell'attuatore allo zero macchina attraverso il Manual Command

8. a questo punto dobbiamo far prendere al software il totale controllo della macchina. Per far ciò dallo *Station Manager* cliccare in sequenza da sinistra a destra i tasti di potenza HSM 2 come mostrato in figura 2.6.1l.



figura 2.6.1l Tasti di accensione virtuale delle pompe

Posizionare la leva locale-remoto di fronte al pannello di controllo in posizione remoto. A questo punto la macchina è interamente controllata dal software

9. dalla finestra *Manual Command* impostare nuovamente il valore 0.0mm mentre dalla finestra *Detectors* impostare limiti di spostamento piccoli. Per le prove ad R-1 si consiglia di impostare  $\pm 2.0\text{mm}$ . Per le prove ad R0,1 il limite superiore (relativo al segno +) va modificato durante la prova in quanto gli allungamenti dei provini superano i 2mm
10. aprire il rubinetto dell'acqua di raffreddamento dell'olio nel locale pompe giocando con l'apertura per mantenerne la temperatura tra i 40°C e i 70°C.

### 2.6.2 Montaggio provino

1. Se la prova non prevede l'utilizzo dell'estensometro, il provino può essere montato direttamente sulla ganascia superiore come indicato nel punto

successivo. Se invece al provino si vuole attaccare l'estensometro questo va preventivamente preparato come spiegato in appendice

2. afferrare il provino con la ganascia superiore portando la corrispondente leva in posizione di chiusura (verso orario). Aprire la ganascia inferiore per permettere l'ingresso del provino agendo sulla corrispondente leva
3. aprire le chiocchie della traversa ed abbassarla mediante la pedaliera (tasto nero) finché l'afferraggio del provino non entra nella ganascia inferiore. Chiudere le chiocchie della traversa
4. chiudere progressivamente la ganascia inferiore fino a 2mm circa dal provino agendo con l'apposita leva senza farla scattare in posizione di chiusura
5. dalla finestra del *Manual Command* scegliere dal menù a tendina relativo alla voce *Control Mode* l'opzione *Force* quindi chiudere la ganascia inferiore subito dopo facendo scattare la leva corrispondente (verso orario) in posizione di chiusura. Impostare il valore 0.0kN. Il provino è afferrato da entrambe le ganasce ed una volta collegata la spina relativa alla termocoppia è pronto per essere sottoposto alla prova (figura 2.6.2a).

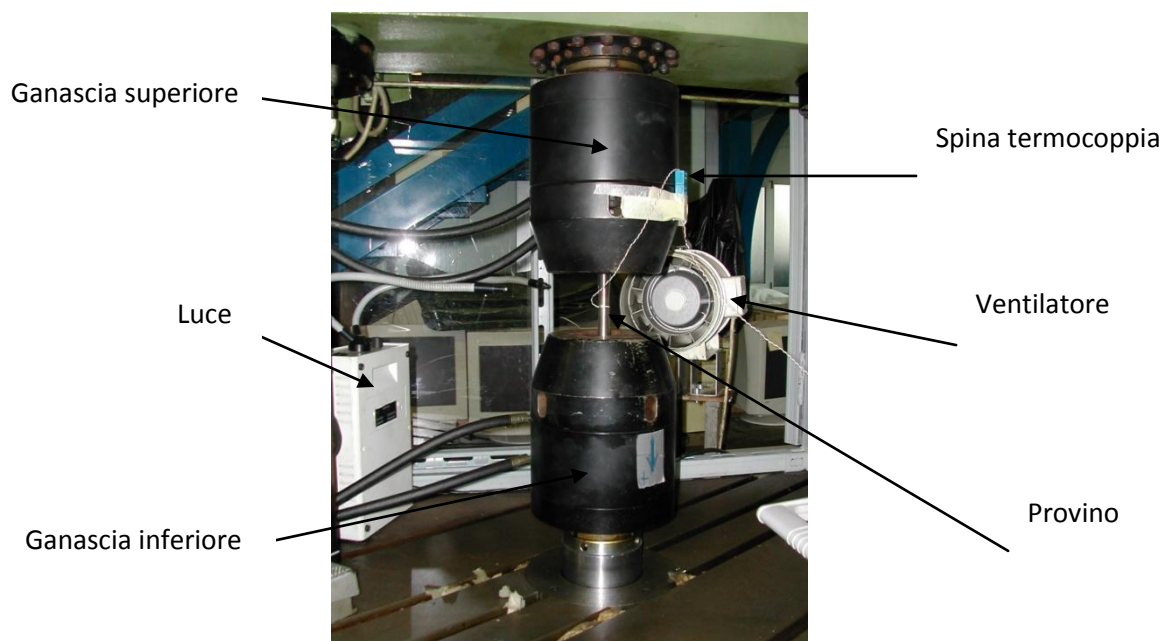


figura2.6.2a Ganasce in presa sul provino da testare

### 2.6.3 Impostazione parametri di prova

L'impostazione dei parametri di prova viene fatta attraverso l'*MPT Procedure Editor* attraverso i seguenti passaggi:

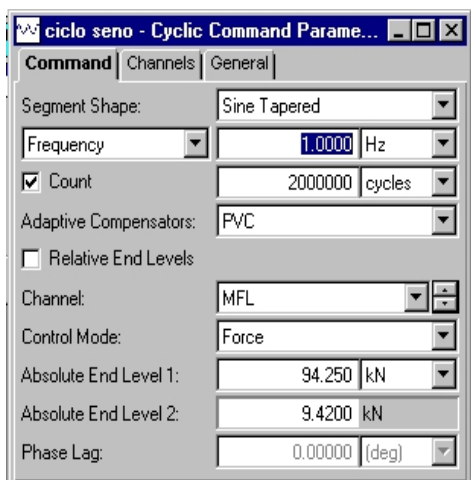


figura2.6.3a

1. Doppio clic sull'icona "ciclo seno": si apre la finestra di figura 2.6.3a nella quale è possibile impostare la frequenza di prova, il numero di cicli al quale la macchina deve terminare la prova, i valori massimo e minimo in forza da applicare, ed una serie di parametri che di norma non vengono variati. Tra questi è importante controllare che sia attivo il controllo PVC (Peak Valley Control). Si consiglia inoltre di partire con frequenze basse (0,5-1Hz) per consentire la regolazione della forza di presa delle ganasce sul provino che avviene automaticamente.

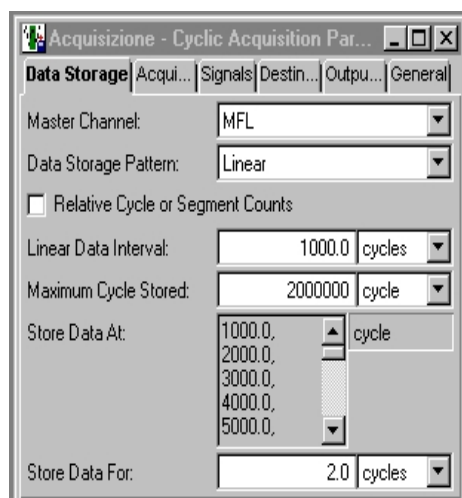


figura 2.6.3b

2. Doppio clic sull'icona "acquisizione": si apre la finestra di figura 2.6.3b dove è possibile impostare i parametri di acquisizione dei dati da parte della macchina. Dal menù *Data Storage* si può scegliere il tipo di acquisizione (si consiglia lineare), l'intervallo di acquisizione (dipende dalla vita prevista per il provino 500-1000cicli) e il numero di cicli da acquisire al termine di ogni intervallo (per il nostro lavoro sempre 2). È infine importante specificare il nome del file nel quale verranno salvati i dati. Dal menù *Destination* si nomina un file.dat. È inoltre indispensabile creare la cartella nella quale salvare il file.dat. Dallo *Station Manager* una volta cliccata l'icona "New Specimens" (fig.2.6.3c) si consiglia di nominare la cartella con lo stesso nome del file in modo da generare una cartella per ciascuna prova e non creare confusione nella successiva analisi dei dati.

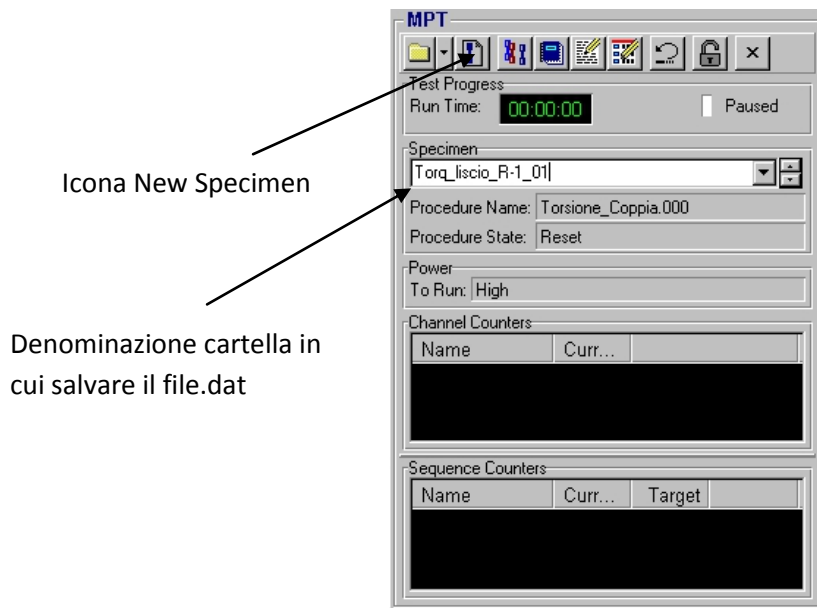


Figura 2.6.3c New Specimen

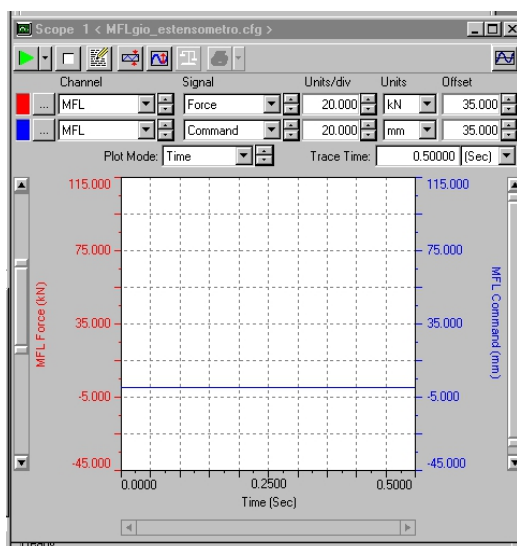


Figura 2.6.3d Finestra Scope

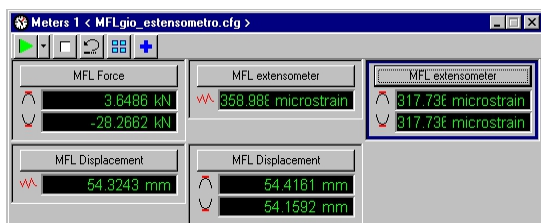


Figura 2.6.3e Finestra Meters

3. Come detto in precedenza per poter controllare visivamente cosa fa la macchina e se rispetta i valori impostati è bene aprire la finestra di "Scope"(fig.2.6.3d) che permette di visualizzare graficamente il valore istantaneo del comando in forza (ovvero quello che la macchina dovrebbe fare) e il valore effettivo (ovvero quello che la macchina sta facendo). Si possono scegliere di plottare anche altri parametri a seconda di ciò che si vuole controllare. Altro strumento utile è l'apertura della finestra "Meters" (fig.2.6.3e) che mostra i valori numerici a cui la macchina sta effettivamente lavorando. Nella figura sono indicati i valori picco/valle di forza (MFL Force), spostamento (MFL Displacement) e deformazione (MFL Extensometer) ed i valori istantanei di spostamento e deformazione. Si ritiene che questi appena descritti siano i parametri più importanti da tenere sotto controllo.



#### 2.6.4 Configurazione e gestione del sistema di acquisizione di temperatura

In questo lavoro una parte fondamentale delle prove a fatica è il costante monitoraggio della temperatura attraverso l'utilizzo di termocoppie incollate in corrispondenza alla sezione media del provino dalla quale si presume possa avere inizio la cricca. Prima di avviare la prova è dunque necessario accendere il computer posto a destra della macchina e il sistema di acquisizione *Agilent* al quale è collegata la spina che trasmette il segnale proveniente proprio dalla termocoppia.

Per l'avvio del software *Agilent BenchLink Data Logger* si segue il seguente percorso:

Start > *Agilent BenchLink Data Logger* > Open an existing setup > Negrisololo

che apre le finestre visibili in figura 2.6.4a,b.

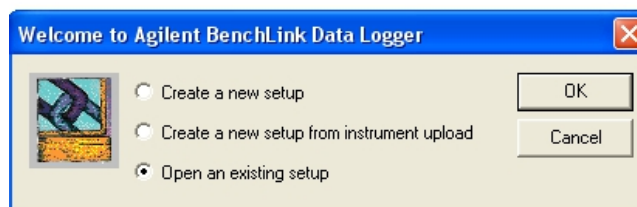


Figura 2.6.4a Finestra di apertura di un nuovo setup o di un setup già esistente

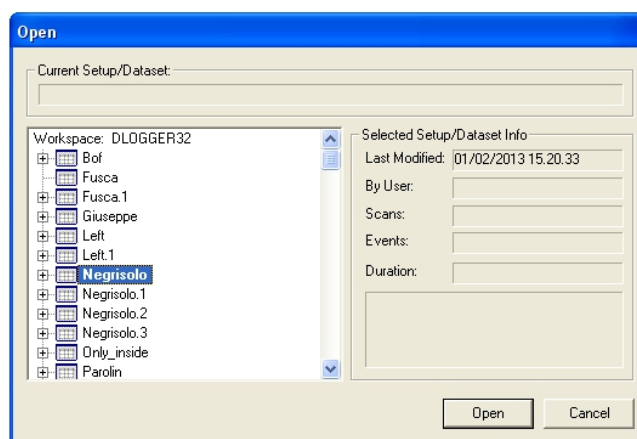


Figura 2.6.4b Scelta tra i setup già esistenti

Selezionando il setup Negrisololo e cliccando sul tasto Open si apre l'interfaccia principale del Software Agilent che viene riportata in figura 2.6.4c

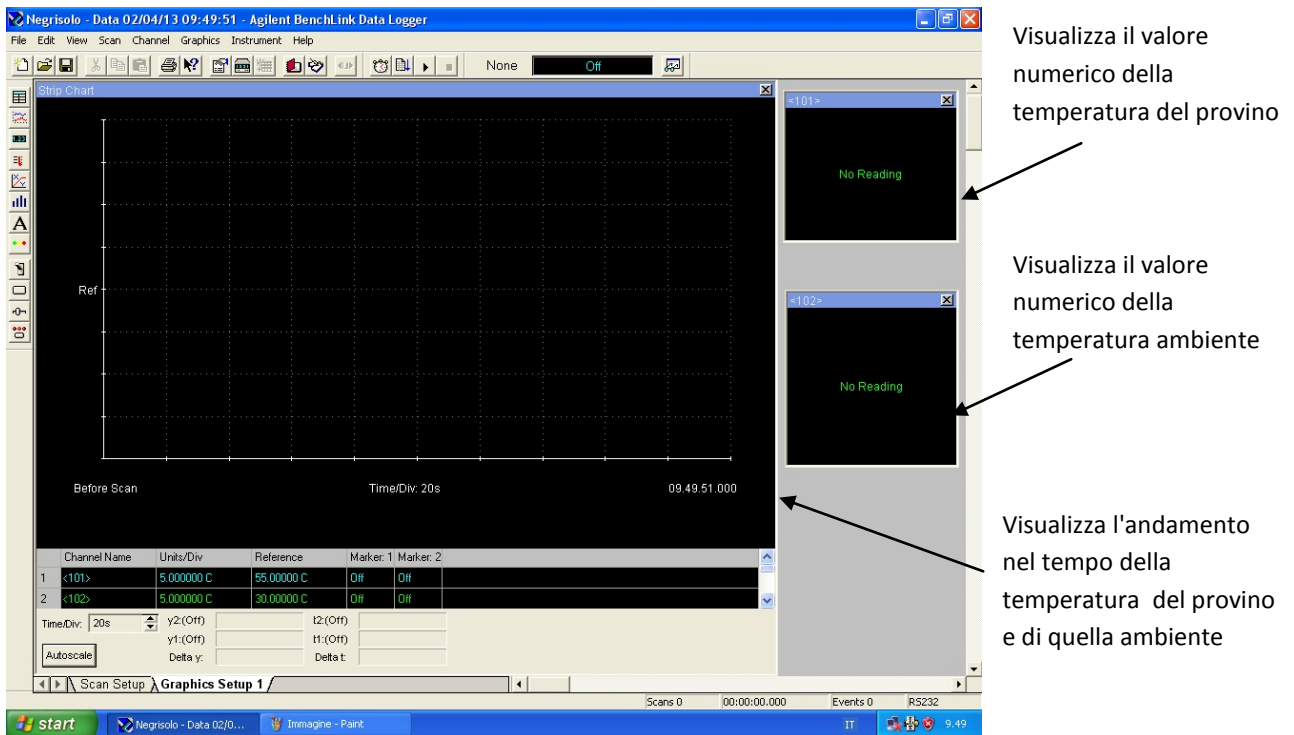


Figura 2.6.4c Interfaccia principale di Agilent BenchLink Data Logger

Ciascun setup differisce per il numero di canali di acquisizione della temperatura e per le modalità di visualizzazione dei dati relativi a ciascun canale. La scelta del setup sopra indicato permette di monitorare sia la temperatura del provino che la temperatura ambiente attraverso l'utilizzo di due canali distinti. I valori registrati sono visualizzati sia graficamente in funzione del tempo sia in valore numerico ad ogni acquisizione come indicato in figura 2.6.4c. La termocoppia relativa alla temperatura ambiente è posta su una colonna della macchina con l'utilizzo del nastro adesivo.

Per avviare l'acquisizione cliccare il tasto play presente sulla barra dei menù in alto a sinistra (fig. 2.6.4c). Si apre la finestra visibile in figura 2.6.4d dove, alla voce *setting* (fig. 2.6.4e), bisogna indicare l'intervallo di acquisizione di temperatura.

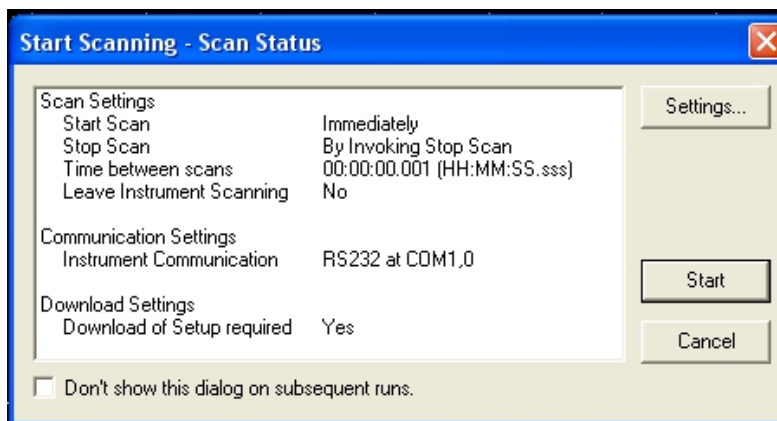


Figura 2.6.4d Finestra per l'inizio della scansione e la modifica dei parametri

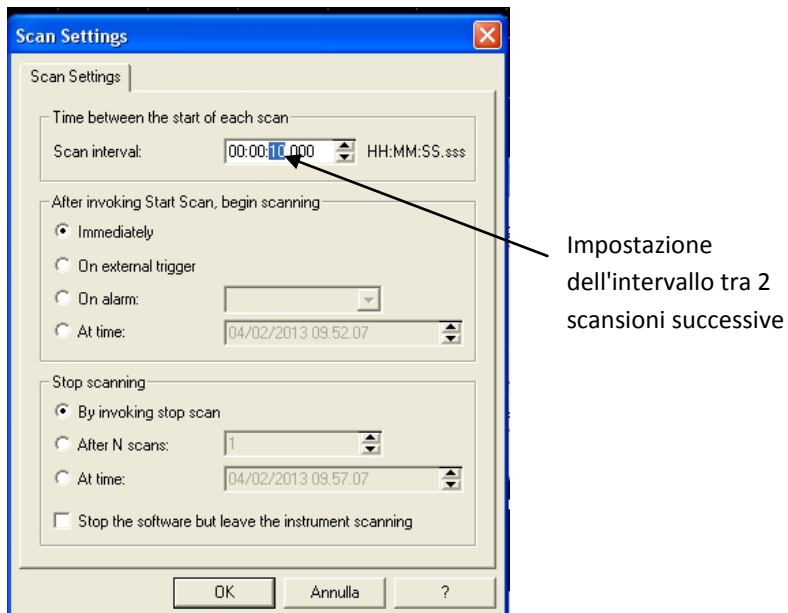


Figura 2.6.4e Finestra per impostare l'intervallo di scansione

Si suggerisce un intervallo di 5 secondi quando le prove sono ad alto carico e si prevede una vita breve del provino ( $N_f < 100000$  cicli), di 10 secondi per vite maggiori. Una volta inseriti i parametri voluti e dato l'ok, premere il tasto Start di figura 2.6.4d per dare avvio alla scansione. L'andamento di temperatura viene mostrato sia graficamente che attraverso i valori numerici come indicato in figura 2.6.4c.

### 2.6.5 Esecuzione della prova

Il sistema è adesso pronto per eseguire la prova e monitorare la temperatura. Prima far partire la prova bisogna disattivare il *Manual Command* togliendo lo spunto dalla voce *Enable Manual Command*, e chiudere il lucchetto visualizzato in alto della finestra *MPT Procedure Editor*.

Prima di cliccare sul tasto *Play* sono però indispensabili alcune indicazioni da tenere ben presente.

Per le prove ad R-1 sono stati applicati carichi fino a  $\pm 82,3$  kN mentre per le prove ad R0,1 si arriva a 117,8 kN di forza. L'entità del carico dipende ovviamente dalla sezione del provino. Dall'esperienza accumulata nell'esecuzione delle prove posso fare alcune considerazioni:

- per carichi superiori ai 60 kN di forza consiglio di aumentare il carico gradatamente per permettere alle ganasce di afferrare in modo adeguato il provino.

- detto che i primi cicli vanno eseguiti a frequenze basse si possono prendere come riferimento i seguenti valori :  $f=0,5$  Hz per carichi inferiori ai 60kN,  $f=0,1$  Hz per carichi fino ai 100 kN e  $f=0,05$ Hz per carichi superiori ai 100kN

Per chiarire meglio la procedura da seguire si riporta nel seguito un esempio di prova eseguita ad R0,1 con un valore del carico massimo pari a  $F_{MAX}=106,03$ kN.

- 1° Step:  $F_{MAX}=60,0$ kN ;  $F_{MIN}=6,0$ kN si eseguono 10 cicli a 0,5 Hz
- 2° Step:  $F_{MAX}=60,0$ kN ;  $F_{MIN}=6,0$ kN si eseguono 50 cicli a 2,0 Hz
- 3° Step:  $F_{MAX}=80,0$ kN ;  $F_{MIN}=8,0$ kN si eseguono 5 cicli a 0,1 Hz
- 4° Step:  $F_{MAX}=80,0$ kN ;  $F_{MIN}=8,0$ kN si eseguono 10 cicli a 0,5 Hz
- 5° Step:  $F_{MAX}=80,0$ kN ;  $F_{MIN}=8,0$ kN si eseguono 50 cicli a 2,0 Hz
- 6° Step:  $F_{MAX}=100,0$ kN ;  $F_{MIN}=10,0$ kN si eseguono 5 cicli a 0,05 Hz
- 7° Step:  $F_{MAX}=100,0$ kN ;  $F_{MIN}=10,0$ kN si eseguono 10 cicli a 0,5 Hz
- 8° Step:  $F_{MAX}=100,0$ kN ;  $F_{MIN}=10,0$ kN si eseguono 50 cicli a 2,0 Hz
- 9° Step:  $F_{MAX}=106,03$ kN ;  $F_{MIN}=10,6$ kN si eseguono 5 cicli a 0,05 Hz
- 10° Step:  $F_{MAX}=106,03$ kN ;  $F_{MIN}=10,6$ kN si eseguono 10 cicli a 0,5 Hz
- 11° Step:  $F_{MAX}=106,03$ kN ;  $F_{MIN}=10,6$ kN si eseguono 50 cicli a 2,0 Hz

Al termine di questa procedura si fanno fare al provino circa 500/1000 cicli alla frequenza reale di prova che nell'esempio è di 8Hz.

Dopo questi cicli di stabilizzazione degli afferraggi si ferma la macchina per poter montare l'estensometro assiale se previsto dalla prova. Data la sua elevata sensibilità, l'estensometro va infatti montato esclusivamente dopo che il sistema di afferraggio ganasce-provino si è stabilizzato.

### 2.6.6 Montaggio estensometro

1. Con riferimento alla figura 2.6.6a fissare l'estensometro al provino tramite due elastici a cavallo della termocoppia, facendo attenzione a non urtarne il filo. Questa operazione è abbastanza delicata e si consiglia di eseguirla in due persone
2. tenere leggermente in tiro gli elastici e far scorrere i denti d'appoggio dell'estensometro sulla superficie del provino finché non si sente uno scattino

che indica che il dentino è entrato nella tacchetta precedentemente fatta con il truschino



Figura 2.6.6a Montaggio estensometro assiale

3. collegare il cavo di trasmissione dei dati al cavo di ricezione posizionato sulla colonna di sinistra della macchina
4. sfilare il perno di azzeramento dal corrispondente foro
5. azzerare il valore della deformazione letto dal software attraverso il corrispondente comando di reset

A questo punto si può cliccare su "Play" e la macchina si porta in modo graduale ai valori di forza o spostamento impostati.

Per variare la frequenza in modo da mantenere la temperatura del pezzo abbastanza elevata rispetto all'ambiente (si cerca di tenere una differenza  $\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$ ) è sufficiente fermare la prova con il tasto "Stop", aprire il lucchetto alla procedura, impostare il nuovo valore della frequenza, chiudere il lucchetto e far ripartire la prova con il tasto "Play".

### 2.6.7 Esecuzione dei raffreddamenti

Per eseguire un raffreddamento è indispensabile aumentare al massimo la frequenza di acquisizione della temperatura in modo da avere una quantità di punti sufficiente per la corretta definizione della pendenza della curva, cioè del gradiente di raffreddamento, fondamentale per la valutazione dell'energia specifica dissipata che è il nostro obiettivo finale della prova. Si deve quindi applicare la seguente procedura:

1. abbassare la frequenza di prova in modo che la temperatura del provino non superi i  $65^\circ\text{C}$  anche a ventilatore spento.

2. spegnere il ventilatore
3. aspettare che la temperatura del provino si stabilizzi. Per questa fase sono indispensabili dai 15 ai 20 minuti circa a seconda del livello di carico e della temperatura
4. raggiunta la stabilizzazione leggere e trascrivere il valore della temperatura ambiente e fermare l'acquisizione attraverso il tasto stop del software Agilent BenchLink Data Logger (l'acquisizione di temperatura avveniva ogni 5/10 secondi)
5. salvare i dati acquisiti fino a quel momento seguendo il percorso seguente:

*ok > File > Export Data > Browse > Cartella di destinazione*

ricordando di salvare il file in formato testo: File.txt.

6. disattivare il canale di lettura della temperatura ambiente dall'interfaccia *Scan Setup* togliendo lo spunto al canale 102 (figura2..6.7a)

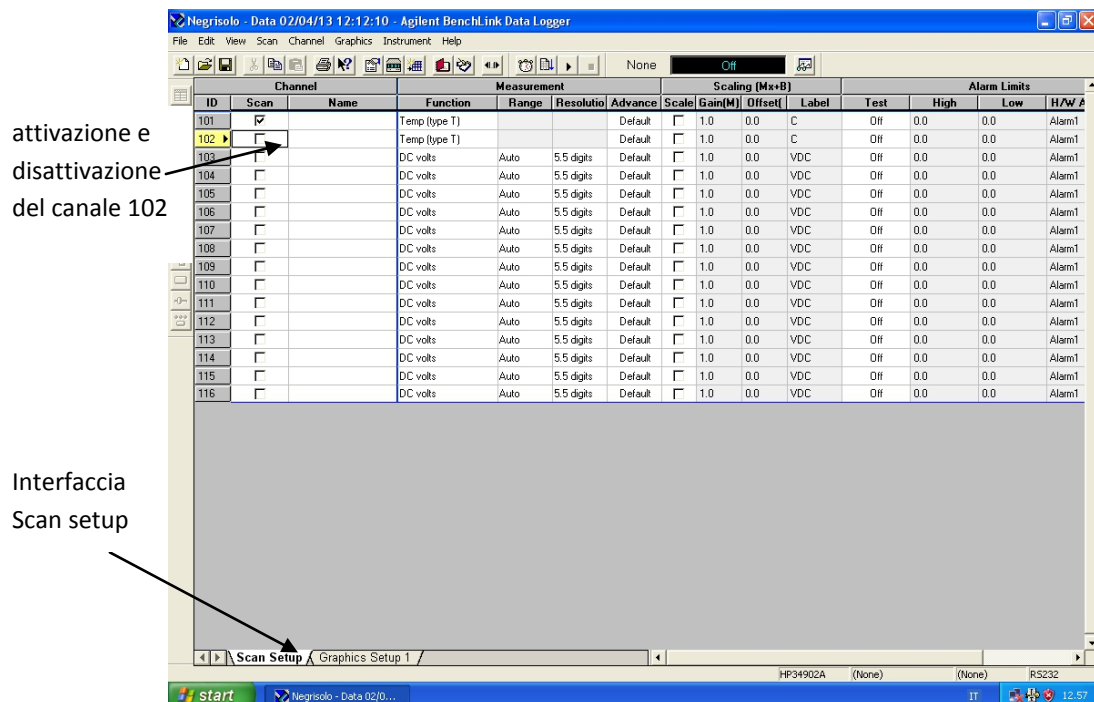


Figura2.6.7a Disattivazione del canale di lettura della temperatura ambiente

7. cliccare l'icona start e l'opzione *Setting* per impostare la massima frequenza di acquisizione, pari a 22 Hz, come indicato in figura 2.6.7b

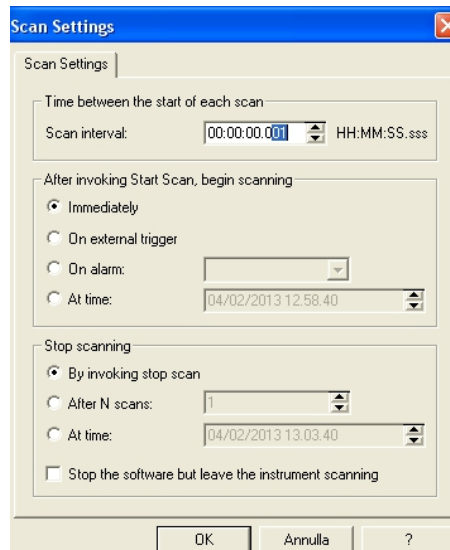


Figura 2.6.7b Impostazione della frequenza massima di acquisizione

8. cliccare su *OK* ed avviare l'acquisizione attraverso il comando *Start*
9. far passare circa 30 secondi in modo da far vedere che la temperatura è stabilizzata a meno dell'effetto termoelastico
10. dal software *MTS Station Manager* cliccare il tasto "*Hold*" per arrestare istantaneamente la prova come mostrato in figura 2.6.7c.

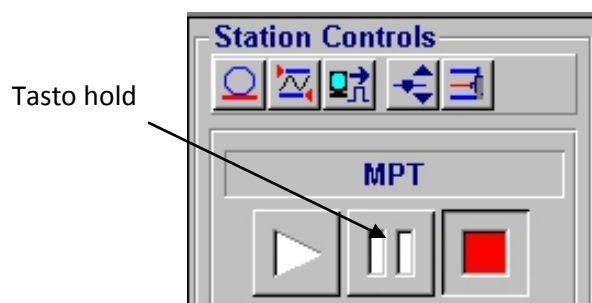


Figura 2.6.7c Arresto istantaneo della prova con il tasto hold

11. far passare circa 80 secondi per far vedere in modo completo l'andamento di temperatura durante il raffreddamento
12. dal software Agilent BenchLink Data Logger cliccare il tasto di stop per fermare l'acquisizione di temperatura e salvare il file attraverso il percorso:

*File > Export Data > Browse > Cartella di destinazione > File.txt*

13. dal software *MTS Station Manager* cliccare il tasto "*Stop*" per riportare a zero il valore della forza applicata al provino. Reimpostare il valore della frequenza per

accelerare la prova col ventilatore. In alternativa si può rimuovere semplicemente il tasto "hold" cliccando su "Play". L'utilizzo del tasto "Stop" è utile solo per riportare a zero il valore di forza ed effettuare eventuali operazioni sulla macchina in sicurezza senza che sia applicata alcuna forza.

14. accendere il ventilatore e far ripartire sia la prova che l'acquisizione di temperatura alle frequenze desiderate

### 2.6.8 Smontaggio e spegnimento

La prova può terminare in tre diverse modalità.

- a) Il provino raggiunge i 2 milioni di cicli e la prova deve essere arrestata manualmente con il tasto di *Stop* portando la forza a zero
- b) la cricca raggiunge dimensioni elevate e tali da far superare i limiti dell'estensometro impostati nella finestra *Detectors* alla voce *MFL extensometer*. Una volta superati questi limiti la macchina porta a zero il valore di forza applicato come se si fosse cliccato il tasto di *Stop*
- c) nel caso in cui non ci sia l'estensometro la prova si ferma automaticamente quando si superano i limiti di spostamento impostati nella finestra *Detectors* alla voce *MFL Displacement*. In questo caso si avrà la separazione netta delle superfici di frattura. Quando vengono superati i limiti di spostamento il software toglie istantaneamente pressione al circuito principale e la ganascia inferiore, non essendo più sostenuta si porta nella posizione più in basso. Ecco perché questa modalità di arresto non può essere utilizzata quando sul provino viene montato l'estensometro in quanto il peso della ganascia aprirebbe l'estensometro rischiando di romperlo.

Se il provino non è rotto, ovvero siamo nei casi a) e b) descritti sopra, deve essere tolto procedendo nel seguente modo:

1. assicurarsi che il valore di forza applicato dalla macchina sia zero
2. aprire il lucchetto alla procedura
3. dalla finestra del *Manual Command* rimettere lo spunto alla voce *Enable Manual Command* (vedi fig 2.6.1g). Si ricorda che la prova è stata eseguita in controllo di forza quindi alla voce *Active Mode* sarà indicato *Force*. Portare la leva manuale relativa alla ganascia inferiore in posizione neutra (centrale) e dal menù a tendina del *Control Mode* scegliere l'opzione *Displacement* per passare in controllo di spostamento



4. aprire ancora manualmente la ganascia inferiore ruotando la corrispondente leva in senso antiorario per liberare completamente il provino
5. aprire le chiocchie della traversa ed alzarla mediante il tasto giallo dell'apposita pedaliera
6. staccare la spina della termocoppia ed il cavo trasmissione dati dell'estensometro
7. aprire la ganascia superiore ruotando la corrispondente leva in senso antiorario e togliere il provino
8. se si vogliono spegnere anche le pompe lo si fa prima virtualmente attraverso il software tramite i tasti di potenza premuti questa volta da destra a sinistra (vedi fig 2.6.1l) e poi manualmente dal pannello di controllo mediante il tasto rosso 0.



## CAPITOLO 3

### VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO

#### 3.1 PREMESSA

In questo capitolo vengono presentati i risultati di una serie di prove sperimentali. Le prove sono state eseguite in controllo di forza su macchina MFL assiale su provini lisci di acciaio inossidabile AISI304L della geometria precedentemente descritta. Le prove in controllo di forza sono state eseguite imponendo una forma d'onda sinusoidale a frequenze variabili tra 0,3 e 20Hz in funzione dell'ampiezza di tensione applicata. Per mantenere la temperatura stabilizzata del materiale sotto al limite massimo dei 70°C e allo stesso tempo accelerare la prova, è stato utilizzato un ventilatore per raffreddare i provini. Circa 10 minuti prima di ogni raffreddamento il ventilatore veniva spento e contemporaneamente ridotta la frequenza di prova in modo da mantenere costante la temperatura del materiale. Quindi il test veniva interrotto bruscamente per misurare il gradiente di raffreddamento. Sono state eseguite prove assiali a  $R=-1$  e  $R=0,1$  allo scopo di valutare l'effetto del rapporto di ciclo nella relazione tra ampiezza di tensione e numero di cicli a rottura, ovvero nella costruzione delle curve di Woehler classiche utili nella progettazione a fatica.

Sono stati analizzati poi i risultati utilizzando l'approccio energetico basato sull'energia dissipata dal materiale nelle diverse fasi della vita e, relazionando questo parametro sempre al numero di cicli a rottura, si sono ottenute delle nuove curve di progetto per le sollecitazioni di fatica. Sono stati poi confrontati i due diversi approcci allo scopo di valutarne eventuali vantaggi e svantaggi.

Per i nostri scopi, durante le prove sono stati quindi registrati i valori di spostamento e forza applicati dalla macchina ed in molti casi anche i valori di deformazione provenienti dall'estensometro assiale montato direttamente sui provini. Da questi parametri si è quindi risaliti alla deformazione media e alla rigidità del materiale e si sono diagrammati i dati in funzione del numero di cicli per cercare di comprendere il comportamento del materiale e la modifica delle sue proprietà in funzione del carico applicato durante tutta la sua vita. È stato possibile inoltre, per i provini dotati di estensometro, ricostruire i cicli di isteresi e calcolare l'energia meccanica spesa per l'esecuzione delle prove.

La temperatura è stata monitorata con termocoppie rame-costantina incollate in corrispondenza alla sezione minima del provino, ovvero dove le tensioni raggiungono il valore nominale corrispondente al diametro di 15mm scelto. I segnali di temperatura provenienti dalle termocoppie sono stati acquisiti con una centralina di acquisizione Agilent Technologies HP34970° ad una frequenza massima di 22Hz.

### 3.2 APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE

In questo paragrafo sono presentati i risultati di tutte le prove di fatica analizzati in termini di ampiezza di tensione  $\sigma_a$ . Sono dunque presentati grafici  $\sigma_a-N_f$  per rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0,1$ . Sono presentati inoltre gli andamenti caratteristici della rigidità e della deformazione media riscontrati a diverso numero di cicli durante le diverse campagne di prove.

Queste misurazioni sono state possibili per i provini in cui è stato utilizzato l'estensometro assiale. Per entrambe le campagne di prove (a  $R=-1$  ed  $R=0,1$ ) si è quindi proceduto nel modo seguente:

- esecuzione di alcune prove (5/6) senza l'utilizzo dell'estensometro assiale per la determinazione di massima della curva di Woelher necessaria per avere dei riferimenti con riguardo ai valori di tensione da applicare
- esecuzione delle prove a livelli di tensione alti, medi e bassi con l'utilizzo dell'estensometro assiale per una definizione via via migliore della curva di vita a fatica

Come visibile nelle figure riportate di seguito e, più in generale, nelle schede tecniche dedicate ai provini, le misure dell'estensometro non sono sempre di facile interpretazione. Essendo infatti uno strumento molto sensibile si notano alcune discontinuità soprattutto nelle misurazioni della deformazione media. Queste discontinuità sono dovute essenzialmente a scorrimenti dei dentini d'appoggio dell'estensometro lungo la superficie del provino provocate principalmente da cambi di frequenza, fermate istantanee per l'esecuzione dei raffreddamenti e scatti delle ganasce per instabilità nell'afferraggio del provino. A queste problematiche si è cercato di ovviare incidendo leggermente i provini con un truschino a cavallo della termocoppia in modo da creare un invito per i dentini. La soluzione migliora la situazione anche se non risolve completamente il problema. Si è deciso inoltre di eseguire due prove senza raffreddamenti per cercare di non alterare le misurazioni. Nei provini senza l'estensometro la rigidità assiale è stata ricavata a partire dai valori di spostamento del sensore LVDT della macchina di prova ed in questo caso le misure sono più grossolane.

### 3.2.1 Andamenti delle rigidzze durante le prove a R-1

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R-1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\sigma_a=240-400\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici delle rigidzze  $k$  misurate durante le prove e normalizzate rispetto al valore della rigidzza iniziale  $k_i$  (valutata a temperatura stabilizzata) e della deformazione media sono riportati in figura 3.2.1a,b,c,d. Si cerca di riassumere in queste figure tutti i comportamenti tipici riscontrati durante le prove. Per i risultati di ogni singola prova si rimanda alle schede relative ai provini.

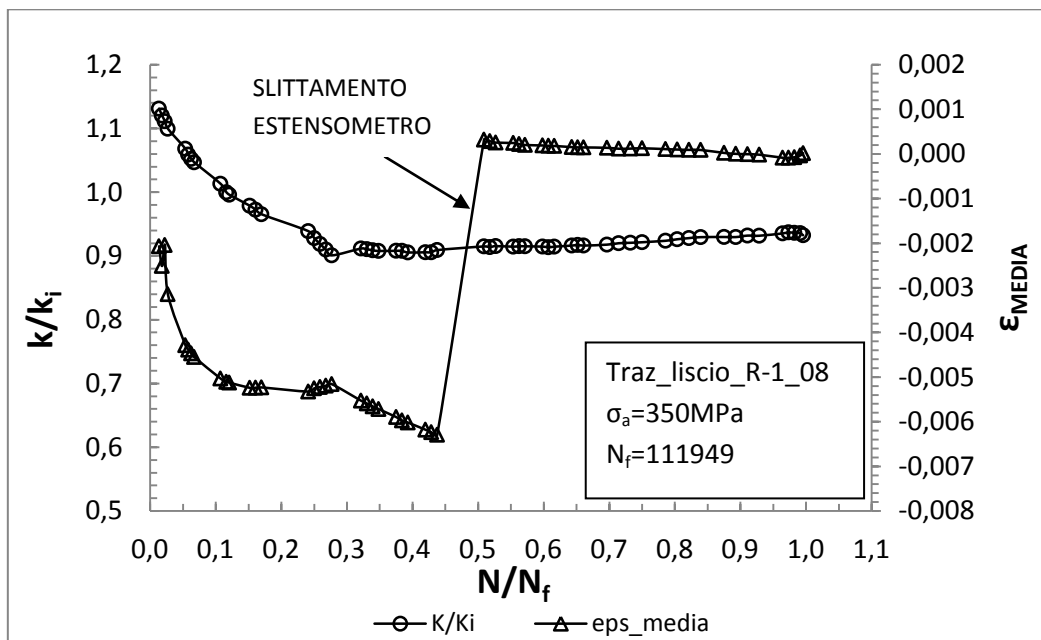


Figura 3.2.1a Evoluzione della rigidzza assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08

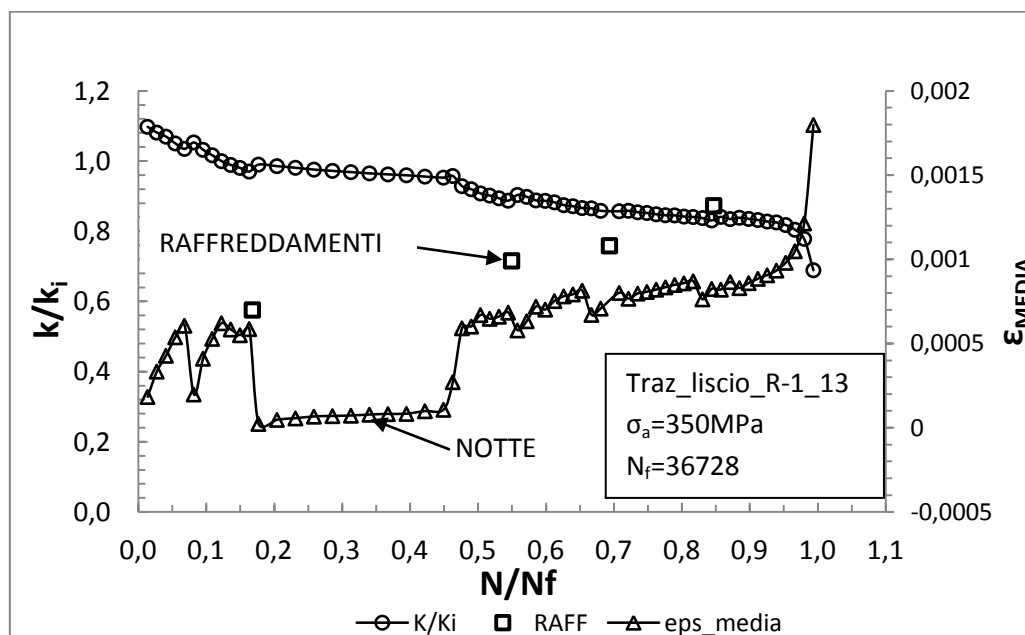


Figura 3.2.1b Evoluzione della rigidzza assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

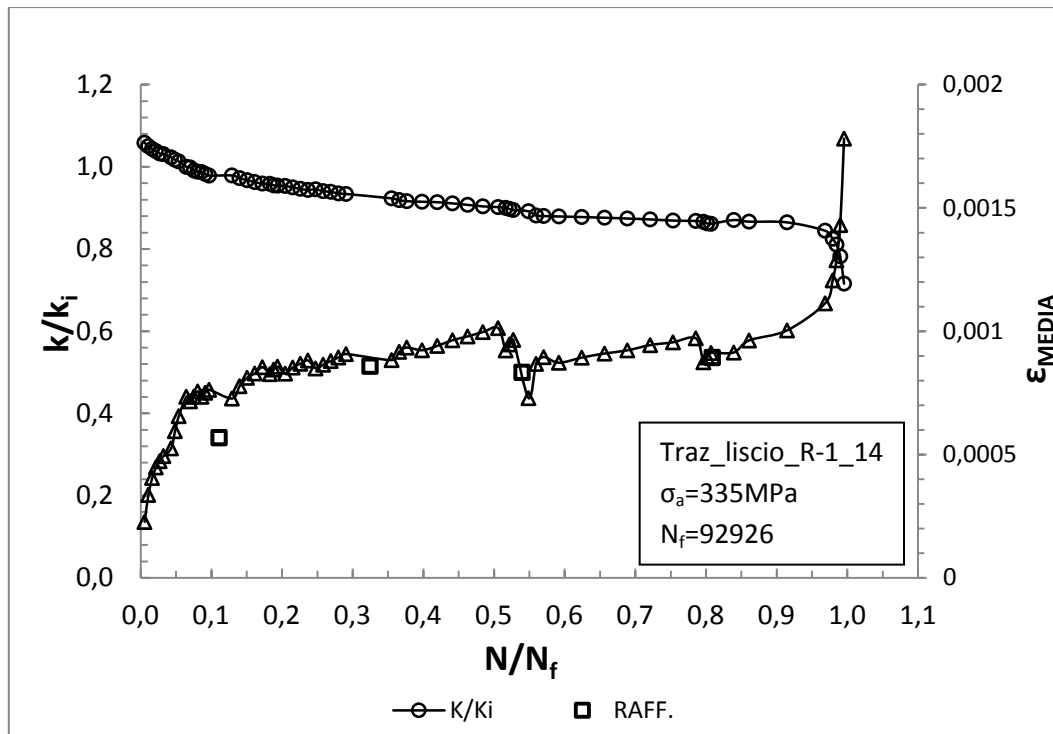


Figura 3.2.1c Evoluzione della rigidezza assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

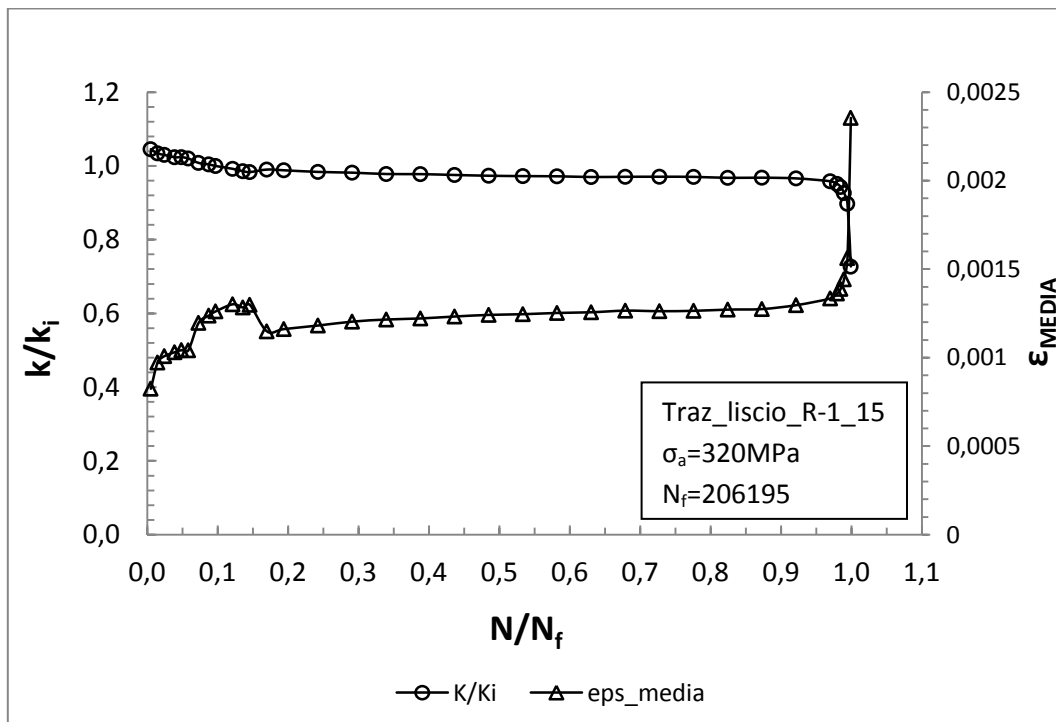


Figura 3.2.1d Evoluzione della rigidezza assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_15

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 3 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 3.2.1a dove si vede come la rigidezza cala fortemente (circa del 10% rispetto alla rigidezza iniziale) all'inizio della prova fino a circa un terzo della vita, poi resta costante fino al 40% di vita ed infine tende ad aumentare fino a raggiungere circa il 94% della rigidezza iniziale. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 05, 08, 09, 11 e descrive un iniziale addolcimento del materiale nelle prime fasi della sua vita ed un progressivo incrudimento. I quattro provini tuttavia sono stati sollecitati a diversi livelli di tensione, rispettivamente 320MPa, 350MPa, 335MPa e 320MPa ed è dunque difficile trovare una correlazione tra il livello del carico di sollecitazione applicato e il conseguente comportamento del materiale. Si può invece constatare come la tendenza ad incrudire aumenta la resistenza a fatica del materiale che si rompe ad un numero di cicli superiore rispetto al materiale sottoposto allo stesso livello di carico ma che non presenta il fenomeno dell'incrudimento. A conferma di questo si presentano due esempi riscontrati sperimentalmente.

I provini 05 e 11 sottoposti a fatica alla tensione  $\sigma_a=320\text{MPa}$  e che presentano incrudimento hanno rispettivamente vita pari a  $N_f=793881$  cicli e  $N_f=2000000$  cicli. I provini 10 e 15 sottoposti sempre alla tensione  $\sigma_a=320\text{MPa}$  e che non presentano incrudimento hanno rispettivamente vita pari a  $N_f=198187$  cicli e  $N_f=206195$  cicli.

Il provino 09 sottoposto a fatica alla tensione  $\sigma_a=335\text{MPa}$  e che presenta incrudimento ha vita pari a  $N_f=2000000$  cicli. I provini 07 e 14 sottoposti sempre alla tensione  $\sigma_a=335\text{MPa}$  e che non presentano incrudimento hanno rispettivamente vita pari a  $N_f=123424$  cicli e  $N_f=92926$  cicli.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nelle figure 3.2.1b e 3.2.1c dove la rigidezza cala continuamente durante la prova fino alla rottura. La rigidezza finale, valutata prima dell'innescio della cricca, cala fino al 16% rispetto alla rigidezza iniziale valutata a temperatura stabilizzata. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 07, 10, 12, 13, 14 e descrive un progressivo addolcimento del materiale durante tutta la vita. Anche in questo caso il fenomeno avviene ad alti, medi e bassi carichi e non è possibile definire una relazione tra il comportamento del materiale e l'ampiezza di tensione applicata.

Il terzo comportamento riscontrato è quello mostrato nella figura 3.2.1d dove si riscontra un iniziale calo di rigidezza e poi un andamento per lo più costante o in leggero calo fino alla rottura. Questo comportamento è simile al precedente ma i cali di rigidezza sono più contenuti e arrivano fino al 5% rispetto alla rigidezza iniziale valutata a temperatura stabilizzata. Viene riscontrato nei provini 02, 04, 06, 15 e descrive un leggero addolcimento iniziale del materiale seguito da una fase per lo più stabile fino a rottura.

Statisticamente si può affermare che il comportamento più diffuso tra i provini sottoposti alle prove di fatica ad R-1 è quello relativo agli ultimi due casi, ovvero il materiale tende ad addolcire più o meno intensamente per tutta la durata della prova.

Dall'analisi delle figure 3.2.1a,b,c,d si può inoltre osservare come la fase di propagazione della cricca, che presenta un forte calo della rigidità ed un rapido aumento della deformazione media, avviene in maniera molto rapida. Infatti, dall'analisi dei dati, si vede come l'innesco della cricca, evidenziato dal cambio di pendenza delle curve di rigidità e deformazione media, avvenga ad una percentuale di vita prossima al 96-97% e comunque superiore al 95%. Questo fenomeno è addirittura non riscontrato nel caso dei provini che presentano un incrudimento, come evidenziato in figura 3.1a, in quanto l'innesco e la propagazione della cricca avvengono in un numero di cicli più breve dell'intervallo di acquisizione dei dati dell'estensometro, che di solito è impostato pari a 1000 cicli. Nell'analisi dei dati si è allora deciso di trascurare la fase di propagazione rispetto alla vita spesa per l'innesco e si è così utilizzato il numero di cicli a rottura  $N_f$  per la sintesi dei dati, in termini sia di tensione che di densità di energia dissipata per unità di volume e per ciclo. Nei provini dotati di estensometro, non potendo giungere alla completa separazione delle superfici di frattura per preservare l'integrità dello strumento,  $N_f$  sta ad indicare il numero di cicli in cui la cricca ha raggiunto dimensioni tali da superare i limiti di misura imposti, di norma 10 mila microepsilon. Essendo però, come detto, la propagazione della cricca molto rapida, si è comunque assunto che il numero di cicli a cui l'estensometro arresta la prova per superamento del limite corrisponda con il numero di cicli di effettiva rottura del provino. Per verificare l'effettiva bontà dell'assunzione in alcuni provini è stato tolto l'estensometro una volta raggiunto il limite e si è portato a rottura il provino riscontrando che effettivamente il numero di cicli che trascorre tra il superamento del limite e la netta separazione delle superfici di frattura è inferiore allo 0,5% della vita totale.

Si riportano infine in figura 3.2.1e,f due tipiche superfici di frattura riscontrate nelle prove assiali ad R-1.





Figura3.2.1e Esempio tipico di superfici di frattura (provino Traz\_liscio\_R-1\_07  $\sigma_a=335\text{MPa}$  ; Nf = 123424)

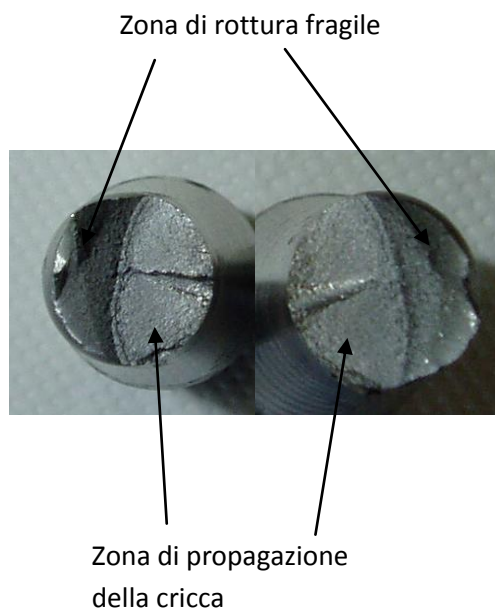


Figura3.2.1f Esempio tipico di superfici di frattura (provino Traz\_liscio\_R-1\_04  $\sigma_a=350\text{MPa}$  ; Nf = 58260)  
nelle prove a rapporto di ciclo R-1

Il caso di figura 3.2.1e è stato quello maggiormente riscontrato ed è caratterizzato dalla netta separazione della zona che ha subito plasticizzazione (zona di propagazione della cricca) che si presenta liscia, dalla zona dove la rottura è avvenuta in modo fragile che al tatto si presenta molto più ruvida. Il caso di figura 3.2.1f presenta ancora la netta separazione delle due zone di rottura ma nella zona in cui è propagata la cricca si nota la presenza di due piani di scorrimento. In questo caso il carico applicato era più elevato e

la zona a rottura fragile presenta una distorsione maggiore rispetto al caso di figura 3.2.1e.

### 3.2.2 Risultati delle prove assiali a R-1

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 3.2.2 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R-1 sintetizzati in termini di ampiezza di tensione, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa k, il coefficiente di dispersione in tensione  $T_{\sigma}$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 3.2.2 Vita a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

NOME_PROVINO	$\sigma_a$ [Mpa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Traz_liscio_R-1_02	240	-1	9	2000000	1
Traz_liscio_R-1_03	400	-1	0,3	2931	
Traz_liscio_R-1_04	350	-1	1	58260	
Traz_liscio_R-1_05	320	-1	3	793881	
Traz_liscio_R-1_06	300	-1	5	2000000	1
Traz_liscio_R-1_07	335	-1	2	123424	
Traz_liscio_R-1_08	350	-1	1	111949	
Traz_liscio_R-1_09	335	-1	2,5	2489072	1
Traz_liscio_R-1_10	320	-1	3	198187	
Traz_liscio_R-1_11	320	-1	3,5	1882442	2
Traz_liscio_R-1_12	400	-1	0,3	3589	
Traz_liscio_R-1_13	350	-1	1	36728	
Traz_liscio_R-1_14	335	-1	2	92926	
Traz_liscio_R-1_15	320	-1	3	206195	3
Traz_liscio_R-1_16	300	-1	5	483510	3
					1 prova interrotta prima della rottura
					2 prova interrotta per rottura afferraggio
					3 prova eseguita senza raffreddamenti

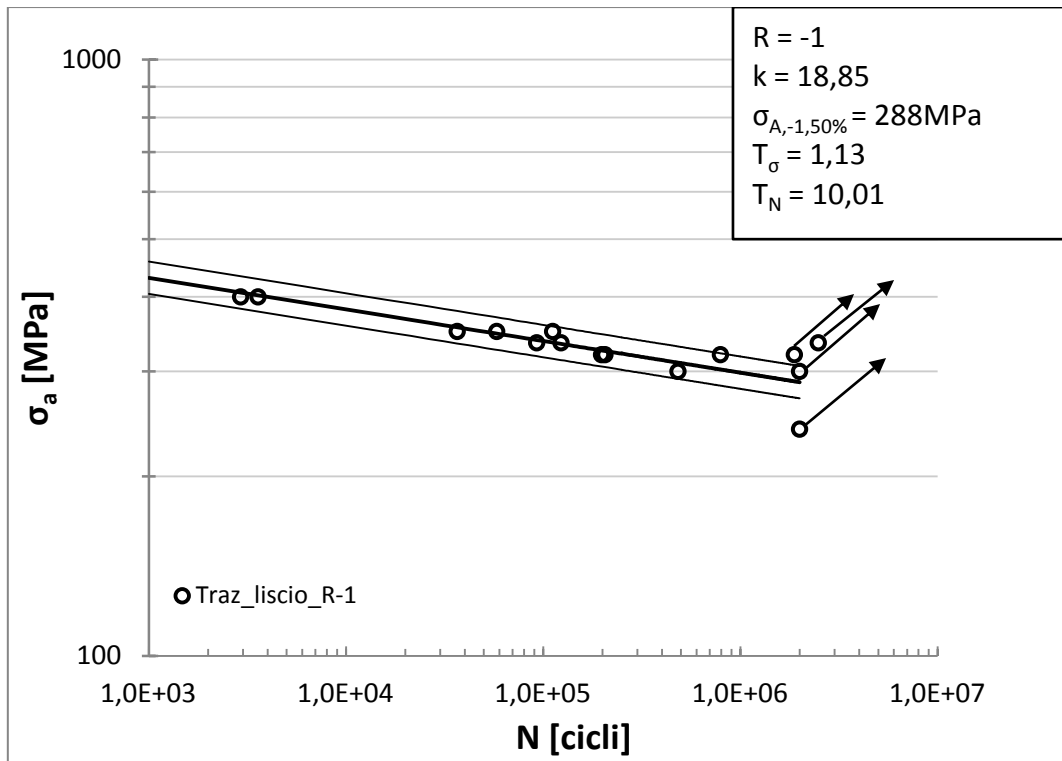


Grafico 3.2.2 Curva a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

La prova del provino 11 è stata interrotta a 1882442 cicli a causa della rottura dell'afferraggio. In questo caso il provino è stato inserito nell'analisi come un provino a vita infinita in quanto sia i valori di rigidezza ( il provino presenta incrudimento) che i valori dell'energia dissipata non evidenziavano un imminente rottura. Le frecce applicate ai punti nel grafico 3.2.2 indicano che i provini non si sono rotti ma la prova è stata interrotta per il raggiungimento dei 2 milioni di cicli.

### 3.2.3 Andamenti delle rigidezze durante le prove a R0,1

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R0,1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\sigma_a=200-300\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici delle rigidezze  $k$  misurate durante le prove e normalizzate rispetto al valore della rigidezza iniziale  $k_i$  (valutata a temperatura stabilizzata) e della deformazione media sono riportati in figura 3.2.3a,b,c,d. Si cerca di riassumere in queste figure tutti i comportamenti tipici riscontrati durante le prove. Per i risultati di ogni singola prova si rimanda alle schede relative ai provini.

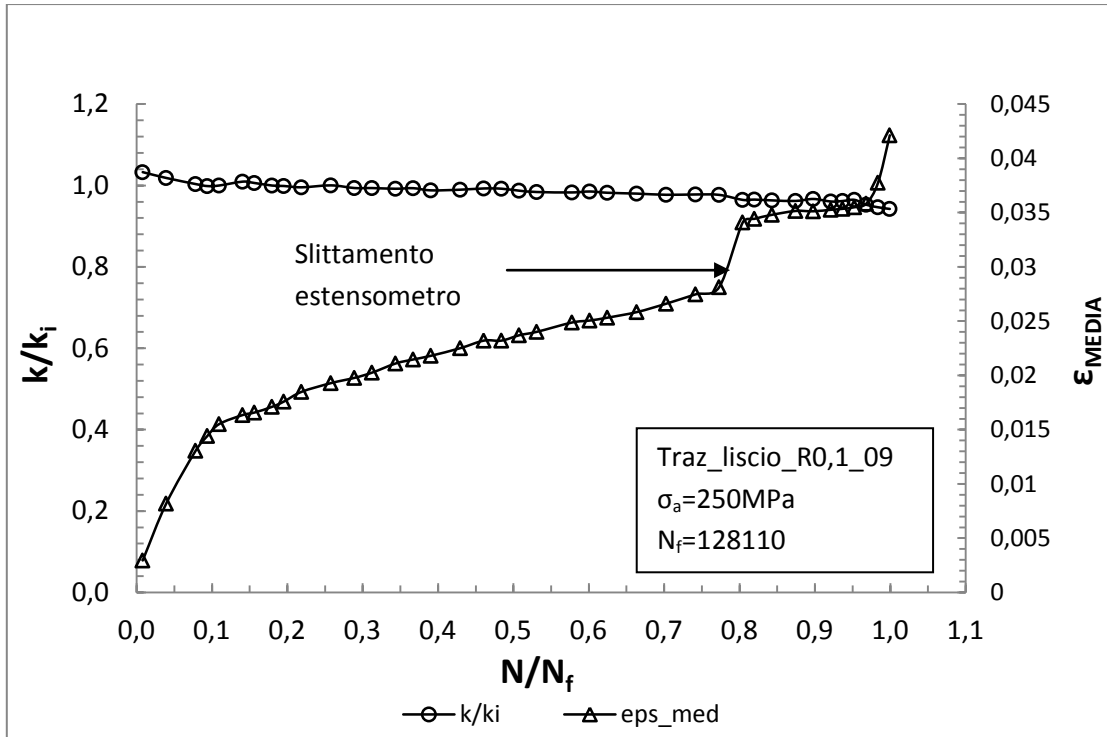


Figura 3.2.3a Evoluzione della rigidità assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

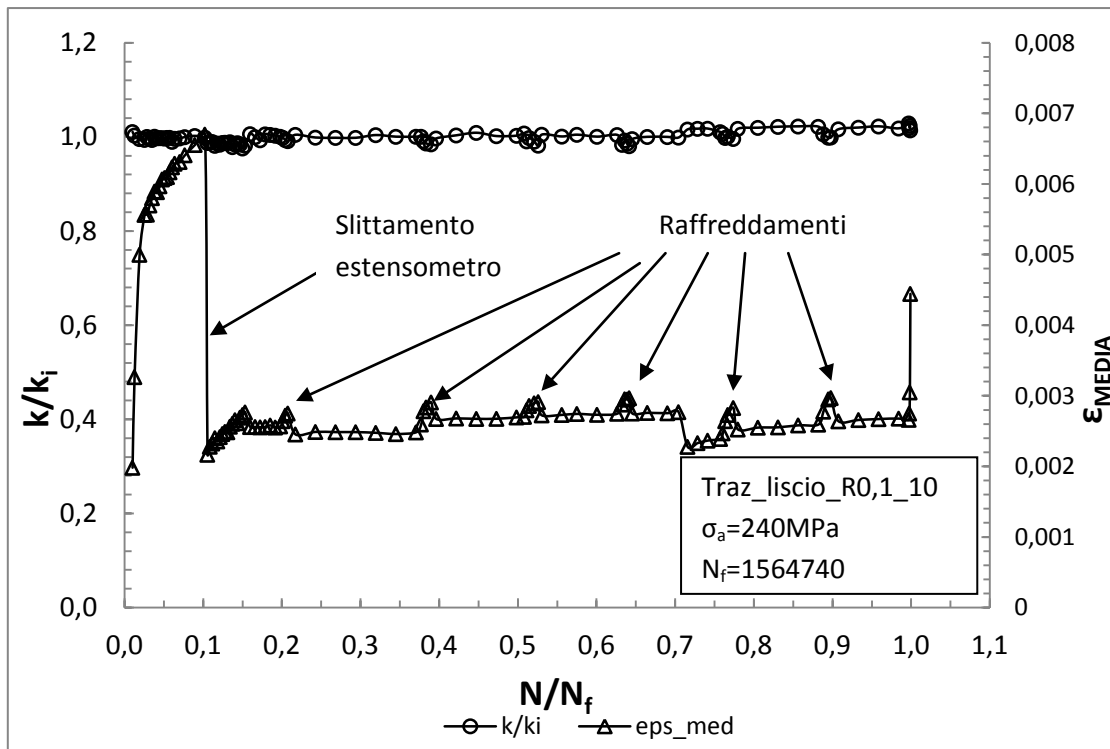


Figura 3.2.3b Evoluzione della rigidità assiale (normalizzata rispetto al valore iniziale a temperatura stabilizzata) e della deformazione media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 2 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 3.2.3a dove si vede come la rigidità cala progressivamente fino a raggiungere circa il 90-94% della rigidità iniziale. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 09,11,12,13,16 e descrive un addolcimento del materiale. In questo caso tutti i provini, ad esclusione dello 09 (sollecitato a 250MPa), sono stati sollecitati da ampiezze di tensione superiori ai 270MPa. Questo aspetto porta a dire che a livelli di sollecitazione elevati il materiale tende ad addolcire fino alla rottura.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figura 3.2.3b dove la rigidità tende a rimanere costante nel tratto iniziale della vita per poi salire leggermente fino alla rottura. La rigidità finale, valutata prima dell'insorgere della cricca, aumenta del 2-3% rispetto alla rigidità iniziale valutata a temperatura stabilizzata. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 01,02,06,07,10,17 e descrive un modesto ma progressivo incrudimento del materiale durante la vita. Anche in questo caso si può constatare che il fenomeno avviene per particolari livelli di carico in particolare per ampiezze inferiori ai 250MPa. Questo aspetto porta a dire che a livelli di sollecitazione bassi il materiale tende ad incrudire leggermente fino alla rottura. Nella figura sono indicati i raffreddamenti in corrispondenza dei quali la stabilizzazione della temperatura avviene a temperature più alte in quanto il ventilatore è spento, questo comporta un aumento della deformazione media e un calo della rigidità per effetto termico.

Dall'analisi delle figure 3.2.3a,b si può inoltre osservare come sia più complicato individuare la zona di innesco e propagazione della cricca. Infatti i segnali di rigidità sembrano non accorgersi, ad eccezione di qualche caso, dell'imminente rottura non presentando quel vistoso cambio di pendenza tipico delle prove a R-1 e visibile nelle figure 3.2.1b,c,d. Solo nella deformazione media si ritrova il rapido aumento che comunque è limitato agli ultimi 2-3 punti di acquisizione. Si può dire allora che il materiale, in prossimità della rottura, aumenta mediamente la sua deformazione media ma il  $\Delta\epsilon$ , e quindi la rigidità, restano grossomodo sempre gli stessi fino a qualche decina di cicli prima della rottura, ovvero finché la cricca non raggiunge una dimensione macroscopica.

Si riportano infine in figura 3.2.3c un esempio di superfici di frattura riscontrate nelle prove assiali ad R0,1.

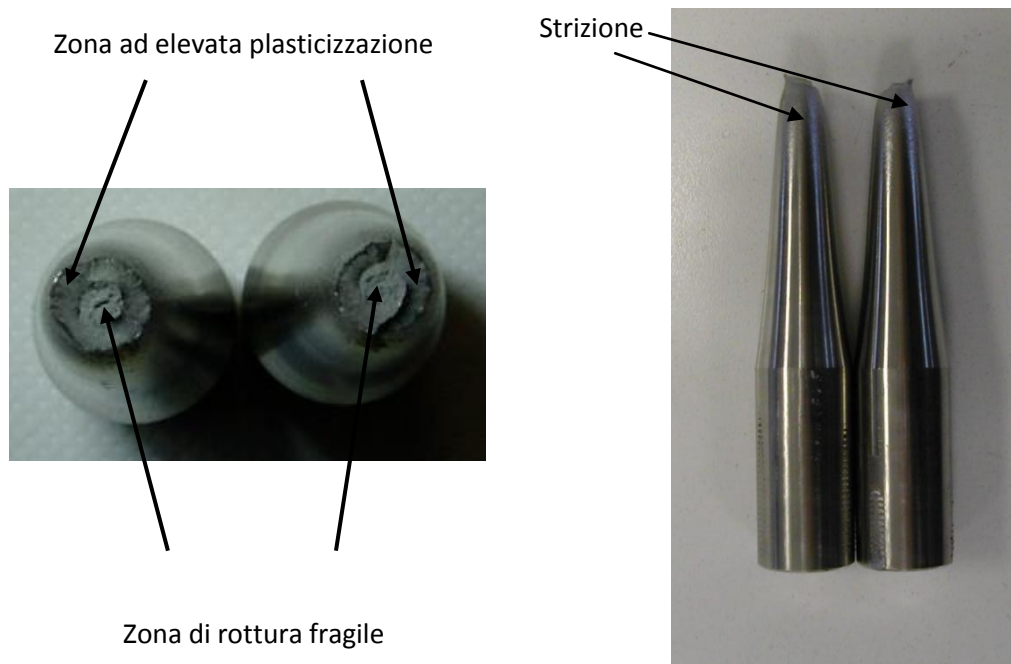


Figura 3.2.3c Esempio tipico di superfici di frattura (provino Traz\_liscio\_R0,1\_16  $\sigma_a=290\text{MPa}$  ;  $N_f = 10275$ ) nelle prove a rapporto di ciclo R0,1

Come appare dalla figura 3.2.3c le superfici di frattura non appaiono regolari come nel caso delle prove a R-1. La zona appare divisa in due cerchi concentrici. Quello esterno ha un aspetto per lo più liscio con delle striature radiali mentre la zona centrale appare ruvida e opaca tipico delle fratture fragili. Nella figura a destra si nota come ad R0,1 il provino subisca deformazioni maggiori e la strizione della sezione mediana è ben visibile e molto accentuata. Nel provino in foto ad esempio il diametro ha subito una riduzione dai 15mm iniziali fino ai 10mm nell'istante della rottura.

### 3.2.4 Risultati delle prove assiali a R0,1

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 3.2.4 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R0,1 sintetizzati in termini di ampiezza di tensione, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa  $k$ , il coefficiente di dispersione in tensione  $T_\sigma$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 3.2.4 Vita a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

PROVINO	$\sigma_a$ [Mpa]	$\sigma_m$ [Mpa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Traz_liscio_R0,1_01	200	244	0,1	20,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_02	250	306	0,1	10,0	92656	
Traz_liscio_R0,1_03	280	342	0,1	6,0	33460	3
Traz_liscio_R0,1_05	270	330	0,1	8,0	28649	
Traz_liscio_R0,1_06	235	287	0,1	13,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_07	240	293	0,1	12,5	1552427	2
Traz_liscio_R0,1_09	250	306	0,1	11,0	128110	
Traz_liscio_R0,1_10	240	293	0,1	12,0	1564740	
Traz_liscio_R0,1_11	270	330	0,1	8,0	33273	
Traz_liscio_R0,1_12	270	330	0,1	8,0	35658	
Traz_liscio_R0,1_13	300	367	0,1	3,5	5430	
Traz_liscio_R0,1_14	300	367	0,1	3,5	2773	3
Traz_liscio_R0,1_15	290	354	0,1	4,5	5307	3
Traz_liscio_R0,1_16	290	354	0,1	4,5	10275	
Traz_liscio_R0,1_17	240	293	0,1	12,5	2000000	1

1 prova interrotta prima della rottura  
 2 prova interrotta per rottura afferraggio  
 3 prova eseguita senza raffreddamenti

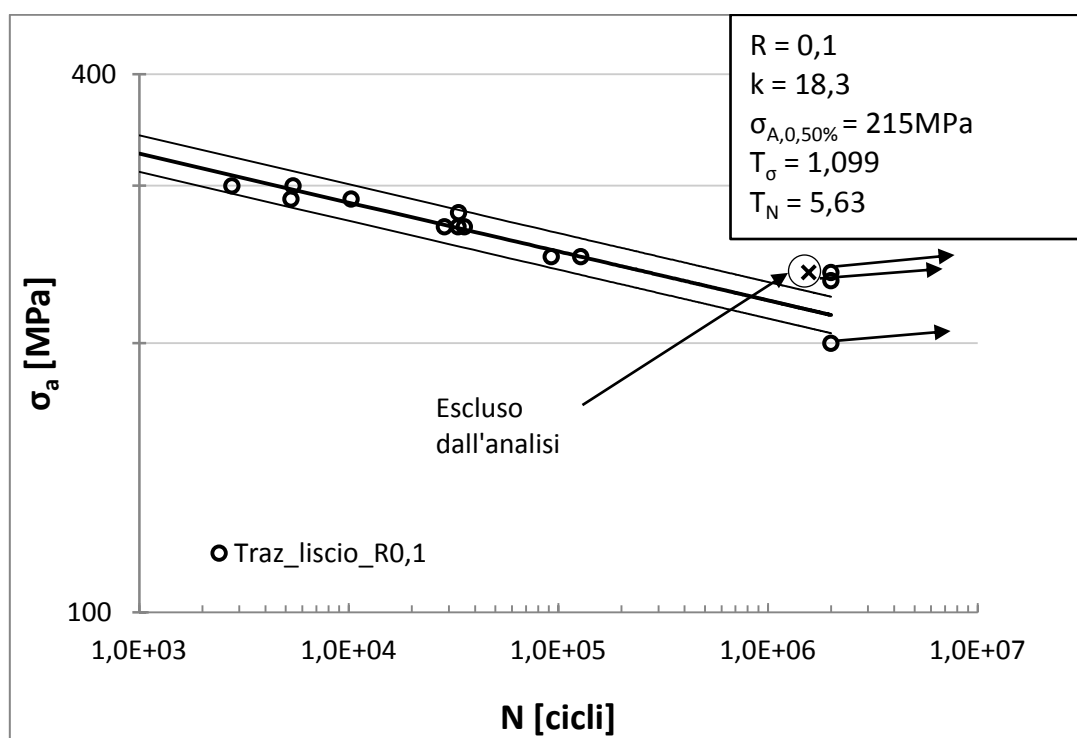


Grafico 3.2.4 Curva a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

Il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10 è stato escluso dall'analisi in quanto si sospetta che sia stata una rottura dovuta a qualche difetto. Questa ipotesi viene fatta in base al fatto che

altri due provini , sollecitati con lo stesso carico, hanno superato il limite dei 2 milioni di cicli. Inoltre, come si vedrà nei paragrafi successivi, il valore dell'energia dissipata era in linea con gli altri due provini ed essendo Q un parametro che non risente della presenza di difetti si può ipotizzare che la rottura sia stata prematura. Altro aspetto che rafforza questa ipotesi è che in tutta la campagna di prove il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10 è stato l'unico provino a rompersi tra il milione e i due milioni di cicli. Si ritiene tuttavia necessaria l'esecuzione di ulteriori prove per confermare tale ipotesi e definire meglio la curva nel tratto di vita dopo il milione di cicli.

### 3.2.5 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di ampiezza di tensione

Nel grafico di figura 3.2.5 si riassumono infine i dati ottenuti per i due diversi rapporti di ciclo per poter effettuare un confronto tra le due serie di dati.

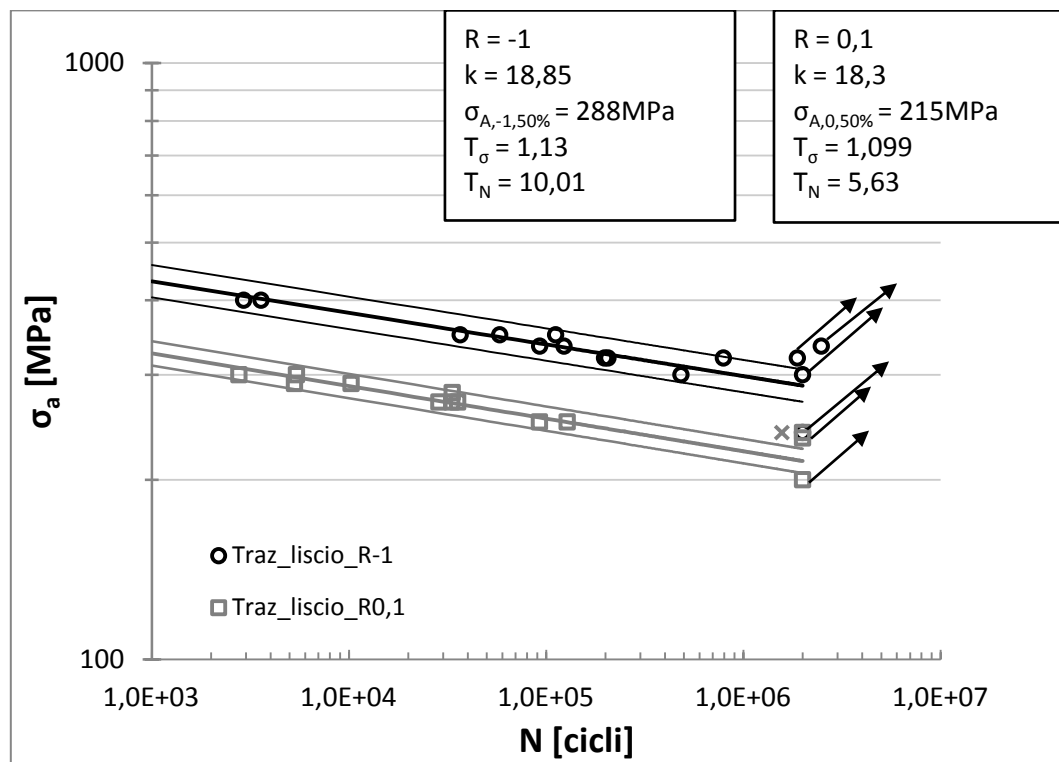


Grafico 3.2.5 Confronto curve a fatica per provini sollecitati a rapporto di ciclo R0,1 ed R-1

Dall'analisi del grafico 3.2.5 si vede come lo stesso materiale, sottoposto a sollecitazioni di fatica a diverso rapporto di ciclo presenta comportamenti diversi ed i risultati non possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione. In particolare si nota come a parità di vita a termine i provini sollecitati ad R-1 presentano ampiezze di tensione più elevate rispetto ai provini sollecitati ad R0,1. Questo fatto è abbastanza intuitivo in quanto il valore della tensione massima è nel primo caso pari al valore dell'ampiezza di tensione  $\sigma_a$  mentre nel secondo caso è molto più elevato a causa della presenza di una tensione media maggiore di zero. Essendo la pendenza delle curve molto simile il



rapporto tra le ampiezze di tensione nei due casi può essere ben rappresentato dal rapporto delle ampiezze corrispondenti al limite di fatica i cui valori sono riportati nei rispettivi grafici. Prendendo come riferimento questo valore possiamo dire che le ampiezze di tensione a parità di numero di cicli a rottura per i due rapporti di ciclo stanno tra loro con un rapporto pari a  $\frac{\sigma_{A,-1,50\%}}{\sigma_{A,0,1,50\%}} = 1,34$ .

### 3.3 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA

In questo paragrafo sono presentati i risultati di tutte le prove di fatica rianalizzati in termini di energia dissipata dal materiale  $Q$ . Sono dunque presentati grafici  $Q-N_f$  per rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0,1$ . Sono presentati inoltre esempi degli andamenti caratteristici dei cicli di isteresi lungo la vita del provino. Le rilevazioni dei cicli di isteresi sono state possibili per i provini in cui è stato utilizzato l'estensometro assiale.

Per ricavare il valore il valore di  $Q$ , rilevabile solo quando la temperatura del provino si è stabilizzata, si interrompe la prova istantaneamente al valore di carico in cui si trova la macchina. Qualche secondo prima dell'interruzione della prova si avvia la registrazione con le termocoppie che permette di valutare la velocità di raffreddamento. Determinata la pendenza del raffreddamento negli istanti successivi all'interruzione della prova e conoscendo le caratteristiche del materiale può essere facilmente ricavato il valore di  $Q$ .

Per uno stesso provino vengono effettuati più raffreddamenti allo scopo di valutare la variazione di  $Q$  in funzione del numero di cicli. A seconda dell'andamento di  $Q$  si ricava un valore caratteristico per ciascun provino, che può essere il valore medio oppure quello valutato a metà vita, e relazionando questo valore in funzione del numero di cicli a rottura si può tracciare una curva di Woehler modificata in cui in ascissa si ha ancora il numero di cicli a rottura mentre in ordinata si ha il parametro energia dissipata  $Q$ .

Una curva completa si può ottenere eseguendo una serie di prove a differenti ampiezze di tensione (per uno stesso provino sempre la stessa ampiezza) in un campo sufficientemente ampio da garantire la corretta caratterizzazione del materiale.

#### 3.3.1 Determinazione del parametro densità di energia dissipata $Q$

Con i file esportati in formato .txt dal software di gestione delle termocoppie Agilent è possibile ricavare il valore di  $Q$ . Per una migliore comprensione della procedura si fa

riferimento ad un esempio considerando il raffreddamento IX del provino Traz\_liscio\_R-1\_08.

Con un elaboratore di dati si traccia un grafico la cui ascissa rappresenta il tempo mentre l'ordinata riporta la temperatura come è evidenziato dal grafico di figura 3.3.1a. Per la determinazione del gradiente nella fase iniziale del raffreddamento si riduce la finestra di tempo al tratto in cui la pendenza della curva resta costante. Si è visto che per le prove assiali questo intervallo di tempo è quello corrispondente alla variazione di temperatura di circa 1°C. Si preferisce inoltre fare riferimento alla variazione di temperatura rispetto all'istante in cui il raffreddamento ha inizio piuttosto che al valore assoluto. Si genera così il grafico di figura 3.3.1b nel quale è possibile tracciare la retta di regressione e visualizzare la rispettiva equazione. Il coefficiente angolare della retta così ottenuti altro non è che la derivata della temperatura rispetto al tempo e rappresenta quindi il nostro gradiente di raffreddamento.

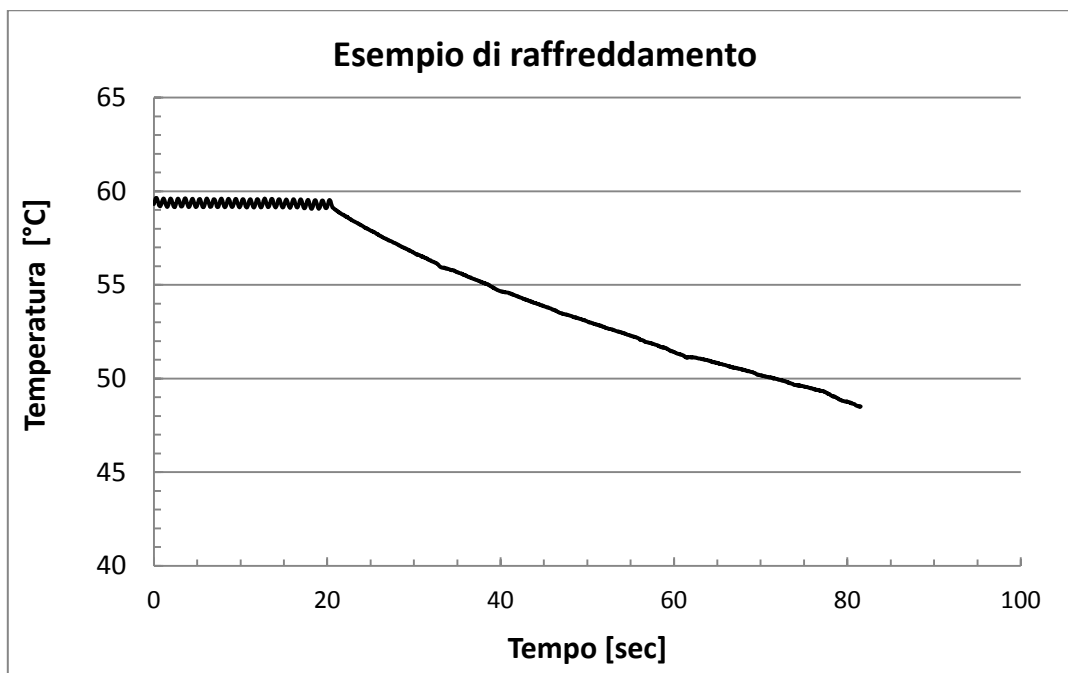


Figura 3.3.1a Grafico temperatura-tempo nel raffreddamento IX del provino Traz\_liscio\_R-1\_08

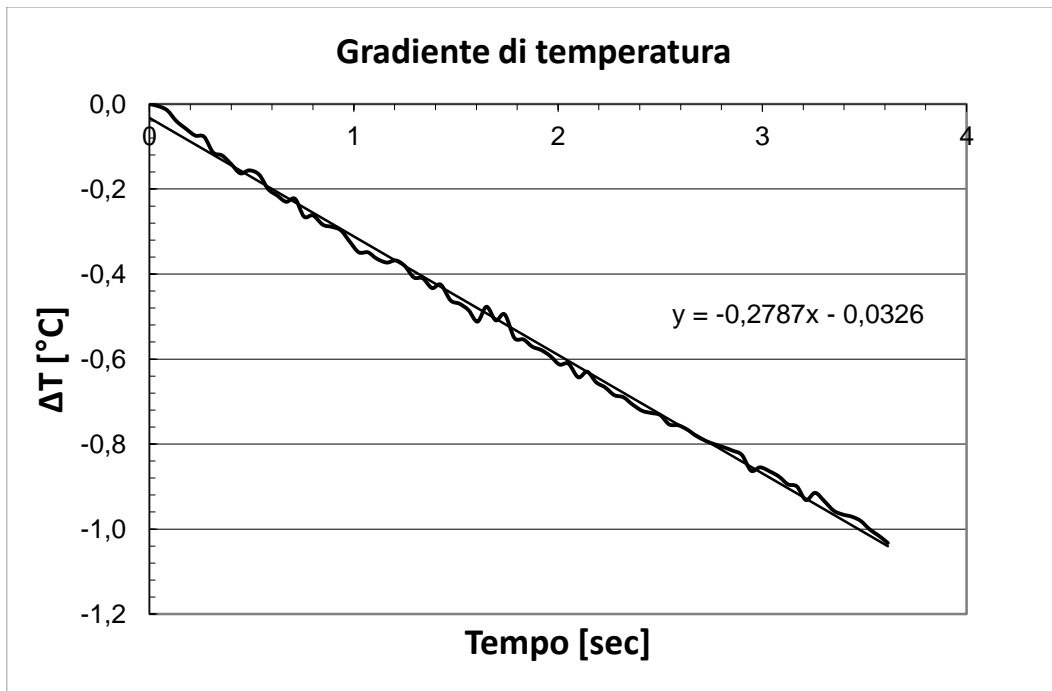


Figura 3.3.1b Determinazione del gradiente di raffreddamento IX del provino Traz\_liscio\_R-1\_08

Dalla conoscenza del gradiente si può dunque risalire alla potenza termica dissipata  $H$  mediante la formula 3.3.1a una volta note la densità ed il calore specifico del materiale. In tutte le prove svolte il materiale è l'acciaio inossidabile AISI304L che presenta i seguenti valori di densità e calore specifico:

$$\rho = 7900 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \qquad c_s = 0,5 \left[ \frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$H = \rho c_s \frac{dT}{dt} = 7900 \cdot 0,5 \cdot 0,2787 = 1101 \left[ \frac{kJ}{m^3s} \right] \qquad (3.3.1)$$

Mentre l'energia termica dissipata  $Q$  si ottiene dividendo per la frequenza di prova:

$$Q = \frac{H}{f} = \frac{1101}{1,2} = 917,5 \left[ \frac{kJ}{m^3ciclo} \right] \qquad (3.3.2)$$

Per ciascuna prova di fatica l'obiettivo è dunque quello di effettuare almeno 3-4 raffreddamenti per riuscire a valutare l'evoluzione del parametro  $Q$  al variare del numero di cicli. Ogni valore ottenuto da un raffreddamento lo si riporta sull'ordinata in

un grafico e li si presenta in funzione del numero di cicli. Un esempio di grafico è visibile in figura 3.3.1c.

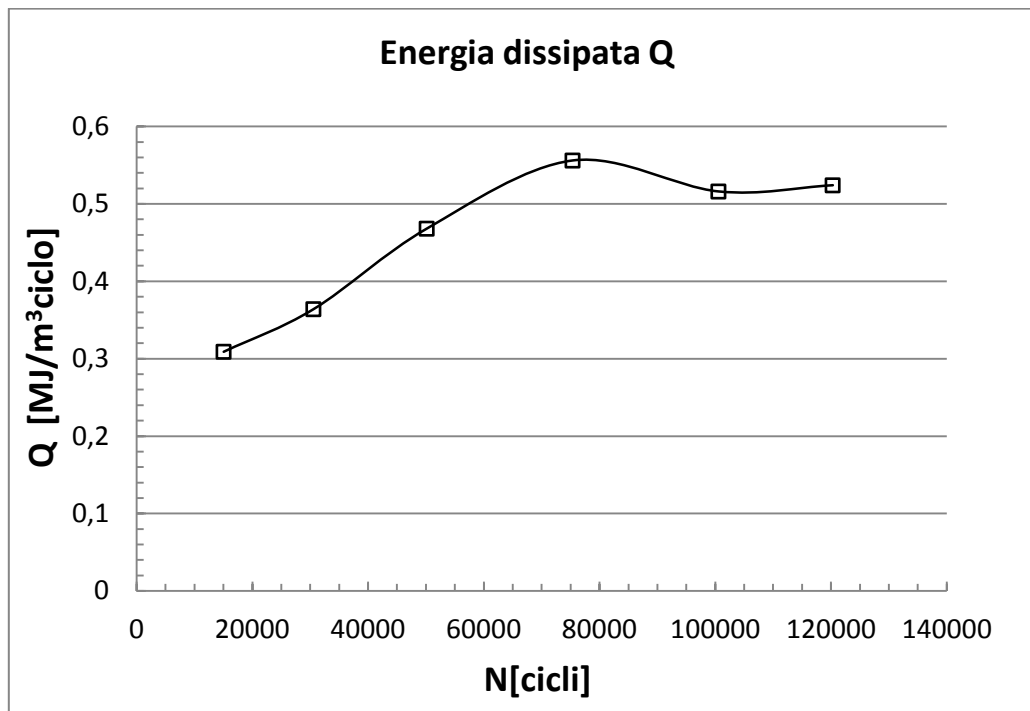


Figura 3.3.1c Esempio di andamento dell'energia dissipata Q

Il grafico di Q in funzione del numero di cicli può avere diversi andamenti. In particolare in alcuni casi Q stabilizza, cioè dopo un aumento iniziale si stabilizza per il resto della vita per poi aumentare nelle vicinanze della rottura, mentre in altri casi l'energia dissipata ha un andamento sempre crescente o sempre decrescente.

Occorre a questo punto tracciare la curva di Woehler che presenta in ascissa il numero di cicli e in ordinata l'energia dissipata per ciclo. Per farlo dobbiamo, per ogni provino, ricavare un Q che lo rappresenti. Si possono presentare generalmente due casi differenti:

- andamento di Q misurato nei diversi raffreddamenti al variare del numero di cicli è sempre crescente o decrescente;
- l'andamento di Q misurato nei diversi raffreddamenti al variare del numero di cicli ha una stabilizzazione.

Per il secondo caso la scelta del Q del provino è abbastanza semplice in quanto basta fare la media dei valori stabilizzati. Qualora l'andamento fosse sempre crescente o sempre decrescente si deve scegliere a quale percentuale prendere il Q di riferimento, per tutte le analisi svolte è stato scelto di fare riferimento al Q valutato al 50% della vita del provino.

### 3.3.2 Andamenti dell'energia dissipata nelle prove a R-1

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R-1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\sigma_a=240-400\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici dell'energia dissipata Q sono riportati nelle figure 3.3.2a,b,c.

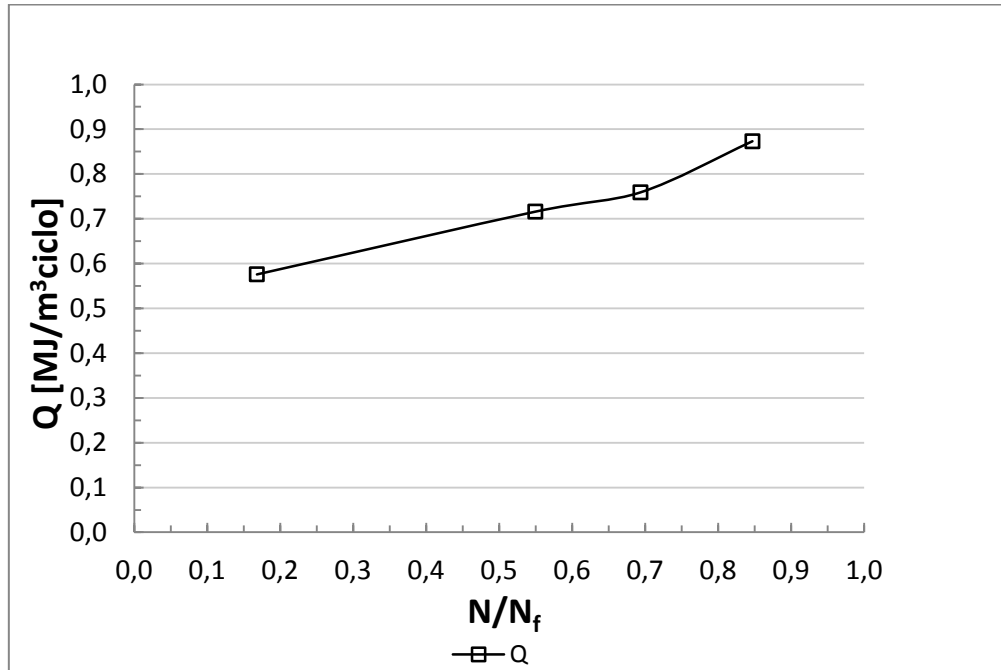


Figura 3.3.2a Andamento dell'energia dissipata Q del provino Traz\_liscio\_R-1\_13

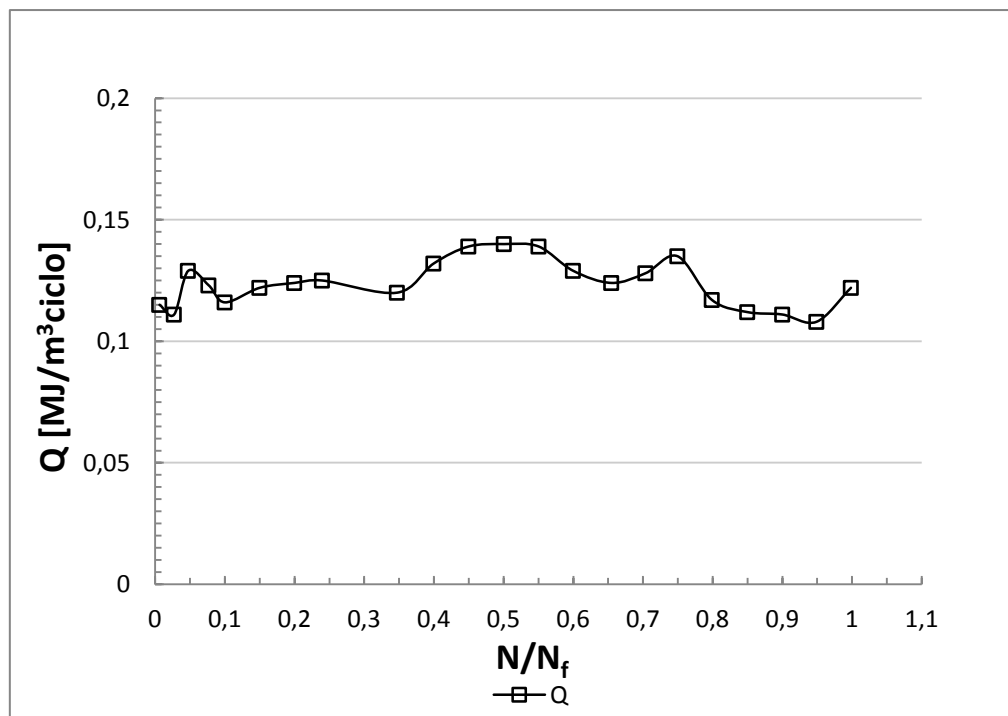


Figura 3.3.2b Andamento dell'energia dissipata Q del provino Traz\_liscio\_R-1\_06

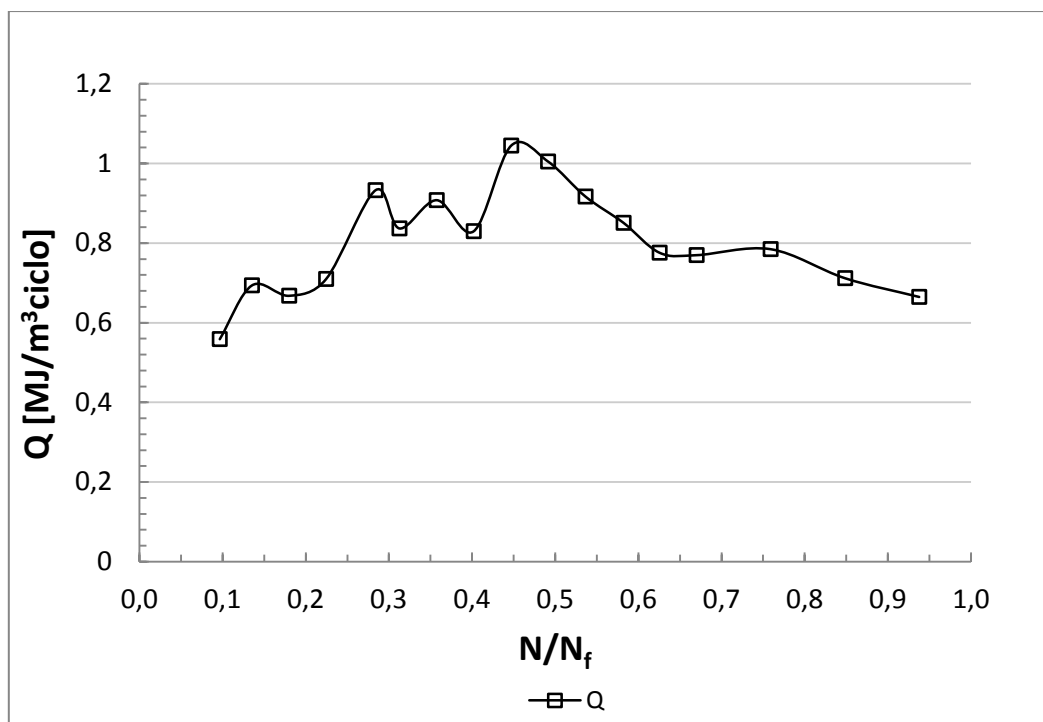


Figura 3.3.2c Andamento dell'energia dissipata Q del provino Traz\_liscio\_R-1\_08

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 3 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 3.3.2a dove si vede che l'energia dissipata aumenta con il numero di cicli. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 02,04,07,10,13,14 che sono tutti provini che presentano un addolcimento, ovvero un calo di rigidità all'aumentare del numero di cicli. Per questi provini si è preso come parametro di riferimento per la costruzione della curva di Woehler modificata il valore di Q relativo al 50% della vita.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figure 3.3.2b dove l'energia dissipata resta per lo più costante durante tutta la prova. Questo comportamento è stato riscontrato per i provini 02,05,06,12 ma in questo caso non si riesce a trovare una correlazione con il comportamento relativo alla rigidità del materiale. Anche per questi provini si è preso come parametro di riferimento per la costruzione della curva di Woehler modificata il valore di Q relativo al 50% della vita.

Il terzo comportamento rilevato è quello di figura 3.3.2c in cui l'energia dissipata presenta un aumento nella prima parte della vita e un calo nella seconda parte. Questo comportamento è stato rilevato per i provini 08,09 e 11 che sono tutti provini che presentano un iniziale addolcimento ed un successivo incrudimento. Queste associazioni sono fatte esclusivamente osservando i grafici relativi a ciascun provino ma la quantità

dei dati a disposizione non permette di affermare che la corrispondenza sia effettivamente quella indicata. Per il provino 08, che è quello che presenta una maggiore variazione di  $Q$  si è preso come parametro rappresentativo dell'energia dissipata il valore di medio. Per gli altri due si è considerato invece sempre il valore al 50% della vita in quanto è stato considerato comunque rappresentativo del comportamento del provino.

Si riporta infine in figura 3.3.2d un tipico andamento dei cicli di isteresi durante la vita del provino. Dall'analisi della figura si vede come i cicli subiscono una traslazione verso destra e contemporaneamente l'area del ciclo tende ad aumentare. Questo comportamento è tipico nel materiale che addolcisce durante la prova in quanto la traslazione verso destra indica un aumento della deformazione media e l'aumento dell'area indica un calo di rigidità. L'ultimo ciclo è preso in corrispondenza della rottura del provino e si vede come la forma risulta distorta e l'area appare molto più grande rispetto ai cicli precedenti.

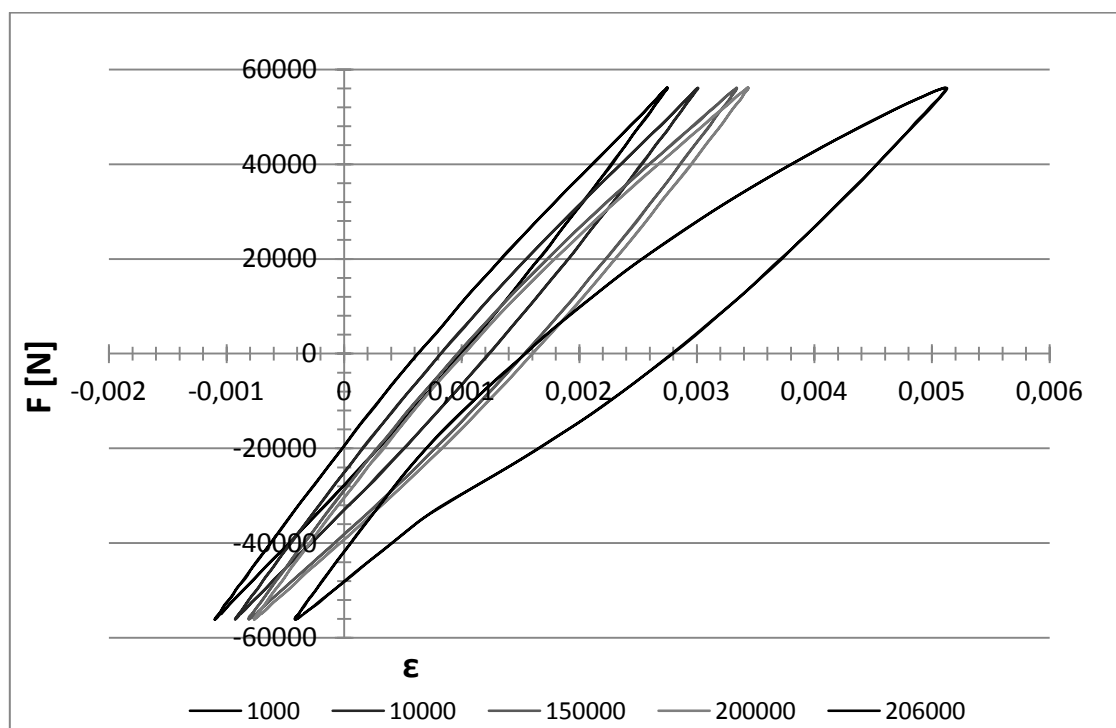


Figura 3.3.2d Cicli di isteresi in diverse fasi della prova per il provini Traz\_liscio\_R-1\_15

### 3.3.3 Risultati delle prove assiali a R-1 in termini di energia dissipata

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 3.3.3 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R-1 sintetizzati in termini di energia dissipata  $Q$  con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la

pendenza inversa  $k$ , il coefficiente di dispersione in tensione  $T_\sigma$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 3.3.3 Energia dissipata per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

PROVINO	R	f [HZ]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Traz_liscio_R-1_02	-1	9	48	0,048	2000000	1
Traz_liscio_R-1_03	-1	0,3	3483	3,483	2931	
Traz_liscio_R-1_04	-1	1	992	0,992	58260	
Traz_liscio_R-1_05	-1	3	246	0,246	793881	
Traz_liscio_R-1_06	-1	5	140	0,14	2000000	1
Traz_liscio_R-1_07	-1	2	512	0,512	123424	
Traz_liscio_R-1_08	-1	1	751	0,751	111949	
Traz_liscio_R-1_09	-1	2,5	252	0,252	2489072	1
Traz_liscio_R-1_10	-1	3	252	0,252	198187	
Traz_liscio_R-1_11	-1	3,5	275	0,275	1882442	2
Traz_liscio_R-1_12	-1	0,3	3278	3,278	3589	
Traz_liscio_R-1_13	-1	1	716	0,716	36728	
Traz_liscio_R-1_14	-1	2	500	0,5	92926	
Traz_liscio_R-1_15	-1	3	/	/	206195	3
Traz_liscio_R-1_16	-1	5	/	/	483510	3

1 prova interrotta prima della rottura  
 2 prova interrotta per rottura afferraggio  
 3 prova eseguita senza raffreddamenti

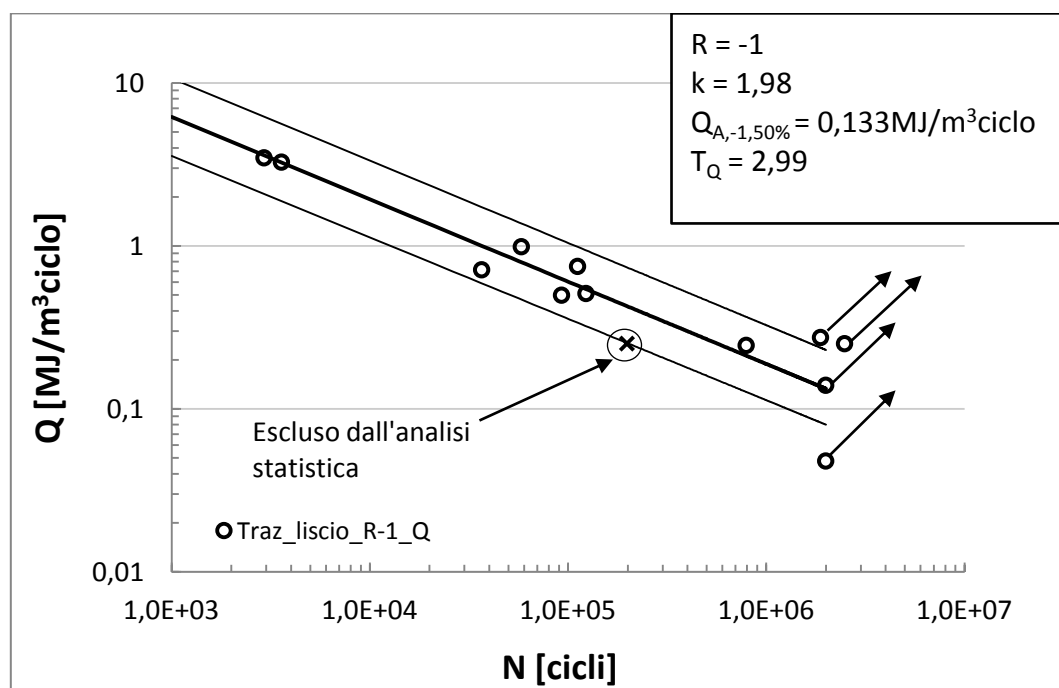


Figura 3.3.3 Curva di Woelher modificata per le prove assiali ad R-1



Il provino Traz\_liscio\_R-1\_10, indicato con una crocetta nel grafico di figura 3.3.3, non è stato inserito nell'analisi statistica perché la superficie di frattura risulta anomala in quanto si notano più punti di innesco probabilmente dovuti a qualche difetto. Il dato, anche se al limite, cade comunque all'interno della banda di dispersione.

#### *3.3.4 Andamenti dell'energia dissipata nelle prove a R0,1*

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R0,1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\sigma_a=200-300\text{MPa}$ . In queste prove la determinazione del parametro Q è stata critica per ampiezze di tensione superiori ai 250MPa. A causa delle elevate deformazioni assiali subite dai provini infatti, la termocoppia tendeva a staccarsi dalla superficie del provino. Per ovviare al problema si è stretta una comune fascetta in plastica attorno alla termocoppia, dopo aver constatato che la sua applicazione non alterava le misure di Q. La soluzione è stata non solo risolutiva ma ha permesso di ottenere dei raffreddamenti molto ben definiti e senza disturbi esterni che rendevano la stima del gradiente difficoltosa nel caso delle prove ad R-1.

Un altro aspetto critico riscontrato è che la stabilizzazione della temperatura è risultata più lenta rispetto alle prove a R-1 e non ha permesso di eseguire molti raffreddamenti per i provini con vita breve. Come si vede nelle schede tecniche dedicate in alcuni provini sono state effettuate soltanto una o due misurazioni di Q ma il dato è stato ritenuto comunque significativo proprio per la definizione netta del gradiente ottenuta grazie all'applicazione delle fascette. Gli andamenti tipici dell'energia dissipata Q sono riportati nelle figure 3.3.4a,b.

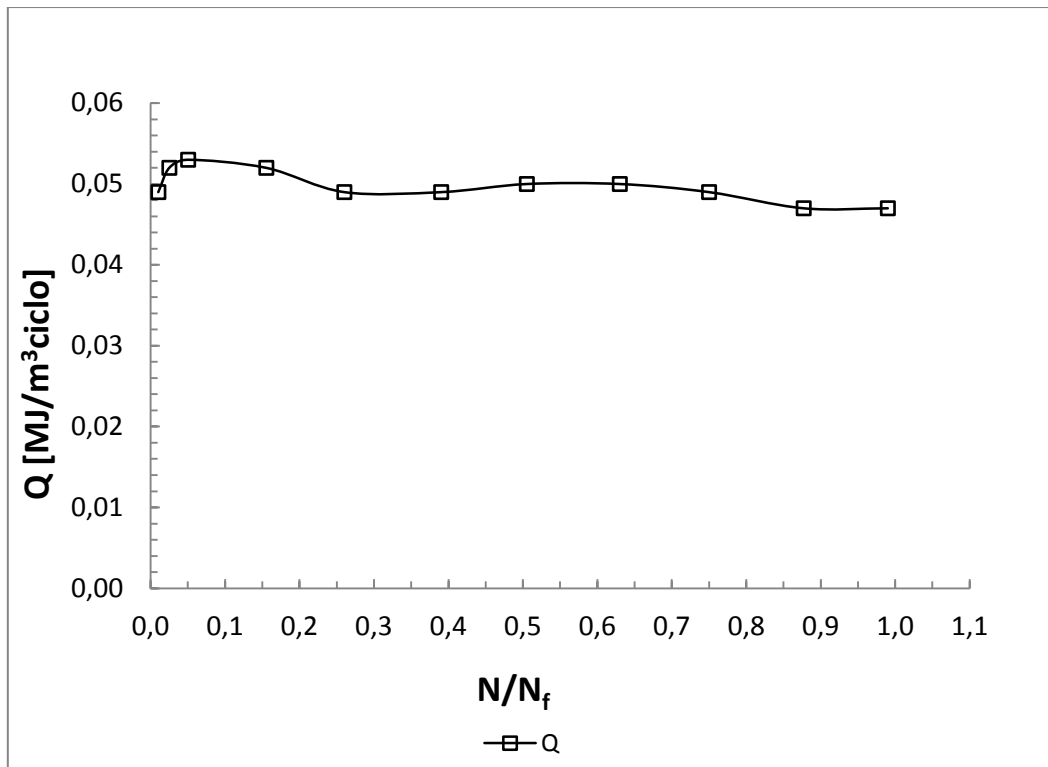


Figura 3.3.4a Andamento dell'energia dissipata Q del provino Traz\_liscio\_R0,1\_17

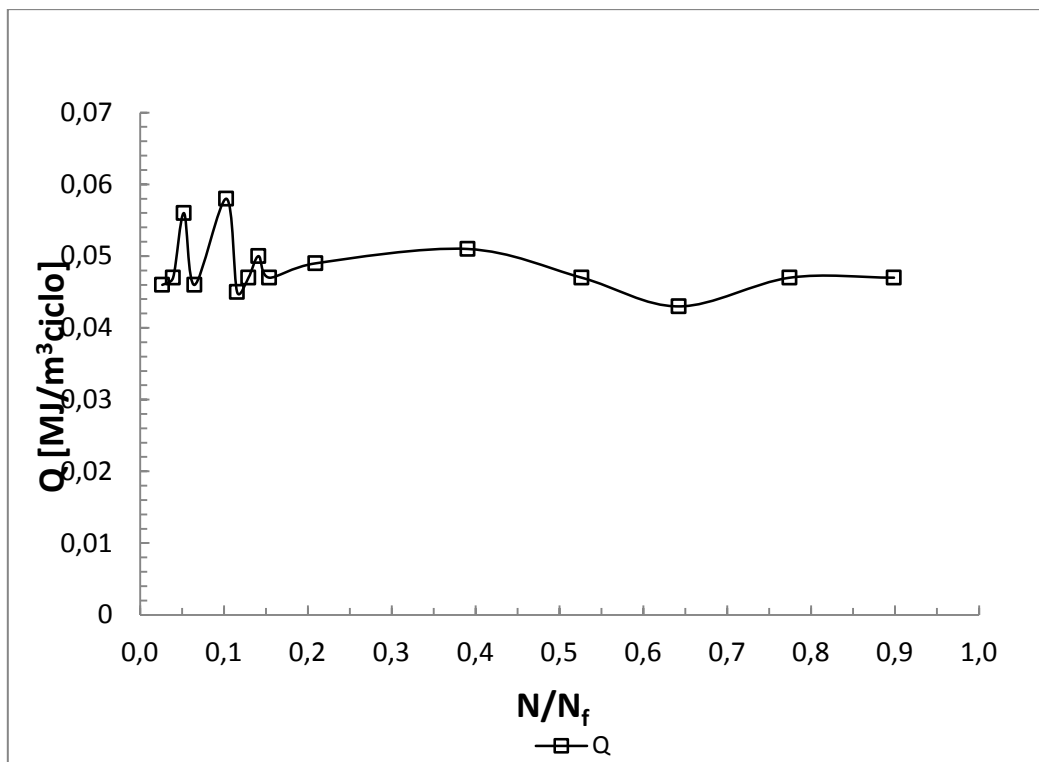


Figura 3.3.4b Andamento dell'energia dissipata Q del provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 2 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 3.3.4a dove si vede che l'energia dissipata resta per lo più costante durante tutta la vita del provino. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 01,02,09,11,12,16,17. Per questi provini si è preso come parametro di riferimento per la costruzione della curva di Woehler modificata il valore di Q relativo al 50% della vita.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figure 3.3.4b dove l'andamento dell'energia dissipata presenta una variazione iniziale ed una successiva stabilizzazione. Questo comportamento è stato riscontrato per i provini 06,07,10. Anche per questi provini si è preso come parametro di riferimento per la costruzione della curva di Woehler modificata il valore di Q relativo al 50% della vita.

Si riporta infine in figura 3.3.4c un tipico andamento dei cicli di isteresi durante la vita del provino. Dall'analisi della figura si vede come i cicli subiscono una traslazione verso destra molto più marcata rispetto alle prove ad R-1. Un'altra differenza è che l'area dei cicli è più ristretta e questo è in accordo con i valori più piccoli dell'energia dissipata riscontrati per queste prove.

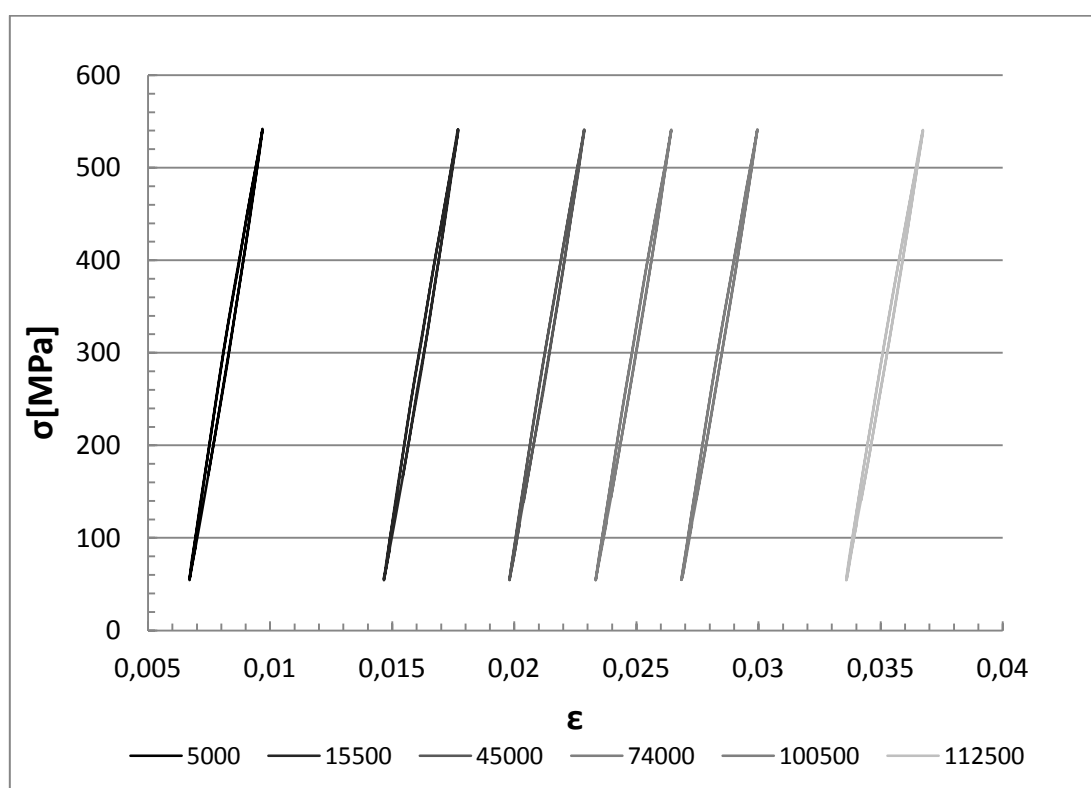


Figura 3.3.4c Cicli di isteresi in diverse fasi della prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

### 3.3.5 Risultati delle prove assiali a R0,1 in termini di energia dissipata

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 3.3.5 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R0,1 sintetizzati in termini di energia dissipata Q con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa k, il coefficiente di dispersione in tensione  $T_\sigma$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 3.3.5 Energia dissipata per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

PROVINO	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	R	f [Hz]	N <sub>f</sub>	NOTE
Traz_liscio_R0,1_01	24	0,024	0,1	20,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_02	72	0,072	0,1	10,0	92656	
Traz_liscio_R0,1_05	85	0,085	0,1	8,0	28649	
Traz_liscio_R0,1_06	46	0,046	0,1	13,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_09	56	0,056	0,1	11,0	128110	
Traz_liscio_R0,1_10	49	0,049	0,1	12,0	1564740	2
Traz_liscio_R0,1_11	79,5	0,0795	0,1	8,0	33273	
Traz_liscio_R0,1_12	77	0,077	0,1	8,0	35658	
Traz_liscio_R0,1_13	205	0,205	0,1	3,5	5430	
Traz_liscio_R0,1_16	136	0,136	0,1	4,5	10275	
Traz_liscio_R0,1_17	50	0,05	0,1	12,5	2000000	1

1 prova interrotta prima della rottura  
 2 prova interrotta per rottura afferraggio

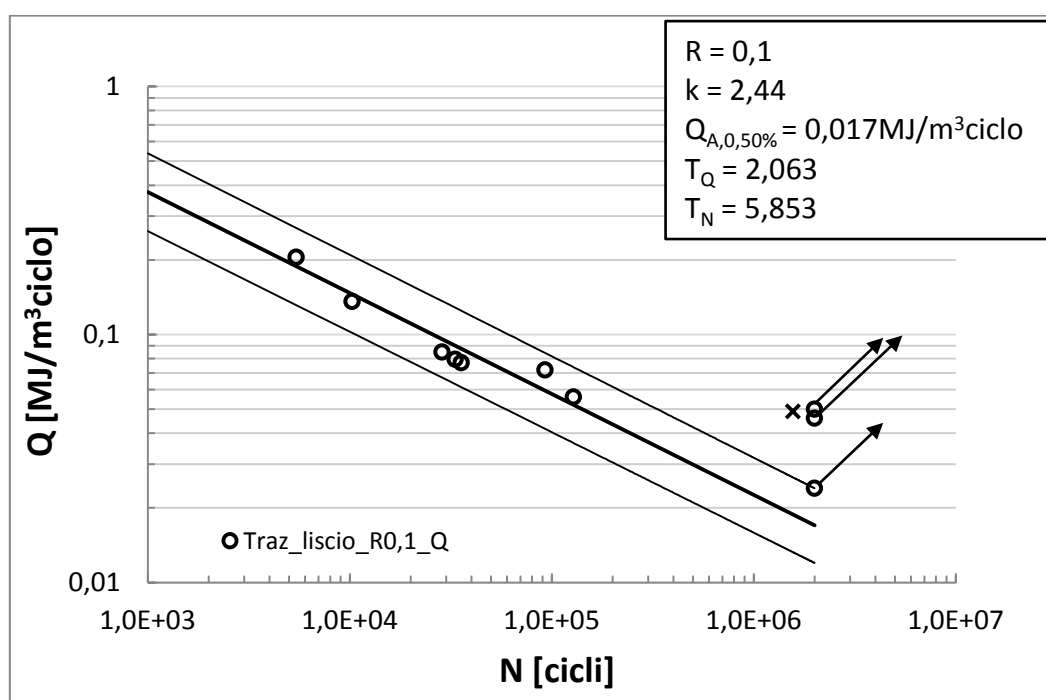


Figura 3.3.5 Curva di Woelher modificata per le prove assiali ad R0,1

Come detto in precedenza e come visibile dal grafico di figura 3.3.5 il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10, escluso dall'analisi statistica, presenta un valore della densità di energia dissipata praticamente uguale a quello di due provini che hanno superato il limite dei due milioni di cicli. In un caso il valore di Q risulta addirittura inferiore. Questo aspetto porta ad ipotizzare che la rottura sia stata prematura e dovuta alla presenza di un qualche difetto. Per confermare l'ipotesi si potrà sottoporre il provino ad un controllo al microscopio elettronico mediante analisi SEM (Scanning Electron Microscope).

### 3.3.6 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di energia dissipata Q

Nel grafico di figura 3.3.6 si riassumono infine i dati ottenuti per i due diversi rapporti di ciclo per poter effettuare un confronto tra le due serie di dati.

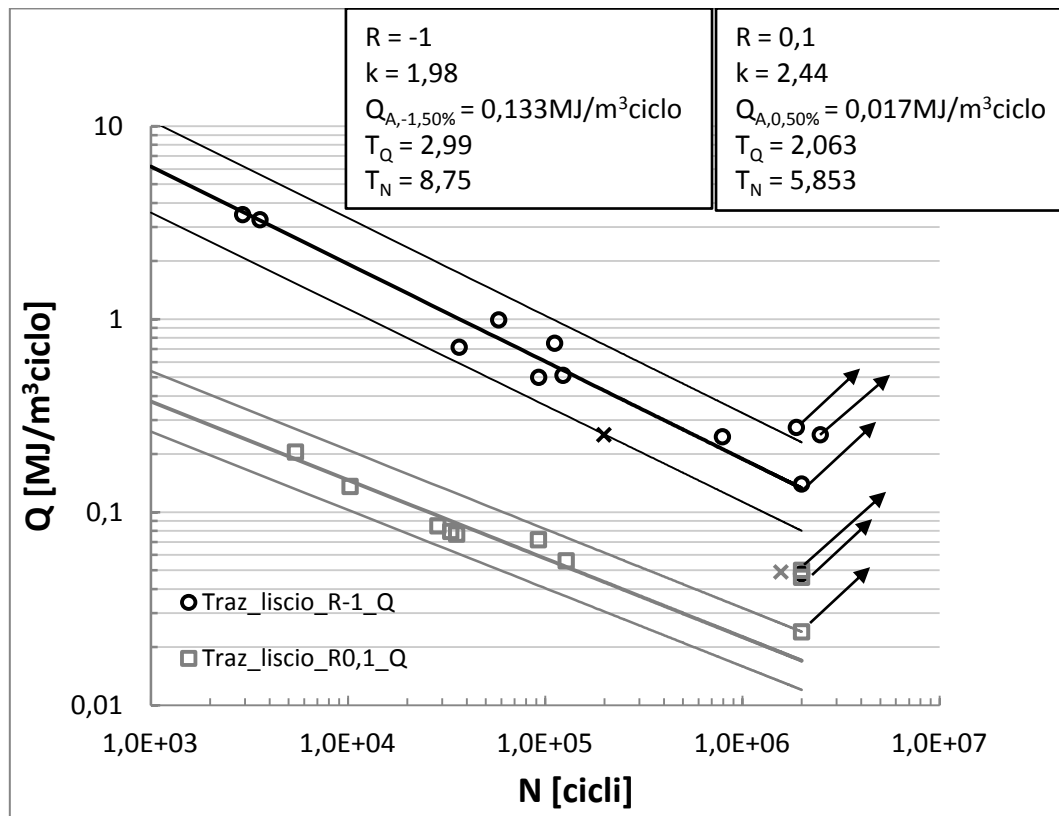


Grafico 3.3.6 Confronto curve a fatica in termini di energia dissipata per provini sollecitati a rapporto di ciclo R0,1 ed R-1

Dall'analisi del grafico 3.3.6 si vede come lo stesso materiale, sottoposto a sollecitazioni di fatica a diverso rapporto di ciclo presenta comportamenti diversi anche in termini di energia dissipata ed i risultati non possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione. In particolare si nota come a parità di vita a termine i provini sollecitati ad R-1 presentano valori dell'energia dissipata Q più elevati rispetto ai provini sollecitati ad R0,1 di circa un ordine di grandezza.

### 3.4 CONFRONTO CON PRECEDENTI RISULTATI SPERIMENTALI

In questo paragrafo si vogliono confrontare i risultati ottenuti in questa campagna di prove con quelli recentemente pubblicati (settembre 2012) dall'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS 2012 [3]) per valutarne la compatibilità, sia in termini di ampiezza di tensione che in termini di energia dissipata.

L'obiettivo è quello di trovare una corrispondenza tra le serie di dati provenienti dalle due fonti e valutare gli eventuali vantaggi di questo nuovo approccio rispetto all'utilizzo delle curve di Woehler classiche nello studio del fenomeno della fatica. Le prove a cui si fa riferimento sono solo quelle eseguite a rapporto di ciclo R-1.

#### 3.4.1 Materiale e metodi utilizzati in AIAS [3]

Per la comparazione dei dati è necessario che il materiale utilizzato nelle varie fonti sia il medesimo. Detto che la denominazione dell'acciaio inossidabile analizzato è in tutti i casi AISI 304 L, i provini sperimentati non provengono tutti dallo stesso lotto di produzione e la composizione dell'acciaio legato varia per le diverse fonti, comportando inoltre una variazione, anche se contenuta, delle caratteristiche meccaniche dello stesso.

Si riportano per completezza tutte le caratteristiche fornite da [3] con riguardo al materiale dei provini sperimentati in tabella 3.4.1. Si riportano inoltre nell'ultima riga le caratteristiche del materiale utilizzato in questa campagna di prove.

Tabella 3.4.1 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio AISI 304L utilizzato nelle diverse campagne di prove

Fonte	Tipo Prove	Rs [Mpa]	Rm [MPa]	A %	HB	C%	Si%	Mn %	Cr%	Ni%	Cu%
[2] [7]	Controllo di forza e deformazione	315	700	66	160	0,02	0,34	1,67	18,2	8,1	0,29
[3]	Controllo di forza	327	680	57	183	0,02	0,33	1,71	18,2	8,1	0,31
	Controllo di forza	468	691	43	230	0,013	0,58	1,81	18	8	0,55

Dall'analisi della tabella precedente si notano alcune differenze tra i materiali utilizzati con riguardo alla composizione chimica e alle caratteristiche meccaniche, sia tra le diverse campagne di prova raccolte in [3] sia per la campagna di prova eseguita in questo lavoro.

Come anticipato dalla precedente tabella, nell'articolo dell'AIAS [3] sono riportati i dati sperimentali ottenuti da prove di fatica eseguite sia in controllo di deformazione sia in controllo di forza. In esso viene analizzato il comportamento a fatica del materiale sopra citato a rapporto di ciclo R-1, sia liscio che in presenza di intagli di diverse geometrie, le quali sono riportate nella figura 3.4.1.

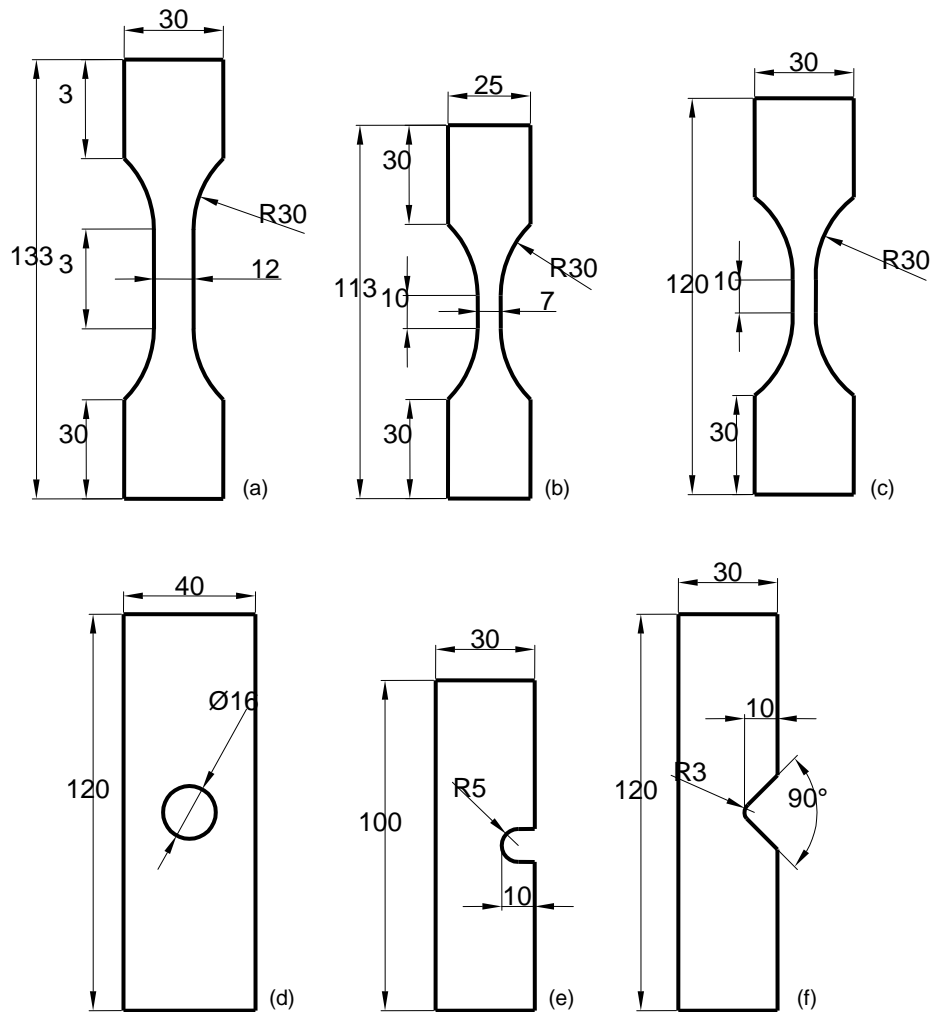


Figura 3.4.1 Geometrie dei provini utilizzate nelle diverse campagne sperimentali. a) prove a fatica in controllo di deformazione a medio e alto numero di cicli e b) basso numero di cicli. d), e), f) geometrie utilizzate per le prove in controllo di forza su provini intagliati.

In particolare sono state utilizzate le seguenti serie di provini: prove in controllo di deformazione, su materiale liscio, su provini forati con raggio  $R=8\text{mm}$ , su provini con intaglio a V e raggio di fondo intaglio  $R=3\text{mm}$ , su provini con intaglio a U a raggio  $R=5\text{mm}$ , Stair case rotti e Stair case non rotti. Lo spessore per tutti i provini descritti sopra è pari a  $6\text{mm}$ .

### 3.4.2 Approccio in termini di tensione netta

In questo paragrafo sono riportati i risultati di tutte le prove di fatica eseguite in termini di ampiezza di tensione netta  $\sigma_{a,net}$ . È opportuno precisare che nel caso delle prove di fatica in controllo di deformazione, la  $\sigma_{a,net}$  è stata calcolata a partire dalla forza registrata dalla cella di carico della macchina di prova durante la prova di fatica, mentre per i provini intagliati a V e U si è assunto come criterio per la determinazione dei cicli ad

innesco il numero di cicli in corrispondenza al quale vi era una cricca di 4mm di lunghezza a partire dal fondo dell'intaglio.

La figura 3.4.2a riporta i risultati di tutte le prove di fatica, sintetizzati in termini di ampiezza di tensione netta, con le curve medie, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza e le pendenze inverse  $k$  per le diverse geometrie testate in AIAS [3].

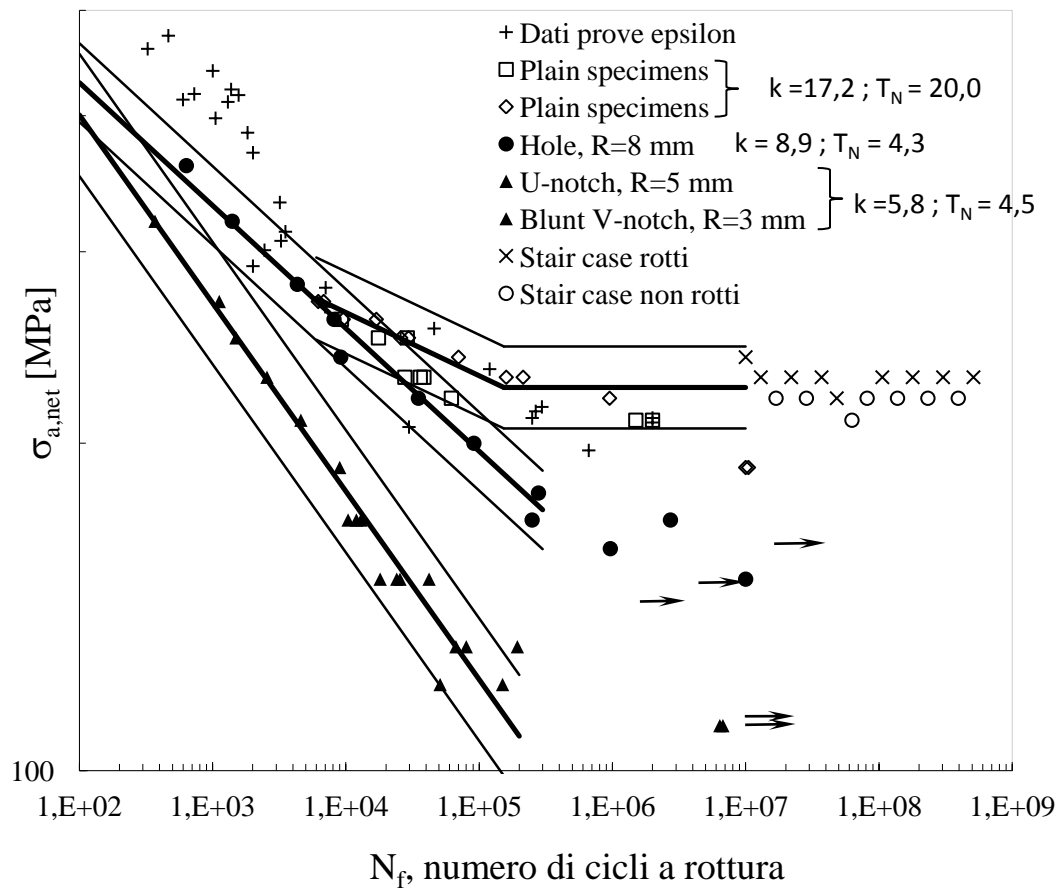


Figura 3.4.2a Curve di Woehler per le geometrie testate in AIAS [3]

Sul grafico di figura 3.4.2b sono presentati gli stessi dati con aggiunti i risultati dei provini di questo lavoro sottoposti alle prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R-1.



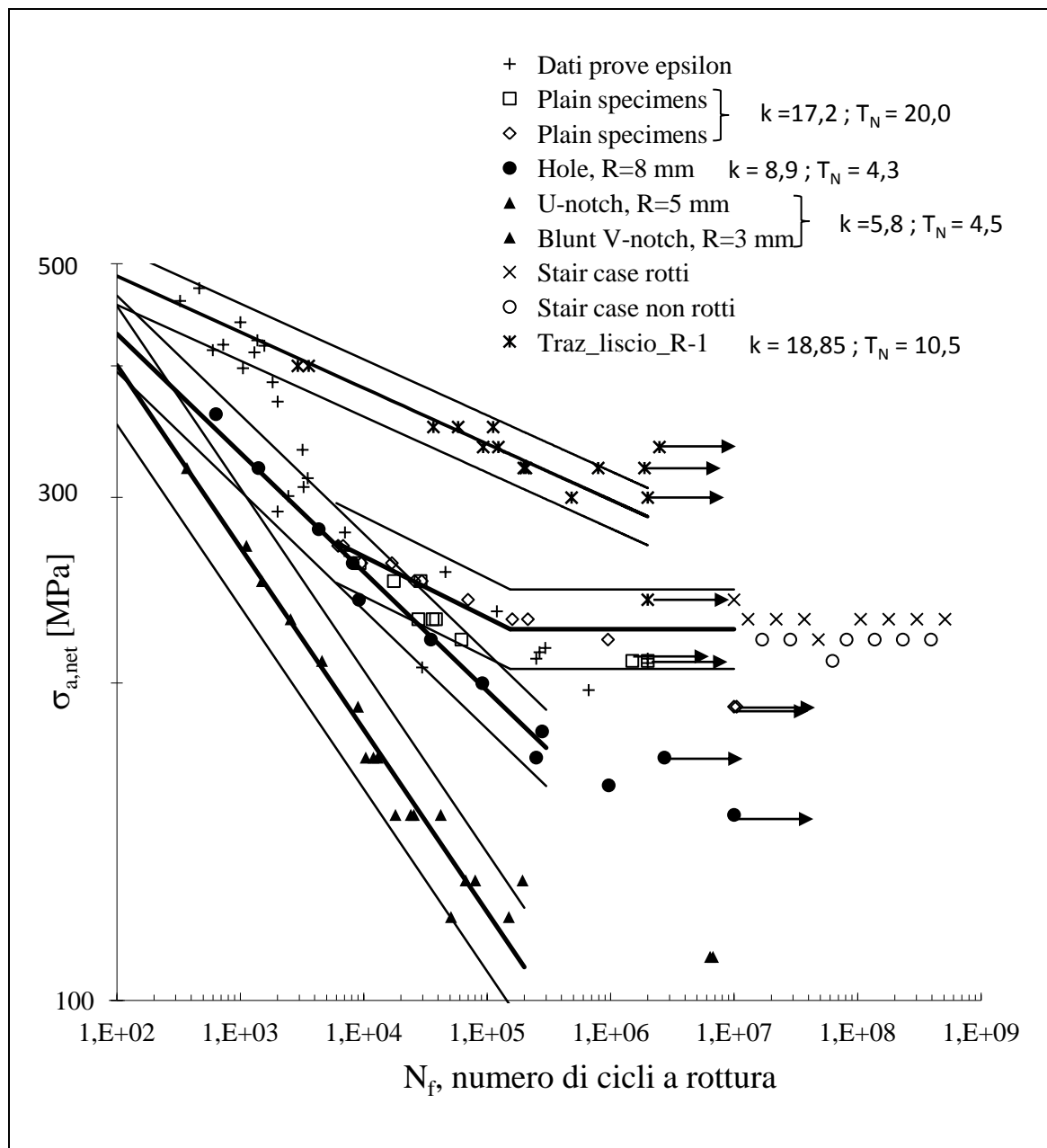


Figura 3.4.2b Confronto delle curve di Woehler per le geometrie testate in AIAS [3] e in questo lavoro

Dall'analisi di figura 3.4.2b si vede una netta differenza di comportamento, sia per quanto riguarda una variazione di geometria sia per quel che riguarda differenti campagne di prove eseguite su materiale con composizione chimica e caratteristiche meccaniche leggermente differenti, pur trattandosi nominalmente dello stesso materiale. Infatti la curva dei lisci provati in questo lavoro (denominata Traz\_liscio\_R-1) è traslata verso l'alto rispetto alla curva dei lisci presentata in [3] pur presentando quasi la stessa pendenza, almeno nel tratto centrale. In definitiva l'approccio basato sull'ampiezza di tensione netta non solo non consente di generalizzare lo studio della fatica a geometrie diverse dello stesso materiale ma risente anche delle variazioni di composizione chimica e delle caratteristiche meccaniche sullo stesso materiale.

### 3.4.3 Approccio in termini di densità di energia dissipata

Nei dati forniti dall'AIAS, in accordo con [2] e [7], i risultati delle prove di fatica sono stati analizzati in termini di un valore caratteristico di Q misurato al 50% del numero di cicli a rottura nel caso di provini lisci e forati e al 50% del numero di cicli ad innesco nel caso dei provini intagliati ad U e V. I risultati di tutte le prove a fatica eseguite, sintetizzati in termini del parametro energetico Q, sono stati analizzati statisticamente come un'unica popolazione nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura e con un livello di confidenza del 95% secondo l'espressione:

$$Q^k N_f = \text{cost}$$

dove  $N_f$  è il numero di cicli a rottura e l'esponente  $k$  è una costante da determinare sperimentalmente.

I risultati tratti dall' articolo dell' AIAS [3] sono sintetizzati in Figura 3.4.3a, dove sono riportate la curva media, le curve al 10% e al 90% di probabilità di sopravvivenza, e successivamente il valore della pendenza inversa  $k$ , il valore di Q valutato a 2 milioni di cicli  $Q_{A,-1,50\%}$ , l'indice di dispersione dei dati attorno al valor medio in vita  $T_{N,Q}$ .

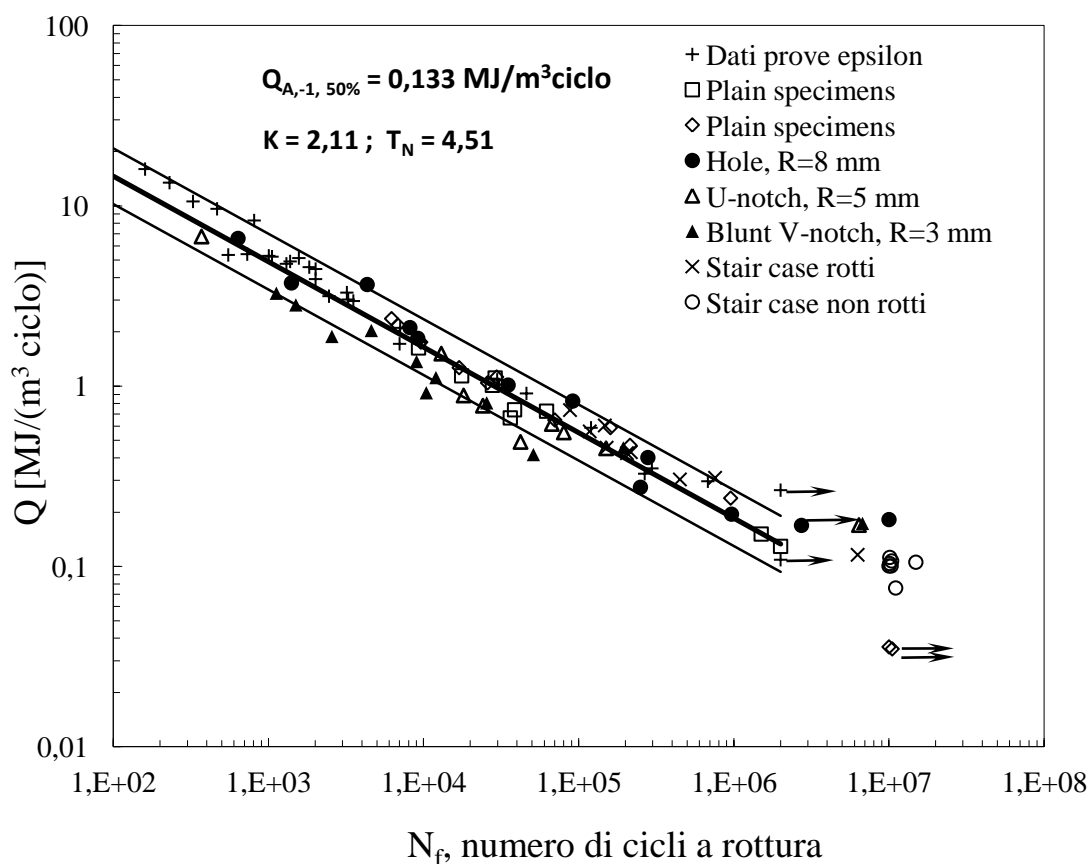


Figura 3.4.3a Sintesi in termini di energia dissipata per ciclo dei risultati presentati in AIAS [3]

Dall'analisi di figura 3.4.3a e come presentato in [3] si vede come il metodo basato sull'energia dissipata per ciclo, a differenza dell'approccio classico basato sull'ampiezza di tensione netta, riesca a sintetizzare il comportamento a fatica di un acciaio inossidabile AISI304L sottoposto a diverse tipologie di sollecitazione (prove in controllo di deformazione e in controllo di forza) e in presenza di diverse geometrie di intagli (foro centrale R=8mm; intaglio a U con raggio di raccordo R=5mm e intaglio a V con raggio di raccordo R=3mm).

Si vuole estendere la bontà del metodo anche alle prove eseguite in questo lavoro. Sul grafico di figura 3.4.2b alla banda pubblicata in [3] sono stati aggiunti i risultati dei provini di questo lavoro sottoposti alle prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R-1.

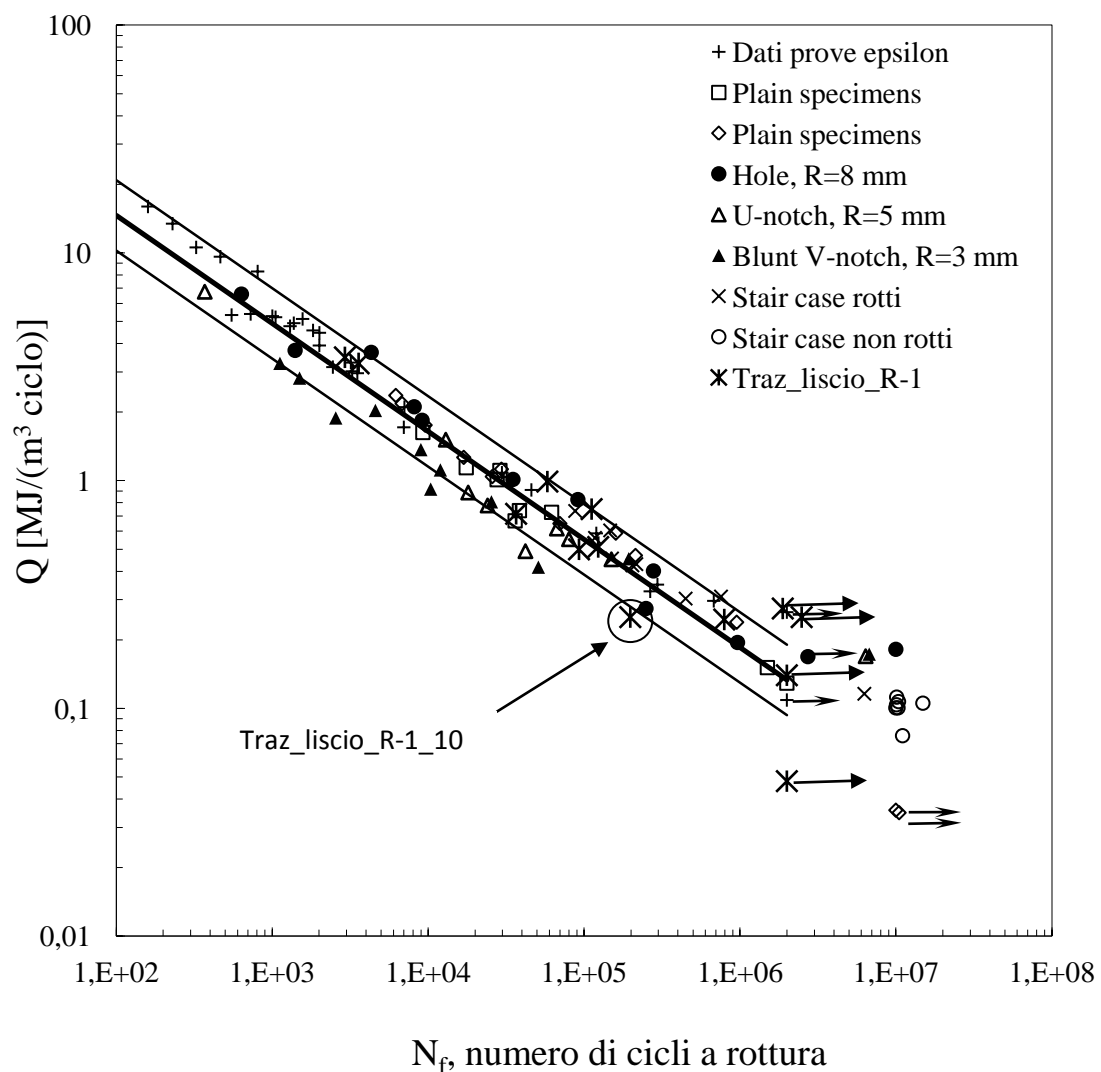


Figura 3.4.3b Sintesi in termini di energia dissipata per ciclo dei risultati presentati in AIAS [3] con inseriti i risultati relativi alle prove eseguite in questo lavoro

Dall'analisi di figura 3.4.3b si vede come i dati relativi ai provini testati in questo lavoro (denominati Traz\_liscio\_R-1) cadono tutti all'interno della banda di dispersione presentata in [3] ad eccezione del provino Traz\_liscio\_R-1\_10 che già era stato escluso dall'analisi perché presentava una superficie di frattura anomala rispetto alle altre e c'era il sospetto della presenza di difetti nel materiale. Considerando le due campagne di prove come un'unica popolazione di dati si ottiene la nuova banda di dispersione, sintetizzata in termini di energia dissipata per ciclo per l'acciaio AISI304L, visibile in figura 3.4.3c dove sono riportati la nuova pendenza  $k$ , il coefficiente di dispersione in energia  $T_Q$  e in via  $T_N$  ed il valore dell'energia dissipata a 2 milioni di cicli  $Q_{\infty, R-1, 50\%}$ .

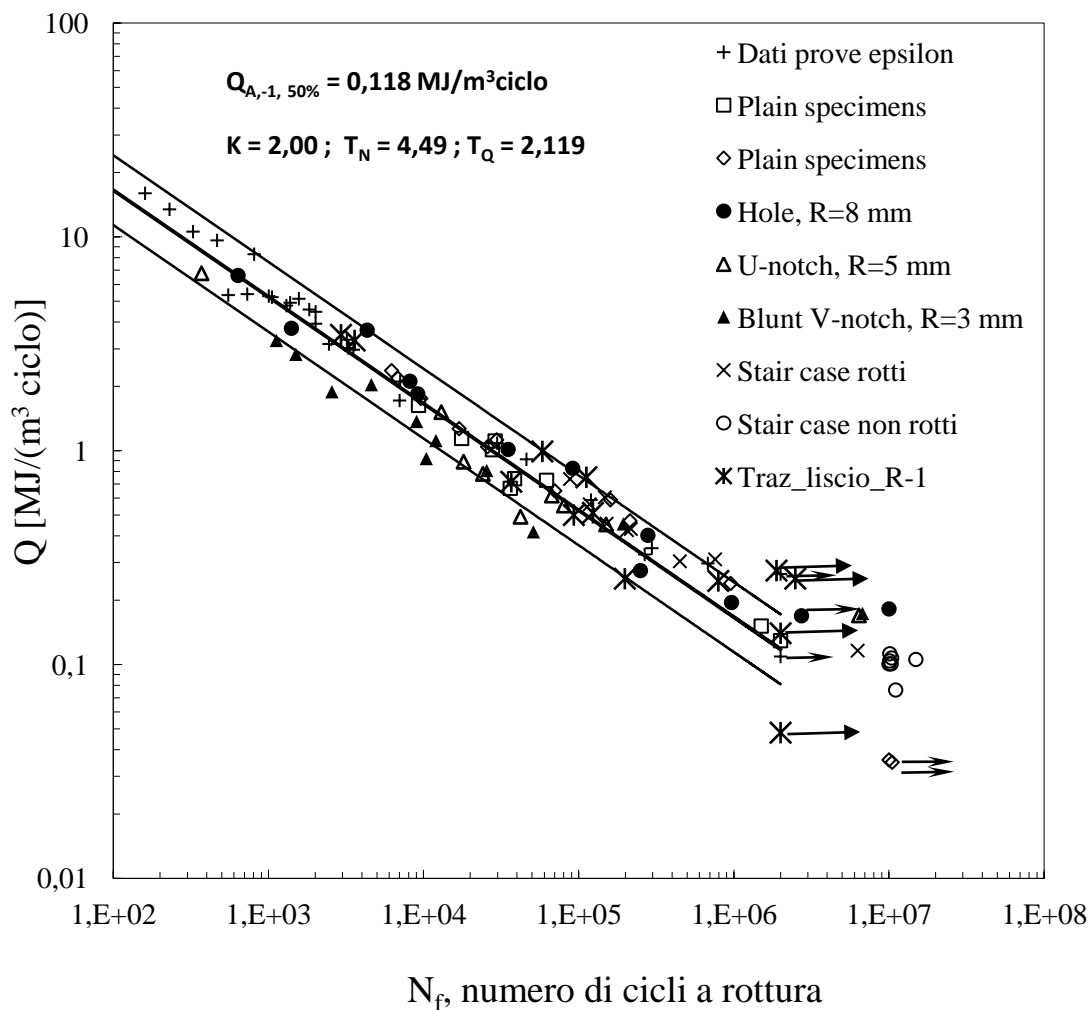


Figura 3.4.3c Sintesi in termini di energia dissipata per ciclo dei risultati presentati in AIAS [3] e i risultati della presente campagna di prove a R-1

### 3.5 CONCLUSIONI

In questo capitolo sono stati presentati i risultati ottenuti dalle campagne di prove eseguite su provini di acciaio inossidabile AISI304L sottoposti a fatica assiale a rapporti di ciclo  $R=-1$  ed  $R=0,1$  in termini di tensione netta e in termini di energia dissipata per ciclo. Si sono poi confrontati i dati con quelli già presenti in letteratura ed in particolar modo quelli presentati dall'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni [3] riferiti allo stesso materiale ma con diverse geometrie. Alla luce dei dati sperimentali raccolti si può dire che i risultati presentati in [3] sono stati confermati e che la caratterizzazione delle prove di fatica può essere sintetizzata in termini di  $Q$  con un'unica banda di dispersione a pendenza costante da 100 a 2milioni di cicli. Lo stesso non si può invece affermare se si considera l'ampiezza di tensione netta per caratterizzare il comportamento a fatica del materiale. Un ulteriore vantaggio nell'utilizzo di  $Q$ , analogamente all'approccio classico basato sulla misura della deformazione locale mediante estensimetri e l'utilizzo della curva di Manson-Coffin, è che questo parametro energetico si presta al monitoraggio sperimentale della vita a fatica di componenti mediante l'uso, ad esempio, di termocoppie posizionate nei punti critici, una volta nota la curva di caratterizzazione del materiale liscio ottenuta nelle stesse condizioni di carico. Una limitazione dell'approccio basato sull'energia dissipata è che al momento il metodo non è estendibile anche al caso di tensione media diversa da zero, richiedendo una taratura della curva caratteristica per ogni valore della tensione media, cosa che avviene anche con l'approccio in tensione netta.

Sono stati inoltre presentati gli andamenti caratteristici di rigidità e deformazione media dei provini durante le prove. Come si vede dai grafici nella maggior parte dei casi il materiale tende ad addolcirsi dall'inizio alla fine della prova ma ci sono stati casi in cui dopo una fase iniziale di addolcimento, il materiale tende ad incrudirsi. Non si è al momento in grado di trovare una relazione tra questi comportamenti ed il livello di carico applicato anche per le difficoltà avute con le misurazioni dell'estensometro soprattutto nei primi utilizzi. Saranno necessarie ulteriori prove per capire se effettivamente sia presente una correlazione o se il fenomeno è di tipo casuale.

È stato infine osservato come la fase di propagazione della cricca sia molto rapida in entrambe le campagne di prove. Infatti si è visto come il calo drastico della rigidità, sintomo della comparsa della cricca, avvenga sempre dopo il 95% e oltre della vita del provino. Questo aspetto assume una certa importanza perché stabilisce che l'energia dissipata è legata al processo di innesco della cricca e non alla sua propagazione. Inoltre, come già detto nel paragrafo 3.2.1, si è deciso di trascurare la fase di propagazione rispetto alla vita spesa per l'innesco e si è così utilizzato il numero di cicli a rottura  $N_f$  per la sintesi dei dati, in termini sia di tensione che di densità di energia dissipata per unità di volume e per ciclo. Nei provini dotati di estensometro, non potendo giungere alla completa separazione delle superfici di frattura per preservare l'integrità dello strumento,  $N_f$  sta ad indicare il numero di cicli in cui la cricca ha raggiunto dimensioni tali

da superari i limiti di misura imposti, di norma 10 mila microepsilon. Essendo però, come detto, la propagazione della cricca molto rapida, si è comunque assunto che il numero di cicli a cui l'estensometro arresta la prova per superamento del limite corrisponda con il numero di cicli di effettiva rottura del provino.

## **CAPITOLO 4**

### **INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO NELLO STUDIO DELLA VITA A FATICA IN TERMINI DI DENSITÀ DI ENERGIA DISSIPATA**

#### **PREMESSA**

In questo capitolo si vogliono confrontare i dati ottenuti in un precedente lavoro di tesi [6] con quelli pubblicati dall'Associazione Italiana per L'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) nel recente articolo AIAS2012-63 [3] che riassume i risultati di diverse analisi sperimentali allo scopo di sintetizzare il comportamento a fatica di un materiale utilizzando l'approccio basato sull'energia dissipata da un'unità di volume dello stesso materiale in un ciclo.

L'obiettivo è quello di trovare una corrispondenza tra le serie di dati provenienti dalle due fonti precedentemente citate per confermare la bontà del metodo e si vuole inoltre cercare di determinare una relazione tra i parametri tensione, calore dissipato e numero di cicli a rottura in modo indipendente dal rapporto di ciclo  $R$  e dalla geometria dei provini. Le stesse analisi verranno in seguito estese ai dati relativi a questo lavoro di tesi per valutarne la compatibilità e poter confrontare i risultati.

#### **4.1 MATERIALE E METODI**

Per la comparazione dei dati è necessario che il materiale utilizzato nelle varie fonti sia il medesimo. Detto che la denominazione dell'acciaio inossidabile analizzato è in tutti i casi AISI 304 L, i provini sperimentati non provengono tutti dallo stesso lotto di produzione e la composizione dell'acciaio legato varia per le diverse fonti, comportando inoltre una variazione delle caratteristiche meccaniche dello stesso.

Si riportano per completezza tutte le caratteristiche fornite da [3] e da [6] con riguardo al materiale dei provini sperimentati. Nell'ultima riga sono inoltre riportate le caratteristiche del materiale utilizzato in questa campagna di prove.

Tabella 4.1 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio AISI 304L utilizzato nelle diverse campagne di prove

Fonte	Tipo Prove	Rs [Mpa]	Rm [MPa]	A %	HB	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Cu
[2] [7]	Controllo di forza e deformazione	315	700	66	160	0,02	0,34	1,67	18,16	8,08	0,29
[3]	Controllo di forza	327	680	57	183	0,02	0,33	1,71	18,16	8,09	0,31
[6]	Controllo di forza	300	650	60	/	0,03	0,75	2	18/20	8/12	/
	Controllo di forza	468	691	43	230	0,013	0,58	1,81	18	8	0,55

Dall'analisi della tabella precedente si notano alcune differenze tra le composizioni dei materiali utilizzati, in particolar modo l'acciaio utilizzato in [6] presenta una quantità di silicio doppia rispetto agli altri due, mentre gli altri dati a disposizione sono comparabili tra loro. Anche per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche si evidenzia un minor carico di rottura e snervamento per il materiale utilizzato in [6] rispetto agli altri, mentre non è disponibile il dato relativo alla durezza. Molto diverso risulta invece il materiale utilizzato in questa campagna di prove, che evidenzia un carico di snervamento notevolmente più elevato rispetto agli altri.

Come anticipato dalla tabella 4.1, nell'articolo dell'AIAS [3] sono riportati i dati sperimentali ottenuti da prove di fatica eseguite sia in controllo di deformazione sia in controllo di forza. In esso viene analizzato il comportamento a fatica del materiale sopra citato, sia liscio che in presenza di intagli di diverse geometrie, le quali sono riportate nella figura 4.1.



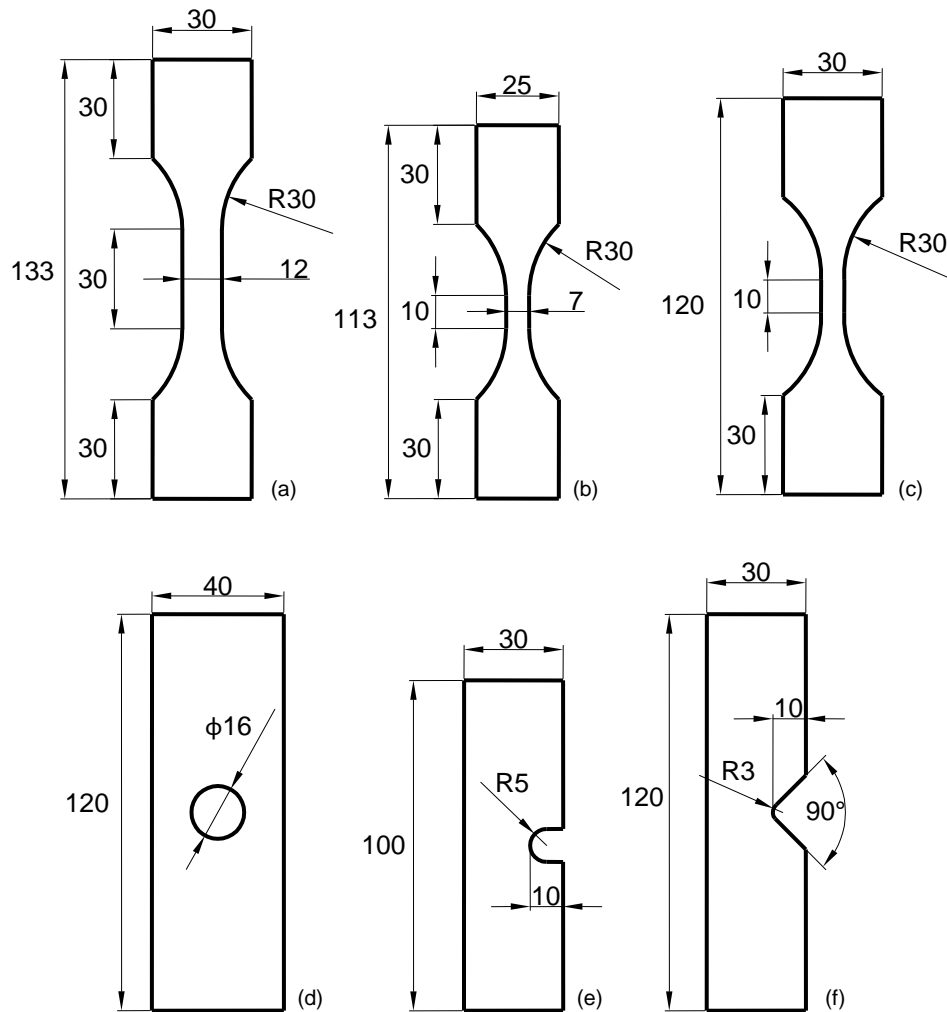


Figura 4.1 Geometrie dei provini utilizzate nelle diverse campagne sperimentali. a) prove a fatica in controllo di deformazione a medio e alto numero di cicli e b) basso numero di cicli. d), e), f) geometrie utilizzate per le prove in controllo di forza su provini intagliati.

In particolare sono state utilizzate le seguenti serie di provini: prove in controllo di deformazione, su materiale liscio, su provini forati con raggio  $R=8\text{mm}$ , su provini con intaglio a V e raggio di fondo intaglio  $R=3\text{mm}$ , su provini con intaglio a U a raggio  $R=5\text{mm}$ , Stair case rotti e Stair case non rotti. Lo spessore per tutti i provini descritti sopra è pari a  $6\text{mm}$ .

In [6] sono invece state analizzate tre diverse geometrie: provini lisci, provini con foro di diametro  $10\text{mm}$  e provini con foro di diametro  $20\text{mm}$  che sono riportate in figura 4.2.

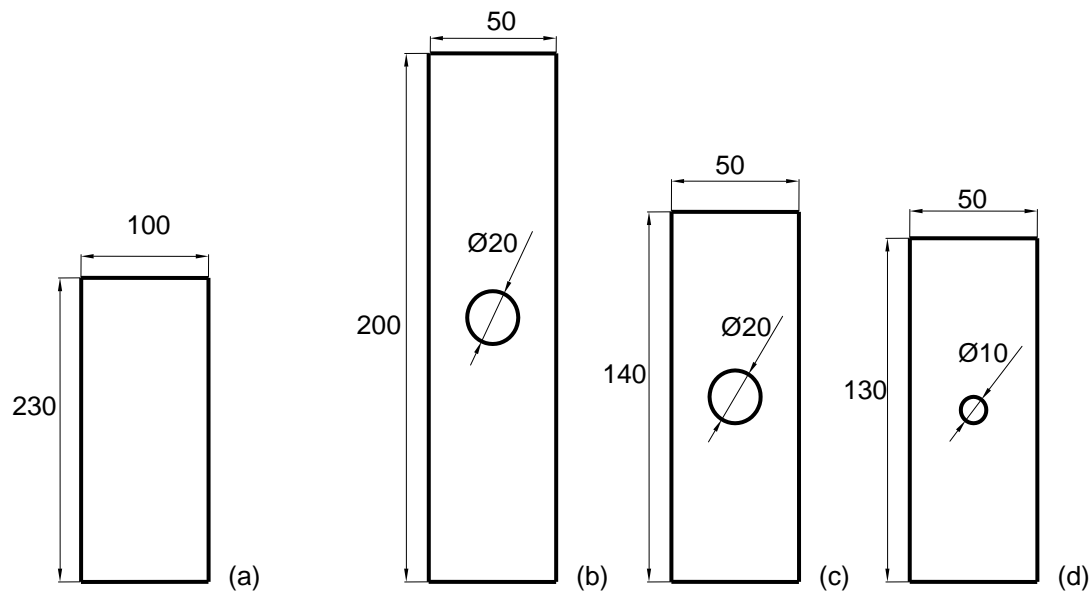


Figura 4.2 Geometrie dei provini utilizzate nelle diverse campagne sperimentali. a) provino liscio, b) provino forato per  $R=0.1$ , c) provino forato per  $R=-0.5$  e  $R=-1$ , d) provino forato per  $R=-0.5$  e  $R=-1$ .

Lo spessore per i provini utilizzati in [6] e riportati in figura 4.2 è per tutti pari a 2mm.

## 4.2 CONFRONTO DEI RISULTATI DELLE DIVERSE CAMPAGNE DI PROVE

### 4.2.1 Approccio in termini di tensione netta

In questo paragrafo sono riportati i risultati di tutte le prove di fatica relative a [3] e [6] eseguite in termini di ampiezza di tensione netta  $\sigma_{a,net}$ . Come già specificato nel caso delle prove di fatica in controllo di deformazione, la  $\sigma_{a,net}$  è stata calcolata a partire dalla forza registrata dalla cella di carico della macchina di prova durante la prova di fatica, mentre per i provini intagliati a V e U si è assunto come criterio per la determinazione dei cicli ad innesco il numero di cicli in corrispondenza al quale vi era una cricca di 4mm di lunghezza a partire dal fondo dell'intaglio.

La figura 4.2.1a riporta i risultati di tutte le prove di fatica riportate in [3], sintetizzati in termini di ampiezza di tensione netta, con le curve medie, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza e le pendenze inverse  $k$ .

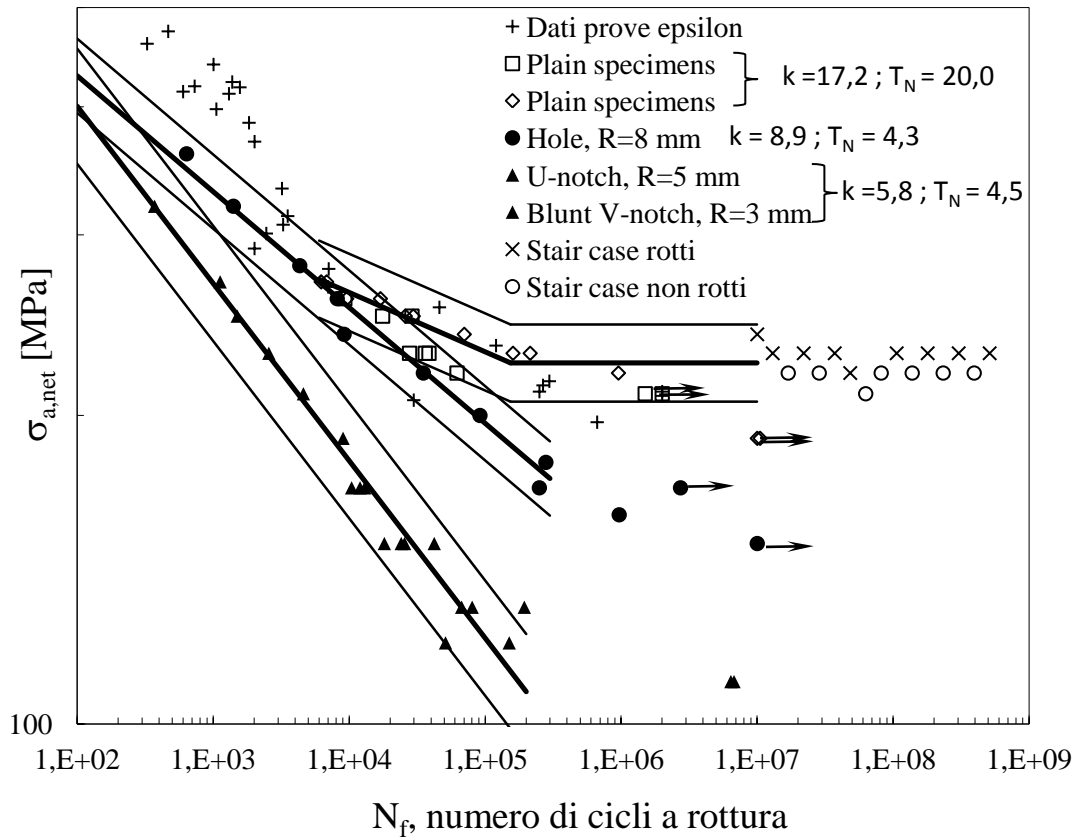


Figura4.2.1a Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di ampiezza di tensione netta [3]

Confrontiamo ora i dati appena presentati, forniti dall'articolo dell'AIAS [3], con quelli derivanti dalle prove eseguite in [6], allo scopo di verificare se c'è corrispondenza tra le serie analizzate, trattandosi nominalmente dello stesso materiale in entrambi i casi. Per far questo, al grafico di figura 4.2.1a sono stati aggiunti i dati relativi alle tre diverse geometrie analizzate in [6] e i risultati sono stati riassunti nel grafico di figura 4.2.1b, simile al precedente.

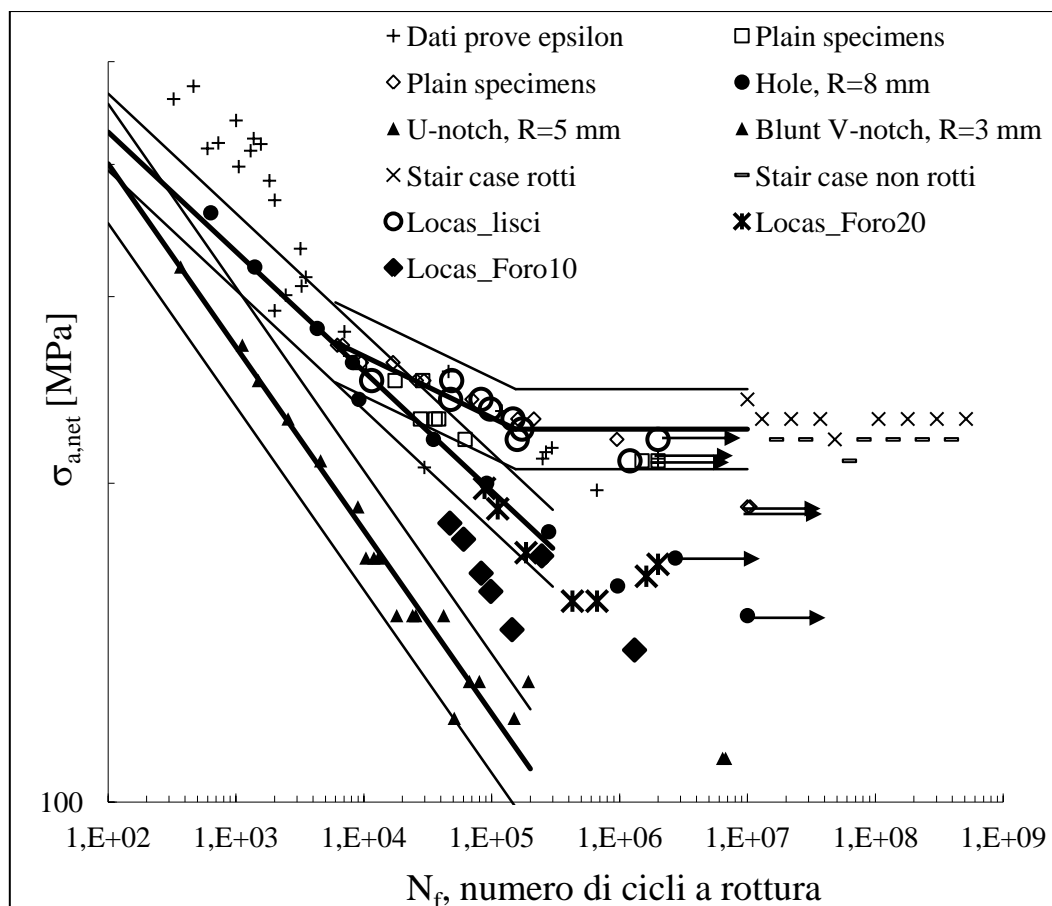


figura 4.2.1b Confronto dati AIAS[3]-[6] in termini di ampiezza di tensione netta

Dall'analisi della figura 4.2.1b si possono fare le seguenti considerazioni:

Per i provini lisci c'è una corrispondenza tra i dati ricavati da [6] e quelli forniti dall'AIAS [3]. Infatti tutti i punti relativi ai provini lisci tratti da [6] cadono all'interno della banda di dispersione fornita dall'AIAS [3] la cui pendenza è riportata sul grafico 4.2.1a.

Per i provini con foro da 20mm [6] si vede come seguono abbastanza bene il comportamento dei provini denominati Hole R=8mm [3]. Anche in questo caso i punti cadono all'interno della banda di dispersione proposta da [3] fino ai 300 000 cicli e presentano un cambio di pendenza della curva proprio in corrispondenza a quel numero di cicli.

I provini con foro da 10mm [6] presentano invece un comportamento diverso da tutte le altre prove.

L'analisi delle figure 4.2.1a e 4.2.1b dimostra, come già evidenziato nel paragrafo 3.4, come l'approccio basato sull'ampiezza di tensione netta non è in grado di riassumere con un'unica banda di dispersione i dati relativi a provini di differenti geometrie e non è possibile determinare il valore del limite di fatica del materiale in modo indipendente dalla forma del provino.

#### 4.2.2 Approccio in termini di densità di energia dissipata

Nei dati forniti dall'AIAS [3], in accordo con [2] e [7], i risultati delle prove di fatica sono stati analizzati in termini di un valore caratteristico di  $Q$  misurato al 50% del numero di cicli a rottura nel caso di provini lisci e forati e al 50% del numero di cicli ad innesco nel caso dei provini intagliati ad U e V. I risultati di tutte le prove a fatica eseguite, sintetizzati in termini del parametro energetico  $Q$ , sono stati analizzati statisticamente come un'unica popolazione nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura e con un livello di confidenza del 95% secondo l'espressione:

$$Q^k N_f = \text{cost}$$

dove  $N_f$  è il numero di cicli a rottura e l'esponente  $k$  è una costante da determinare sperimentalmente.

I risultati tratti dall' articolo dell' AIAS [3] sono sintetizzati in Figura 4.2.2a, dove sono riportate la curva media, le curve al 10% e al 90% di probabilità di sopravvivenza, e successivamente il valore della pendenza inversa  $k$ , il valore di  $Q$  valutato a 2 milioni di cicli  $Q_{A,50\%}$ , l'indice di dispersione dei dati attorno al valor medio in vita  $T_N$ .

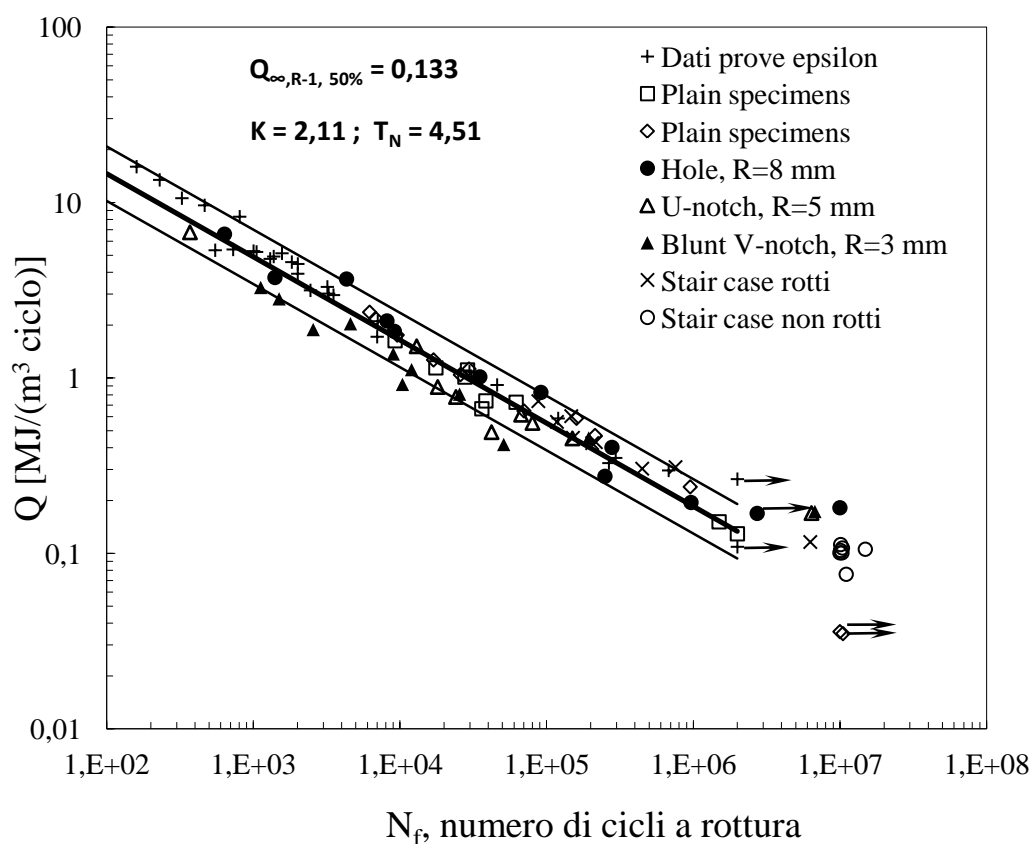


Figura 4.2.2a Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di densità di energia dissipata per ciclo [3]

Considerando più dettagliatamente la banda in energia proposta dall'articolo con probabilità di sopravvivenza del 10%-90% si vede che per quanto riguarda i dati relativi ai provini con intaglio a V, alcuni di questi si posizionano a sinistra della linea media ed altri all'esterno della banda stessa. Secondo gli autori, questo risultato indica che per questo materiale un raggio di raccordo pari a 3 mm è vicino alla condizione limite di applicabilità pratica del metodo, almeno facendo ricorso alle termocoppie con diametro di 0.127 mm incollate sulla superficie del materiale. A causa della dimensione dei fili e soprattutto dell'estensione della zona ricoperta dall'adesivo (mediamente diametro di 2 mm), la risoluzione geometrica dell'apparato sperimentale qui utilizzato non è probabilmente in grado di cogliere il valore puntuale della temperatura all'apice dell'intaglio e quindi il valore locale della densità di energia dissipata per ciclo risulta mediata su una zona troppo estesa in relazione al raggio di raccordo. Tuttavia la figura 4.2.2a mostra come l'approccio in Q, a differenza di quello in sigma, riesca a riassumere il comportamento di tutte le tipologie di provini di diversa geometria con un'unica curva e relativa banda di dispersione. La validità del metodo è stata già confermata dai dati ottenuti in questa campagna di prove e presentati nel paragrafo 3.4. Si cerca un'ulteriore conferma di questo aspetto andando a confrontare questi dati con quelli provenienti dal lavoro di tesi precedente [6].

Confrontiamo quindi i dati provenienti da [6] con quelli forniti sopra dall'articolo dell'AIAS [3] per verificare se, con il metodo basato sull'energia dissipata, c'è ancora corrispondenza, trattandosi, in linea teorica, dello stesso materiale in entrambi i casi. Come avvenuto per l'approccio in termini di tensione netta, alla figura 4.2.2a vengono dunque aggiunti i punti sperimentali provenienti da [6]. Il risultato è presentato nella figura 4.2.2b seguente.

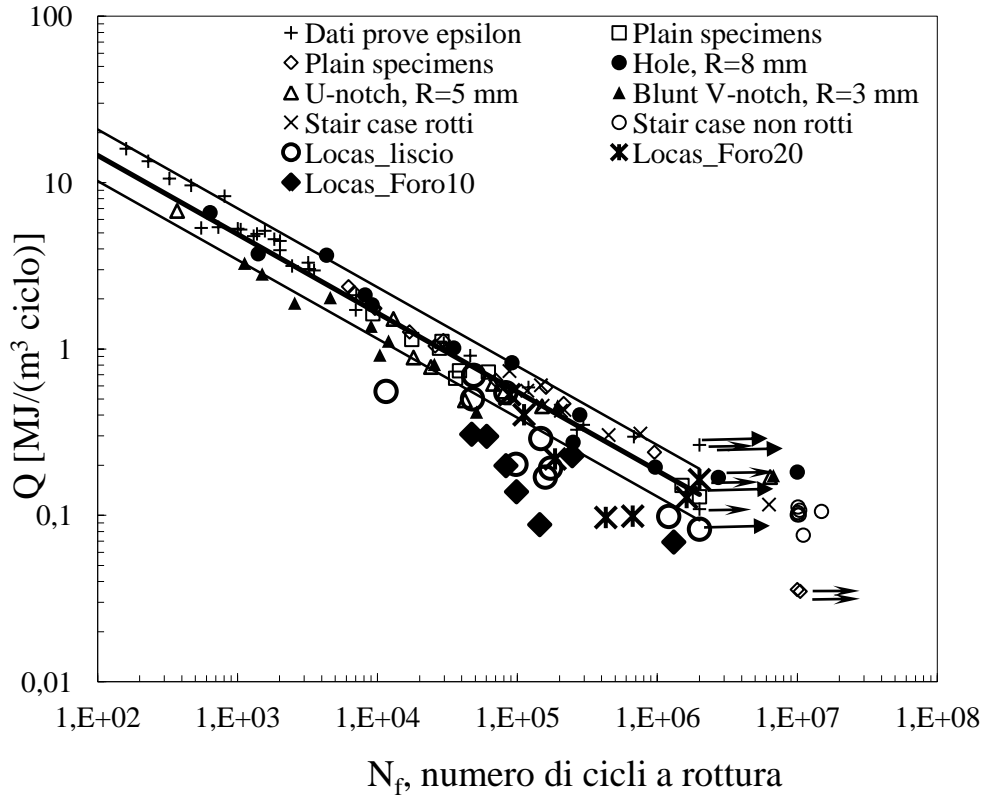


Figura 4.2.2b Confronto dati AIAS [3]-LOCAS [6] in termini di densità di energia dissipata per ciclo

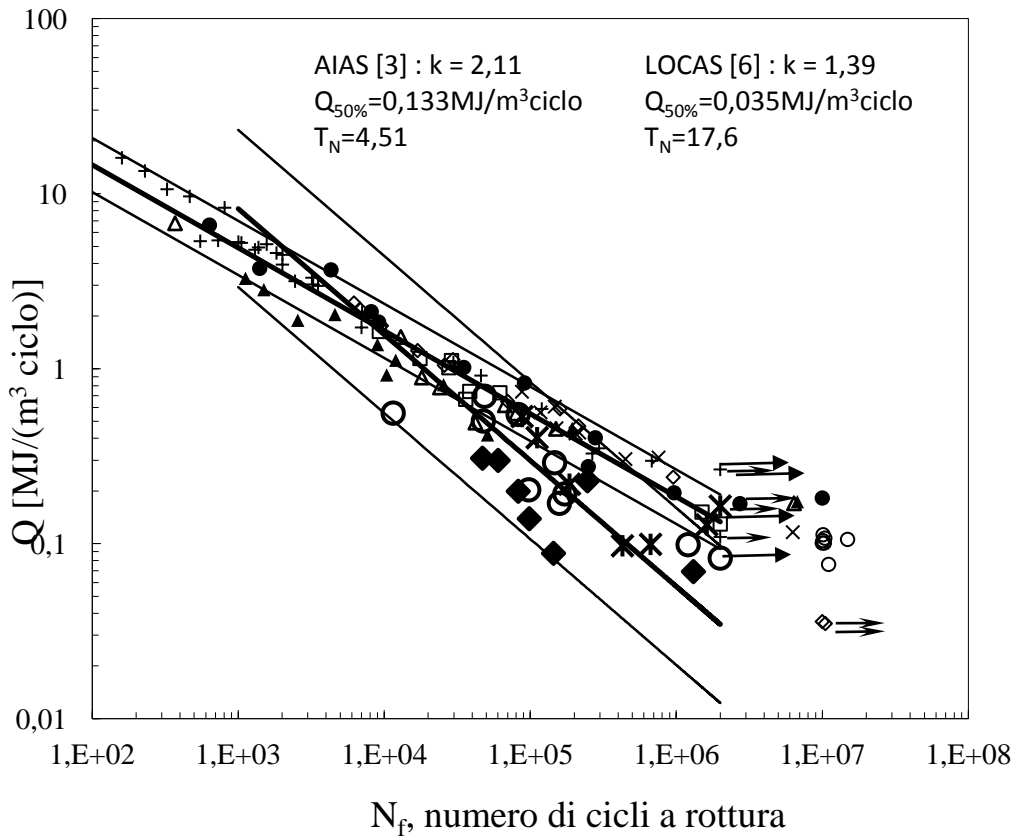


Figura 4.2.2c Confronto serie in termini di densità di energia dissipata per ciclo

In figura 4.2.2b si sono inseriti i dati provenienti da [6] nella banda di dispersione presentata in [3]. È evidente come il materiale delle due diverse campagne di prove ha un comportamento differente.

Dall'analisi della figura 4.2.2c, dove si sono considerati i dati come due serie distinte, valutando la pendenza e la relativa banda di dispersione dei dati ricavati da [6], si nota ancora di più il differente comportamento delle due serie e questo aspetto non è in accordo con quanto è stato proposto in [3] e con quanto è stato verificato in questa campagna di prove. Nei dati relativi all'articolo infatti si sono potuti sintetizzare i comportamenti dei diversi provini con un'unica banda di dispersione attorno alla curva con pendenza inversa  $k=2,11$  indipendentemente dalla presenza di fori o intagli di diversa forma. I dati reperiti in [6], come mostrato nel grafico, vengono invece riassunti da una curva di pendenza inversa  $k=1,39$ .

La differenza tra le due serie di dati si può evidenziare anche prendendo in considerazione il limite di fatica a 2 milioni di cicli. Per la serie AIAS [3] tale limite assume il valore di  $Q_{A,50\%}=133$  [kJ/m<sup>3</sup>ciclo] mentre per la serie Locas [6] vale  $Q_{A,50\%}=35$ [kJ/m<sup>3</sup>ciclo].

Per cercare di comprendere le motivazioni di tale discordanza tra i due comportamenti, si prova a distinguere le diverse geometrie relative ai dati tratti da [6], mentre la serie AIAS [3], essendo quella di riferimento per il nostro studio, viene considerata ancora come un'unica serie di dati.

Dall'analisi delle figure 4.2.2b,c si possono fare alcune considerazioni. I dati che più si discostano dal comportamento previsto dall'articolo dell'AIAS [3] sono sicuramente quelli relativi ai provini con foro da 10mm che cadono tutti al di fuori della banda di dispersione. Questa discordanza rispetto alle altre geometrie era già stata riscontrata anche valutando la vita a fatica in termini di tensione netta. Per quanto riguarda i dati relativi ai provini con foro da 20mm si osserva che 4 di questi cadono all'interno della banda di dispersione mentre 3 stanno al di sotto. Data la scarsità dei dati a disposizione per questa serie è difficile trarre delle conclusioni. Sarebbe necessaria l'esecuzione di ulteriori prove per avere una quantità di dati sufficientemente ampia da poter definire con più precisione il comportamento di questa geometria. Per quanto riguarda la serie di provini lisci analizzati in [6] il grafico mette in evidenza la non corrispondenza con la serie dell'AIAS. In questo caso è però da prendere in considerazione un aspetto importante che riguarda le modalità di acquisizione della temperatura. Mentre nei provini forati avviene attraverso l'utilizzo di termocoppie incollate ai provini stessi, in quelli lisci provenienti da [6] si utilizza la tecnica termografica che risulta meno accurata ed affidabile rispetto alla prima.

Si può quindi ritenere che questo aspetto possa aver influenzato i risultati delle prove e che vada tenuto in considerazione nelle valutazioni finali. Un'ulteriore parametro che potrebbe aver discostato i dati provenienti da [6] sono le differenze di composizione e di



caratteristiche meccaniche riscontrate per il materiale analizzato. Questo aspetto però non sembrava influenzare i risultati in termini di densità di energia dissipata nel confronto dei dati proposti in [3] con quelli derivati dalla presente campagna di prove, dove le differenze tra i due acciai sono più marcate.

### 4.3 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO

#### 4.3.1 *Influenza del rapporto di ciclo nei dati tratti da precedenti lavori di tesi [6]*

I numerosi studi presenti in letteratura hanno portato a dire che l'energia dissipata per unità di volume e per ciclo, una volta raggiunte le condizioni di stabilizzazione, è una caratteristica del materiale funzione solamente del rapporto di ciclo, ovvero a parità di vita a fatica rimane costante l'energia dissipata dal materiale sia in un provino liscio che in uno intagliato, indipendentemente dalla frequenza di prova.

Si vuole in questo paragrafo cercare di determinare una relazione tra i parametri che entrano in gioco nello studio del fenomeno della fatica di un materiale metallico, in modo da rendere indipendente la stima del limite di fatica, oltre che dalla geometria del pezzo, anche dal rapporto di ciclo  $R = \sigma_{\text{MIN}}/\sigma_{\text{MAX}}$  che caratterizza la sollecitazione esterna.

Dai risultati di precedenti lavori di tesi [3] [4] [5] [6] e confermato anche in questo lavoro, un aspetto rilevante che è stato osservato è che il calore generato dal provino aumenta al diminuire del rapporto di ciclo. In particolare è stato rilevato che in diagrammi Q-N, dove si ricorda che Q è l'energia dissipata dal materiale per unità di volume in un ciclo di sollecitazione ed N rappresenta il numero di cicli, la curva a  $R=-1$  si posiziona al di sopra della curva a  $R=-0.5$  e quest'ultima sta a sua volta al di sopra della curva a  $R=0.1$ .

Per l'analisi dei dati si sono presi in considerazione i risultati ottenuti in [6] in quanto sono state eseguite numerose prove a diverso rapporto di ciclo ( $R=-1$  ;  $R=0,1$  ;  $R=0,5$  ;  $R=-0,5$ ). In [3] invece i risultati sono relativi solamente alle prove eseguite a rapporto di ciclo  $R=1$  e non sono pertanto utili al tipo di analisi che si vuole condurre. Si cercherà poi di relazionare i risultati di [6] con quelli ottenuti in questo lavoro nel quale si sono adoperati rapporti di ciclo pari a  $R=1$  e  $R=0,1$ .

Facendo dunque riferimento a tutte le prove presentate in [6] una possibile relazione tra generazione termica, rapporto di ciclo e vita a termine può essere ricavata dall'analisi delle figure 4.3.1a,b,c in cui vengono riportati gli andamenti del calore generato in funzione dell'ampiezza di tensione netta per diversi rapporti di ciclo e per tre diverse geometrie.

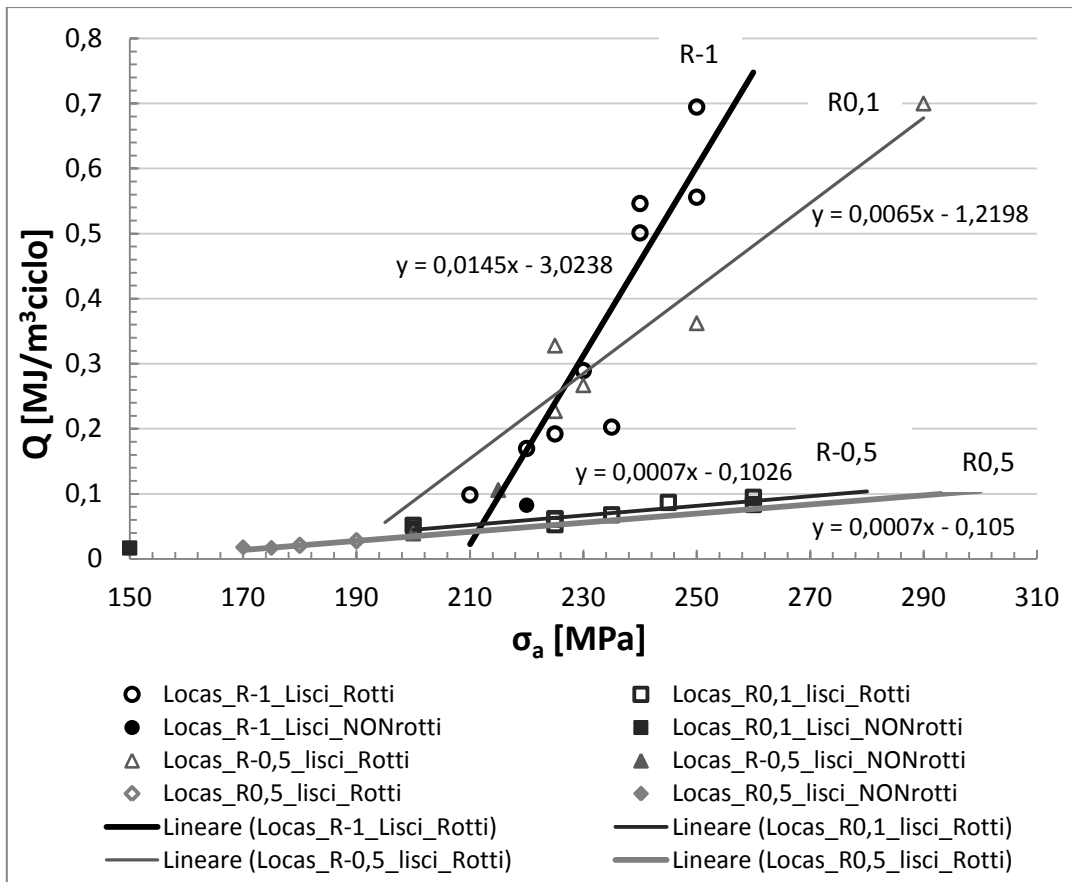


Figura 4.3.1a Relazione tra calore generato e ampiezza di tensione al variare del rapporto di ciclo per provini lisci [6]

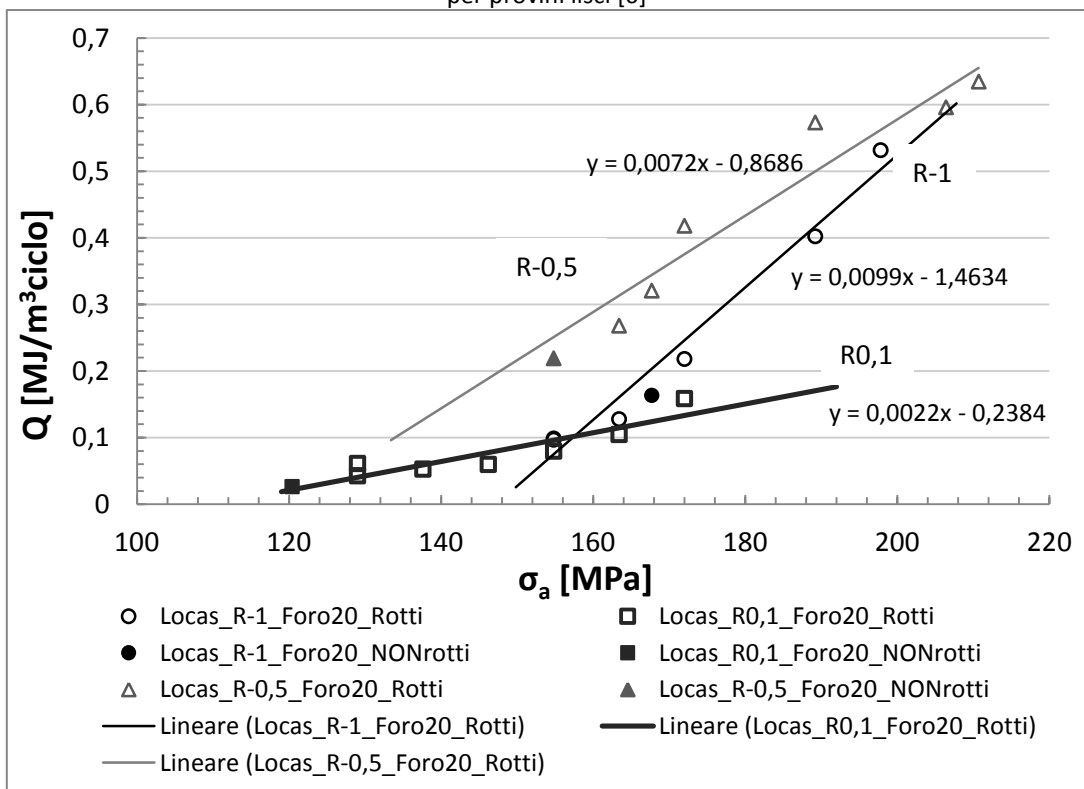


Figura 4.3.1b Relazione tra calore generato e ampiezza di tensione netta al variare del rapporto di ciclo per provini con foro da 20mm [6]

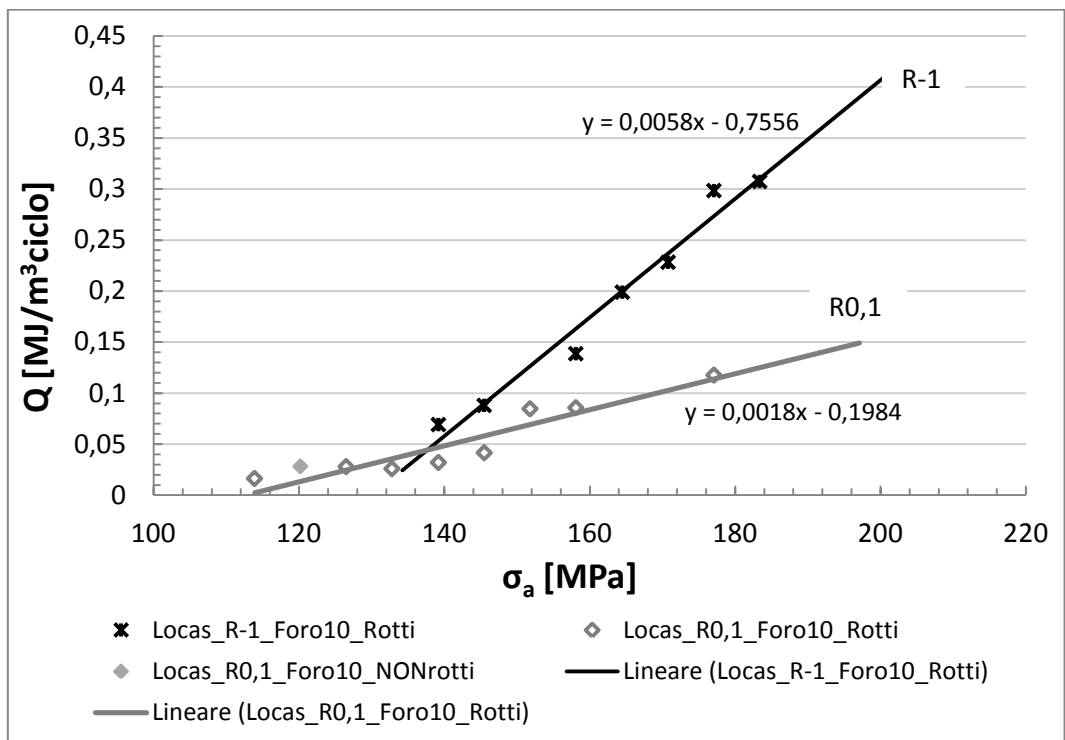


Figura 4.3.1c Relazione tra calore generato e ampiezza di tensione netta al variare del rapporto di ciclo per provini con foro da 10mm [6]

Per tutte le geometrie analizzate la pendenza delle rette varia in modo netto nei casi raffigurati: per  $R=0,1$ , e a maggior ragione per rapporti di ciclo superiori, la curva tende a diventare orizzontale. Questo significa che a grandi differenze di ampiezza di tensione applicate coincidono relativamente piccole variazioni di generazione termica. Tale fatto viene messo bene in evidenza anche nei diagrammi Q-N dove la curva trasla verso il basso all'aumentare del rapporto di ciclo.

Considerando rapporti di ciclo negativi invece, al diminuire di R la curva tende a diventare verticale e minime variazioni di sollecitazione applicata comportano grandi variazioni di energia generata Q.

A partire da queste considerazioni si può allora pensare di creare delle curve parametriche in vita a termine.

Partendo dai dati delle figure 4.3.1a,b,c è possibile individuare, per i diversi rapporti di ciclo, i punti che corrispondono ad una determinata vita del provino, ovvero quelli che si rompono ad un determinato numero di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione R. Questi dati vengono poi approssimati da una curva parametrica, detta curva di isodurata, in funzione appunto del numero di cicli a rottura.

Sono stati analizzati i provini lisci e forati sia come due serie distinte che come un'unica serie in quanto non si vuole perdere il vantaggio dato dal metodo in Q di riunire in un'unica serie anche geometrie diverse tra loro. Dai dati a disposizione, come viene

mostrato nei grafici che seguono, è stato possibile creare 4 curve isodurata per i provini lisci e 3 curve isodurata per i provini forati che approssimano almeno 4 dati tra quelli a disposizione. Non è stato possibile individuare altre curve a causa della scarsità dei dati a disposizione per rotture avvenute a diverso numero di cicli.

Per l'approssimazione dei dati è stata inizialmente utilizzata una curva del tipo potenza la cui equazione è riportata di seguito:

$$Q = C \sigma_{n,max}^{-k} \quad (4.1)$$

Il risultato di questa parametrizzazione è mostrato nei grafici di figura 4.3.1d,e,f,g e che riguardano rispettivamente i dati relativi a provini lisci e quelli relativi a provini forati. In ascissa si riporta il valore della tensione netta massima presente durante la prova. Nel grafico di figura 4.3.1d sono riportate anche le curve a  $R = \text{cost}$  già mostrate nei grafici 4.3.1a,b,c per una miglior comprensione della metodologia applicata. Tuttavia, per una migliore chiarezza dei grafici nelle figure successive sono riportate solo le curve isodurata anche in scala doppio logaritmica.

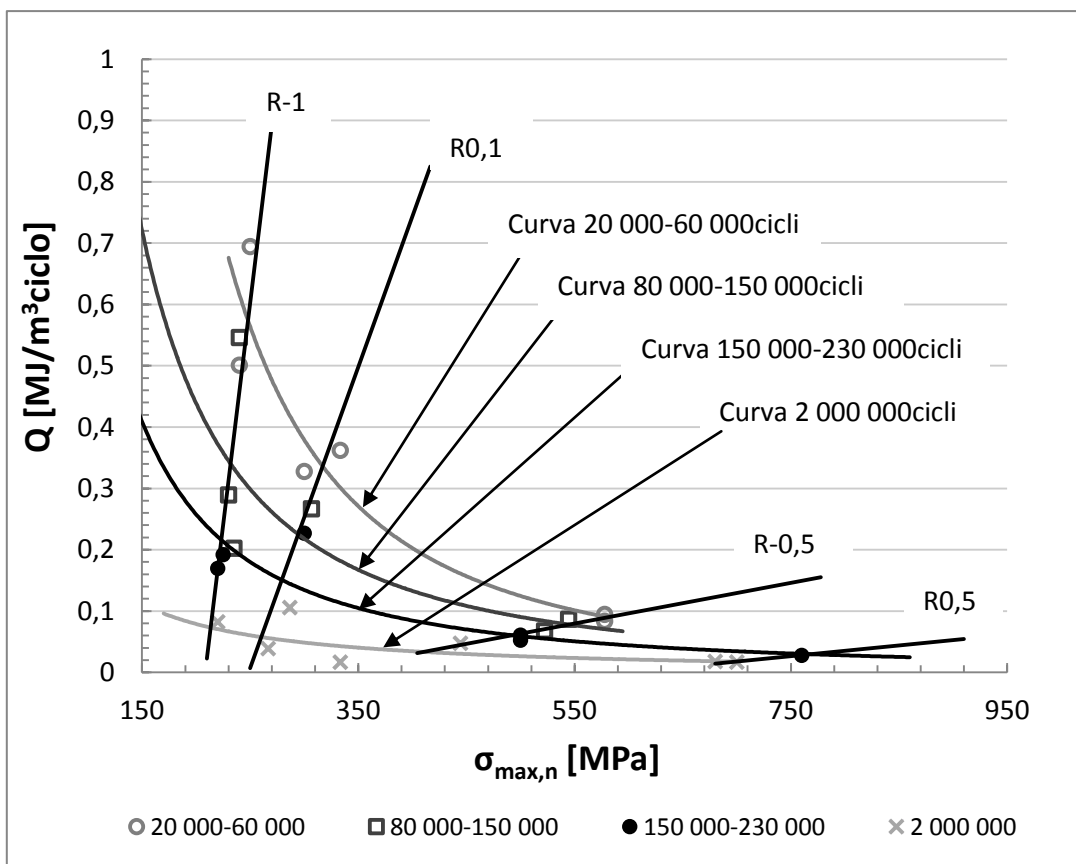


Figura 4.3.1d Curve parametriche isodurata per provini lisci [6]

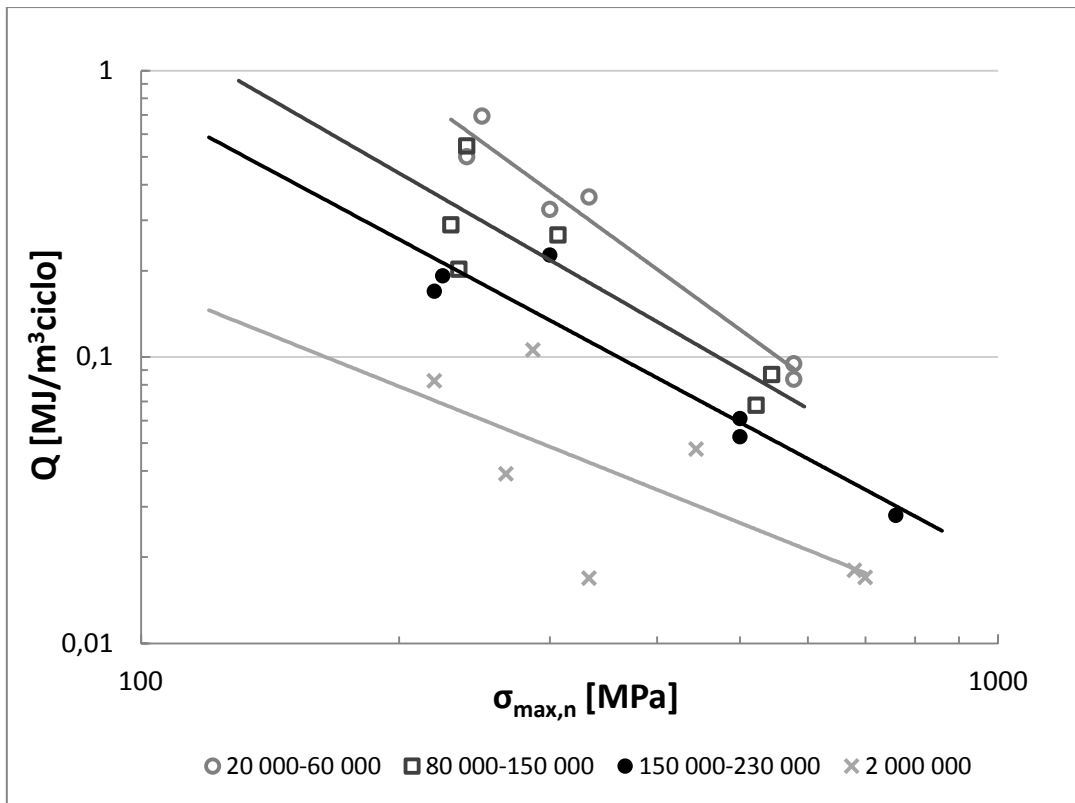


Figura 4.3.1e Curve parametriche isodurata per provini lisci in scala log-log [6]

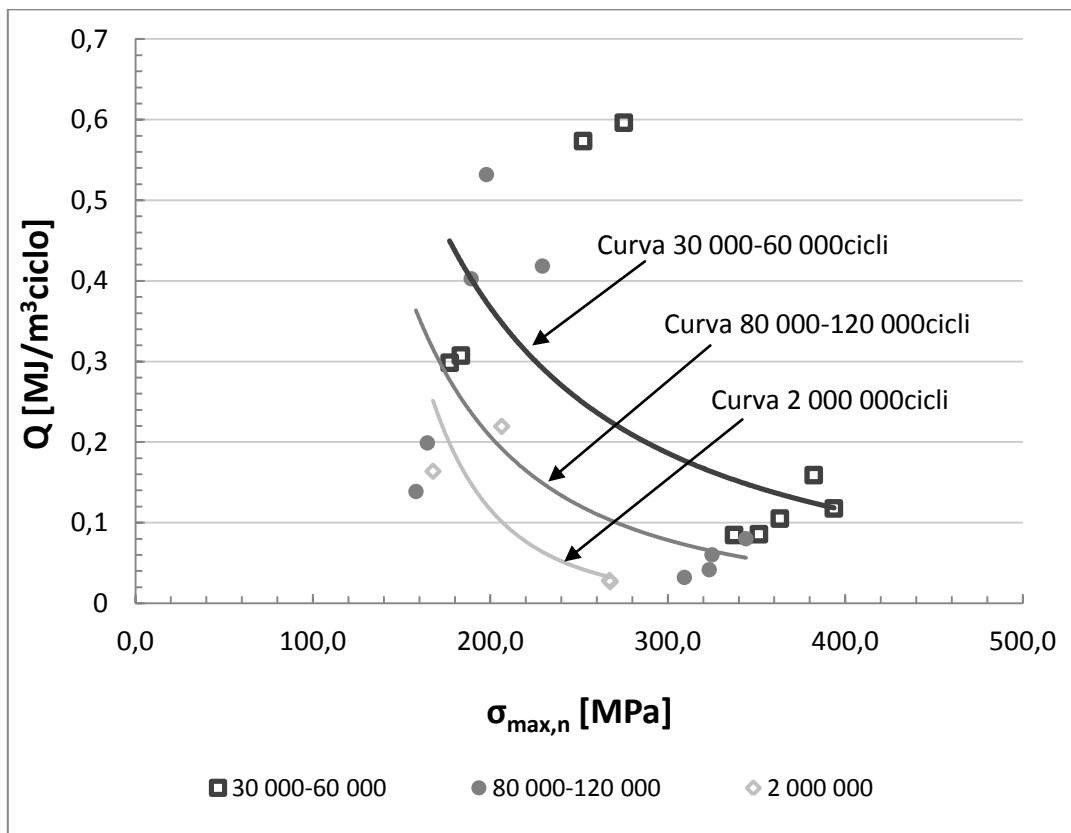


Figura 4.3.1f Curve parametriche isodurata per provini forati [6]

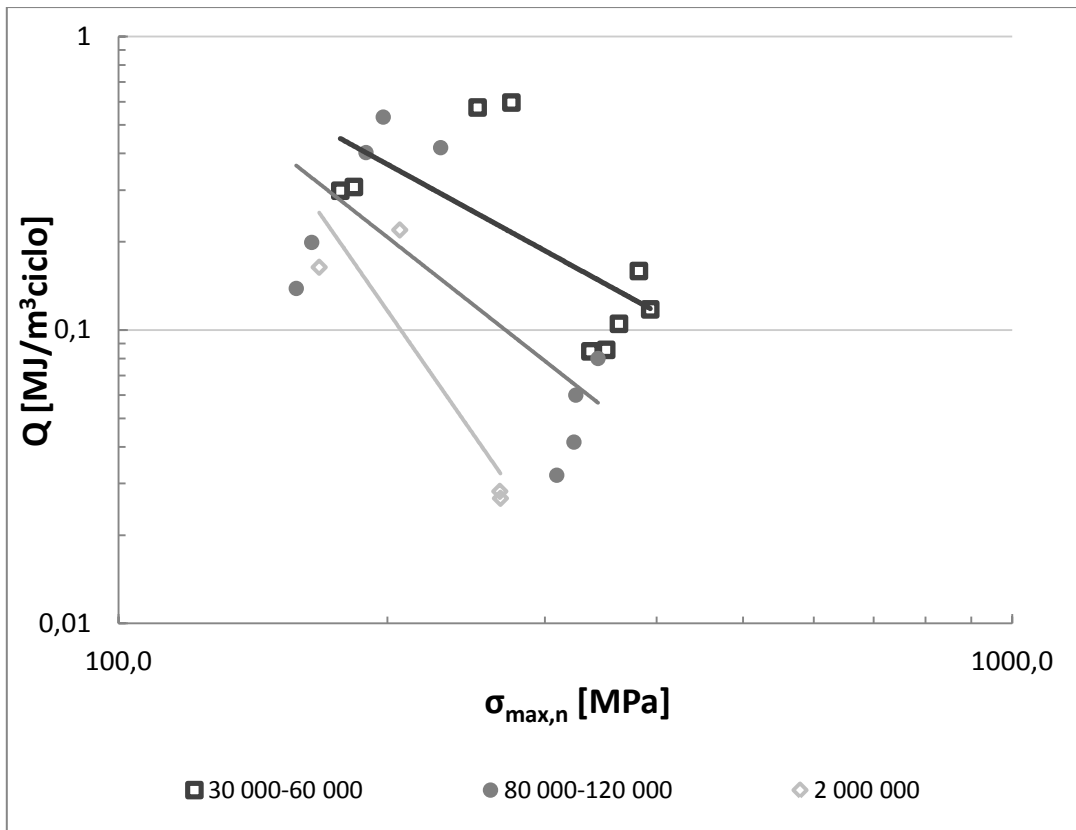


Figura 4.3.1g Curve parametriche isodurata per provini forati in scala log-log [6]

Tenendo sempre in considerazione che il numero di dati a disposizione è ridotto e quindi l'approssimazione eseguita va interpretata di conseguenza, dall'analisi della figura 4.3.1e relativa ai provini lisci sembrerebbe che le curve parametriche costruite nel modo precedentemente descritto tendano ad avere una pendenza costante in un grafico doppio logaritmico. Per completezza si riportano i valori delle pendenze di ciascuna curva:

Curva a $N_f$	2 000 000	150000-230000	80000-150000	20000-60000
Pendenza k	1,198	1,724	1,607	2,177

La pendenza media calcolata risulta pari a  $k=1,677$ .

Analizzando invece la figura 4.3.1g questo sembra non avvenire per i provini forati. Verificando una ad una le serie di dati si è visto che escludendo dall'analisi quella relativa ai provini forati con  $d=10\text{mm}$  sollecitati a  $R=-1$ , che aveva mostrato diversi comportamenti anche nei grafici  $Q-N$  e  $\sigma_n-N$ , la situazione cambia notevolmente. Il risultato è mostrato in figura 4.3.1h.

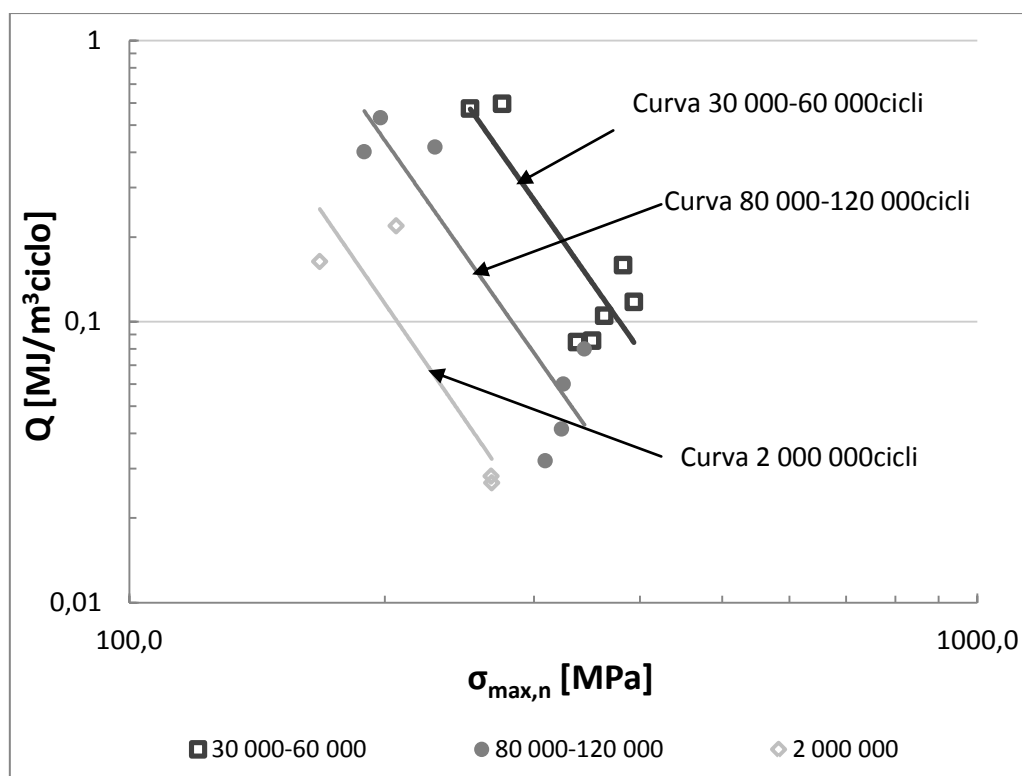


Figura 4.3.1h Curve parametriche isodurata per provini forati in scala log-log senza i dati relativi alla serie di provini con foro da d=10mm a R=-1 [6]

Come si era trovato per i provini lisci, anche in questo caso sembra che le curve così generate tendano ad avere tra loro la stessa pendenza in un grafico doppio logaritmico, anche se diversa da quella riscontrata per i lisci. Si riportano anche in questo caso le pendenze di ciascuna curva.

Curva a $N_f$	2 000 000	80000-120000	30000-60000
Pendenza k	4,381	4,301	4,301

La pendenza media calcolata risulta pari a  $k = 4,328$ .

A questo punto si può allora pensare di riportare la costante C dell'equazione 4.1 in un grafico in funzione del parametro  $N_f$  in modo da ottenere una relazione  $Q$ ,  $\sigma_{n,max}$  e  $N_f$  indipendente dal rapporto di ciclo. Nel nostro caso la costante sarà pari a  $C = Q\sigma^k$ .

Sono percorribili due strade: la prima è quella di stabilire a priori una pendenza k media, uguale per tutte le curve parametriche e calcolare la costante C con il valore  $k = k_{MEDI}$ ; la seconda è quella di calcolare il valore della costante C utilizzando il k relativo a ciascuna curva parametrica e, successivamente, approssimare i dati ottenuti con un'unica curva di pendenza costante h. Nel seguito verranno discusse in parallelo entrambe le strade in modo da poterle confrontare tra loro.

Il grafico di figura 4.3.1i riporta i valori della costante C calcolata per i provini lisci sia con k variabile che con  $k = k_{\text{medio}}$ .

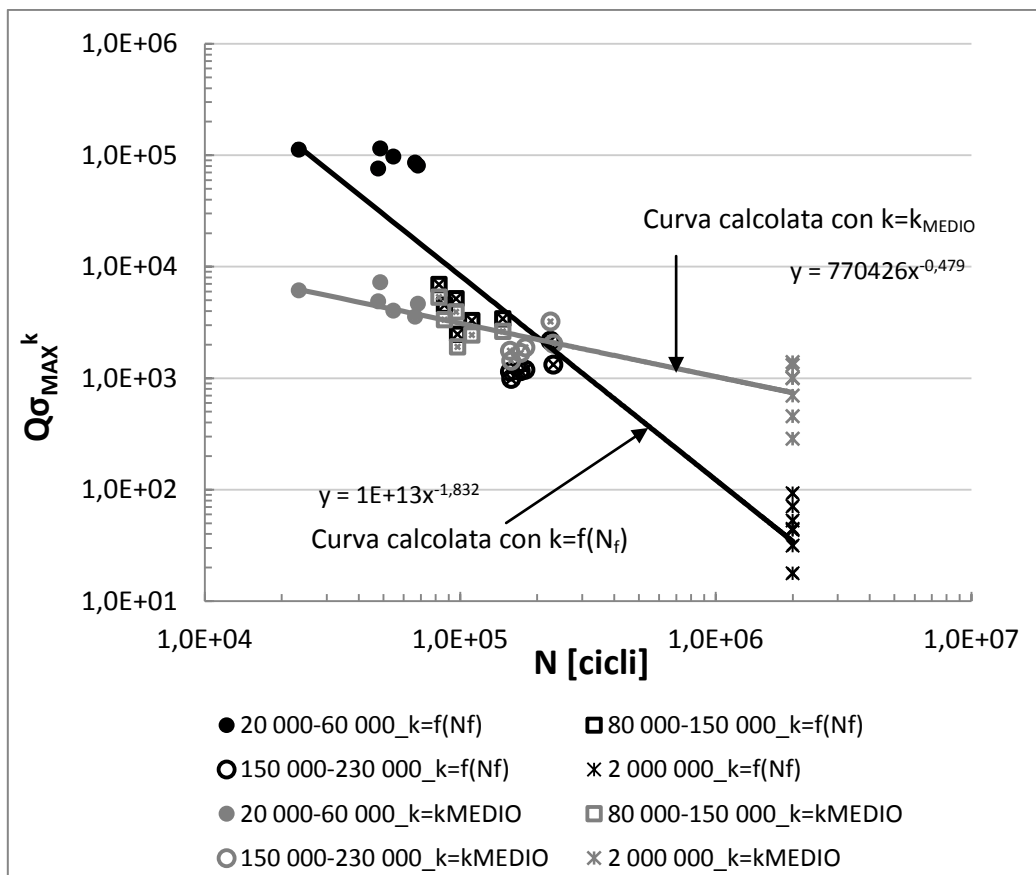


Figura 4.3.1i Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = k_{\text{medio}}$  e  $K = f(N_f)$  in provini lisci [6]

Il grafico di figura 4.3.1l riporta i valori della costante C calcolata per i provini forati sia con k variabile che con  $k = k_{\text{medio}}$ .



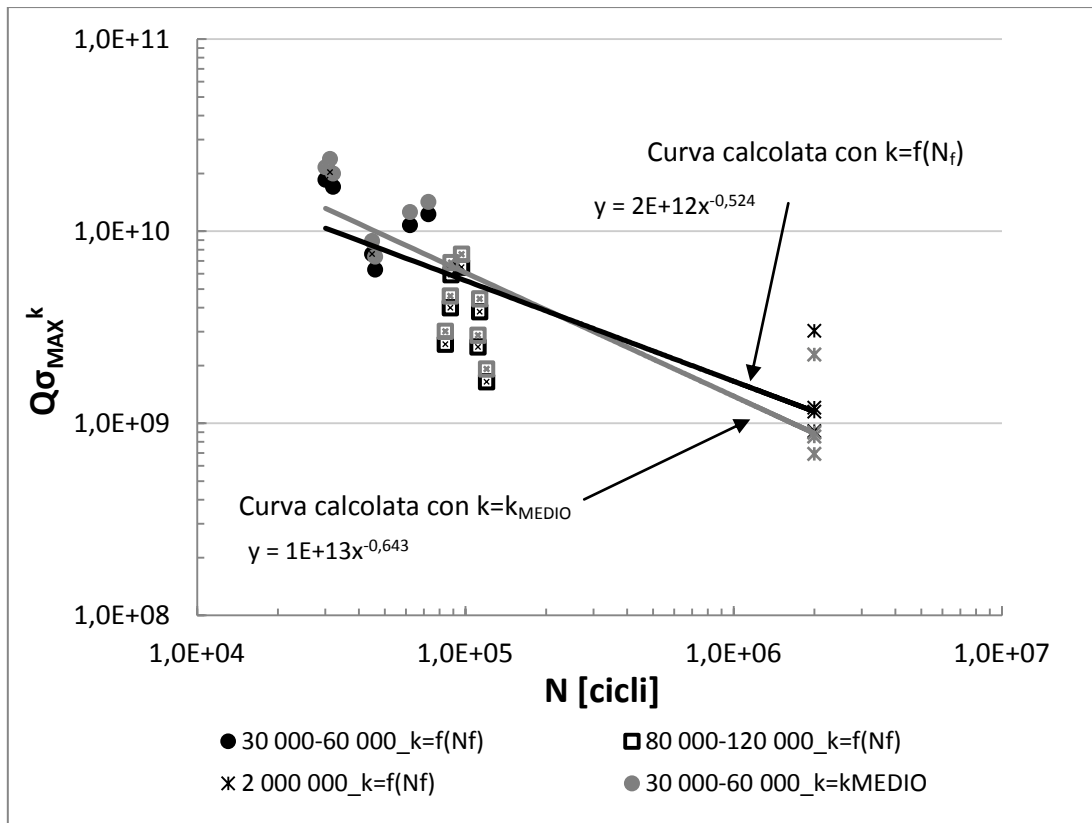


Figura 4.3.1l Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = k_{medio}$  e  $K = f(N_f)$  in provini forati [6]

Come visibile dai grafici di figura 4.3.1i,l nel caso dei provini lisci i due diversi approcci forniscono due curve di approssimazione con pendenza  $h$  diverse. Più nel dettaglio l'approccio che assume a priori il  $k$  medio fornisce una pendenza della curva  $h = 0,5$  mentre l'altro approccio fornisce una pendenza della curva  $h = 1,8$ . Questo è intuibile in quanto i valori di  $k$  delle curve isodurata sono diversi dal valore della pendenza media per le serie di dati relative ai provini che si sono rotti tra i 20 000 e i 60 000 cicli e quelli a 2 milioni di cicli. Per le altre due serie invece il valore della pendenza è simile alla pendenza media e quindi le nuvole di punti relative cadono ella stessa zona.

Questo ultimo comportamento è quello riscontrato per i provini forati, dove le pendenze delle curve isodurata sono molto simili tra loro e quindi simili alla pendenza media. In questo caso i due approcci forniscono grossomodo gli stessi risultati approssimabili da una retta di pendenza costante  $h = 0,6$ .

Come si vede dai grafici, per l'approssimazione dei dati sono state usate ancora equazioni del tipo potenza, di cui è riportata l'equazione, che risultano delle rette in un grafico doppio logaritmico. Si possono ora confrontare i dati relativi ai provini lisci con quelli relativi ai provini forati per capire se c'è corrispondenza tra i loro comportamenti. Questo viene fatto nelle figure 4.3.1m,n dove viene riportato il valore della costante C in funzione del numero di cicli per le due serie di dati, rispettivamente con il metodo a  $k$  variabile e con quello a  $k = k_{medio}$ .

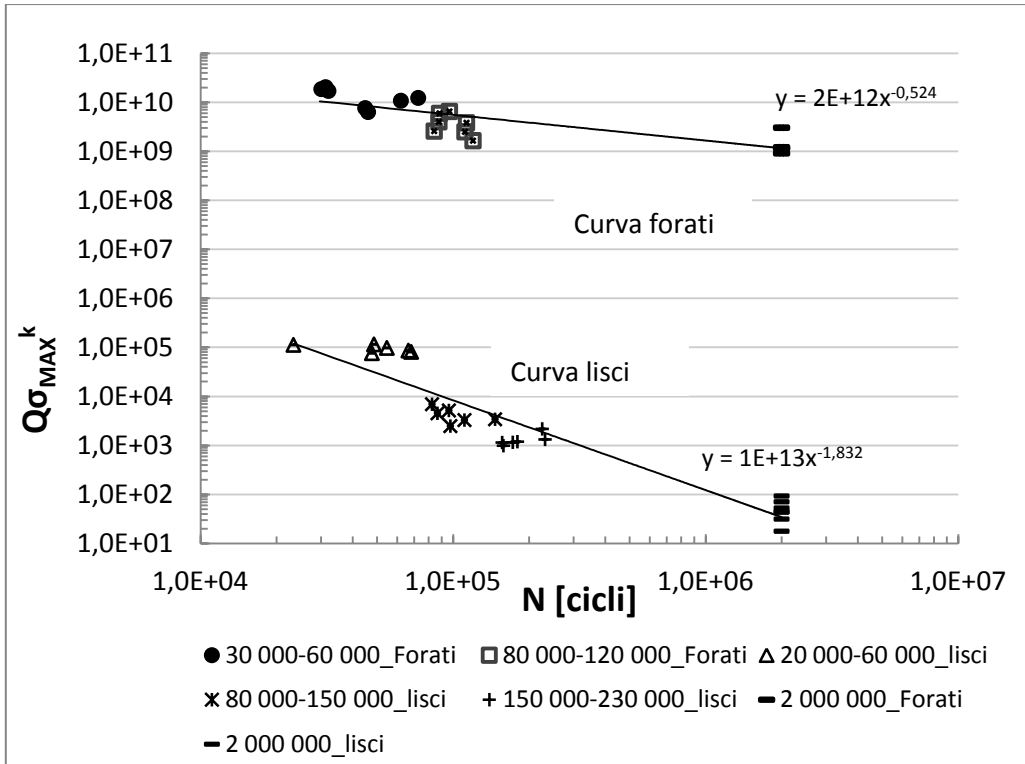


Figura 4.3.1m Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = f(N_f)$  in provini lisci e forati [6]

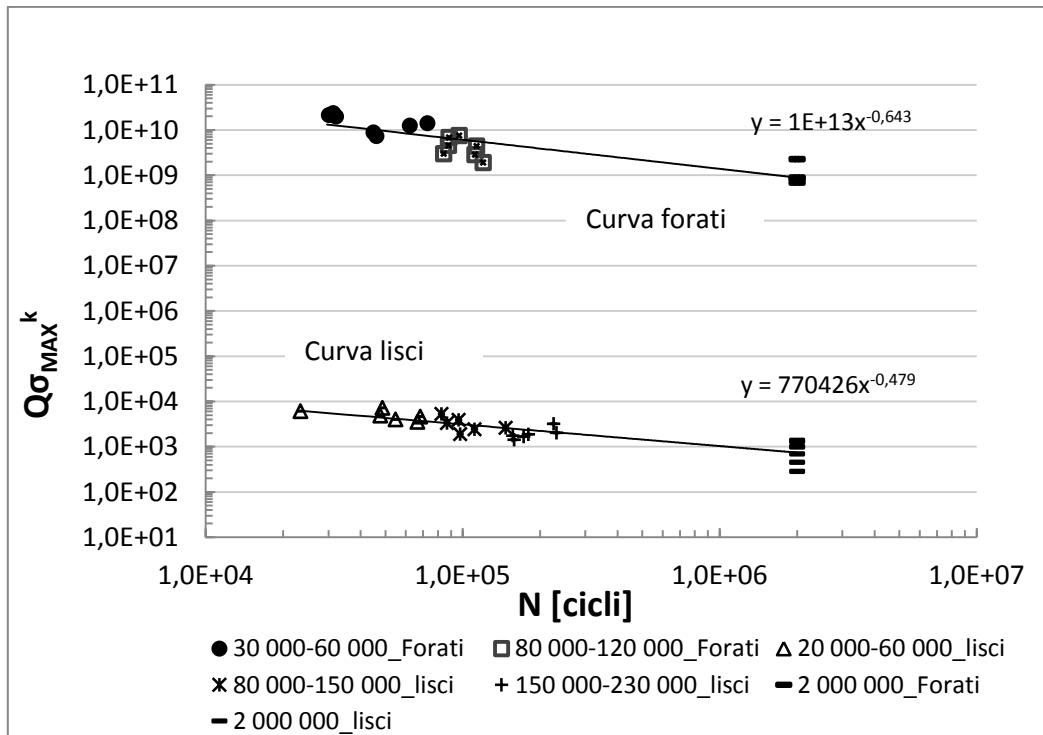


Figura 4.3.1n Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = k_{medio}$  in provini lisci e forati distinti per numero di cicli a rottura

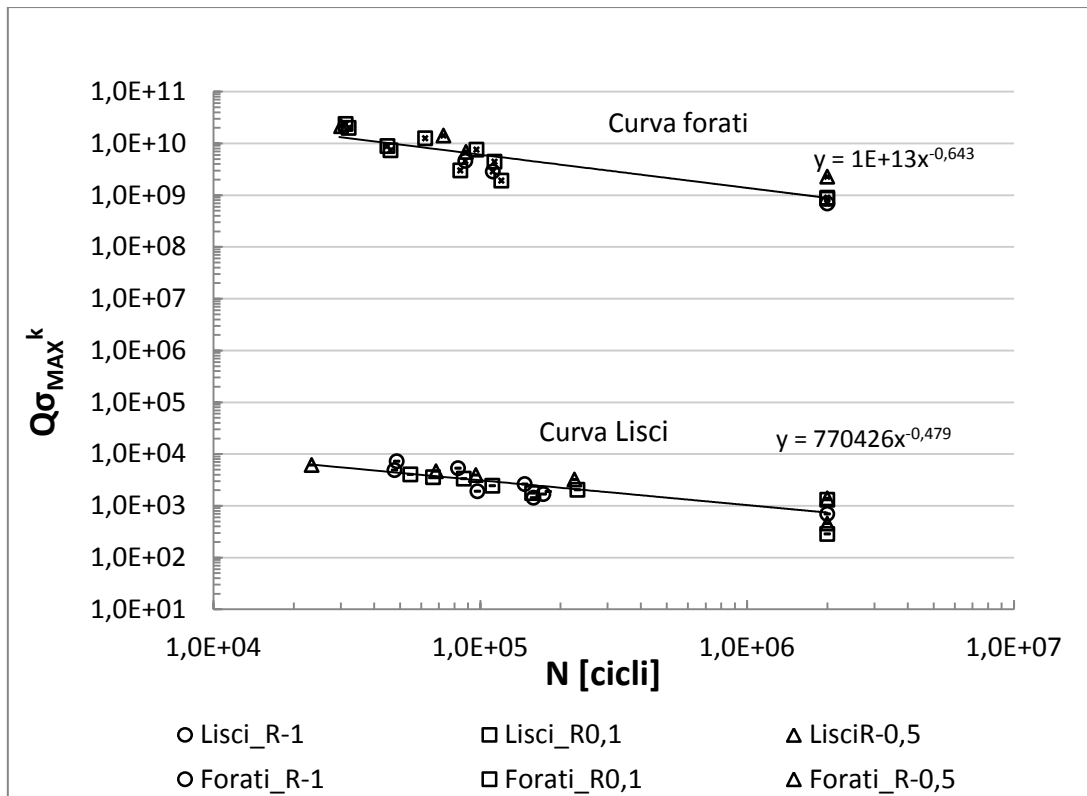


Figura 4.3.1n' Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = k_{medio}$  in provini lisci e forati distinti per rapporto di ciclo

Si osserva che le curve di approssimazione relative ai provini lisci e quelle relative ai provini forati presentano grossomodo la stessa pendenza  $h$  solo nel caso dell'approccio che valuta a priori un  $k_{MEDIO}$  tra le curve isodurata in un grafico  $Q-\sigma_{MAX}$ .

Nel caso si tenga  $k$  variabile con  $N_f$  la pendenza della curva di approssimazione dei provini lisci risulta pari a circa  $h = -1,832$  mentre quella relativa ai provini forati è  $h = -0,524$ . Nel caso si assuma a priori una pendenza  $k$  media delle curve isodurata la curva di approssimazione dei provini lisci presenta una pendenza di circa  $h = -0,479$  mentre quella relativa ai provini forati è  $h = -0,643$ .

Come detto in precedenza, si vuole però mantenere il vantaggio che offre l'approccio basato sulla densità di energia dissipata, ovvero quello di riassumere con un'unica banda i risultati di diverse geometrie. Questo, come si vede dal grafico di figura 4.3.1n, non avviene se si considerano separatamente le serie lisci e forati nel tentativo di rendere indipendenti i risultati dal rapporto di ciclo. Si rianalizzano pertanto i dati considerando le curve isodurata indipendentemente dalla geometria dei provini.

In questo caso è stato possibile individuare 4 curve isodurata che raggruppano dunque sia provini lisci che provini forati. Le curve così ottenute sono riportate nei grafici di figura 4.3.1o,p.

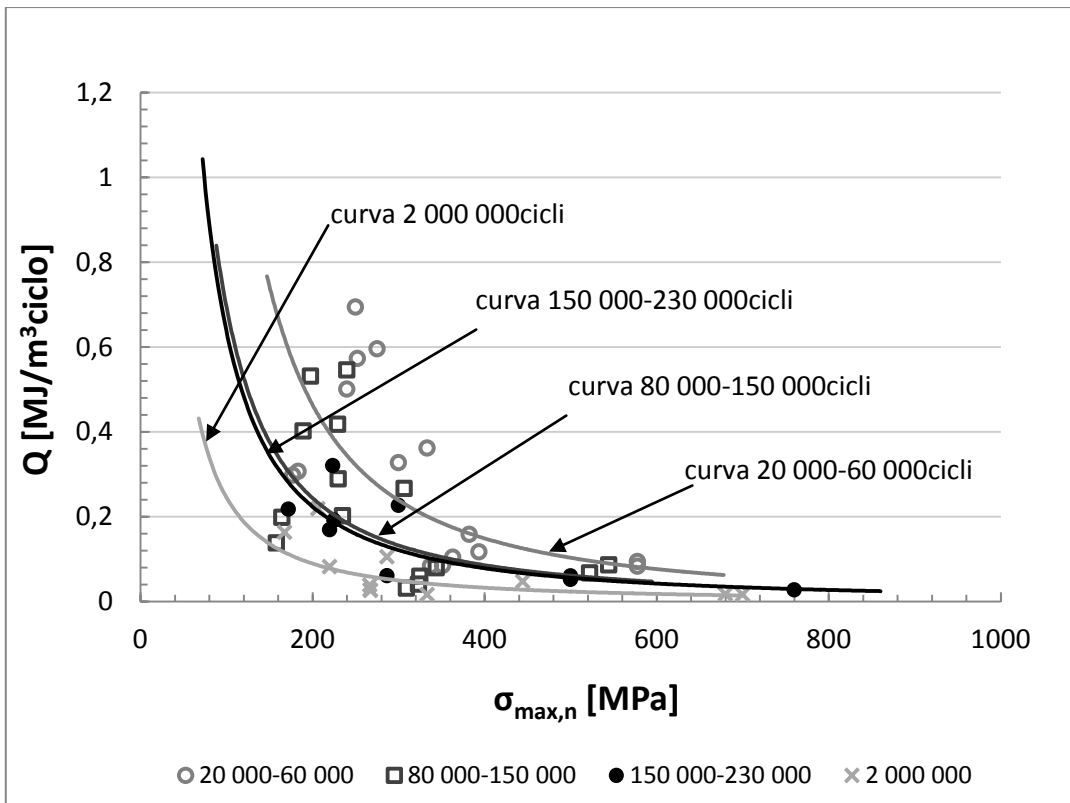


Figura 4.3.1o Curve isodurata per provini lisci e forati [6]

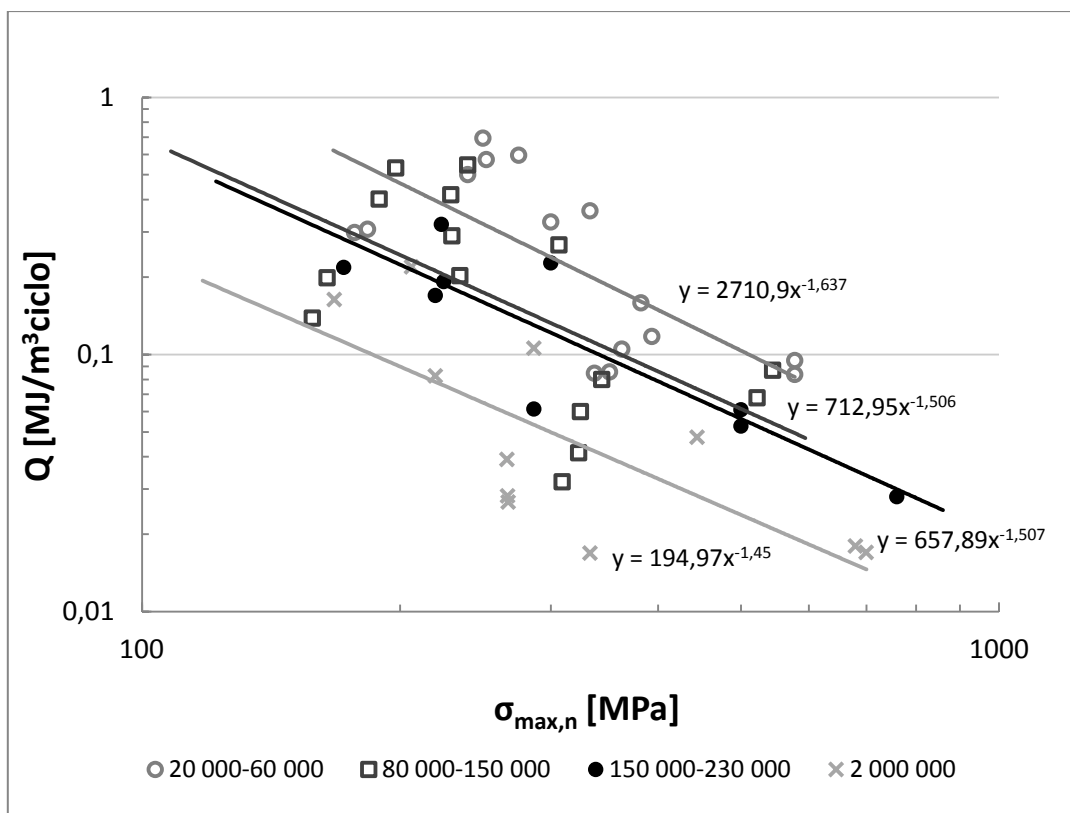


Figura 4.3.1p Curve isodurata per provini lisci e forati in scala log-log [6]

Dal grafico di figura 4.3.1p si vede come, nonostante la maggior dispersione dei dati, le 4 curve isodurata presentano grossomodo la stessa pendenza che viene riportata per completezza nella tabella seguente.

Curva a $N_f$	2 000 000	150000-230000	80000-150000	20000-60000
Pendenza k	1,45	1,507	1,506	1,637

La pendenza media risulta  $k=1,525$ .

Si riporta nel grafico 4.3.1q il valore della costante  $C=Q\sigma_{MAX}^k$ , valutata con la pendenza k media delle curve isodurata, in funzione del numero di cicli a rottura calcolata per la serie lisci+forati.

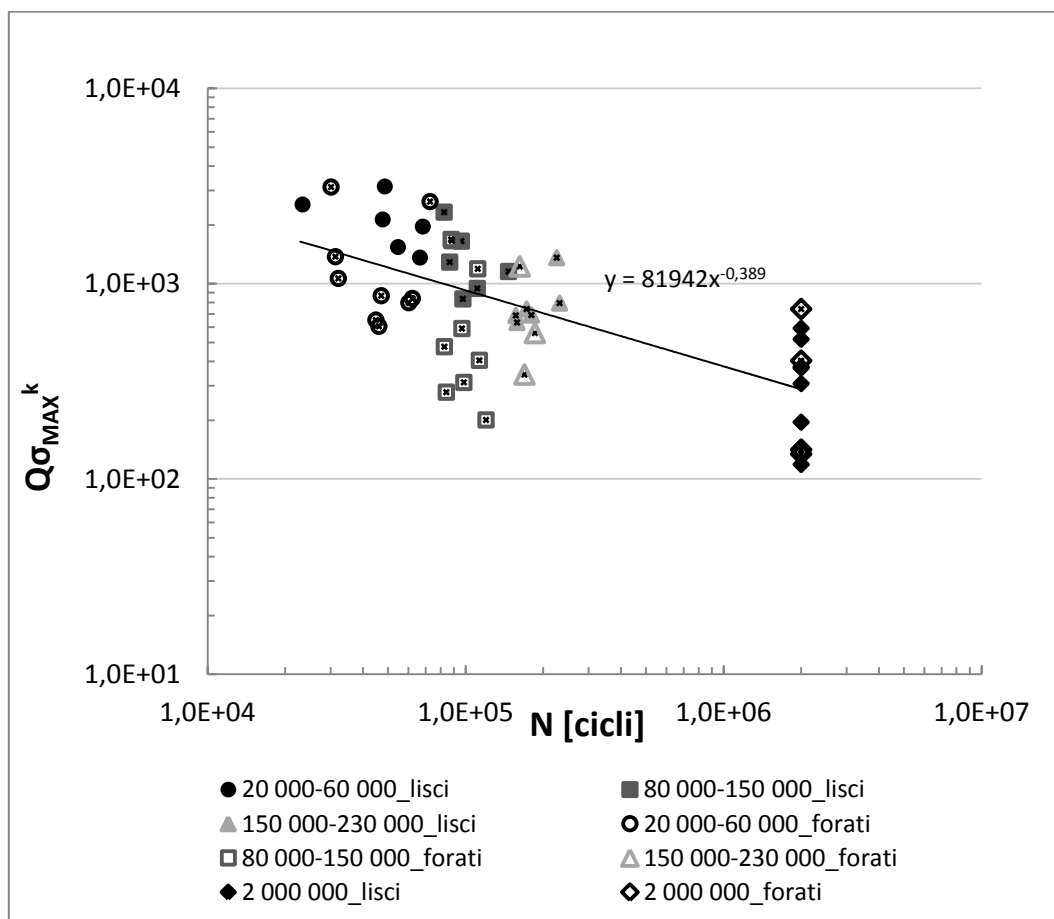


Figura 4.3.1q Costante C calcolata con  $k=k_{MEDIO}$  in funzione del numero di cicli per la serie lisci+forati

Dal grafico si nota che tutti i dati non possono essere riassunti in un'unica banda di dispersione.

#### 4.3.2 Influenza del rapporto di ciclo nei dati relativi al presente lavoro di tesi

In questa campagna sono state eseguite prove a rapporto di ciclo  $R=-1$  e  $R=0,1$ . In modo del tutto analogo a quanto fatto nel paragrafo precedente con i dati ricavati da [6] si vuole trovare una relazione tra densità di energia dissipata tensione applicata e vita a termine in modo indipendente dal rapporto di ciclo. Si riporta in figura 4.3.2a il grafico densità di energia dissipata-ampiezza di tensione per i dati di questo lavoro di tesi. In questo caso si avranno solo due rette corrispondenti ai due diversi rapporti di ciclo come indicato in figura.

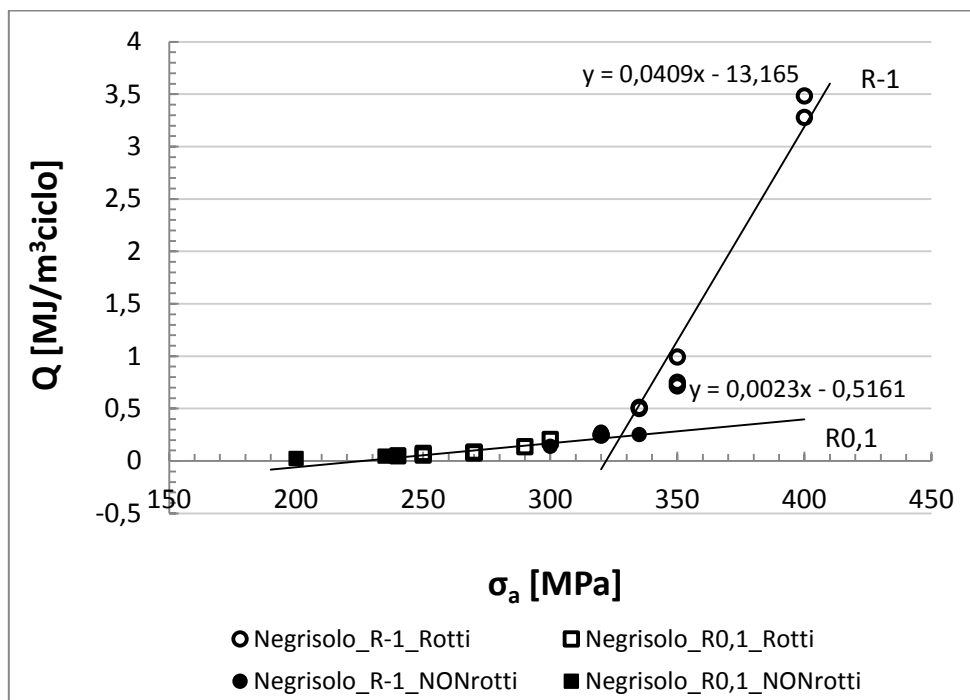


Figura 4.3.2a Relazione tra calore generato e ampiezza di tensione al variare del rapporto di ciclo per i provini lisci di questa campagna di prove

Partendo dai dati della figura 4.3.2a è possibile individuare, per i due diversi rapporti di ciclo, i punti che corrispondono ad una determinata vita del provino, ovvero quelli che si rompono ad un determinato numero di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione  $R$ . Questi dati vengono poi approssimati da una curva parametrica, detta curva di isodurata, in funzione appunto del numero di cicli a rottura. In questo caso, con i dati a disposizione, è stato possibile individuare 4 curve di isodurata che sono riportate in figura 4.3.2b,c.

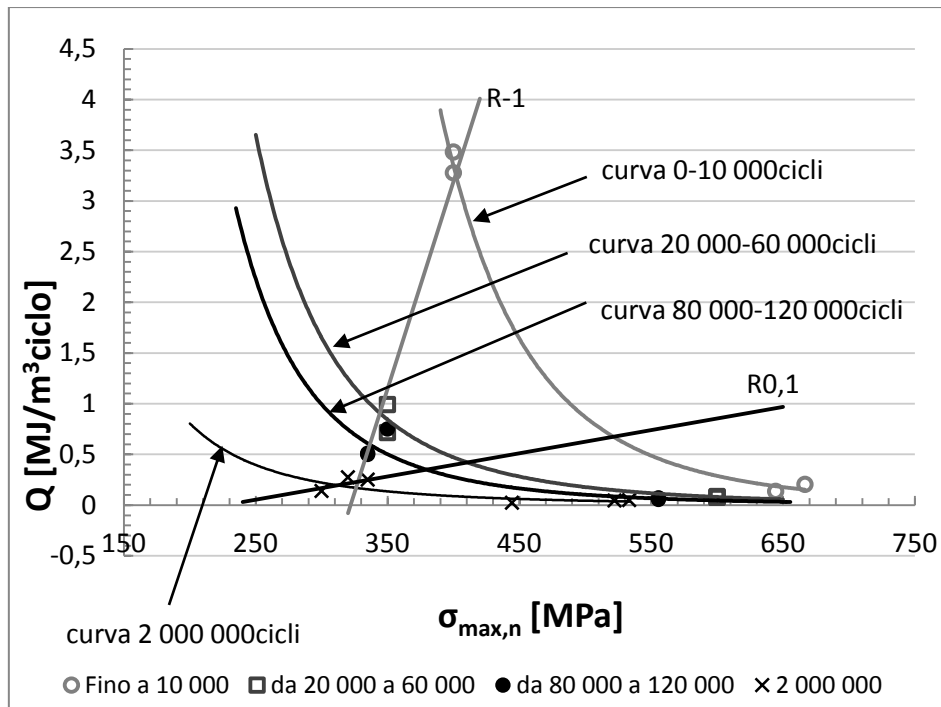


Figura 4.3.2b Curve isodurata per i provini di questa campagna di prove

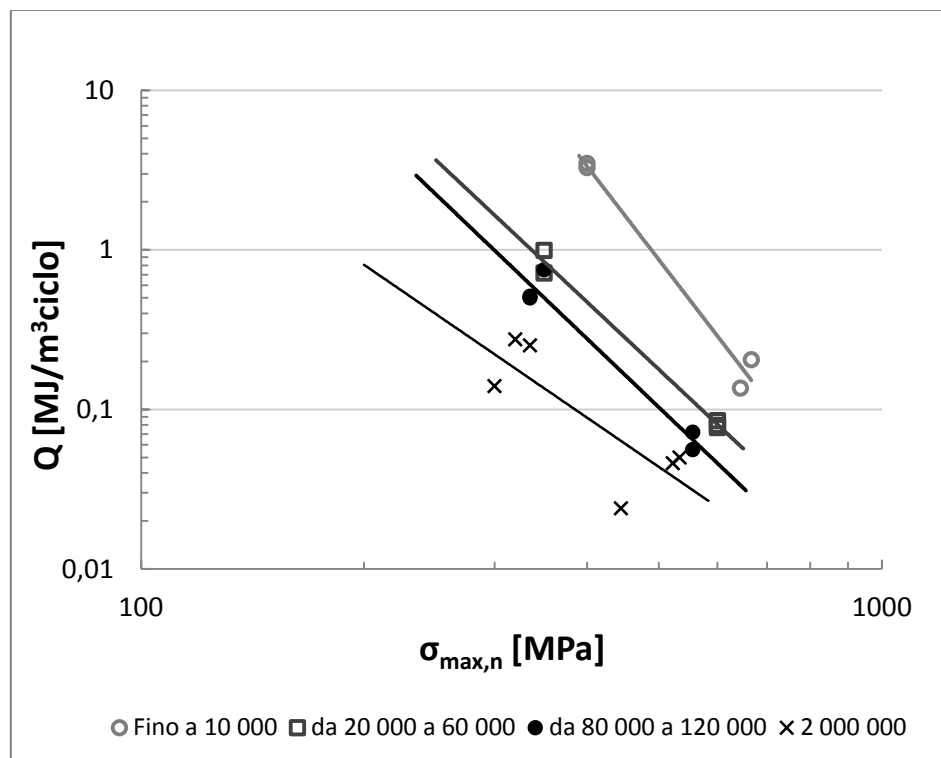


Figura 4.3.2c Curve isodurata per i provini di questa campagna di prove in scala log-log

Dal grafico di figura 4.3.2c si vede come le pendenze siano leggermente diverse, soprattutto per le due serie estreme relative a vita infinita e vita molto breve. Per completezza si riportano nella tabella seguente i valori delle pendenze  $k$  delle curve.

Curva a $N_f$	2000000	80000-120000	20000-60000	0-10000
Pendenza k	3,182	4,434	4,359	6,047

La pendenza media risulta  $k=4,506$ .

Come fatto in precedenza si riporta a questo punto il valore della costante  $C=Q\sigma_{MAX}^k$ , valutata con la pendenza k media delle curve isodurata, in funzione del numero di cicli a rottura. Il risultato è riportato nel grafico di figura 4.3.2d.

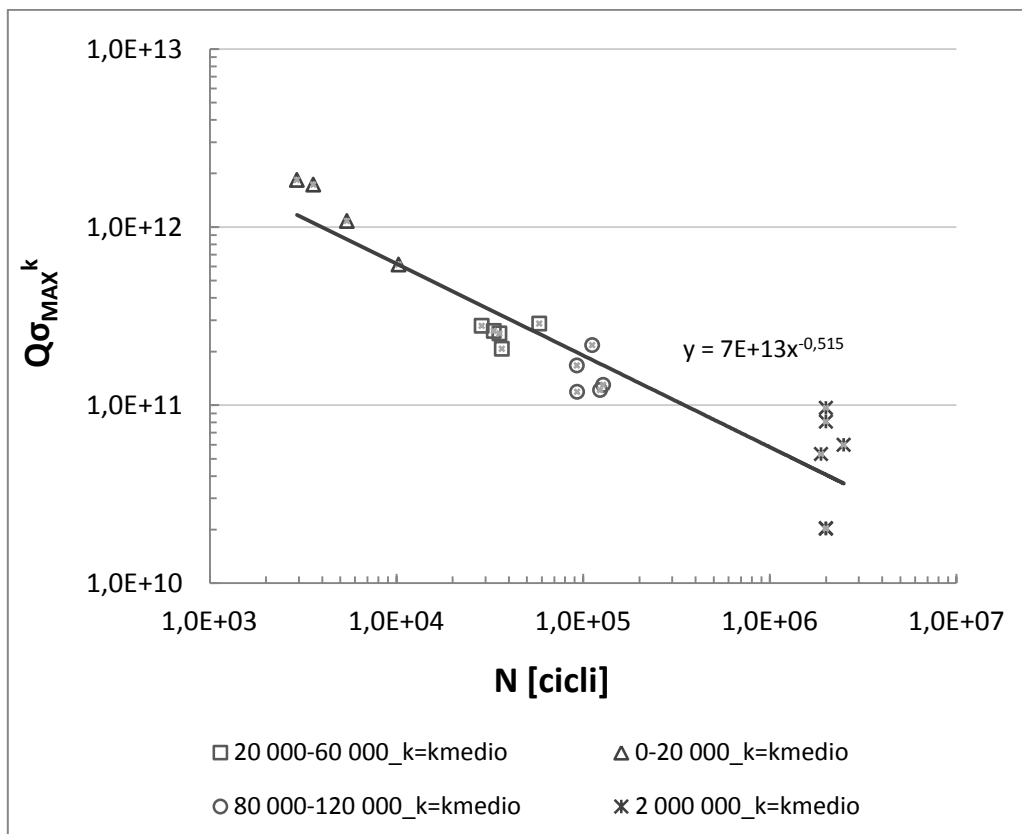


Figura 4.3.2d Costante C calcolata con  $k=k_{MEDIO}$  in funzione del numero di cicli per la serie di provini analizzati in questa campagna di prove distinti per numero di cicli a rottura

Si riporta lo stesso grafico distinguendo i punti relativi alle prove eseguite a rapporto di ciclo R-1 e quelli relativi alle prove eseguite a R0,1.



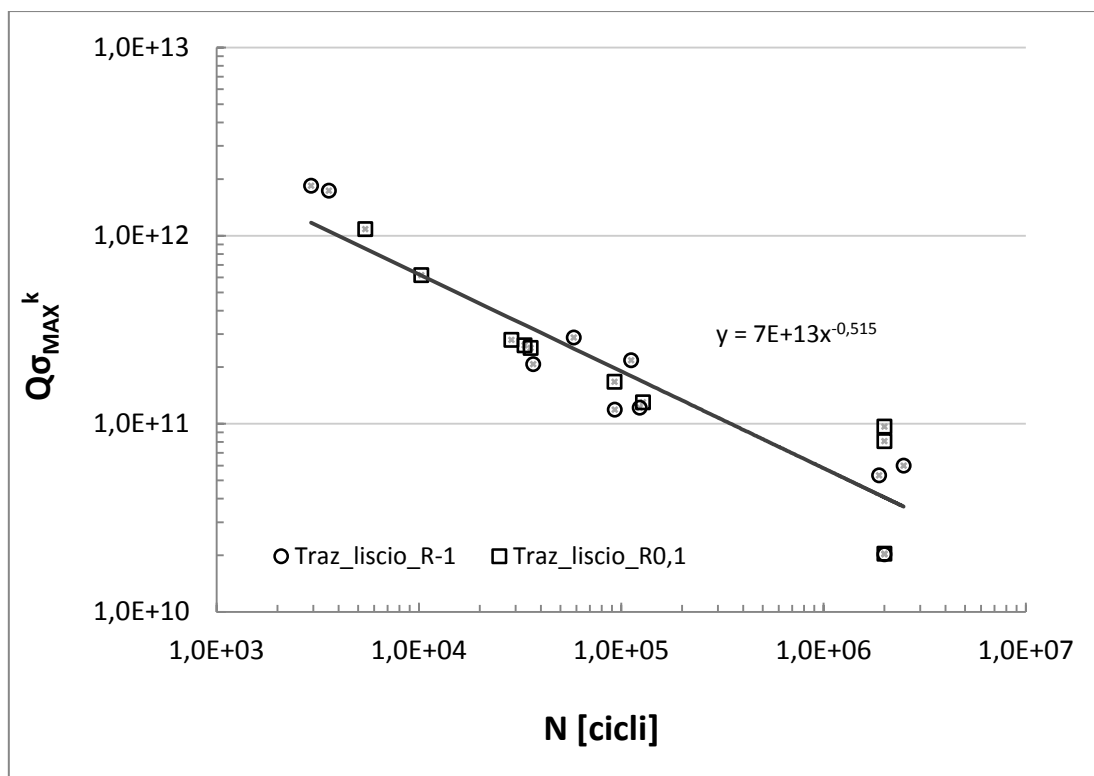


Figura 4.3.2e Costante C calcolata con  $k=k_{MEDIO}$  in funzione del numero di cicli per la serie di provini analizzati in questa campagna di prove distinti per diverso rapporto di ciclo

I grafici 4.3.2d,e mostrano che la curva di pendenza  $h = 0,515$  in un grafico doppio logaritmico approssima abbastanza bene la serie di dati proposta. Com'era avvenuto per i dati ricavati da [6], anche in questo caso la valutazione del parametro  $Q\sigma_{MAX}^k$ , valutato con un  $k$  medio ricavato dalle curve isodurata, in funzione del numero di cicli a rottura sembra poter riassumere i risultati delle prove in modo indipendente dal rapporto di ciclo. Questo sembra però avvenire in modo accettabile soltanto nel caso in cui si analizzi una serie avente la stessa geometria.

A questo punto resta da confrontare la serie di prove effettuate in questa campagna con quelle eseguite in [6].

#### 4.3.3 Influenza del rapporto di ciclo: confronto tra le diverse campagne di prove

A questo punto resta da confrontare la serie di prove effettuate in questa campagna con quelle eseguite in [6]. Data la miglior approssimazione ottenuta nei casi precedenti si utilizzerà il metodo che definisce una pendenza  $k$  media delle curve isodurata del materiale. Inoltre data la dispersione troppo elevata dei dati nel caso in cui si analizzano serie lisci e forati come un'unica serie (fig.4.3.1q) si è deciso di mettere a confronto soltanto le prove eseguite su materiale liscio.

È stato possibile individuare 4 curve isodurata che sono riportate nel grafico di figura 4.3.3a.

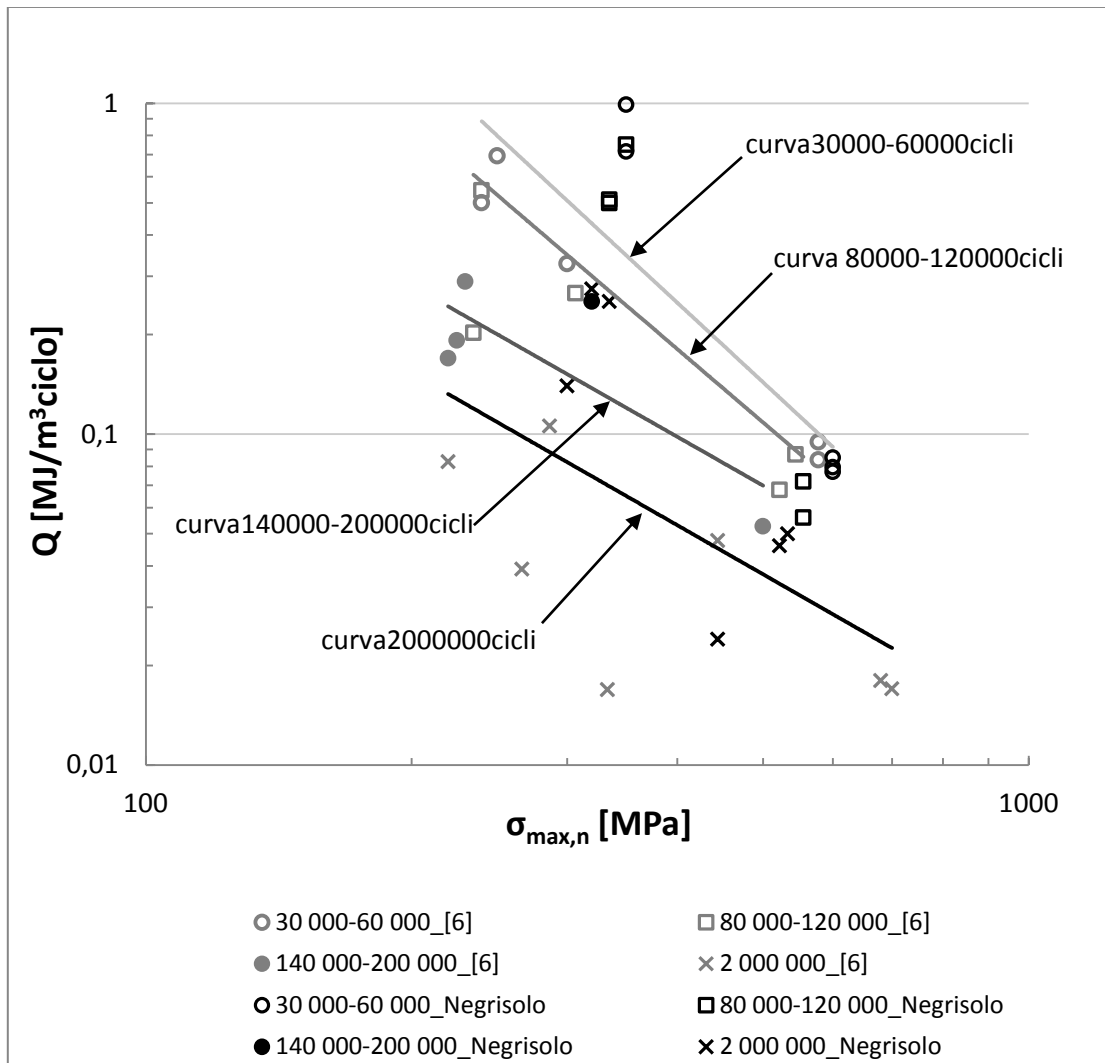


Figura 4.3.3a Curve isodurata per tutti i lisci delle diverse campagne di prova

Dall'analisi del grafico precedente si vede come i punti relativi alla stessa curva di isodurata siano molto dispersi. Inoltre le pendenze in questo caso sono molto diverse tra loro. Per completezza si riportano tutte le pendenze delle curve nella tabella seguente.

Curva a $N_f$	200000	140000-200000	80000-120000	30000-60000
Pendenza k	1,528	1,519	2,283	2,475

La pendenza media k risulta essere  $k=1,951$ .

Con questo valore di pendenza si vanno dunque a calcolare per ciascun provino i valori della costante  $Q\sigma_{MAX}^k$  e si plottano questi valori in funzione del numero di cicli a rottura. Si ottiene il grafico di figura 4.3.3b.

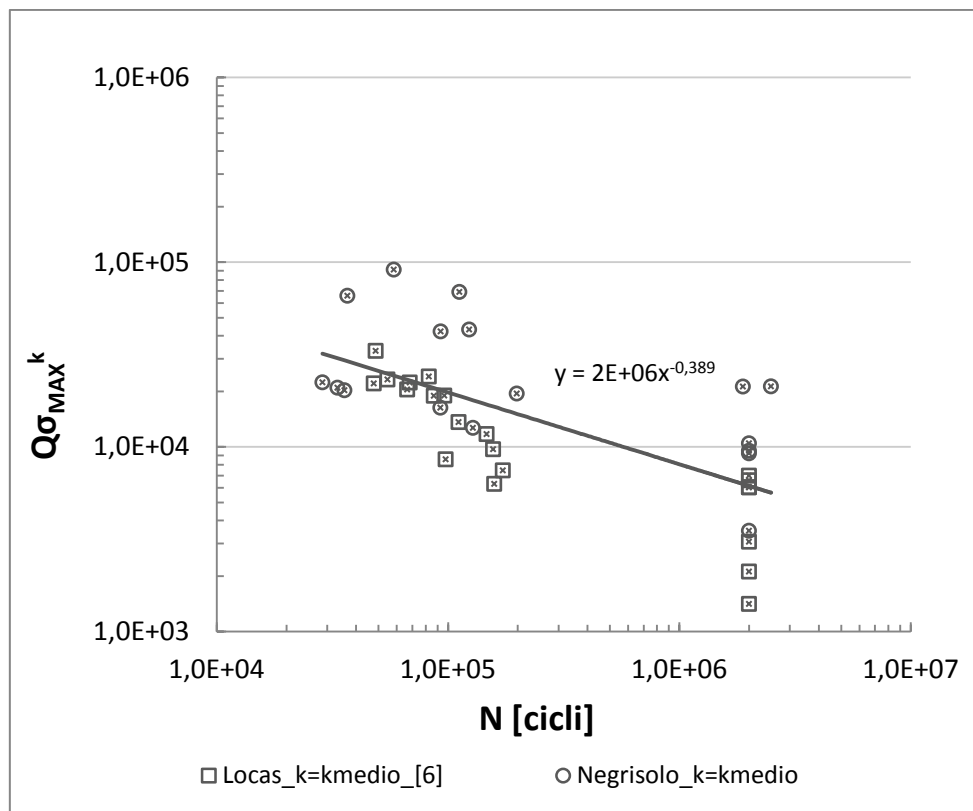


Figura 4.3.3b Valori della costante C in funzione del numero di cicli a rottura per le serie di provini lisci

Anche dal grafico di figura 4.3.3b si nota una maggiore dispersione dei dati attorno alla curva di pendenza  $h = 0,389$  rispetto alle serie analizzate singolarmente. Come già discusso in precedenza una dispersione così elevata è dovuta alla maggior differenza tra le pendenze delle curve isodurata e la pendenza media. In particolare si osserva dal grafico che i punti della presente campagna di prove (denominati Negrisolo\_k=kmedio) tendono a stare al di sopra della curva di approssimazione mentre i dati relativi a [6] stanno quasi tutti al di sotto. A differenza del grafico di figura 4.2.1q, in cui la dispersione dei dati è dovuta al raggruppamento in un'unica serie di dati relativi a geometrie diverse (lisci e forati), in questo caso, secondo l'autore, la dispersione è dovuta alle caratteristiche diverse dei materiali utilizzati nelle due campagne di prove, pur trattandosi nominalmente dello stesso materiale. Questa differenza di comportamento, infatti, era già stata riscontrata dall'analisi della curva densità di energia dissipata-numero di cicli a rottura (fig 4.4.2b), nella quale i dati relativi alle due campagne di prove venivano riassunti da bande di dispersione di pendenza molto diversa tra loro.

## 4.4 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO: VALUTAZIONE DEL RAFFREDDAMENTO ADIABATICO

### 4.4.1 Descrizione del metodo

Come evidenziato nei paragrafi precedenti dall'analisi delle diverse campagne di prove è stata valutata la possibilità di riassumere i risultati di prove a fatica su acciaio inossidabile AISI304L in modo indipendente dalla geometria e dal rapporto di ciclo cercando una relazione tra i parametri densità di energia dissipata, tensione applicata e numero di cicli a rottura. Come già anticipato nel paragrafo 4.3.3 si ritiene che il confronto dei dati di questa campagna di prove con quelli ricavati da [6] non sia adeguato in quanto il materiale non sembra essere lo stesso. L'aspetto che maggiormente supporta questa considerazione è la differenza di comportamento rappresentata dalla curva energia dissipata-numero di cicli a rottura che, in [6], non corrisponde alla banda pubblicata dall'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni [3] (fig. 4.2.2c), come invece è avvenuto per queste prove.

Per i dati relativi alle diverse campagne di prove si è visto che una relazione tra i parametri in gioco può essere ben rappresentata da una retta di pendenza  $h$  in un grafico doppio logaritmico. Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti (entro un certo intervallo) allo stesso numero di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione  $R$  applicato durante la prova, si ricava per ciascun punto il valore della costante definita nel seguente modo:

$$C = Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}} \quad (4.4.1)$$

dove  $k_{MEDIA}$  indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata su un grafico doppio logaritmico (fig.4.3.2c). Si diagramma poi il valore della costante così determinata in funzione del numero di cicli a rottura di ciascun provino ottenendo una serie di punti che vengono ben approssimati da una curva di equazione del tipo 4.4.2:

$$Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}} \cdot N_f^h = COST. \quad (4.4.2)$$

che rappresenta ancora una retta in un grafico doppio logaritmico (fig. 4.3.2d). L'equazione 4.4.2 rappresenta il legame che cercavamo tra densità di energia dissipata, tensione applicata e numero di cicli a rottura e sembra essere, a meno della dispersione dei dati indipendente dal rapporto di ciclo  $R$ .

Si riportano in tabella 4.4.1 i valori caratteristici delle costanti determinati per le diverse campagne di prove analizzate separatamente.

Tabella 4.4.1 Valori dei parametri caratteristici k,h,COST. determinati sperimentalmente nelle diverse campagne di prove

Nome serie	Pendenza media delle curve isodurata: $k_{MEDIA}$	Pendenza della curva caratteristica: h	Costante COST.
Lisci_Negrisolo	4,506	0,515	$7 \times 10^{13}$
Lisci_[6]	1,677	0,479	$8 \times 10^5$
Forati_[6]	4,328	0,643	$1 \times 10^{13}$

Dalla tabella e da quanto visto nel paragrafo 4.3 si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I dati relativi a questa campagna di prove sono ben approssimati da una relazione del tipo 4.4.2. Questa serie è però costituita da provini della stessa geometria e la verifica è stata effettuata solo per rapporti di ciclo R-1 e R0,1. È quindi necessario estendere la verifica del metodo sia ad altri rapporti di ciclo che a differenti geometrie.
- I dati relativi a [6] risultano ben approssimati da una relazione del tipo 4.4.2 solo se si considerano separatamente le serie lisci e forati. Da questo punto di vista l'obiettivo che prevedeva di valutare la vita a fatica in modo indipendente dal rapporto di ciclo sembra essere rispettato ma si perde il vantaggio di estendibilità del metodo basato sulla densità di energia dissipata a diverse geometrie.

La validità del metodo basato sull'equazione 4.4.2 appare sicuramente buona dal punto di vista teorico ma a livello pratico va a scontrarsi con quella che era l'idea iniziale del metodo energetico di riuscire a stabilire la resistenza a fatica di un componente in esercizio attraverso l'utilizzo di una semplice termocoppia, incollata sul punto critico, per la rilevazione del gradiente di raffreddamento. La presenza nell'equazione 4.4.2 del parametro  $\sigma_{MAX}$  infatti non consente di applicare tale metodo con semplicità, in quanto la determinazione della tensione massima presente nel punto critico di un componente in esercizio può essere effettuata solo attraverso l'incollaggio di estensimetri oppure con una simulazione agli elementi finiti. L'idea è quindi quella di sostituire il parametro  $\sigma_{MAX}$  con un altro parametro legato sempre ad una variazione di temperatura, e quindi ancora rilevabile con l'utilizzo della sola termocoppia.

Da recenti studi sulla teoria della termoelasticità dei materiali, è stato infatti rilevato sperimentalmente che all'applicazione di una tensione di trazione, il materiale subisce un raffreddamento, comportandosi come un gas che espandendosi si raffredda. L'intensità del raffreddamento, valutato in condizioni di adiabaticità con l'ambiente, è

proporzionale, almeno all'interno del campo elastico-lineare del materiale, alla tensione di trazione applicata ed è valutabile attraverso la relazione 4.4.3 .

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho c_p} \cdot T \cdot \sigma \quad (4.4.3)$$

dove  $\Delta T$  [K] indica la variazione di temperatura del materiale sottoposto alla tensione  $\sigma$ ,  $\alpha$  [K<sup>-1</sup>] è il coefficiente di dilatazione termica,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] e  $c_p$  [J/kgK] sono rispettivamente la densità ed il calore specifico del materiale,  $T$  [K] è la temperatura del materiale, espressa in Kelvin, prima dell'applicazione del carico.

Una volta stabilito il valore della costante  $\frac{\alpha}{\rho c_p} T = \frac{\Delta T}{\sigma}$  che, una volta note le condizioni ambientali è una caratteristica del materiale, si ottiene dunque la relazione tra la tensione applicata al materiale e la sua variazione di temperatura che cerchiamo.

Per la determinazione della costante è necessario dunque sottoporre il materiale ad una serie di prove di trazione statiche a livelli di carico differenti. Per ciascun livello di tensione si va a misurare il raffreddamento subito dal materiale e si riporta in un grafico la variazione di temperatura in funzione della tensione applicata. Si ottiene una serie di punti che in linea teorica stanno su una retta, la cui pendenza approssima proprio il valore della costante.

Dovendo restare nel tratto lineare della curva  $\sigma$ - $\epsilon$  si suggerisce di applicare livelli di tensione inferiori ad un terzo della tensione  $\sigma_{p0,2\%}$  del materiale. Facendo riferimento al materiale utilizzato in questa campagna di prove il suo carico di snervamento è  $\sigma_{p0,2\%} = 468$ MPa. Questo significa che il livello di tensione da applicare può essere al massimo di 150MPa. Visti i modesti valori di variazione della temperatura per questo tipo di prove si cerca di sfruttare il tratto lineare della curva  $\sigma$ - $\epsilon$  anche in compressione facendo poi riferimento, nei calcoli, non più al valore di tensione applicato ma alla sua variazione totale  $\Delta\sigma$ . Per chiarire le modalità della procedura da seguire nel paragrafo successivo viene descritto il protocollo di prova utilizzato per la determinazione della costante  $\frac{\Delta T}{\Delta\sigma}$ .

#### 4.4.2 Protocollo di prova per la determinazione della costante $\frac{\Delta T}{\Delta\sigma}$

Per determinare il legame tra tensione applicata e variazione di temperatura sono necessarie dunque una macchina per prove di trazione e un sistema di acquisizione di temperatura al quale sarà collegata la termocoppia incollata nella sezione ristretta del provino. Il provino utilizzato è il medesimo usato nelle prove di fatica, visibile in figura 2.1.

La relazione 4.4.3 è valida, come detto, in condizioni di adiabaticità, ovvero in assenza di scambi di calore con l'ambiente esterno. Per avvicinarsi il più possibile a questa condizione l'applicazione del carico deve essere abbastanza veloce da non dare il tempo al materiale di scambiare calore con l'ambiente e viceversa. Inoltre la termocoppia è stata isolata dall'esterno attraverso una fascetta di plastica in modo da avere un segnale di temperatura più pulito e quindi più facilmente analizzabile nei calcoli successivi. In realtà, sono state eseguite numerose prove a frequenze diverse e con sollecitazioni di tipo diverso per cercare di comprendere quale sia il miglior compromesso tra velocità di applicazione del carico e tipo di carico da applicare per la determinazione sperimentale della costante. In particolare sono state eseguite prove di trazione con segnale di comando a rampa e segnale di comando ad onda quadra a diverse velocità di applicazione del carico. Il valore di riferimento per la costante, ricavato da valori del coefficiente di dilatazione termica, della densità e del calore specifico ricavati in letteratura per un acciaio inossidabile è pari a:

$$\frac{\alpha}{\rho c_p} T = 1,26 \times 10^{-09} \quad (4.4.2)$$

considerando un valore della temperatura del pezzo prima dell'esecuzione delle prove pari alla temperatura ambiente di 20°C (293.15°K). Proprio l'esecuzione delle diverse prove ha permesso di poter affermare che il valore della temperatura del pezzo T prima dell'applicazione del carico ha un'influenza trascurabile sul valore della costante quando le prove siano eseguite in condizioni ambientali simili. Con riferimento a tutte le prove eseguite la temperatura più bassa del provino riscontrata prima dell'applicazione del carico è stata di 19.1°C mentre la più alta è stata di 20,9°C. Considerando la variazione percentuale del parametro 4.4.2 corrispondente alla variazione di T si ottiene:

$$\frac{(20.9 + 273.15) - (19.1 + 273.15)}{(19.1 + 273.15)} = 0,006 = 0,6\%$$

Ovvero si ha una variazione inferiore all'1% che permette di assumere T=293,15°K come una costante, almeno per queste prove.

Si riassumono nella tabella 4.4.2a le diverse prove effettuate con un segnale in forza tipo rampa a diverse velocità di applicazione del carico e a livelli differenti di tensione con il valore di tensione determinato per ciascun caso:

Tabella4.4.2a Prove a rampa per la determinazione sperimentale della costante  $\Delta T/\Delta\sigma$

RAMPA	LIVELLI DI TENSIONE [Mpa]	VELOCITÀ [Mpa/s]	$\Delta T$ [°K]	$\Delta\sigma$ [Mpa]	$\Delta T/\Delta\sigma$ [K/Pa]
RAMPA1	±100	50	0,173	133,54	1,295E-09
RAMPA2	±100	25	0,226	194,6	1,161E-09
RAMPA3	±100	100	0,088	88,06	9,993E-10
RAMPA4	±150	75	0,326	247,76	1,316E-09
RAMPA5	±200	100	0,387	369,8	1,047E-09
RAMPA6	±125	62,5	0,216	157,79	1,369E-09
RAMPA7	±75	37,5	0,064	58,75	1,089E-09

I valori più prossimi a quello di riferimento sono stati ottenuti per velocità di applicazione del carico che permettono di concludere la prova in 2 secondi di tempo. In particolare sono quelli relativi alle prove RAMPA1, RAMPA4 e RAMPA5 che saranno poi i valori utilizzati per l'approssimazione della costante

Sono state successivamente effettuate delle prove anche utilizzando il comando in forza del tipo onda quadra a diverse frequenze dell'onda. I risultati ottenuti sono riportati in tabella 4.4.2b.

Tabella4.4.2b Prove ad onda quadra per la determinazione sperimentale della costante  $\Delta T/\Delta\sigma$

ONDA QUADRA	LIVELLI DI TENSIONE [Mpa]	VELOCITÀ [Hz]	$\Delta T$ [°K]	$\Delta\sigma$ [Mpa]	$\Delta T/\Delta\sigma$ [K/Pa]
ONDA1	±150	0,5	0,261	239,2	1,091E-09
ONDA2	±150	0,25	0,258	240,5	1,073E-09
ONDA3	±150	0,125	0,277	243,7	1,137E-09
ONDA4	±150	0,1	0,294	245,1	1,200E-09
ONDA5	±150	0,05	0,312	253,7	1,230E-09
ONDA6	±150	0,017	0,317	284,4	1,115E-09

I valori della costante risultano in questo caso prossimi al valore di riferimento per frequenze di applicazione del carico relativamente basse (<0,125Hz). A conferma di ciò è stato analizzato l'andamento di temperatura durante la prova di trazione statica nel tratto lineare elastico dove la velocità di deformazione è molto lenta (2mm/min). Anche in questo caso il valore della costante risulta pari a 1,36E-09 ed è compatibile con il valore di riferimento.

Tutte le prove mettono in evidenza come la condizione di adiabaticità sembra sia rispettata anche per applicazioni del carico molto lente. Una volta stabilita questa condizione si può procedere con la determinazione sperimentale della costante.



Si descrive nel seguito la procedura da seguire.

- afferrare il provino munito di termocoppia e fascetta sulla macchina di prova a trazione
- dal software che controlla la macchina impostare i livelli di carico da applicare, il tipo di sollecitazione, che in questo caso è una rampa in controllo di forza, e la velocità di applicazione del carico ( si è visto che l'ideale è far terminare la rampa dopo 2 secondi di tempo)
- impostare i limiti di spostamento e forza della macchina in funzione del carico applicato
- impostare il salvataggio del file.dat che contiene le acquisizioni di tempo, forza e spostamento applicate dalla macchina durante la prova indicando la tensione applicata e la frequenza dell'onda quadra in modo da catalogare le varie prove. Ad esempio il file 100MPa\_50.dat indica che la prova è stata eseguita applicando una rampa con velocità di applicazione del carico pari a 50MPa/s con una tensione variabile tra +100MPa e -100MPa.
- avviare l'acquisizione di temperatura alla massima frequenza (22Hz) e far trascorrere circa 5 secondi per rilevare in modo corretto la temperatura T del provino in condizioni di equilibrio con l'ambiente
- far partire la macchina di prova attraverso il tasto play sempre con l'acquisizione di temperatura attiva ed attendere che venga eseguita la rampa completa. Dovendo, come detto, sfruttare al massimo il tratto lineare elastico del materiale la macchina applicherà dapprima una rampa per portarsi dal valore di zero in forza al valore corrispondente al massimo livello di tensione, dopo di che si effettuerà un'unica rampa dal valore massimo a quello minimo in compressione
- fermare la macchina di prova
- fermare l'acquisizione di temperatura e salvare il file.txt con lo stesso nome utilizzato per il file.dat della macchina di prova in modo da aver chiara la corrispondenza tra i due file
- con un foglio di calcolo (es. Excel) aprire i due file. Nel file.txt relativo all'acquisizione di temperatura saranno presenti due colonne di dati, una relativa al tempo ed una relativa alla temperatura acquisita. É dunque immediato costruire il grafico temperatura-tempo che sarà simile al grafico si figura 4.4.2a

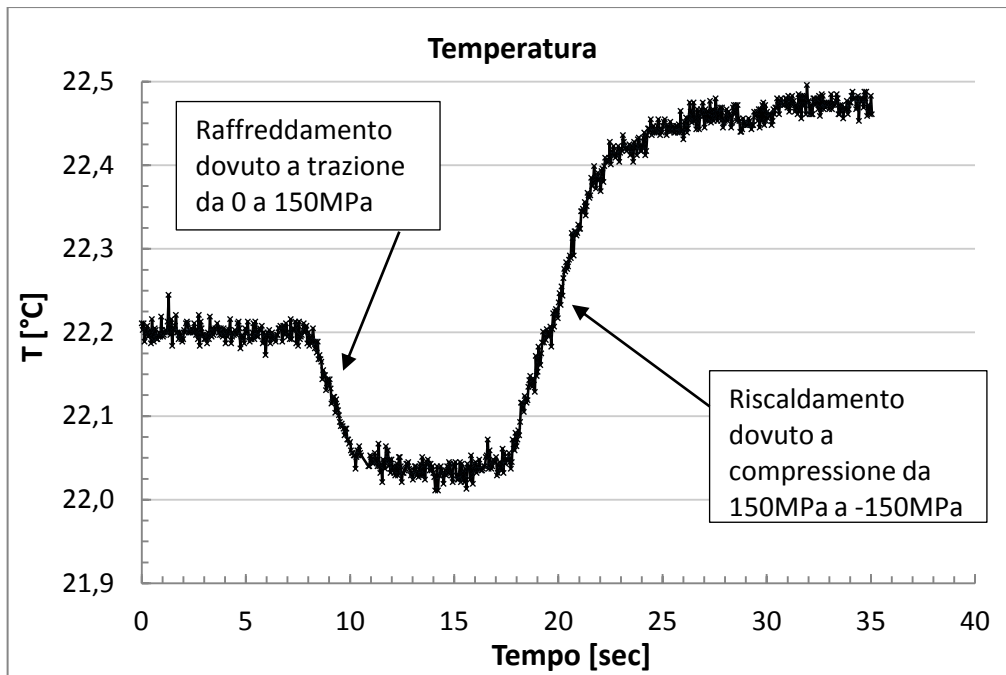


Figura 4.4.2a Andamento della temperatura durante la prova a rampa

nel file.dat relativo alla macchina di prova saranno presenti la colonna relativa al tempo ed una relativa al carico applicato espresso in kN. In questo caso si costruisce di fianco una colonna che, partendo dal carico, esprime la tensione applicata in MPa ( $\frac{FORZA [N]}{AREA [mm^2]}$ ) e si costruisce il grafico tensione applicata-tempo che sarà simile al grafico di figura 4.4.2b.

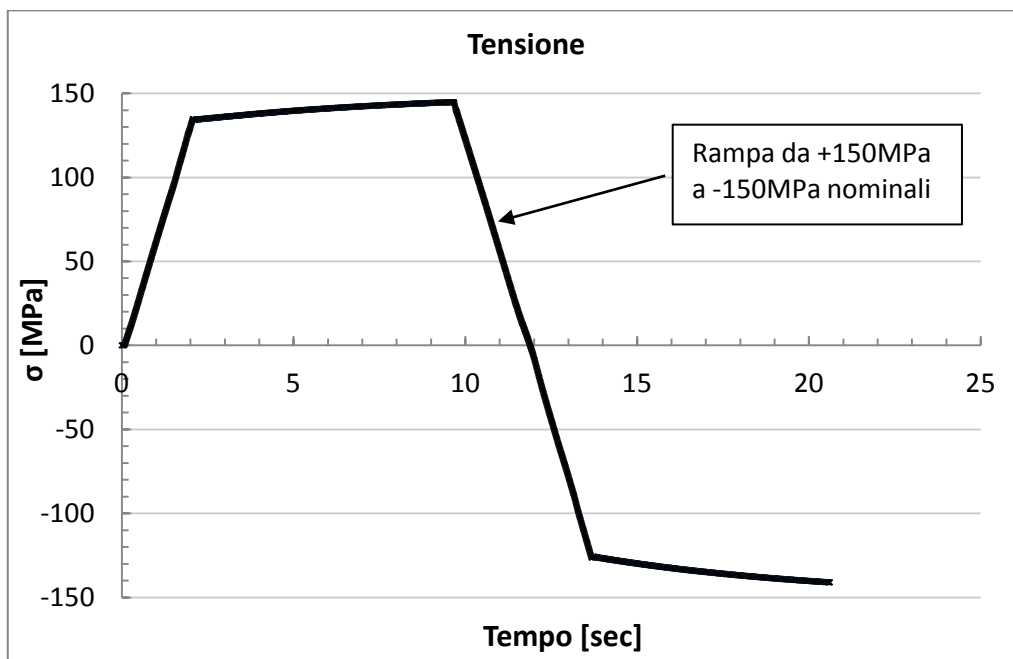


Figura 4.4.2b Andamento della tensione applicata durante la prova a rampa

- a questo punto si devono sincronizzare i due grafici in modo da ottenere in modo corretto la relazione tra variazione della tensione e quella di temperatura. Partendo dal grafico temperatura-tempo si prende come zero tempo l'istante in cui si nota il cambio di pendenza della curva e si traccia l'andamento della temperatura durante il tempo solo per il tratto inclinato ottenendo un nuovo grafico temperatura-tempo come quello riportato in figura 4.4.2c che rappresenta la variazione totale di temperatura nell'intervallo di tempo  $\Delta t$

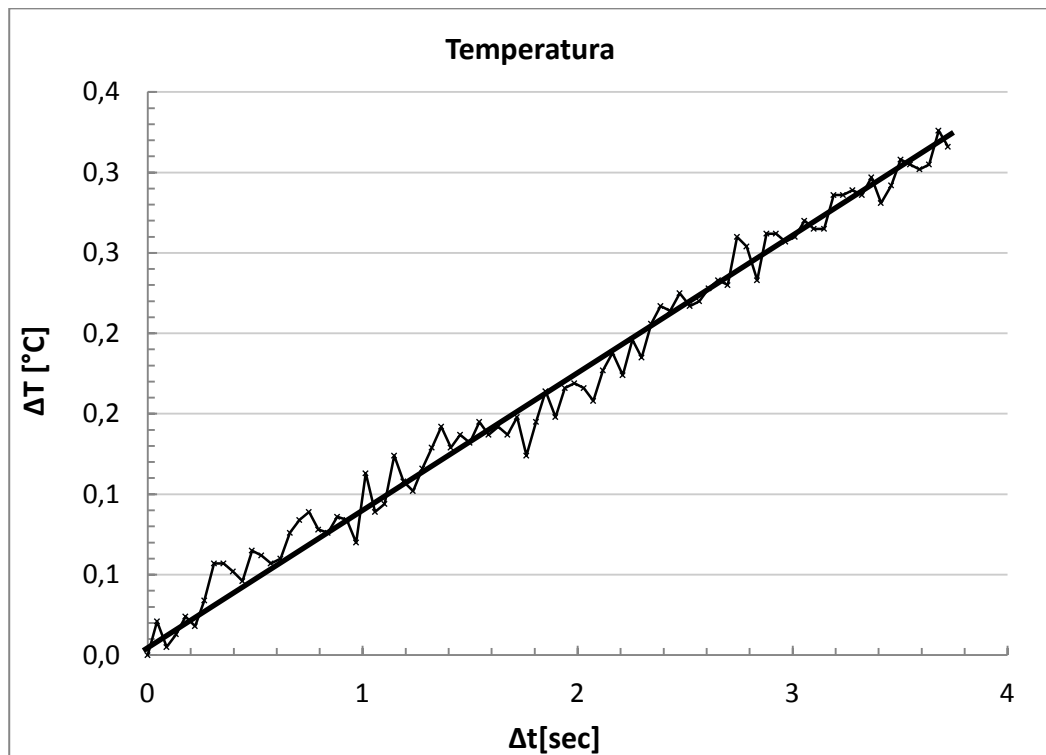


Figura 4.4.2c Variazione di temperatura rispetto all'istante in cui inizia la compressione

- si prende ora in considerazione il grafico tensione-tempo e, in modo analogo al precedente, si prende come zero tempo l'istante in cui si nota il cambio di pendenza della curva costruendo un nuovo grafico tensione-tempo. L'intervallo di tempo da prendere in considerazione sarà lo stesso intervallo  $\Delta t$  in cui si ha la variazione di temperatura. Il grafico che si ottiene è simile a quello riportato in figura 4.4.2d

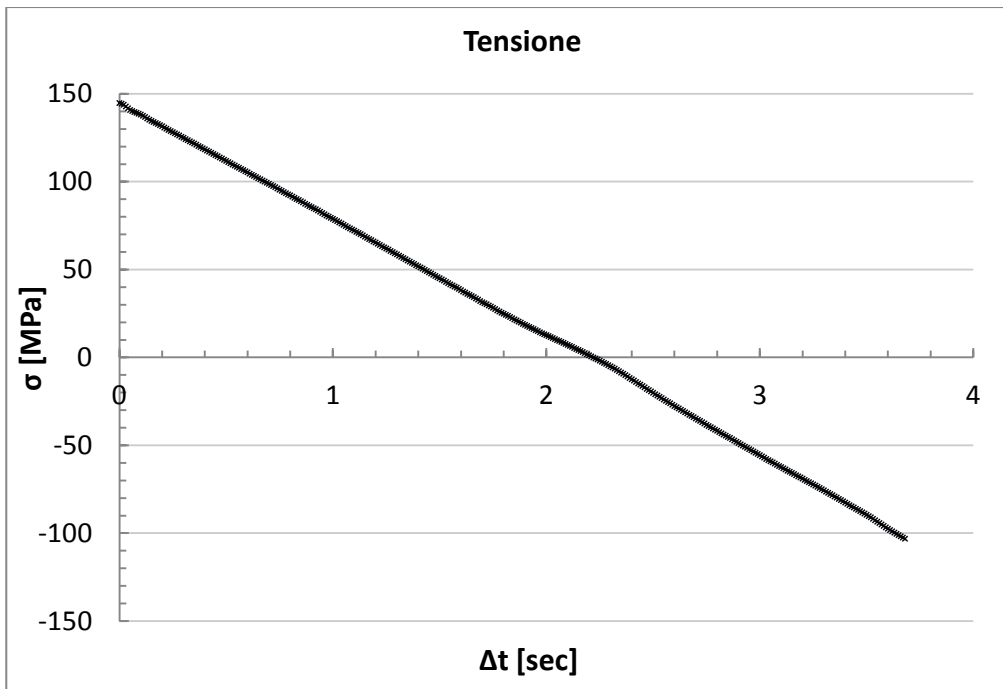


Figura 4.4.2d Variazione di tensione rispetto all'istante in cui inizia la compressione

- in questo modo si sono sincronizzati i due grafici ed è ora possibile valutare nello stesso intervallo di tempo  $\Delta t$  sia la variazione di temperatura  $\Delta T$  che la variazione di tensione  $\Delta \sigma$ . Si riporta in figura 4.4.2e per completezza tensione e variazione di temperatura in funzione del tempo dopo l'istante in cui inizia l'aumento di temperatura.

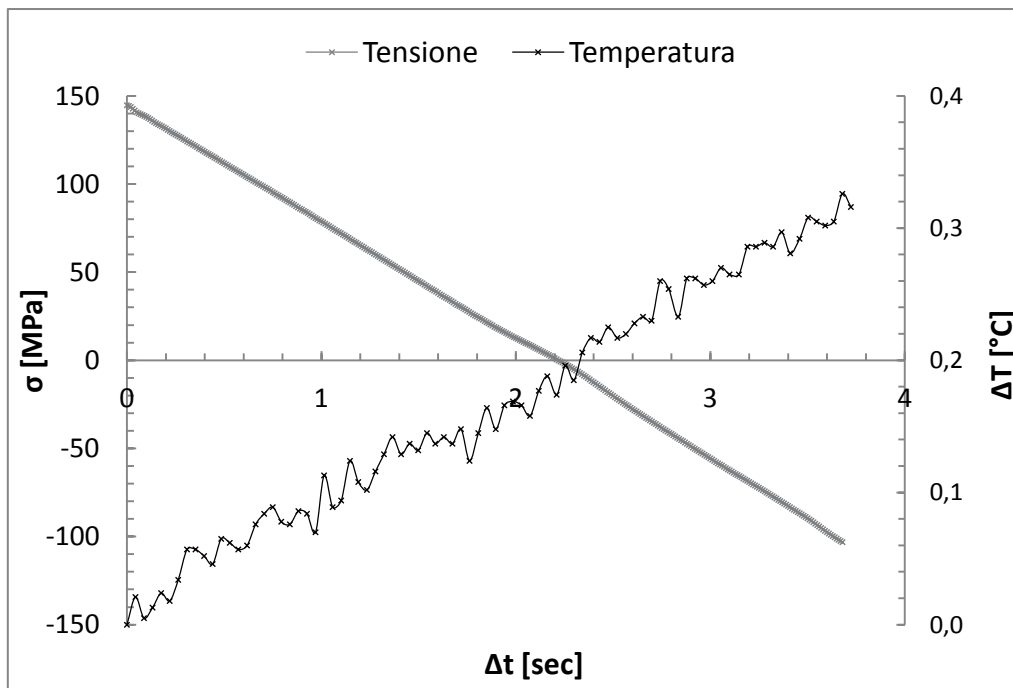


Figura 4.4.2e Variazione di tensione e temperatura sincronizzate nel tempo

- si riporta su un grafico che ha in ascissa la variazione di tensione  $\Delta\sigma$  e in ordinata la variazione di temperatura  $\Delta T$  il punto corrispondente e si calcola la costante come  $C = \frac{\Delta T}{\Delta\sigma}$ . Dopo aver eseguito almeno tre misure a livelli di tensione diversi si approssimano i punti ottenuti con una retta che avrà una pendenza pari al valore della costante da determinare ottenendo un grafico come quello riportato in figura 4.4.2f

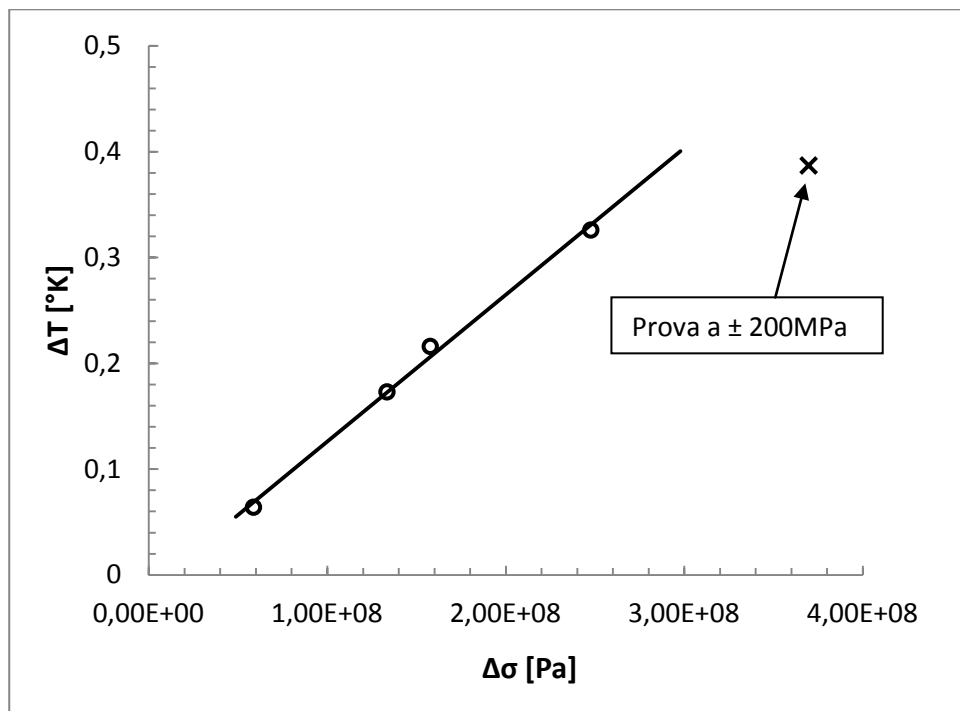


Figura 4.4.2f Determinazione della costante  $\Delta T/\Delta\sigma$  attraverso il coefficiente angolare della retta

I punti utilizzati per la determinazione della retta sono quelli relativi alle prove RAMPA1, RAMPA4, RAMPA6, RAMPA7 visibili nella precedente tabella 4.4.2a e relativi alle prove che si concludevano nell'intervallo di tempo di due secondi. Si è infine provata a fare una prova a  $\pm 200$ MPa indicata nel grafico, dove si vede come ci si discosta dalla linearità. È dunque valida l'ipotesi di restare al di sotto del valore  $\sigma_{p0,2}/3$  per restare nel campo lineare elastico del materiale.

In definitiva la retta fornisce un coefficiente angolare che sarà pari al valore della costante che cercavamo. Nel nostro caso risulta:

$$\frac{\Delta T}{\Delta\sigma} = 1,388 \times 10^{-9} \quad (4.4.3)$$

#### 4.4.3 Risultati del metodo basato sulla determinazione del raffreddamento adiabatico

Il metodo descritto nei due paragrafi precedenti è stato applicato ai risultati delle prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R-1 e R0,1 eseguiti in questo lavoro. La relazione 4.4.3 permette dunque una sostituzione del parametro  $\sigma_{MAX}$  nella costante 4.4.1 con un parametro legato alla variazione di temperatura del materiale. In particolare si vuole effettuare la seguente trasformazione:

$$C = Q\sigma_{MAX}^k \longrightarrow C = Q \left( \frac{\Delta T}{T} \right)_{ad}^k \quad (4.4.4)$$

Dove il termine entro parentesi rappresenta la variazione di temperatura adiabatica normalizzata rispetto al valore iniziale di temperatura del pezzo, che, come visto è assunta pari a 293,15°K. Per ciascun provino è stata dunque effettuata la trasformazione 4.4.4 ricavando il valore della nuova costante a partire dalla tensione massima applicata in ciascuna prova applicando la 4.4.5 seguente:

$$\left( \frac{\Delta T}{T} \right)_{ad} = \frac{1,388 \times 10^{-9}}{293,15} \cdot \sigma_{MAX} \quad (4.4.5)$$

Si può a questo punto diagrammare la nuova costante C della 4.4.4 in funzione del numero di cicli a rottura ottenendo il grafico di figura 4.4.3a.

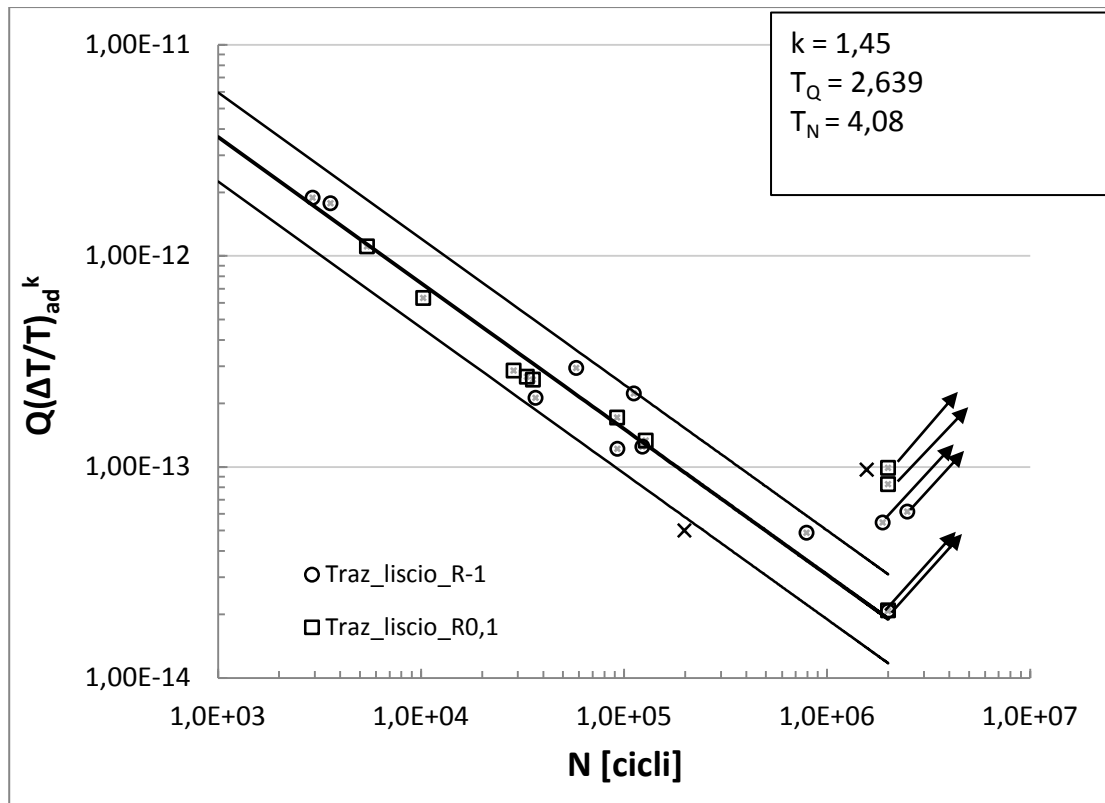


Figura 4.4.3a Valori della nuova costante C in funzione del numero di cicli a rottura

Il grafico di figura 4.4.3a riassume tutti i dati (ad eccezione dei due dati già scartati dalle precedenti analisi ed indicati con una crocetta) in un'unica banda di dispersione di pendenza  $k=1,45$  e con coefficienti di dispersione in energia e in vita rispettivamente pari a  $T_Q=2,639$  e  $T_N=4,08$  in modo indipendente dal rapporto di ciclo a cui è stata eseguita la prova. Questo risultato è ancora più rilevante se si confrontano proprio i valori dei coefficienti di dispersione della nuova serie, che comprende tutte le prove a R-1 e R0,1, con quelli che si erano ottenuti sempre con l'approccio energetico valutando le due serie separate. Con riferimento al coefficiente in vita le prove ad R-1 presentavano un  $T_N=8,75$ , quelle ad R0,1 un  $T_N=5,85$  mentre la serie che raggruppa le due precedenti attraverso il nuovo parametro (4.4.4) presenta un  $T_N= 4,08$  inferiore ad entrambe.

## 4.5 CONCLUSIONI

In questo capitolo si sono analizzati le sintesi sperimentali di diverse campagne di prove a fatica assiale [3] , [6] eseguite su un acciaio inossidabile AISI304L confrontando i risultati ottenuti sia in termini di tensione netta sia utilizzando l'approccio basato sulla densità di energia dissipata.

Un primo risultato ottenuto è che i dati relativi a [6] non sono compatibili con quelli pubblicati da AIAS [3] e quindi nemmeno con quelli relativi a questa campagna di prove (che rientrano nella banda in energia di [3] vedi par. 3.4). La ragione è da ricercarsi nel tipo di materiale utilizzato che, pur essendo nominalmente lo stesso, presenta diverse caratteristiche sia a livello di composizione chimica che come caratteristiche meccaniche (vedi tabella 4.1).

Per le successive analisi riguardo all'influenza del rapporto di ciclo nello studio del fenomeno della fatica assiale si sono quindi eseguite le analisi separando le serie relative ai dati ricavati da [6] con quelle relative a questa campagna di prove. Il riassunto delle diverse prove come un'unica grande popolazione di dati non ha infatti portato a risultati degni di nota (vedi fig.4.4.3b) , generando grafici con dispersioni troppo elevate.

Analizzando invece i dati di [6] e i dati di questo lavoro in modo indipendente si è ottenuto pressoché lo stesso risultato. Raggruppando le prove in base al numero di cicli a rottura è stato infatti possibile individuare una serie di curve, chiamate curve isodurata appunto, in un grafico  $Q-\sigma_{MAX}$  (Fig. 4.3.1d) in cui non si tiene conto del rapporto di ciclo di ciascuna prova ma soltanto del numero di cicli a rottura. Si è visto che queste curve, in un grafico doppio logaritmico, tendono ad avere una pendenza costante (Fig. 4.3.1e) e si è dunque valutata la possibilità di utilizzare un valore medio tra le pendenze calcolate che possa essere utilizzato come una caratteristica del materiale.

Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti (entro un certo intervallo) allo stesso numero di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione R applicato durante la prova, si ricava per ciascun punto il valore della costante definita nel seguente modo:

$$C = Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}} \quad (4.4.1)$$

dove  $k_{MEDIA}$  indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata su un grafico doppio logaritmico (fig.4.3.2c). Si diagramma poi il valore della costante così determinata in funzione del numero di cicli a rottura di ciascun provino ottenendo una serie di punti che vengono ben approssimati da una curva di equazione del tipo 4.4.2:



$$Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}} \cdot N_f^h = COST. \quad (4.4.2)$$

che rappresenta ancora una retta in un grafico doppio logaritmico (fig. 4.3.2d). L'equazione 4.4.2 rappresenta il legame che cercavamo tra densità di energia dissipata, tensione applicata e numero di cicli a rottura e sembra essere, a meno della dispersione dei dati indipendente dal rapporto di ciclo R.

I grafici ottenuti sono riportati per completezza qui di seguito.

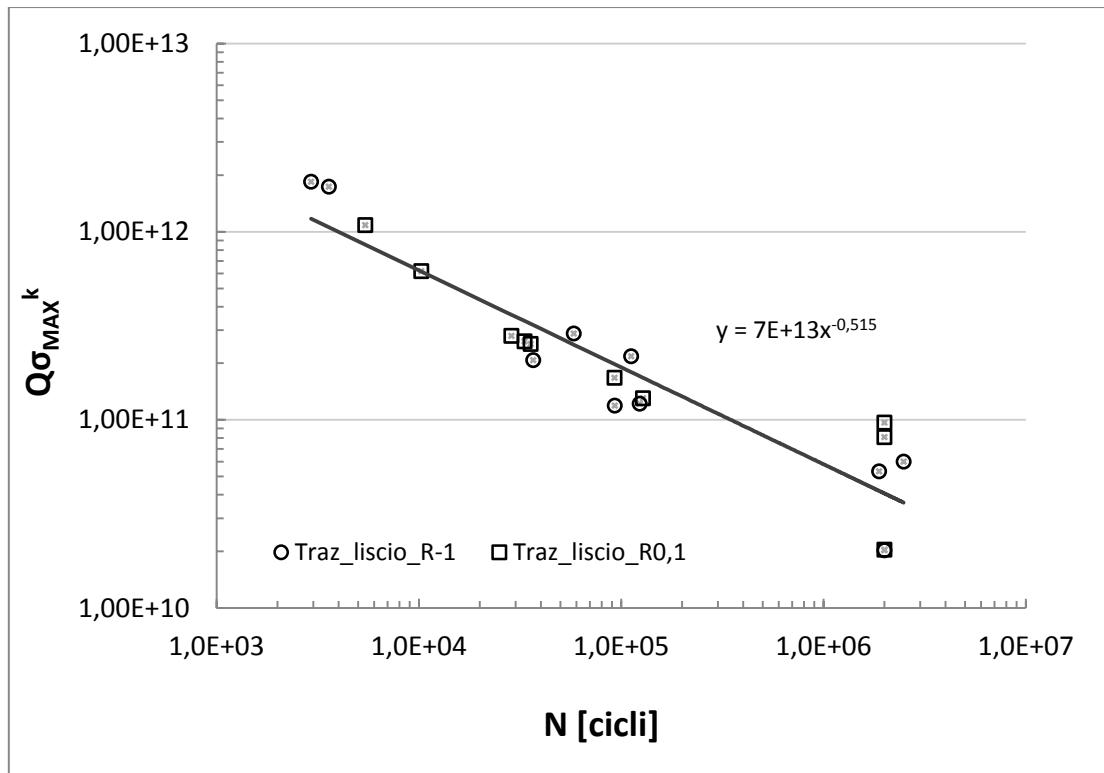


Figura 4.3.2e Costante C calcolata con  $k=k_{MEDIO}$  in funzione del numero di cicli per la serie di provini analizzati in questa campagna di prove distinti per diverso rapporto di ciclo

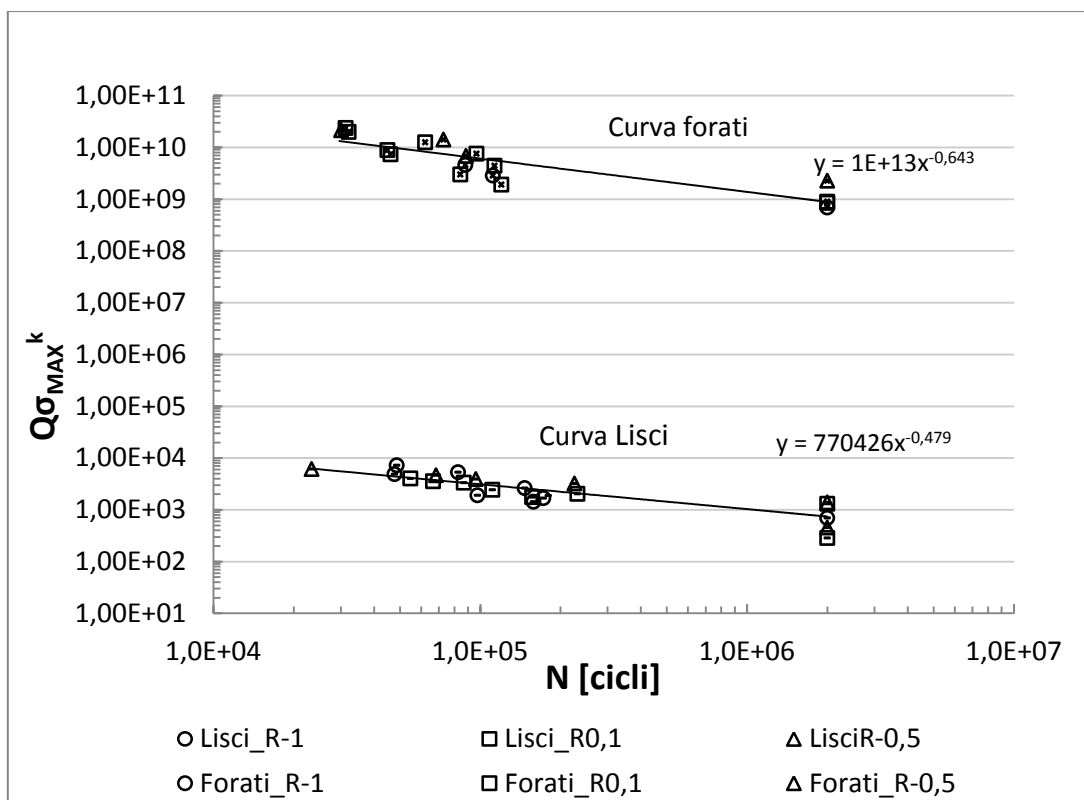


Figura 4.3.1n' Costante C in funzione del numero di cicli calcolata per  $k = k_{medio}$  in provini lisci e forati distinti per rapporto di ciclo

Dall'analisi dei grafici 4.3.2e e 4.3.1n' si può vedere come il comportamento delle diverse serie sia molto simile tra loro. Inoltre il livello di dispersione dei dati attorno alla curva del 50% sembra essere buono. Lo svantaggio principale che sembra emergere dall'analisi dei dati in [6] è che i provini lisci e quelli forati non possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione ma vanno considerati come serie separate, andando a compromettere quello che il metodo in Q garantisce, ovvero di riassumere il comportamento del materiale in modo indipendente dalla geometria. Tuttavia la non compatibilità dei dati presentati in [6] con quelli presentati in [3] lascia l'argomento in sospeso, non potendo trarre delle conclusioni.

Si è dunque proceduto con l'analisi utilizzando solo i dati di questo lavoro cercando di ottimizzare la curva di figura 4.3.2e dal punto di vista pratico. Infatti la presenza nell'equazione 4.4.2 del parametro  $\sigma_{MAX}$  non consente di applicare tale metodo con semplicità, in quanto la determinazione della tensione massima presente nel punto critico di un componente in esercizio può essere effettuata solo attraverso l'incollaggio di estensimetri oppure con una simulazione agli elementi finiti. L'idea è stata quindi quella di sostituire il parametro  $\sigma_{MAX}$  con un altro parametro legato sempre ad una variazione di temperatura, e quindi ancora rilevabile con l'utilizzo della sola termocoppia.

Grazie agli studi sulla teoria della termo elasticità si è partiti dall'equazione 4.4.3 per la determinazione di un nuovo parametro in sostituzione della tensione massima. Dopo alcune prove si è arrivati infine alla determinazione del parametro  $(\Delta T/T)_{ad}$  che sostituito nella 4.4.2 alla  $\sigma_{MAX}$  permette di ottenere una nuova costante energetica per la sintesi dei dati in funzione del numero di cicli a rottura. Il risultato è riportato per completezza nella figura seguente.

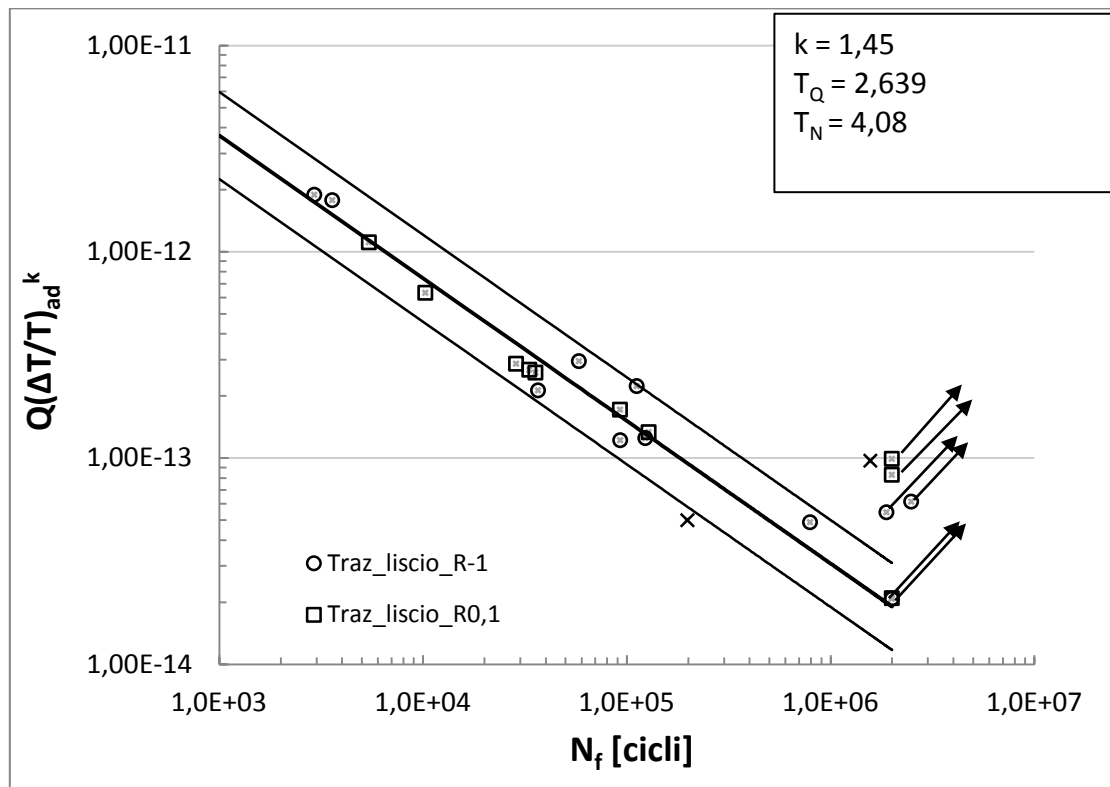


Figura 4.4.3a Valori della nuova costante C in funzione del numero di cicli a rottura

La banda di dispersione di figura 4.4.3 riassume i dati delle prove di fatica assiali in modo indipendente dal rapporto di ciclo attraverso l'equazione 4.4.6

$$Q \cdot \left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{ad}^k \cdot N_f^h = COST \quad (4.4.6)$$

dove h è la pendenza della curva (=1,45 per queste prove) mentre k è la pendenza media calcolata delle curve isodurata.

Il vantaggio principale di questo metodo sta nel fatto che la verifica a fatica di un componente in esercizio può essere fatta attraverso l'utilizzo di una sola termocoppia e di un sistema di acquisizione della temperatura, attraverso la misurazione di Q che può avvenire arrestando istantaneamente la sollecitazione a cui è sottoposto il componente da verificare e misurando il raffreddamento, e attraverso la misurazione del

raffreddamento subito dal componente in corrispondenza all'applicazione di un carico statico che non superi il limite di  $\sigma_{p0,2/3}$  precedentemente definito.

La validità del metodo deve essere confermata dall'esecuzione di altre prove, anche a rapporti di ciclo differenti da quelli utilizzati in questa campagna di prove. Inoltre dev'essere valutata la possibilità di estendere il metodo anche a diverse geometrie, cosa che non avveniva il [6]. Importante sarà il fatto di utilizzare per le prove sempre lo stesso materiale utilizzato in questo lavoro.

## **CAPITOLO 5**

### **ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA SU MACCHINA MFL TORSIONALE**

#### **5.1 DESCRIZIONE DELLA PROVA**

Le prove da eseguire consistono nel sottoporre diversi provini dello stesso materiale e con la stessa geometria ad una sollecitazione di fatica torsionale a diversi livelli di tensione monitorando l'andamento della temperatura nella sezione minima del provino, ovvero dove la tensione è massima e pari a quella nominale, durante tutta la prova.

Una volta raggiunta la stabilizzazione della temperatura si arresta la prova istantaneamente e si scansiona, al massimo della frequenza di acquisizione (22Hz), la diminuzione di temperatura nel tempo andando dunque a ricavare il gradiente di raffreddamento, indispensabile per il calcolo dell'energia dissipata dal materiale che è poi l'obiettivo principale delle prove. I raffreddamenti vengono eseguiti durante diverse fasi della vita del provino in modo da poter valutare l'andamento dell'energia dissipata durante tutta la prova.

È stato inoltre utilizzato un ventilatore per poter aumentare la frequenza di prova tra un raffreddamento e l'altro senza che la temperatura del provino superasse i 65°C in modo da non compromettere le proprietà fisiche del materiale.

Sono state eseguite 8 prove torsionali a rapporto di ciclo  $R=-1$  con ampiezze di tensione variabili tra i 250MPa e i 350MPa e 8 prove ad  $R=0,1$  con ampiezze di tensione comprese tra i 200MPa e i 320MPa.

Il materiale e i provini sono gli stessi utilizzati nelle prove di fatica assiale (vedi par. 2.2 ; 2.3 ; 2.4)

#### **5.2 DISPOSIZIONE DEL CENTRO DI LAVORO E DESCRIZIONE DELLA MACCHINA DI PROVA MFL TORSIONALE**

##### *5.2.1 Disposizione del centro di lavoro*

Le prove a fatica vengono condotte su macchina MFL torsionale servo idraulica in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova, che ha una portata massima di 1000Nm. Per il lavoro è necessario portare in prossimità della

macchina tutte le attrezzature indispensabili per l'esecuzione delle prove e che sono indicate in figura 5.2.1a. Il PC Master che gestisce il software di controllo della macchina è lo stesso utilizzato nelle prove di fatica assiali e non può essere spostato e, anche se non rientra nell'immagine si trova comunque di fronte alla macchina (vedi fig. 2.2)



Figura 5.2.1a Attrezzature necessarie per l'esecuzione delle prove

### 5.2.2 Descrizione della macchina

La macchina di prova MFL torsionale serve per l'esecuzione di prove di torsione statica e dinamica, e può essere controllata sia in forza (momento torcente) che in angolo. È composta principalmente da due aggregati separati, visibili in figura 5.2b, la cassa di comando e la cassa di misura.

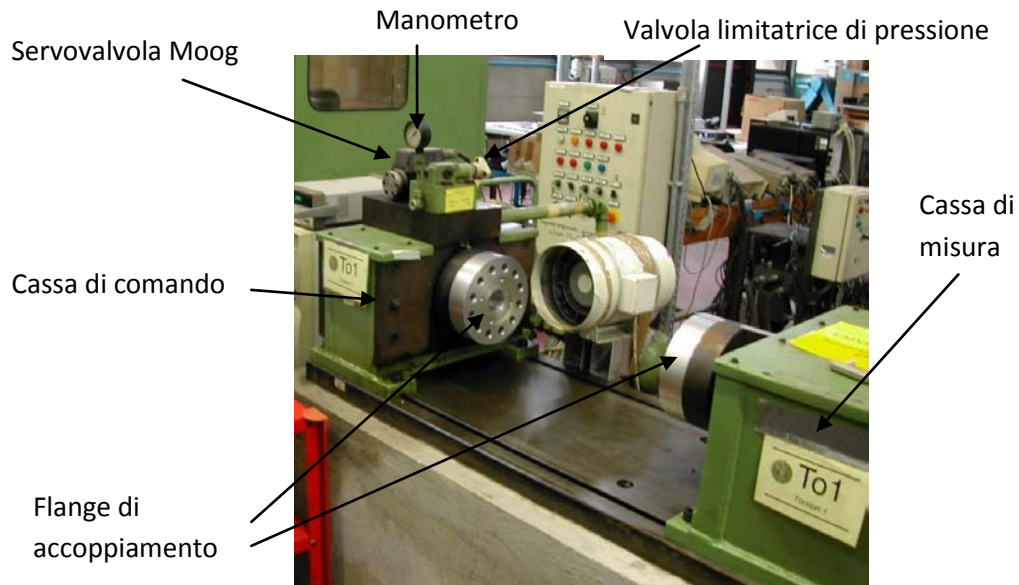


Figura 5.2.2a Componenti della macchina MFL torsionale

La cassa di comando è quella che applica effettivamente il carico di torsione al provino. Il suo movimento è comandato da una servovalvola Moog posta sopra di essa mentre il manometro indica la presenza o meno di pressione all'interno della cassa di comando. La cassa di misura invece contiene la cella di carico che misura il momento torcente applicato dalla cassa di comando. Per l'afferraggio dei provini cilindrici è necessario l'utilizzo delle flange di accoppiamento in alluminio visibili in figura 5.2.2a e di due calettatori (figura 5.2.2b) ad attrito che accoppiano le flange agli afferraggi del provino consentendo la trasmissione del momento torcente per attrito.

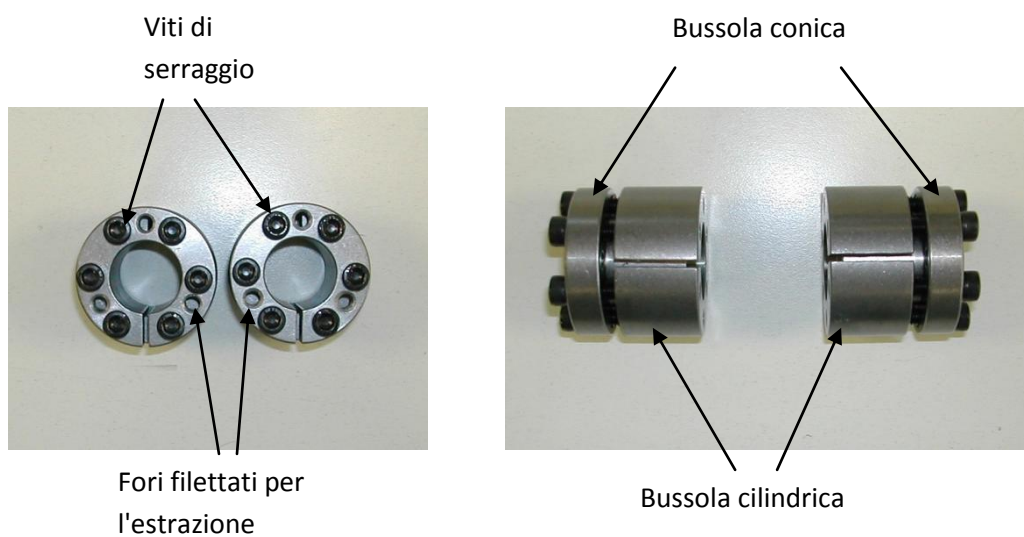


Figura 5.2.2b Calettatori ad attrito Tollok TLK 130 25x50

Per le nostre prove si sono scelti da catalogo i calettatori Tollok TLK 130 25x50 che possono trasmettere un momento torcente massimo pari a 680Nm. La denominazione 25x50 indica il diametro rispettivamente interno ed esterno del calettore, scelto appunto per la compatibilità con le misure dei provini da testare e le flange di accoppiamento utilizzate. Inoltre per le prove di fatica è bene non fare riferimento al valore del momento torcente massimo trasmissibile riportato dal catalogo ma è bene adottare un certo coefficiente di sicurezza che qui si è preso pari a 0,7. Infatti, partendo dal diametro minimo dei provini (15mm) e conoscendo le caratteristiche del materiale si è stimato che il momento torcente massimo che si applicherà nelle prove non supera i 480Nm che è inferiore al valore limite calcolato come  $680 \times 0,75 = 476\text{Nm}$ .

Il pannello di controllo, le pompe e il software che controllano la macchina sono gli stessi che comandano MFL assiale e che sono già stati presentati e descritti nel paragrafo 2.5. L'unica operazione fondamentale da eseguire è premere il tasto di commutazione TO1 sul pannello di controllo principale per inviare l'olio dalle pompe al circuito che alimenta il torsatore.

### **5.3 PROTOCOLLO DI PROVA SU MACCHINA MFL TORSIONALE**

#### *5.3.1 Accensione e preparazione della macchina*

1. Attraverso il computer *Master* posto di fronte alla macchina aprire il software *Station Manager* con un doppio clic sull'icona *MTS\_TestStar* dal desktop, scegliendo la configurazione di parametri adatta alle modalità della prova che si deve eseguire. Per le prove di fatica a torsione si è seguito il seguente percorso:

*MTS TestStar > Station Manager > MFL Torsion > MFLtorsionGianMarcoTamponi.cfg*

con la configurazione di parametri:

*> FSAE-semiassi*

disponibile nel menù a tendina denominato *Parameter Sets* e visibile in figura 5.3.



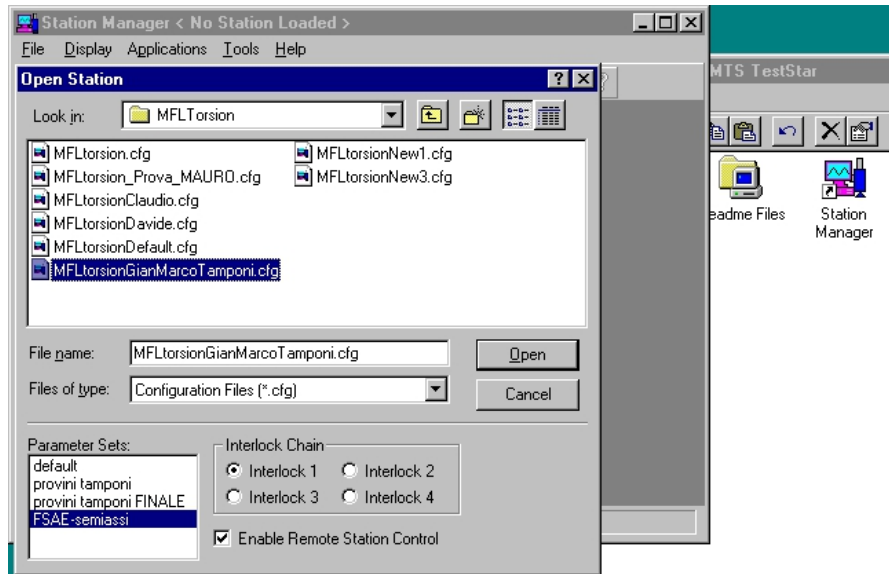


Figura 5.3.1a percorso di apertura del software Station Manager

Nella schermata principale dovranno essere aperte la finestra principale dello *Station Manager* e quella dell' *MPT Procedure Editor*. Dalla finestra *MPT Procedure Editor* si deve scegliere la procedura che si vuole utilizzare. Il percorso da seguire per aprire la procedura voluta è il seguente:

*Open Procedure > C: > tsiim > mpt > Procs > Negrisololo > Torsione\_Coppia.000*

Si consiglia inoltre di aprire le finestre di *Scope* e *Meters* per avere un controllo visivo di cosa fa la macchina durante la prova. La schermata completa così ottenuta viene riportata in figura 5.3.1b.

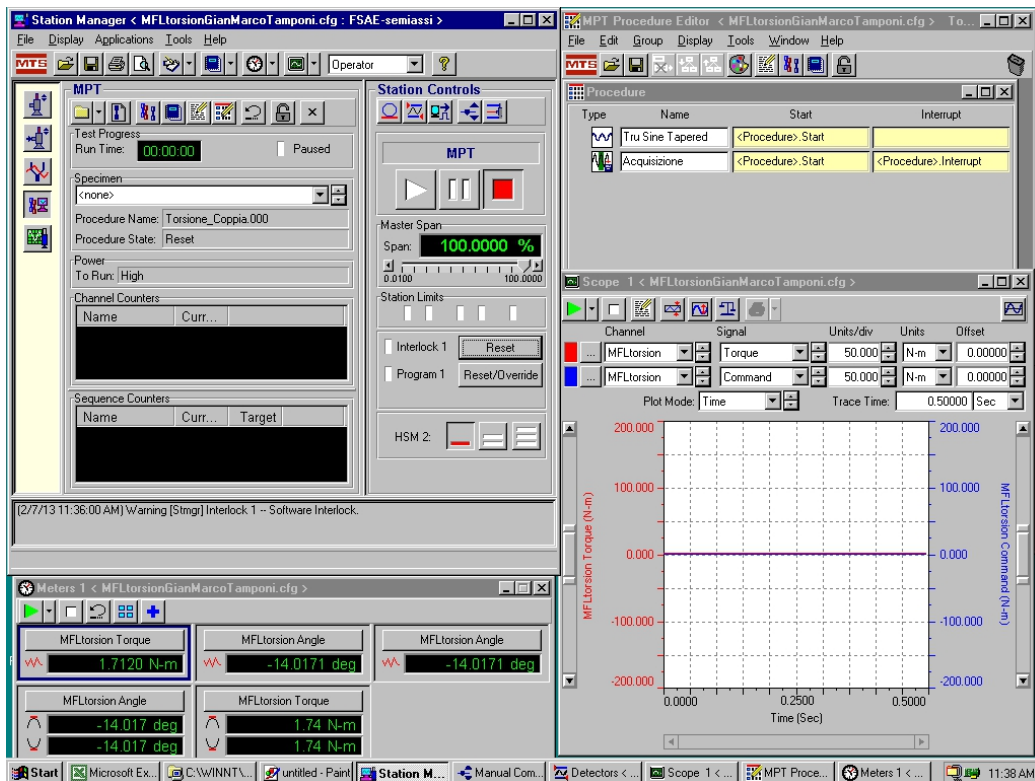


figura 5.3.1b Interfaccia utente prima dell'avvio di una prova

2. assicurarsi che il banco di prova sia libero da attrezzature
3. il pannello di controllo principale si presenterà come in figura 5.3.1c con la spia della temperatura dell'olio accesa. Posizionare la leva locale-remoto su locale (figura 5.3.1d) e accendere in sequenza la pompa degli ausiliari e le pompe del circuito principale come evidenziato nelle figure 5.3.1e,f. Accendere anche il ventilatore del locale pompe



figura 5.3.1c Spia temperatura dell'olio



figura 5.3.1d Leva comando locale-remoto



figura 5.3.1e Accensione pompa ausiliari



figura 5.3.1f Accensione pompe principali

4. attendere che l'olio superi i 40 °C. A questo punto la macchina spegne automaticamente le pompe principali mentre resta accesa quella relativa agli ausiliari

- dallo *Station Manager* aprire la cartella *Manual Command* relativa alle modalità di controllo della macchina e dal menù a tendina relativo al *Control Mode* scegliere la voce *Angle* mettendo inoltre lo spunto alla voce *Enable Manual Command* per acquisire il controllo della macchina in angolo (figura 5.3.1g)



figura 5.3.1g Manual Command

Sulla finestra apparirà il valore numerico della posizione, letta dal sensore angolare, a cui si trova la testa rotante rispetto al suo riferimento. Si ricorda che valori positivi indicano spostamenti angolari in senso orario mentre valori negativi in senso antiorario rispetto al riferimento

- dallo *Station Manager* aprire la finestra *Detectors* relativa ai limiti di macchina (figura 5.3.1h). All'accensione si consiglia di impostare limiti di coppia piccoli, ad esempio  $\pm 200\text{Nm}$  e limiti angolari pari a  $\pm 20^\circ$ .

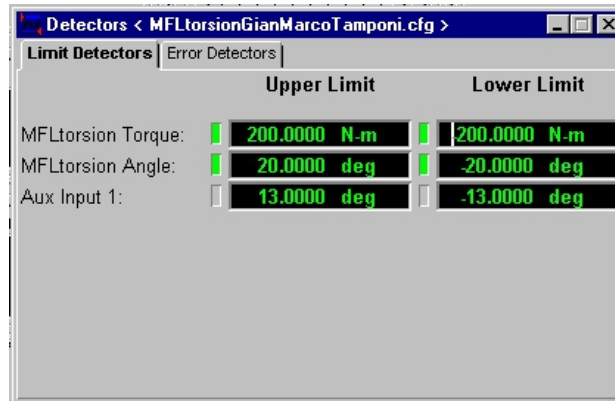


figura 5.3.1h Detectors

7. dal pannello di controllo riaccendere le pompe del circuito principale e nella finestra *Manual Command* inserire il valore 0.0° in modo da portare la testa di comando allo zero macchina proprio della configurazione di parametri scelta. Una volta inserito il valore 0.0° e premuto il tasto invio si vede la cassa di comando e la relativa flangia ruotare fino allo zero macchina.
8. a questo punto dobbiamo far prendere al software il totale controllo della macchina. Per far ciò dallo *Station Manager* cliccare in sequenza da sinistra a destra i tasti di potenza HSM 2 come mostrato in figura 5.3.1i.



figura 5.3.1i Tasti di accensione virtuale delle pompe

Posizionare la leva locale-remoto di fronte al pannello di controllo in posizione remoto. La macchina è adesso interamente controllata dal software. A questo punto bisogna assicurarsi che la cella di carico non legga alcuna coppia applicata. Aprire il menu *Auto Offset* attraverso la relativa icona ed azzerare il valore della coppia letta dalla cella di carico nel caso in cui questo sia diverso da zero.

9. spegnere virtualmente le pompe dallo *Station Manager*, eseguendo la sequenza di figura 5.3.1i al contrario, per poter procedere con il montaggio del provino.
10. inserire all'interno della flangia solidale alla cassa di comando un calettatore ed il provino munito di termocoppia e fascetta ancora allentati.

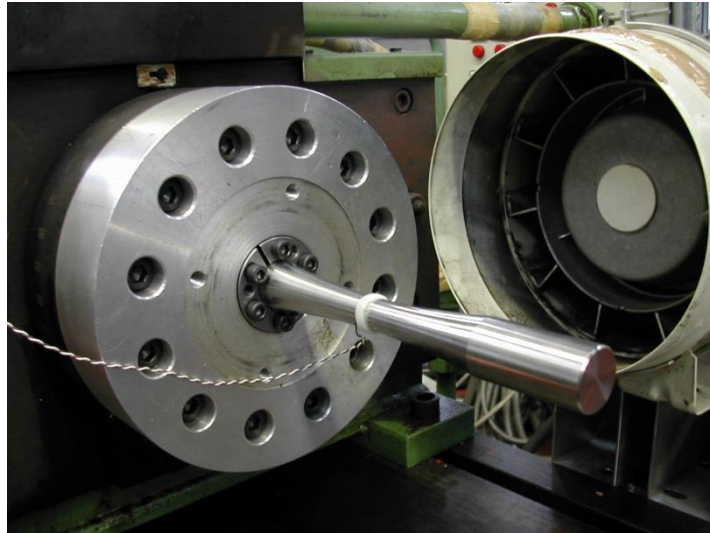


Figura 5.3.1l fissaggio flangia-calettatore-provino alla cassa di comando

Serrare le viti del calettatore con una chiave dinamometrica fino alla coppia di serraggio indicata a catalogo e pari in questo caso a 17Nm. È importante serrare le viti in maniera alternata e progressiva in modo da permettere un corretto accoppiamento tra bussola conica e cilindrica.

11. inserire il secondo calettatore nella flangia solidale alla cassa di misura e avvicinare la stessa alla cassa di comando finché l'afferraggio del provino è completamente inserito nel calettatore (fig. 5.3.1m).

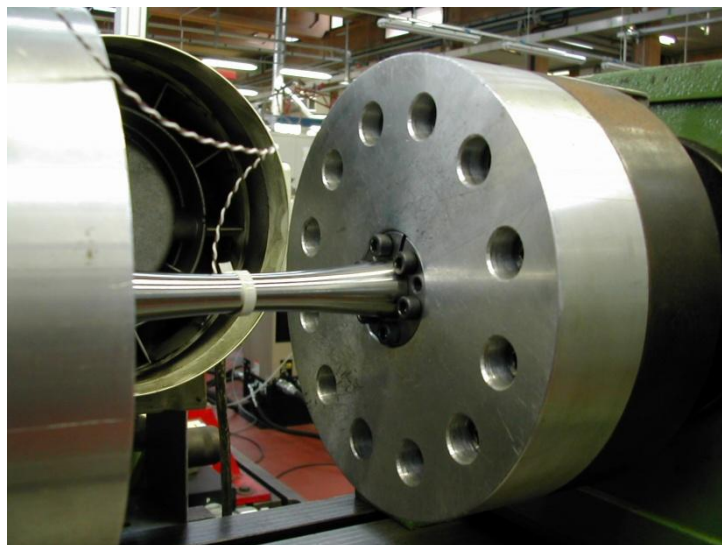


Figura 5.3.1m fissaggio flangia-calettatore-provino alla cassa di misura

serrare le viti con la chiave dinamometrica alla coppia di serraggio di 17Nm. Il provino è fissato da entrambi i lati ed è pronto per essere sottoposto alla prova.

12. dal *Manual Command* scegliere dall'*Active Mode* l'opzione *Torque* e riaccendere le pompe principali prima attraverso la sequenza di figura 5.3.1i e poi dal pannello di controllo principale (fig. 5.3.1f). Il manometro indicherà la pressione all'interno della cassa di comando (100bar). Inserire nella finestra del *Manual Command* il valore 0.0 Nm per azzerare la coppia applicata al provino (fig. 5.3.1n).

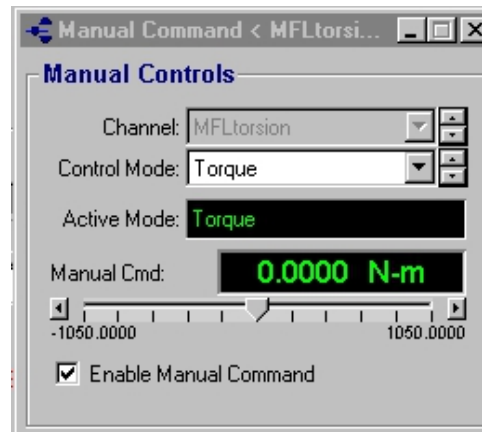


Figura 3.2.1n Manual Command: Azzeramento della coppia applicata

13. Aprire il rubinetto dell'acqua di raffreddamento dell'olio all'interno del locale pompe giocando sull'apertura per mantenere la temperatura dell'olio stesso tra i 40 e i 70°C.

### 5.3.2 Impostazione dei parametri di prova

L'impostazione dei parametri di prova viene fatta attraverso l'*MPT Procedure Editor* attraverso i seguenti passaggi:

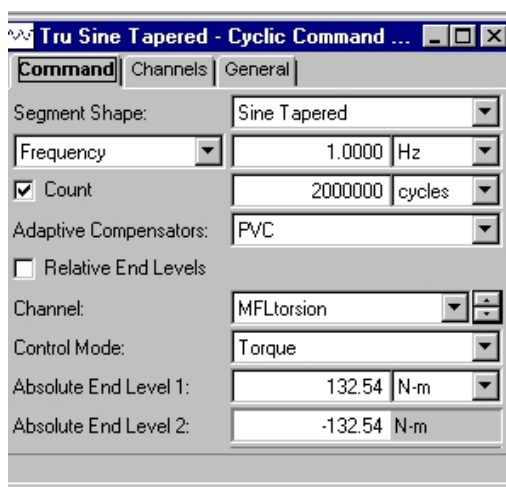


figura5.3.2a

1. Doppio clic sull'icona "ciclo seno": si apre la finestra di figura 5.3.2a nella quale è possibile impostare la frequenza di prova, il numero di cicli al quale la macchina deve terminare la prova, i valori massimo e minimo in forza da applicare, ed una serie di parametri che di norma non vengono variati. Tra questi è importante controllare che sia attivo il controllo PVC (Peak Valley Control). Si consiglia inoltre di partire con frequenze basse (0,5-1Hz) per controllare visivamente l'operato della macchina.

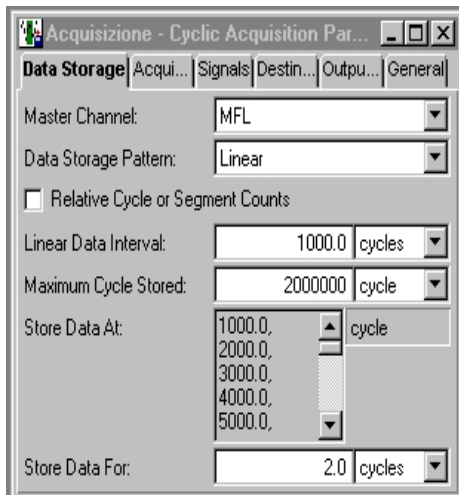


figura 5.3.2b

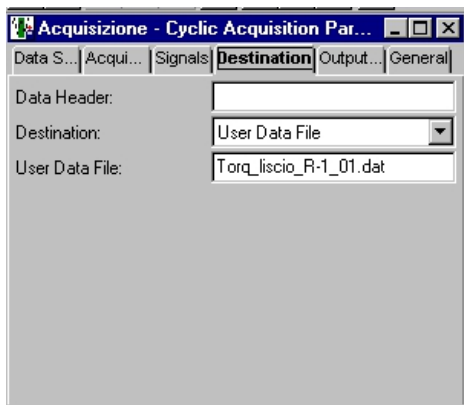


figura 5.3.2c

2. Doppio clic sull'icona " acquisizione": si apre la finestra di figura 5.3.2b dove è possibile impostare i parametri di acquisizione dei dati da parte della macchina. Dal menù *Data Storage* si può scegliere il tipo di acquisizione (si consiglia lineare), l'intervallo di acquisizione (dipende dalla vita prevista per il provino 500-1000cicli) e il numero di cicli da acquisire al termine di ogni intervallo (per il nostro lavoro sempre 2). È infine importante specificare il nome del file nel quale verranno salvati i dati. Dal menù *Destination* (fig. 5.3.2c) si nomina un file.dat. È inoltre indispensabile creare la cartella nella quale salvare il file.dat. Dallo *Station Manager* una volta cliccata l'icona "New Specimen" (fig. 5.3.2d) si consiglia di nominare la cartella con lo stesso nome del file in modo da generare una cartella per ciascuna prova e non creare confusione nella successiva analisi dei dati.

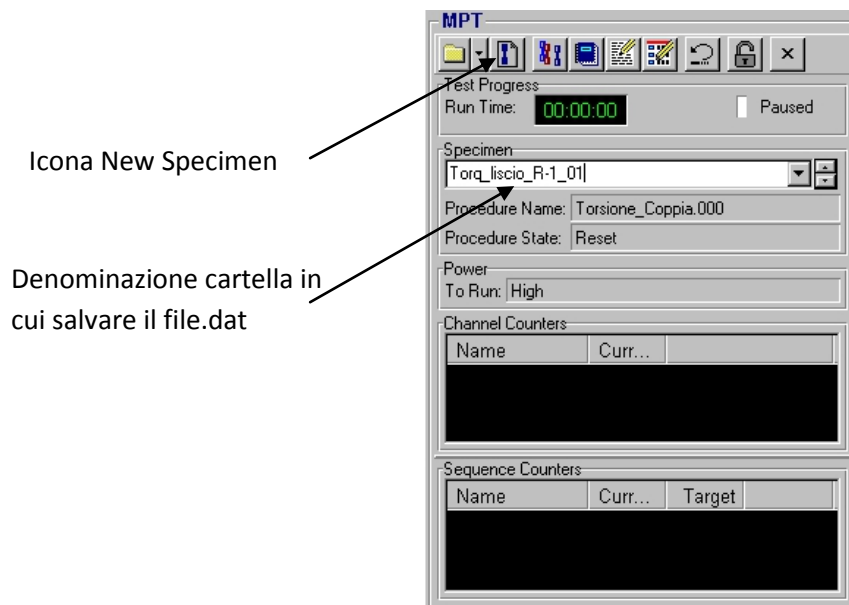


Figura 5.3.2d New Specimen

3. Come detto in precedenza per poter controllare visivamente cosa effettivamente fa la macchina e se rispetta i valori impostati è bene aprire la finestra di "Scope"(fig.5.3.2e) che permette di visualizzare graficamente il valore istantaneo del comando in coppia (ovvero quello che la macchina dovrebbe fare) e il valore effettivo (ovvero quello che la macchina sta facendo). Si possono scegliere di plottare anche altri parametri a seconda di ciò che si vuole controllare. Un altro strumento utile è l'apertura della finestra "Meters"(fig.5.3.2f) che mostra i valori numerici a cui la macchina sta effettivamente lavorando. Nella figura sono indicati i valori picco/valle di coppia (MFLtortion Torque), angolo (MFLtortion Angle) ed i corrispettivi valori istantanei. Si ritiene che questi appena descritti siano i parametri più importanti da tenere sotto controllo.

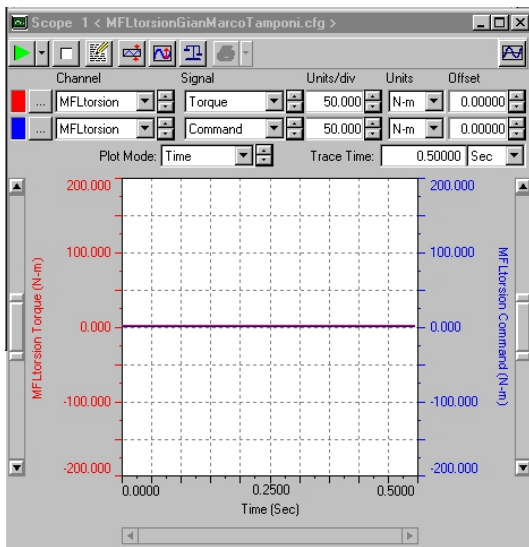


figura 5.3.2e Finestra Scope

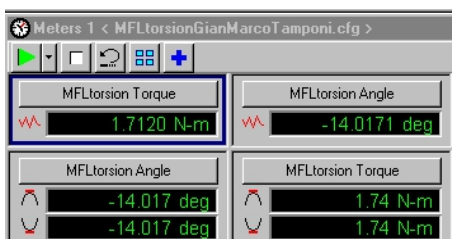


figura 5.3.2f Finestra Meters

### 5.3.3 Configurazione e gestione del sistema di acquisizione di temperatura

Come avvenuto per i test di fatica assiale una parte fondamentale delle prove è il costante monitoraggio della temperatura attraverso l'utilizzo di termocoppie incollate in corrispondenza alla sezione media del provino dalla quale si presume possa avere inizio la cricca. Prima di avviare la prova è dunque necessario accendere il computer posto a sinistra della macchina (fig.5.2.1a) e il sistema di acquisizione *Agilent* al quale è collegata la spina che trasmette il segnale proveniente proprio dalla termocoppia.

Per l'avvio del software *Agilent BenchLink Data Logger* si segue il seguente percorso:

Start > *Agilent BenchLink Data Logger* > Open an existing setup > Negrisolo

che apre le finestre visibili in figura 5.3.3a,b.





figura 5.3.3a Finestra di apertura di un nuovo setup o di un setup già esistente

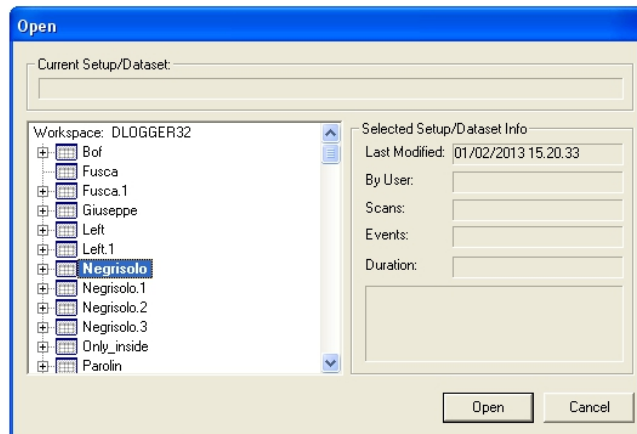


figura 5.3.3b Scelta tra i setup già esistenti

Selezionando il setup Negrisolo e cliccando sul tasto Open si apre l'interfaccia principale del Software Agilent che viene riportata in figura 5.3.3c

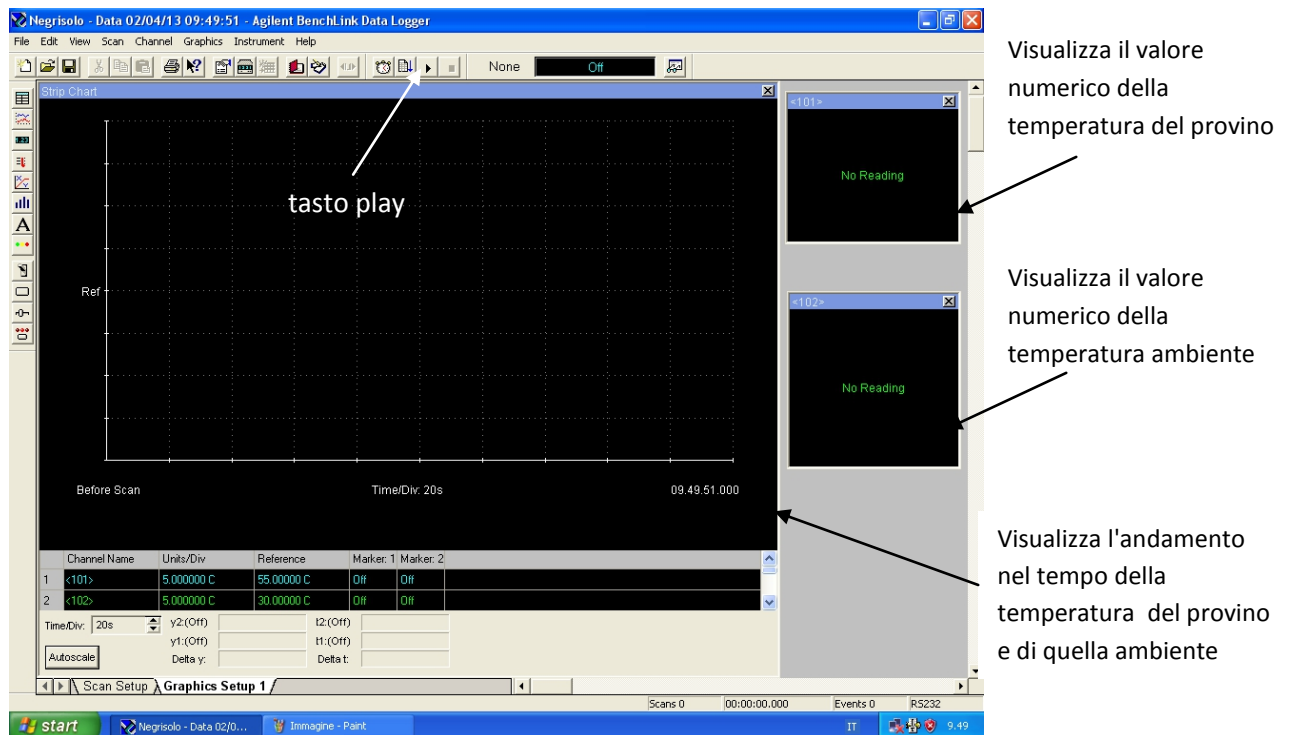


Figura 5.3.3c Interfaccia principale di Agilent BenchLink Data Logger

Ciascun setup differisce per il numero di canali di acquisizione della temperatura e per le modalità di visualizzazione dei dati relativi a ciascun canale. La scelta del setup sopra indicato permette di monitorare sia la temperatura del provino che la temperatura ambiente attraverso l'utilizzo di due canali distinti. I valori registrati sono visualizzati sia graficamente in funzione del tempo sia in valore numerico ad ogni acquisizione come indicato in figura 5.3.3c. La termocoppia relativa alla temperatura ambiente è posta di fianco al PC Agilent.

Per avviare l'acquisizione cliccare il tasto play presente sulla barra dei menù in alto a sinistra (fig. 5.3.3c). Si apre la finestra visibile in figura 5.3.3d dove, alla voce *setting* (fig. 5.3.3e), bisogna indicare l'intervallo di acquisizione di temperatura.

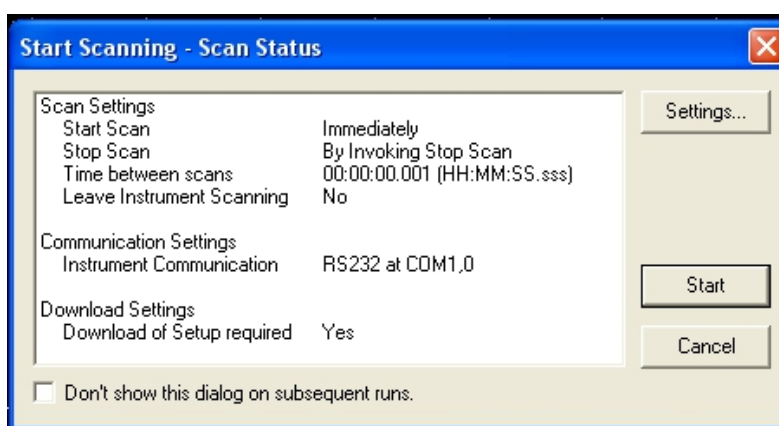
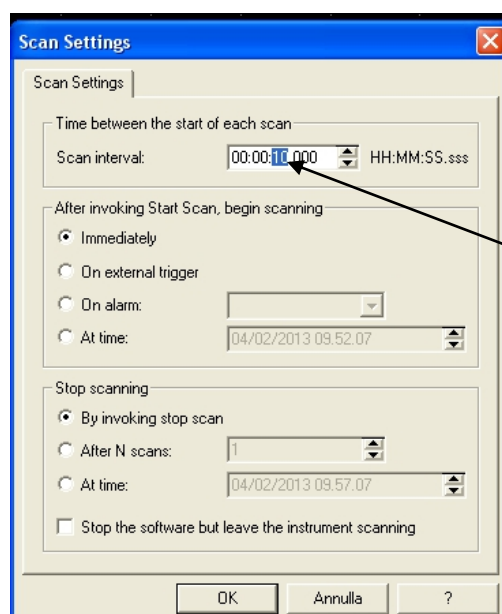


Figura 5.3.3d Finestra per l'inizio della scansione e la modifica dei parametri



Impostazione dell'intervallo tra 2 scansioni successive

Figura 5.3.3e Finestra per impostare l'intervallo di scansione

Si suggerisce un intervallo di 5 secondi quando le prove sono ad alto carico e si prevede una vita breve del provino ( $N_f < 100000$  cicli), di 10 secondi per vite maggiori. Una volta inseriti i parametri voluti e dato l'ok, premere il tasto Start di figura 5.3.3d per dare avvio alla scansione. L'andamento di temperatura viene mostrato sia graficamente che attraverso i valori numerici come indicato in figura 5.3.3c.

#### 5.3.4 Esecuzione della prova

Il sistema è adesso pronto per eseguire la prova e monitorare la temperatura. Prima di far partire la prova bisogna disattivare il *Manual Command* (fig. 3.2.1n) togliendo lo spunto dalla voce *Enable Manual Command*, e chiudere il lucchetto visualizzato in alto della finestra *MPT Procedure Editor* (fig. 5.3.1b).

In queste prove non si sono riscontrati problemi nell'applicazione delle coppie di torsione direttamente al valore nominale. Non è dunque necessario aumentare il carico gradatamente come avveniva per le prove assiali al di sopra di un certo livello di carico. È comunque raccomandabile partire sempre con frequenze basse (1Hz) per poi aumentarle gradualmente.

A questo punto si può cliccare su "Play" e la macchina si porta in modo graduale ai valori di coppia o angolo impostati.

Per variare la frequenza in modo da mantenere la temperatura del pezzo abbastanza elevata rispetto all'ambiente (si cerca di tenere una differenza  $\Delta T \approx 30-40^\circ\text{C}$ ) è sufficiente fermare la prova con il tasto "Stop", aprire il lucchetto alla procedura, impostare il nuovo valore della frequenza, chiudere il lucchetto e far ripartire la prova con il tasto "Play".

#### 5.3.5 Esecuzione dei raffreddamenti

Per eseguire un raffreddamento è indispensabile aumentare al massimo la frequenza di acquisizione della temperatura in modo da avere una quantità di punti sufficiente per la corretta definizione della pendenza della curva, cioè del gradiente di raffreddamento, fondamentale per la valutazione dell'energia specifica dissipata che è il nostro obiettivo finale della prova. Si deve quindi applicare la seguente procedura:

1. abbassare la frequenza di prova in modo che la temperatura del provino non superi i  $65^\circ\text{C}$  anche a ventilatore spento.
2. spegnere il ventilatore
3. aspettare che la temperatura del provino si stabilizzi. Per questa fase sono indispensabili dai 15 ai 20 minuti circa a seconda del livello di carico e della temperatura

4. raggiunta la stabilizzazione leggere e trascrivere il valore della temperatura ambiente e fermare l'acquisizione attraverso il tasto "Stop" del software Agilent BenchLink Data Logger (l'acquisizione di temperatura avveniva ogni 5/10 secondi)
5. salvare i dati acquisiti fino a quel momento seguendo il percorso seguente:
 

*ok > File > Export Data > Browse > Cartella di destinazione*

 ricordando di salvare il file in formato testo: File.txt.
6. disattivare il canale di lettura della temperatura ambiente dall'interfaccia *Scan Setup* togliendo lo spunto al canale 102 (figura5.3.5a)

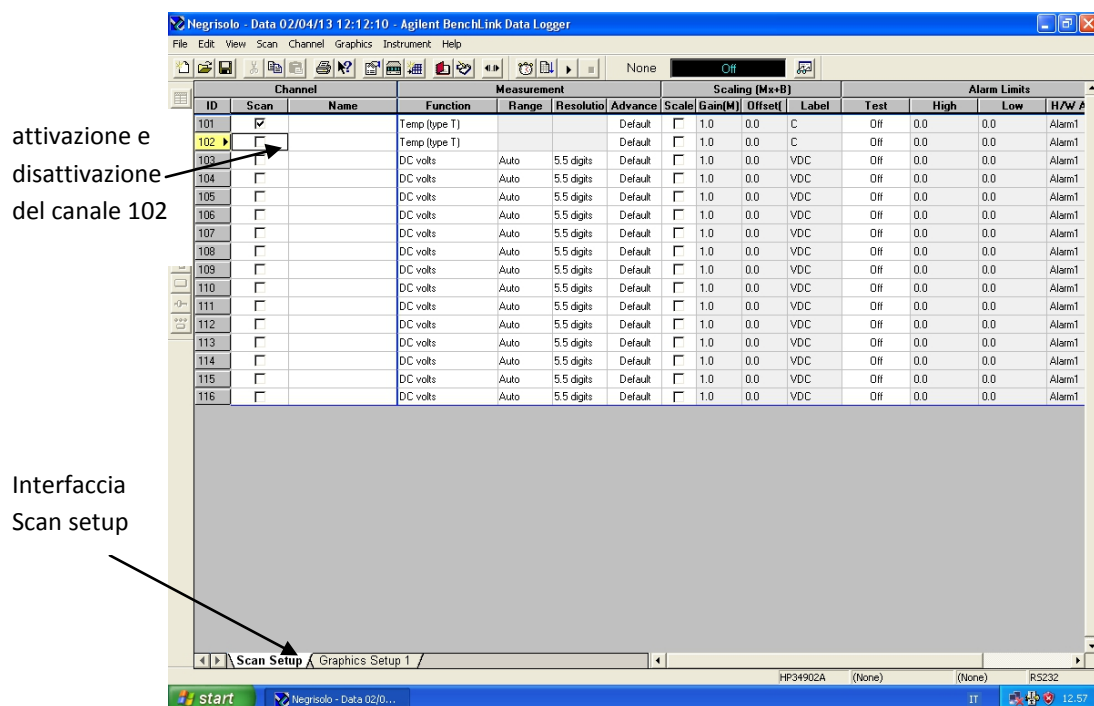


Figura5.3.5a Disattivazione del canale di lettura della temperatura ambiente

7. cliccare l'icona start e l'opzione *Setting* per impostare la massima frequenza di acquisizione, pari a 22Hz, come indicato in figura 5.3.5b

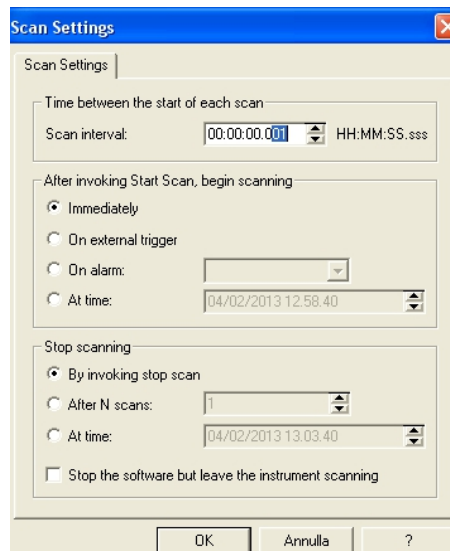


Figura 5.3.5b Impostazione della frequenza massima di acquisizione

8. cliccare su *OK* ed avviare l'acquisizione attraverso il comando "*Start*"
9. far passare circa 30 secondi in modo da far vedere che la temperatura è stabilizzata a meno dell'effetto termoelastico
10. dal software *MTS Station Manager* cliccare il tasto "*Hold*" per arrestare istantaneamente la prova come mostrato in figura 5.3.5c

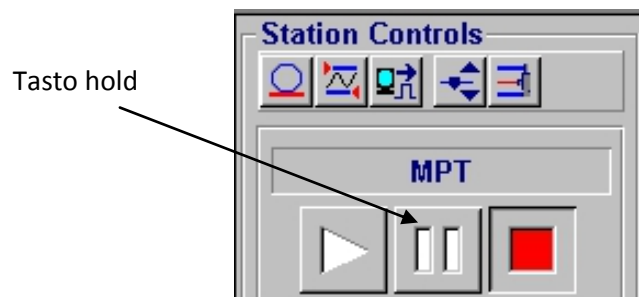


Figura 5.3.5c Arresto istantaneo della prova con il tasto hold

11. far passare circa 80 secondi per far vedere in modo completo l'andamento di temperatura durante il raffreddamento
12. dal software Agilent BenchLink Data Logger cliccare il tasto di stop per fermare l'acquisizione di temperatura e salvare il file attraverso il percorso:

*File > Export Data > Browse > Cartella di destinazione > File.txt*

13. dal software *MTS Station Manager* rimuovere semplicemente il tasto "*hold*" cliccando su "*Play*" per far ripartire la prova.
14. accendere il ventilatore e far ripartire sia la prova che l'acquisizione di temperatura alle frequenze desiderate

### 5.3.6 Smontaggio e spegnimento

La prova può terminare in 2 diverse modalità.

- a) Il provino raggiunge i 2 milioni di cicli e la prova deve essere arrestata manualmente con il tasto di "Stop".
- b) la cricca raggiunge dimensioni elevate e tali da far superare i limiti di angolo impostati nella finestra *Detectors* alla voce *MFLtortion Angle*. Una volta superati questi limiti il software toglie istantaneamente pressione al circuito principale e la macchina si ferma nella posizione in cui si trova in quell'istante.

Se il provino non è rotto, ovvero siamo nei casi a) descritto sopra, deve essere tolto procedendo nel seguente modo:

1. aprire il lucchetto alla procedura
2. dalla finestra del *Manual Command* rimettere lo spunto alla voce *Enable Munual Command* (vedi fig 3.2.1n). Si ricorda che la prova è stata eseguita in controllo di coppia quindi alla voce *Active Mode* sarà indicato *Torque*. Portare il valore di coppia applicata a zero inserendo il valore 0.0Nm.
3. spegnere le pompe dal software utilizzando la sequenza di figura 5.3.1i in senso inverso
4. spegnere gli ausiliari con il tasto rosso dal pannello di controllo principale (fig. 5.3.1c)
5. spegnere il ventilatore e chiudere il rubinetto dell'acqua di raffreddamento all'interno del locale pompe
6. allentare le viti di serraggio del calettatore della cassa di misura. Avvitare tre di queste viti negli appositi fori filettati per l'estrazione della bussola conica (vedi fig. 5.2.2b). Anche in questo caso si consiglia di avvitare in modo alternato e progressivo le tre viti per estrarre il calettatore in modo corretto senza distorsioni
7. allontanare la cassa di misura dalla cassa di comando e recuperare il calettatore che potrà essere riutilizzato per le prove successive
8. eseguire le operazioni descritte al punto 6 anche per il calettatore relativo alla cassa di comando

## CAPITOLO 6

### VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA TORSIONALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO

#### 6.1 PREMESSA

In questo capitolo vengono presentati i risultati di una serie di prove sperimentali. Le prove sono state eseguite in controllo di coppia su macchina MFL torsionale su provini lisci di acciaio inossidabile AISI304L della geometria precedentemente descritta. Le prove in controllo di coppia sono state eseguite imponendo una forma d'onda sinusoidale a frequenze variabili tra 1 e 20Hz in funzione dell'ampiezza di tensione applicata. Per mantenere la temperatura stabilizzata del materiale sotto al limite massimo dei 70°C e allo stesso tempo accelerare la prova, è stato utilizzato un ventilatore per raffreddare i provini. Circa 10 minuti prima di ogni raffreddamento il ventilatore veniva spento e contemporaneamente ridotta la frequenza di prova in modo da mantenere costante, entro un certo intervallo, la temperatura del materiale. Quindi il test veniva interrotto bruscamente per misurare il gradiente di raffreddamento. Sono state eseguite prove torsionali a  $R=-1$  e  $R=0,1$  allo scopo di valutare l'effetto del rapporto di ciclo nella relazione tra ampiezza di tensione e numero di cicli a rottura, ovvero nella costruzione delle curve di Woehler classiche utili nella progettazione a fatica.

Sono stati analizzati poi i risultati utilizzando l'approccio energetico basato sull'energia dissipata dal materiale nelle diverse fasi della vita e, relazionando questo parametro sempre al numero di cicli a rottura, si sono ottenute delle nuove curve di progetto per le sollecitazioni di fatica. Sono stati poi confrontati i due diversi approcci allo scopo di valutarne eventuali vantaggi e svantaggi in modo del tutto analogo a quanto è stato fatto per le prove assiali.

Per i nostri scopi, durante le prove sono stati quindi registrati i valori angolari e di coppia applicati dalla macchina mentre non è stato possibile valutare con maggior precisione le deformazioni angolari in gioco in quanto non era disponibile un estensometro torsionale. Dai valori provenienti dalla cella di carico e dal sensore di spostamento angolare della macchina di prova si è quindi risaliti alla rotazione media e alla rigidità del materiale e si sono diagrammati i dati in funzione del numero di cicli per cercare di comprendere il comportamento del materiale e la modifica delle sue proprietà in funzione del carico applicato durante tutta la sua vita.

La temperatura è stata monitorata con termocoppie rame-costantana incollate in corrispondenza alla sezione minima del provino, ovvero dove le tensioni raggiungono il valore nominale corrispondente al diametro di 15mm scelto. I segnali di temperatura provenienti dalle termocoppie sono stati acquisiti con una centralina di acquisizione Agilent Technologies HP34970° ad una frequenza massima di 22Hz.

## **6.2 APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE**

In questo paragrafo sono presentati i risultati di tutte le prove di fatica torsionale analizzati in termini di ampiezza di tensione  $\tau_a$ . Sono dunque presentati grafici  $\tau_a-N_f$  per rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0,1$ . Sono presentati inoltre gli andamenti caratteristici della rigidità relativa e della rotazione media relativa delle sezioni in corrispondenza agli afferraggi riscontrati a diverso numero di cicli durante le diverse campagne di prove.

Come visibile nelle figure riportate di seguito e, più in generale, nelle schede tecniche dedicate ai provini, le misure provenienti dal sensore di spostamento angolare della macchina di torsione non sono molto precise e risentono molto della frequenza di prova utilizzata. Per fare un esempio l'angolo misurato dal sensore per uno stesso livello di tensione applicato e alla stessa percentuale di vita risulta minore per frequenze di applicazione della coppia maggiori. Di conseguenza, come si vedrà nei grafici, i valori di rigidità aumentano con l'aumentare della frequenza. È comunque ancora possibile individuare gli andamenti delle grandezze rotazione angolare relativa e rigidità relativa nell'arco dell'intera vita del provino.

### *6.2.1 Andamenti delle rigidità durante le prove a R-1*

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R-1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\tau_a=250-350\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici delle rigidità  $k$  misurate durante le prove e normalizzate rispetto al valore della rigidità iniziale  $k_i$  (valutata a temperatura stabilizzata) e della rotazione angolare media delle sezioni in corrispondenza agli afferraggi sono riportati in figura 6.2.1a,b. Si cerca di riassumere in queste figure tutti i comportamenti tipici riscontrati durante le prove. Per i risultati di ogni singola prova si rimanda alle schede relative ai provini.



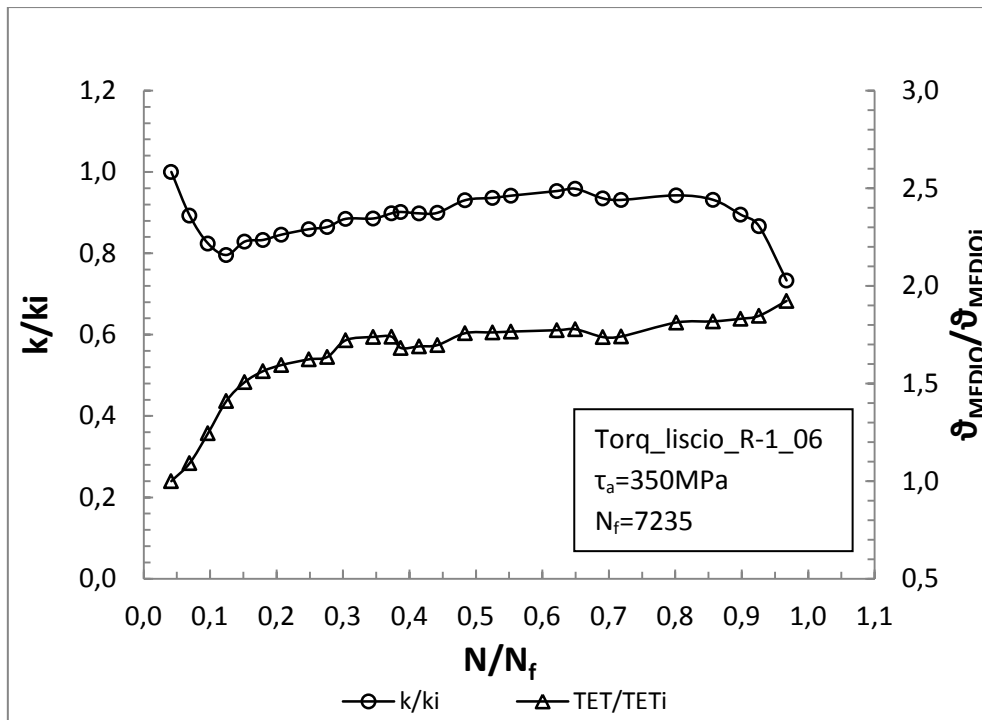


Figura 6.2.1a Evoluzione della rigidezza torsionale (normalizzata rispetto al valore iniziale) e della rotazione angolare media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Torq\_liscio\_R-1\_06

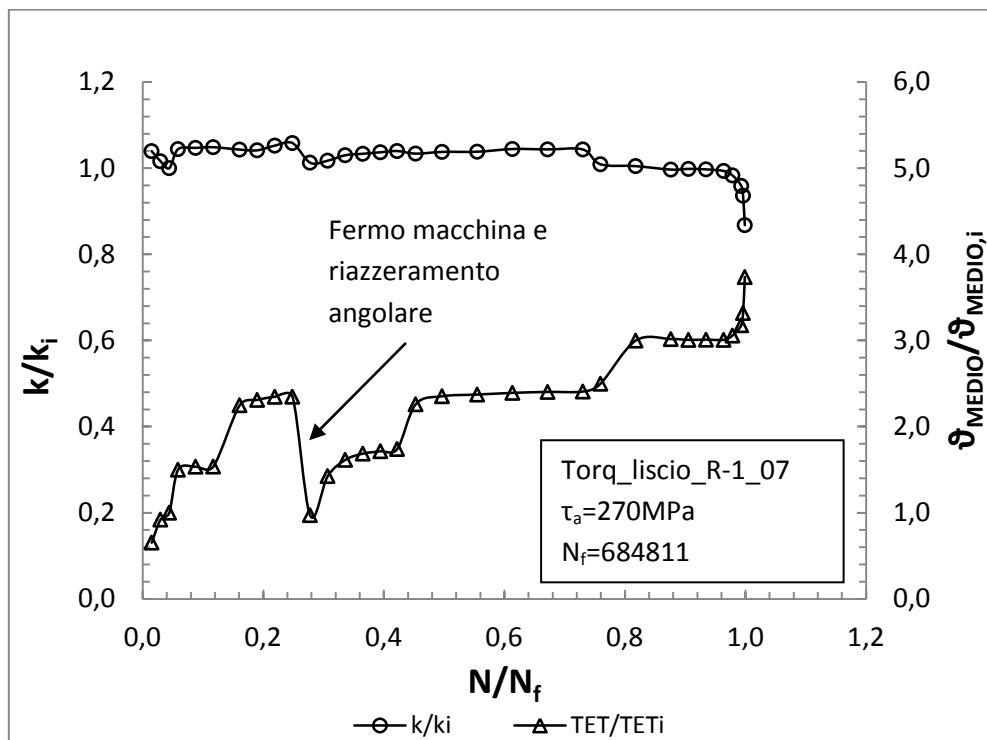


Figura 6.2.1b Evoluzione della rigidezza torsionale (normalizzata rispetto al valore iniziale) e della rotazione angolare media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove torsionali a rapporto di ciclo R-1. In particolare si possono distinguere 2 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 6.2.1a dove si vede come la rigidezza cala fortemente (fino anche all'80% della rigidezza iniziale) all'inizio della prova fino a circa il 10% della vita e tende poi ad aumentare fino a raggiungere circa il 95% della rigidezza iniziale. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 02, 03, 04, 06 e descrive un iniziale addolcimento del materiale nelle primissime fasi della sua vita ed un progressivo incrudimento. I quattro provini sono stati sollecitati ad ampiezze di tensione maggiori di 300MPa e questo sembra essere il comportamento comune per tutti i provini caratterizzati da livelli di tensione elevati e vita relativamente breve.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figura 6.2.1b dove la rigidezza si mantiene per lo più costante o tende leggermente ad aumentare fino agli ultimi cicli dove avviene il crollo dovuto alla propagazione delle cricche. La variazione di rigidezza durante tutta la prova non supera il 5-6%. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 05 e 07 e descrive un leggero incrudimento del materiale fino alla rottura. Anche in questo caso si riscontra questo comportamento in tutti i provini sollecitati ad ampiezze di tensione inferiori ai 300MPa e questo sembra essere il comportamento comune per tutti i provini caratterizzati da livelli di tensione modesti e vita relativamente lunga.

Dall'analisi delle figure 6.2.1a,b si può inoltre osservare come la fase di propagazione della cricca, che presenta un forte calo della rigidezza ed un rapido aumento della rotazione angolare media, avviene in maniera meno rapida rispetto alle prove assiali. Infatti, dall'analisi dei dati, si vede come l'innesco della cricca, evidenziato dal cambio di pendenza delle curve di rigidezza e rotazione media, avvenga ad una percentuale di vita prossima al 85% nel caso di figura 3.2.1a e al 94% in figura 6.2.1b. Nell'analisi dei dati si è comunque deciso, come fatto per le prove assiali, di trascurare la fase di propagazione rispetto alla vita spesa per l'innesco e si è così utilizzato il numero di cicli a rottura  $N_f$  per la sintesi dei dati, in termini sia di tensione che di densità di energia dissipata per unità di volume e per ciclo.

Si riportano infine in figura 6.2.1e,f,g tre tipiche superfici di frattura riscontrate nelle prove torsionali ad R-1.

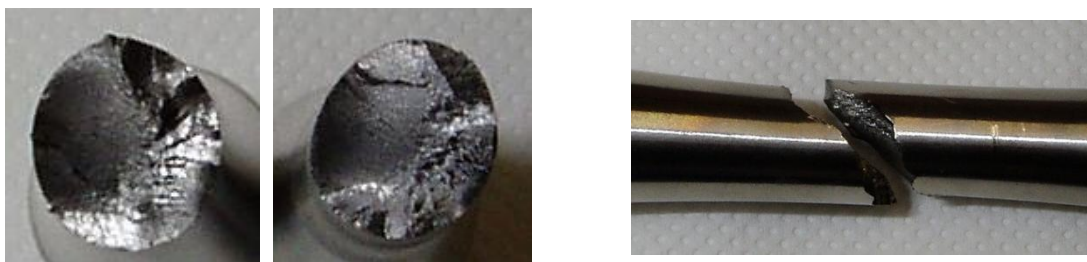


Figura 6.2.1e Esempio tipico di superfici di frattura (provino Torq\_liscio\_R-1\_01  $\tau_a=300\text{MPa}$  ; Nf = 337176) nelle prove a rapporto di ciclo R-1



Figura 6.2.1f Esempio tipico di superfici di frattura (provino Torq\_liscio\_R-1\_06  $\tau_a=350\text{MPa}$  ; Nf = 7235) nelle prove a rapporto di ciclo R-1

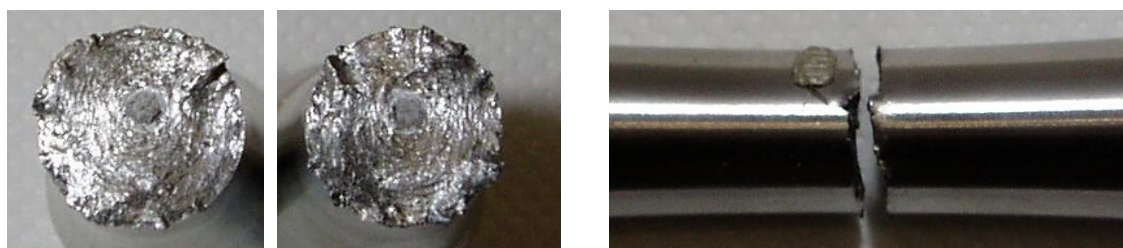


Figura 6.2.1g Esempio tipico di superfici di frattura (provino Torq\_liscio\_R-1\_02  $\tau_a=350\text{MPa}$  ; Nf = 8454) nelle prove a rapporto di ciclo R-1

Il caso di figura 6.2.1e è caratterizzato dalla propagazione della cricca in un piano inclinato a  $45^\circ$ , ovvero lungo la direzione della tensione principale  $\sigma_1$ . Questo tipo di rottura si evidenzia in provini sollecitati a livelli di tensione medio bassi ( $< 300\text{MPa}$ ) e vite relativamente lunghe. I casi di figura 6.2.1f,g sono invece tipici di provini sollecitati a livelli di tensione molto elevati ( $>320\text{MPa}$ ) e vite brevi ( $N_f < 10000$  cicli). In entrambi i casi la rottura avviene a causa delle tensioni tangenziali che giacciono rispettivamente in piani longitudinali e paralleli alla superficie di frattura.

### 6.2.2 Risultati delle prove torsionali a R-1

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 6.2.2 riportano i risultati di tutte le prove di fatica torsionale ad R-1 sintetizzati in termini di ampiezza di tensione, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa  $k$ , il coefficiente di dispersione in tensione  $T_\tau$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 6.2.2 Vita a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

PROVINO	$\tau_a$ [MPa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Torq_liscio_R-1_01	300	-1	1,3	337176	
Torq_liscio_R-1_02	350	-1	0,3	8454	
Torq_liscio_R-1_03	320	-1	0,6	44757	
Torq_liscio_R-1_04	300	-1	1,3	134479	
Torq_liscio_R-1_05	280	-1	3	675666	
Torq_liscio_R-1_06	350	-1	0,3	7235	
Torq_liscio_R-1_07	270	-1	4	684811	
Torq_liscio_R-1_08	250	-1	5	2000000	1

1 prova interrotta prima della rottura

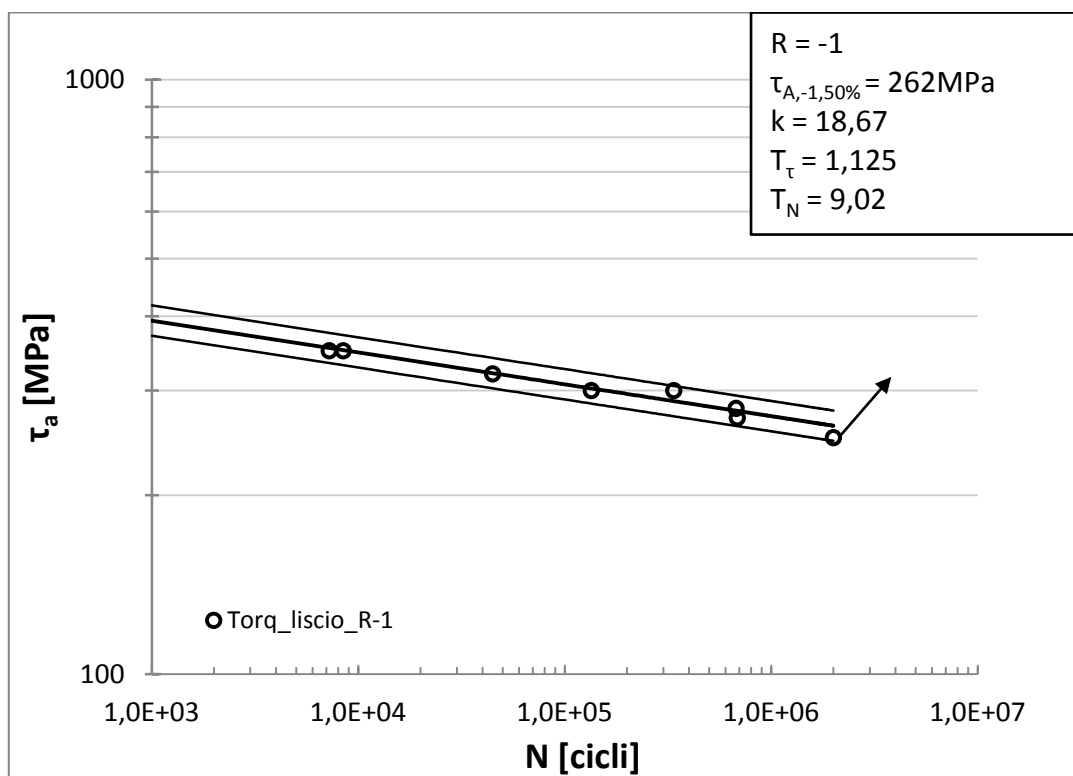


Grafico 6.2.2 Curva a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

La banda di dispersione risulta ben definita in tensione ma la pendenza della curva porta ad avere un coefficiente di dispersione in vita molto elevato.

### 6.2.3 Andamenti delle rigidità durante le prove a R0,1

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R0,1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\tau_a=200-300\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici delle rigidità  $k$  misurate durante le prove e normalizzate rispetto al valore della rigidità iniziale  $k_i$  e della rotazione angolare media tra le sezioni in corrispondenza agli afferraggi sono riportati in figura 6.2.3a,b. Si cerca di riassumere in queste figure tutti i comportamenti tipici riscontrati durante le prove. Per i risultati di ogni singola prova si rimanda alle schede relative ai provini.

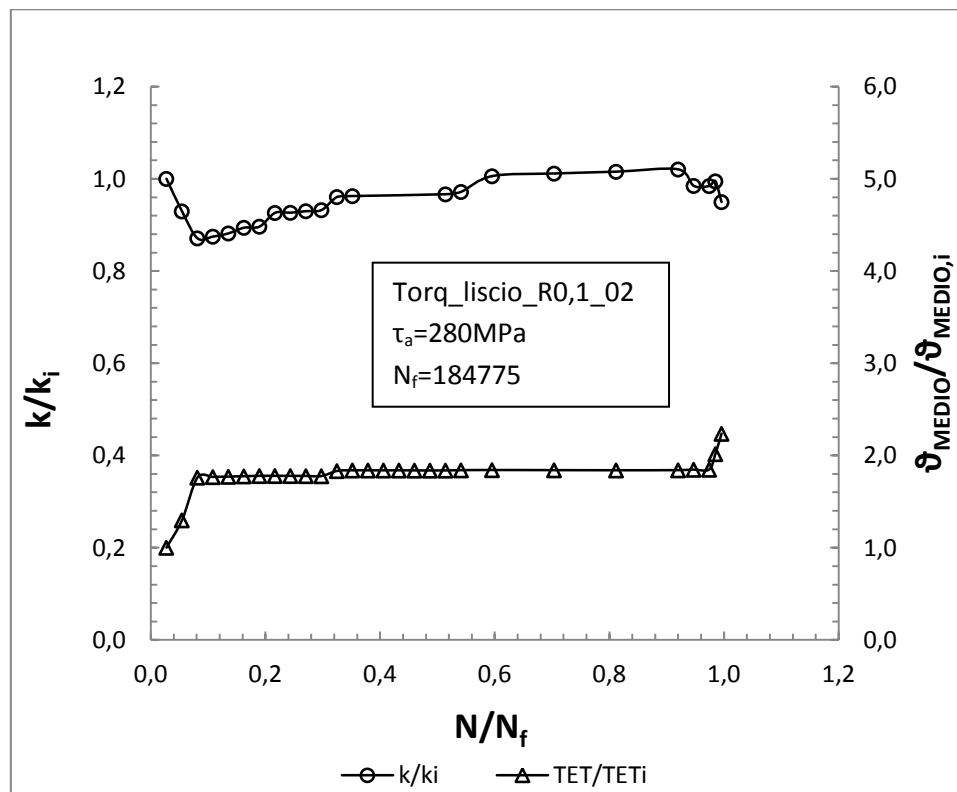


Figura 6.2.3a Evoluzione della rigidità torsionale e della rotazione media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_02

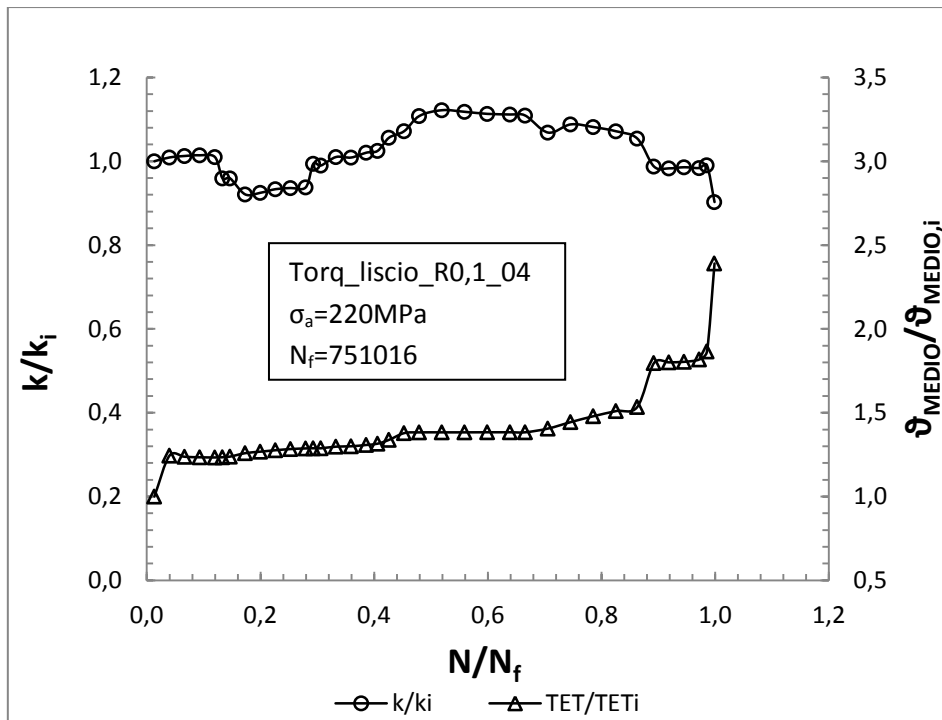


Figura 6.2.3b Evoluzione della rigidezza torsionale e della rotazione media in funzione della frazione di vita a fatica per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_04

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 2 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 6.2.3a dove si vede come la rigidezza cala fortemente nei primi cicli di vita fino anche all'85% della rigidezza iniziale per poi subire un progressivo aumento indice di un incrudimento del materiale. Questo comportamento è stato riscontrato per valori delle tensioni tangenziali elevati dove, nei primi cicli di prova, la rotazione delle sezioni di estremità risultava superiore anche ai  $180^\circ$  prima di stabilizzarsi ad un certo valore a causa dell'incrudimento subito dal materiale, che porta ad un conseguente aumento della rigidezza.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figura 6.2.3b dove la rigidezza tende a salire fino ad una percentuale di vita del 60-70% per poi calare fino alle fasi precedenti la rottura. Questo comportamento è stato riscontrato nei provini 03 e 04 e descrive un modesto ma progressivo incrudimento del materiale durante la prima metà della vita seguito da un successivo addolcimento. Questo comportamento è invece tipico di provini sottoposti a livelli di tensione relativamente bassi.

Si riportano infine in figura 6.2.3c un esempio di superfici di frattura riscontrate nelle prove torsionali ad R0,1.

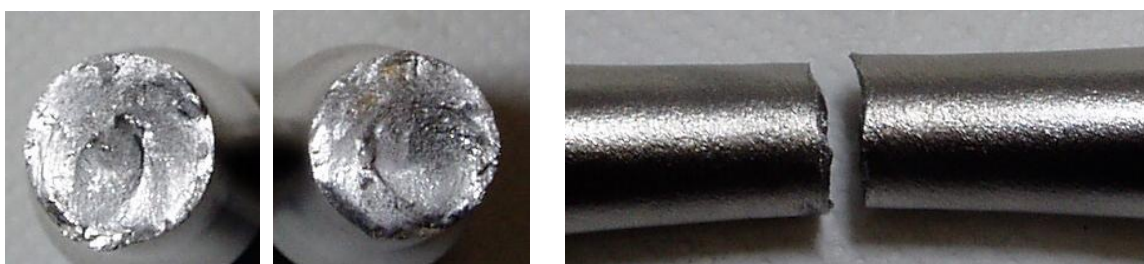


Figura 6.2.3c Esempio tipico di superfici di frattura (provino Torq\_liscio\_R0,1\_06  $\tau_a=320$  MPa ;  $N_f = 7180$ ) nelle prove a rapporto di ciclo R0,1

Come appare dalla figura 6.2.3c le superfici di frattura assomigliano molto ai casi delle prove a torsione ad R-1 effettuate a carichi elevati. In effetti i livelli di tensione raggiunti nelle prove a R0,1 sono prossimi alla tensione di rottura del materiale e la rottura lungo i piani delle tensioni tangenziali sembra essere tipica di livelli di tensione elevati.

#### 6.2.4 Risultati delle prove torsionali a R0,1

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 6.2.4 riportano i risultati di tutte le prove di fatica torsionale a rapporto di ciclo R0,1 sintetizzati in termini di ampiezza di tensione, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa  $k$ , il coefficiente di dispersione in tensione  $T_\tau$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 6.2.4 Vita a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

PROVINO	$\tau_a$ [Mpa]	$\tau_{MED}$ [Mpa]	R	f	$N_f$	NOTE
Torq_liscio_R0,1_01	250	305,56	0,1	5	225063	
Torq_liscio_R0,1_02	280	342,22	0,1	4,5	184775	
Torq_liscio_R0,1_03	300	366,67	0,1	4	102403	
Torq_liscio_R0,1_04	220	268,89	0,1	10	751016	
Torq_liscio_R0,1_05	200	244,44	0,1	20	2000000	1
Torq_liscio_R0,1_06	320	391,11	0,1	2	7180	
Torq_liscio_R0,1_07	300	366,67	0,1	2	8648	
Torq_liscio_R0,1_08	280	342,22	0,1	3	74450	

1 prova interrotta prima della rottura

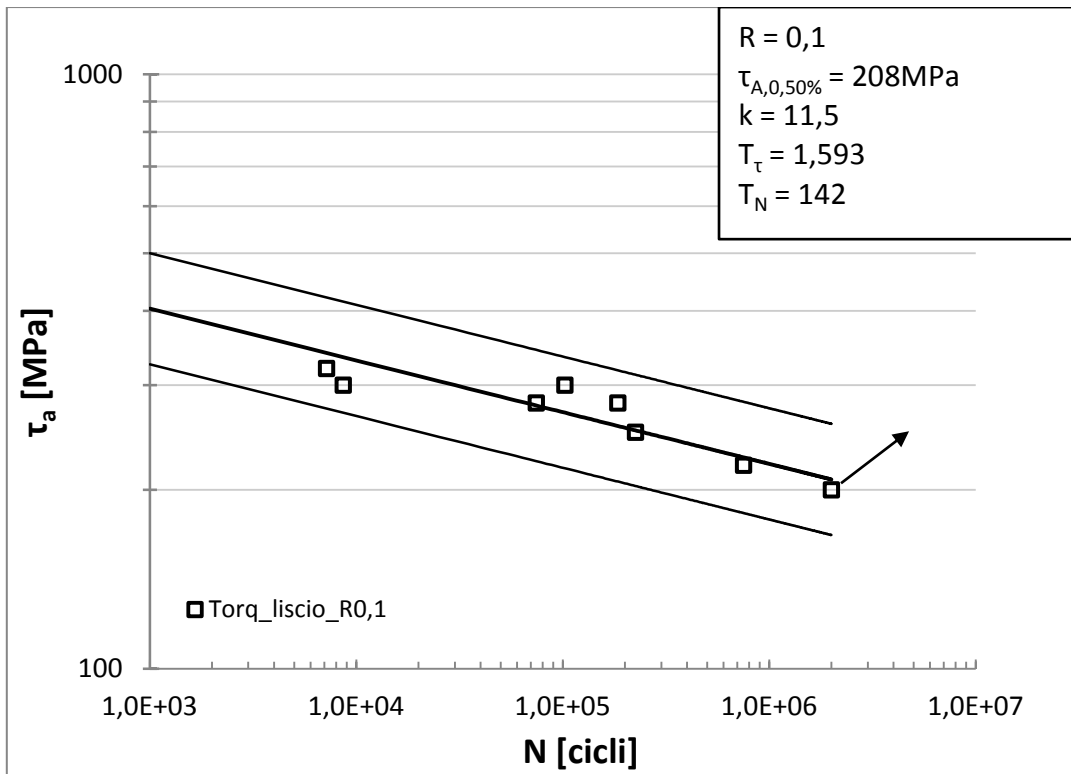


Grafico 6.2.4 Curva a fatica per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

La banda di dispersione delle prove a R0,1 risulta molto più allargata rispetto alle prove eseguite ad R-1. Un coefficiente di dispersione in vita così elevato non è accettabile per una curva di progetto e si ritengono dunque necessarie ulteriori prove per restringere la dispersione dei dati e definire in modo migliore la banda.



### 6.2.5 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di ampiezza di tensione

Nel grafico di figura 6.2.5 si riassumono infine i dati ottenuti nelle prove di fatica torsionali per i due diversi rapporti di ciclo per poter effettuare un confronto tra le due serie di dati.

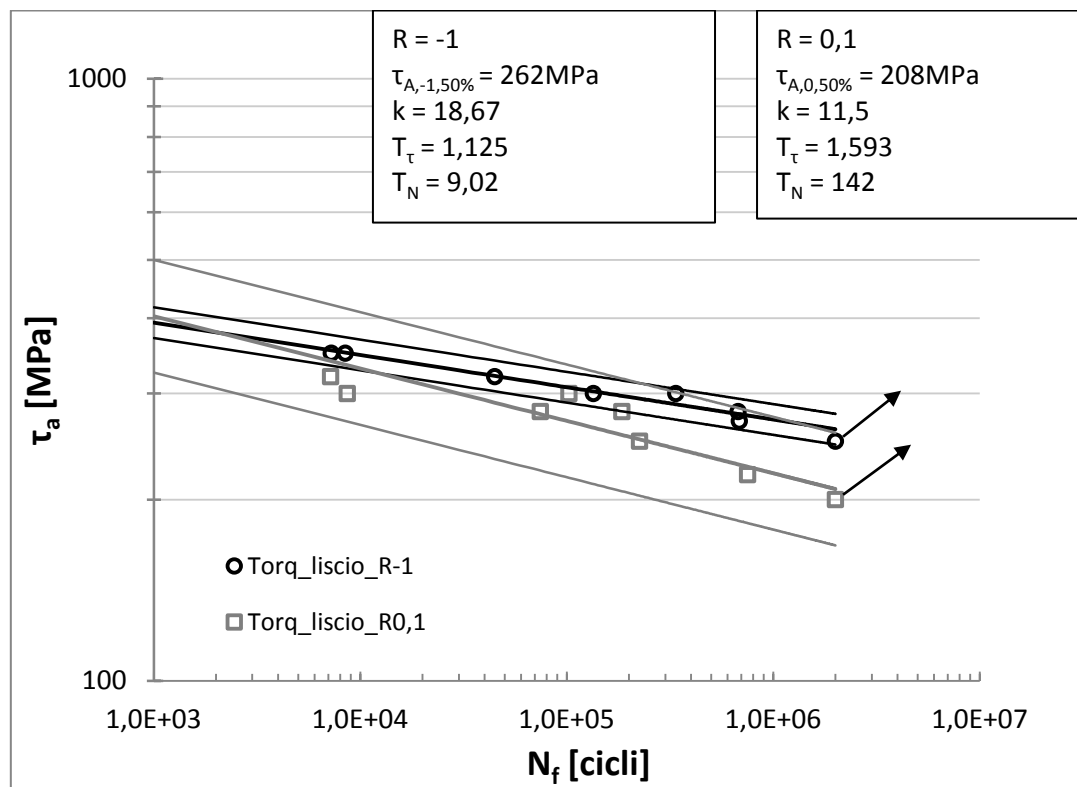


Grafico 6.2.5 Confronto curve a fatica per provini sollecitati a torsione a rapporto di ciclo R0,1 ed R-1

Dall'analisi del grafico 6.2.5 si vede come lo stesso materiale, sottoposto a sollecitazioni di fatica torsionale a diverso rapporto di ciclo, presenta comportamenti diversi ed i risultati non possono essere riassunti in termini di ampiezza di tensione  $\tau_a$  da un'unica banda di dispersione. In particolare le ampiezze di tensione delle prove ad R-1 sono, a parità di numero di cicli a rottura, più elevate rispetto alle prove ad R0,1 e questo è intuibile dal fatto che la presenza di una tensione media maggiore di zero, nelle prove ad R0,1, porta ad avere un livello di  $\tau$  massima molto più elevato a parità di ampiezza di tensione.

### 6.3 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA

In questo paragrafo sono presentati i risultati di tutte le prove di fatica torsionali rianalizzati in termini di energia dissipata dal materiale  $Q$ . Sono dunque presentati grafici  $Q-N_f$  per rapporti di ciclo  $R=-1$  e  $R=0,1$ .

Per ricavare il valore di  $Q$ , rilevabile solo quando la temperatura del provino si è stabilizzata, si interrompe la prova istantaneamente al valore di coppia a cui si trova la macchina. Qualche secondo prima dell'interruzione della prova si avvia la registrazione con le termocoppie che permette di valutare la velocità di raffreddamento. Determinata la pendenza del raffreddamento negli istanti successivi all'interruzione della prova e conoscendo le caratteristiche del materiale può essere facilmente ricavato il valore di  $Q$ .

Per uno stesso provino vengono effettuati più raffreddamenti allo scopo di valutare la variazione di  $Q$  in funzione del numero di cicli. A seconda dell'andamento di  $Q$  si ricava un valore caratteristico per ciascun provino, che può essere il valore medio oppure quello valutato a metà vita, e relazionando questo valore in funzione del numero di cicli a rottura si può tracciare una curva di Woehler modificata in cui in ascissa si ha ancora il numero di cicli a rottura mentre in ordinata si ha il parametro densità di energia dissipata  $Q$ .

Una curva completa si può ottenere eseguendo una serie di prove a differenti ampiezze di tensione (per uno stesso provino sempre la stessa ampiezza) in un campo sufficientemente ampio da garantire la corretta caratterizzazione del materiale.

Per la determinazione del parametro densità di energia dissipata  $Q$  si rimanda al paragrafo 3.3.1 relativo alle prove di fatica assiali. Il procedimento è del tutto analogo anche nel caso delle prove torsionali.

### 6.3.1 Andamento dell'energia dissipata nelle prove torsionali a R-1

Le prove torsionali effettuate a rapporto di ciclo R-1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\tau_a=250-350\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici dell'energia dissipata Q sono riportati nelle figure 6.3.2a,b.

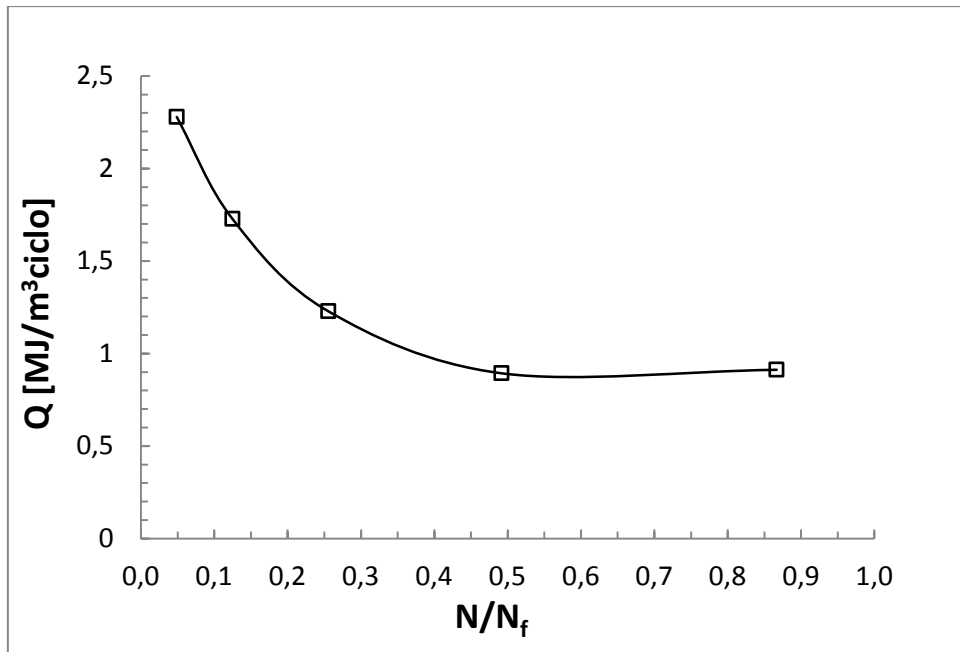


Figura 6.3.1a Andamento dell'energia dissipata Q del provino Torq\_liscio\_R-1\_03

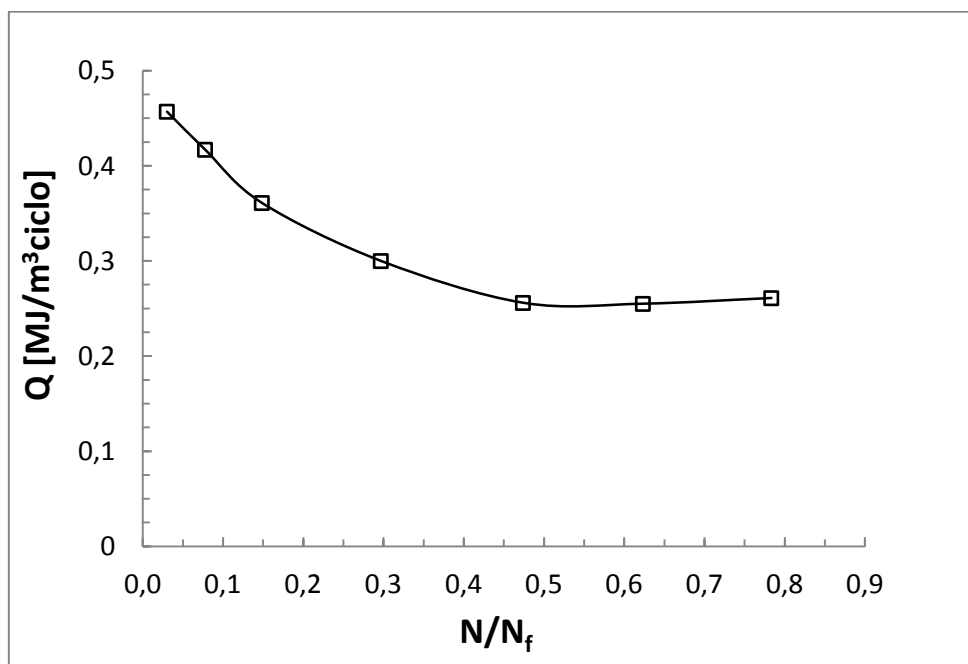


Figura 6.3.1b Andamento dell'energia dissipata Q del provino Torq\_liscio\_R-1\_05

I grafici riportati mettono in evidenza il comportamento riscontrato durante la campagna di prove. Analizzando infatti le figure 6.3.1a,b si nota come in entrambi i casi il valore dell'energia dissipata per ciclo cali in modo più o meno marcato (arrivando a valori fino al 40% di quello iniziale) per il primo terzo di vita per poi stabilizzarsi nei due terzi di vita finali. Questo comportamento è stato riscontrato per tutti i provini sollecitati a torsione a rapporto di ciclo R-1 e l'unica differenza è data dal calo iniziale che, a seconda dei casi, risulta più o meno marcato. Non si è riusciti a trovare una corrispondenza tra l'intensità della diminuzione di Q ed il livello di tensione applicato. Questa caratteristica, comune a tutti i provini sollecitati a torsione e a rapporto di ciclo R-1, potrebbe apparire un ostacolo per la determinazione del valore caratteristico di ciascun provino. Tuttavia si vedrà in seguito come, nella successiva elaborazione dei dati, in un grafico doppio logaritmico Q-N<sub>f</sub> la scelta del valore di Q caratteristico del provino cade all'interno della banda di dispersione sia se preso negli istanti iniziali di vita che dopo la stabilizzazione. Si ritiene dunque ancora valida per la scelta del Q caratteristico, la regola di considerare il valore misurato al 50% della vita di ciascun provino.

### 6.3.3 Risultati delle prove assiali a R-1 in termini di energia dissipata

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 6.3.3 riportano i risultati di tutte le prove di fatica torsionale ad R-1 sintetizzati in termini di energia dissipata Q con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa k, il coefficiente di dispersione in energia T<sub>Q</sub> ed il coefficiente di dispersione in vita T<sub>N</sub>.

Tabella 6.3.3 Energia dissipata per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R-1

PROVINO	R	f [Hz]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Torq_liscio_R-1_01	-1	1,3	353,5	0,3535	337176	
Torq_liscio_R-1_02	-1	0,3	2132	2,132	8454	
Torq_liscio_R-1_03	-1	0,6	894	0,894	44757	
Torq_liscio_R-1_04	-1	1,3	571	0,571	134479	
Torq_liscio_R-1_05	-1	3	256	0,256	675666	
Torq_liscio_R-1_06	-1	0,3	2477	2,477	7235	
Torq_liscio_R-1_07	-1	4	267	0,267	684811	
Torq_liscio_R-1_08	-1	5	112	0,112	2000000	1
						1 prova interrotta prima della rottura

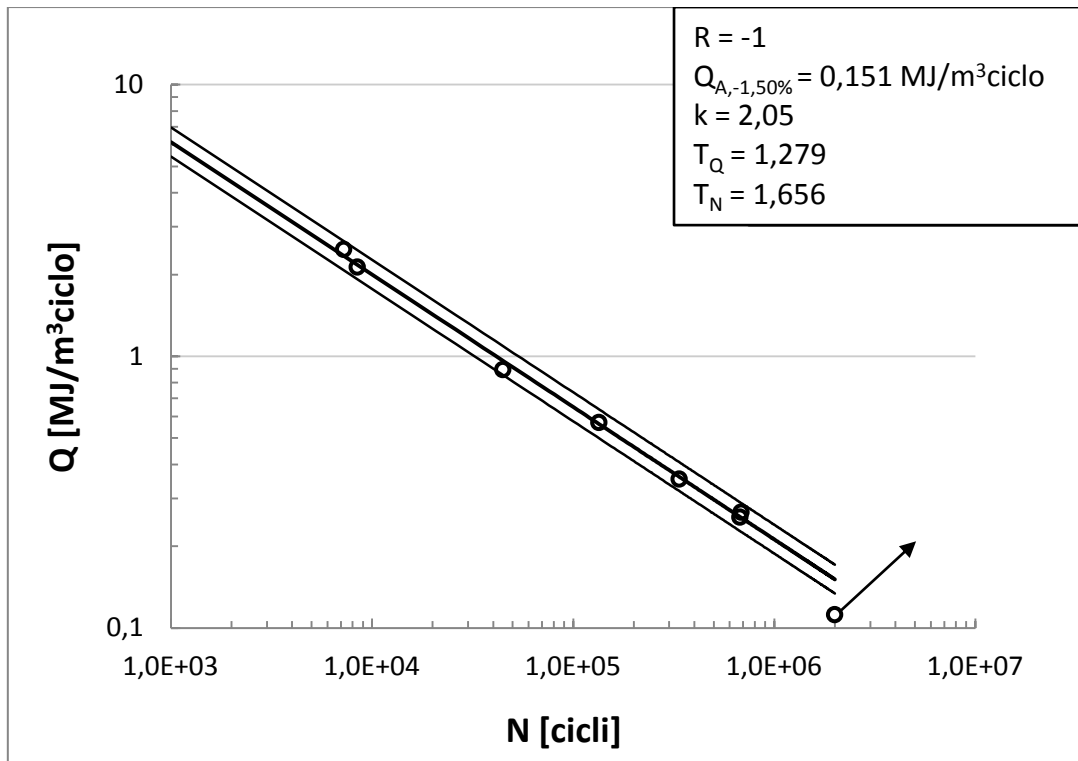


Figura 6.3.3 Curva di Woelher modificata per le prove assiali ad R-1

Il grafico di figura 6.3.3 mette in evidenza come la banda di dispersione ottenuta ha un coefficiente di dispersione molto ristretto, sia in vita che in energia, nonostante il numero di dati a disposizione per l'analisi sia molto limitato. Questo aspetto rende la curva in energia molto interessante dal punto di vista della verifica a fatica. Inoltre la pendenza della curva è pressoché uguale alla curva in energia relativa alle prove di fatica assiali a rapporto di ciclo R-1. Per l'approfondimento di questa analisi si rimanda al capitolo 7.

#### 6.3.4 Andamento dell'energia dissipata nelle prove a R0,1

Le prove effettuate a rapporto di ciclo R0,1 sono state eseguite con ampiezze di tensione comprese tra  $\tau_a=200-320\text{MPa}$ . Gli andamenti tipici dell'energia dissipata Q sono riportati nelle figure 6.3.4a,b.

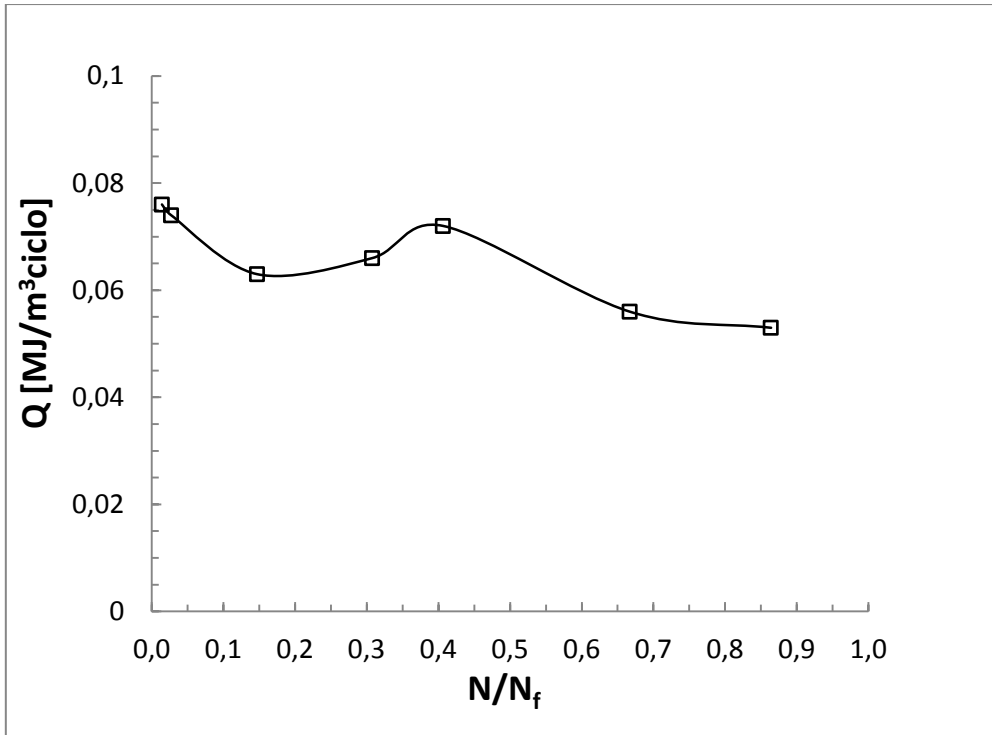


Figura 6.3.4a Andamento dell'energia dissipata  $Q$  del provino Torq\_liscio\_R0,1\_04

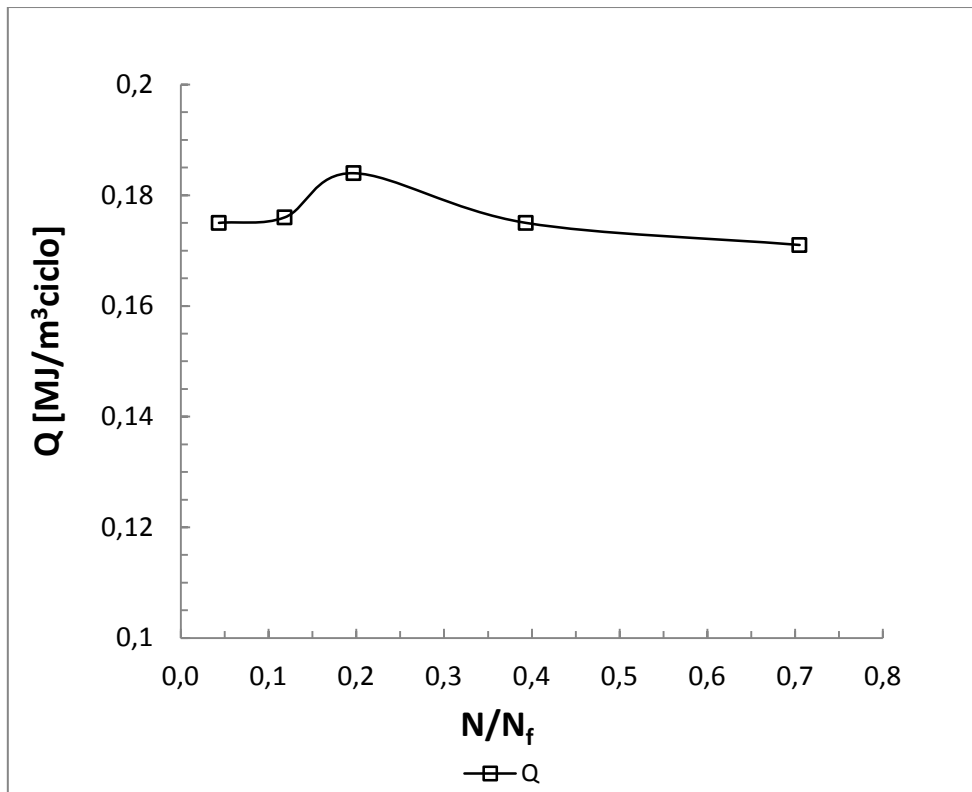


Figura 6.3.4b Andamento dell'energia dissipata  $Q$  del provino Torq\_liscio\_R0,1\_03

I grafici riportati mettono in evidenza i diversi comportamenti riscontrati durante la campagna di prove. In particolare si possono distinguere 2 comportamenti che, a seconda dei casi, risultano più o meno marcati.

Il primo comportamento riscontrato è quello di fig. 6.3.4a dove si vede che l'energia dissipata diminuisce nelle primissime fasi della vita come avveniva nei provini sollecitati a R-1 ma nella fase centrale della vita risale quasi fino al valore iniziale per poi diminuire nell'ultima fase di vita.

Il secondo comportamento riscontrato durante le prove è quello mostrato nella figure 6.3.4b dove l'andamento dell'energia dissipata si presenta per lo più costante per tutta la vita fino agli ultimi cicli dove si nota una tendenza a diminuire.

Non si è riusciti a trovare una corrispondenza tra gli andamenti di parametro Q ed i livelli di tensione applicati in diversi provini.

### 6.3.5 Risultati delle prove torsionali a R0,1 in termini di energia dissipata

La tabella e il corrispettivo grafico di figura 6.3.5 riportano i risultati di tutte le prove di fatica torsionale eseguiti a R0,1 sintetizzati in termini di energia dissipata Q con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa k, il coefficiente di dispersione in energia  $T_Q$  ed il coefficiente di dispersione in vita  $T_N$ .

Tabella 6.3.5 Energia dissipata per provini sollecitati a diverse ampiezze di tensione a rapporto di ciclo R0,1

PROVINO	R	f	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Torq_liscio_R0,1_01	0,1	5	130	0,13	225063	
Torq_liscio_R0,1_02	0,1	4,5	139	0,139	184775	
Torq_liscio_R0,1_03	0,1	4	173	0,173	102403	
Torq_liscio_R0,1_04	0,1	10	64	0,064	751016	
Torq_liscio_R0,1_05	0,1	20	32	0,032	2000000	1
Torq_liscio_R0,1_06	0,1	2	392	0,392	7180	
Torq_liscio_R0,1_07	0,1	2	290	0,29	8648	
Torq_liscio_R0,1_08	0,1	3	208	0,208	74450	
						1 prova interrotta prima della rottura

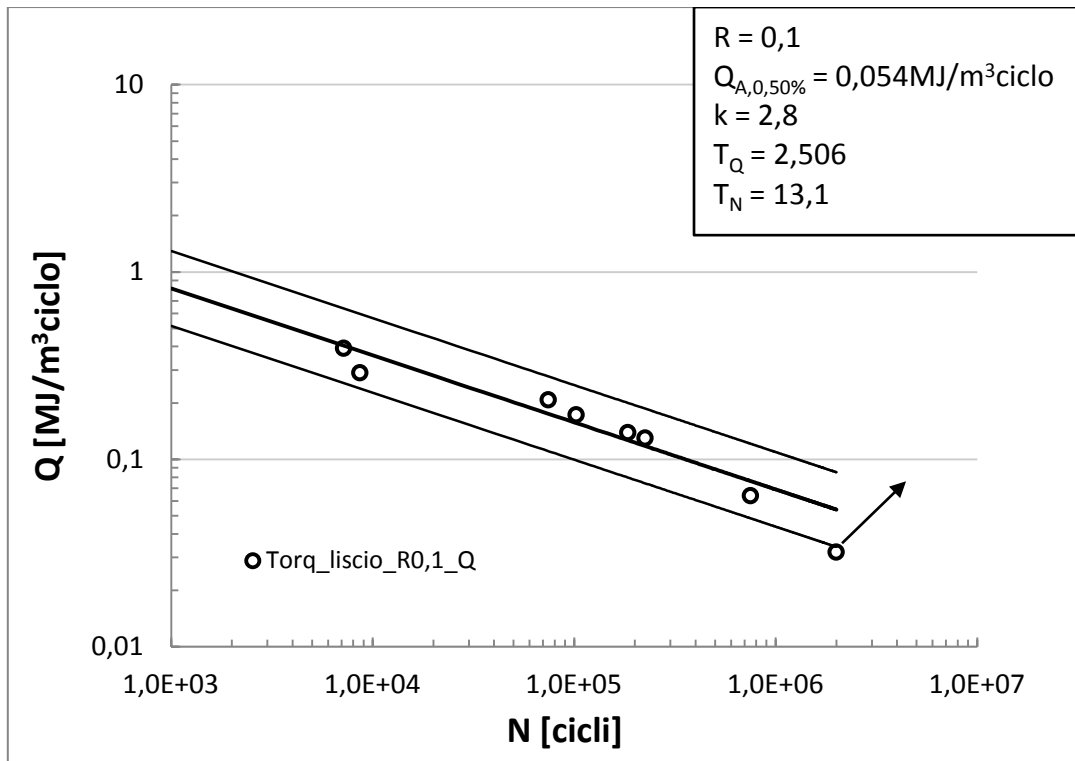


Figura 6.3.5 Curva di Woelher modificata per le prove torsionali ad R0,1

Dall'analisi del grafico 6.3.5 si vede come la banda relativa alle prove torsionali a rapporto di ciclo R0,1 risulta più dispersa rispetto alle prove eseguite ad R-1. In particolare il coefficiente di dispersione in vita risulta 8 volte maggiore. Si ritiene che per la definizione più accurata della curva in energia siano necessarie ulteriori prove a rapporto di ciclo R0,1. Se però confrontiamo questa banda con la corrispettiva banda in ampiezza di tensione si vede come l'approccio basato sulla dissipazione di energia riesca a definire in modo migliore le curve con lo stesso numero di dati a disposizione. In particolare il coefficiente di dispersione in vita si abbassa di un ordine di grandezza.



### 6.3.6 Confronto delle prove a R-1 e R0,1 in termini di energia dissipata Q

Nel grafico di figura 6.3.6 si riassumono infine i dati ottenuti per i due diversi rapporti di ciclo per poter effettuare un confronto tra le due serie di dati.

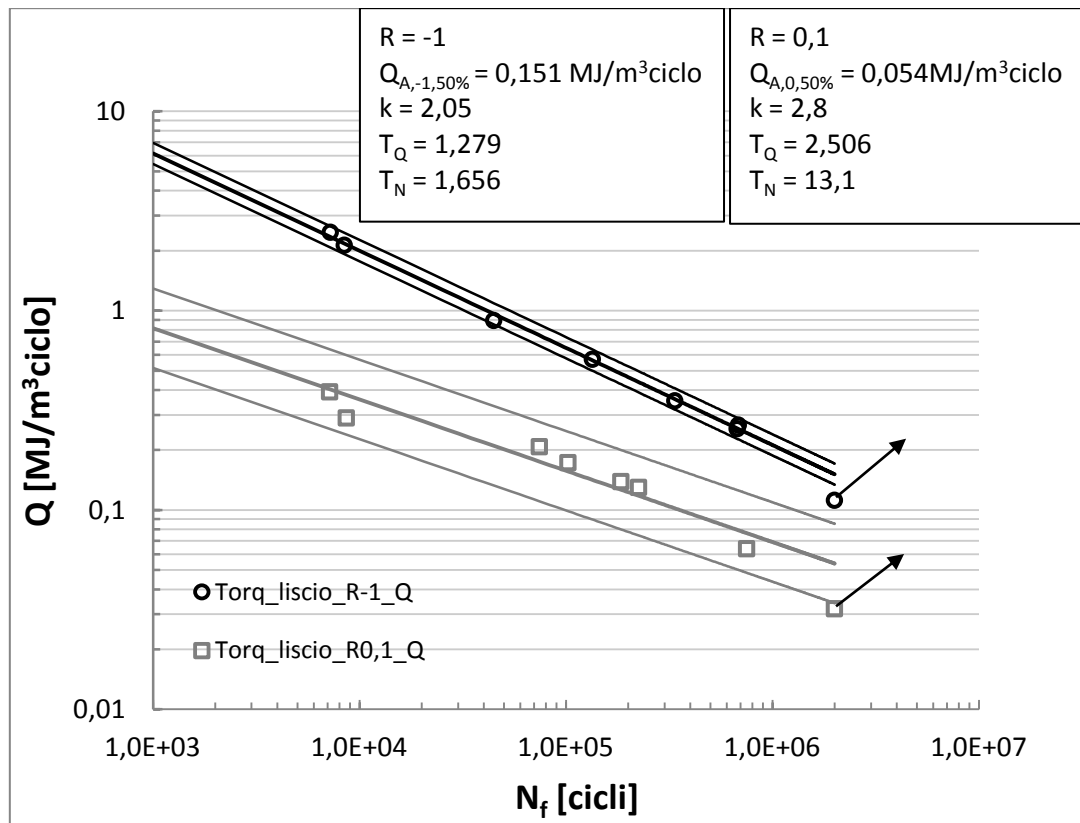


Grafico 6.3.6 Confronto curve a fatica torsionale in termini di energia dissipata per provini sollecitati a rapporto di ciclo R0,1 ed R-1

Dall'analisi del grafico 6.3.6 si vede come lo stesso materiale, sottoposto a sollecitazioni di fatica a diverso rapporto di ciclo presenta comportamenti diversi anche in termini di energia dissipata ed i risultati non possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione. In particolare si nota come a parità di vita a termine i provini sollecitati ad R-1 presentano valori dell'energia dissipata Q più elevati rispetto ai provini sollecitati ad R0,1 come si era trovato anche per le prove assiali. La pendenza delle due curve è leggermente diversa mentre, come detto in precedenza, sono necessarie ulteriori prove per stringere maggiormente la banda di dispersione relativa alle prove a rapporto di ciclo R0,1.

## 6.4 CONCLUSIONI

In questo capitolo sono stati presentati i risultati di tutte le prove di fatica torsionali eseguite in questo lavoro a diverso rapporto di ciclo, analizzati sia in termini di ampiezza di tensione che in termini di densità di energia dissipata. Si è visto come entrambi gli approcci non riescano a sintetizzare i dati relativi ai diversi rapporti di ciclo con un'unica banda di dispersione.

Un vantaggio riscontrato nell'utilizzo del parametro  $Q$  per l'analisi dei dati è stato quello di ridurre i coefficienti di dispersione sia in tensione/energia sia in vita.

Un altro aspetto molto interessante dal punto di vista della verifica a fatica è dato dalla banda di dispersione in energia ottenuta per le prove a torsione a rapporto di ciclo  $R=1$ . Questa banda infatti presenta una pendenza ed un valore  $Q_{A,-1,50\%}$  pressoché uguali a quelli trovati per le prove di fatica assiale allo stesso rapporto di ciclo. Questo aspetto sembra essere un enorme vantaggio del metodo energetico rispetto a quello basato sull'ampiezza di tensione, in quanto, la sintesi dei dati relativi a prove di fatica assiali e torsionali in un'unica banda di dispersione renderebbe la verifica a fatica indipendente dal tipo di sollecitazione applicata, almeno per rapporto di ciclo costante e pari ad  $R=1$ . Questo aspetto verrà ulteriormente approfondito nel capitolo 7.

## CAPITOLO 7

### VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE NELLO STUDIO DELLA RESISTENZA A FATICA DI UN ACCIAIO INOSSIDABILE AISI304L

#### 7.1 PREMESSA

In questo capitolo si vogliono confrontare i risultati ottenuti nelle prove di fatica assiali con quelli ottenuti dalle prove di fatica torsionali sia attraverso l'approccio classico basato sull'ampiezza di tensione sia con l'approccio basato sulla densità di energia dissipata.

Nei paragrafi seguenti saranno dunque riassunti tutti i dati relativi ai provini testati in questa campagna di prove, ovvero si analizzeranno le 4 serie di dati qui riassunte:

- prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R-1
- prove a fatica torsionale a rapporto di ciclo R-1
- prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R0,1
- prove a fatica torsionale a rapporto di ciclo R0,1

Si vogliono confrontare tra loro i risultati ottenuti per ciascuna serie allo scopo di valutare gli eventuali vantaggi del metodo energetico rispetto a quello classico basato sull'ampiezza di tensione.

#### 7.2 EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE PER PROVE A RAPPORTO DI CICLO R-1

In questo paragrafo si confrontano i risultati relativi alle prove di fatica assiali con quelli relativi alle prove di fatica torsionali, eseguite in entrambi i casi a rapporto di ciclo costante e pari a R=-1. Si confronteranno dapprima i risultati ottenuti in termini di ampiezza di tensione ( $\sigma_a$  e  $\tau_a$ ) e successivamente gli stessi dati saranno rianalizzati in termini di densità di energia dissipata Q.

##### *7.2.1 Confronto prove assiali-torsionali in termini di ampiezza di tensione*

Nelle tabelle 7.2.1a,b sono riassunti tutti i risultati delle prove sperimentali analizzati in termini di tensione netta rispettivamente nelle prove di fatica assiali e in quelle torsionali a rapporto di ciclo R-1.

Tabella 7.2.1a Risultati delle prove di fatica assiali a R-1 in termini di ampiezza di tensione  $\sigma_a$

NOME_PROVINO	$\sigma_a$ [MPa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Traz_liscio_R-1_02	240	-1	9	2000000	1
Traz_liscio_R-1_03	400	-1	0,3	2931	
Traz_liscio_R-1_04	350	-1	1	58260	
Traz_liscio_R-1_05	320	-1	3	793881	
Traz_liscio_R-1_06	300	-1	5	2000000	1
Traz_liscio_R-1_07	335	-1	2	123424	
Traz_liscio_R-1_08	350	-1	1	111949	
Traz_liscio_R-1_09	335	-1	2,5	2489072	1
Traz_liscio_R-1_10	320	-1	3	198187	
Traz_liscio_R-1_11	320	-1	3,5	1882442	2
Traz_liscio_R-1_12	400	-1	0,3	3589	
Traz_liscio_R-1_13	350	-1	1	36728	
Traz_liscio_R-1_14	335	-1	2	92926	
Traz_liscio_R-1_15	320	-1	3	206195	3
Traz_liscio_R-1_16	300	-1	5	483510	3
1 prova interrotta prima della rottura					
2 prova interrotta per rottura afferraggio					
3 prova eseguita senza raffreddamenti					

Tabella 7.2.1b Risultati delle prove di fatica torsionali a R-1 in termini di ampiezza di tensione  $\tau_a$

PROVINO	$\tau_a$ [MPa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Torq_liscio_R-1_01	300	-1	1,3	337176	
Torq_liscio_R-1_02	350	-1	0,3	8454	
Torq_liscio_R-1_03	320	-1	0,6	44757	
Torq_liscio_R-1_04	300	-1	1,3	134479	
Torq_liscio_R-1_05	280	-1	3	675666	
Torq_liscio_R-1_06	350	-1	0,3	7235	
Torq_liscio_R-1_07	270	-1	4	684811	
Torq_liscio_R-1_08	250	-1	5	2000000	1
1 prova interrotta prima della rottura					

Le due serie di dati riassunte nelle tabelle 7.2.1a,b sono messe a confronto nel grafico di figura 7.2.1c che riporta in ascissa il numero di cicli a rottura e in ordinata l'ampiezza di tensione applicata.

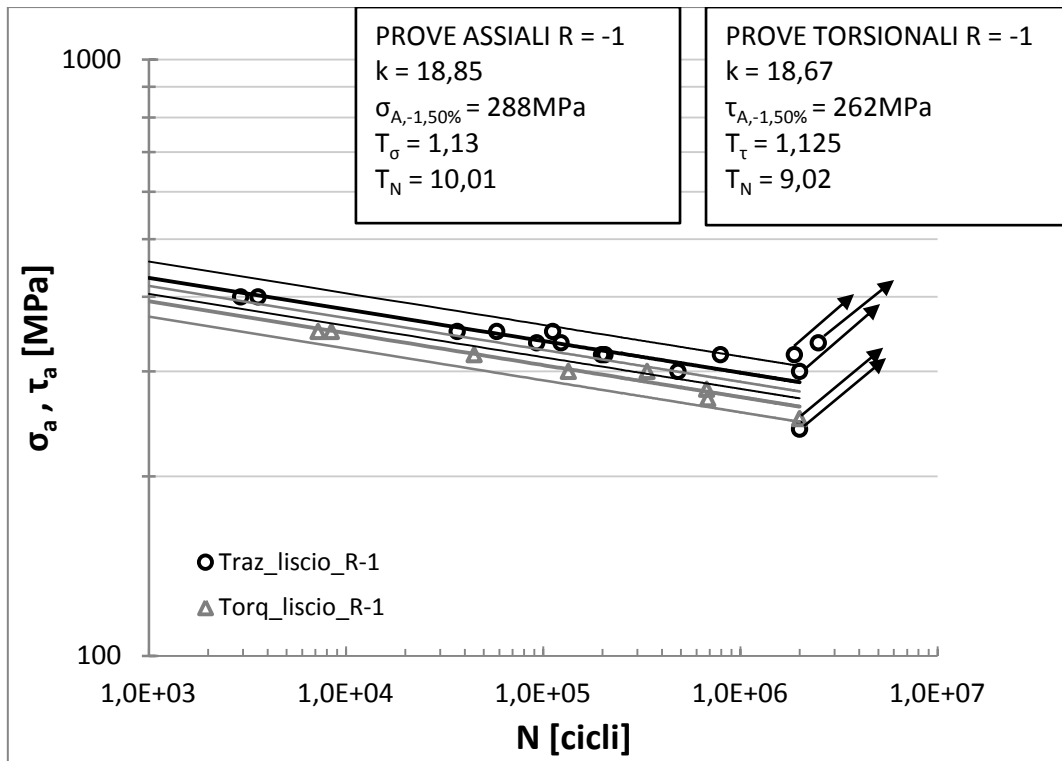


Figura 7.2.1c Confronto prove di fatica assiali e torsionali a R-1 in termini di ampiezza di tensione netta

Dall'analisi del grafico di figura 7.2.1c si vede come i dati relativi alle prove di fatica torsionali cadano sempre al di sotto rispetto a quelli relativi alle prove di fatica assiali. Essendo però le pendenze molto simili si prova a riassumere i dati con un'unica banda di dispersione, come visualizzato nel grafico di figura 7.2.1d.

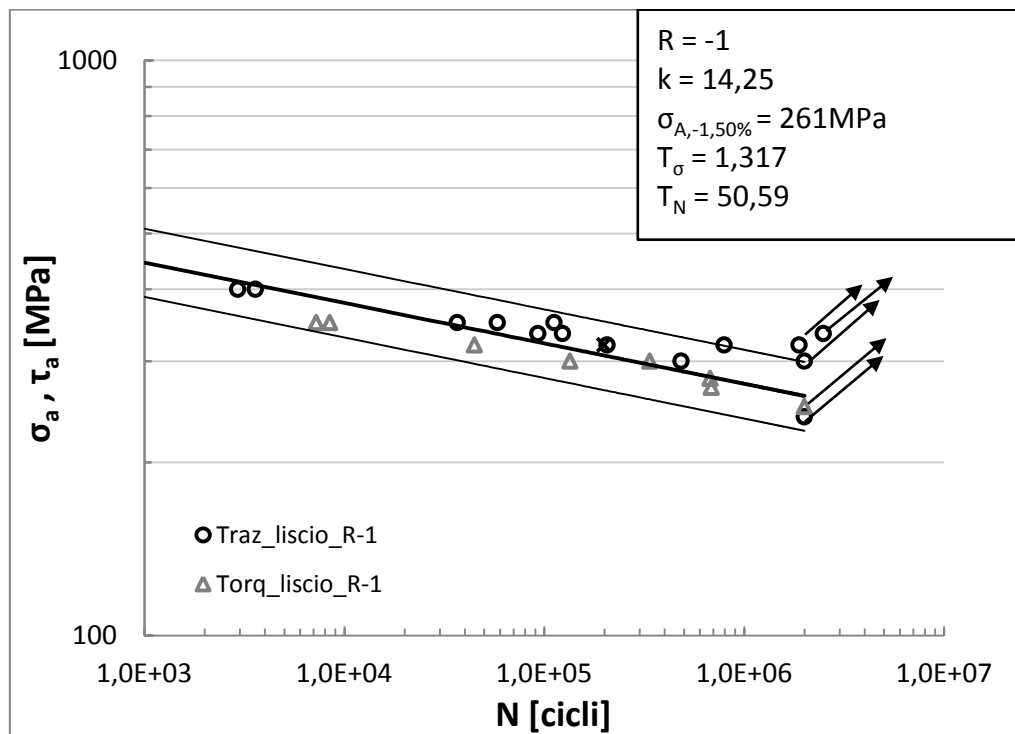


Figura 7.2.1d Prove di fatica assiali e torsionali a R-1 in termini di ampiezza di tensione netta

Come visualizzato nel grafico in ordinata sono riportati i valori delle ampiezze della tensione principale  $\sigma_1$  che in prove di fatica puramente assiale corrisponde con l'ampiezza di tensione ed in prove puramente torsionali corrisponde con l'ampiezza della tensione tangenziale applicata. Sono riportati inoltre i valori della pendenza  $k$  e dei coefficienti di dispersione in tensione e in vita. Proprio il valore elevato di quest'ultimo rende la banda inappropriata per una adeguata progettazione o verifica a fatica.

### 7.2.2 Confronto prove assiali-torsionali in termini di energia dissipata per ciclo

Nelle tabelle 7.2.2a,b sono riassunti tutti i risultati delle prove sperimentali analizzati in termini di densità di energia dissipata rispettivamente nelle prove di fatica assiali e in quelle torsionali a rapporto di ciclo R-1.

Tabella 7.2.2a Risultati delle prove di fatica assiali a R-1 in termini di densità di energia dissipata Q

NOME PROVINO	R	f [Hz]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Traz_liscio_R-1_02	-1	9	48	0,048	2000000	1
Traz_liscio_R-1_03	-1	0,3	3483	3,483	2931	
Traz_liscio_R-1_04	-1	1	992	0,992	58260	
Traz_liscio_R-1_05	-1	3	246	0,246	793881	
Traz_liscio_R-1_06	-1	5	140	0,14	2000000	1
Traz_liscio_R-1_07	-1	2	512	0,512	123424	
Traz_liscio_R-1_08	-1	1	751	0,751	111949	
Traz_liscio_R-1_09	-1	2,5	252	0,252	2489072	1
Traz_liscio_R-1_10	-1	3	252	0,252	198187	
Traz_liscio_R-1_11	-1	3,5	275	0,275	1882442	2
Traz_liscio_R-1_12	-1	0,3	3278	3,278	3589	
Traz_liscio_R-1_13	-1	1	716	0,716	36728	
Traz_liscio_R-1_14	-1	2	500	0,5	92926	
						1 prova interrotta prima della rottura
						2 prova interrotta per rottura afferraggio

Tabella 7.2.2b Risultati delle prove di fatica torsionali a R-1 in termini di densità di energia dissipata Q

PROVINO	R	f [Hz]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Torq_liscio_R-1_01	-1	1,3	353,5	0,3535	337176	
Torq_liscio_R-1_02	-1	0,3	2132	2,132	8454	
Torq_liscio_R-1_03	-1	0,6	894	0,894	44757	
Torq_liscio_R-1_04	-1	1,3	571	0,571	134479	
Torq_liscio_R-1_05	-1	3	256	0,256	675666	
Torq_liscio_R-1_06	-1	0,3	2477	2,477	7235	
Torq_liscio_R-1_07	-1	4	267	0,267	684811	
Torq_liscio_R-1_08	-1	5	112	0,112	2000000	1

1 prova interrotta prima della rottura

Le due serie di dati riassunte nelle tabelle 7.2.2a,b sono messe a confronto nel grafico di figura 7.2.2c che riporta in ascissa il numero di cicli a rottura e in ordinata la densità di energia dissipata.

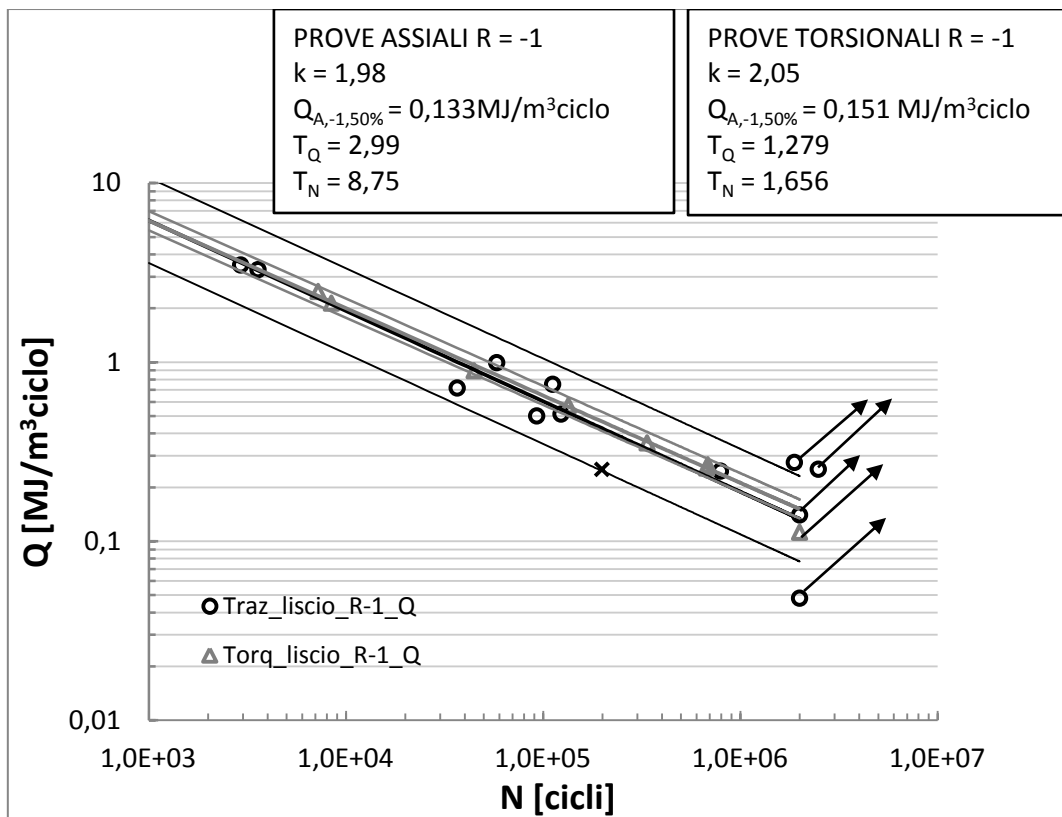


Figura 7.2.2c Confronto prove di fatica assiali e torsionali a R-1 in termini di densità di energia dissipata

Dall'analisi del grafico 7.2.2c si nota come i punti relativi alle prove di fatica assiali e quelli relativi alle prove di fatica torsionali sono riassunti da bande di dispersione praticamente identiche per rapporto di sollecitazione R=-1. L'unica differenza sta nel

fatto che la banda relativa alle prove assiali è molto più allargata. Si prova allora a riassumere tutti i dati relativi a prove assiali e torsionali a rapporto di ciclo R-1 in un'unica banda di dispersione che viene riportata nel grafico di figura 7.2.2d.

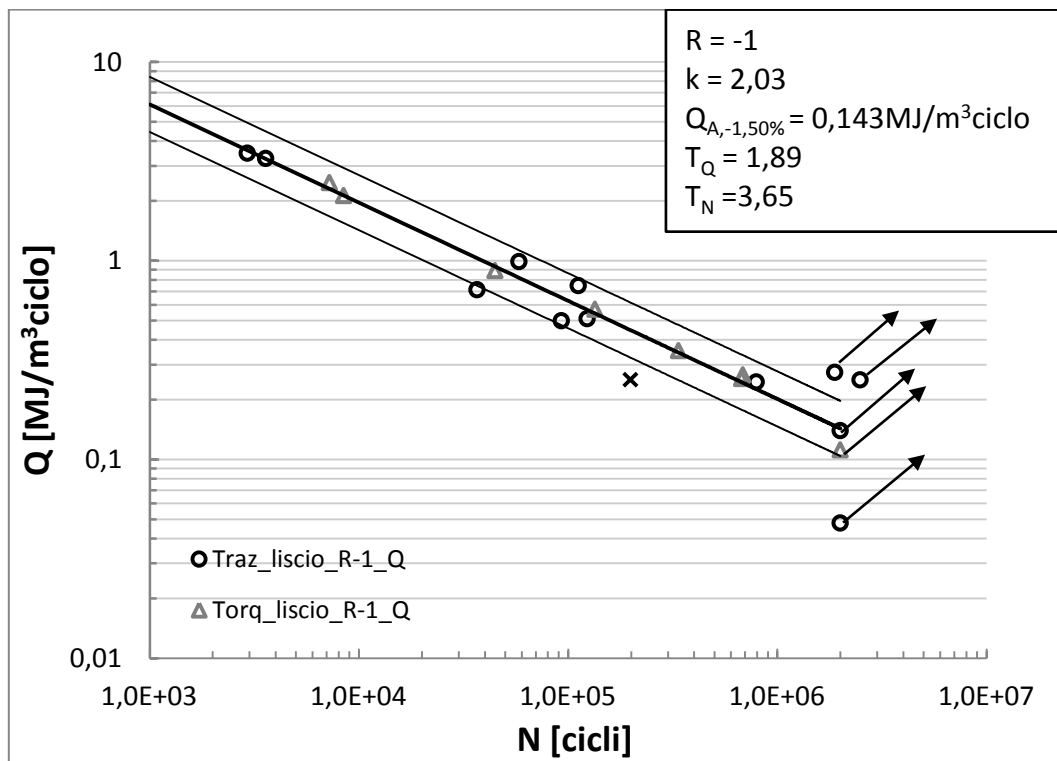


Figura 7.2.2d Prove di fatica assiali e torsionali a R-1 in termini di densità di energia dissipata

Dall'analisi del grafico si figura 7.2.2d si possono fare le seguenti considerazioni:

- I risultati delle prove assiali e torsionali eseguite a rapporto di ciclo R-1 possono essere riassunte da un'unica banda di dispersione utilizzando l'approccio energetico basato sul parametro densità di energia dissipata
- a differenza dell'approccio basato sull'ampiezza di tensione, la sintesi dei risultati con un'unica banda di dispersione consente di stringere la banda stessa ottenendo coefficienti di dispersione in vita modesti ed indicati per una corretta verifica a fatica
- l'esclusione dall'analisi del provino Traz\_liscio\_R-1\_10, a causa della anomala superficie di frattura riscontrata, viene maggiormente avvalorata in quanto si vede molto bene come il dato (indicato con una crocetta) presenta un comportamento diverso da tutti gli altri

Questi aspetti indicano in definitiva che il metodo basato sulla densità di energia dissipata per ciclo consente, almeno stando ai risultati di queste prove, di studiare il comportamento a fatica del materiale indipendentemente dal tipo di sollecitazione



applicata, sia essa una sollecitazione assiale o torsionale, almeno per quanto riguarda rapporti di sollecitazione costanti e pari a R=-1.

### 7.3 EFFETTO DEL TIPO DI SOLLECITAZIONE PER PROVE A RAPPORTO DI CICLO R0,1

In questo paragrafo si confrontano i risultati relativi alle prove di fatica assiali con quelli relativi alle prove di fatica torsionali, eseguite in entrambi i casi a rapporto di ciclo costante e pari a R=0,1. Come è stato fatto per le prove R=-1 si confronteranno dapprima i risultati ottenuti in termini di ampiezza di tensione ( $\sigma_a$  e  $\tau_a$ ) e successivamente gli stessi dati rianalizzati in termini di densità di energia dissipata Q.

#### 7.3.1 Confronto prove assiali-torsionali in termini di ampiezza di tensione

Nelle tabelle 7.3.1a,b sono riassunti tutti i risultati delle prove sperimentali analizzati in termini di tensione netta rispettivamente nelle prove di fatica assiali e in quelle torsionali a rapporto di ciclo R0,1.

Tabella 7.3.1a Risultati delle prove di fatica assiali a R0,1 in termini di ampiezza di tensione  $\sigma_a$

PROVINO	$\sigma_a$ [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	R	f [Hz]	$N_f$	NOTE
Traz_liscio_R0,1_01	200	244,44	0,1	20,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_02	250	305,56	0,1	10,0	92656	
Traz_liscio_R0,1_03	280	342,22	0,1	6,0	33460	
Traz_liscio_R0,1_05	270	330,00	0,1	8,0	28649	
Traz_liscio_R0,1_06	235	287,22	0,1	13,0	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_09	250	305,56	0,1	11,0	128110	
Traz_liscio_R0,1_10	240	293,33	0,1	12,0	1564740	2
Traz_liscio_R0,1_11	270	330,00	0,1	8,0	33273	
Traz_liscio_R0,1_12	270	330,00	0,1	8,0	35658	
Traz_liscio_R0,1_13	300	366,67	0,1	3,5	5430	
Traz_liscio_R0,1_14	300	366,67	0,1	3,5	2773	
Traz_liscio_R0,1_15	290	354,44	0,1	4,5	5307	
Traz_liscio_R0,1_16	290	354,44	0,1	4,5	10275	
Traz_liscio_R0,1_17	240	293,33	0,1	12,5	2000000	1
						1 prova interrotta prima della rottura
						2 prova interrotta per rottura afferraggio

Tabella 7.3.1b Risultati delle prove di fatica torsionali a R0,1 in termini di ampiezza di tensione  $\tau_a$

PROVINO	$\tau_a$ [Mpa]	$\tau_{MED}$ [Mpa]	R	f	$N_f$	NOTE
Torq_liscio_R0,1_01	250	305,56	0,1	5	225063	
Torq_liscio_R0,1_02	280	342,22	0,1	4,5	184775	
Torq_liscio_R0,1_03	300	366,67	0,1	4	102403	
Torq_liscio_R0,1_04	220	268,89	0,1	10	751016	
Torq_liscio_R0,1_05	200	244,44	0,1	20	2000000	1
Torq_liscio_R0,1_06	320	391,11	0,1	2	7180	
Torq_liscio_R0,1_07	300	366,67	0,1	2	8648	
Torq_liscio_R0,1_08	280	342,22	0,1	3	74450	

1 prova interrotta prima della rottura

Le due serie di dati riassunte nelle tabelle 7.3.1a,b sono messe a confronto nel grafico di figura 7.3.1c che riporta in ascissa il numero di cicli a rottura e in ordinata l'ampiezza di tensione applicata.

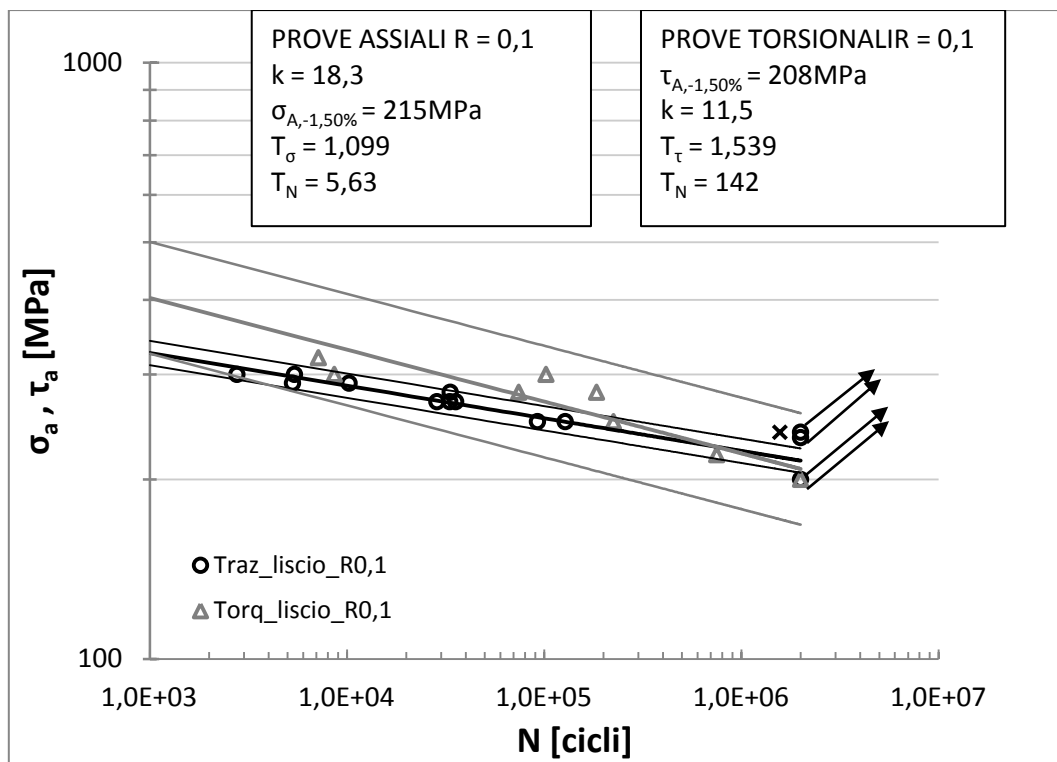


Figura 7.3.1c Confronto prove di fatica assiali e torsionali a R0,1 in termini di ampiezza di tensione netta

Dall'analisi del grafico di figura 7.2.1c si vede come i dati relativi alle prove di fatica torsionali sono riassunti da una banda di dispersione di pendenza diversa rispetto alla banda che descrive le prove di fatica assiali. È evidente che i risultati non sono sintetizzabili da un'unica banda di dispersione che presenti un valore accettabile del coefficiente di dispersione in vita.

### 7.3.2 Confronto prove assiali-torsionali in termini di energia dissipata per ciclo

Nelle tabelle 7.3.2a,b sono riassunti tutti i risultati delle prove sperimentali analizzati in termini di densità di energia dissipata rispettivamente nelle prove di fatica assiali e in quelle torsionali a rapporto di ciclo R0,1.

Tabella 7.3.2a Risultati delle prove di fatica assiali a R0,1 in termini di densità di energia dissipata Q

PROVINO	R	f	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Traz_liscio_R0,1_01	0,1	20,0	24	0,024	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_02	0,1	10,0	72	0,072	92656	
Traz_liscio_R0,1_05	0,1	8,0	85	0,085	28649	
Traz_liscio_R0,1_06	0,1	13,0	46	0,046	2000000	1
Traz_liscio_R0,1_09	0,1	11,0	56	0,056	128110	
Traz_liscio_R0,1_10	0,1	12,0	49	0,049	1564740	2
Traz_liscio_R0,1_11	0,1	8,0	79,5	0,0795	33273	
Traz_liscio_R0,1_12	0,1	8,0	77	0,077	35658	
Traz_liscio_R0,1_13	0,1	3,5	205	0,205	5430	
Traz_liscio_R0,1_16	0,1	4,5	136	0,136	10275	
Traz_liscio_R0,1_17	0,1	12,5	50	0,05	2000000	1
1 prova interrotta prima della rottura						
2 prova interrotta per rottura afferraggio						

Tabella 7.3.2b Risultati delle prove di fatica torsionali a R0,1 in termini di densità di energia dissipata Q

PROVINO	R	f	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [MJ/m <sup>3</sup> ciclo]	N <sub>f</sub>	NOTE
Torq_liscio_R0,1_01	0,1	5	130	0,13	225063	
Torq_liscio_R0,1_02	0,1	4,5	139	0,139	184775	
Torq_liscio_R0,1_03	0,1	4	173	0,173	102403	
Torq_liscio_R0,1_04	0,1	10	64	0,064	751016	
Torq_liscio_R0,1_05	0,1	20	32	0,032	2000000	1
Torq_liscio_R0,1_06	0,1	2	392	0,392	7180	
Torq_liscio_R0,1_07	0,1	2	290	0,29	8648	
Torq_liscio_R0,1_08	0,1	3	208	0,208	74450	
1 prova interrotta prima della rottura						

Le due serie di dati riassunte nelle tabelle 7.3.2a,b sono messe a confronto nel grafico di figura 7.3.2c che riporta in ascissa il numero di cicli a rottura e in ordinata la densità di energia dissipata.

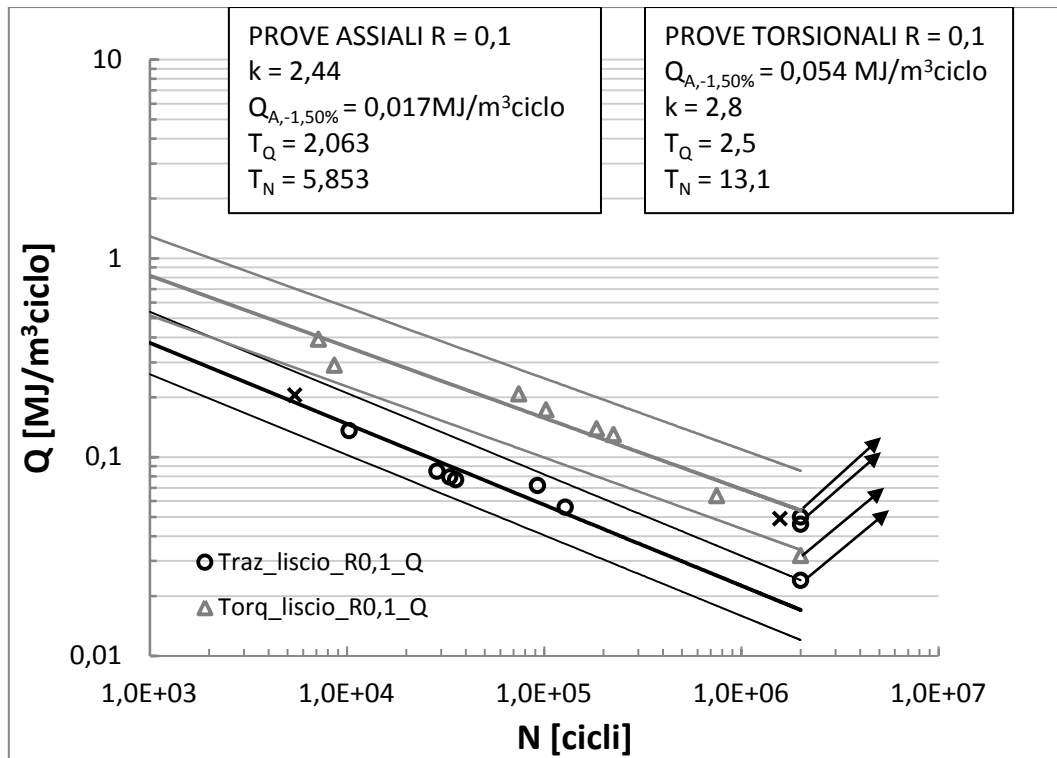


Figura 7.3.2c Confronto prove di fatica assiali e torsionali a R0,1 in termini di densità di energia dissipata

Dall'analisi del grafico 7.3.2c si nota come i punti relativi alle prove di fatica assiali e quelli relativi alle prove di fatica torsionali sono riassunti da bande di dispersione che presentano grosso modo la stessa pendenza. La banda che descrive le prove torsionali risulta però traslata verso valori più elevati dell'energia dissipata per ciclo. Questo significa che a parità di numero di cicli a rottura i valori di Q relativi ad una sollecitazione di torsione sono più elevati. Non si registra dunque, per le prove a rapporto di ciclo R0,1, lo stesso comportamento evidenziato nelle prove a R-1. Non si riesce cioè a riassumere con un'unica banda di dispersione il comportamento a fatica del materiale in modo indipendente dal tipo di sollecitazione alla quale viene sottoposto né con l'approccio classico né con quello energetico.

#### 7.4 METODO BASATO SULLA DETERMINAZIONE DEL RAFFREDDAMENTO ADIABATICO APPLICATO A TUTTE LE PROVE DI TRAZIONE E TORSIONE

Il metodo descritto nel paragrafo 4.4, valido per le prove assiali è stato esteso anche alle prove di fatica torsionali a rapporto di ciclo R-1 e R0,1 eseguiti in questo lavoro.

In questo caso però la relazione 4.4.3 fornisce un valore del  $\Delta T$  adiabatico uguale a zero in quanto le tensioni  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  sono uguali ed opposte nel caso di sollecitazione di torsione semplice. Osservando le superfici di frattura di diversi provini sollecitati a torsione, si vede che per bassi carichi la propagazione della cricca avviene a  $45^\circ$ , ovvero nella direzione della prima tensione principale. Come prima approssimazione si è allora

assunto che la variazione di temperatura sia proporzionale alla sola  $\sigma_1$  mentre si è assunto che la tensione  $\sigma_3$  sia non danneggiante. In questo modo si è riusciti a pervenire al calcolo del parametro  $(\Delta T/T)$  adiabatico anche per le prove di torsione. In particolare si effettua la seguente trasformazione:

$$C = Q\sigma_{1,MAX}^k \longrightarrow C = Q\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{ad}^k \quad (4.4.4)$$

Dove  $\sigma_{1,MAX}$  rappresenta la tensione massima  $\sigma_{MAX}$  per le prove assiali e la tensione tangenziale massima  $\tau_{MAX}$  per le prove torsionali. Si riassumono nel grafico 7.4.1 i risultati ottenuti con questa approssimazione.

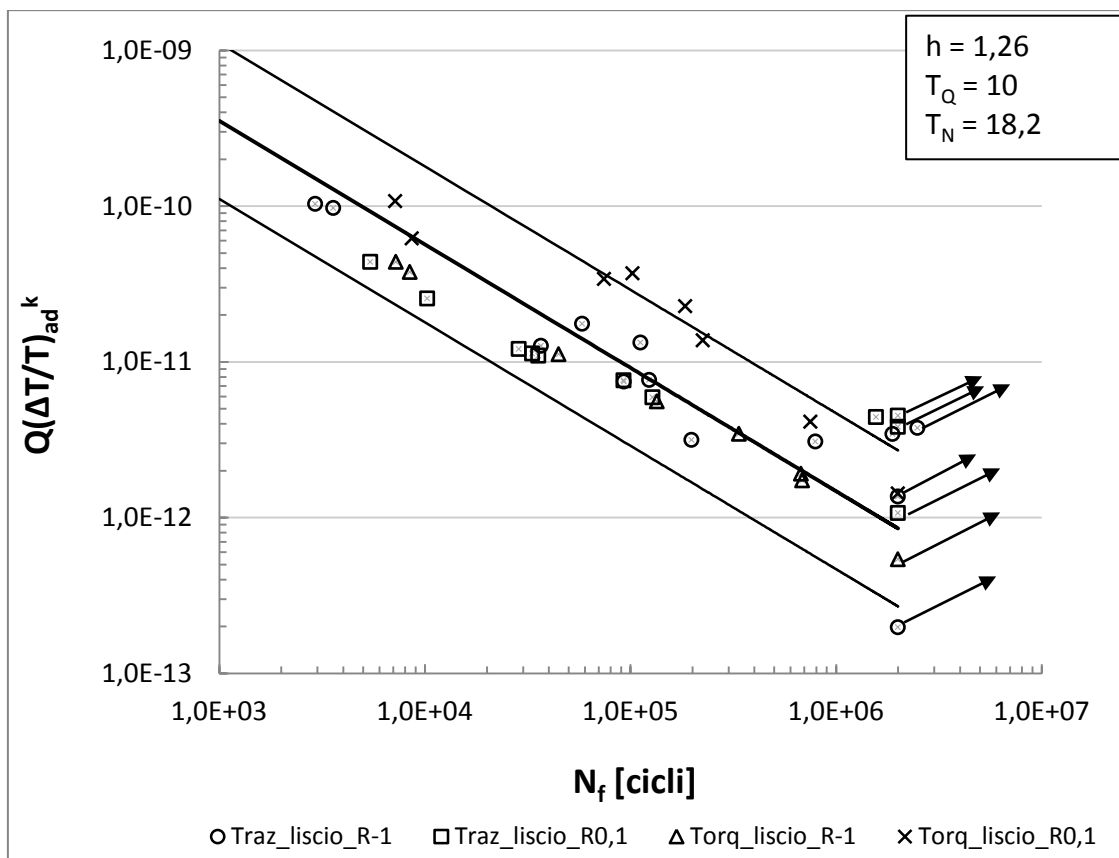


Figura 7.4.1 Sintesi di tutte le prove assiali e torsionali a rapporto di ciclo R=-1 e R=0,1 attraverso il parametro  $Q(\Delta T/T)_{ad}^k$

Dall'analisi del grafico 7.4.1 Si nota come l'approssimazione eseguita sia abbastanza grossolana in quanto i dati relativi alle prove torsionali ad R=0,1 stanno parecchio al di sopra rispetto a tutti gli altri. Questo comportamento trova riscontro anche osservando le superfici di frattura. Per i provini sottoposti a torsione a tensioni tangenziali massime elevate la rottura avviene lungo le direzioni delle stesse e non lungo la direzione della prima tensione principale. Questo sta ad indicare che molto probabilmente la tensione

$\sigma_3$  non può essere trascurata nel calcolo del parametro ( $\Delta T/T$ ). L'argomento è relativamente nuovo e va approfondito sia a livello teorico che sperimentale.

#### **7.4 CONCLUSIONI**

In questo capitolo si sono confrontati i risultati ottenuti nelle prove di fatica assiali con quelli ottenuti dalle prove di fatica torsionali a parità di rapporto di ciclo sia attraverso l'approccio classico basato sull'ampiezza di tensione sia con l'approccio basato sulla densità di energia dissipata.

Si è visto come l'approccio energetico, a differenza di quello classico, permette di riassumere i risultati relativi alle prove a rapporto di ciclo R-1 in un'unica banda di dispersione in modo indipendente dal tipo di sollecitazione applicata. La banda risulta inoltre molto ben definita presentando un valore del coefficiente di dispersione in vita  $T_N=3,65$  (Fig.7.2.2d) modesto e ideale per una corretta verifica a fatica. Infatti, se si fa riferimento ad un caso reale, una volta misurato il valore di Q in un componente in esercizio tramite il solo utilizzo di una termocoppia, entrando nella curva Q- $N_f$  di figura 7.2.2d si riuscirà a prevedere con una carta affidabilità il numero di cicli alla quale quel componente si romperà o se andrà oltre i 2 milioni di cicli indipendentemente dalla tipologia della sollecitazione applicata, sia essa di tipo assiale o torsionale.

Questo vantaggio sembra invece non esserci per le prove eseguite a rapporto di ciclo R0,1. In questo caso infatti, né l'approccio basato sull'ampiezza di tensione né l'approccio energetico riescono a riassumere i comportamenti dei provini sollecitati a fatica assiale con quelli sollecitati a fatica torsionale.

L'esecuzione di ulteriori prove, sia a rapporti di ciclo come quelli utilizzati in questo lavoro, sia ad altri rapporti di ciclo, è indispensabile per comprendere se il comportamento rilevato per le prove a R-1 utilizzando l'approccio energetico, sia un'esclusiva solo di quel rapporto o sia estendibile anche ad altri rapporti di ciclo.

## CAPITOLO 8

### CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi sono state eseguite una serie di prove sperimentali nelle quali dei provini di acciaio inossidabile AISI304L sono stati sottoposti a prove di fatica assiali e torsionali. Per le due diverse modalità di sollecitazione sono state eseguite prove a diverso rapporto di ciclo, in particolare prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R-1 e R0,1 e prove di fatica torsionali a rapporto di ciclo R-1 e R0,1.

I risultati di tutte le prove sono stati poi analizzati sia in termini di ampiezze di tensione, utilizzando l'approccio classico allo studio della fatica, sia in termini energetici attraverso la valutazione del parametro densità di energia dissipata  $Q$ , utilizzando il modello Meneghetti 2007 descritto nel capitolo 1.

Gli obiettivi principali del lavoro erano:

- confermare i vantaggi dell'approccio energetico riscontrati in precedenti lavori, in particolare confrontando i risultati ottenuti con quelli recentemente pubblicati dall'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) [3]
- valutare la possibilità di riassumere i risultati di prove eseguite a diverso rapporto di ciclo in un'unica curva, estendendo la validità dell'approccio energetico anche ai casi di tensione media non nulla senza la necessità di una taratura della curva caratteristica per ogni valore della tensione media
- valutare la possibilità di riassumere i risultati di prove eseguite con diverse modalità di sollecitazione (assiali e torsionali) in un'unica curva di progetto in modo da rendere lo studio della fatica indipendente dal tipo di sollecitazione applicata

Il primo obiettivo è stato raggiunto, in quanto i risultati delle prove assiali a rapporto di ciclo R-1, elaborati in termini di densità di energia dissipata, si sono dimostrati compatibili con la banda di dispersione pubblicata dall'AIAS nella quale sono analizzate prove allo stesso rapporto di ciclo (R-1), sullo stesso materiale (AISI304L) ma su provini di differenti geometrie. L'analisi in termini di ampiezza di tensione netta ha invece fornito una curva di fatica completamente diversa rispetto a quelle presentate in AIAS. I risultati appena esposti confermano i vantaggi del metodo energetico rispetto a quello classico con riguardo all'indipendenza del primo rispetto alla geometria del provino sottoposto a sollecitazioni di fatica.

Con riguardo alla possibilità di rendere indipendente lo studio del fenomeno della fatica dal rapporto di sollecitazione si è visto che raggruppando le prove assiali in base al numero di cicli a rottura è stato possibile individuare una serie di curve, chiamate curve

isodurata, in un grafico  $Q-\sigma_{MAX}$  (Fig. 4.3.1d) in cui non si tiene conto del rapporto di ciclo di ciascuna prova ma soltanto del numero di cicli a rottura.

Si è inoltre visto che queste curve, in un grafico doppio logaritmico, tendono ad avere una pendenza costante (Fig. 4.3.1e) e si è dunque valutata la possibilità di utilizzare un valore medio tra le pendenze calcolate che possa essere utilizzato come una caratteristica del materiale.

Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti (entro un certo intervallo) allo stesso numero di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione  $R$  applicato durante la prova, si è ricavato per ciascun punto il valore della costante definita nel seguente modo:

$$C = Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}}$$

dove  $k_{MEDIA}$  indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata su un grafico doppio logaritmico (fig.4.3.2c). Si diagramma poi il valore della costante così determinata in funzione del numero di cicli a rottura di ciascun provino ottenendo una serie di punti che vengono ben approssimati da una curva di equazione del tipo:

$$Q \cdot \sigma_{MAX}^{k_{MEDIA}} \cdot N_f^h = COST.$$

che rappresenta ancora una retta in un grafico doppio logaritmico (fig. 4.3.2e).

Si è dunque proceduto con l'analisi utilizzando solo i dati di questo lavoro cercando di ottimizzare la curva di figura 4.3.2e dal punto di vista pratico. Infatti la presenza nell'equazione del parametro  $\sigma_{MAX}$  non consente di applicare tale metodo con semplicità, in quanto la determinazione della tensione massima presente nel punto critico di un componente in esercizio può essere effettuata solo attraverso l'incollaggio di estensimetri oppure con una simulazione agli elementi finiti. L'idea è stata quindi quella di sostituire il parametro  $\sigma_{MAX}$  con un altro parametro legato sempre ad una variazione di temperatura, e quindi ancora rilevabile con l'utilizzo della sola termocoppia.

Grazie agli studi sulla teoria della termo elasticità si è partiti dall'equazione 4.4.3 per la determinazione di un nuovo parametro in sostituzione della tensione massima. Dopo alcune prove si è arrivati infine alla determinazione del parametro  $(\Delta T/T)$  adiabatico che sostituito alla  $\sigma_{MAX}$  permette di ottenere una nuova costante energetica per la sintesi dei dati in funzione del numero di cicli a rottura (fig. 4.4.3a).



La banda di dispersione di figura 4.4.3a riassume i dati delle prove di fatica assiali in modo indipendente dal rapporto di ciclo attraverso l'equazione:

$$Q \cdot \left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{ad}^k \cdot N_f^h = COST \quad (4.4.6)$$

dove h è la pendenza della curva (=1,45 per queste prove) mentre k è la pendenza media calcolata delle curve isodurata.

Il vantaggio principale di questo metodo sta nel fatto che la verifica a fatica di un componente in esercizio può essere fatta attraverso l'utilizzo di una sola termocoppia e di un sistema di acquisizione della temperatura, attraverso la misurazione di Q che può avvenire arrestando istantaneamente la sollecitazione a cui è sottoposto il componente da verificare e misurando il raffreddamento, e attraverso la misurazione del raffreddamento subito dal componente in corrispondenza all'applicazione di un carico statico che non superi il limite di  $\sigma_{p0,2/3}$  precedentemente definito.

Si ritiene che la validità del metodo debba essere confermata dall'esecuzione di altre prove, anche a rapporti di ciclo differenti da quelli utilizzati in questa campagna di prove. Inoltre dev'essere valutata la possibilità di estendere il metodo anche a diverse geometrie, cosa che non avveniva in [6]. Importante sarà il fatto di utilizzare per le prove sempre lo stesso materiale utilizzato in questo lavoro.

Infine si è valutata la possibilità di rendere lo studio del fenomeno della fatica indipendentemente anche dalla tipologia della sollecitazione applicata attraverso l'uso dell'approccio energetico.

Si è visto come tale approccio, a differenza di quello classico, permette di riassumere i risultati relativi alle prove a rapporto di ciclo R-1 in un'unica banda di dispersione in modo indipendente dal tipo di sollecitazione applicata. La banda risulta inoltre molto ben definita presentando un valore del coefficiente di dispersione in vita  $T_N=3,65$  (Fig.7.2.2d) modesto e ideale per una corretta verifica a fatica. Infatti, se si fa riferimento ad un caso reale, una volta misurato il valore di Q in un componente in esercizio tramite il solo utilizzo di una termocoppia, entrando nella curva Q- $N_f$  di figura 7.2.2d si riuscirà a prevedere con una carta affidabilità il numero di cicli alla quale quel componente si romperà o se andrà oltre i 2 milioni di cicli indipendentemente dalla tipologia della sollecitazione applicata, sia essa di tipo assiale o torsionale.

Questo vantaggio sembra invece non esserci per le prove eseguite a rapporto di ciclo R0,1. In questo caso infatti, né l'approccio basato sull'ampiezza di tensione né l'approccio energetico riescono a riassumere i comportamenti dei provini sollecitati a fatica assiale con quelli sollecitati a fatica torsionale.

L'esecuzione di ulteriori prove, sia a rapporti di ciclo come quelli utilizzati in questo lavoro, sia ad altri rapporti di ciclo, è indispensabile per comprendere se il comportamento rilevato per le prove a R-1 utilizzando l'approccio energetico, sia un' esclusiva solo di quel rapporto o sia estendibile anche ad altri rapporti di ciclo.

## Appendice A

### RISULTATI PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R-1

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R-1. Ciascuna scheda presenta i dati caratteristici relativi alle modalità di prova e quelli relativi ai diversi raffreddamenti svolti per ciascun provino. Vengono inoltre riportati il grafico dell'energia specifica dissipata  $Q$  in funzione del numero di cicli e l'andamento della temperatura in corrispondenza a raffreddamenti eseguiti in diverse fasi della vita (tra parentesi viene indicata proprio la percentuale di vita a cui viene eseguito quel raffreddamento).

Con i provini da 07 a 16 è stato inoltre utilizzato un estensometro assiale per le misure di deformazione. Grazie ai dati provenienti proprio dall'estensometro è stato possibile tracciare in modo più preciso gli andamenti della rigidità relativa e della deformazione media durante le prove. Inoltre è stato possibile tracciare l'andamento dell'energia meccanica spesa  $W$  calcolata come area del ciclo d'isteresi in funzione del numero di cicli per poter fare un confronto con l'andamento di  $Q$ .

Il valore della rigidità relativa è stato normalizzato non rispetto al valore iniziale ma rispetto al valore di rigidità calcolato non appena la temperatura del provino si è stabilizzata attorno ai  $60^{\circ}\text{C}$  in quanto si è visto come proprio la temperatura influenza molto i valori di deformazione e quindi anche della rigidità stessa.

Viste le difficoltà nel rendere stabile l'estensometro, soprattutto nell'esecuzione dei raffreddamenti dove la macchina viene bruscamente interrotta e l'estensometro può traslare, sono state eseguite due prove (15-16) senza effettuare raffreddamenti in modo da lasciarne indisturbata la misura. Per questi provini mancano dunque i grafici relativi all'energia dissipata  $Q$  mentre viene riportato l'andamento dell'energia meccanica Spesa  $W$ .

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura A.1.

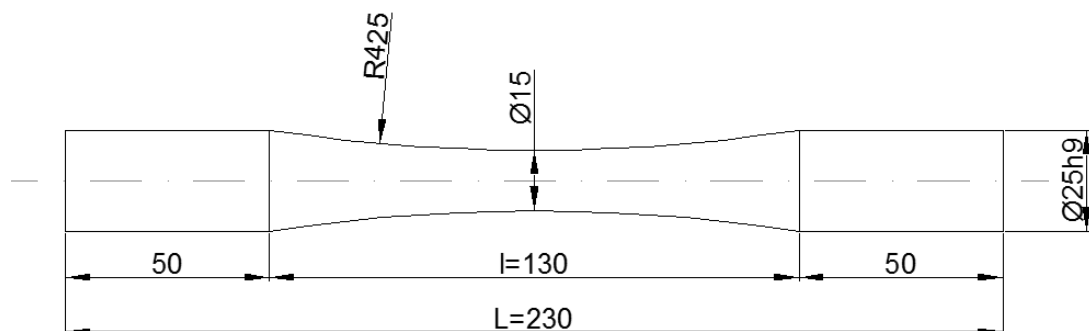


Figura A.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_02</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,02\text{mm}$	A = 177,19 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 42,52 kN	F <sub>MIN</sub> = -42,52 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 42,52 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 240 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -240 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 240 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>fermato a 2000000 cicli [NON ROTTO]</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 48 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10587	0,5%	32,0	10	0,1224	483,48	48,35
2	19684	1,0%	32,3	9	0,1024	404,48	44,94
3	31984	1,6%	32,8	9	0,106	418,70	46,52
4	45938	2,3%	33,2	9	0,1108	437,66	48,63
5	59995	3,0%	33,4	9	0,1089	430,16	47,80
6	75083	3,8%	33,9	9	0,1129	445,96	49,55
7	100890	5,0%	30,1	9	0,1064	420,28	46,70
8	130395	6,5%	33,1	9	0,1088	429,76	47,75
9	160656	8,0%	32,6	9	0,1096	432,92	48,10
10	190114	9,5%	33,2	9	0,1166	460,57	51,17
11	220102	11,0%	33,6	9	0,1099	434,11	48,23
12	250398	12,5%	34,0	9	0,115	454,25	50,47
13	300223	15,0%	34,7	9	0,1023	404,09	44,90
14	351589	17,6%	30,9	9	0,11	434,50	48,28
15	400234	20,0%	31,4	9	0,1132	447,14	49,68
16	450971	22,5%	31,8	9	0,1008	398,16	44,24
17	500212	25,0%	32,2	9	0,0998	394,21	43,80
18	550300	27,5%	33,0	9	0,1065	420,68	46,74
19	1049956	52,5%	30,6	9	0,1092	431,34	47,93
20	1104977	55,2%	31,2	9	0,0991	391,45	43,49
21	1152460	57,6%	31,5	9	0,1063	419,89	46,65
22	1200026	60,0%	31,8	9	0,1061	419,10	46,57
23	1250933	62,5%	32,1	9	0,1022	403,69	44,85
24	1301065	65,1%	32,5	9	0,104	410,80	45,64
25	1820487	91,0%	30,6	9	0,0986	389,47	43,27

NOTE : la prova è stata eseguita senza l'utilizzo dell'estensometro assiale. I valore di rigidezza sono ricavati dal segnale proveniente dal sensore di spostamento LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) della macchina di prova.

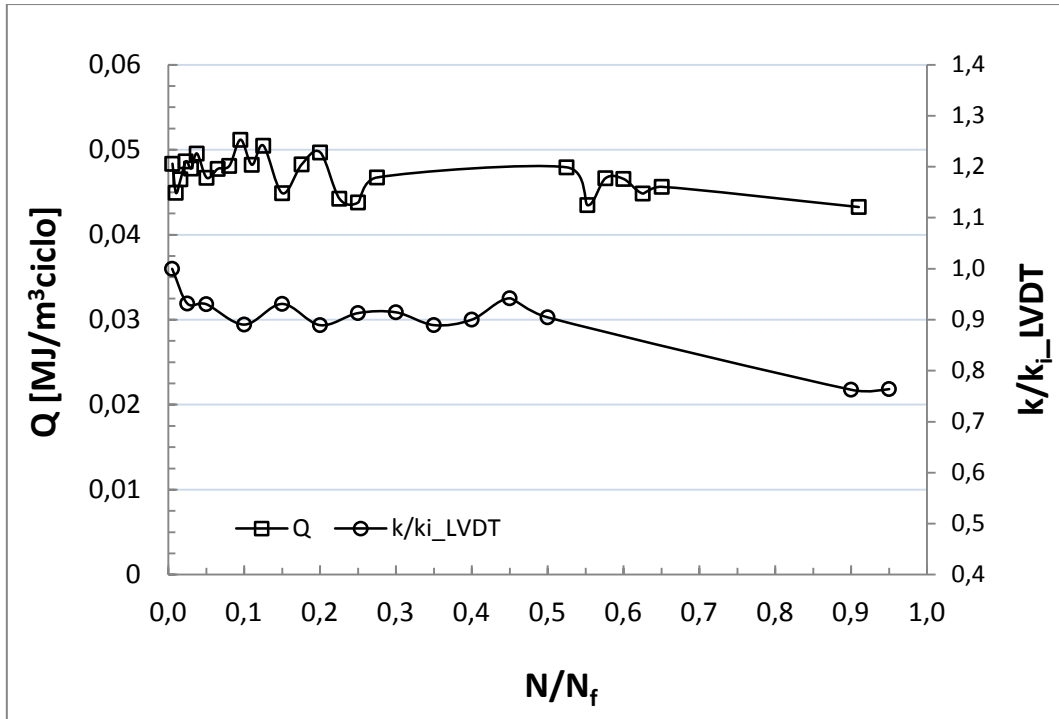


Figura A2.1 Andamento della rigidezza relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_02

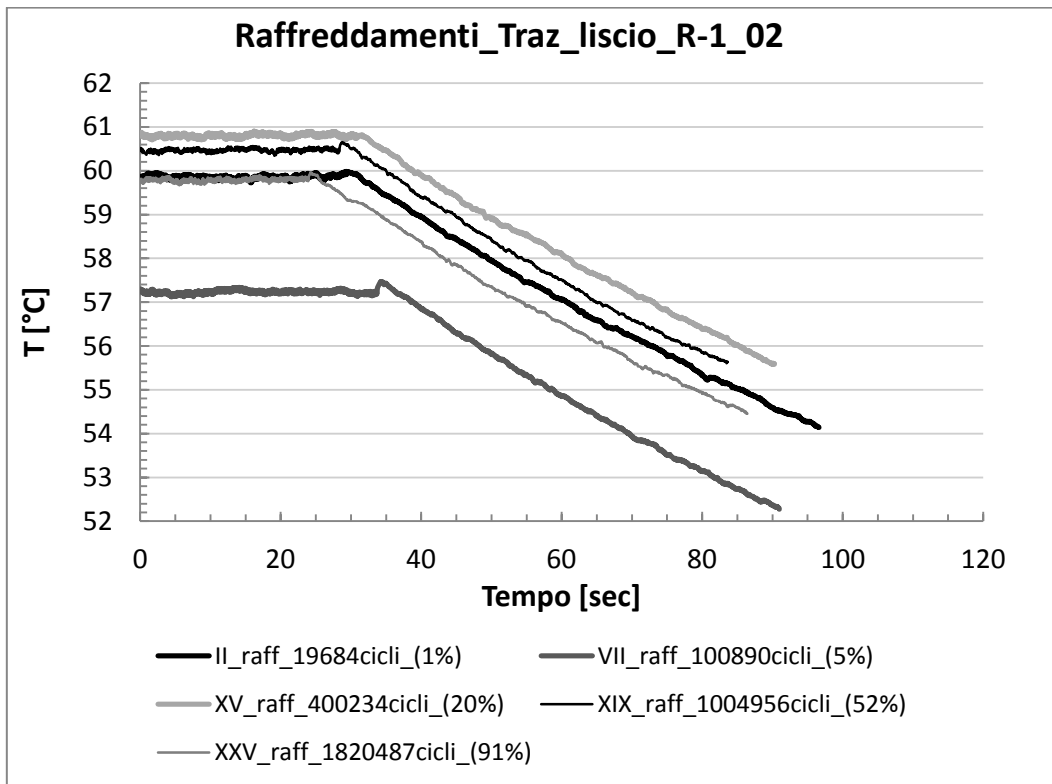


Figura A2.2 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_02

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_03</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 70,69 kN	F <sub>MIN</sub> = -70,69 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 70,69 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -400 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 2931 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 3483 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	967	33,0%	31,1	0,4	0,3246	1282,17	3205,43
2	1293	44,1%	31,3	0,3	0,2576	1017,52	3391,73
3	1617	55,2%	31,3	0,3	0,2715	1072,43	3574,75
4	1895	64,7%	31,4	0,25	0,2394	945,63	3782,52
5	2177	74,3%	31,4	0,2	0,2721	1074,80	5373,98
6	2415	82,4%	31,6	0,2	0,2592	1023,84	5119,20
7	2853	97,3%	31,8	0,2	0,2633	1040,04	5200,18

NOTE : la prova è stata eseguita senza l'utilizzo dell'estensometro assiale. I valore di rigidezza sono ricavati dal segnale proveniente dal sensore di spostamento LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) della macchina di prova.



Figura A3.1 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_03

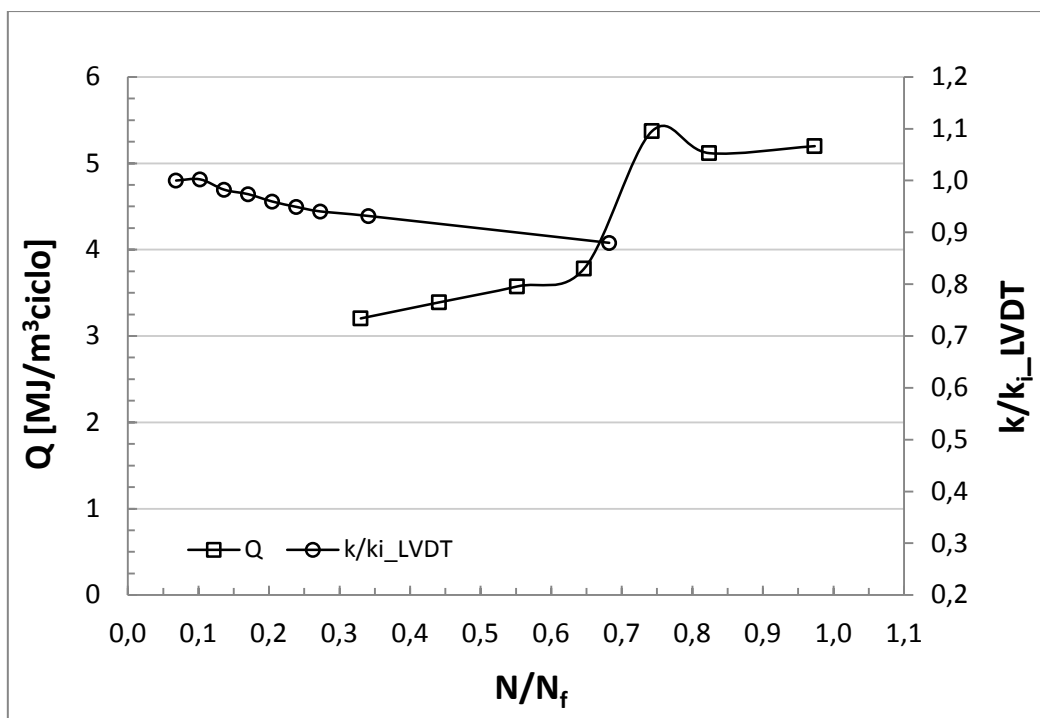


Figura A3.2 Andamento della rigidzza relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_03

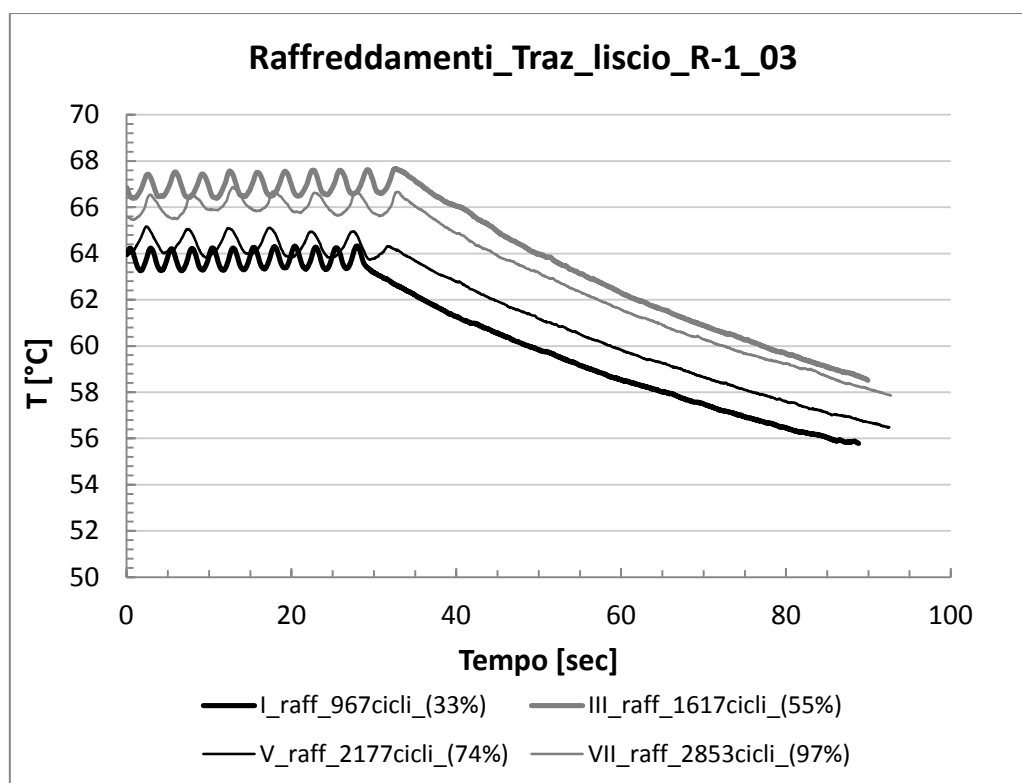


Figura A3.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_03

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_04</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,05\text{mm}$	A = 177,89 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$F_{MAX} = 62,26 \text{ kN}$	$F_{MIN} = -62,26 \text{ kN}$	$F_{MED} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 62,26 \text{ kN}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 58260</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 992 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	2356	4,0%	32,0	2	0,1879	742,21	371,10
2	3893	6,7%	32,0	1,5	0,1689	667,16	444,77
3	4662	8,0%	32,0	1,5	0,1763	696,39	464,26
4	5783	9,9%	32,5	1,5	0,216	853,20	568,80
5	6729	11,5%	32,5	1,5	0,2004	791,58	527,72
6	8025	13,8%	32,5	1,5	0,2336	922,72	615,15
7	10034	17,2%	32,8	1	0,1608	635,16	635,16
8	12018	20,6%	32,8	1	0,2016	796,32	796,32
9	14055	24,1%	32,8	1	0,1696	669,92	669,92
10	15024	25,8%	33,0	1	0,1958	773,41	773,41
11	17021	29,2%	26,0	1,2	0,2122	838,19	698,49
12	18701	32,1%	26,5	1,2	0,3082	1217,39	1014,49
13	20044	34,4%	27,0	1,2	0,2156	851,62	709,68
14	22140	38,0%	27,5	1,2	0,1984	783,68	653,07
15	24331	41,8%	27,5	1,2	0,2403	949,19	790,99
16	28257	48,5%	28,6	1	0,3002	1185,79	1185,79
17	30345	52,1%	29,0	1	0,2419	955,51	955,51
18	33150	56,9%	30,0	1	0,2127	840,17	840,17
19	35096	60,2%	30,0	1	0,2444	965,38	965,38
20	37046	63,6%	29,8	1	0,2567	1013,97	1013,97
21	40694	69,8%	30,1	0,9	0,2901	1145,90	1273,22
22	43041	73,9%	26,0	1	0,2502	988,29	988,29
23	48052	82,5%	26,8	1	0,2372	936,94	936,94
24	51061	87,6%	28,6	1	0,324	1279,80	1279,80
25	55085	94,6%	29,5	0,9	0,222	876,90	974,33

NOTE : la prova è stata eseguita senza l'utilizzo dell'estensometro assiale. I valore di rigidezza sono ricavati dal segnale proveniente dal sensore di spostamento LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) della macchina di prova.



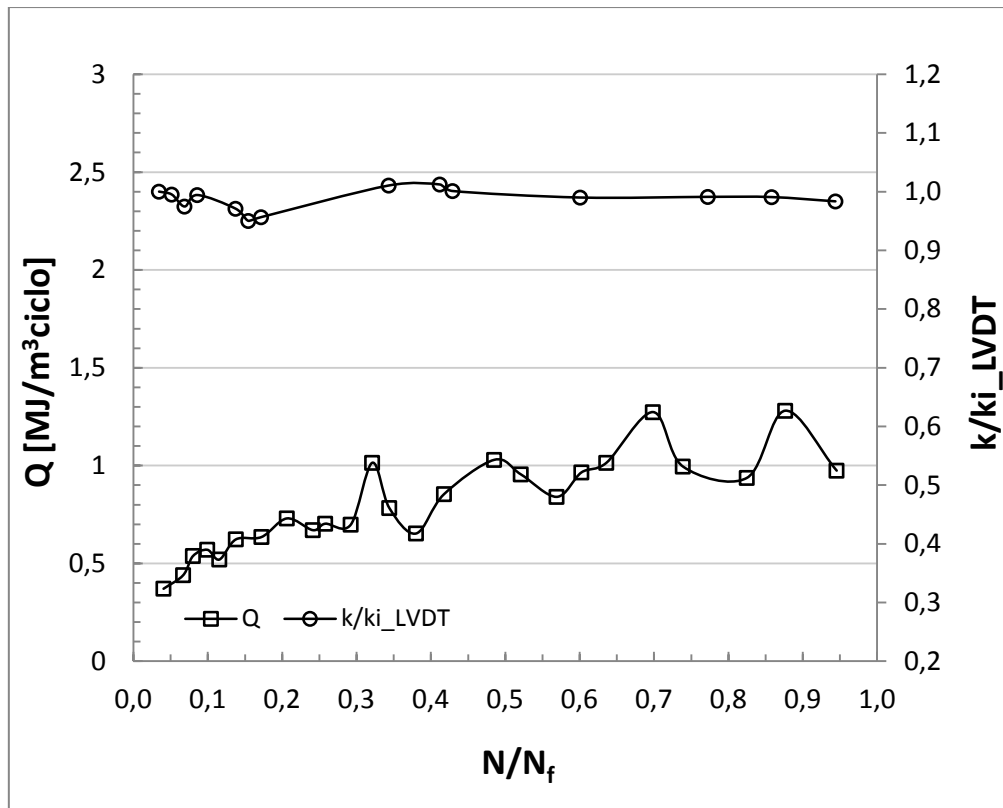


Figura A4.1 Andamento della rigidità relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_04

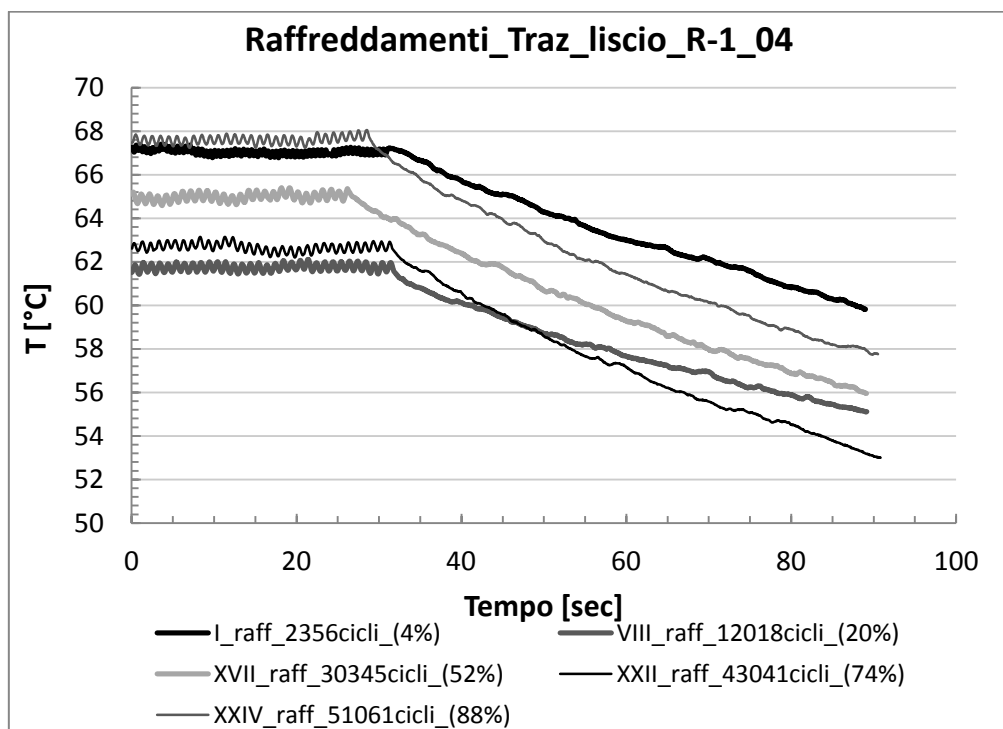


Figura A4.2 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_04



Figura A4.3 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_04

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_05</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,05\text{mm}$	A = 177,89 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 56,93 kN	F <sub>MIN</sub> = -56,93 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 56,93 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>Nf = 793881 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 246 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	8196	1,0%	30,5	3	0,1733	684,54	228,18
2	12225	1,5%	30,2	2,5	0,1279	505,21	202,08
3	15099	1,9%	30,4	2,5	0,1247	492,57	197,03
4	20887	2,6%	26,5	3	0,1851	731,15	243,72
5	32001	4,0%	26,9	3	0,1704	673,08	224,36
6	40489	5,1%	28,1	3	0,2328	919,56	306,52
7	51430	6,5%	29,0	2,8	0,2011	794,35	283,69
8	60262	7,6%	29,5	2,5	0,1717	678,22	271,29
9	70724	8,9%	29,8	2,5	0,172	679,40	271,76
10	80278	10,1%	30,5	2,4	0,1801	711,40	296,41
11	101403	12,8%	29,8	2	0,1449	572,36	286,18
12	150952	19,0%	31,0	2	0,1397	551,82	275,91
13	182750	23,0%	31,8	2,4	0,1601	632,40	263,50
14	300960	37,9%	30,0	2,4	0,1489	588,16	245,06
15	351302	44,3%	29,5	3	0,1753	692,44	230,81
16	450658	56,8%	21,0	3	0,1972	778,94	259,65
17	508155	64,0%	22,5	3	0,2168	856,36	285,45
18	600575	75,7%	23,5	3,5	0,2074	819,23	234,07
19	714092	89,9%	23,0	3,5	0,2144	846,88	241,97

NOTE : la prova è stata eseguita senza l'utilizzo dell'estensometro assiale. I valore di rigidità sono ricavati dal segnale proveniente dal sensore di spostamento LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) della macchina di prova. A causa di una errata sovrascrittura del file.dat i valori di rigidità per N/N<sub>f</sub> > 0,4 sono andati persi.

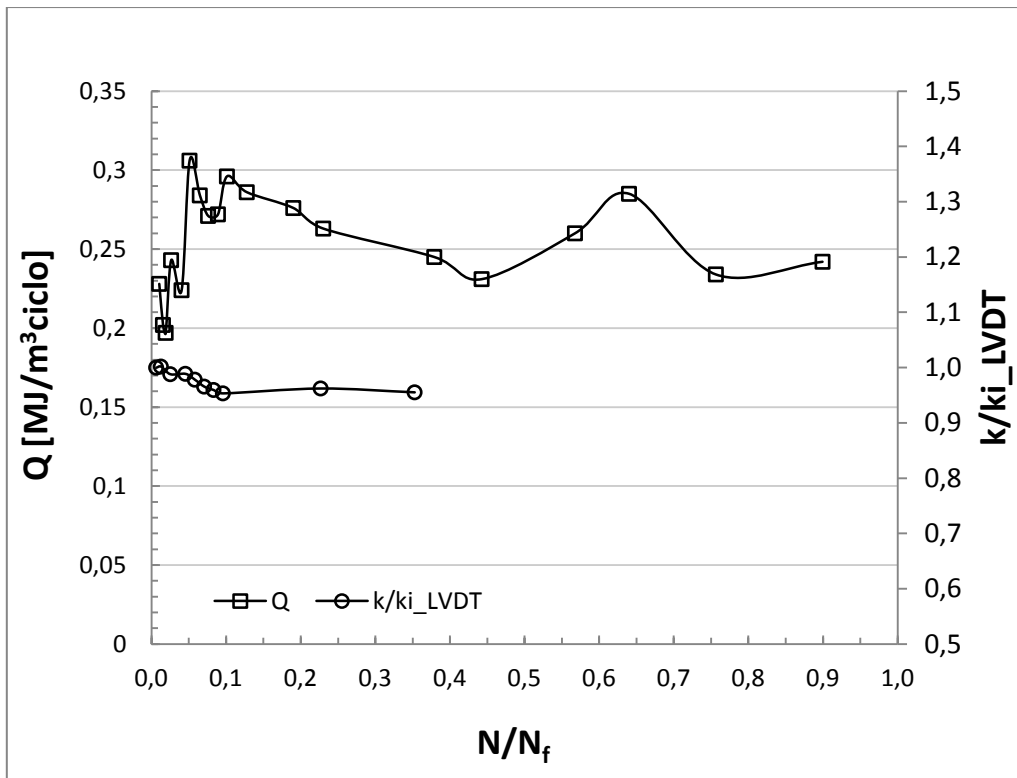


Figura A5.1 Andamento della rigidità relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_05

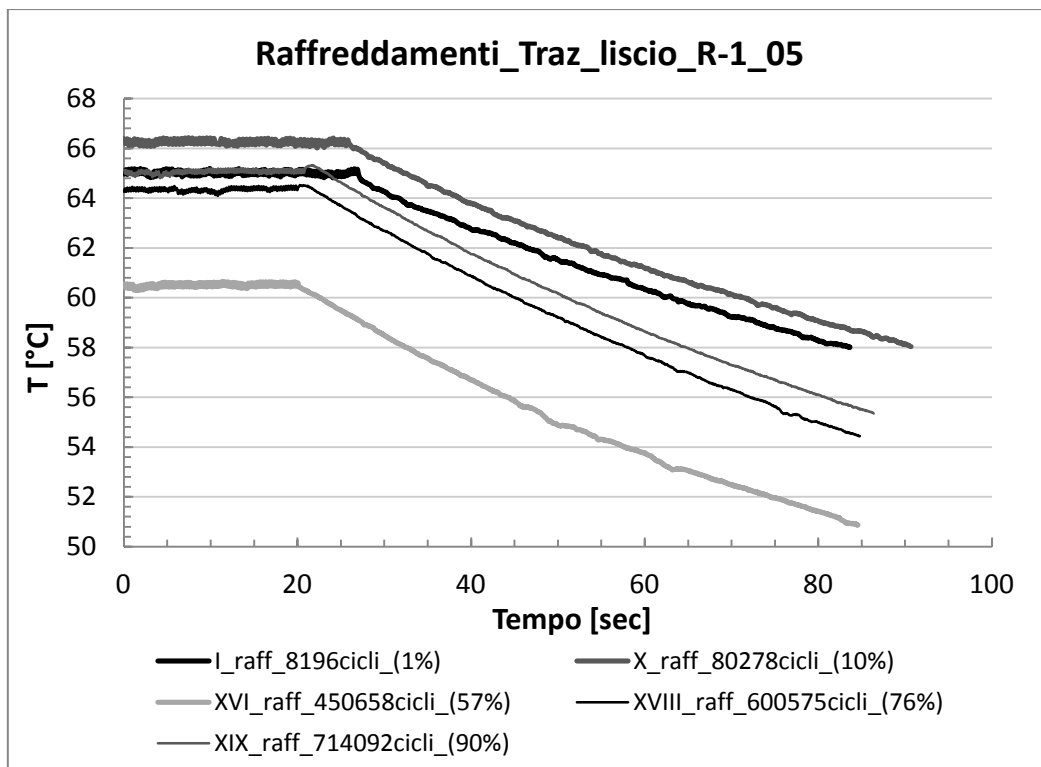


Figura A5.2 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_05

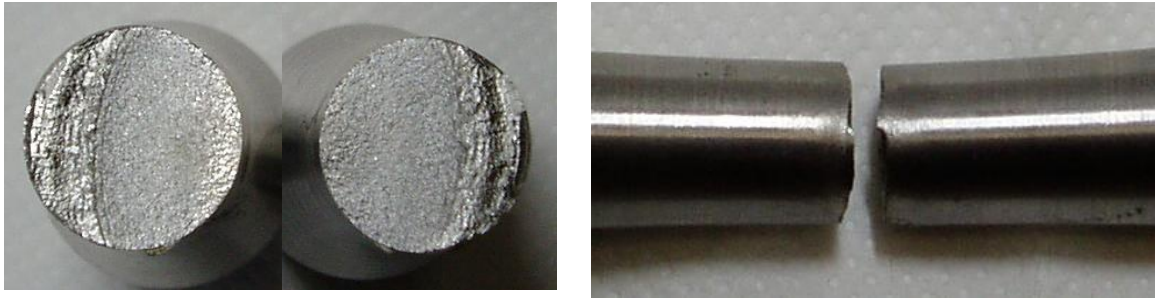


Figura A5.3 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_05

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_06</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 53,01 kN	F <sub>MIN</sub> = -53,71 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 53,71 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>fermato a 2003331 cicli [NON ROTTO]</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 140 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	12147	0,6%	29,6	5	0,145	572,75	114,55
2	54134	2,7%	29,0	5	0,14	553,00	110,60
3	94576	4,7%	27,8	5	0,1637	646,62	129,32
4	153610	7,7%	26,4	5	0,1556	614,62	122,92
5	200226	10,0%	26,7	5	0,1468	579,86	115,97
6	300082	15,0%	27,6	5	0,1545	610,28	122,06
7	400196	20,0%	27,8	5	0,1571	620,55	124,11
8	480006	24,0%	27,8	5	0,1579	623,71	124,74
9	695380	34,7%	28,0	5	0,1522	601,19	120,24
10	800389	40,0%	28,0	5	0,1669	659,26	131,85
11	900860	45,0%	20,7	5,5	0,1939	765,91	139,26
12	1002889	50,1%	22,0	5,5	0,1952	771,04	140,19
13	1102518	55,0%	22,5	5,5	0,1933	763,54	138,82
14	1201435	60,0%	19,6	5,5	0,1795	709,03	128,91
15	1311599	65,5%	21,0	5,5	0,1726	681,77	123,96
16	1409728	70,4%	22,0	5,5	0,1783	704,29	128,05
17	1501736	75,0%	22,5	5,5	0,1881	743,00	135,09
18	1600636	79,9%	19,7	5,5	0,1634	645,43	117,35
19	1702610	85,0%	21,0	6	0,1699	671,11	111,85
20	1803154	90,0%	22,0	6	0,1698	670,71	111,79
21	1901356	94,9%	22,0	6	0,1646	650,17	108,36
22	2000482	99,9%	21,6	6	0,1847	729,57	121,59

NOTE : la prova è stata eseguita senza l'utilizzo dell'estensometro assiale. I valore di rigidità sono ricavati dal segnale proveniente dal sensore di spostamento LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) della macchina di prova.

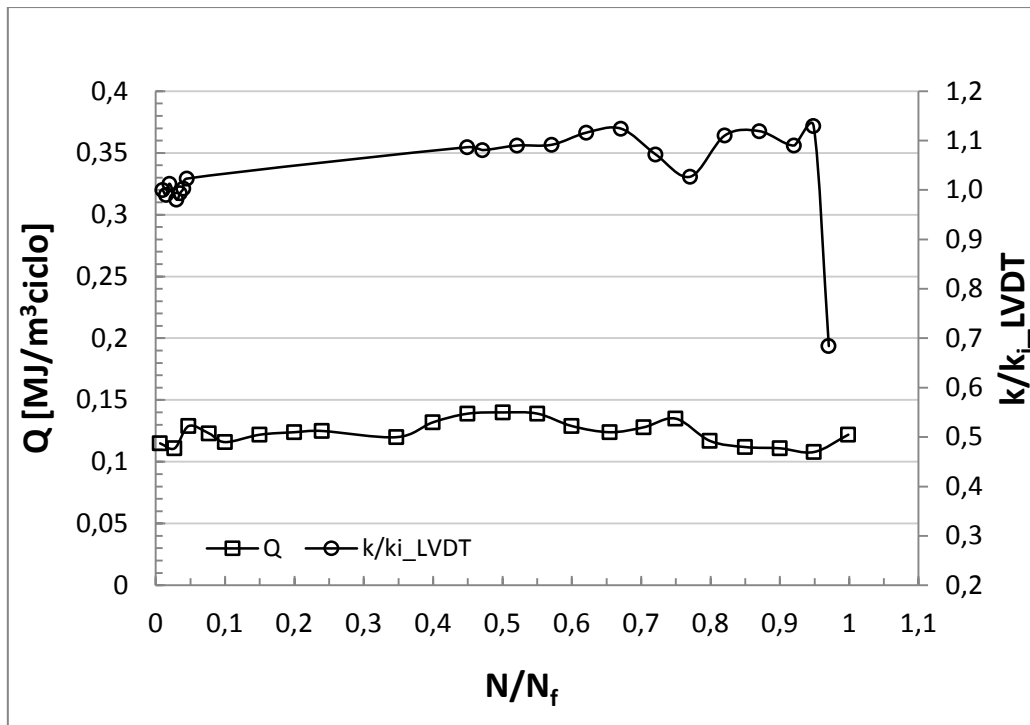


Figura A6.1 Andamento della rigidità relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_06

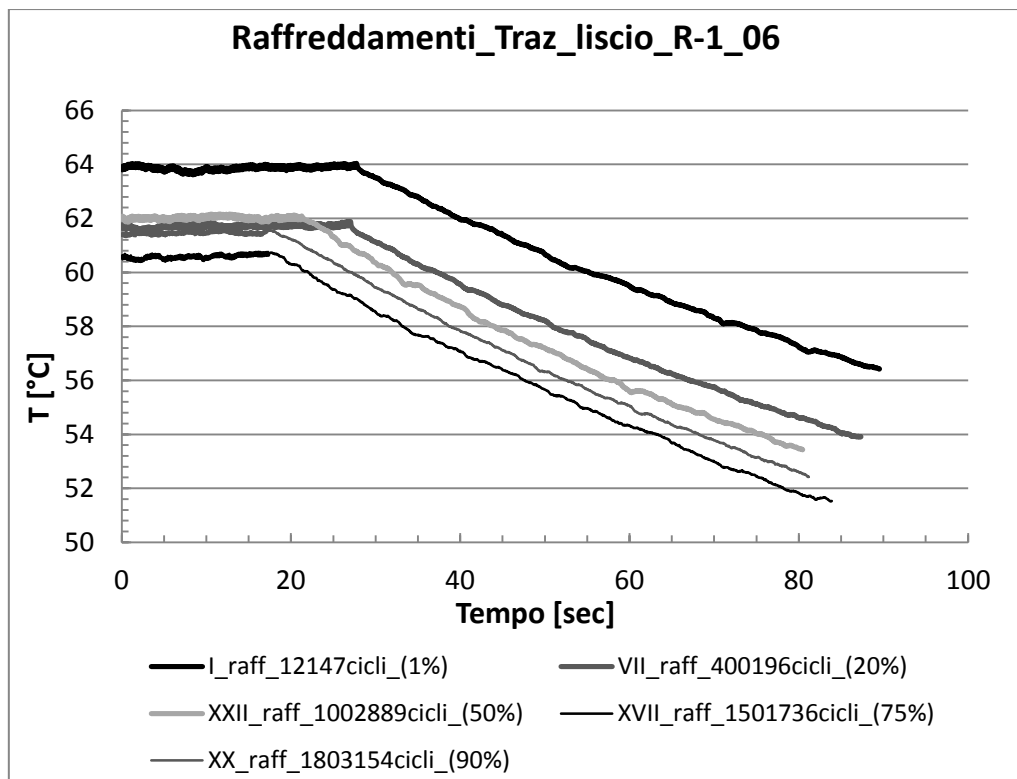


Figura A6.2 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_06

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_07</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 59,20 kN	F <sub>MIN</sub> = -59,20 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 59,20 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 335 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 123424 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 512 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	15043	12,2%	22,5	2,5	0,1956	772,62	309,05
2	30564	24,8%	21,0	2,5	0,2307	911,27	364,51
3	50140	40,6%	21,6	2	0,2371	936,55	468,27
4	75371	61,1%	22,2	2	0,2818	1113,11	556,56
5	100564	81,5%	22,8	2	0,2612	1031,74	515,87
6	120302	97,5%	23,0	2	0,2652	1047,54	523,77

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidezza e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata.



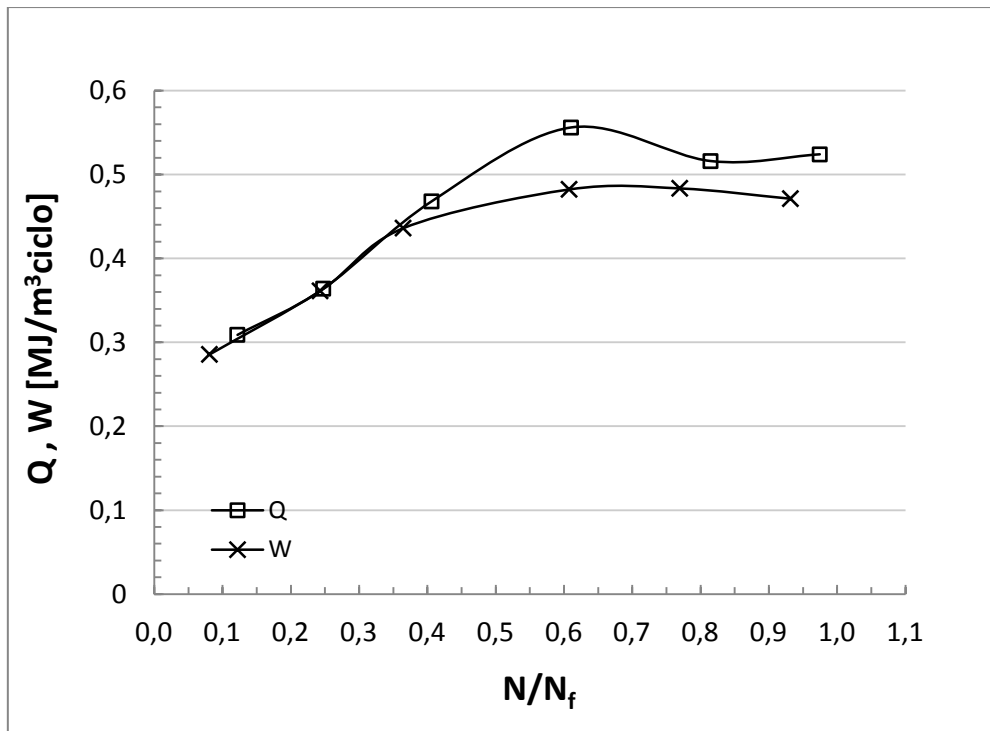


Figura A7.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_07

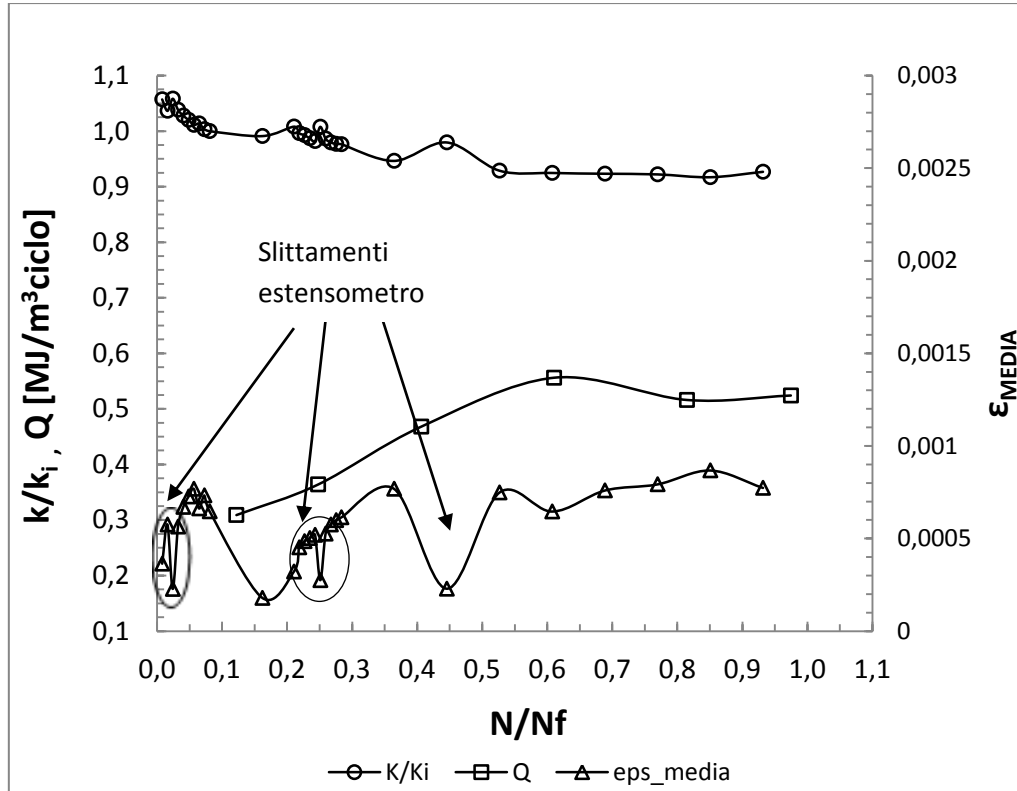


Figura A7.2 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_07

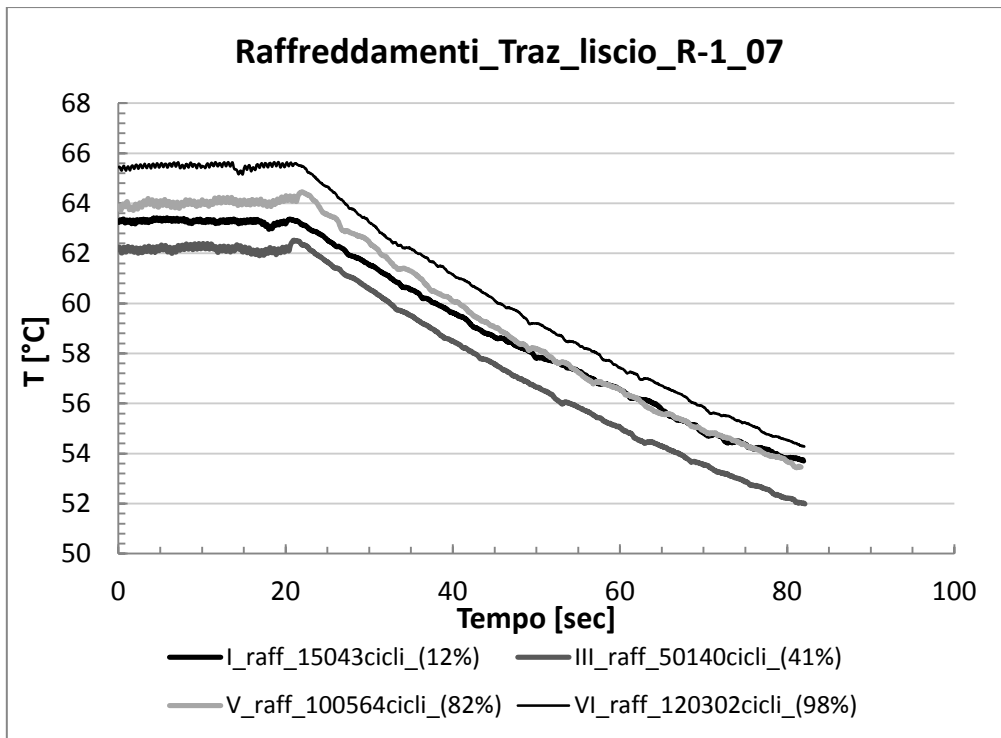
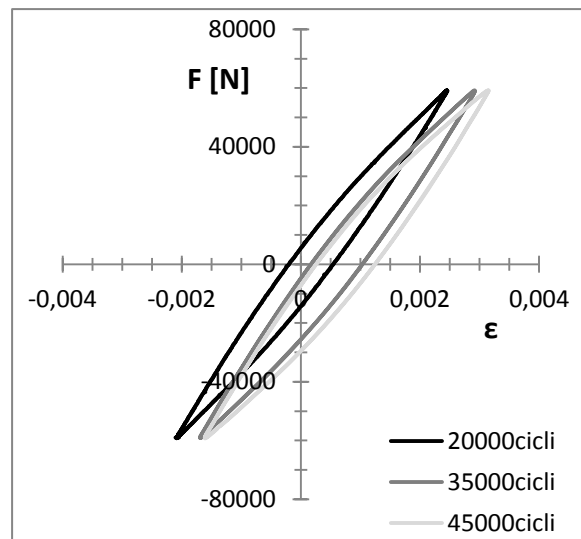
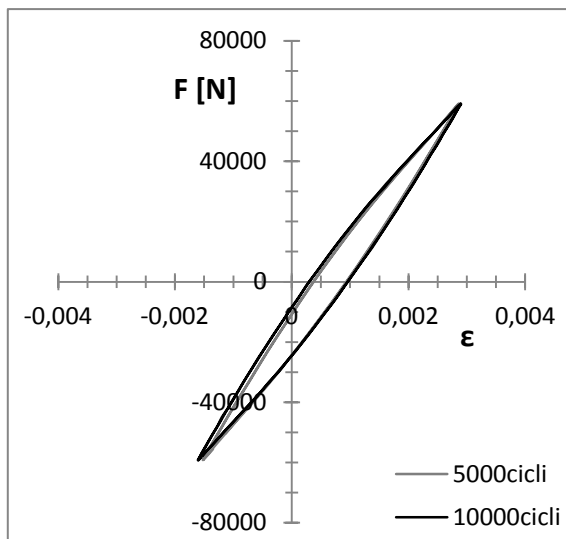


Figura A7.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_07



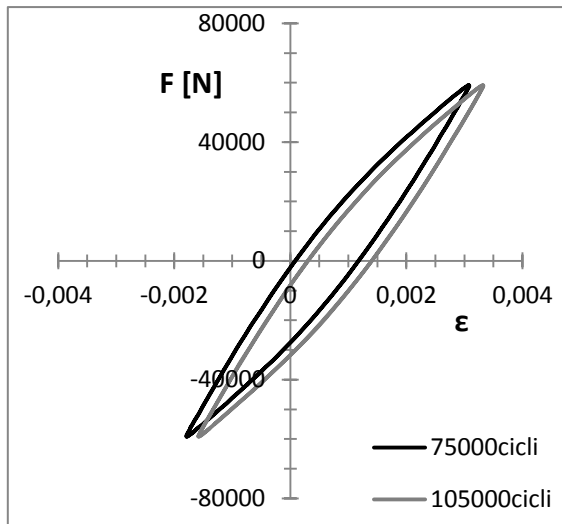


Figura A7.4 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_07



Figura A7.5 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_07

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_08</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$F_{MAX} = 61,85 \text{ kN}$	$F_{MIN} = -61,85 \text{ kN}$	$F_{MED} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 61,85 \text{ kN}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 111949</math> cicli</b>
<b>Q medio della vita:</b>	<b><math>Q_{MEDIO} = 751 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10819	9,7%	21,0	1,8	0,2546	1005,67	558,71
2	15155	13,5%	21,5	1,5	0,2637	1041,62	694,41
3	20171	18,0%	21,8	1,5	0,2535	1001,33	667,55
4	25142	22,5%	22,2	1,5	0,2698	1065,71	710,47
5	31802	28,4%	23,0	1,2	0,2834	1119,43	932,86
6	35024	31,3%	23,2	1,2	0,2544	1004,88	837,40
7	40037	35,8%	23,5	1,2	0,2757	1089,02	907,51
8	45022	40,2%	23,2	1,2	0,2522	996,19	830,16
9	50069	44,7%	23,8	1,2	0,3176	1254,52	1045,43
10	55034	49,2%	19,2	1,2	0,3053	1205,94	1004,95
11	60081	53,7%	19,6	1,2	0,2787	1100,87	917,39
12	65205	58,2%	21,0	1,3	0,28	1106,00	850,77
13	70057	62,6%	20,5	1,3	0,2554	1008,83	776,02
14	75040	67,0%	21,0	1,3	0,2535	1001,33	770,25
15	85007	75,9%	21,8	1,3	0,2583	1020,29	784,83
16	95050	84,9%	22,0	1,4	0,2525	997,38	712,41
17	105022	93,8%	22,5	1,4	0,2357	931,02	665,01

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata.

Per questo provino si è deciso di prendere come valore di riferimento per l'energia dissipata Q il valore medio e non quello calcolato al 50% della vita in quanto come si

vede dal grafico Q-N c'è stato un picco proprio in corrispondenza alla metà della vita ed il valore così misurato non risulterebbe molto indicativo rispetto alle altre misure di Q.

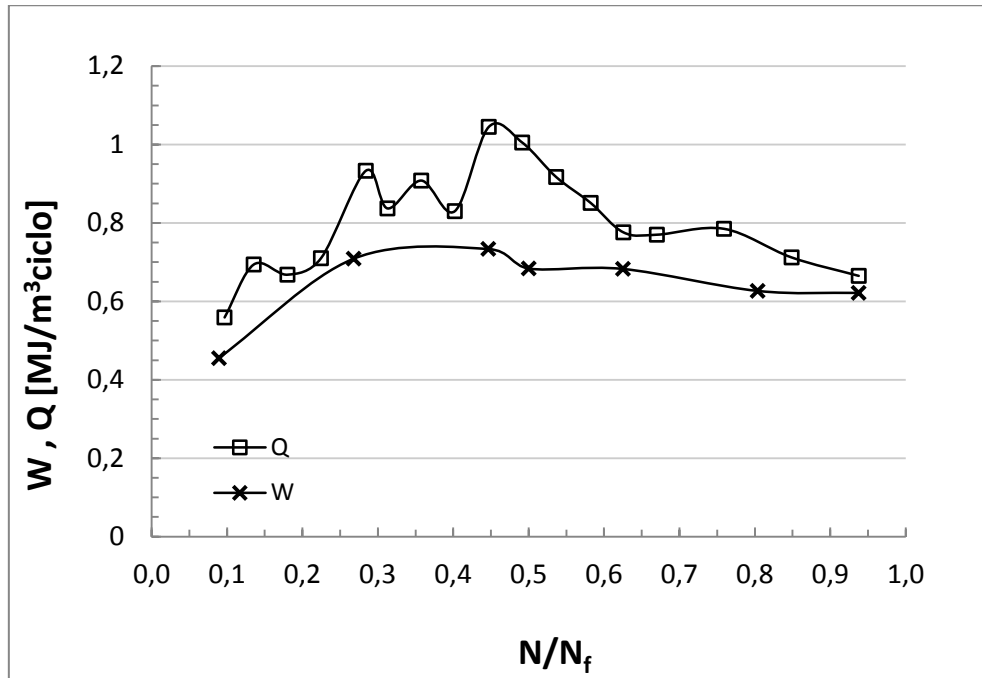


Figura A8.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa W e delle densità di energia dissipata Q in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08

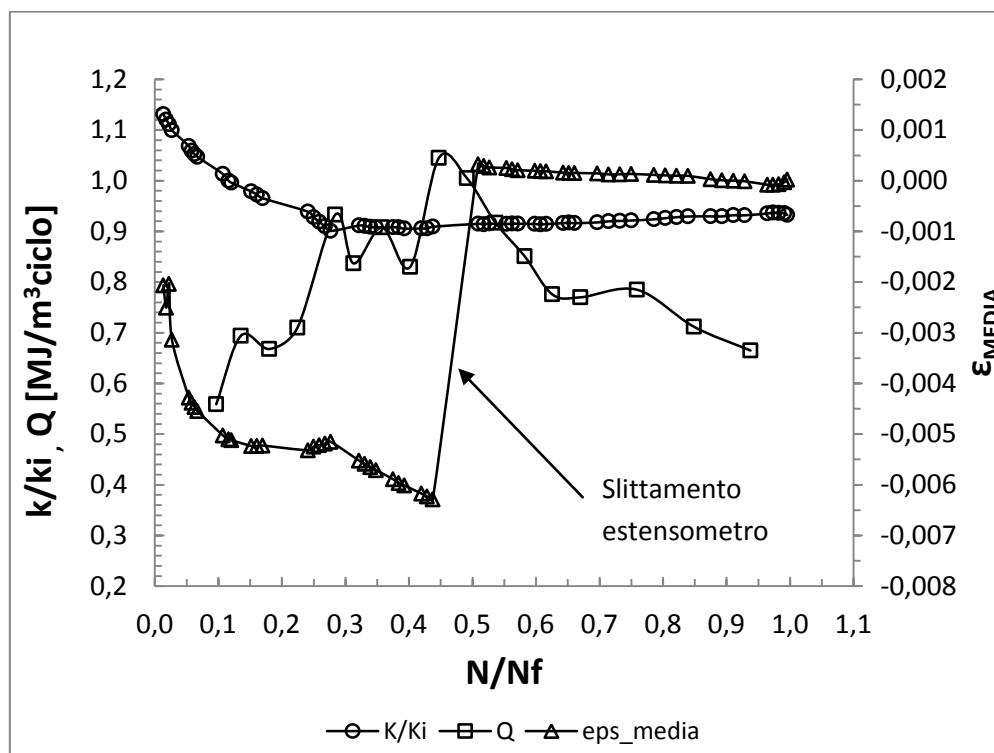


Figura A8.2 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08

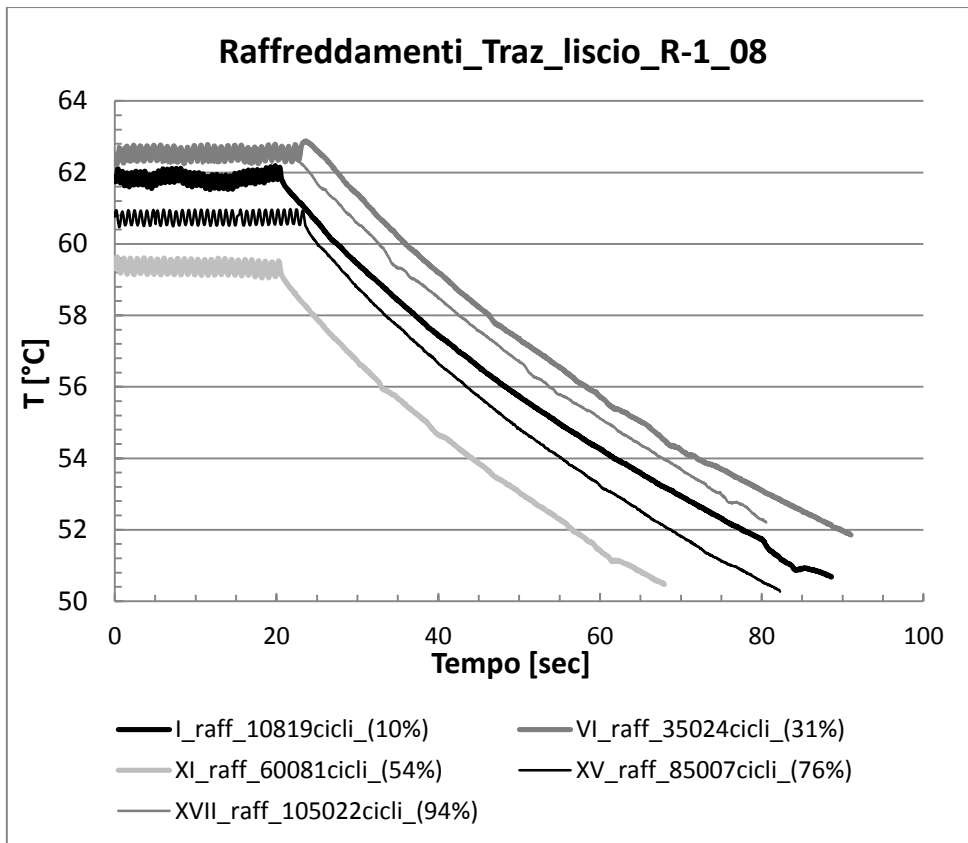


Figura A8.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08

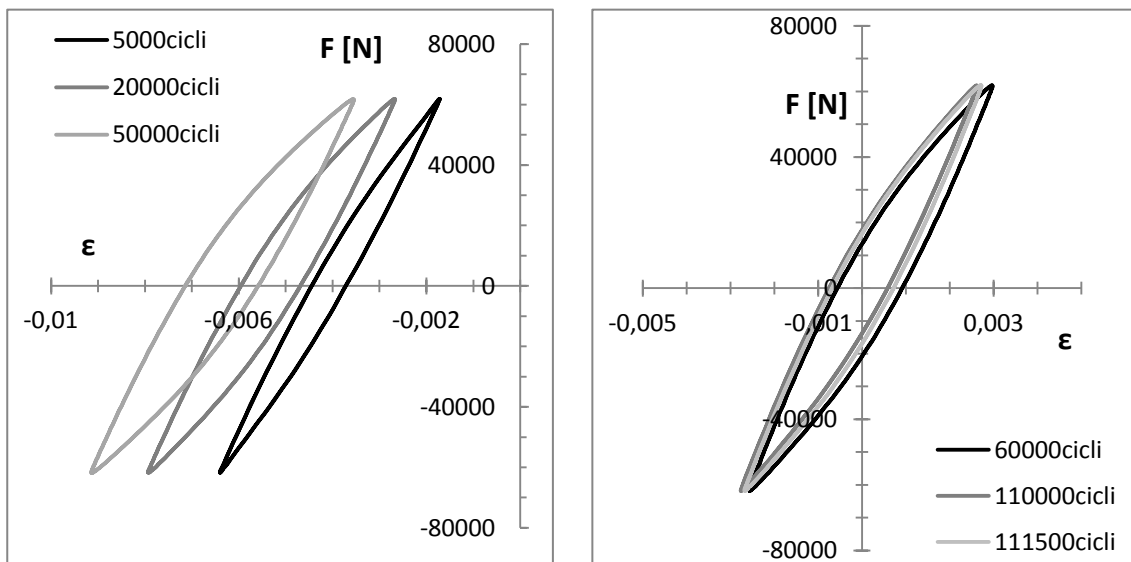


Figura A8.4 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08



Figura A8.5 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_08

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_09</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,05\text{mm}$	A = 177,89 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 59,59 kN	F <sub>MIN</sub> = -59,59 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 59,59 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 335 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>fermato a 2489072 cicli [NON ROTTO]</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 252 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	12861	0,5%	21,0	3	0,2231	881,25	293,75
2	22138	0,9%	20,7	2,5	0,2378	939,31	375,72
3	30356	1,2%	21,3	2,5	0,2463	972,89	389,15
4	41200	1,7%	21,5	2,5	0,2833	1119,04	447,61
5	50851	2,0%	14,0	2,5	0,3012	1189,74	475,90
6	60682	2,4%	15,2	2,5	0,3077	1215,42	486,17
7	70667	2,8%	16,5	2,5	0,3784	1494,68	597,87
8	92217	3,7%	17,0	2,5	0,3183	1257,29	502,91
9	100047	4,0%	17,5	2,3	0,3183	1257,29	546,65
10	110072	4,4%	20,0	2,2	0,2818	1113,11	505,96
11	120822	4,9%	21,0	2,1	0,2969	1172,76	558,45
12	130217	5,2%	21,0	2,2	0,2746	1084,67	493,03
13	140116	5,6%	21,0	2,2	0,375	1481,25	673,30
14	150126	6,0%	21,3	2,2	0,2463	972,89	442,22
15	160437	6,4%	21,0	2,5	0,3388	1338,26	535,30
16	170109	6,8%	18,0	2,3	0,2765	1092,18	474,86
17	181446	7,3%	18,2	2,3	0,2417	954,72	415,09
18	191772	7,7%	19,0	2,3	0,3061	1209,10	525,69
19	210477	8,5%	20,0	2,3	0,267	1054,65	458,54
20	230794	9,3%	21,0	2,3	0,2496	985,92	428,66
21	251188	10,1%	22,0	2,3	0,2527	998,17	433,98
22	273111	11,0%	23,2	2,3	0,2669	1054,26	458,37
23	290508	11,7%	19,6	2,3	0,2341	924,70	402,04
24	310523	12,5%	20,8	2,3	0,2358	931,41	404,96
25	330646	13,3%	22,2	2,3	0,2081	822,00	357,39
26	354956	14,3%	23,2	2,3	0,207	817,65	355,50
27	380603	15,3%	24,0	2,4	0,2233	882,04	367,51
28	400600	16,1%	24,0	2,5	0,2366	934,57	373,83
29	420298	16,9%	24,0	2,5	0,2148	848,46	339,38
30	437266	17,6%	18,8	2,6	0,2167	855,97	329,22



n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
31	460421	18,5%	21,0	2,5	0,2069	817,26	326,90
32	481458	19,3%	22,0	2,5	0,2277	899,42	359,77
33	501112	20,1%	23,0	2,5	0,2106	831,87	332,75
34	521688	21,0%	23,2	2,5	0,2363	933,39	373,35
35	550342	22,1%	24,0	2,5	0,2073	818,84	327,53
36	600774	24,1%	24,0	2,7	0,2057	812,52	300,93
37	731412	29,4%	24,0	2,5	0,1961	774,60	309,84
38	803169	32,3%	24,5	2,8	0,2257	891,52	318,40
39	850332	34,2%	25,0	2,8	0,202	797,90	284,96
40	900022	36,2%	25,2	2,8	0,1818	718,11	256,47
41	1000067	40,2%	23,3	2,8	0,1788	706,26	252,24
42	1050699	42,2%	25,0	2,8	0,2104	831,08	296,81
43	1104049	44,4%	24,8	2,8	0,1728	682,56	243,77
44	1250248	50,2%	24,0	2,8	0,1732	684,14	244,34
45	1360194	54,6%	25,8	3	0,1805	712,98	237,66
46	1402098	56,3%	26,0	3,2	0,2036	804,22	251,32
47	1600120	64,3%	24,0	3,3	0,2028	801,06	242,75
48	1700575	68,3%	25,0	3,3	0,2036	804,22	243,70
49	1800207	72,3%	25,2	3,4	0,1734	684,93	201,45
50	2489066	100,0%	23,0	3	0,1636	646,22	215,41

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata.

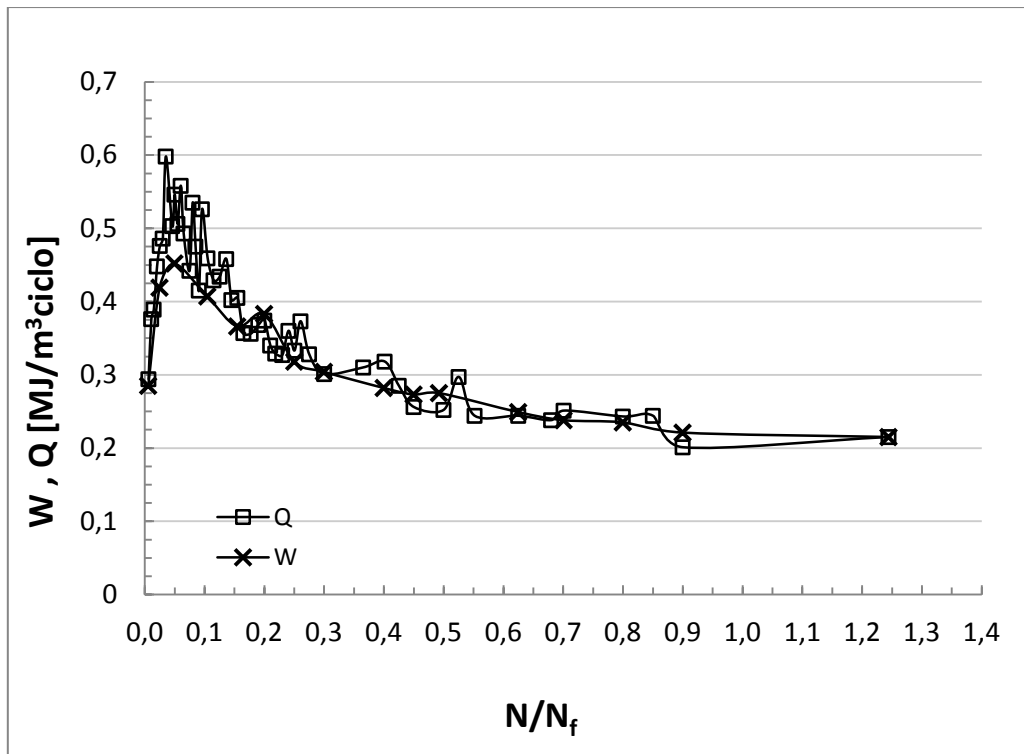


Figura A9.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_09

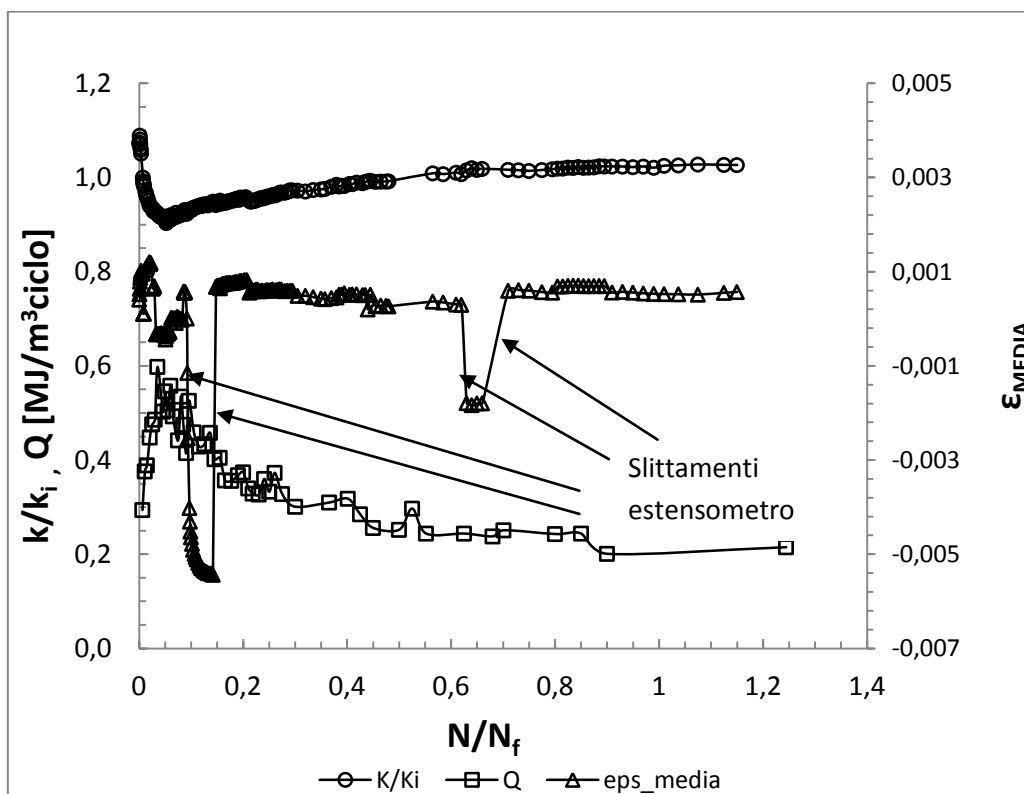


Figura A9.2 Andamento della rigidezza relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_09

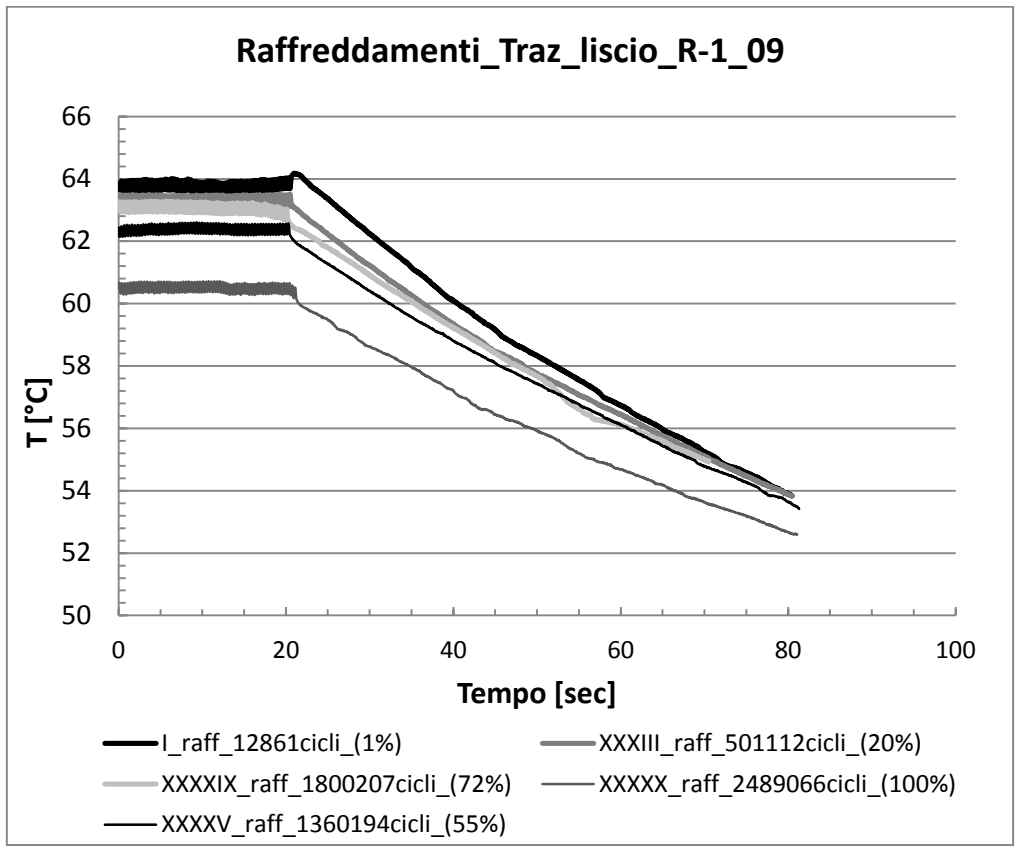
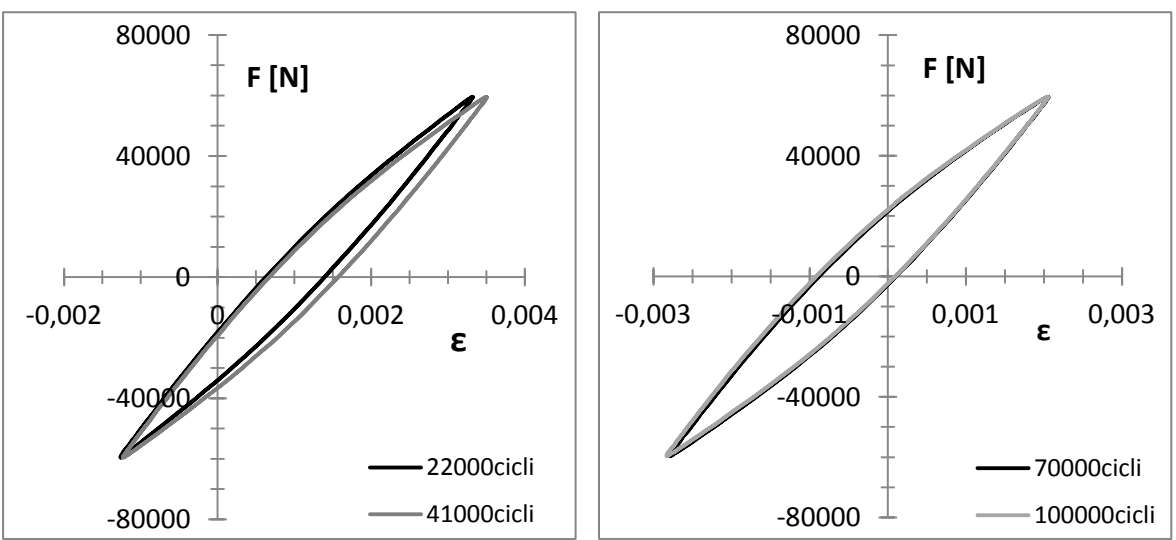


Figura A9.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_09



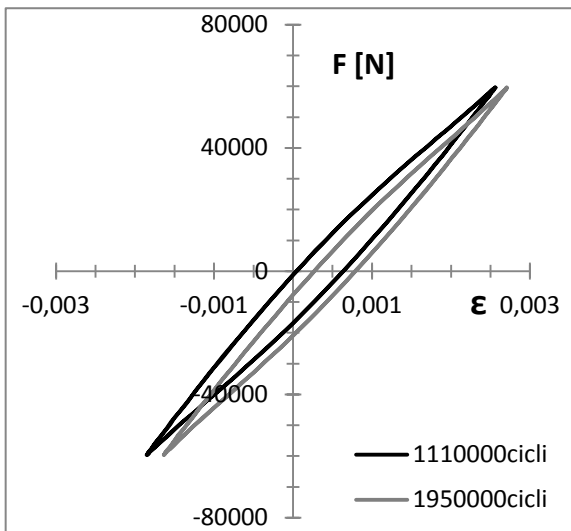
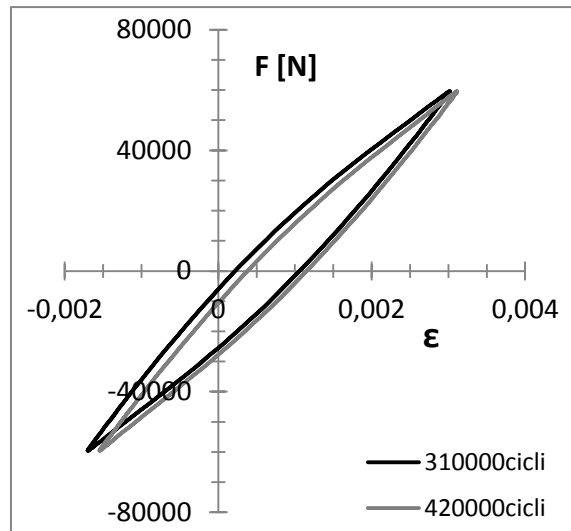
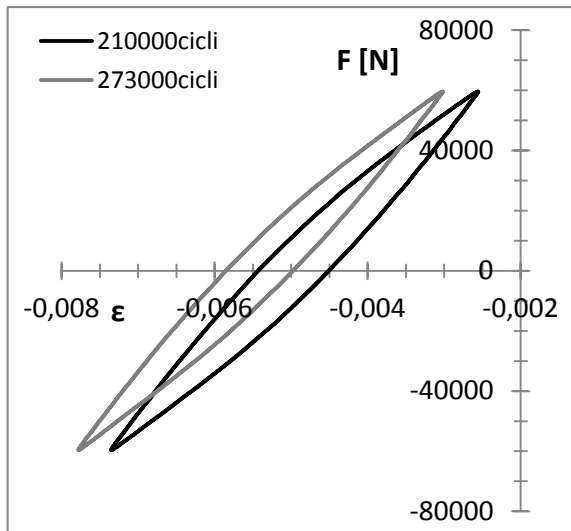


Figura A9.4 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_09

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_10</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,05\text{mm}$	A = 177,89 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 56,93 kN	F <sub>MIN</sub> = -56,93 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 56,93 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX}$ = 320 MPa	$\sigma_{MIN}$ = -320 MPa	$\sigma_{MED}$ = 0 MPa	$\sigma_a$ = 320 MPa

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 198187 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 252,12 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10063	5%	23,7	3,6	0,1743	688,49	191,25
2	50628	25%	24,0	3,2	0,2046	808,17	252,55
3	151188	76%	25,3	3,2	0,2039	805,41	251,69
4	197962	99%	25,5	3,2	0,3235	1277,83	399,32

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata.

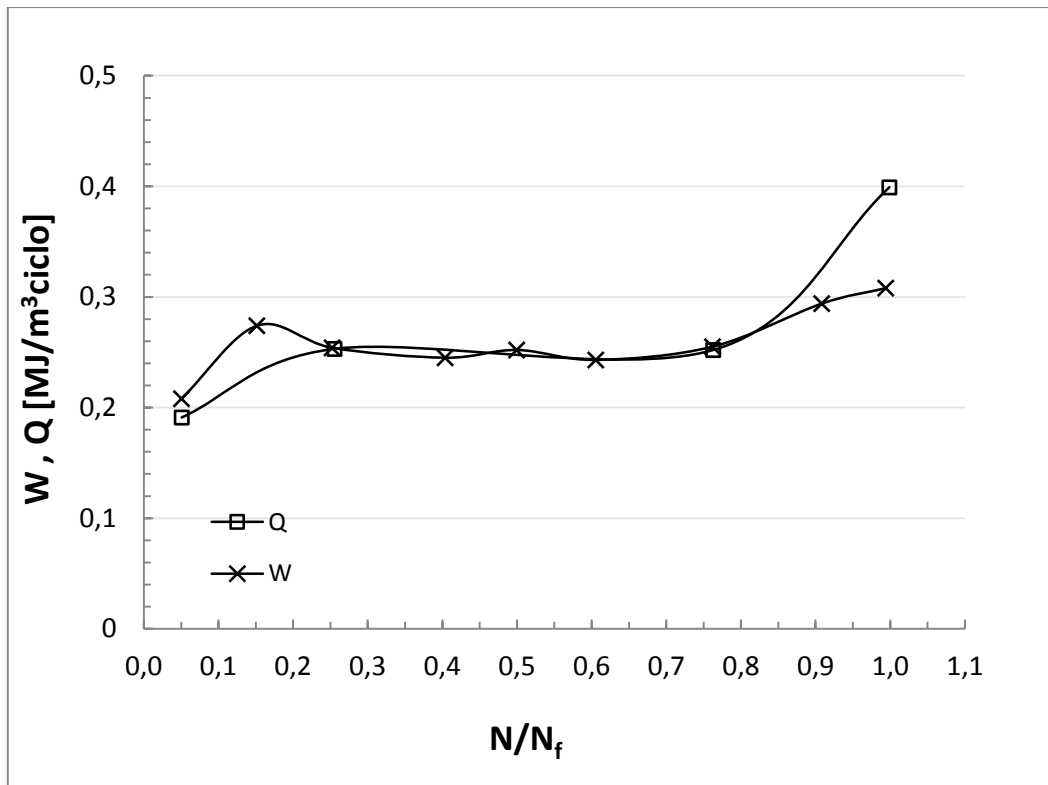


Figura A10.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_10

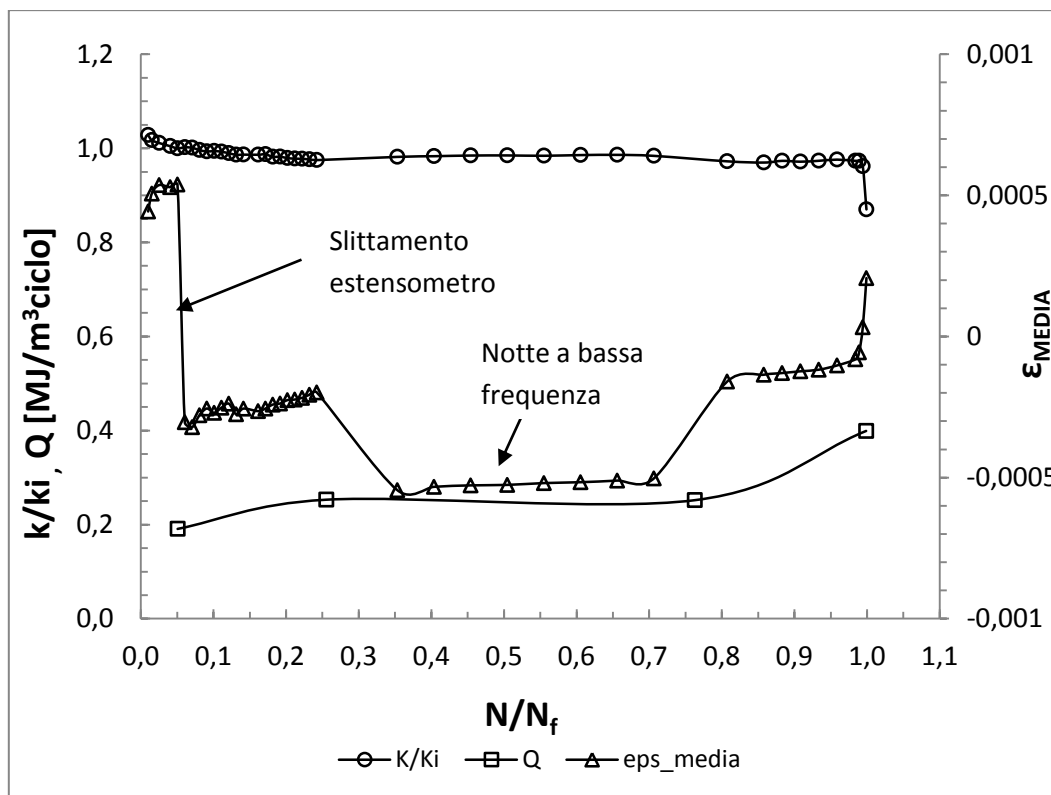


Figura A10.2 Andamento della rigidezza relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_10

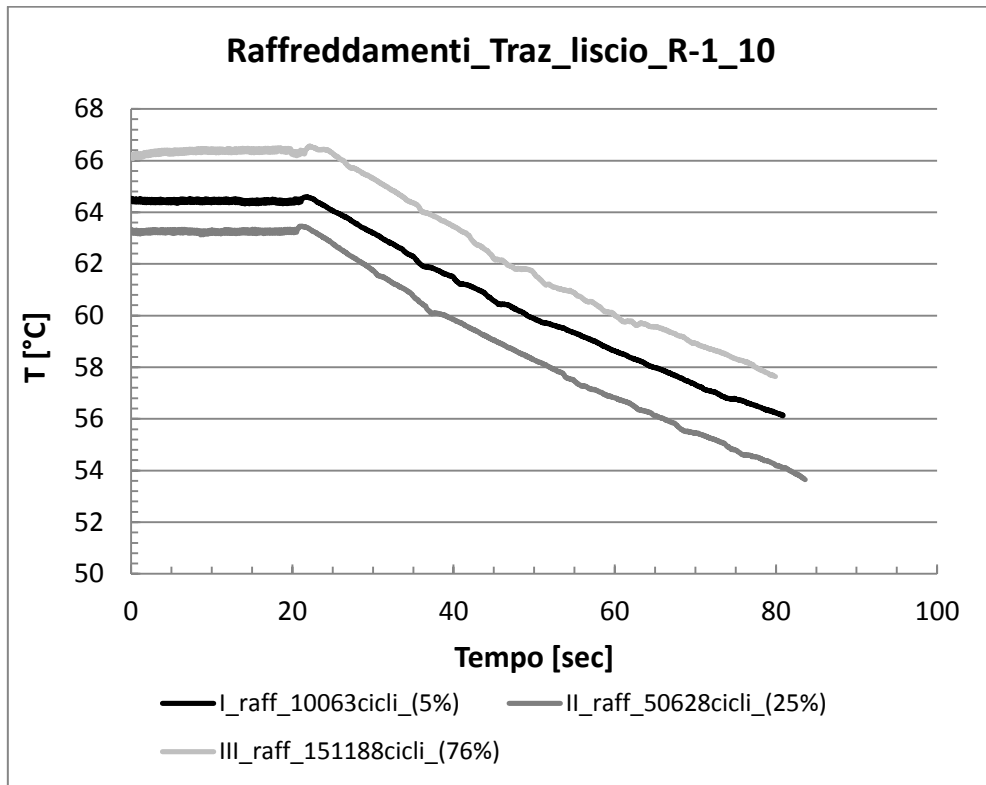
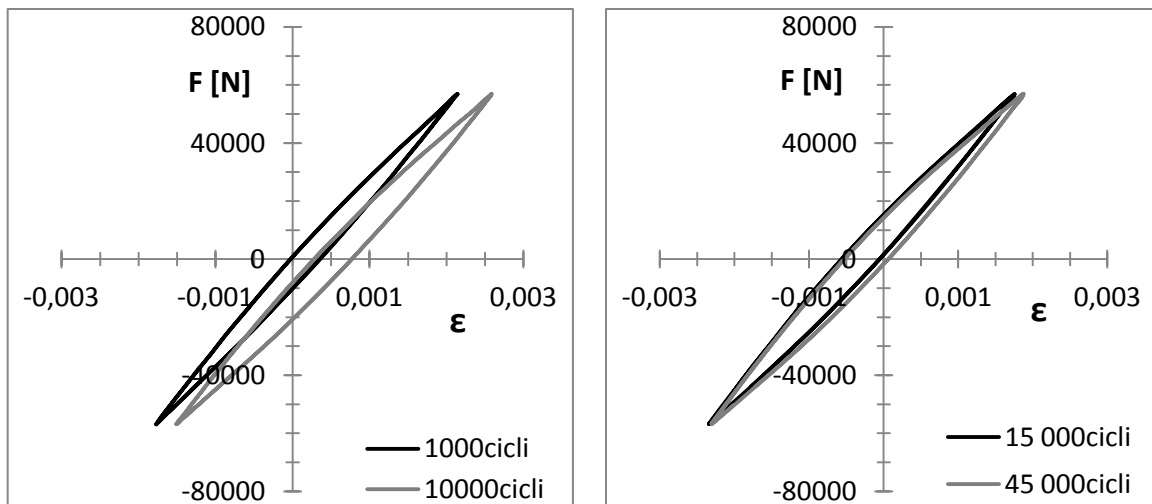


Figura A10.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_10



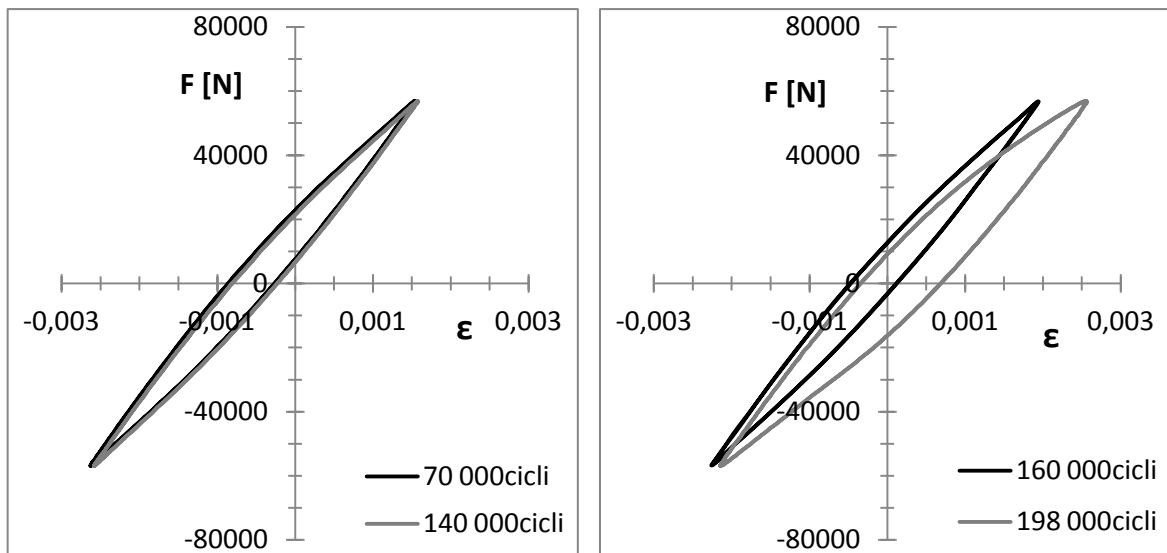


Figura A10.4 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_10

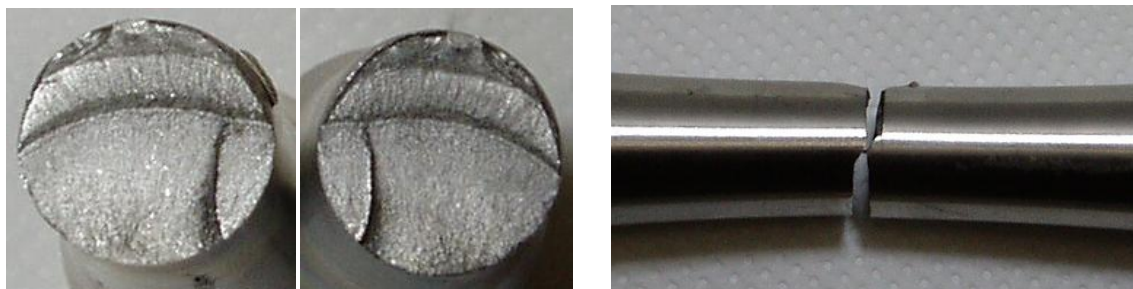


Figura A10.5 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_10



<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_11</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 56,55 kN	F <sub>MIN</sub> = -56,55 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 56,55 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>fermato a 2000000 cicli [NON ROTTO]</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q 50% = 275 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	25496	1,3%	22,7	3,5	0,1967	776,97	221,99
2	50253	2,5%	24,7	3,2	0,184	726,80	227,13
3	100294	5,0%	25,5	2,8	0,1851	731,15	261,12
4	200216	10,0%	24,8	2,8	0,1952	771,04	275,37
5	255159	12,8%	25,0	3	0,2184	862,68	287,56
6	301028	15,1%	26,0	3	0,2135	843,33	281,11
7	350381	17,5%	25,6	3	0,2239	884,41	294,80
8	450299	22,5%	24,5	3	0,2181	861,50	287,17
9	512165	25,6%	24,8	3,2	0,2157	852,02	266,25
10	550515	27,5%	25,5	3,2	0,2133	842,54	263,29
11	600393	30,0%	25,5	3,3	0,2067	816,47	247,41
12	801952	40,1%	22,0	3,8	0,2104	831,08	218,71
13	850228	42,5%	22,0	3,8	0,235	928,25	244,28
14	900113	45,0%	22,2	3,8	0,2093	826,74	217,56
15	1000112	50,0%	23,0	3,8	0,2642	1043,59	274,63
16	1200401	60,0%	23,5	3,4	0,1894	748,13	220,04
17	1300246	65,0%	24,0	3,8	0,2108	832,66	219,12
18	1400251	70,0%	24,5	3,7	0,1881	743,00	200,81
19	1596552	79,8%	24,0	3,7	0,2007	792,77	214,26
20	1701934	85,1%	25,0	4	0,2139	844,91	211,23
21	1800773	90,0%	25,5	4	0,1982	782,89	195,72

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidezza e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata.

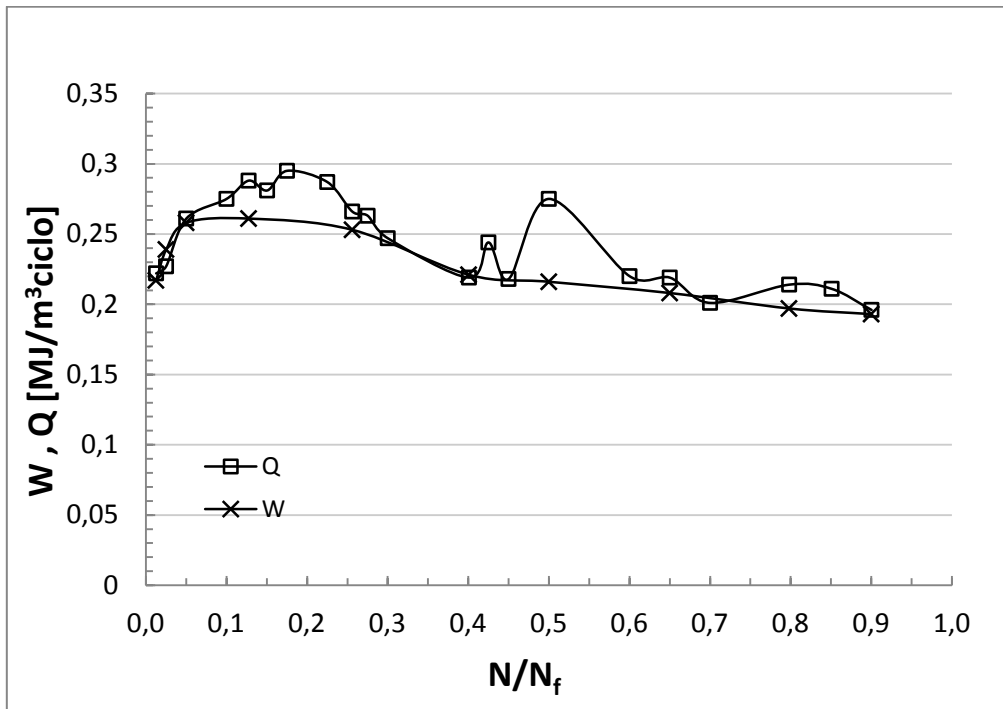


Figura A11.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_11

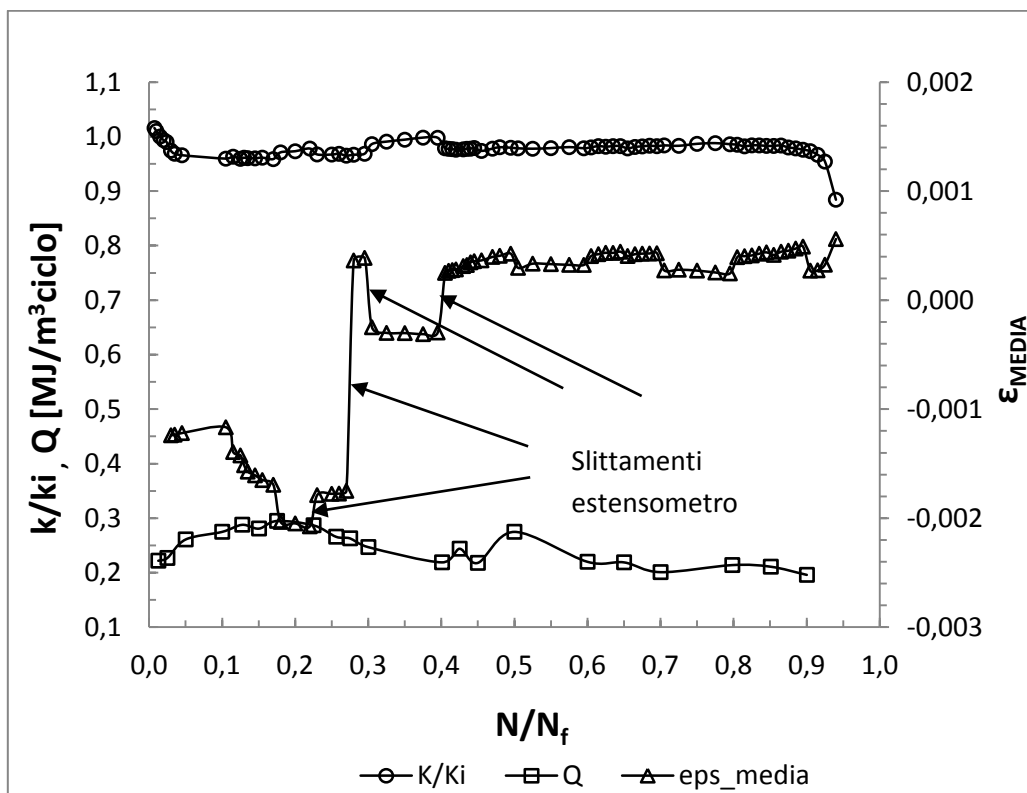


Figura A11.2 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_11

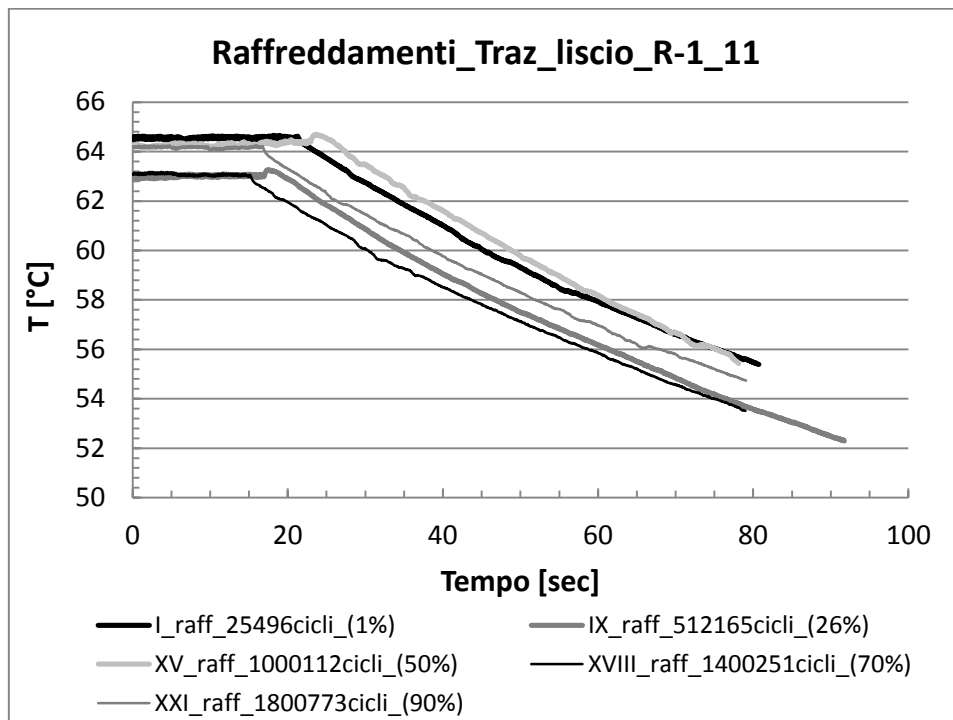


Figura A11.3 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_11

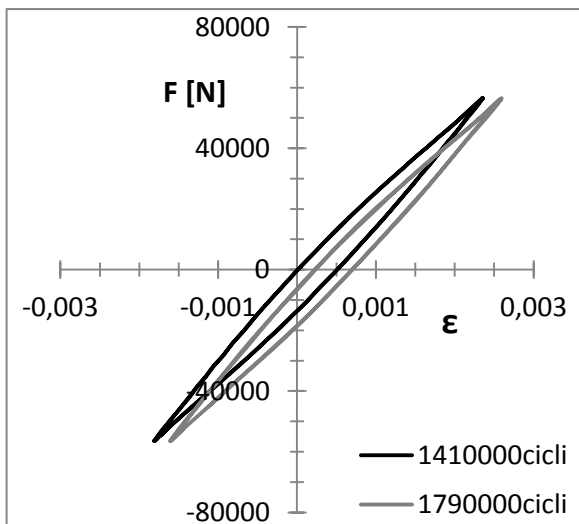
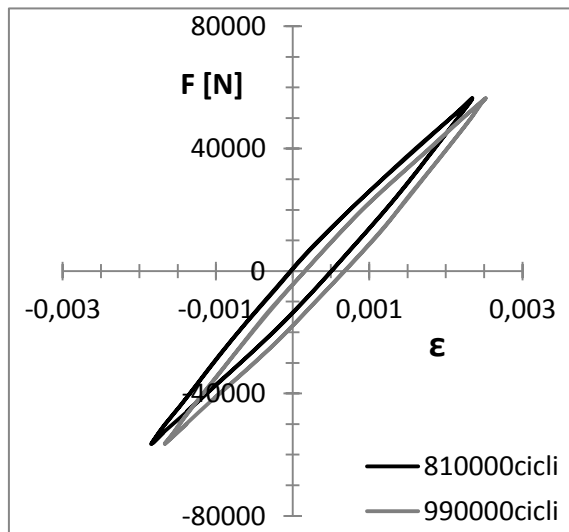
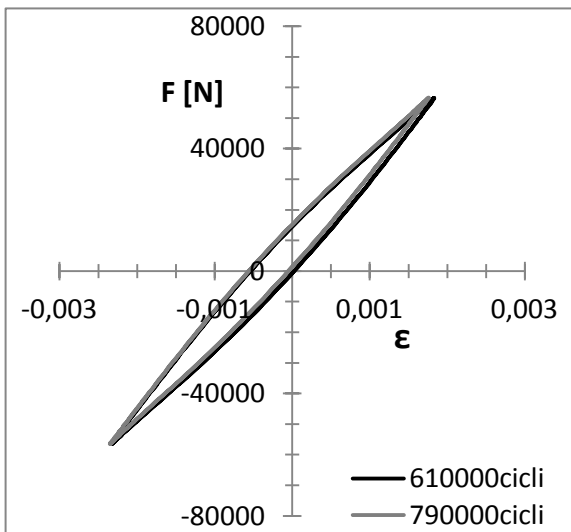
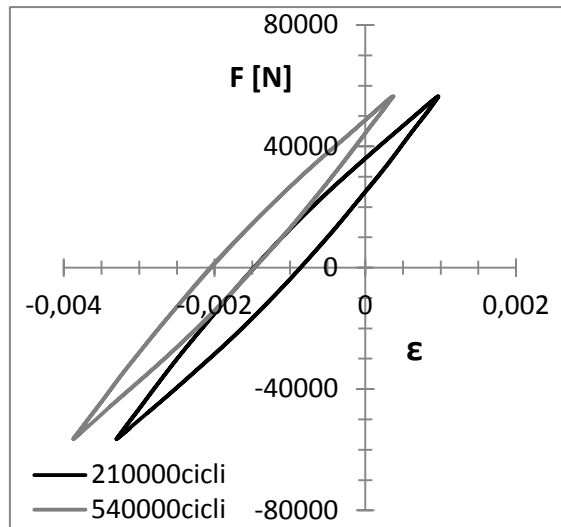
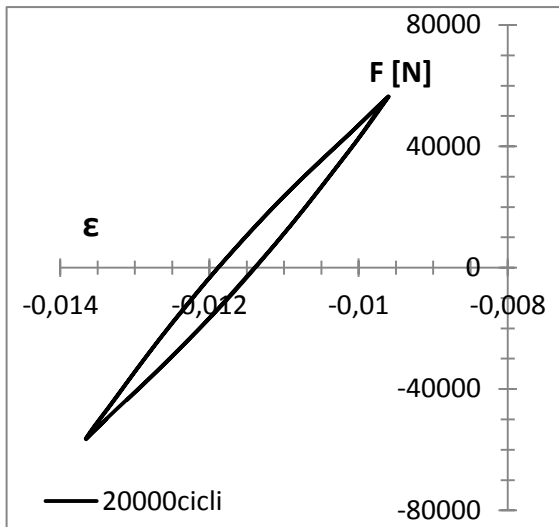


Figura A11.4 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_11

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_12</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 70,69 kN	F <sub>MIN</sub> = -70,69 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 70,69 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 400 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -400 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 400 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 3589 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 3278 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	1529	42,6%	22,7	0,5	0,3827	1511,67	3023,33
2	1900	52,9%	24,7	0,4	0,3319	1311,01	3277,51
3	2444	68,1%	25,5	0,35	0,2806	1108,37	3166,77
4	2729	76,0%	24,8	0,35	0,2954	1166,83	3333,80
5	3026	84,3%	25,0	0,35	0,2886	1139,97	3257,06
6	3342	93,1%	26,0	0,35	0,2872	1134,44	3241,26

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata. Per questo provino è stato registrato l'andamento della temperatura durante tutta la prova per valutare con più accuratezza la sua influenza nelle misure di deformazione media e rigidità.

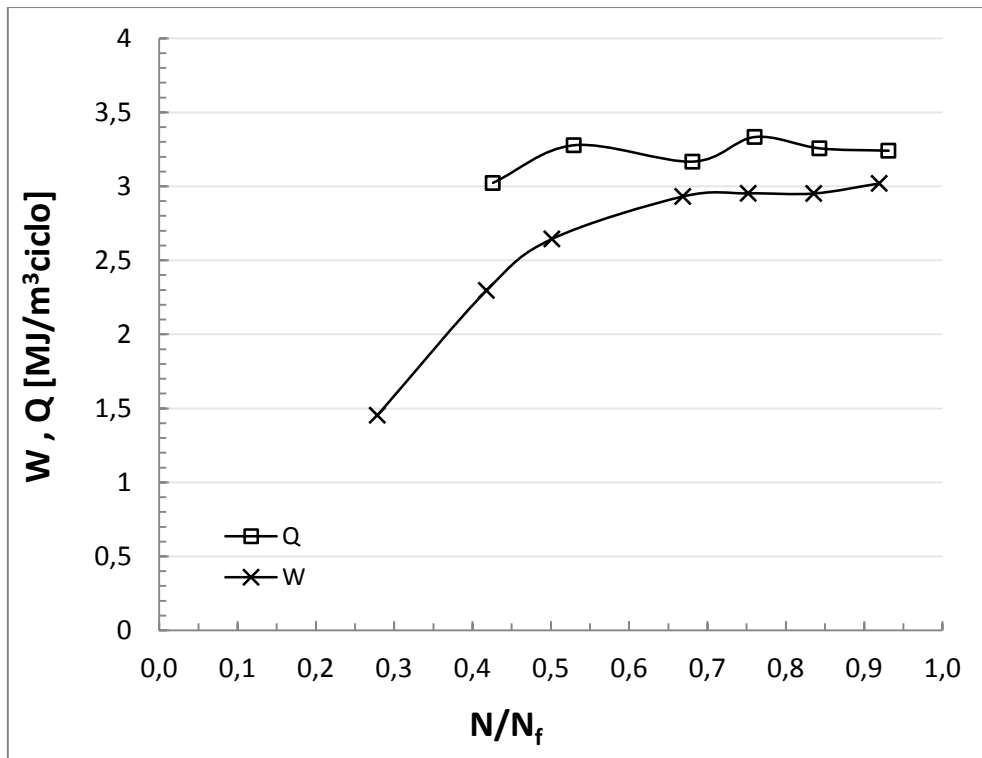


Figura A12.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12

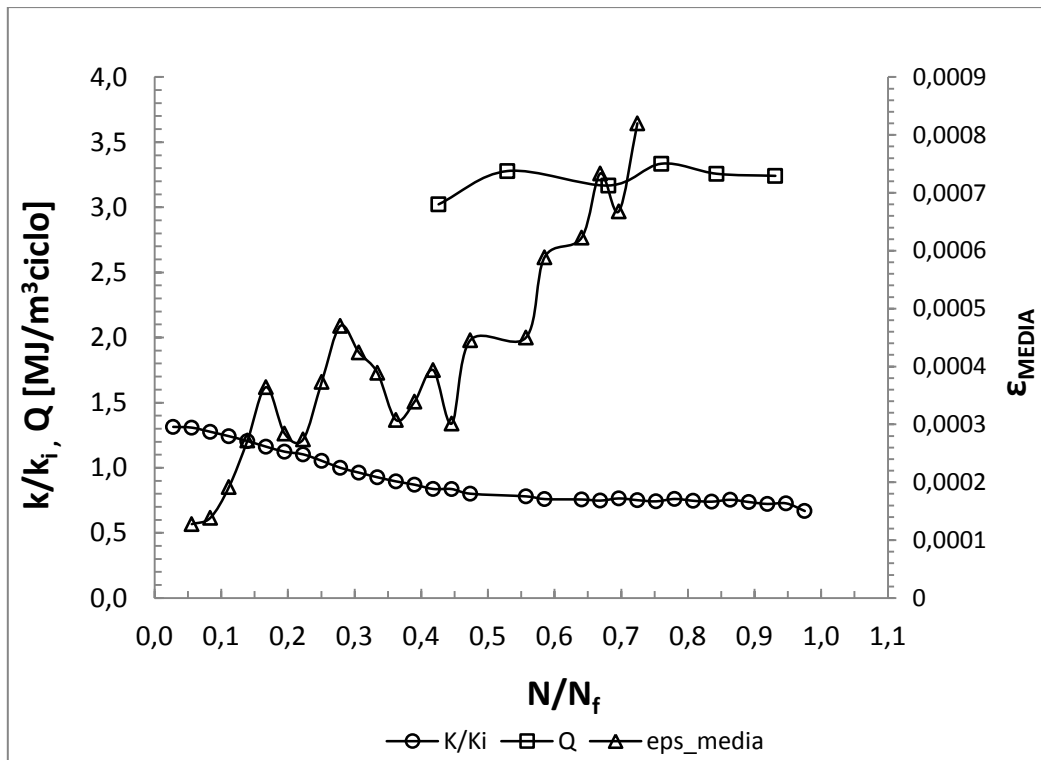


Figura A12.2 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12

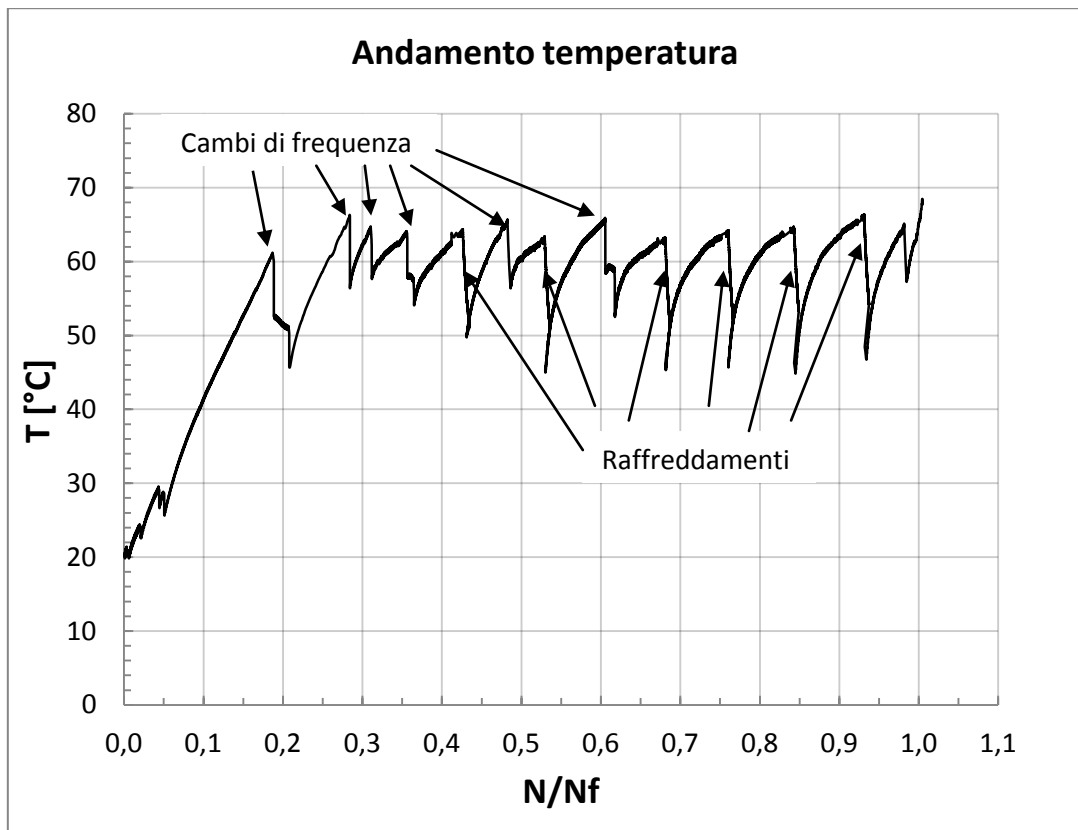


Figura A12.3 Andamento della temperatura registrata dalla termocoppia in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12

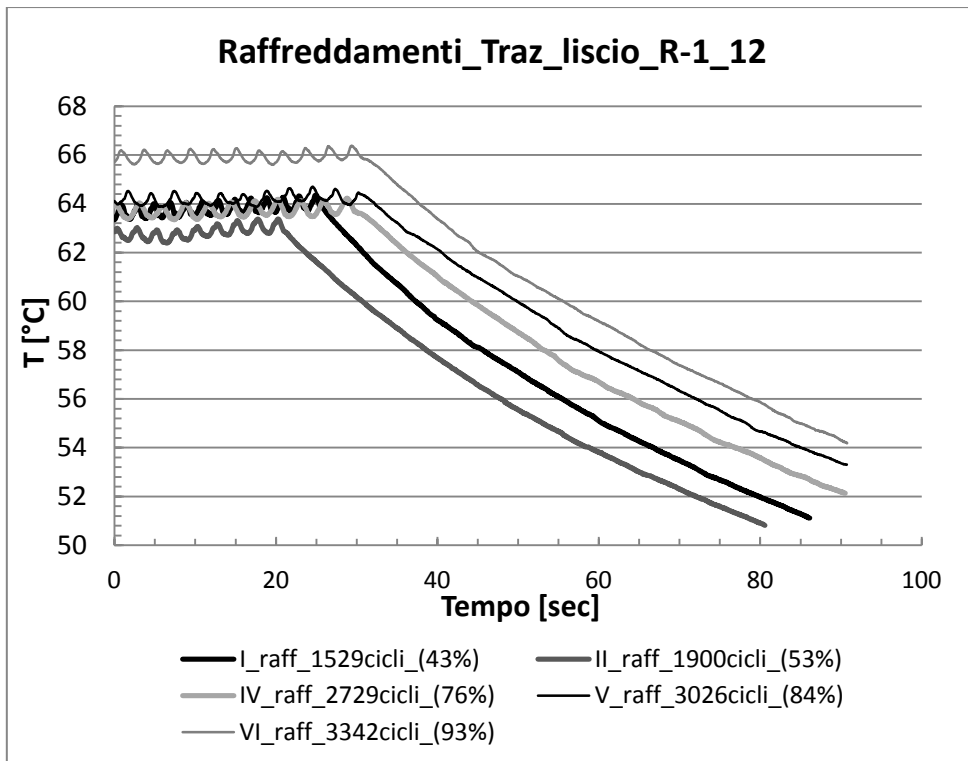
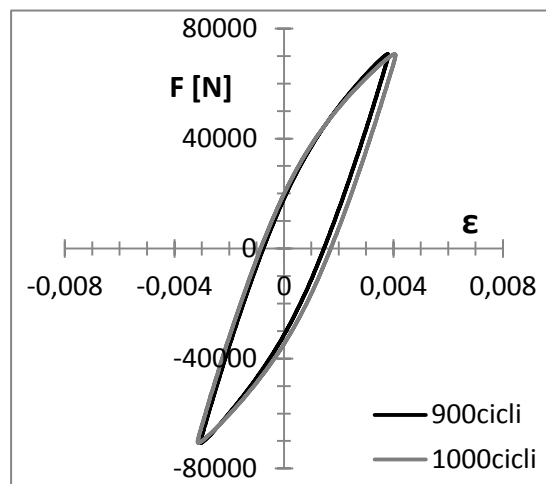
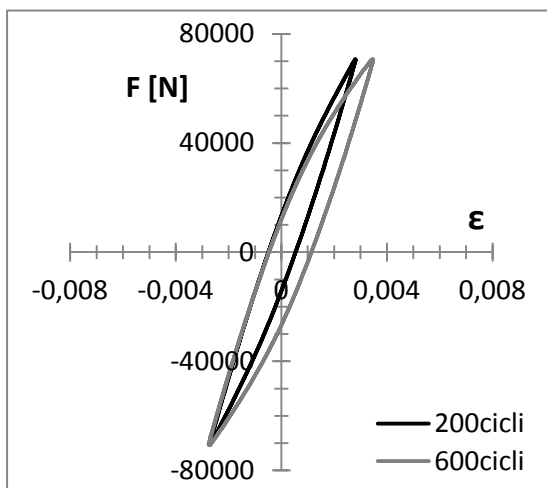


Figura A12.4 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12





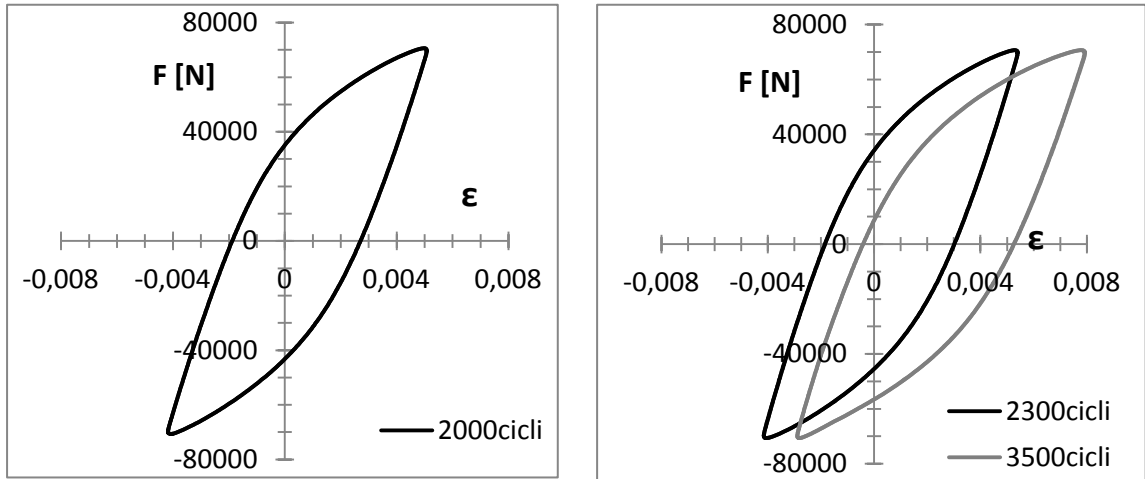


Figura A12.5 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12

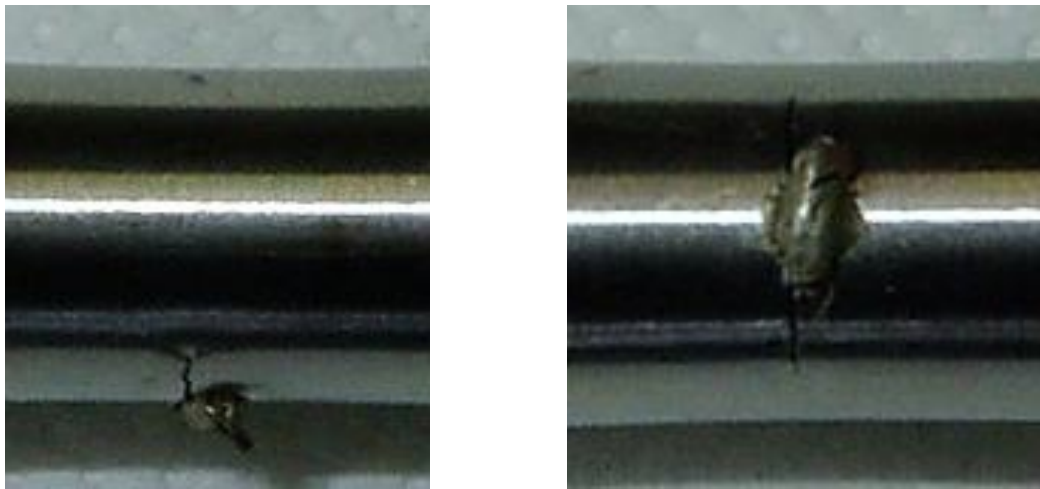


Figura A12.6 Vista laterale e vista frontale della cricca per il provino Traz\_liscio\_R-1\_12

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_13</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 62,26 kN	F <sub>MIN</sub> = -62,26 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 62,26 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -350 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 36728 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 716 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	3670	10,0%	21,5	1,8	0,2623	1036,09	575,60
2	17684	48,1%	23,0	1,3	0,2356	930,62	715,86
3	22975	62,6%	24,0	1,2	0,2306	910,87	759,06
4	28610	77,9%	24,5	1,2	0,2651	1047,15	872,62

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata. Per questo provino è stato registrato l'andamento della temperatura durante tutta la prova per valutare con più accuratezza la sua influenza nelle misure di deformazione media e rigidità.

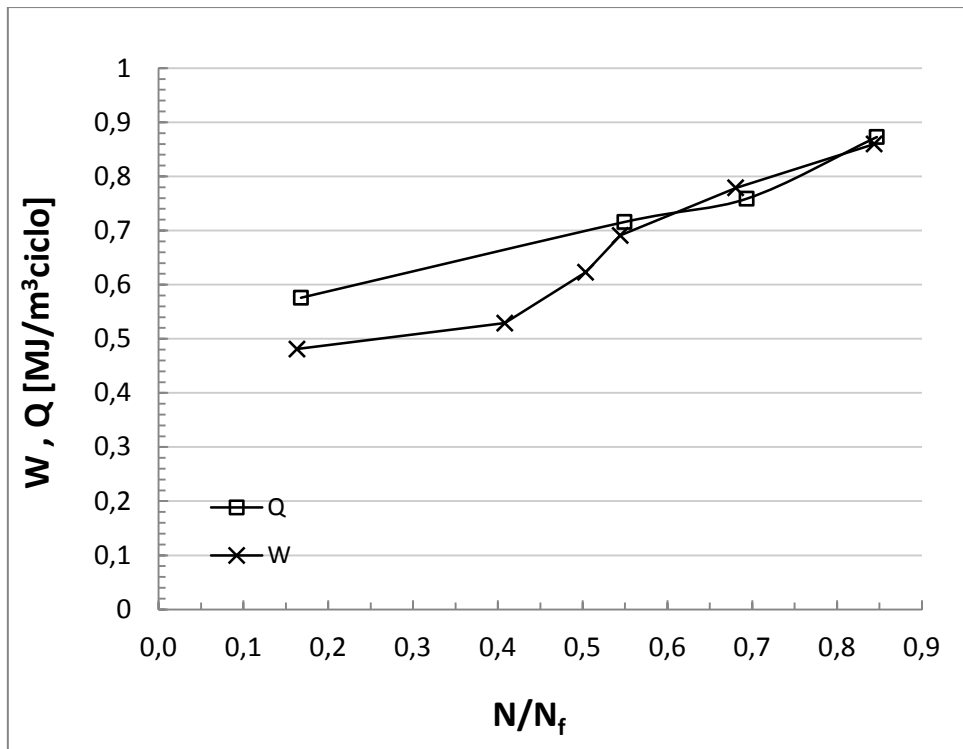


Figura A13.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa  $W$  e delle densità di energia dissipata  $Q$  in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

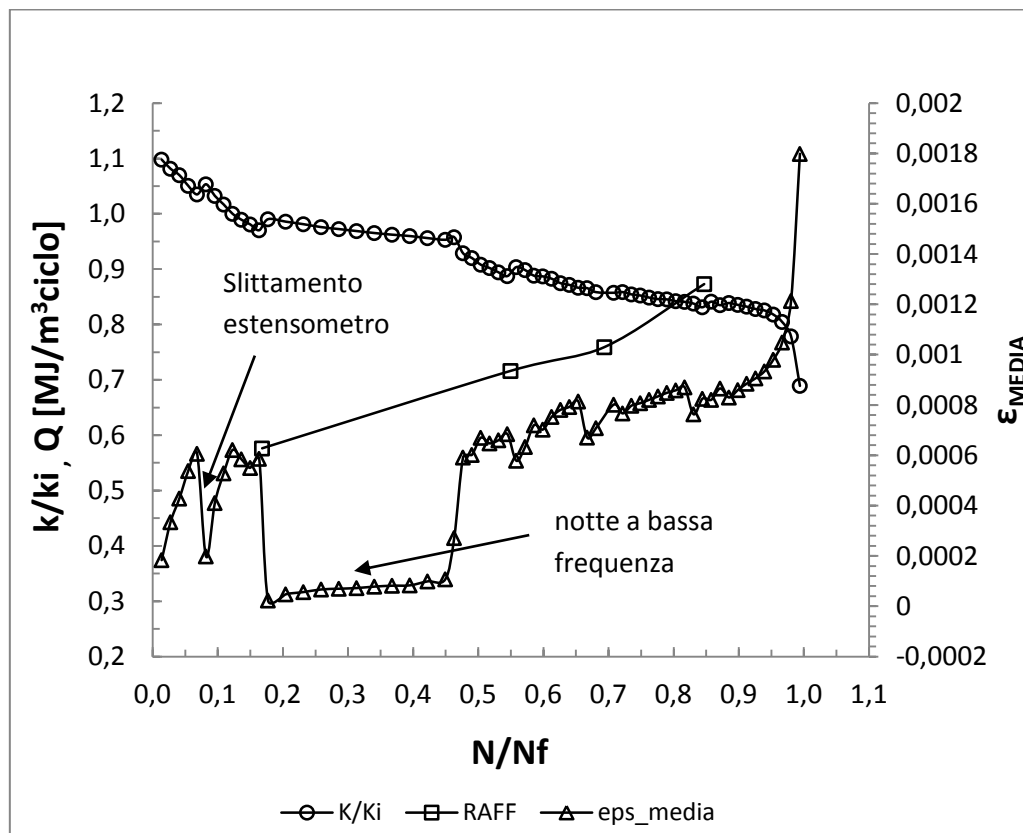


Figura A13.2 Andamento della rigidezza relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

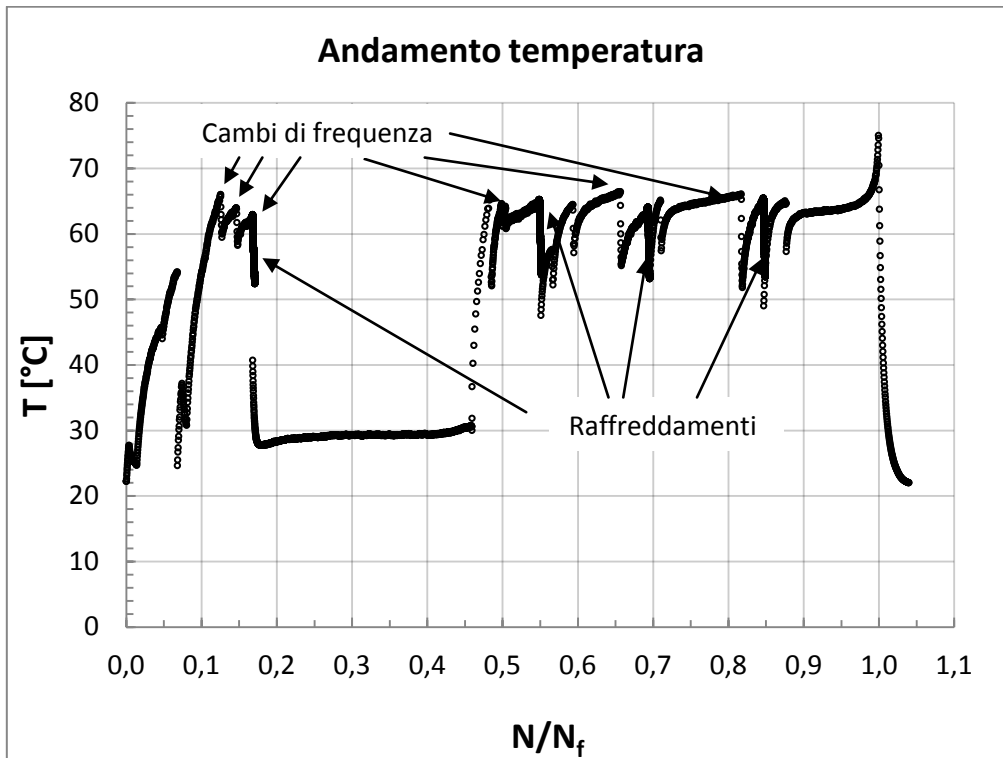


Figura A13.3 Andamento della temperatura registrata dalla termocoppia in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

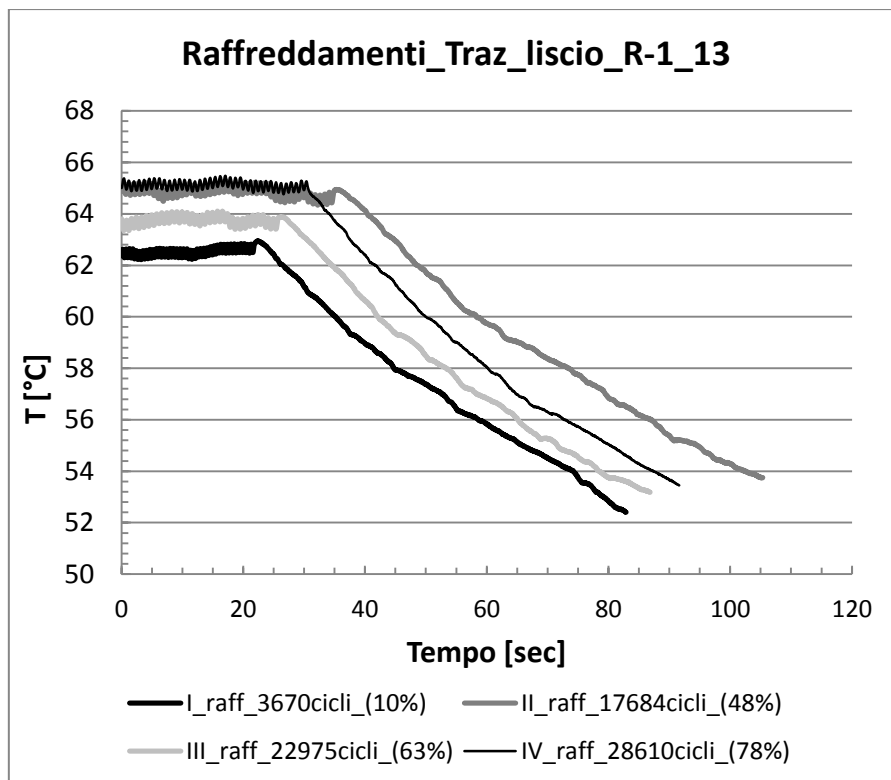


Figura A13.4 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

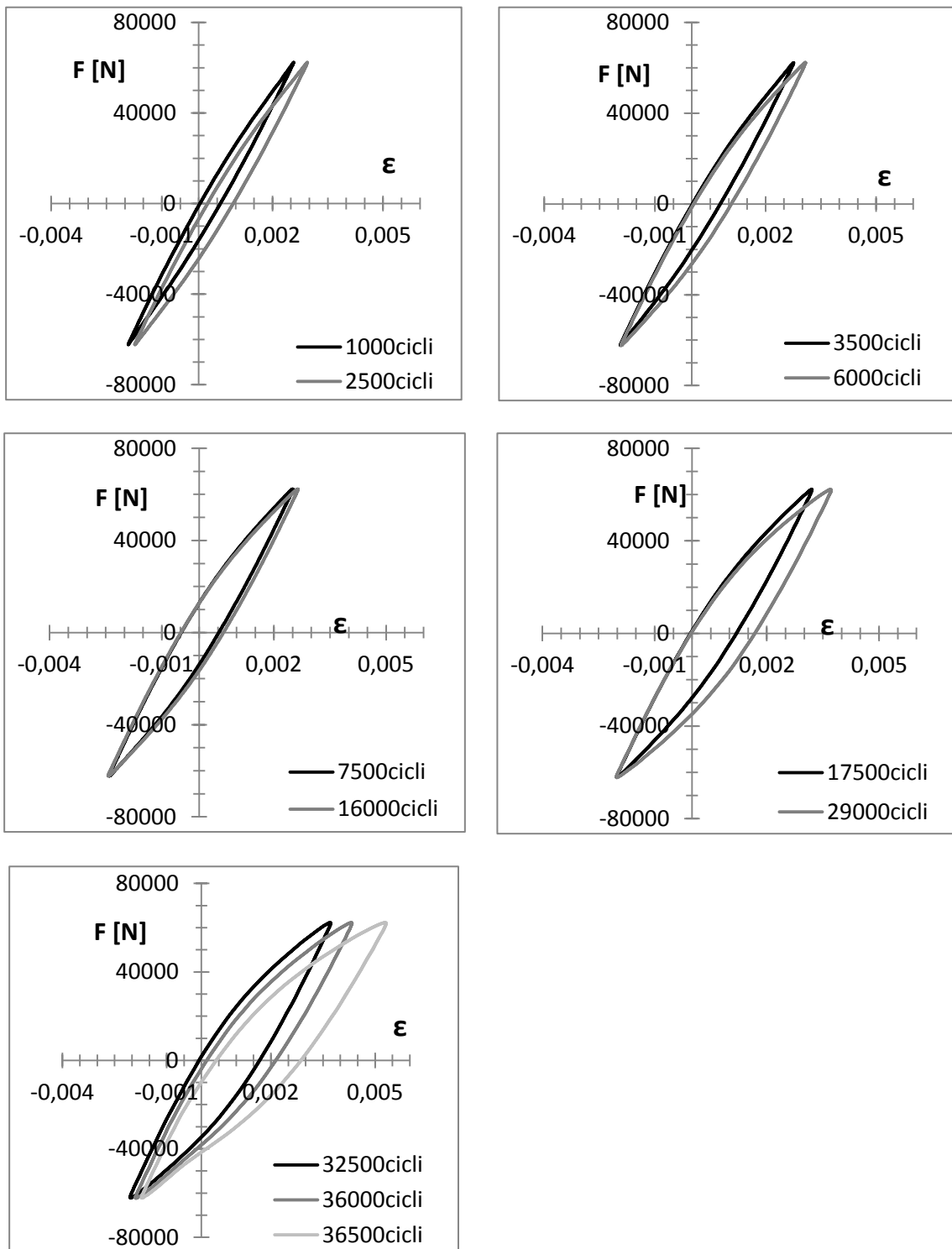


Figura A13.5 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13



Figura A13.6 Vista laterale e vista frontale della cricca per il provino Traz\_liscio\_R-1\_13

<b>PROVA : Traz_liscio_R-1_14</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 59,20 kN	F <sub>MIN</sub> = -59,20 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 59,20 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -335 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 335 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 92926 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q 50% = 500 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10315	11,1%	22,0	2,8	0,242	955,90	341,39
2	30165	32,5%	23,5	2	0,26	1027,00	513,50
3	50153	54,0%	23,5	1,9	0,2406	950,37	500,19
4	75168	80,9%	23,0	1,9	0,2577	1017,92	535,74

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino e calcolare l'energia meccanica spesa per valutarne la compatibilità con le misure di energia dissipata. Per questo provino è stato registrato l'andamento della temperatura durante tutta la prova per valutare con più accuratezza la sua influenza nelle misure di deformazione media e rigidità.

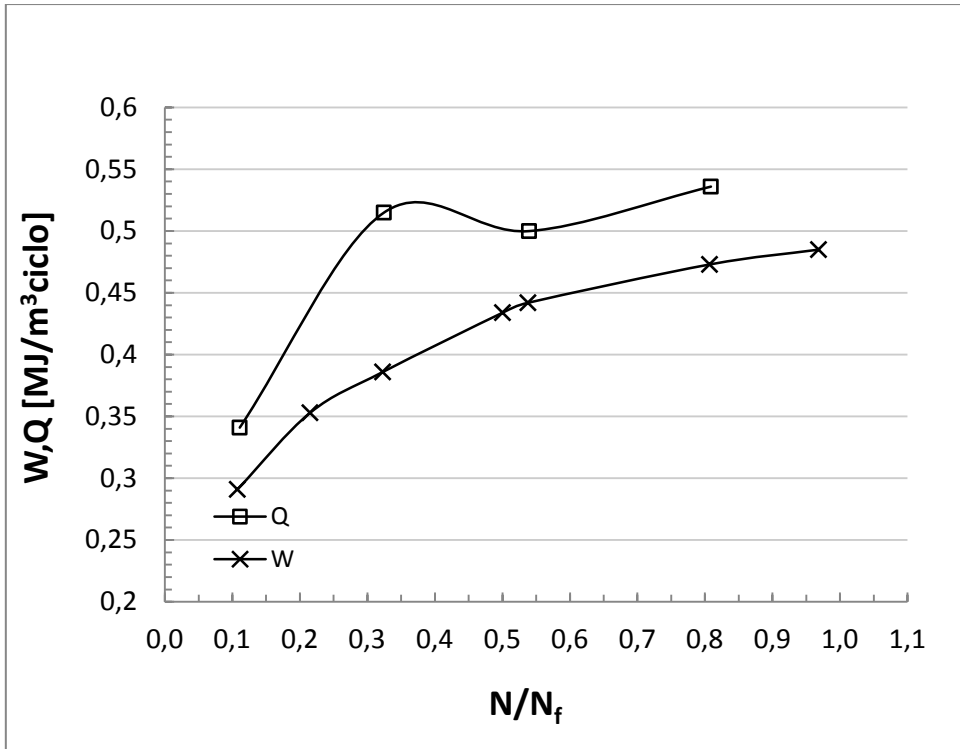


Figura A14.1 Andamento della densità di energia meccanica spesa W e delle densità di energia dissipata Q in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

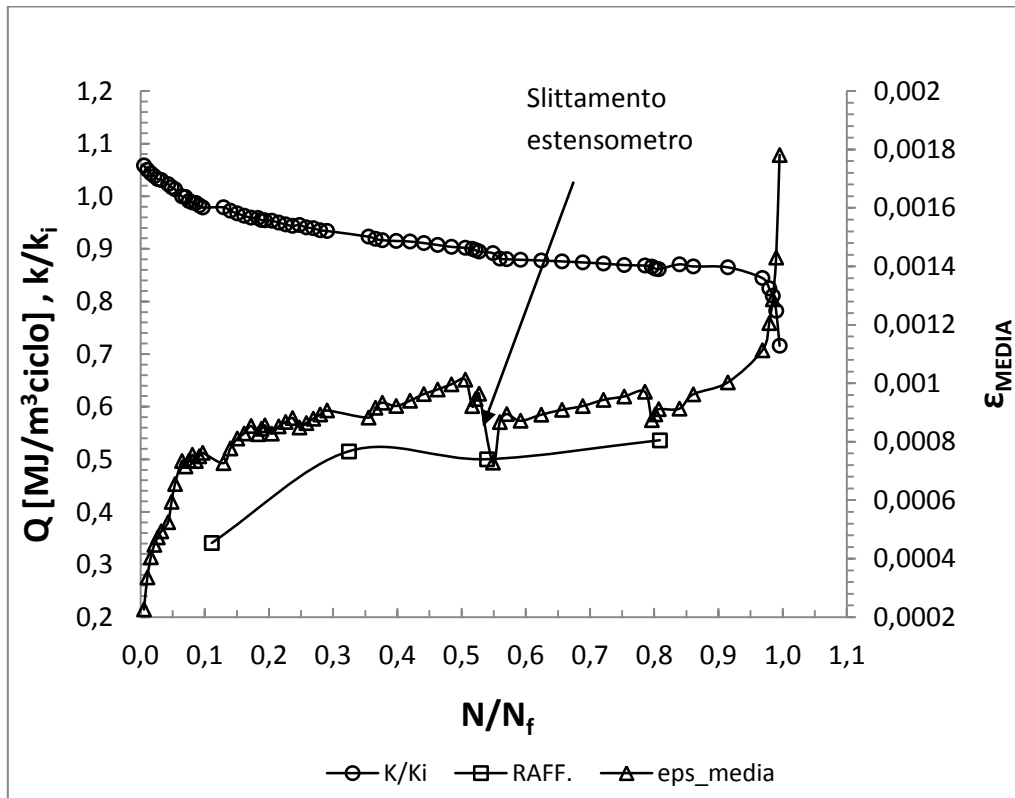


Figura A14.2 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14



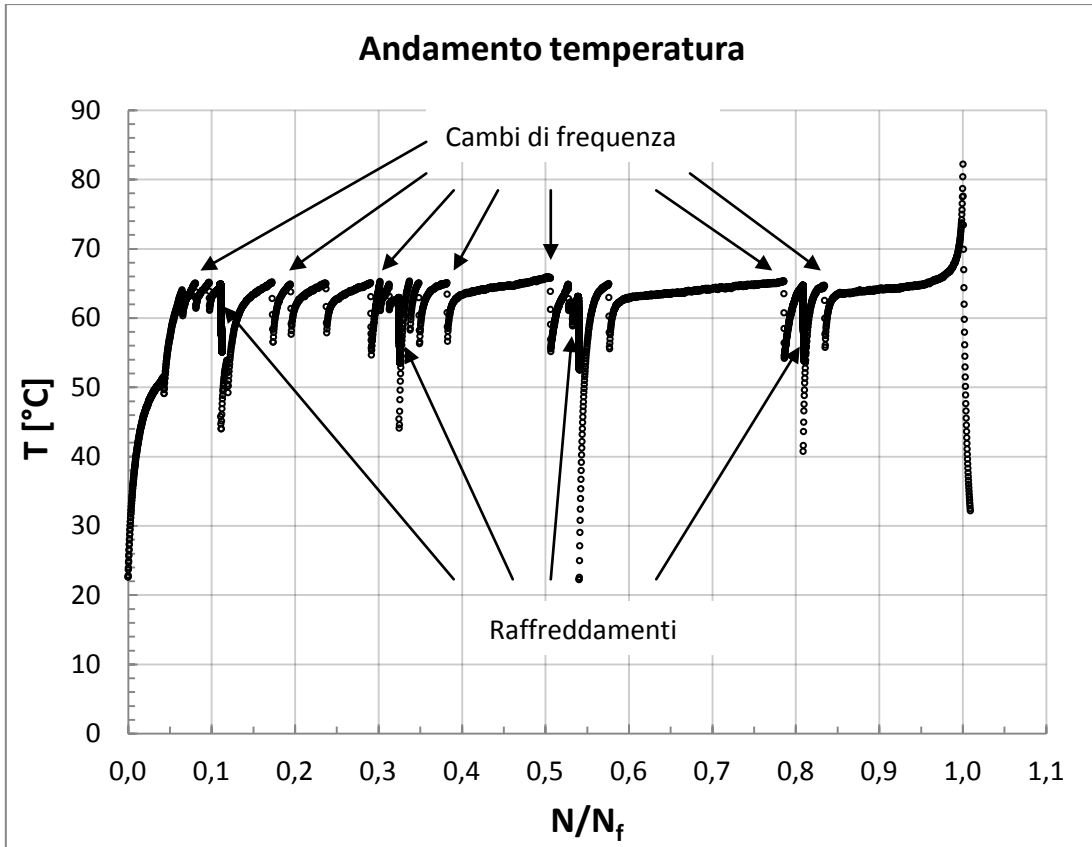


Figura A14.3 Andamento della temperatura registrata dalla termocoppia in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

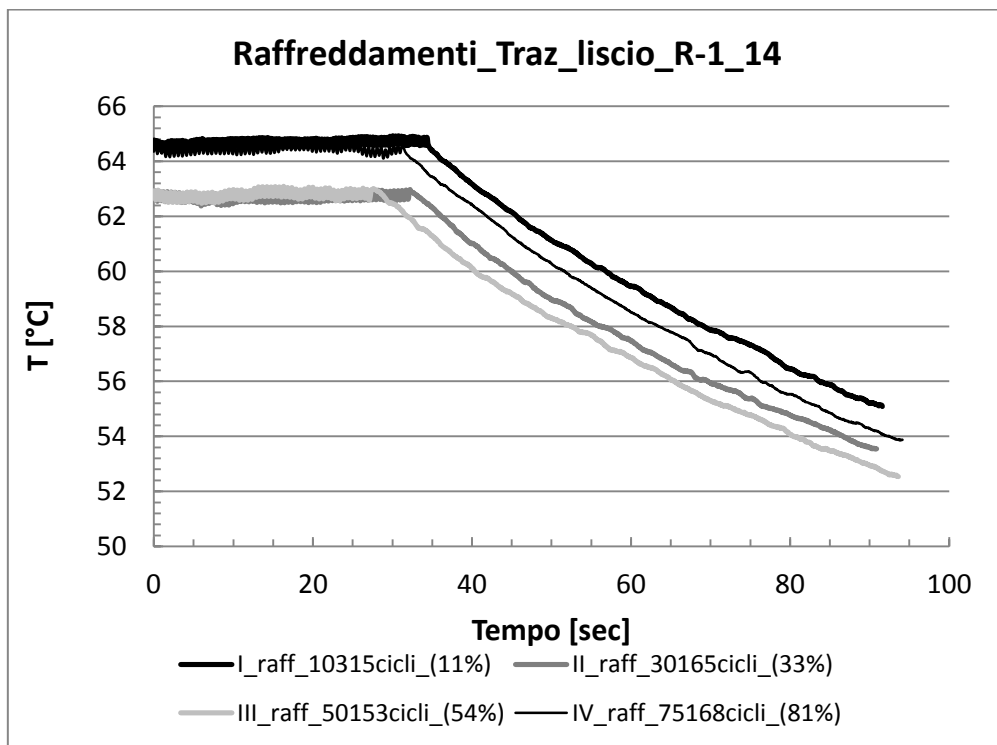


Figura A14.4 Esempi di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita (indicate tra parentesi) per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

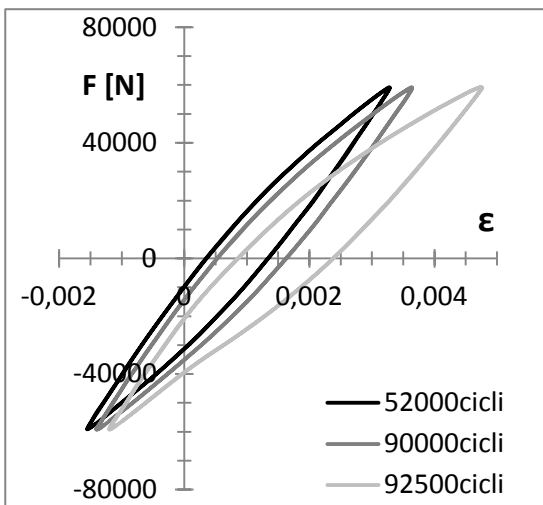
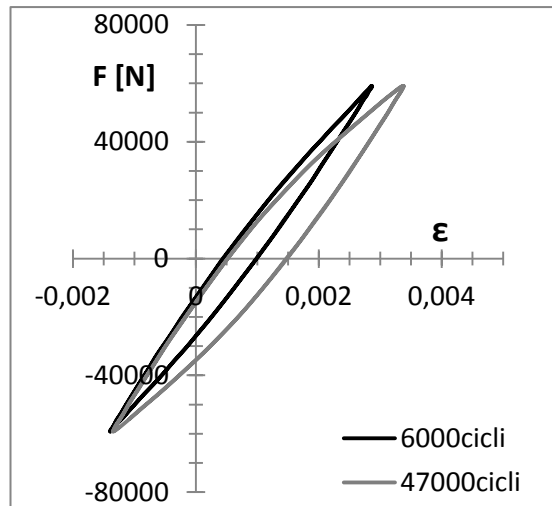
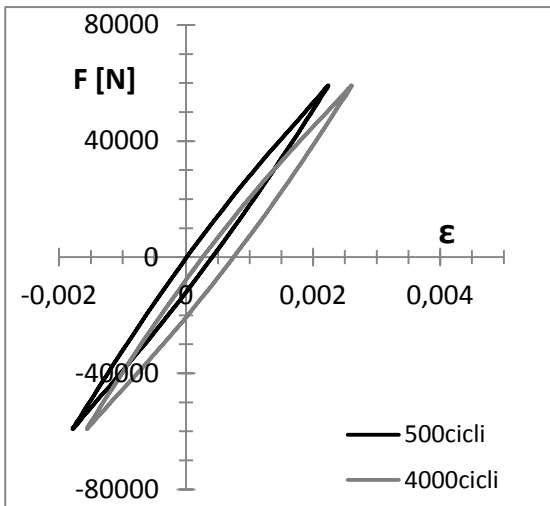


Figura A14.5 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

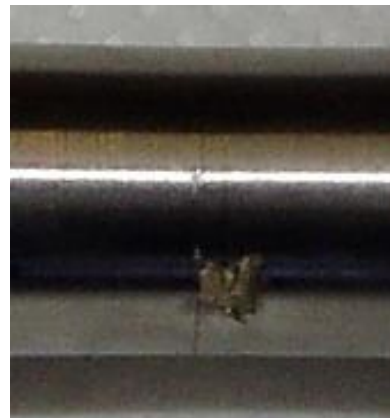


Figura A14.6 Due viste della cricca per il provino Traz\_liscio\_R-1\_14

PROVA : Traz_liscio_R-1_15				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 14,95\text{mm}$	A = 175,54 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 56,17 kN	F <sub>MIN</sub> = -56,17 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 56,17 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320\text{MPa}$

Numero di cicli a rottura:	<b>N<sub>f</sub> = 206195 cicli</b>
Nessuna misura di Q	

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino. Per questo provino è stato registrato l'andamento della temperatura durante tutta la prova per valutare con più accuratezza la sua influenza nelle misure di deformazione media e rigidità. Inoltre non sono stati eseguiti raffreddamenti per non disturbare le misure estensometriche.

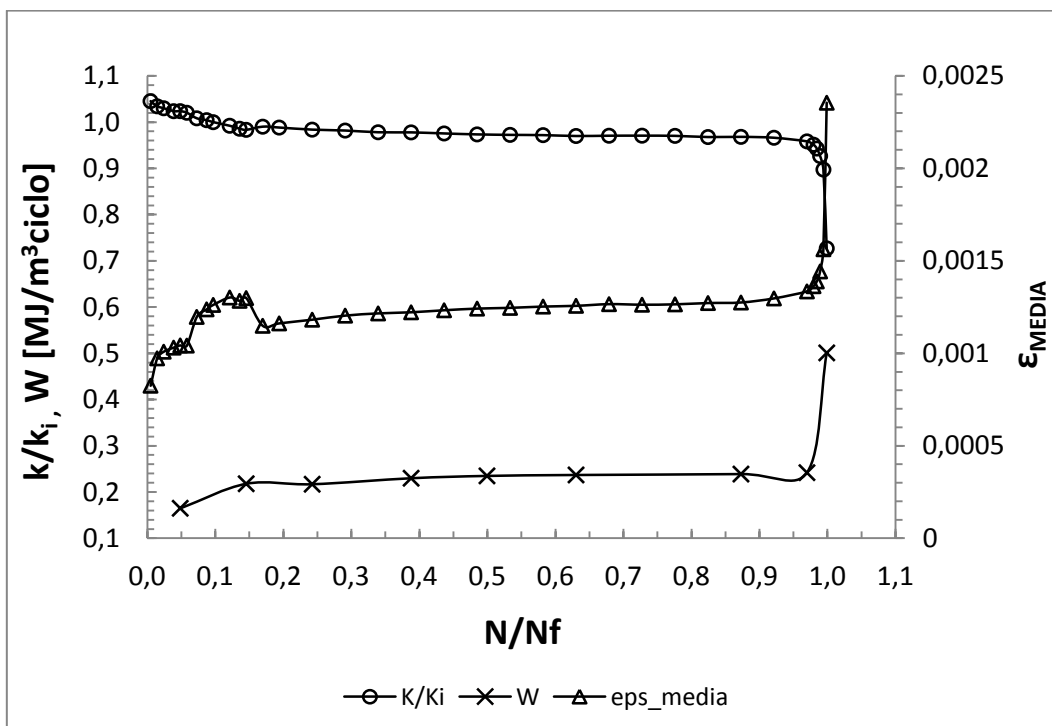


Figura A15.1 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia meccanica spesa in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_15

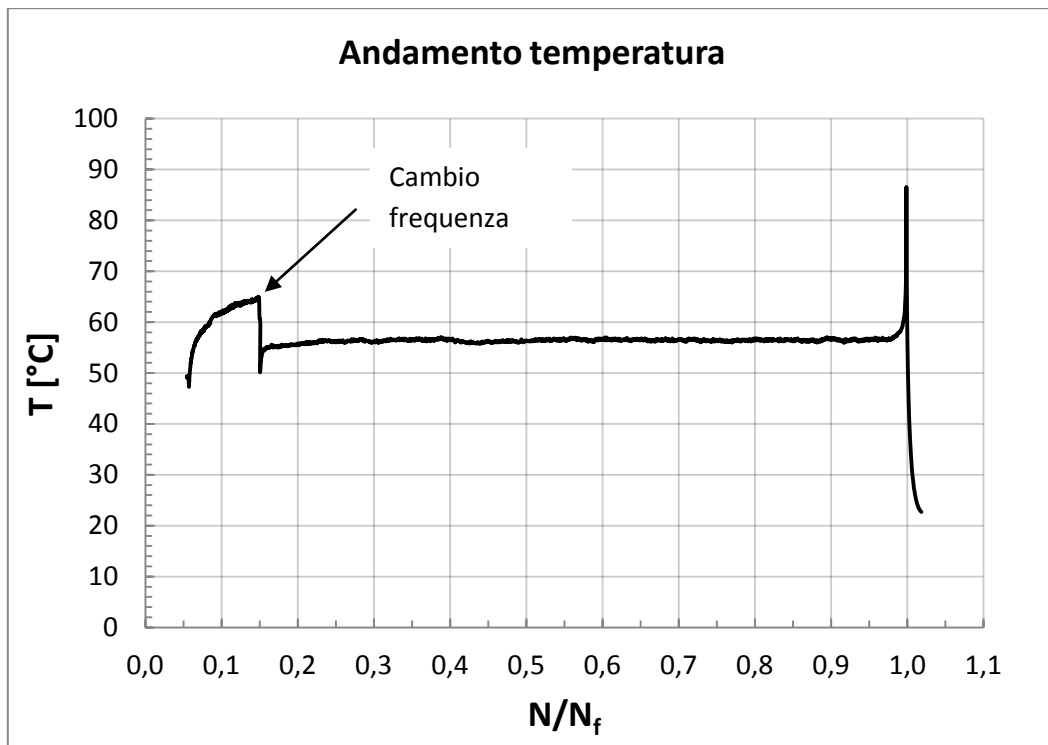


Figura A15.2 Andamento della temperatura registrata dalla termocoppia in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_15

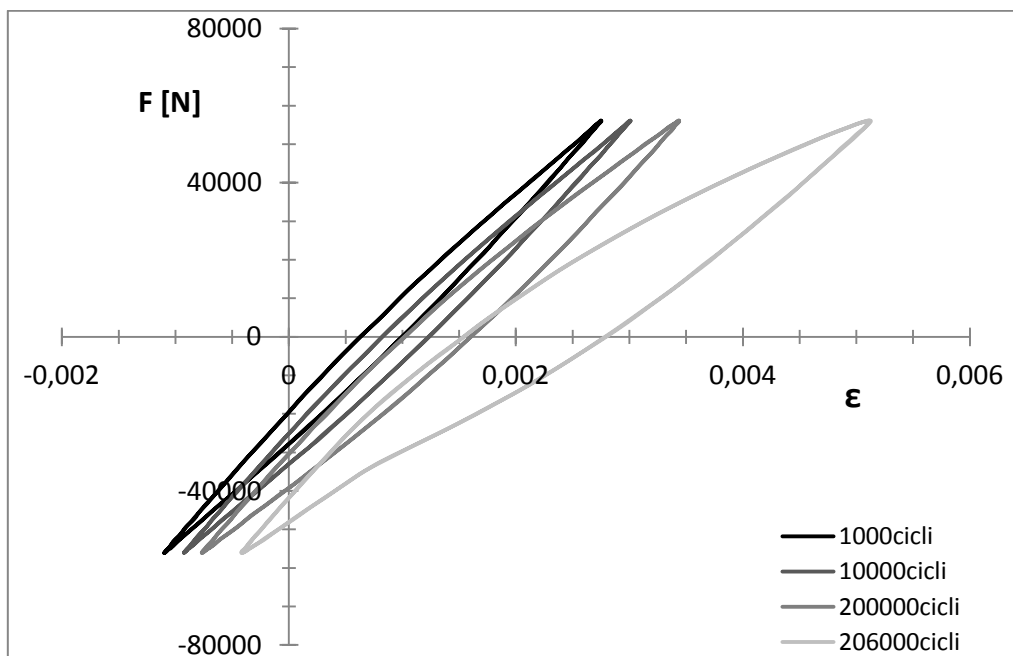


Figura A15.3 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_15

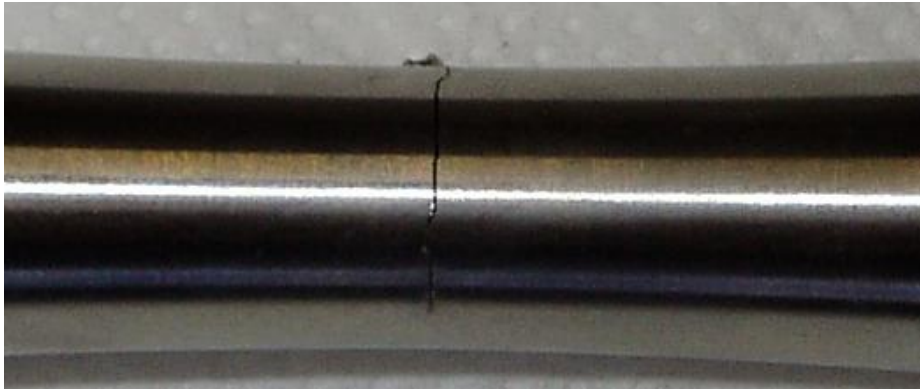


Figura A15.4 Vista della cricca per il provino Traz\_liscio\_R-1\_15

PROVA : Traz_liscio_R-1_16				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 53,01 kN	F <sub>MIN</sub> = -53,01 kN	F <sub>MED</sub> = 0 kN	F <sub>a</sub> = 53,01 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX} = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300\text{MPa}$

Numero di cicli a rottura:	<b>N<sub>f</sub> = 483510 cicli</b>
Nessuna misura di Q	

NOTE: la prova è stata eseguita con l'utilizzo dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato i valori di rigidità e deformazione media. In questa prova l'estensometro è stato fissato attraverso l'utilizzo dei soli elastici e, come si vede dai grafici, sono presenti numerosi slittamenti. È stato inoltre possibile costruire i cicli di isteresi durante la vita del provino. Per questo provino è stato registrato l'andamento della temperatura durante tutta la prova per valutare con più accuratezza la sua influenza nelle misure di deformazione media e rigidità. Inoltre non sono stati eseguiti raffreddamenti per non disturbare le misure estensometriche.

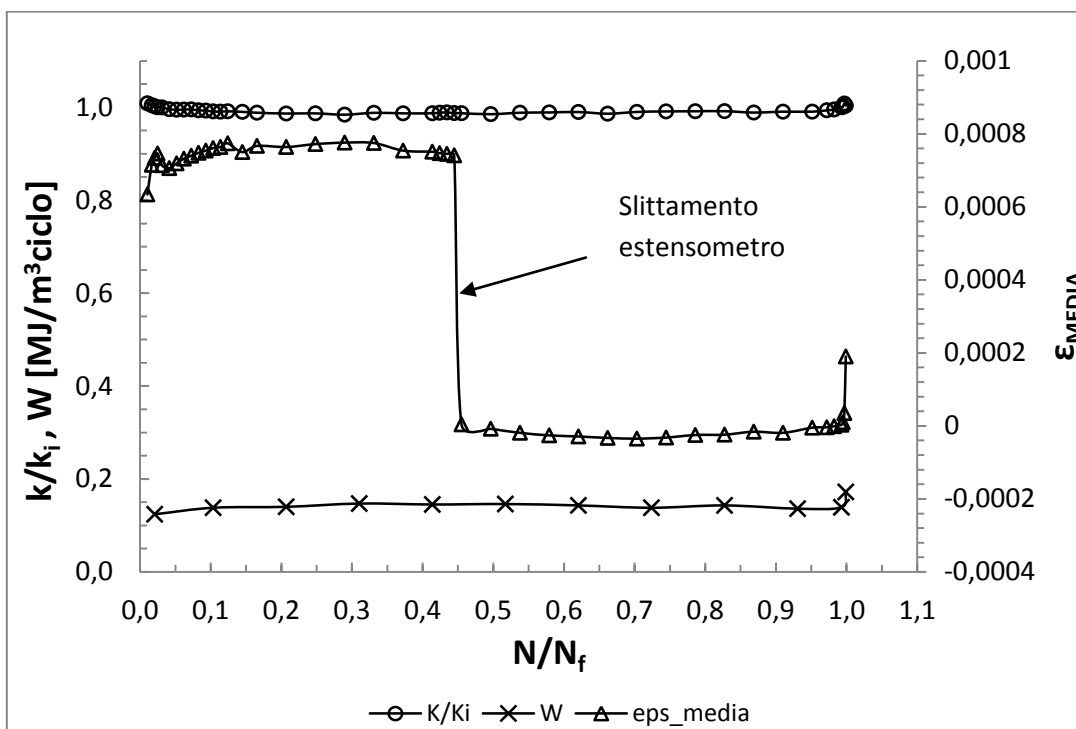


Figura A16.1 Andamento della rigidità relativa, della deformazione media e della densità di energia meccanica spesa in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_16

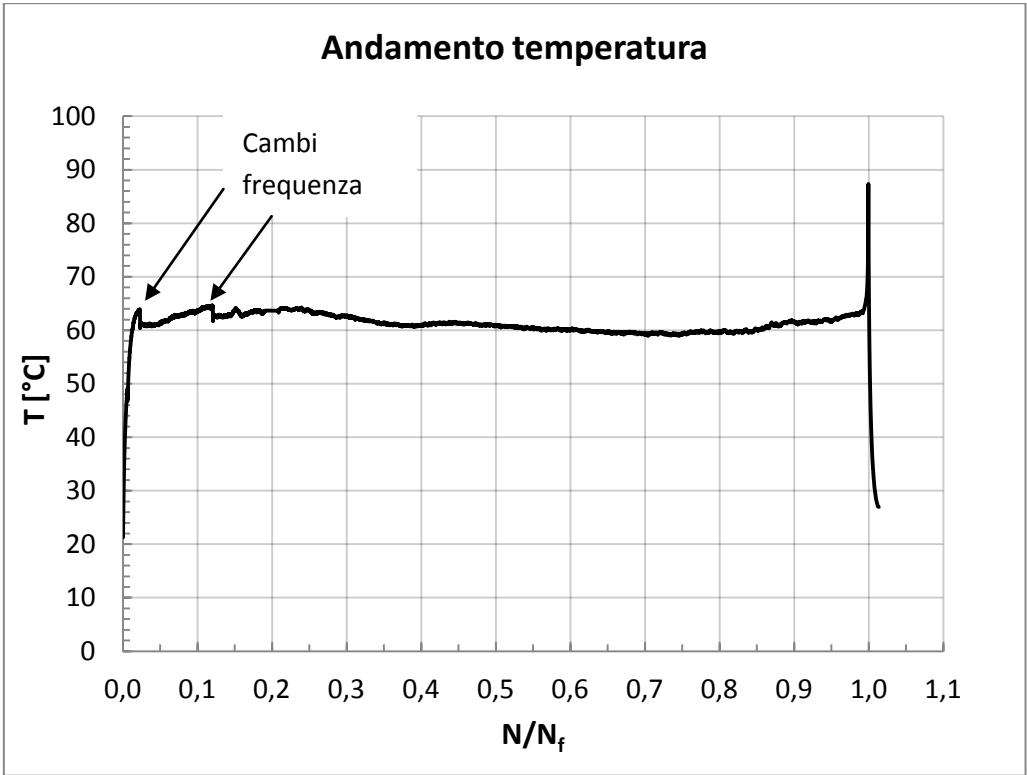


Figura A16.2 Andamento della temperatura registrata dalla termocoppia in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R-1\_16

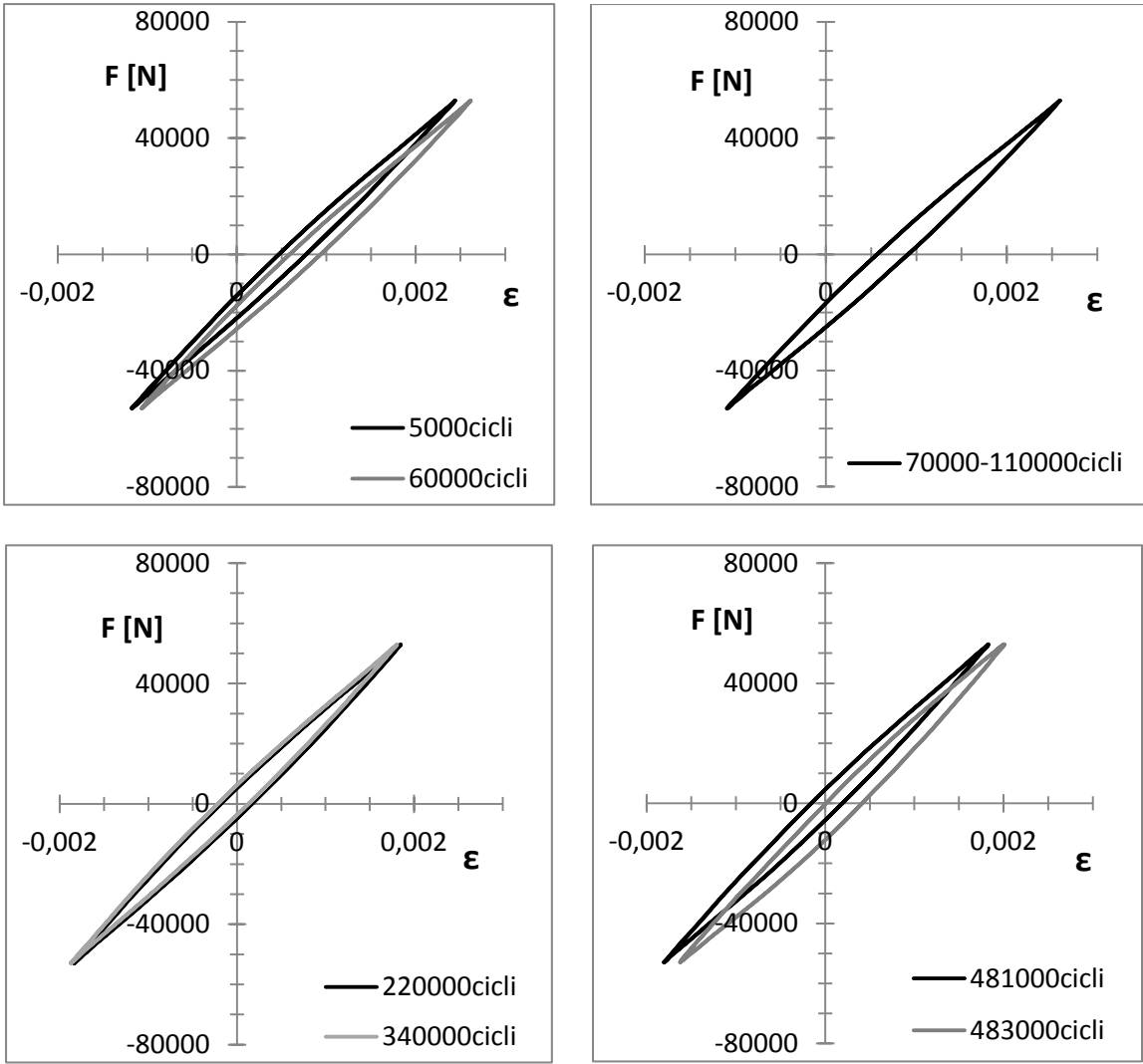


Figura A16.3 Cicli di isteresi valutati a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R-1\_16

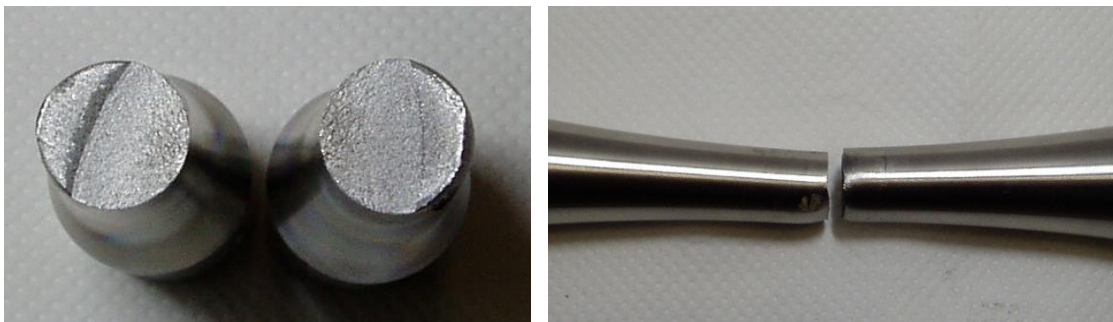


Figura A16.4 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R-1\_16



## Appendice B

### RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R0,1

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R0,1. Ciascuna scheda presenta i dati caratteristici relativi alle modalità di prova e quelli relativi ai diversi raffreddamenti svolti per ciascun provino. Vengono inoltre riportati il grafico dell'energia specifica dissipata Q in funzione del numero di cicli e l'andamento della temperatura in corrispondenza a raffreddamenti eseguiti in diverse fasi della vita (tra parentesi viene indicata proprio la percentuale di vita a cui viene eseguito quel raffreddamento).

A causa degli elevati allungamenti e dei frequenti slittamenti dei provini non è stato possibile utilizzare l'estensometro in tutte le prove, soprattutto per quelle ad elevato carico. Dove è stato utilizzato l'estensometro è stato possibile tracciare in modo più preciso gli andamenti della rigidità relativa e della deformazione media durante le prove. Inoltre è stato possibile tracciare l'andamento dell'energia meccanica spesa W calcolata come area del ciclo d'isteresi in funzione del numero di cicli per poter fare un confronto con l'andamento di Q.

Il valore della rigidità relativa è stato normalizzato non rispetto al valore iniziale ma rispetto al valore di rigidità calcolato non appena la temperatura del provino si è stabilizzata attorno ai 60°C in quanto si è visto come proprio la temperatura influenza molto i valori di deformazione e quindi anche della rigidità stessa.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura A.1.

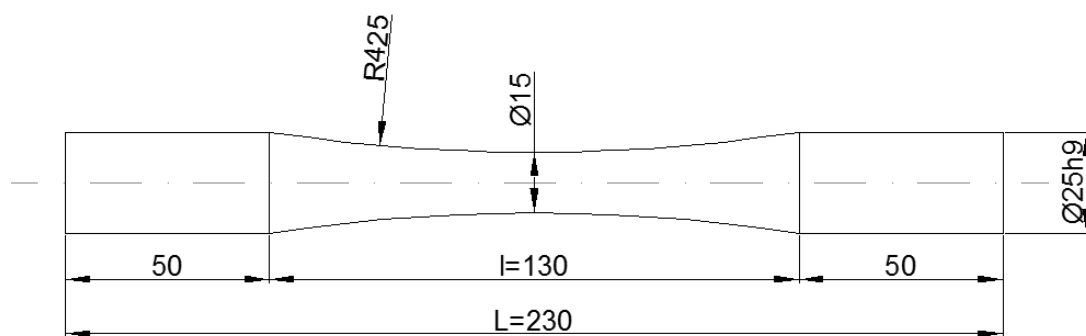


Figura A.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_01</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,10\text{mm}$	A = 179,08 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 79,59 kN	F <sub>MIN</sub> = 7,96 kN	F <sub>MED</sub> = 43,78 kN	F <sub>a</sub> = 35,81 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 444,4 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 44,4 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 244,4 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 200 \text{ MPa}$

<b>NON ROTTO :</b>	<b>Fermato a 2142783 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 24 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
40284	1,9%	22,0	18	0,1254	495,33	27,52
101026	4,7%	23,0	20	0,1388	548,26	27,41
254844	11,9%	24,5	20	0,1359	536,81	26,84
355175	16,6%	25,5	20	0,1397	551,82	27,59
500132	23,3%	25,5	20	0,1302	514,29	25,71
706444	33,0%	16,5	20	0,1525	602,38	30,12
804048	37,5%	19,1	20	0,1648	650,96	32,55
890670	41,6%	20,0	20	0,1454	574,33	28,72
1000874	46,7%	22,0	20	0,1218	481,11	24,06
1100188	51,3%	22,5	20	0,1473	581,84	29,09
1190345	55,6%	23,0	20	0,1469	580,26	29,01
1483542	69,2%	21,5	20	0,1495	590,53	29,53
1601839	74,8%	22,0	20	0,1454	574,33	28,72
1785897	83,3%	23,5	20	0,1489	588,16	29,41
1900973	88,7%	23,5	20	0,1271	502,05	25,10

NOTE : per questa prova non è stato utilizzato l'estensometro. I valori di rigidezza e allungamento medio sono quelli provenienti dal sensore di spostamento LVDT della macchina che risente delle variazioni di frequenza. A frequenze elevate la rigidezza misurata risulta maggiore che a frequenze basse.

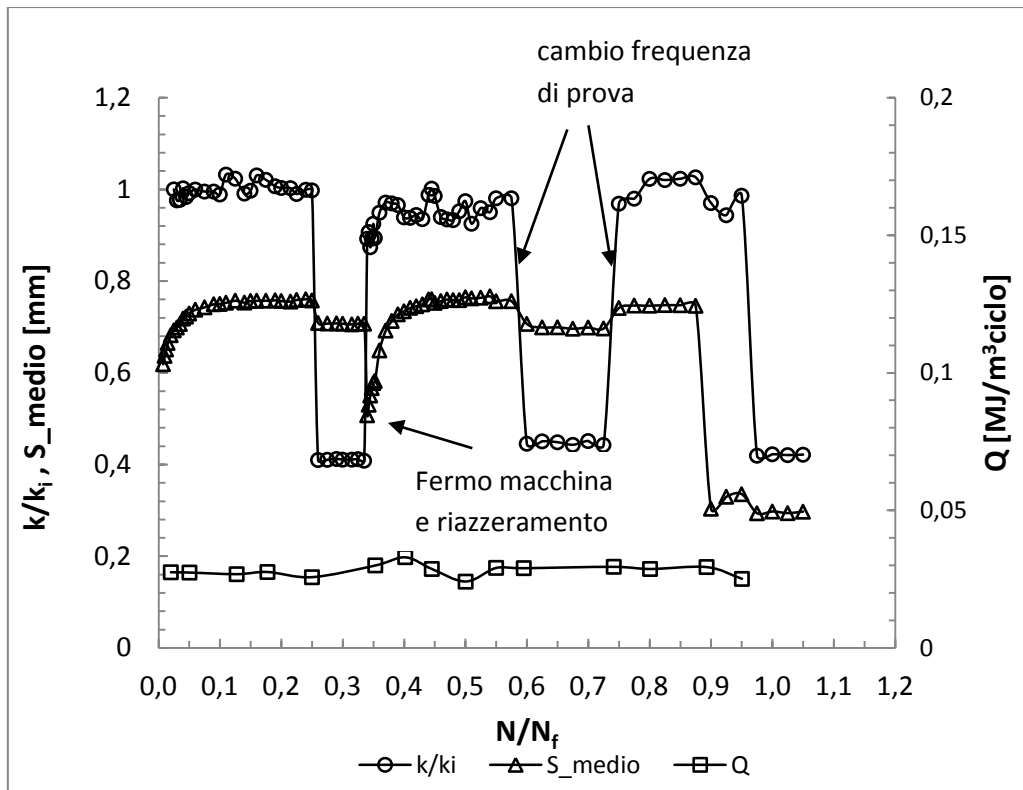


Figura B1.1 Andamento delle rigidità relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_01

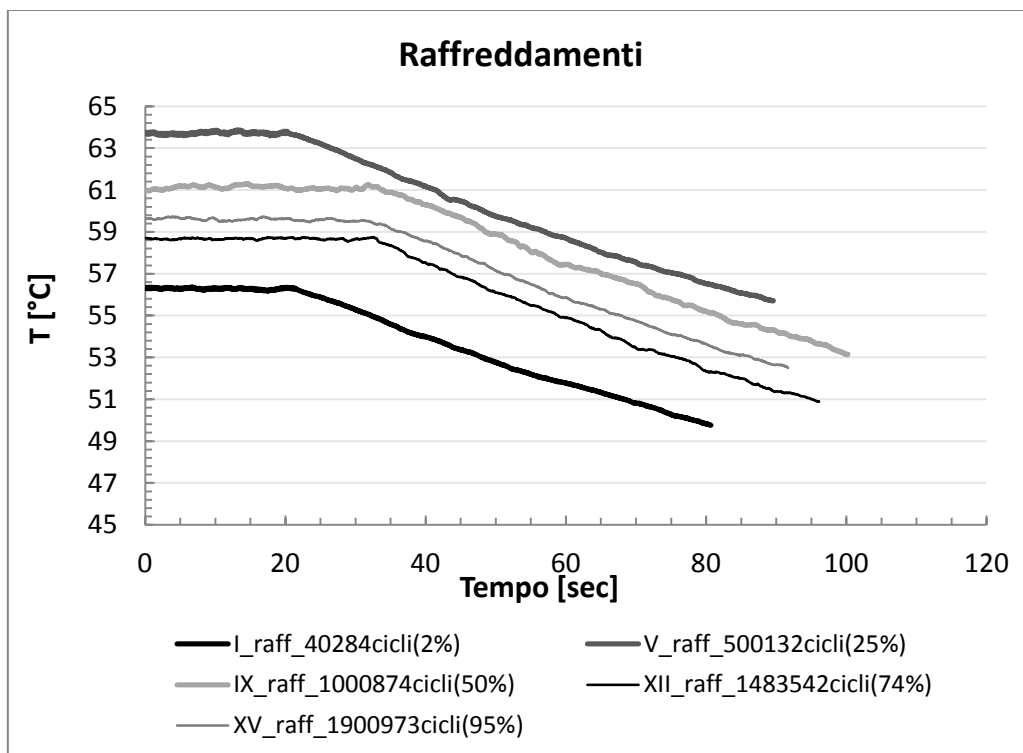


Figura B1.2 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_01

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_02</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 98,17 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,82 kN	F <sub>MED</sub> = 53,99 kN	F <sub>a</sub> = 44,18 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 555,6 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 55,6 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 305,6 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 250 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 92656 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 72 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	15531	16,8%	21,5	10	0,1536	606,72	60,67
2	32928	35,5%	22,5	10	0,1408	556,16	55,62
3	45794	49,4%	22,5	10	0,1825	720,88	72,09
4	61066	65,9%	22,6	10,5	0,1934	763,93	72,76
5	75719	81,7%	23,4	10,5	0,175	691,25	65,83
6	90256	97,4%	22,8	10,5	0,1789	706,66	67,30

NOTE : per questa prova non è stato utilizzato l'estensometro. I valori di rigidità e allungamento medio sono quelli provenienti dal sensore di spostamento LVDT della macchina.

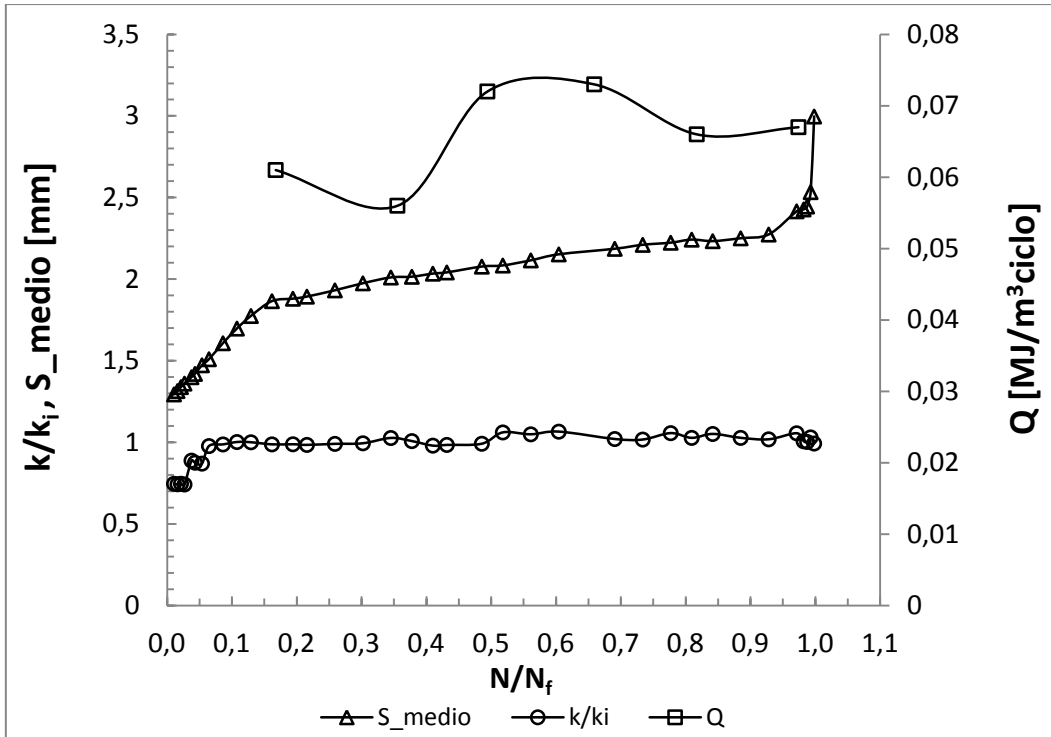


Figura B2.1 Andamento delle rigidezza relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_02

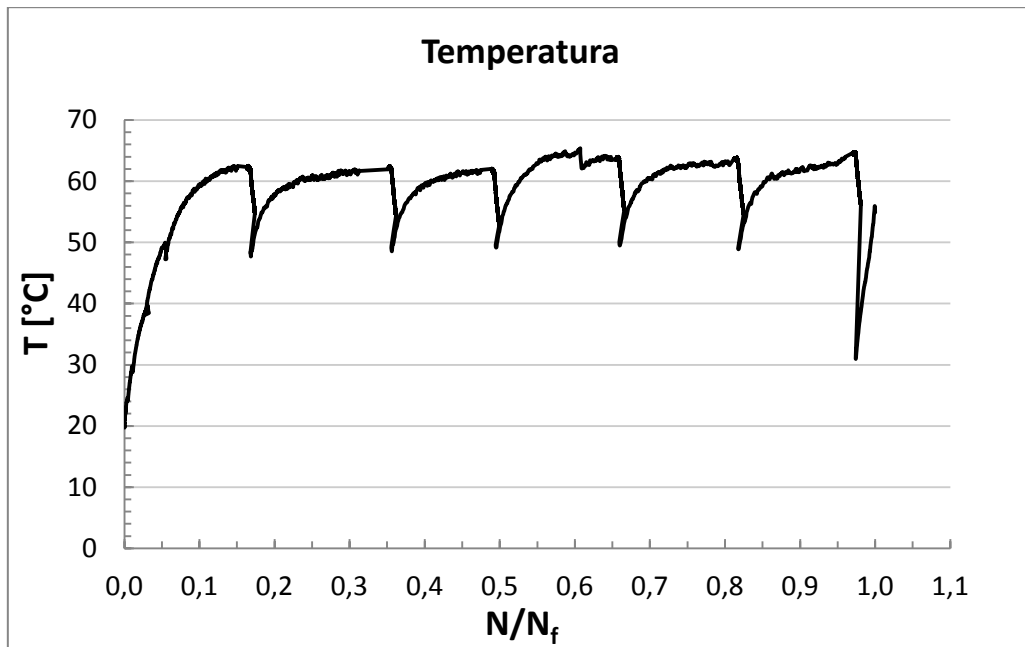


Figura B2.2 Andamento della temperatura registrata durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_02

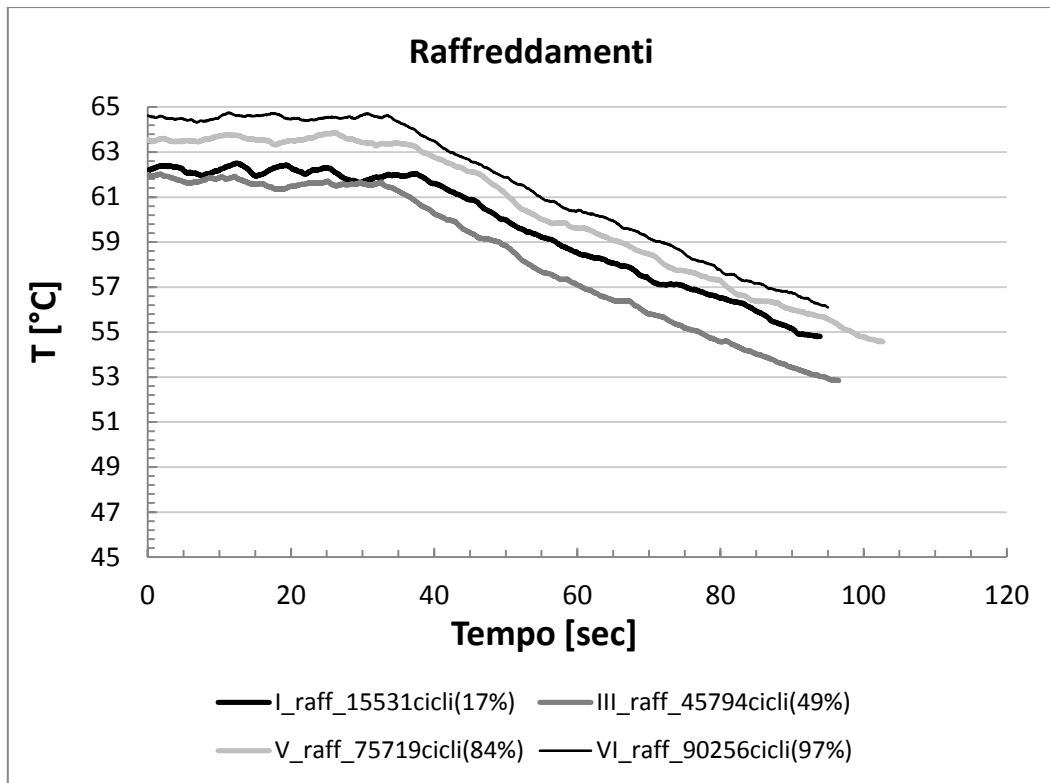


Figura B2.3 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_02

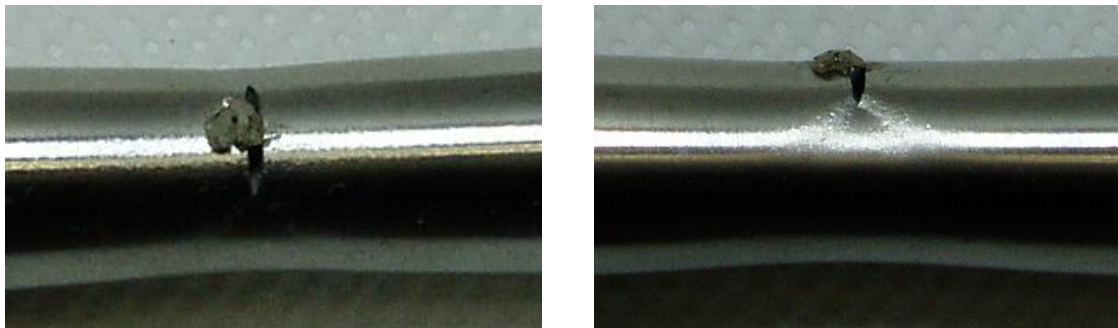


Figura B2.4 Vista frontale e laterale della cricca innescata per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_02

PROVA : Traz_liscio_R0,1_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 106,03 kN	F <sub>MIN</sub> = 10,6 kN	F <sub>MED</sub> = 58,3 kN	F <sub>a</sub> = 47,7 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX} = 600 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 60 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 330 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 270 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura:	<b>N<sub>f</sub> = 28649 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 85 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	8908	31,1%	23,3	8	0,1712	676,24	84,53

NOTE : per questa prova non è stato utilizzato l'estensometro. I valori di rigidità e allungamento medio sono quelli provenienti dal sensore di spostamento LVDT della macchina. Inoltre è stato possibile eseguire un solo raffreddamento a causa di un fermo macchina a circa metà vita.

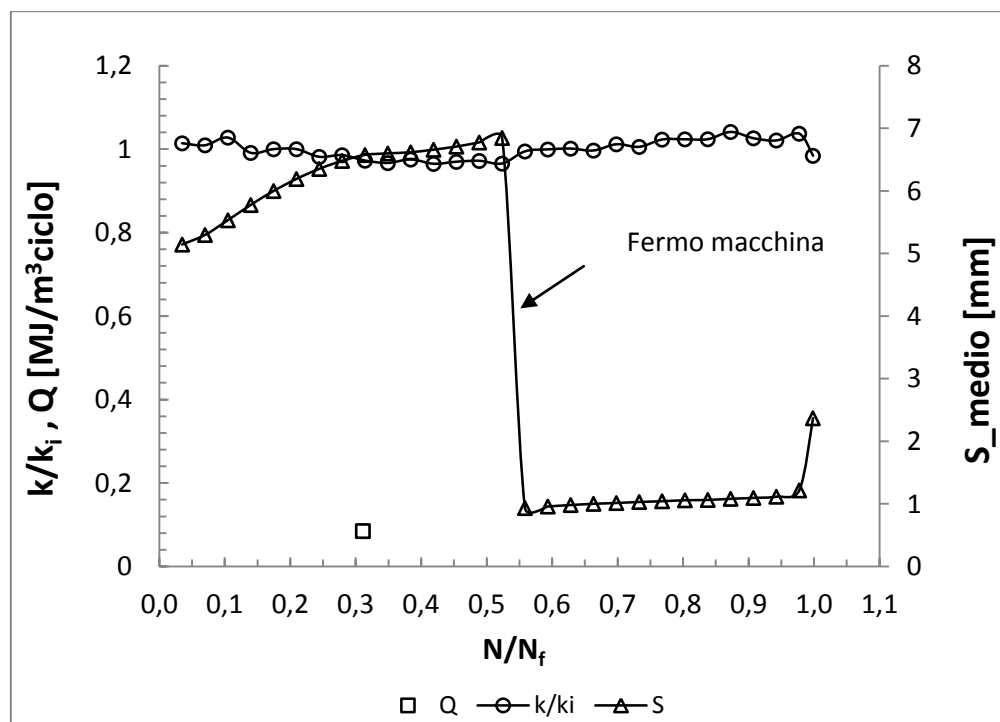


Figura B5.1 Andamento delle rigidità relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_05

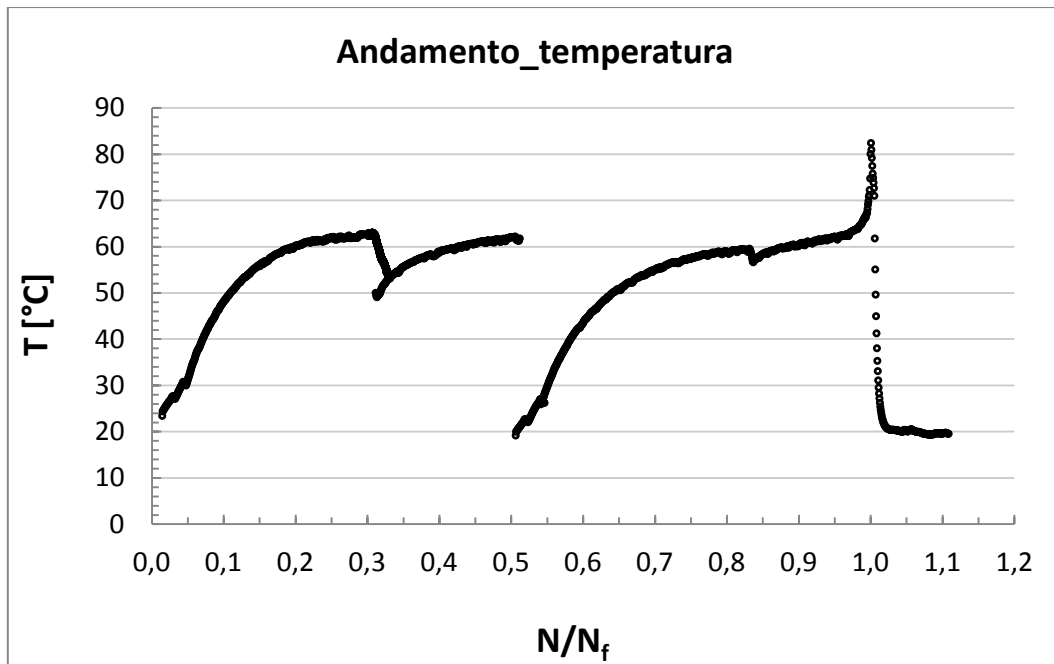


Figura B5.2 Andamento della temperatura registrata durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_05

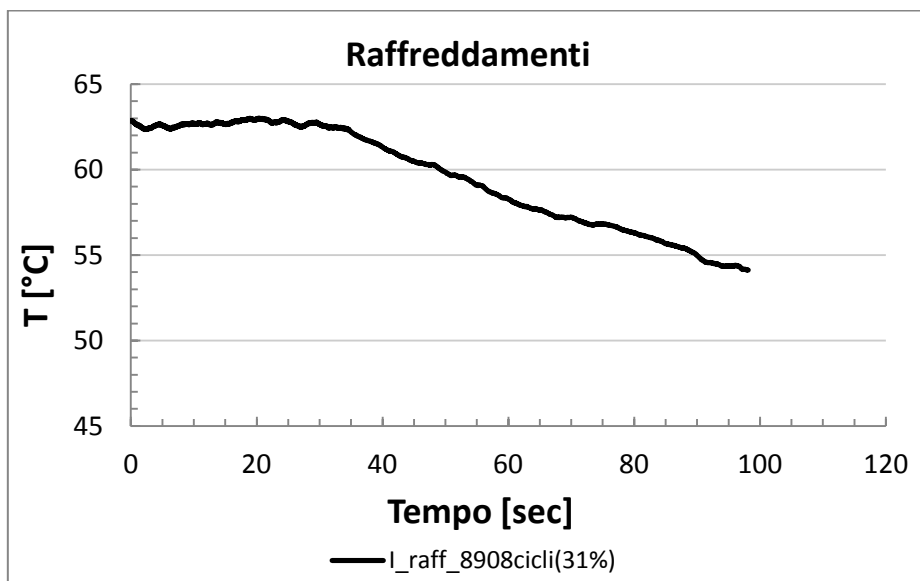


Figura B5.3 Raffreddamento eseguito per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_05

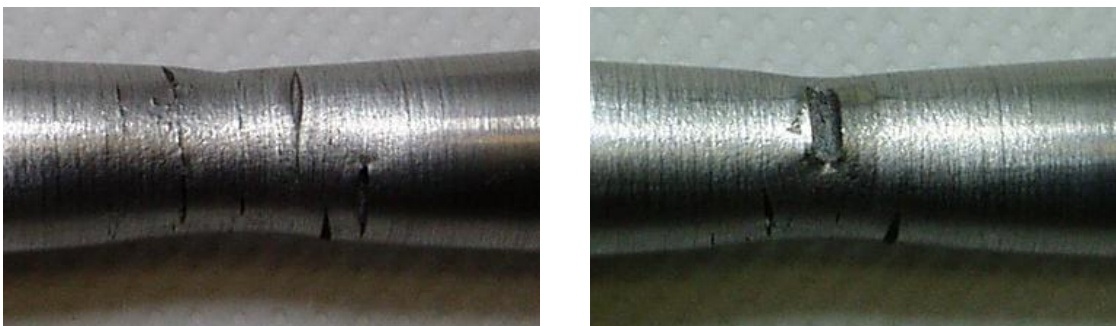


Figura B5.4 Due viste delle cricche innestate per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_05



<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_06</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 92,28 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,23 kN	F <sub>MED</sub> = 50,76 kN	F <sub>a</sub> = 41,53 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 522,2 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 52,2 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 287,2 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 235 \text{ MPa}$

<b>NON ROTTO:</b>	<b>fermato a 1918779 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 85 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	20316	1,0%	21,4	13	0,1357	536,02	41,23
2	71899	3,6%	21,6	13	0,145	572,75	44,06
3	121774	6,1%	21,6	13	0,1558	615,41	47,34
4	140261	7,0%	22,0	12,5	0,1609	635,56	50,84
5	180954	9,0%	22,3	12,5	0,1733	684,54	54,76
6	220740	11,0%	22,5	12,5	0,1356	535,62	42,85
7	265181	13,3%	16,2	14	0,1835	724,83	51,77
8	303867	15,2%	17,5	14	0,1575	622,13	44,44
9	368730	18,4%	19,0	13	0,1724	680,98	52,38
10	459401	23,0%	20,5	12,5	0,1456	575,12	46,01
11	541915	27,1%	21,5	12,5	0,1363	538,39	43,07
12	775459	38,8%	21,0	13,5	0,166	655,70	48,57
13	903483	45,2%	22,1	12,5	0,1365	539,18	43,13
14	1000941	50,0%	23,0	12,5	0,1461	577,10	46,17
15	1167092	58,4%	22,8	13	0,1616	638,32	49,10
16	1304738	65,2%	19,0	14	0,1748	690,46	49,32
17	1560093	78,0%	21,5	13,5	0,1399	552,61	40,93
18	1841048	92,1%	20,5	13,5	0,1609	635,56	47,08

NOTE : per questa prova non è stato utilizzato l'estensometro. I valori di rigidità e allungamento medio sono quelli provenienti dal sensore di spostamento LVDT della macchina.

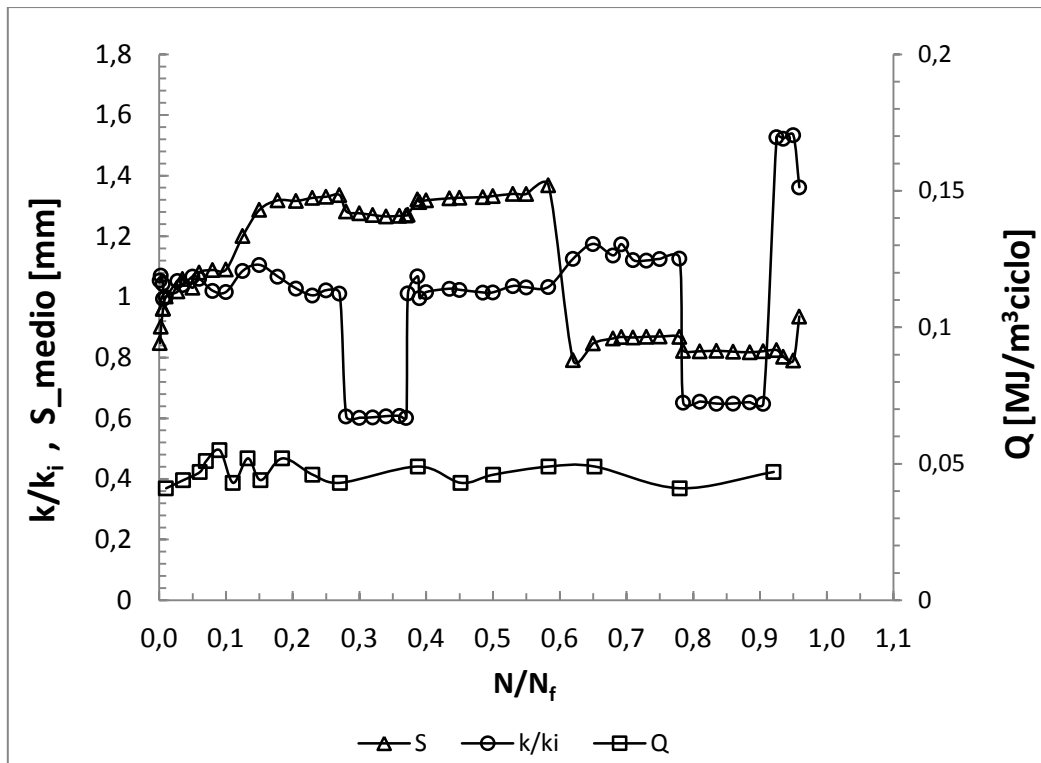


Figura B6.1 Andamento delle rigidezze relative, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_06

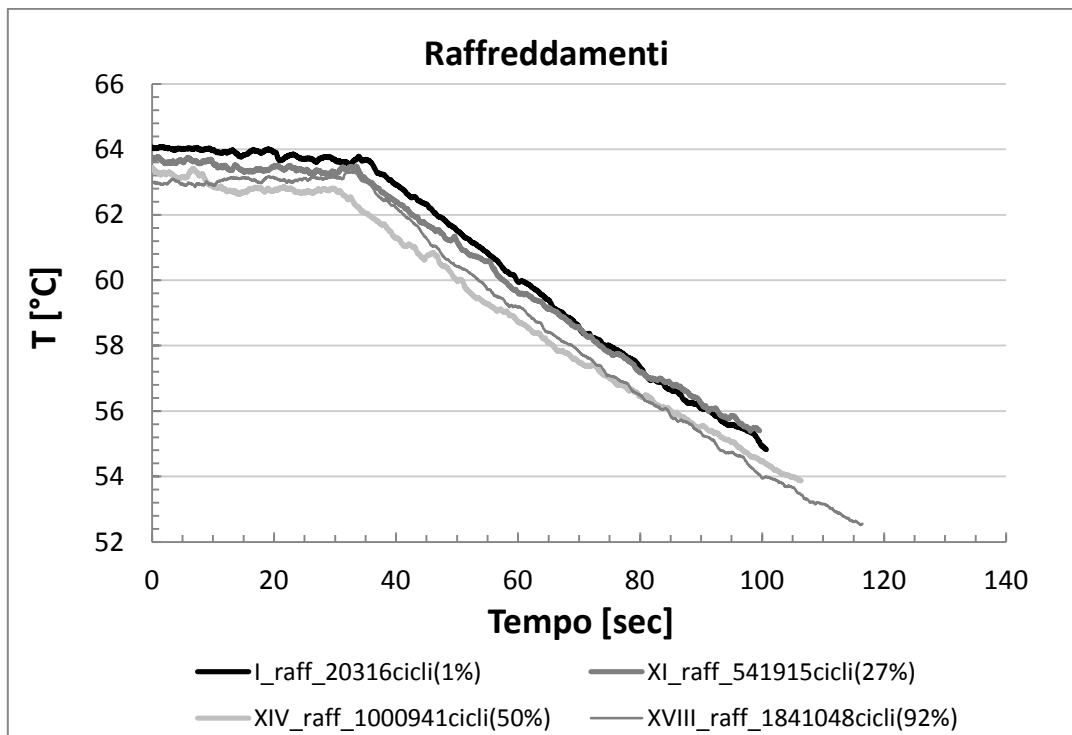


Figura B6.2 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_06

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_07</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 94,25 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,42 kN	F <sub>MED</sub> = 51,8 kN	F <sub>a</sub> = 42,4 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 533,3 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 53,3 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 293,3 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 240 \text{ MPa}$

<b>NON ROTTO:</b>	<b>fermato a 1552427 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 52 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	21225	1,1%	20,2	12	0,1694	669,13	55,76
2	70059	3,5%	21,4	11	0,1718	678,61	61,69
3	105307	5,3%	20,7	11,5	0,1643	648,99	56,43
4	160656	8,0%	21,0	12	0,1525	602,38	50,20
5	205251	10,3%	21,0	12,5	0,1745	689,28	55,14
6	255533	12,8%	21,3	12,5	0,1817	717,72	57,42
7	510038	25,5%	20,5	12,5	0,1696	669,92	53,59
8	651826	32,6%	21,2	12,5	0,1748	690,46	55,24
9	755386	37,8%	21,5	12,5	0,1793	708,24	56,66
10	955365	47,8%	21,2	12,5	0,1646	650,17	52,01
11	1233038	61,7%	21,3	12,5	0,1705	673,48	53,88
12	1435799	71,8%	21,3	12,5	0,182	718,90	57,51

NOTE : per questa prova non è stato utilizzato l'estensometro. I valori di rigidità e allungamento medio sono quelli provenienti dal sensore di spostamento LVDT della macchina.

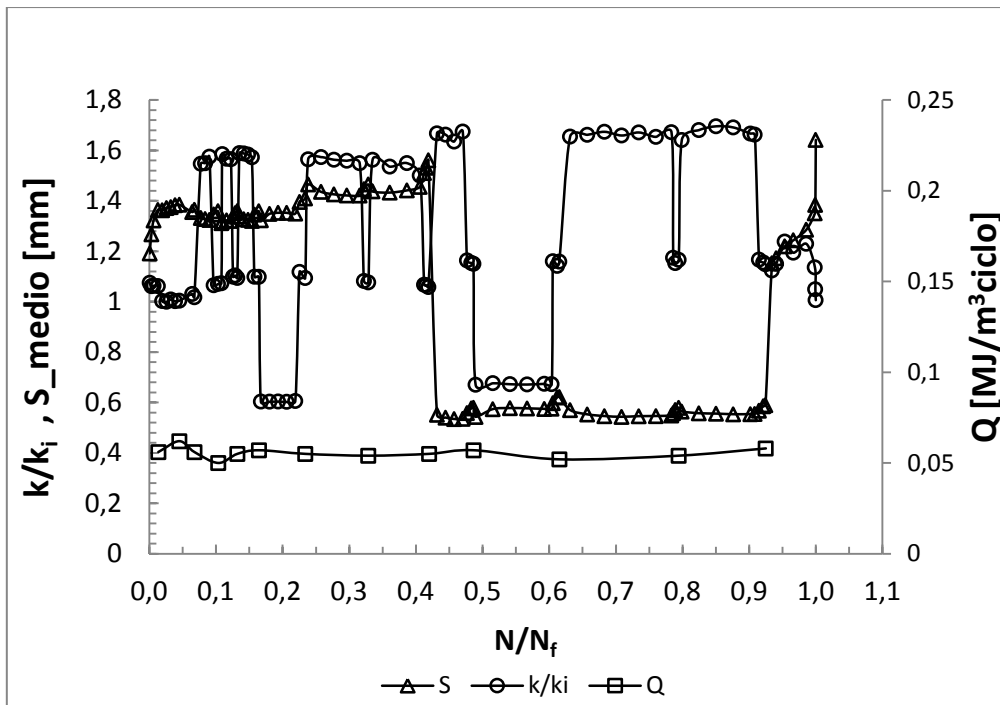


Figura B7.1 Andamento delle rigidezza relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_07



Figura B7.2 Vista della rottura dell'afferraggio causa della sospensione della prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_07

PROVA : Traz_liscio_R0,1_09				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 98,17 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,82 kN	F <sub>MED</sub> = 54 kN	F <sub>a</sub> = 44,2 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX} = 556 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 55,6 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 306 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 250 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura	<b>N<sub>f</sub> = 128110 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 52 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	15949	12,4%	18,0	10,5	0,158	624,10	59,44
2	30533	23,8%	18,5	11	0,1662	656,49	59,68
3	45490	35,5%	19,0	11	0,1739	686,91	62,45
4	60504	47,2%	19,3	11	0,1558	615,41	55,95
5	75657	59,1%	19,5	11	0,1557	615,02	55,91
6	112595	87,9%	19,8	11	0,1507	595,27	54,12

NOTE: In questa prova è stato utilizzato l'estensometro assiale ed è stato possibile valutare l'energia meccanica spesa attraverso l'area dei cicli di isteresi.

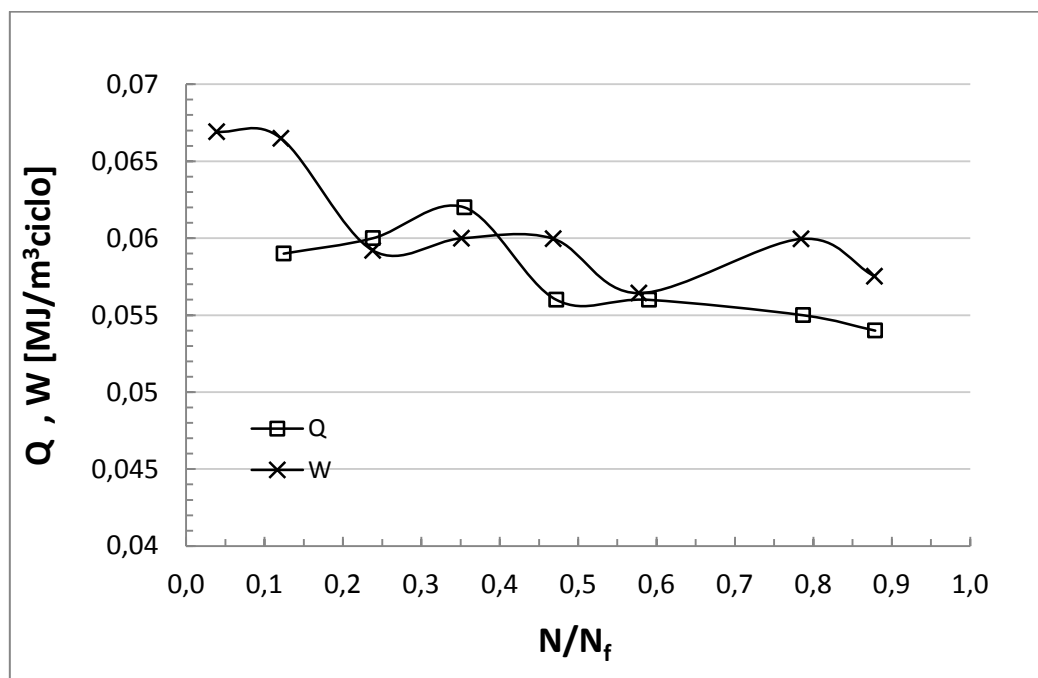


Figura B9.1 Andamento della della densità di energia dissipata e dell'energia meccanica spesa per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

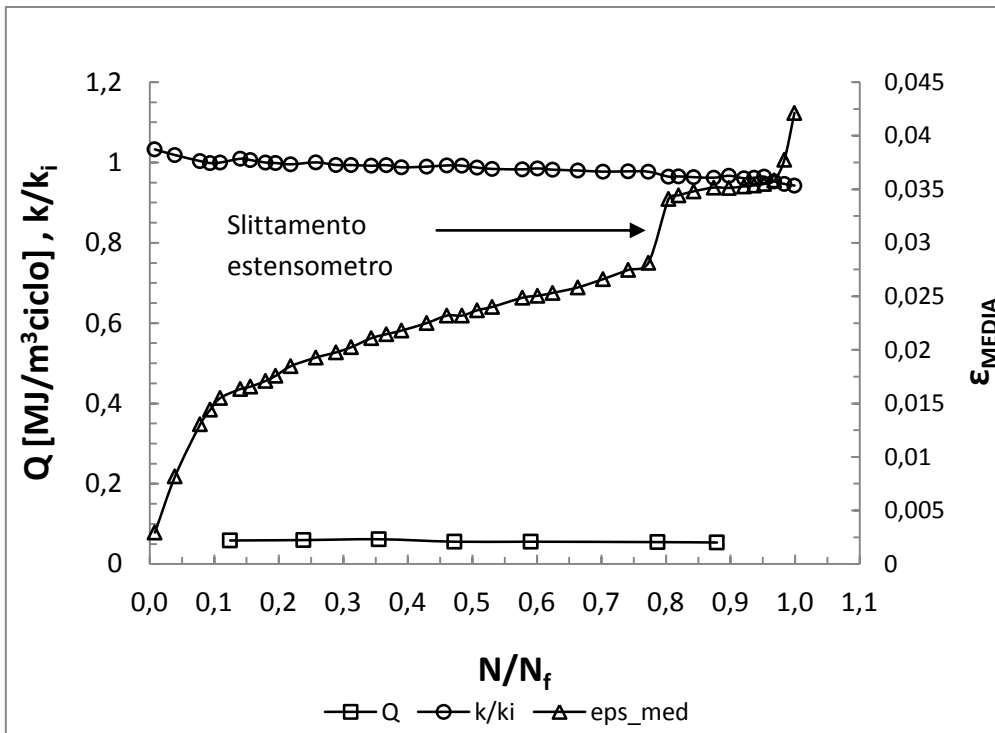


Figura B9.2 Andamento delle rigidità relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

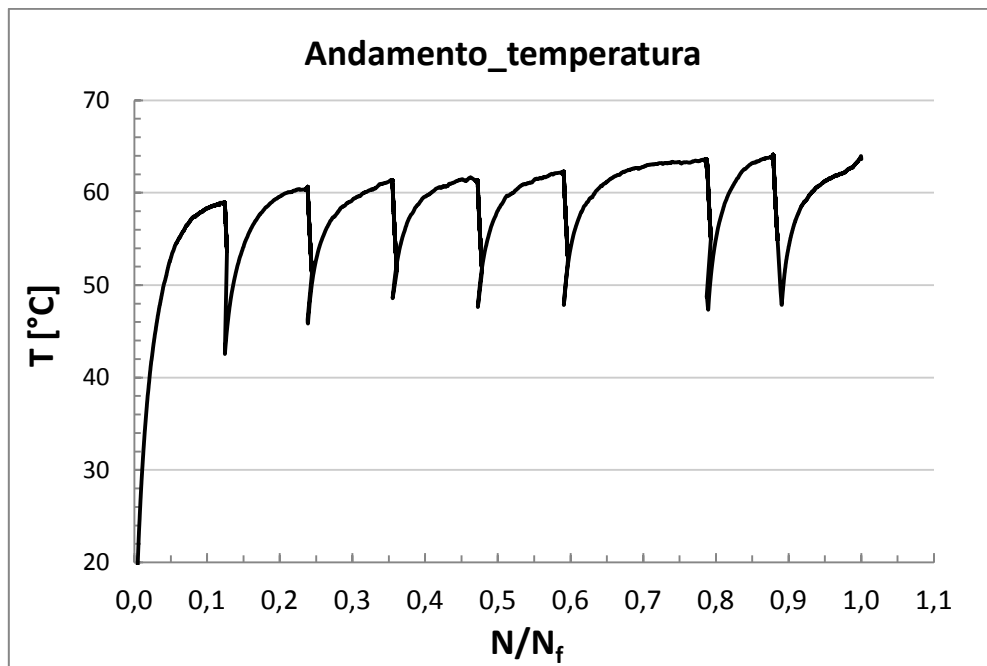


Figura B9.3 Andamento delle temperatura durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

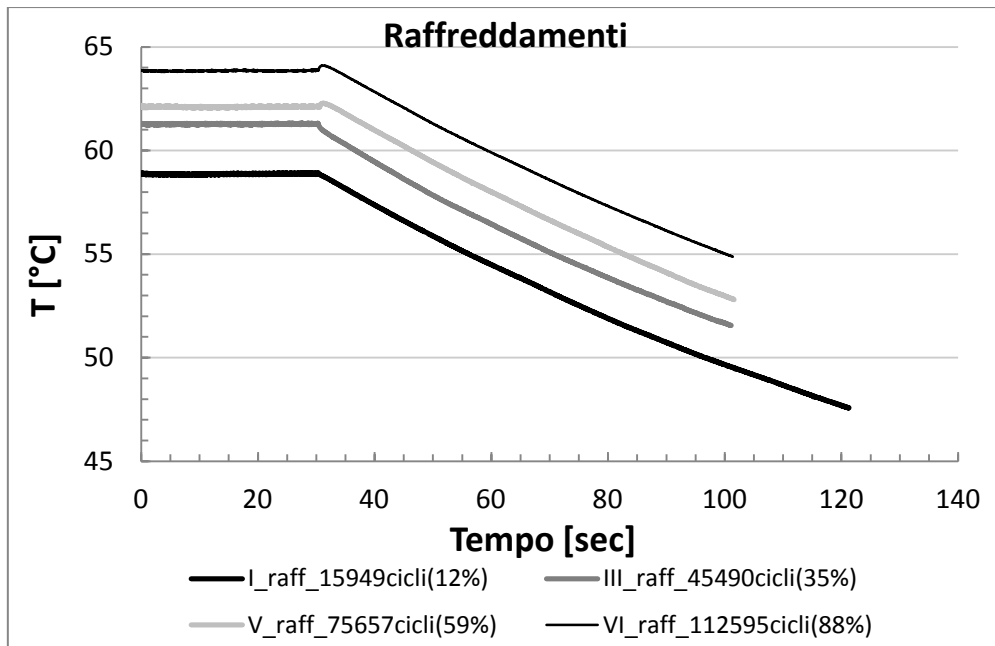


Figura B9.4 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

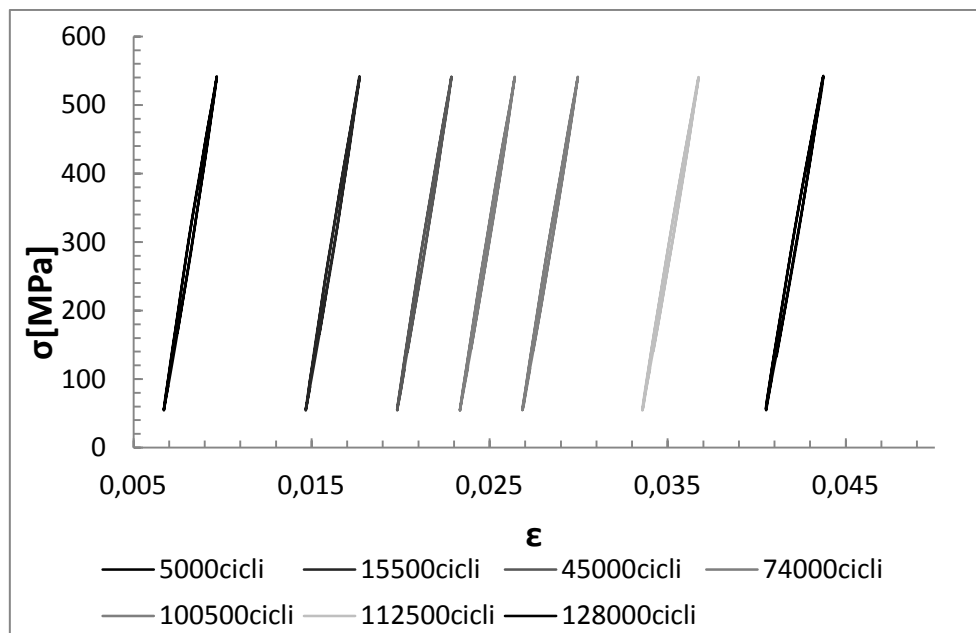


Figura B9.5 Andamento dei cicli di isteresi durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

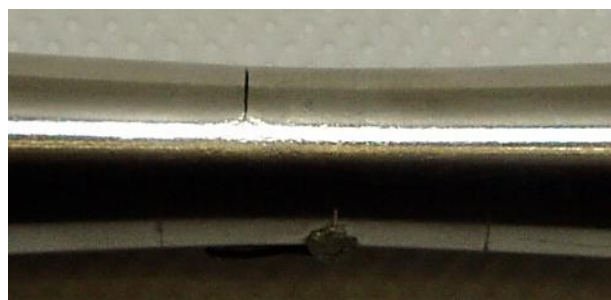


Figura B9.6 Vista della cricca innescata per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_09

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_10</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 94,25 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,42 kN	F <sub>MED</sub> = 51,8 kN	F <sub>a</sub> = 42,4 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 533,3 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 53,3 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 293,3 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 240 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura</b>	<b>N<sub>f</sub> = 1564527 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 49 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	41049	2,6%	20,0	12,5	0,1462	577,49	46,20
2	61227	3,9%	20,5	12,5	0,1495	590,53	47,24
3	81402	5,2%	20,6	12,5	0,1766	697,57	55,81
4	101372	6,5%	21,0	12,5	0,146	576,70	46,14
5	160558	10,3%	22,0	12	0,1749	690,86	57,57
6	180614	11,5%	22,5	12	0,1377	543,92	45,33
7	201895	12,9%	23,0	12	0,144	568,80	47,40
8	220598	14,1%	22,8	12	0,1531	604,75	50,40
9	240696	15,4%	23,2	12	0,1417	559,72	46,64
10	327037	20,9%	23,5	12	0,1489	588,16	49,01
11	610804	39,0%	21,8	12,5	0,1607	634,77	50,78
12	823237	52,6%	22,7	12,5	0,149	588,55	47,08
13	1004515	64,2%	23,0	13	0,1401	553,40	42,57
14	1211257	77,4%	17,0	13,5	0,1602	632,79	46,87
15	1405740	89,9%	19,2	14	0,1679	663,21	47,37

NOTE: In questa prova è stato utilizzato l'estensometro assiale ed è stato possibile valutare l'energia meccanica spesa attraverso l'area dei cicli di isteresi.



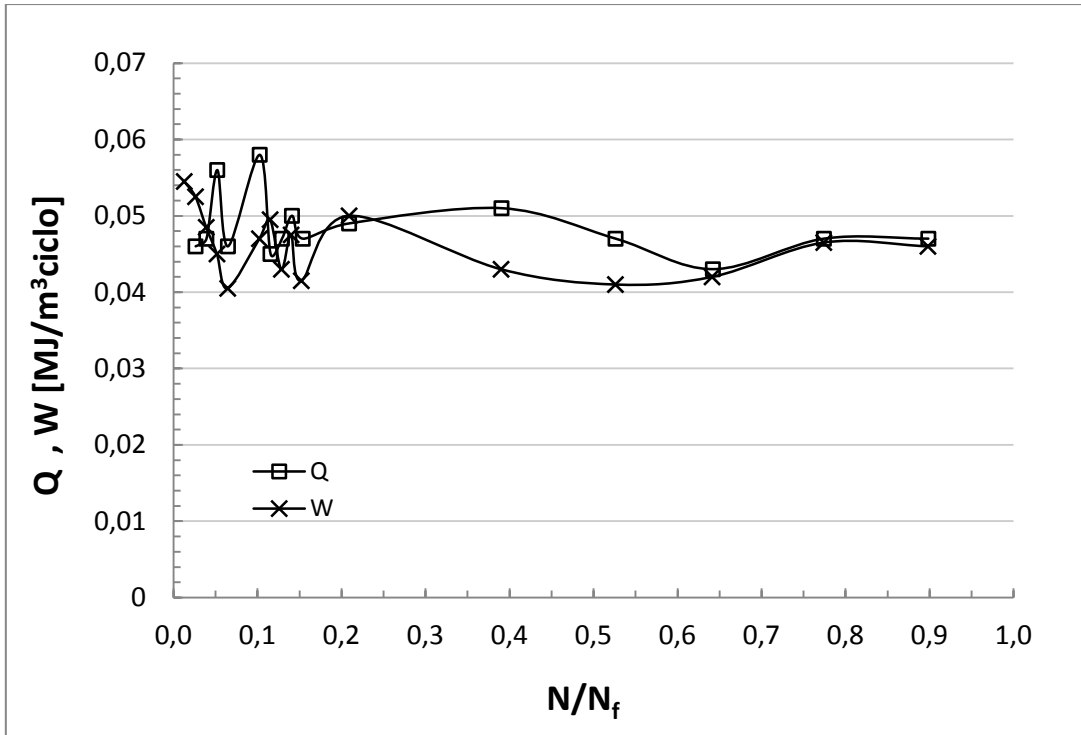


Figura B10.1 Andamento della della densità di energia dissipata e dell'energia meccanica spesa per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

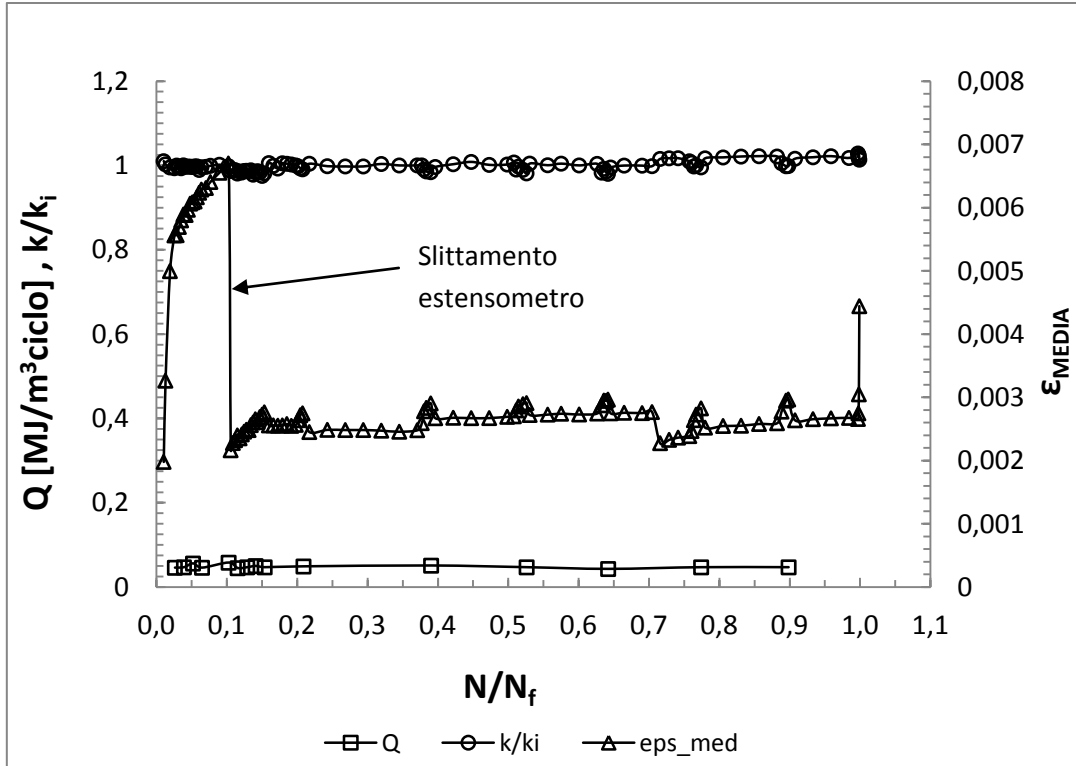


Figura B10.2 Andamento delle rigidità relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

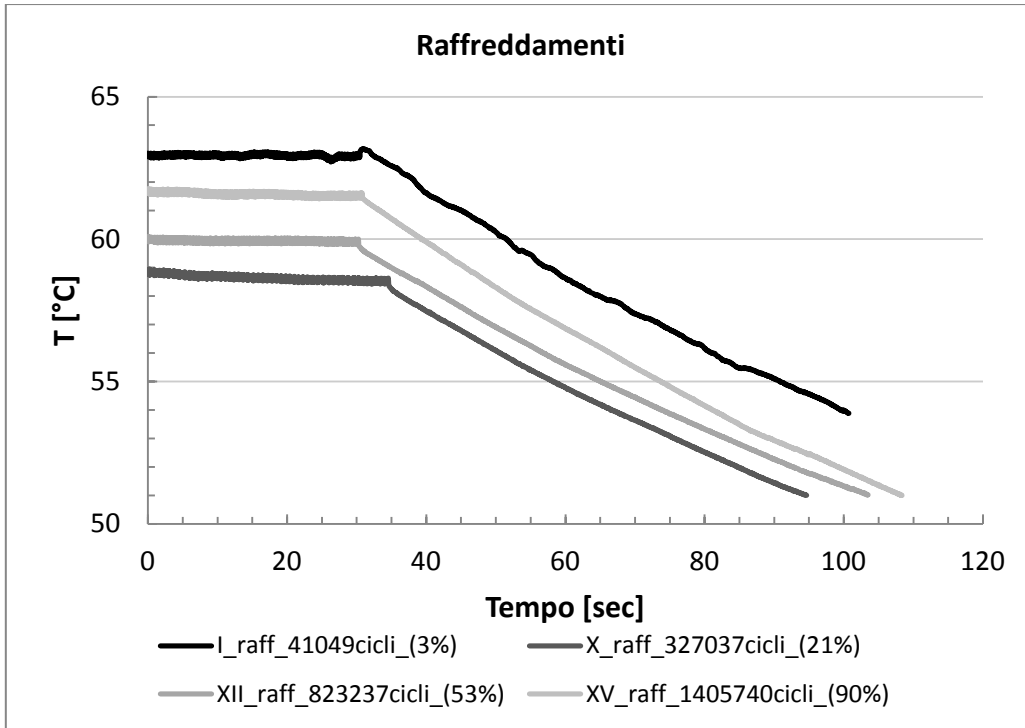
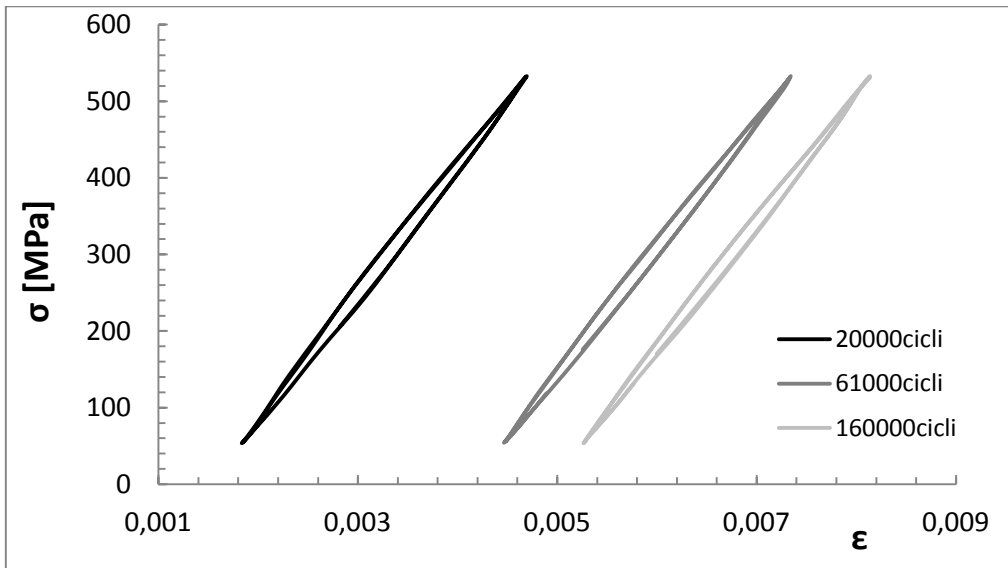


Figura B10.3 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10



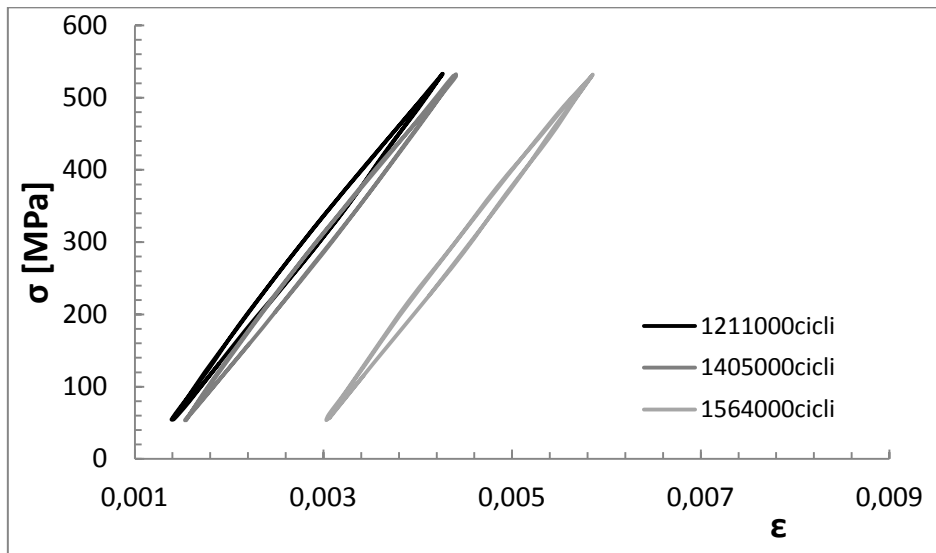
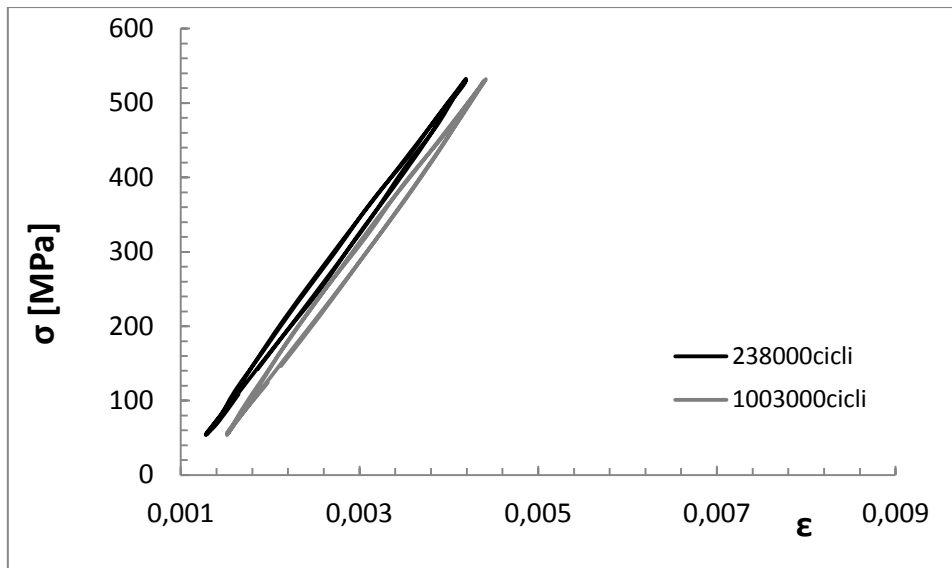


Figura B10.4 Andamento dei cicli di isteresi durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

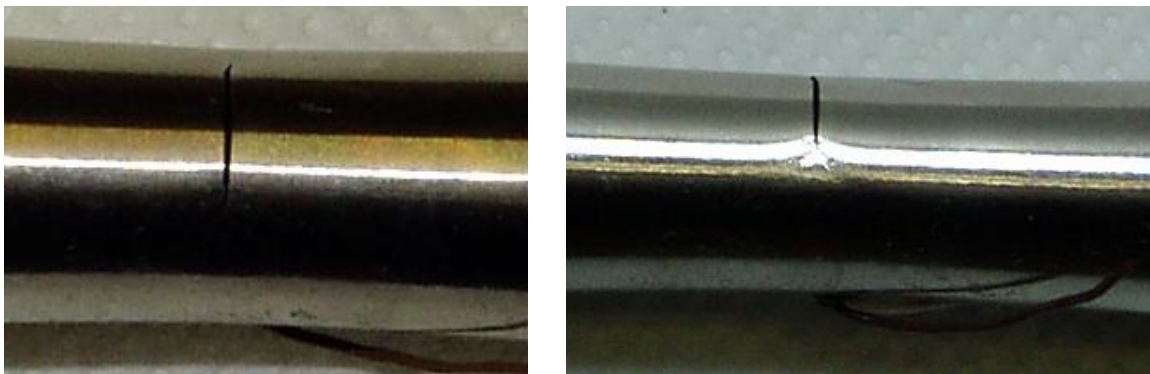


Figura B10.5 Vista frontale e laterale della cricca innescata per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_10

PROVA : Traz_liscio_R0,1_11				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900$ kg/m <sup>3</sup>	$c_s = 0,5$ kJ/kgK	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00$ mm	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 106,03 kN	F <sub>MIN</sub> = 10,6 kN	F <sub>MED</sub> = 58,3 kN	F <sub>a</sub> = 47,7 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX}$ = 600 MPa	$\sigma_{MIN}$ = 60 MPa	$\sigma_{MED}$ = 330 MPa	$\sigma_a$ = 270 MPa

Numero di cicli a rottura	<b>N<sub>f</sub> = 33273 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 79,5 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10751	32,3%	17,0	8	0,1591	628,45	78,56
2	24718	74,3%	17,5	8,5	0,1727	682,17	80,25
3	30658	92,1%	17,7	8	0,1671	660,05	82,51

NOTE: In questa prova è stato utilizzato l'estensometro assiale ed è stato possibile valutare l'energia meccanica spesa attraverso l'area dei cicli di isteresi. In questo provino le cricche hanno innescato dai segni effettuati col truschino per i dentini dell'estensometro. I valori dell'energia dissipata e della tensione applicata sono comunque compatibili con il numero di cicli a rottura e la prova ricade nella banda di dispersione e si è ritenuta comunque valida.

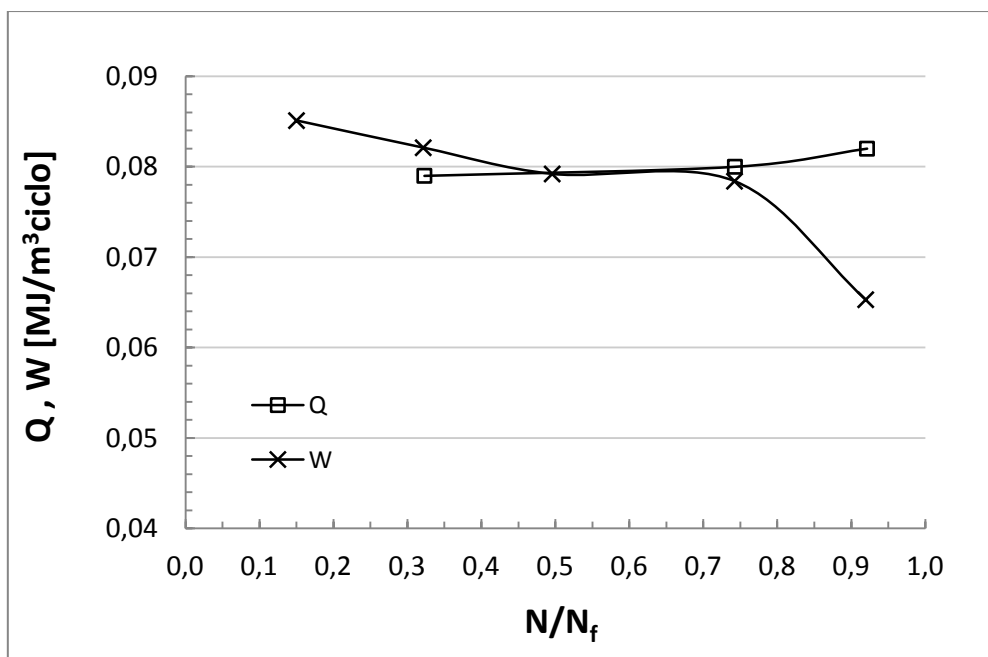


Figura B11.1 Andamento della della densità di energia dissipata e dell'energia meccanica spesa per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

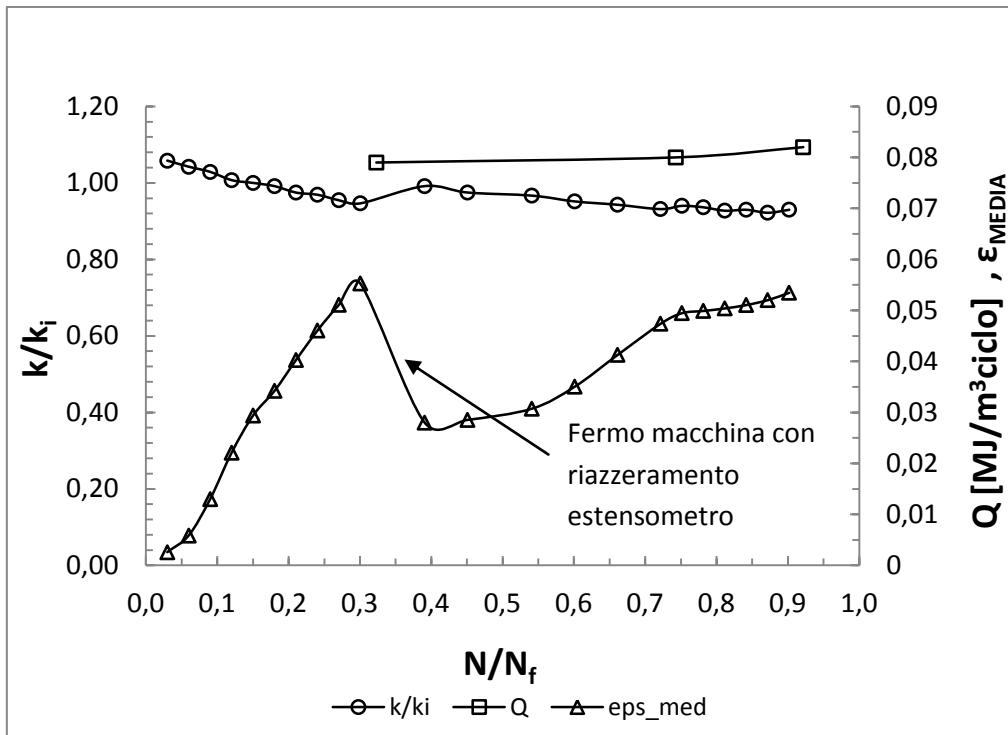


Figura B11.2 Andamento delle rigidezza relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

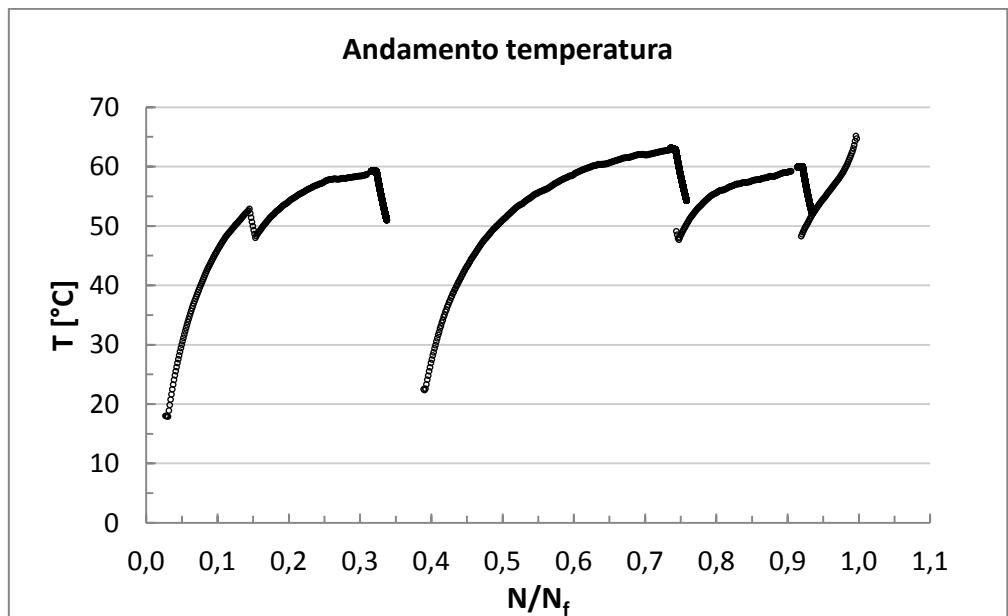


Figura B11.3 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

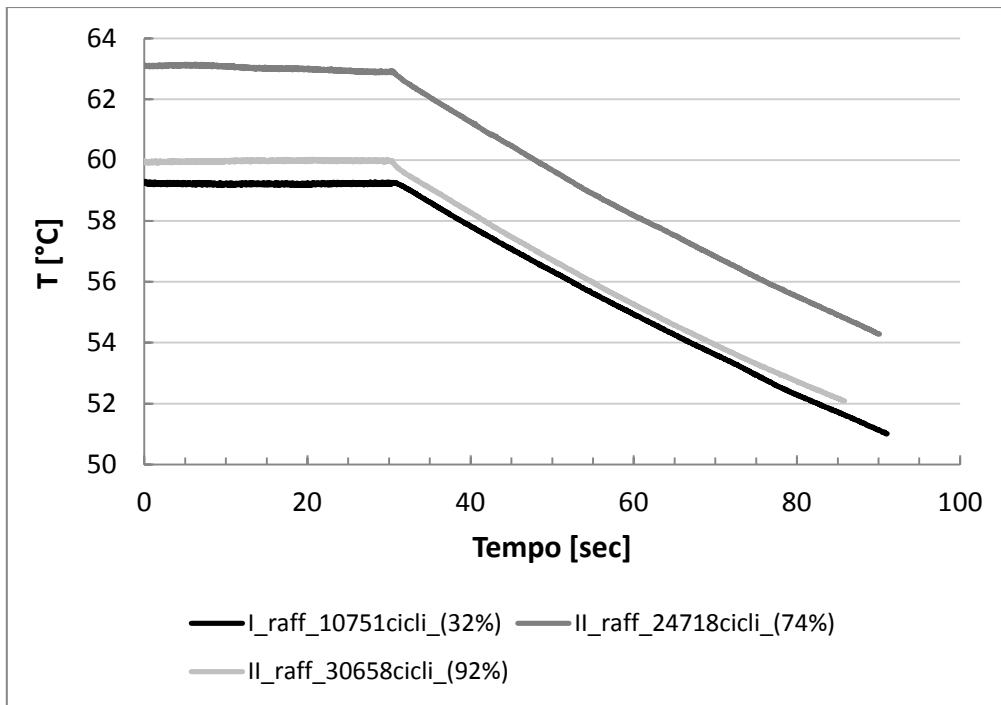


Figura B11.4 Esempio di raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

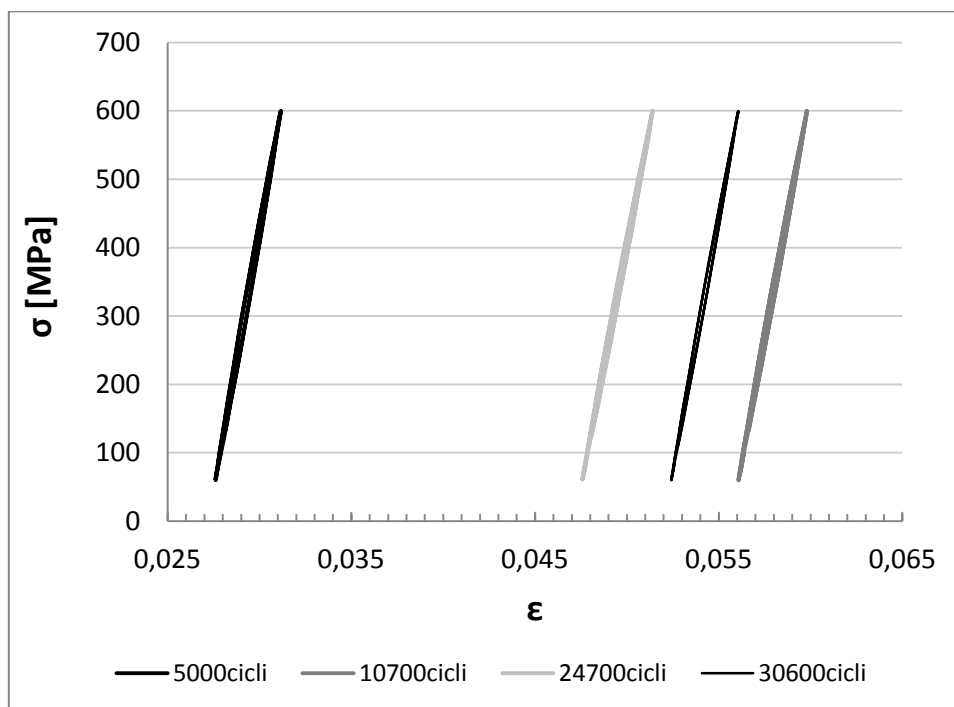


Figura B11.5 Andamento dei cicli di isteresi durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

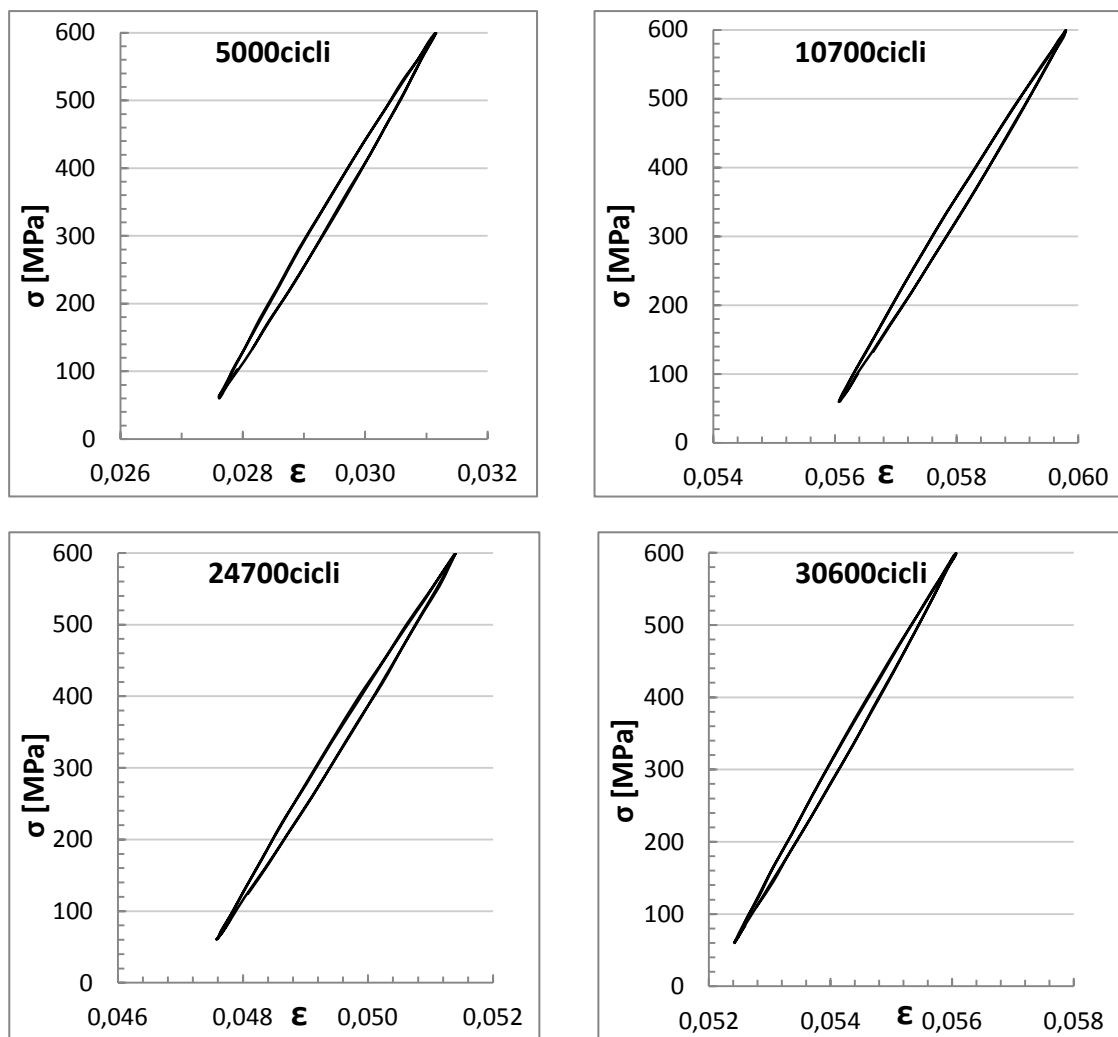


Figura B11.6 Zoom dei singoli cicli di isteresi per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

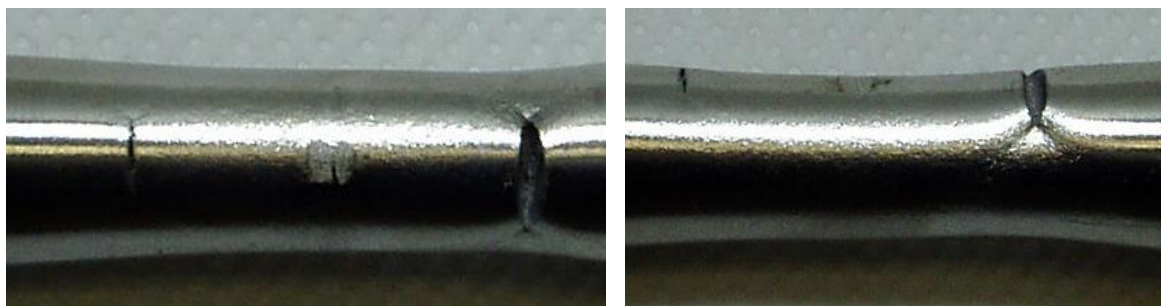


Figura B11.7 Vista frontale e laterale delle cricche innestate per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_11

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_12</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900$ kg/m <sup>3</sup>	$c_s = 0,5$ kJ/kgK	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00$ mm	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 106,03 kN	F <sub>MIN</sub> = 10,6 kN	F <sub>MED</sub> = 58,3 kN	F <sub>a</sub> = 47,7 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX}$ = 600 MPa	$\sigma_{MIN}$ = 60 MPa	$\sigma_{MED}$ = 330 MPa	$\sigma_a$ = 270 MPa

<b>Numero di cicli a rottura</b>	<b>N<sub>f</sub> = 35658 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 77 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	11532	32,3%	19,0	8	0,1655	653,73	81,72
2	19505	54,7%	19,5	8	0,1452	573,54	71,69
3	26818	75,2%	19,5	8	0,156	616,20	77,03

NOTE: In questa prova è stato utilizzato l'estensometro assiale ed è stato possibile valutare l'energia meccanica spesa attraverso l'area dei cicli di isteresi.

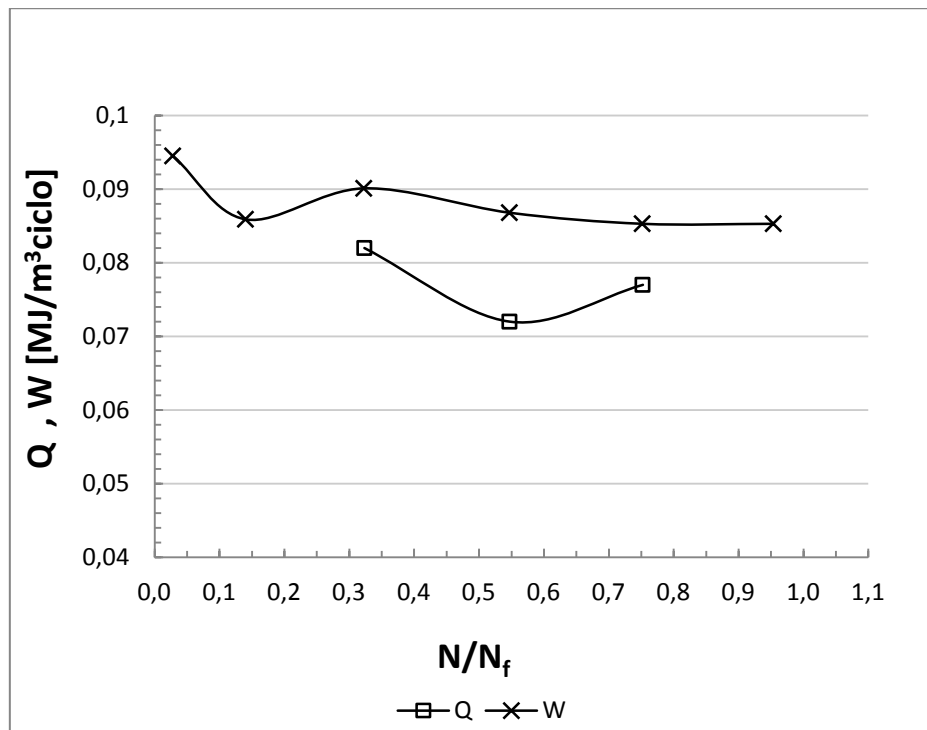


Figura B12.1 Andamento della della densità di energia dissipata e dell'energia meccanica spesa per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12



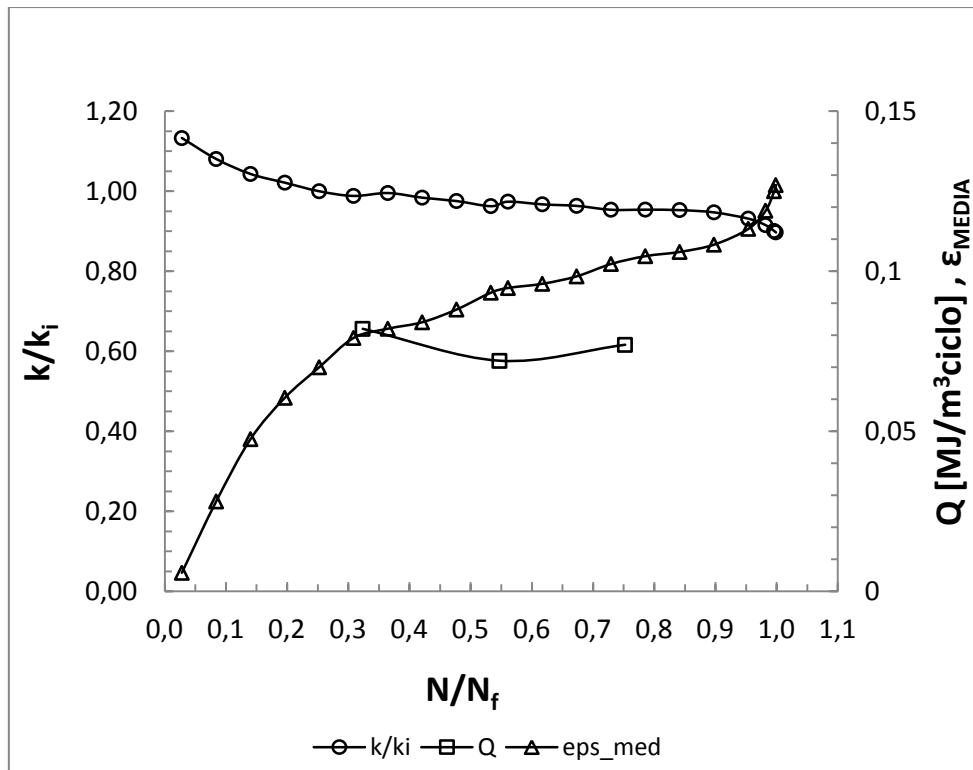


Figura B12.2 Andamento delle rigidezze relative, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

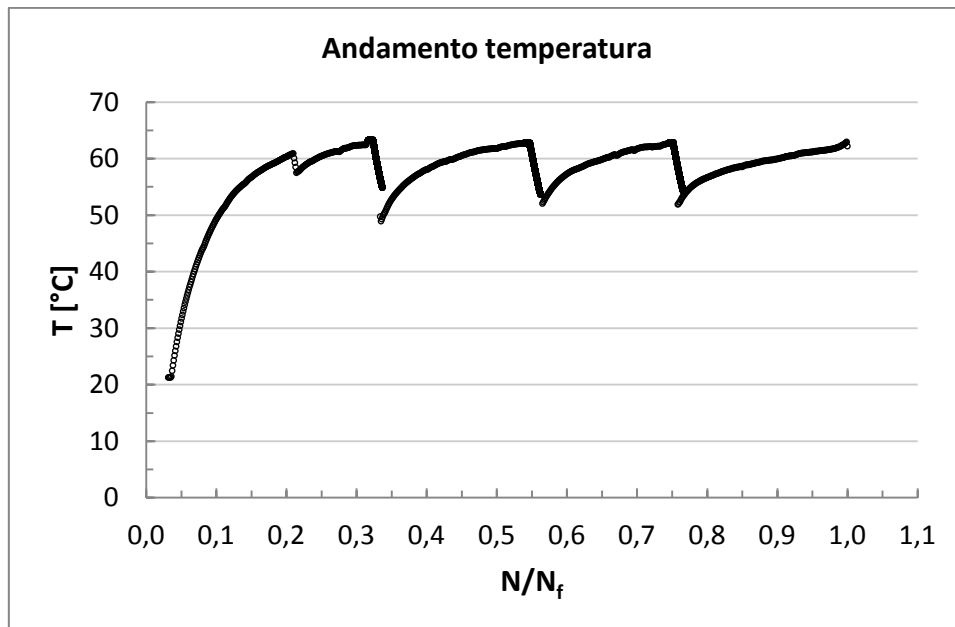


Figura B12.3 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

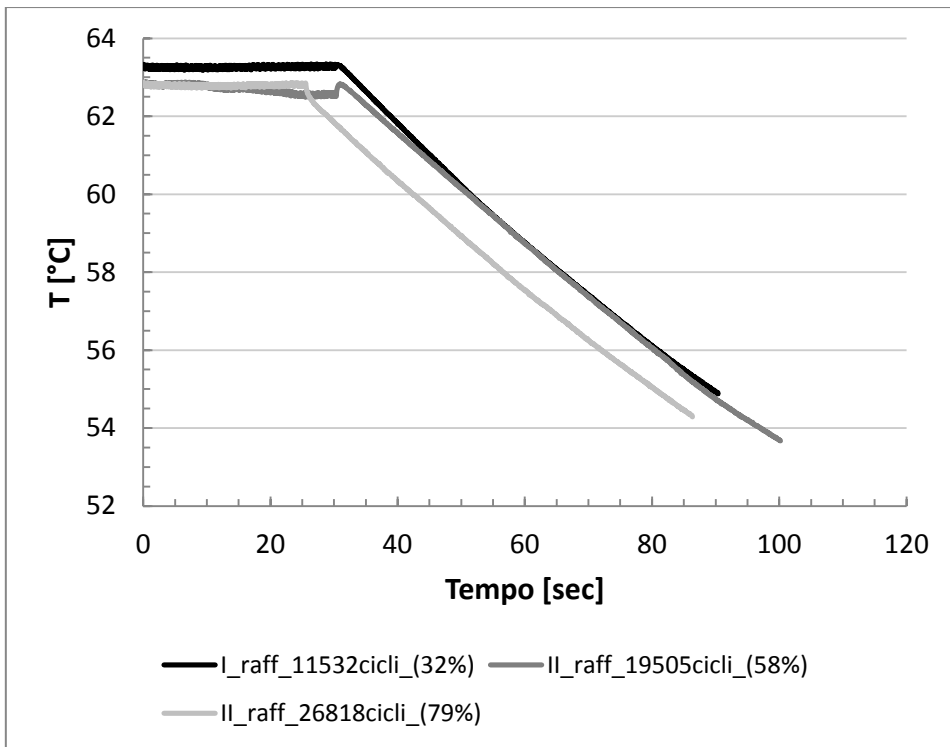


Figura B12.4 Raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

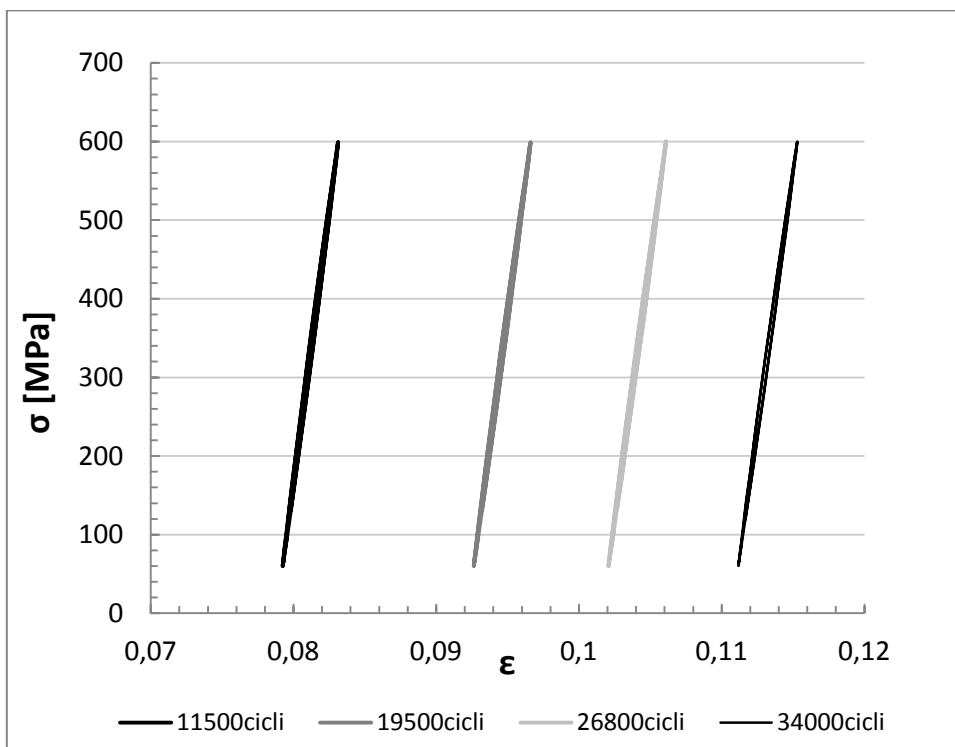


Figura B12.5 Andamento dei cicli di isteresi durante la vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

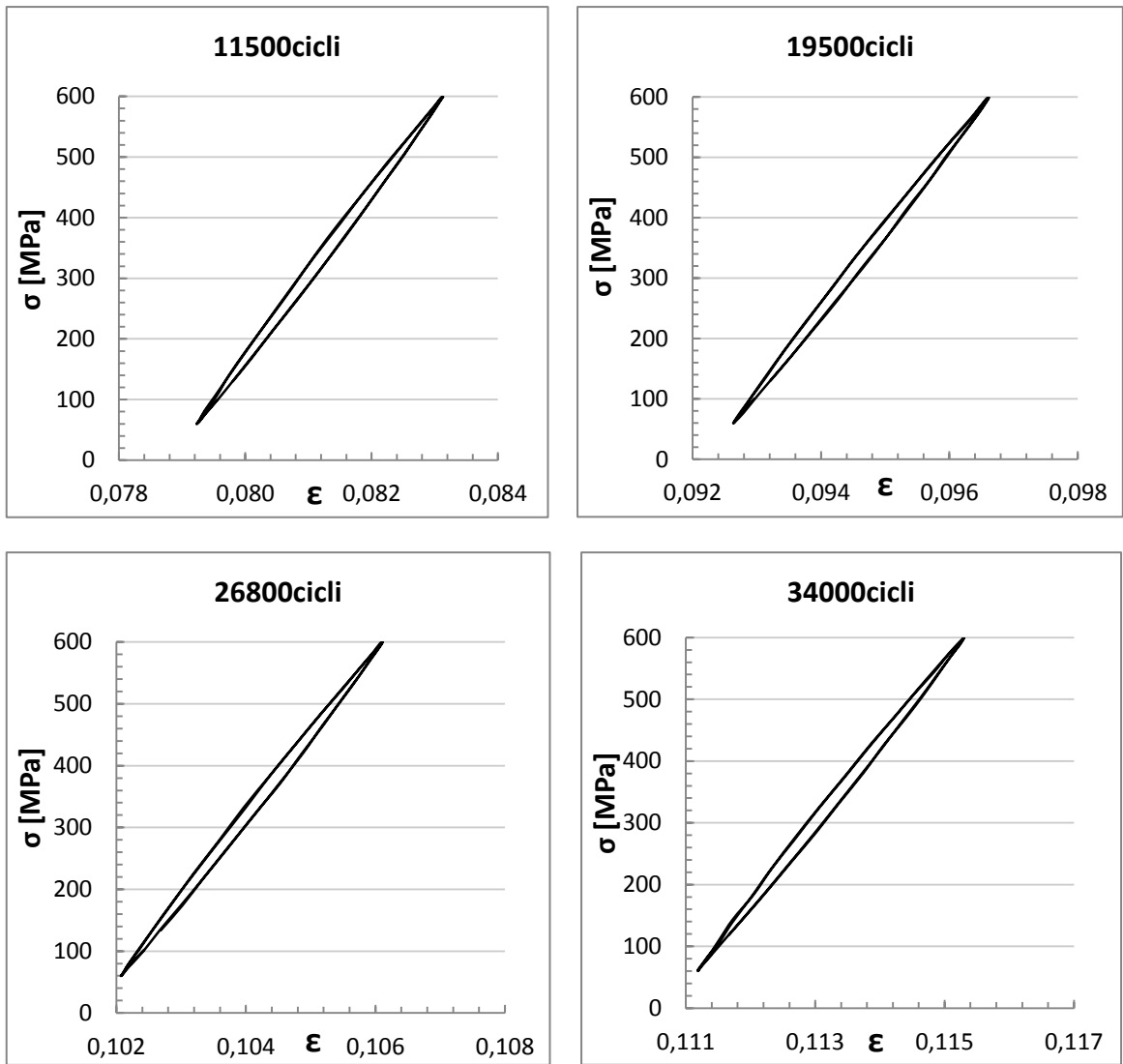


Figura B12.6 Zoom dei cicli di isteresi a diverso numero di cicli per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

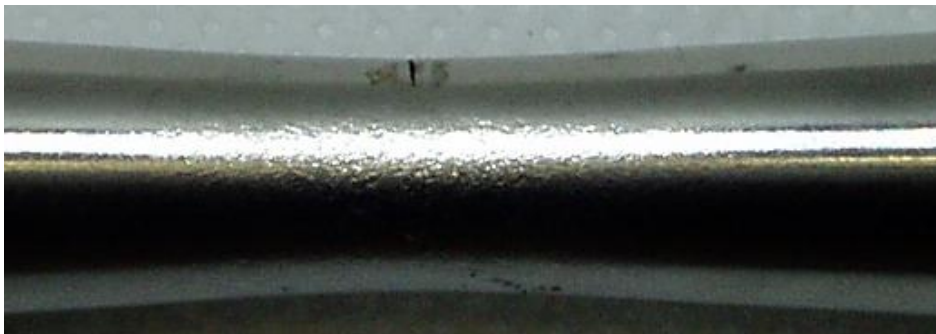


Figura B12.7 Vista laterale della cricca innescata per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_12

PROVA : Traz_liscio_R0,1_13				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho=7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l =130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	F <sub>MAX</sub> = 117,81 kN	F <sub>MIN</sub> = 11,78 kN	F <sub>MED</sub> = 64,8 kN	F <sub>a</sub> = 53,0 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{MAX}$ = 666,67MPa	$\sigma_{MIN}$ =66,67MPa	$\sigma_{MED}$ =366,67MPa	$\sigma_a$ = 300 MPa

Numero di cicli a rottura	<b>N<sub>f</sub> = 5430 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 205 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	4112	75,7%	17,5	3,5	0,1816	717,32	204,95

NOTE: In questa prova non è stato utilizzato l'estensometro assiale e i valori di rigidezza e allungamento medio sono stati ricavati dal sensore LVDT della macchina. Inoltre è stato possibile effettuare un solo raffreddamento a causa della vita molto breve. Come si vede dalla figura B13.4 no si riesce ad individuare una cricca sulla superficie del provino ma l'allungamento del provino è stato così elevato da superare i limiti di spostamento impostati alla macchina. Il rapido aumento di temperatura visibile in figura B13.2 è comunque indice dell'imminente rottura.

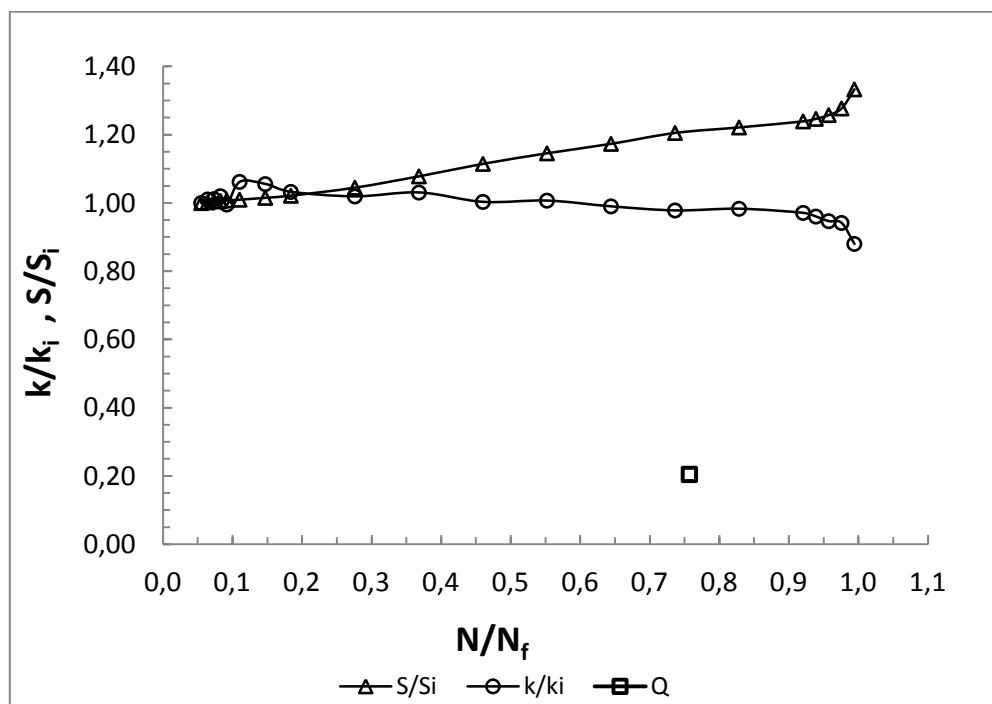


Figura B13.1 Andamento delle rigidezza relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_13

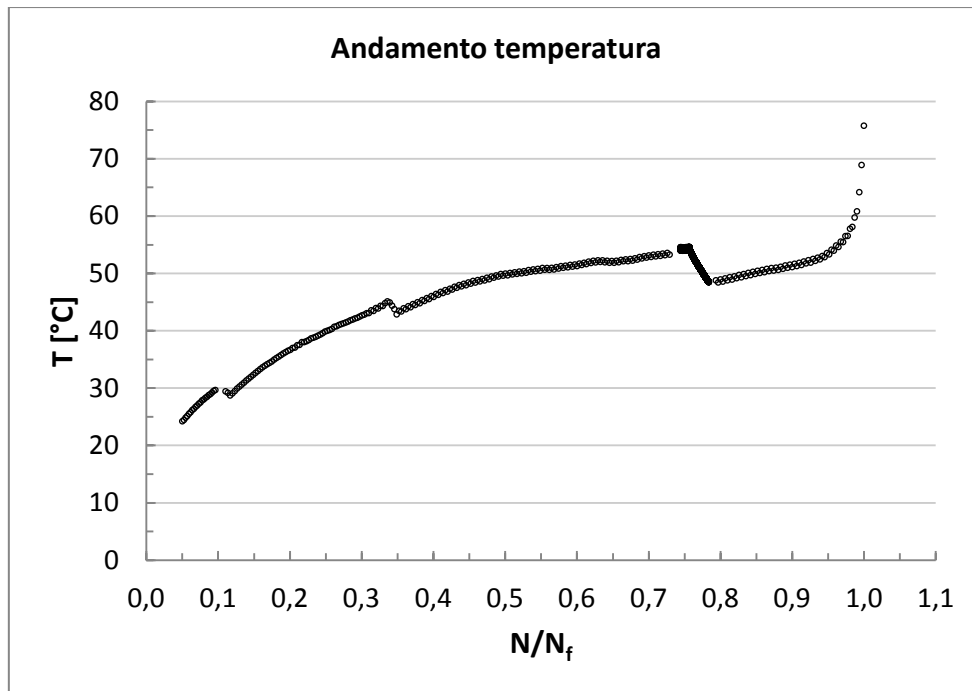


Figura B13.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_13

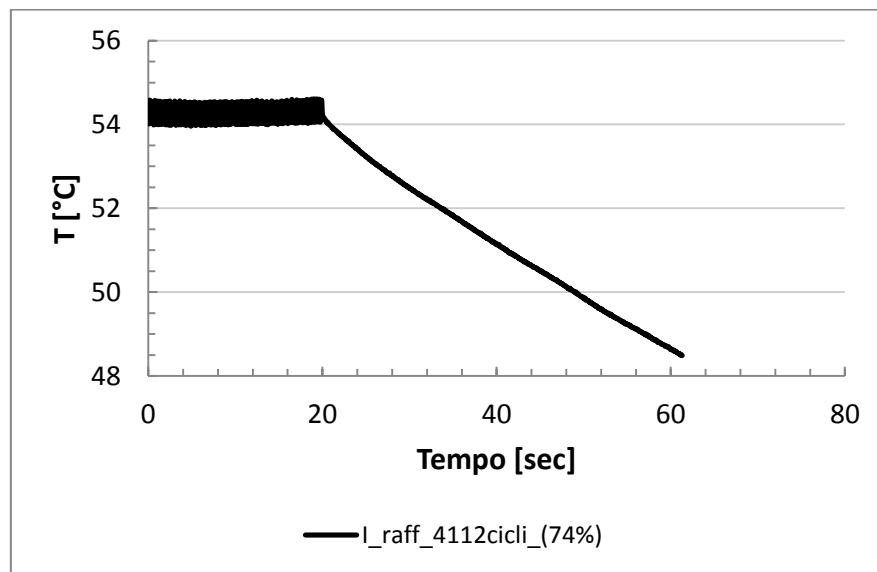


Figura B13.3 Raffreddamento eseguito per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_13



Figura B13.4 Vista della strizione e della plasticizzazione della sezione minima per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_13

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_16</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 113,88 kN	F <sub>MIN</sub> = 11,39 kN	F <sub>MED</sub> = 62,64 kN	F <sub>a</sub> = 51,25 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX} = 644,44\text{MPa}$	$\sigma_{MIN} = 64,44\text{MPa}$	$\sigma_{MED} = 354,44\text{MPa}$	$\sigma_a = 290 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura</b>	<b>N<sub>f</sub> = 10275 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 136 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	4088	39,8%	15,8	4,5	0,1492	589,34	130,96
2	7350	71,5%	16,5	4,5	0,1608	635,16	141,15

NOTE: In questa prova non è stato utilizzato l'estensometro assiale e i valori di rigidità e allungamento medio sono stati ricavati dal sensore LVDT della macchina. Inoltre è stato possibile effettuare un solo raffreddamento a causa della vita molto breve.

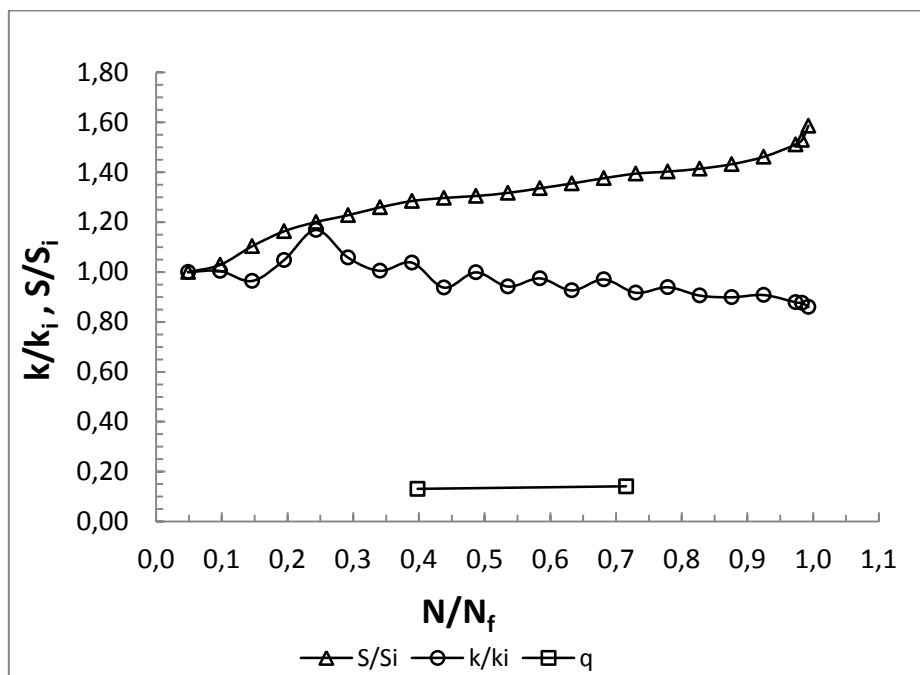


Figura B16.1 Andamento delle rigidità relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_16

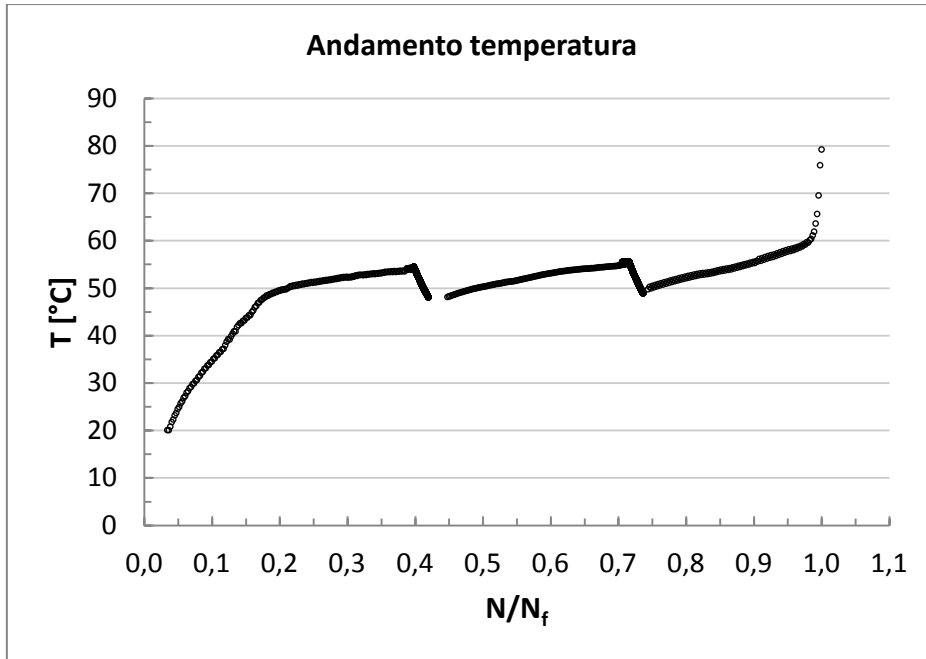


Figura B16.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_16

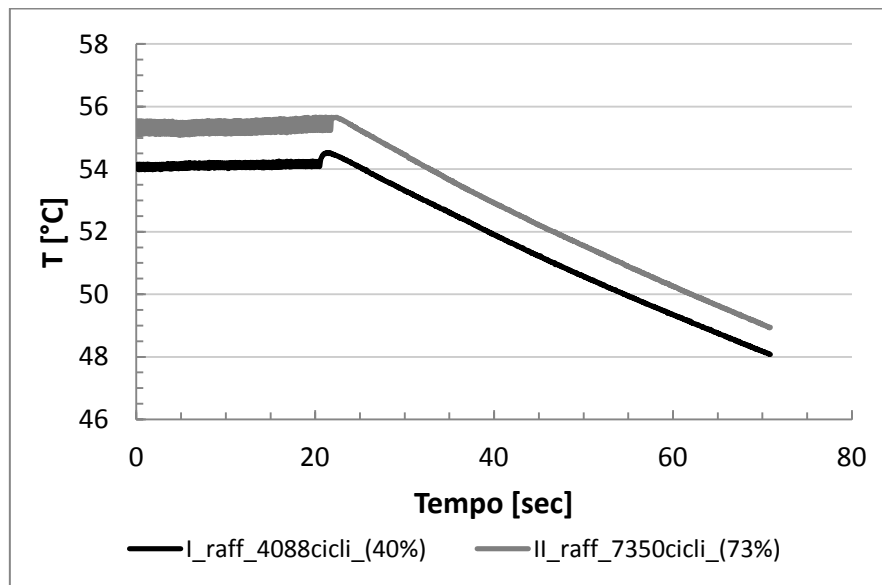


Figura B16.3 Raffreddamenti eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_16

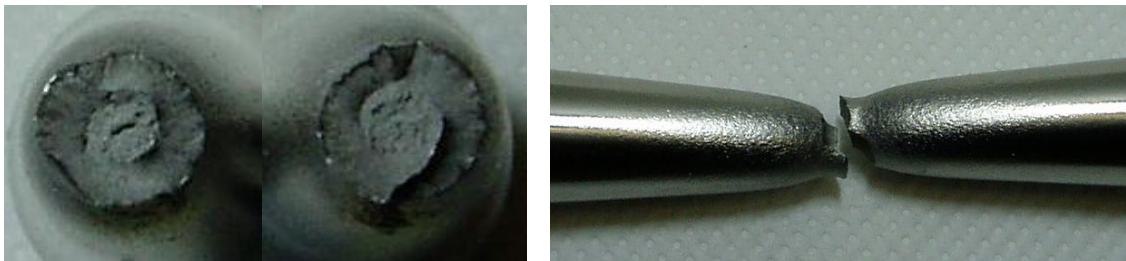


Figura B16.4 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_16

<b>PROVA : Traz_liscio_R0,1_17</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	F <sub>MAX</sub> = 94,25 kN	F <sub>MIN</sub> = 9,42 kN	F <sub>MED</sub> = 51,84 kN	F <sub>a</sub> = 42,42 kN
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\sigma_{MAX}$ = 533,33MPa	$\sigma_{MIN}$ =53,33MPa	$\sigma_{MED}$ =293,33MPa	$\sigma_a$ = 240 MPa

<b>NON ROTTO:</b>	<b>fermato a 2000000cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 136 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	20930	1,0%	19,2	12,5	0,1563	617,39	49,39
2	50432	2,5%	19,8	12,5	0,1638	647,01	51,76
3	100853	5,0%	20,0	12,5	0,1666	658,07	52,65
4	310873	15,5%	20,5	12,5	0,1661	656,10	52,49
5	520482	26,0%	21,8	12,5	0,1546	610,67	48,85
6	780581	39,0%	21,8	12,5	0,1544	609,88	48,79
7	1010652	50,5%	16,5	12,5	0,1579	623,71	49,90
8	1260316	63,0%	19,0	13	0,1645	649,78	49,98
9	1500134	75,0%	20,0	13	0,1607	634,77	48,83
10	1754290	87,7%	20,0	13	0,1553	613,44	47,19
11	1980379	99,0%	20,2	13	0,1563	617,39	47,49

NOTE: In questa prova è stato utilizzato l'estensometro assiale ed è stato possibile valutare l'energia meccanica spesa attraverso l'area dei cicli di isteresi.



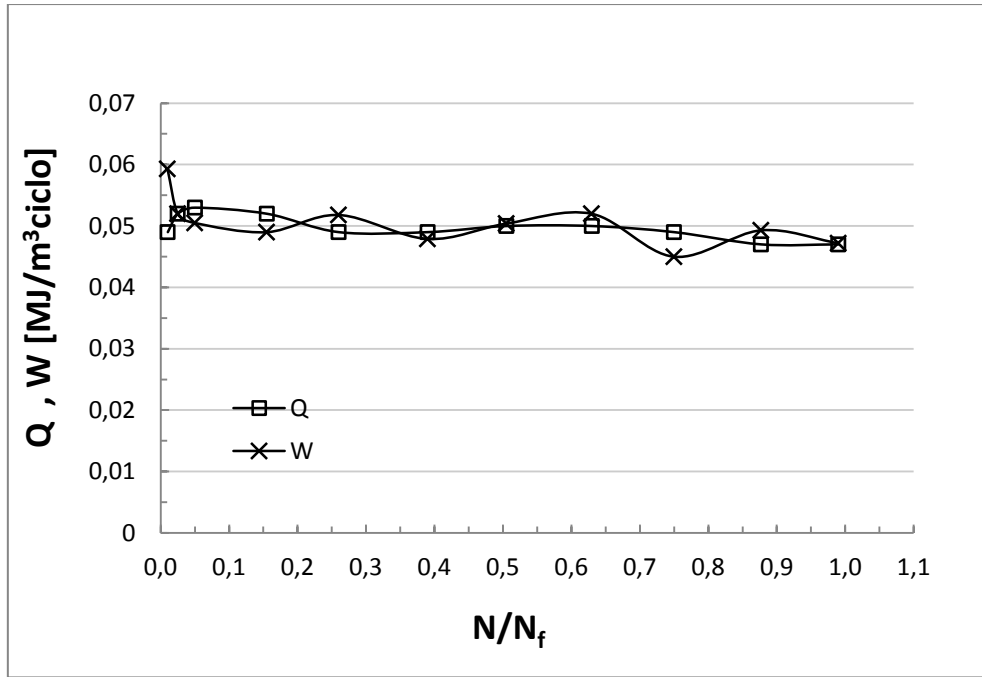


Figura B17.1 Andamento della della densità di energia dissipata e dell'energia meccanica spesa per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_17

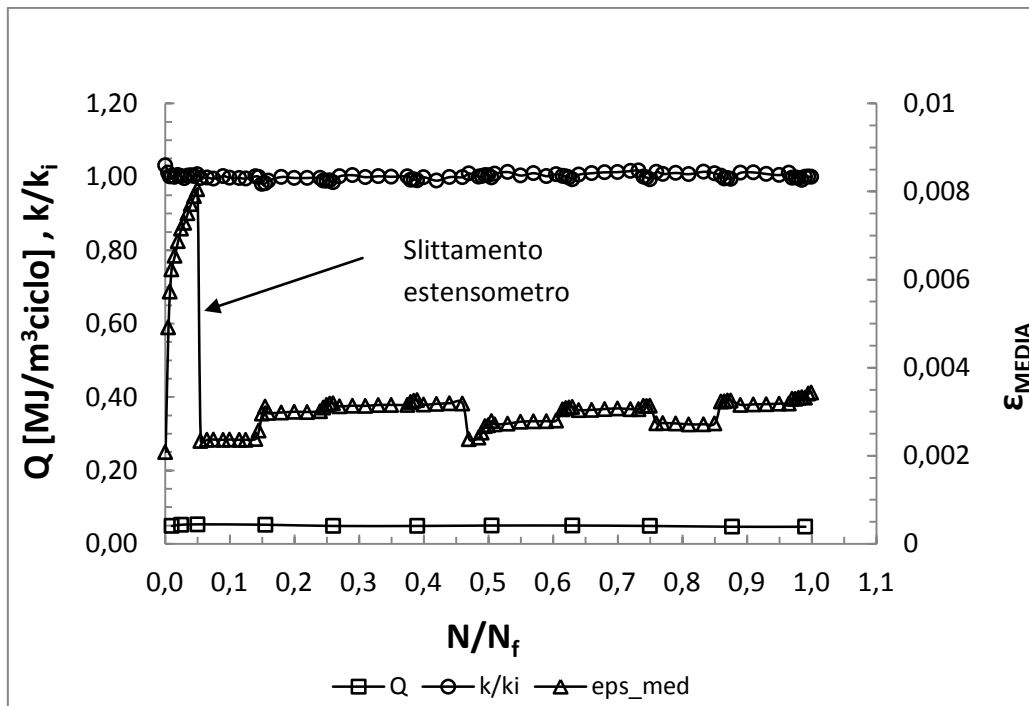


Figura B17.2 Andamento delle rigidzza relativa, della densità di energia dissipata e dello spostamento medio in funzione della frazione di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_17

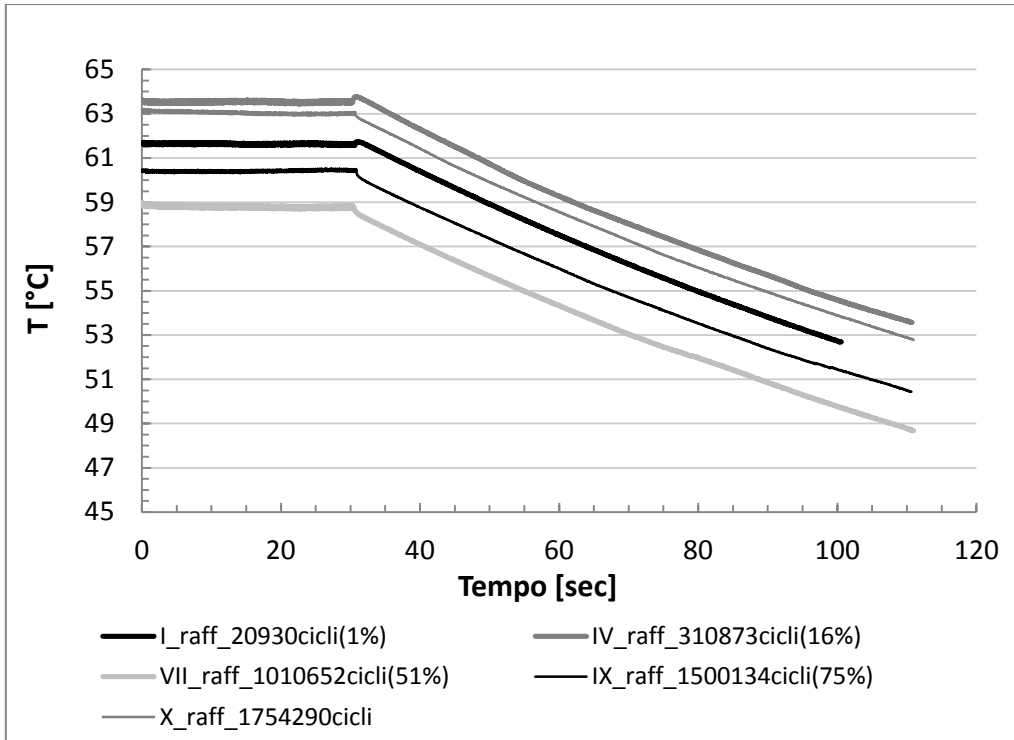
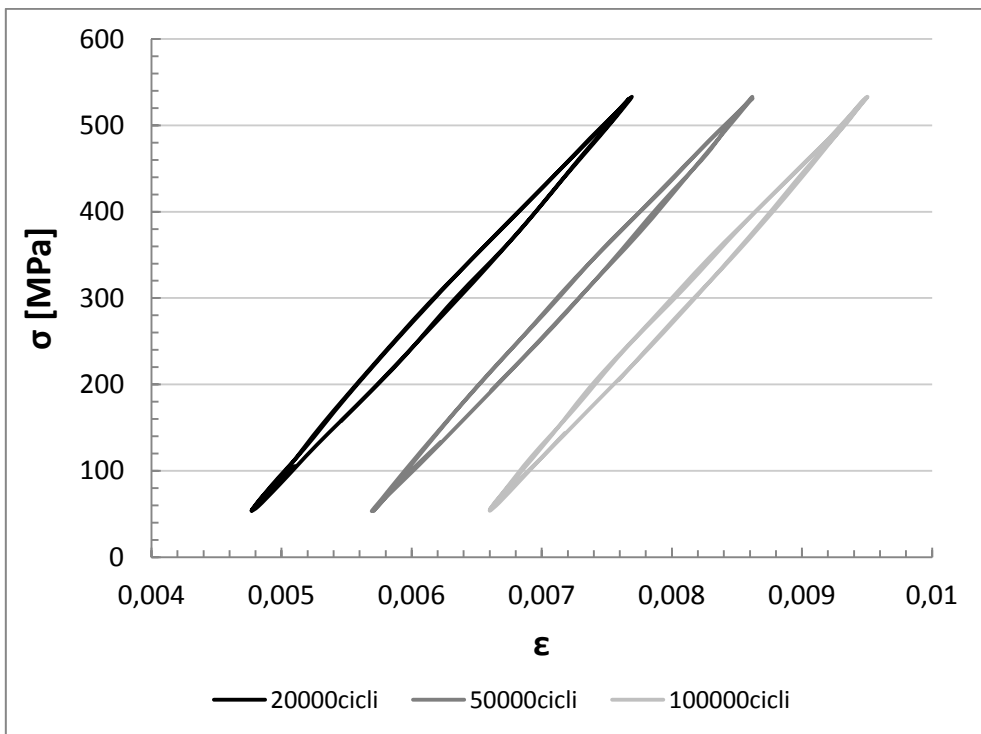


Figura B17.3 Esempi di raffreddamento eseguiti a diverse percentuali di vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_17



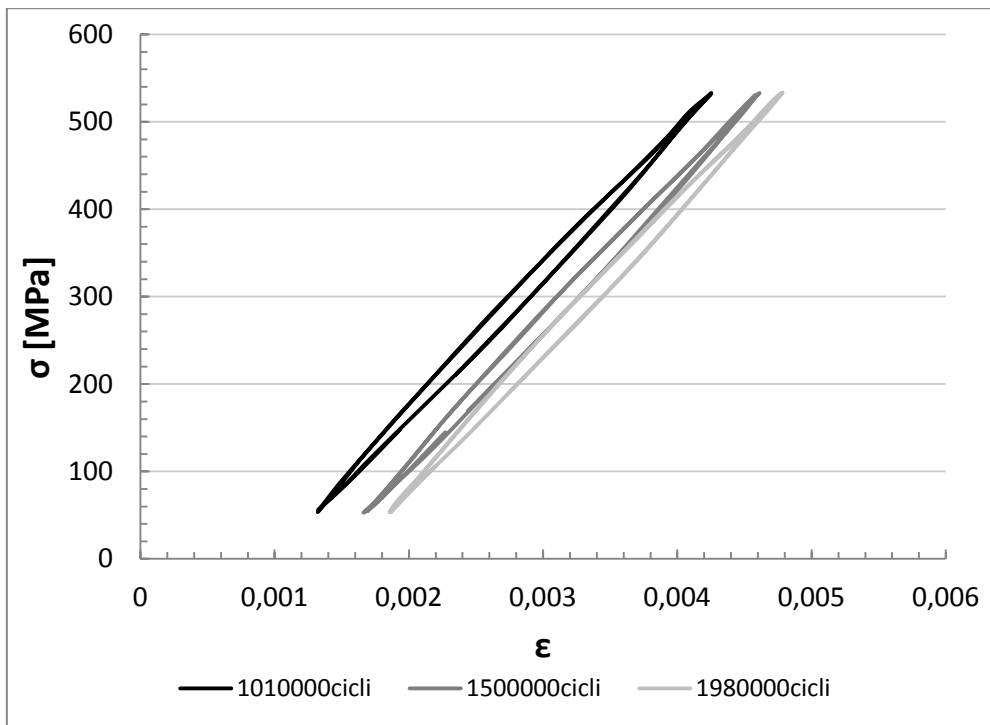
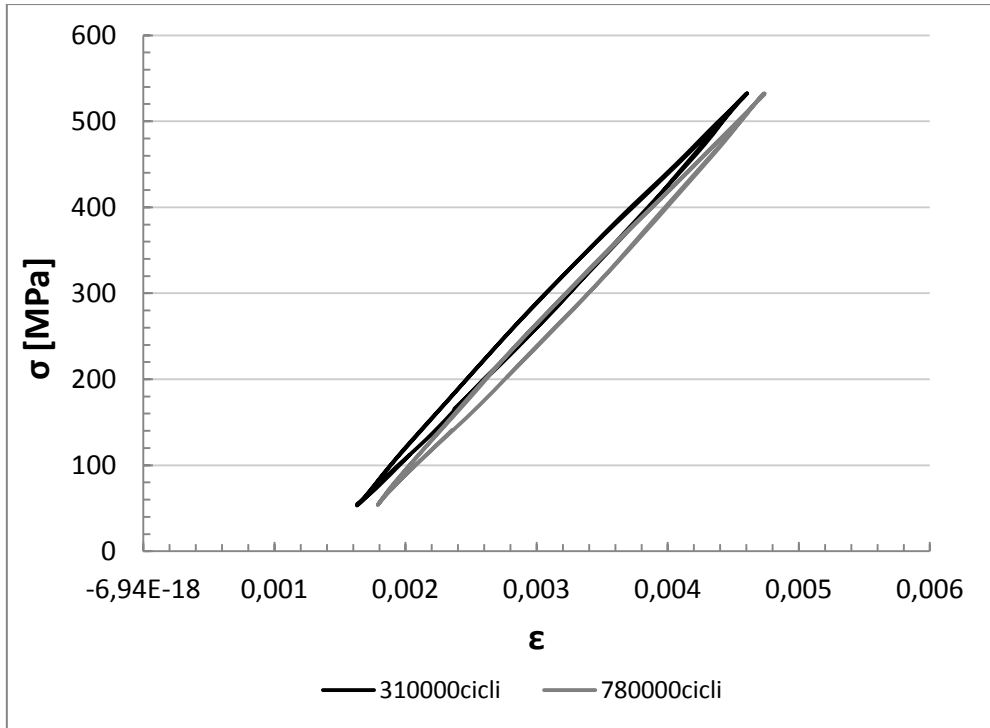


Figura B17.4 Andamento dei cicli di isteresi durante la vita per il provino Traz\_liscio\_R0,1\_17



## Appendice C

### RISULTATI PROVE TORSIONALI A RAPPORTO DI CICLO R-1

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica torsionale a rapporto di ciclo R-1. Ciascuna scheda presenta i dati caratteristici relativi alle modalità di prova e quelli relativi ai diversi raffreddamenti svolti per ciascun provino. Vengono inoltre riportati il grafico dell'energia specifica dissipata Q in funzione del numero di cicli e l'andamento della temperatura in corrispondenza a raffreddamenti eseguiti in diverse fasi della vita (tra parentesi viene indicata proprio la percentuale di vita a cui viene eseguito quel raffreddamento).

Non avendo a disposizione un estensometro torsionale i dati di rigidezza e rotazione angolare sono stati ricavati dal sensore angolare della macchina di torsione.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura A.1.

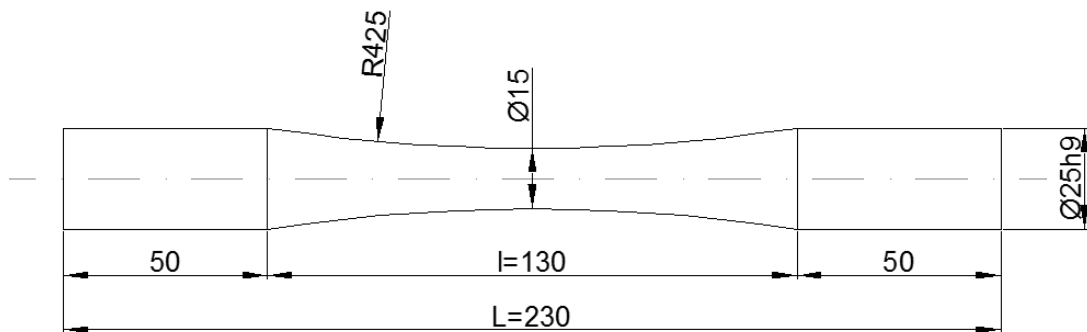


Figura A.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_01</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 198,8 \text{ Nm}$	$M_{MIN} = -198,8 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 0 \text{ Nm}$	$M_a = 198,8 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 300 \text{ Mpa}$	$\tau_{MIN} = -300 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 300 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 337176</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 353,5 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	4773	1,4%	20,0	2	0,3302	1304,29	652,15
2	6708	2,0%	20,2	1,6	0,3001	1185,40	740,87
3	8721	2,6%	20,0	1,2	0,231	912,45	760,38
4	10722	3,2%	20,3	1,3	0,2685	1060,58	815,83
5	12813	3,8%	20,6	1,3	0,2674	1056,23	812,48
6	16679	4,9%	20,6	1,3	0,2734	1079,93	830,72
7	23753	7,0%	19,0	1,6	0,3035	1198,83	749,27
8	33647	10,0%	20,0	1,3	0,2335	922,33	709,48
9	48678	14,4%	21,0	1,3	0,2312	913,24	702,49
10	60785	18,0%	15,4	2	0,2769	1093,76	546,88
11	88799	26,3%	16,5	1,8	0,2293	905,74	503,19
12	129642	38,4%	16,8	1,8	0,1865	736,68	409,26
13	228640	67,8%	15,0	1,8	0,1359	536,81	298,23

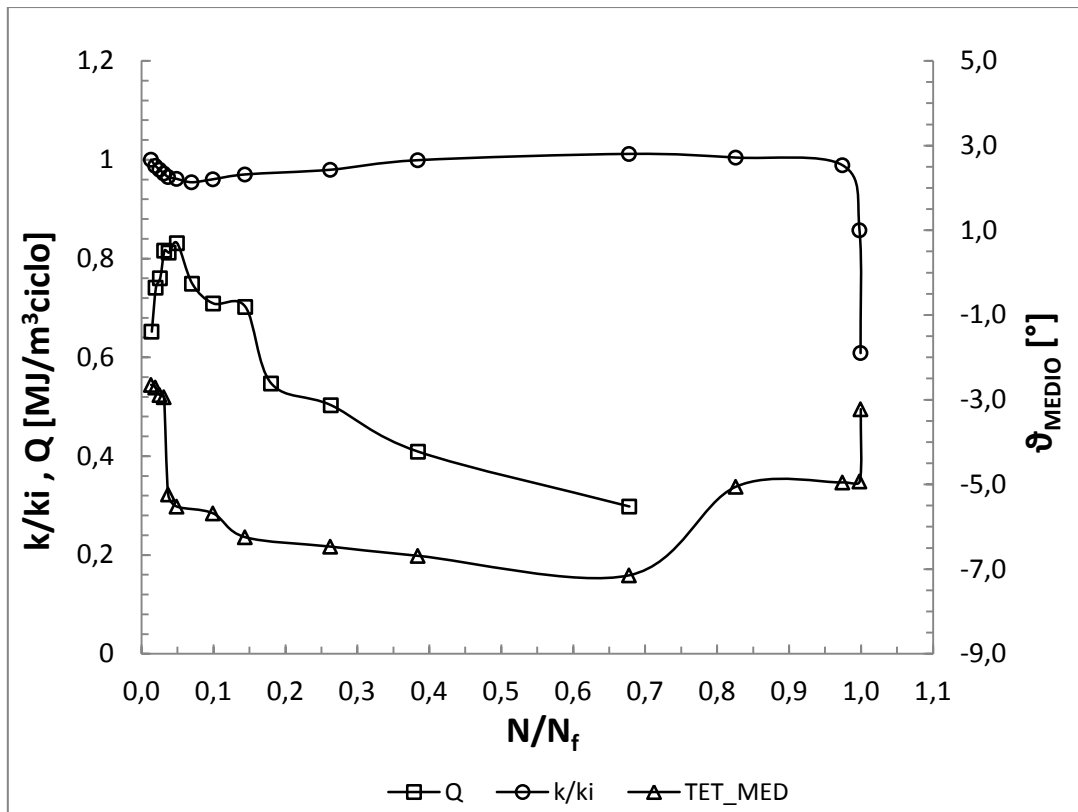


Figura C1.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_01

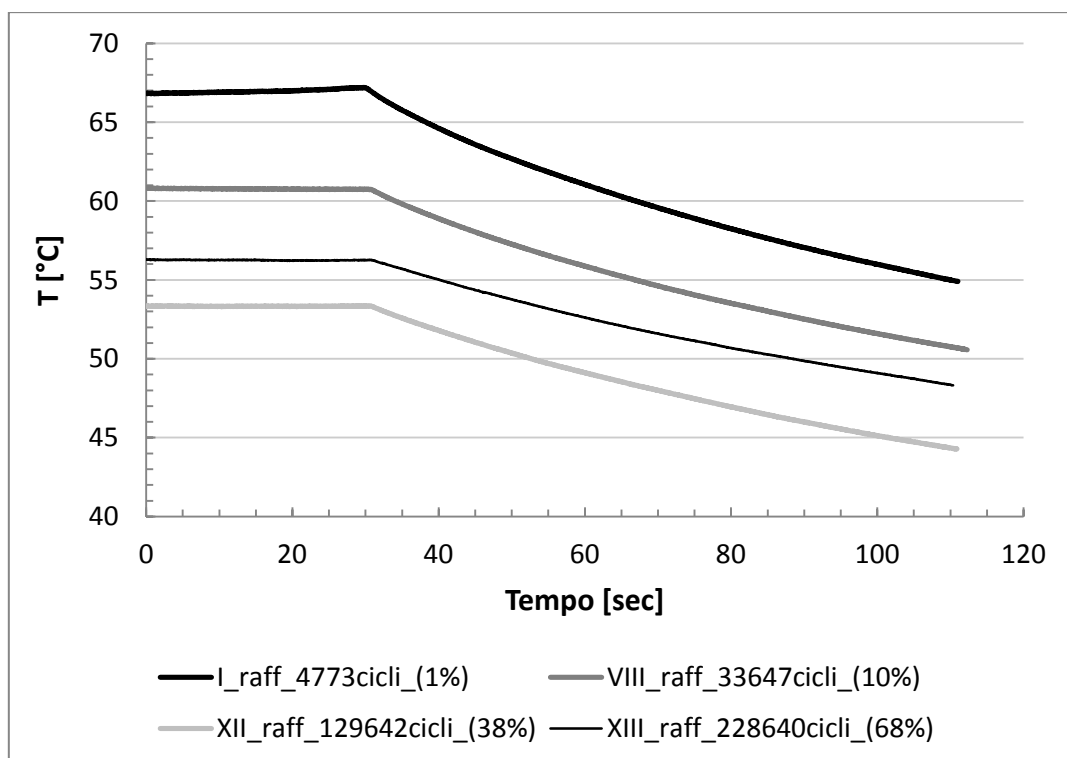


Figura C1.2 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_01

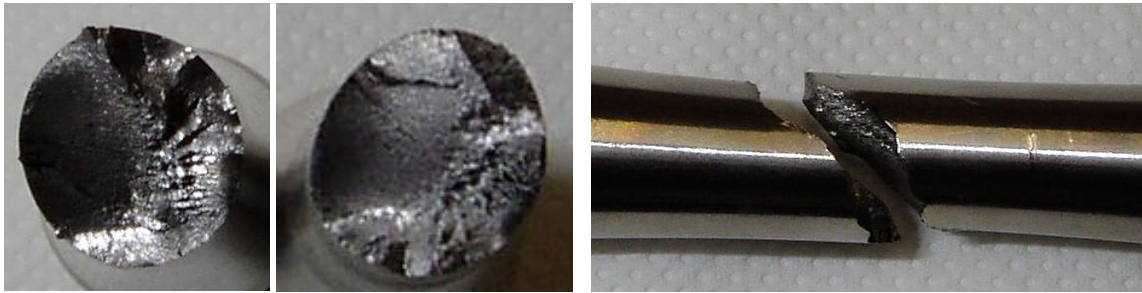


Figura C1.3 Vista frontale e laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_01



<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_02</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 231,9 \text{ Nm}$	$M_{MIN} = -231,9 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 0 \text{ Nm}$	$M_a = 231,9 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 350 \text{ Mpa}$	$\tau_{MIN} = -350 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 350 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 8454</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 2132 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	1141	13,5%	16,7	0,3	0,3233	1277,04	4256,78
2	1561	18,5%	16,8	0,3	0,2947	1164,07	3880,22
3	2015	23,8%	17,0	0,3	0,2646	1045,17	3483,90
4	4028	47,6%	16,5	0,4	0,2159	852,81	2132,01
5	7080	83,7%	17,5	0,5	0,2256	891,12	1782,24

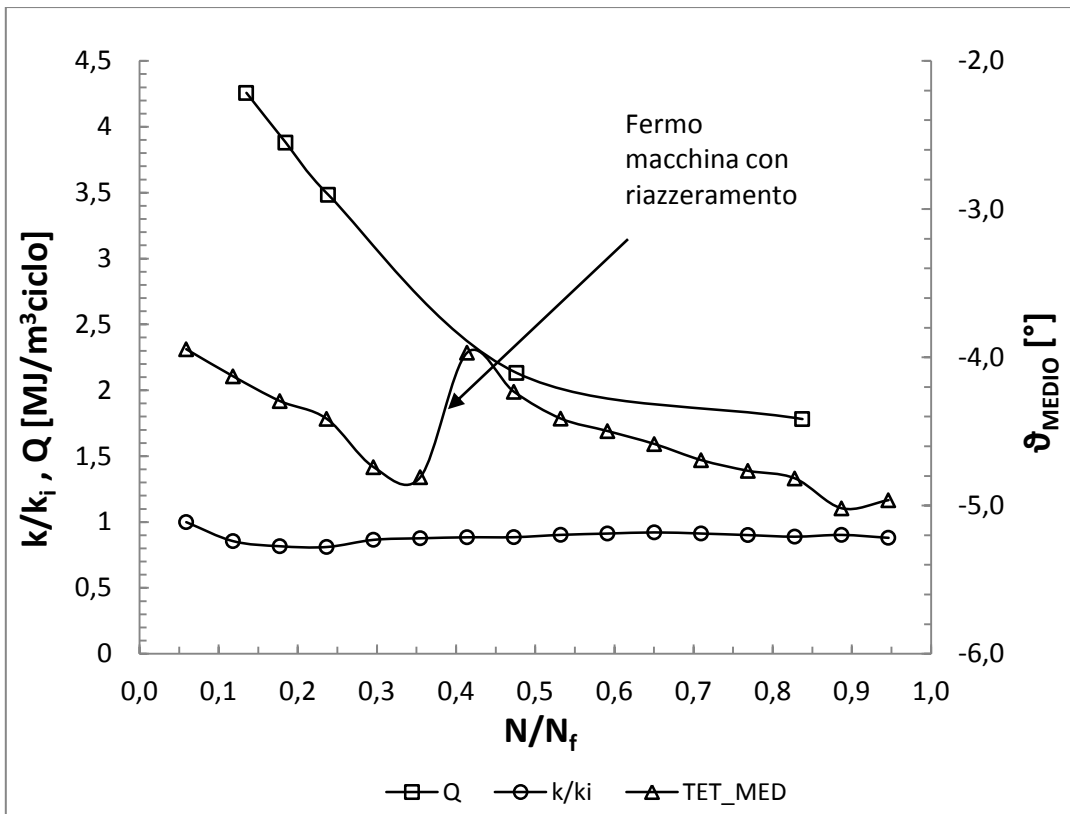


Figura C2.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_02

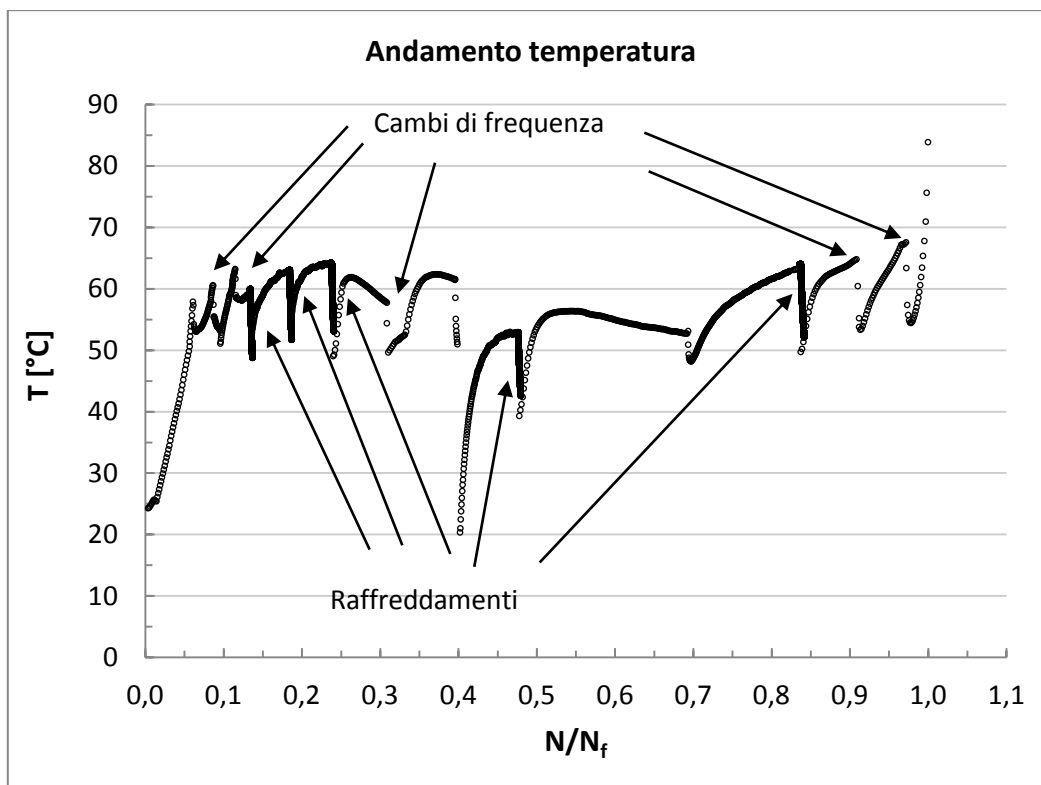


Figura C2.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_02

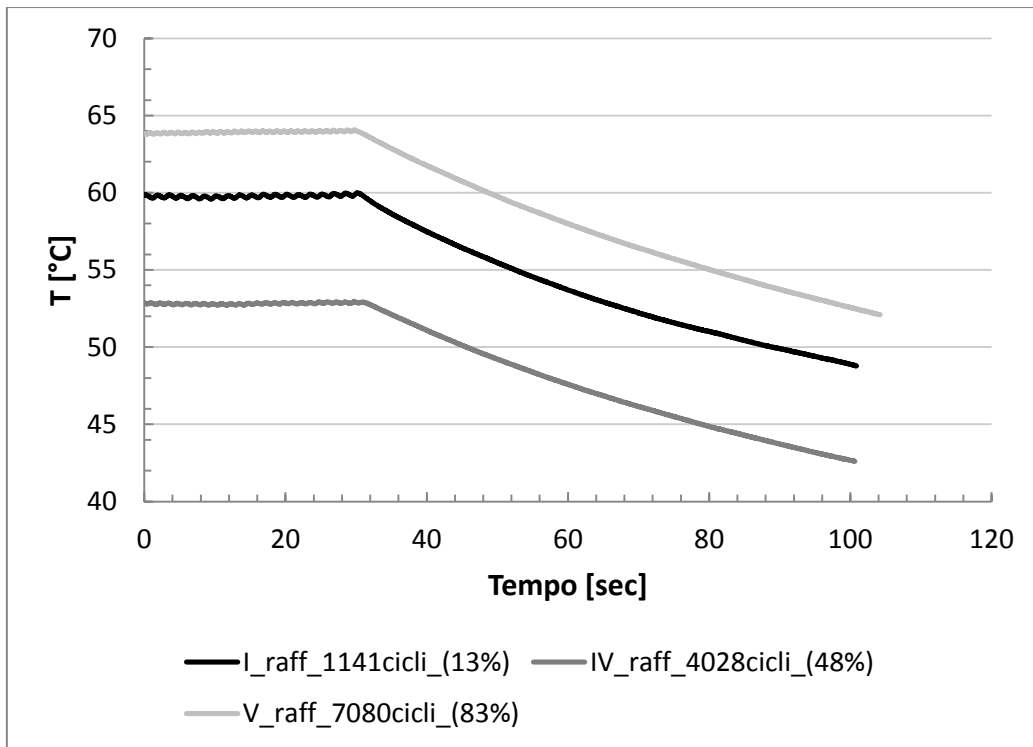


Figura C2.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_02

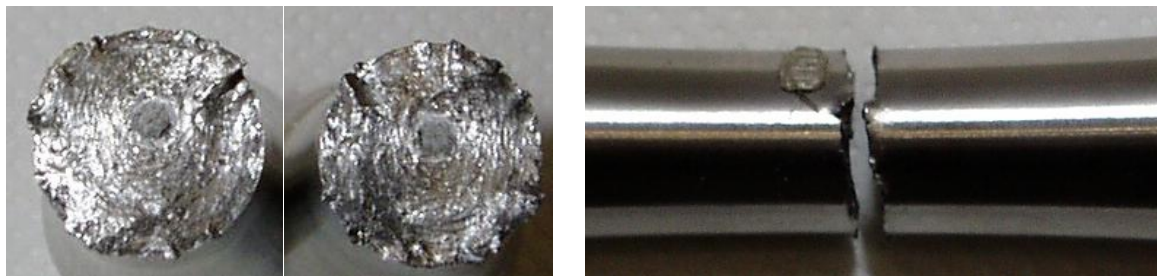


Figura C2.4 Vista frontale e laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_02

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_03</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 212,1 Nm	M <sub>MIN</sub> = -212,1 Nm	M <sub>MED</sub> = 0 Nm	M <sub>a</sub> = 212,1 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 320 \text{ Mpa}$	$\tau_{MIN} = -320 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 320 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 44757 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 894 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	2193	4,9%	18,0	0,6	0,3462	1367,49	2279,15
2	5598	12,5%	18,5	0,6	0,2625	1036,88	1728,13
3	11454	25,6%	18,5	0,6	0,1867	737,47	1229,11
4	22034	49,2%	18,5	1	0,2264	894,28	894,28
5	38835	86,8%	18,6	1	0,2311	912,85	912,85

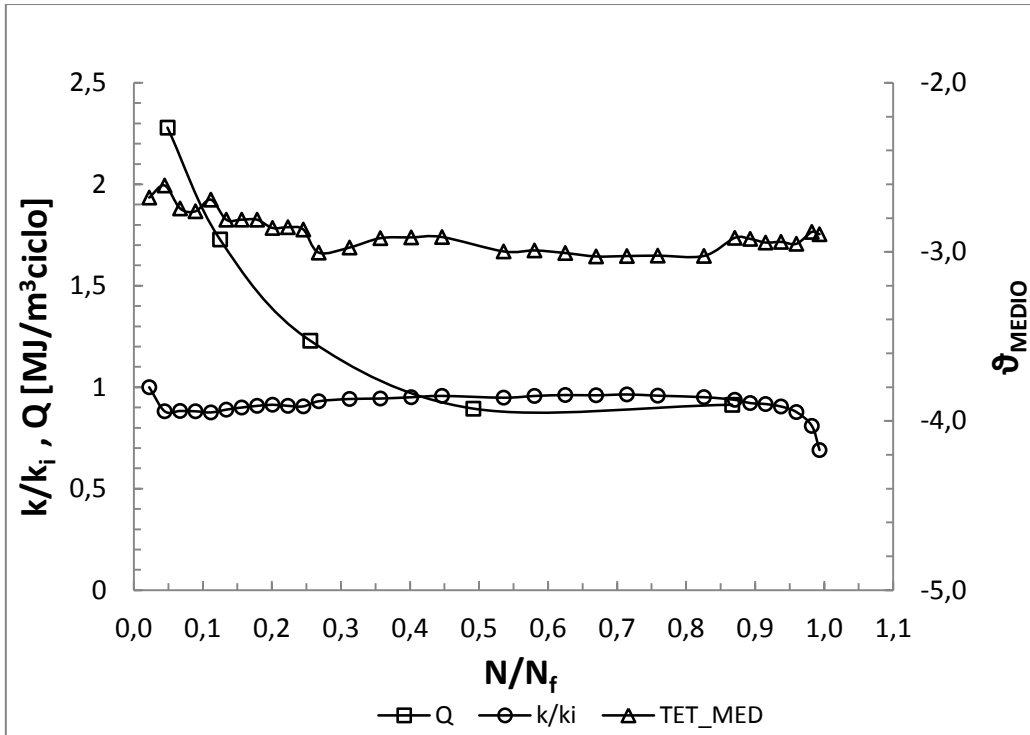


Figura C3.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_03

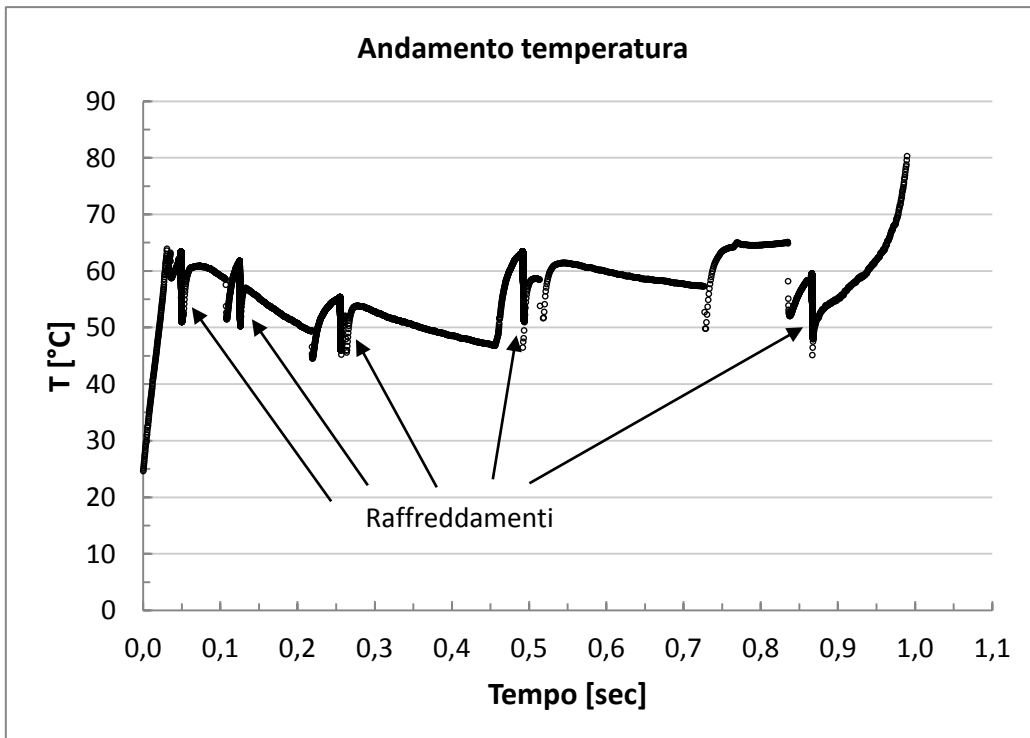


Figura C3.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_03

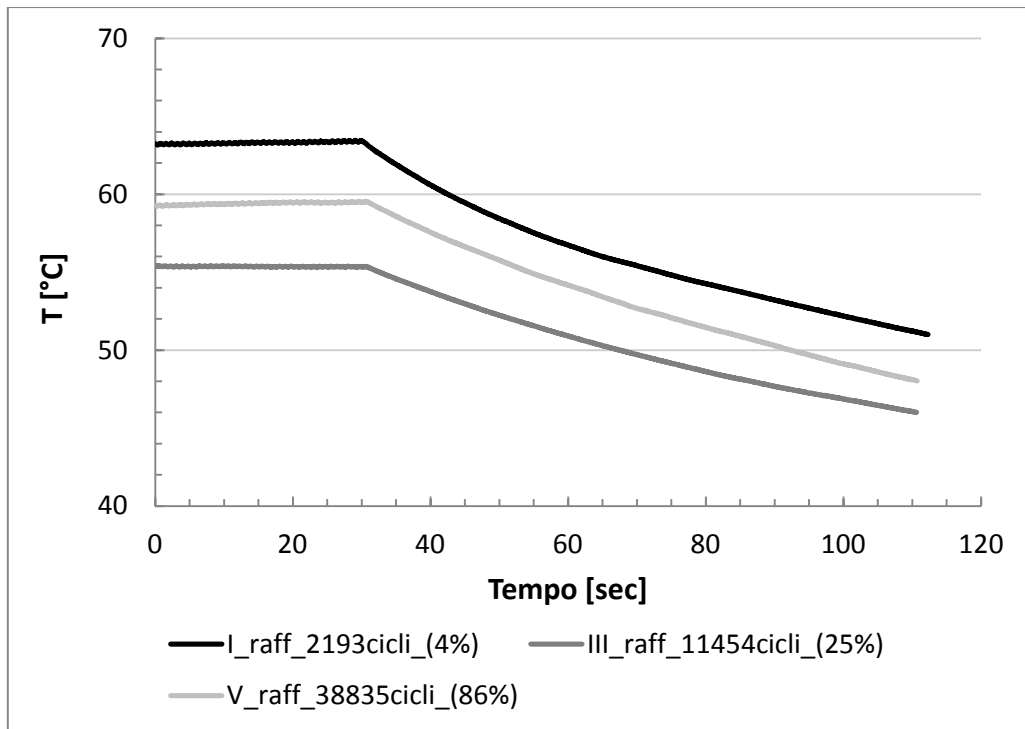


Figura C3.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_03

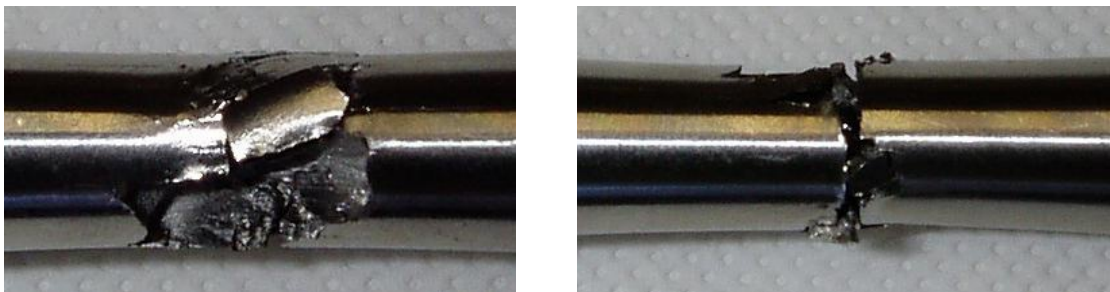


Figura C3.4 Due viste della zona di rottura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_03

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_04</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 198,8 \text{ Nm}$	$M_{MIN} = -198,8 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 0 \text{ Nm}$	$M_a = 198,8 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 300 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -300 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 300 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 134479</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 571 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	7164	5,3%	19,0	0,8	0,2893	1142,74	1428,42
2	26404	19,6%	19,0	1	0,1987	784,87	784,87
3	45394	33,8%	19,0	1,4	0,2196	867,42	619,59
4	85182	63,3%	16,8	1,8	0,2377	938,92	521,62

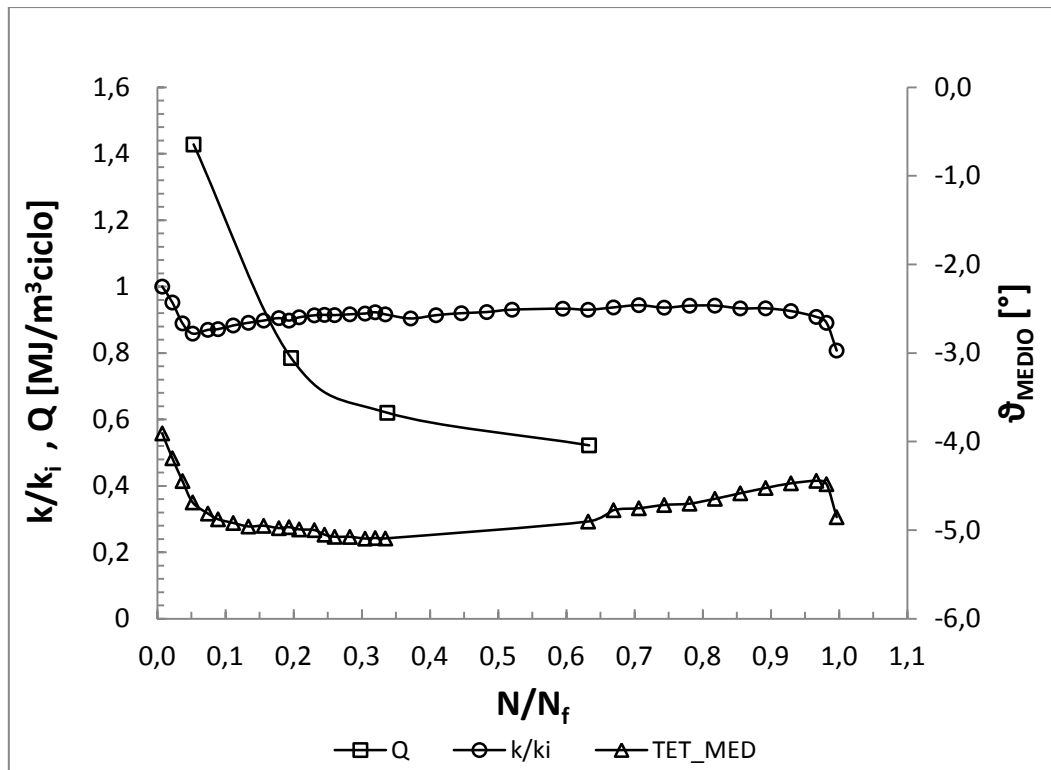


Figura C4.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_04

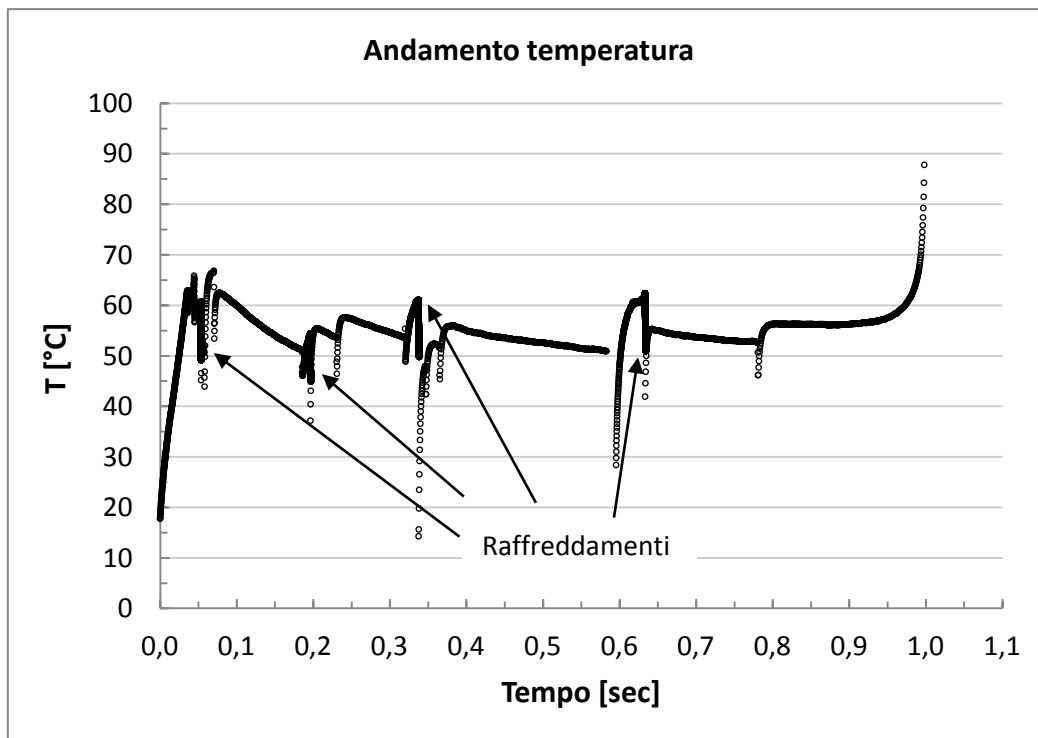


Figura C4.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_04



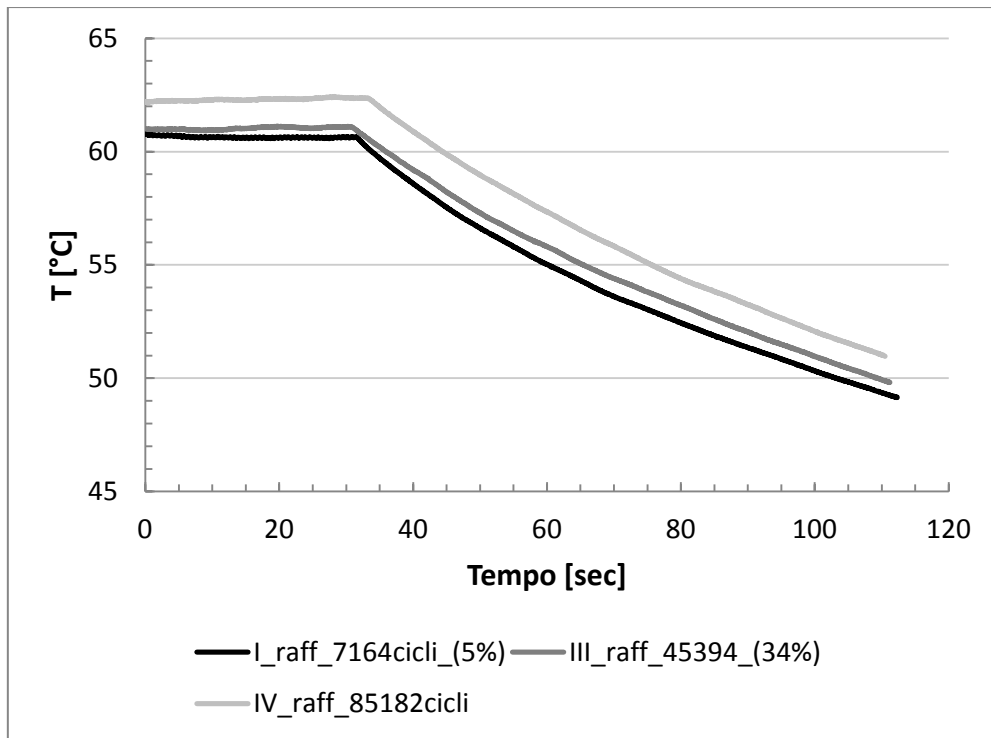


Figura C4.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_04

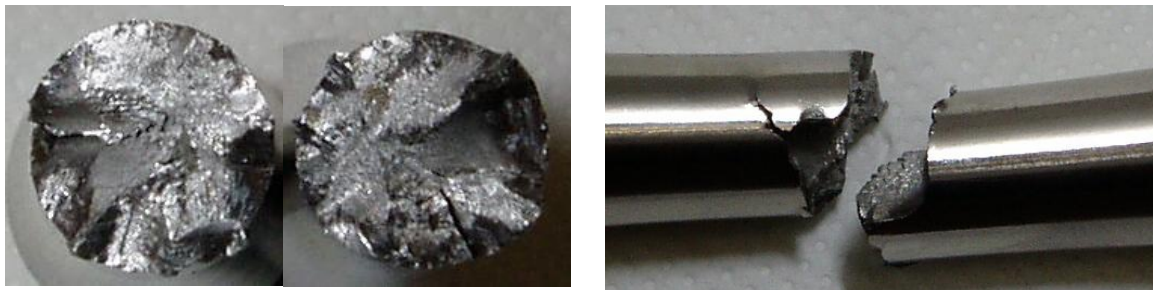


Figura C4.4 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_04

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_05</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{\text{MAX}} = 185,5 \text{ Nm}$	$M_{\text{MIN}} = -185,5 \text{ Nm}$	$M_{\text{MED}} = 0 \text{ Nm}$	$M_a = 185,5 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{\text{MAX}} = 280 \text{ MPa}$	$\tau_{\text{MIN}} = -280 \text{ MPa}$	$\tau_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 280 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 675666</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 256 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	20268	3,0%	17,5	2,6	0,3009	1188,56	457,14
2	52425	7,8%	18,0	3	0,3166	1250,57	416,86
3	100257	14,8%	18,2	3	0,2761	1090,60	363,53
4	200449	29,7%	16,8	1,8	0,1367	539,97	299,98
5	320115	47,4%	18,5	3,5	0,2266	895,07	255,73
6	421153	62,3%	19,2	4	0,2584	1020,68	255,17
7	529254	78,3%	18,5	4	0,2631	1039,25	259,81

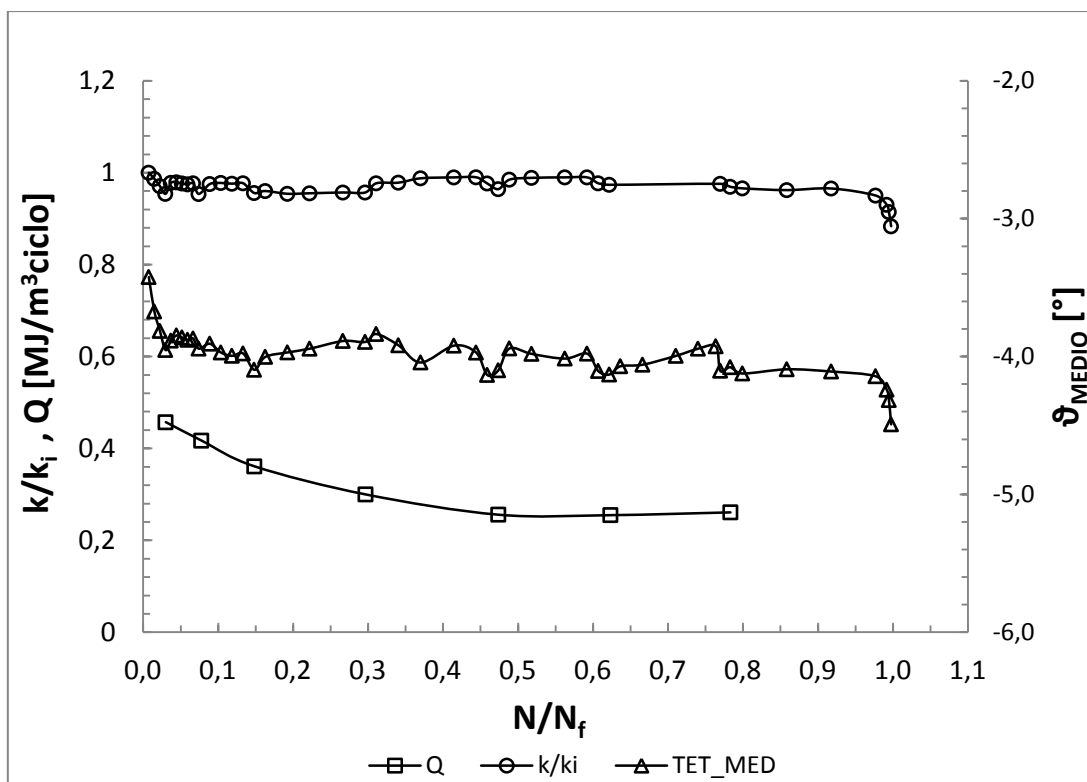


Figura C5.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_05

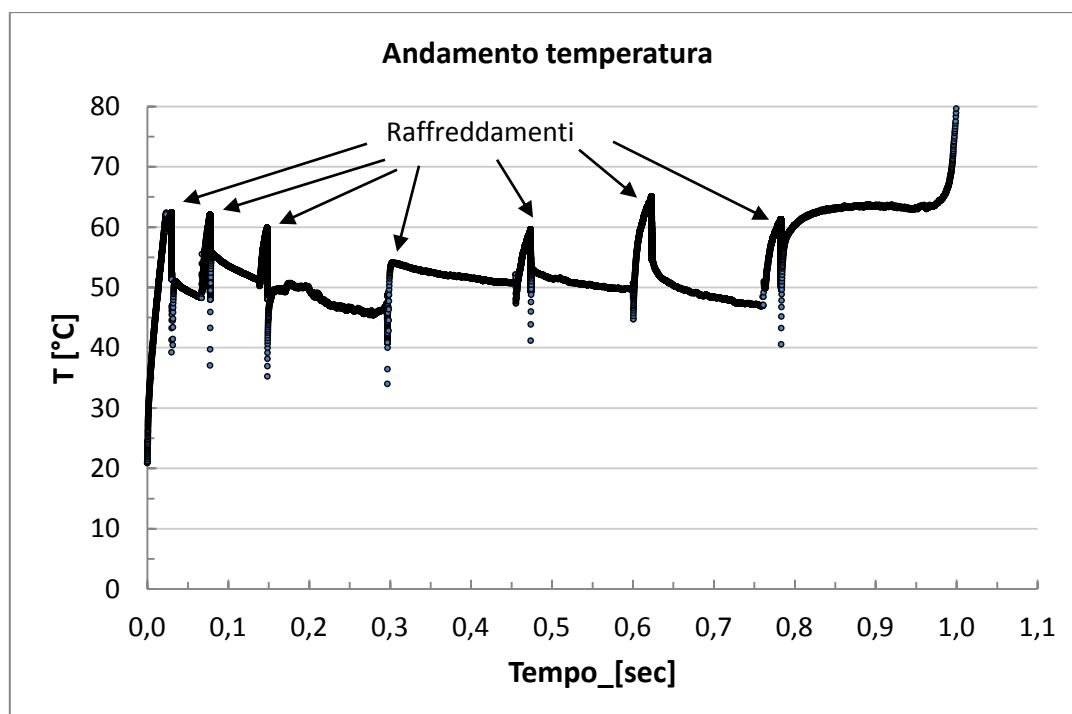


Figura C5.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_05

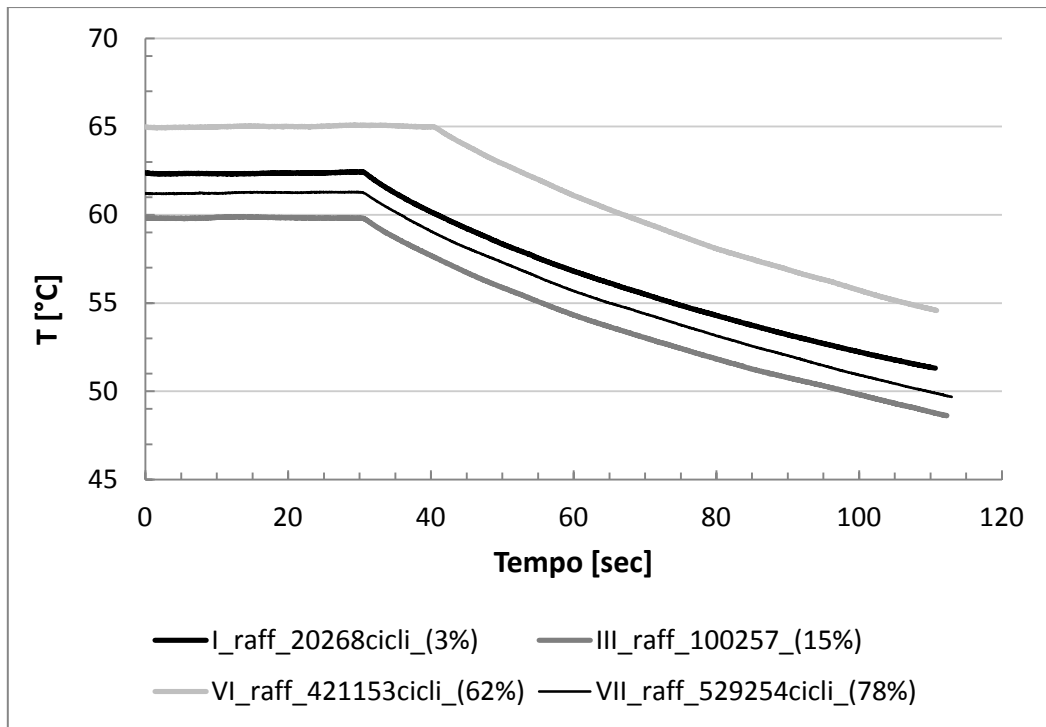


Figura C5.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_05

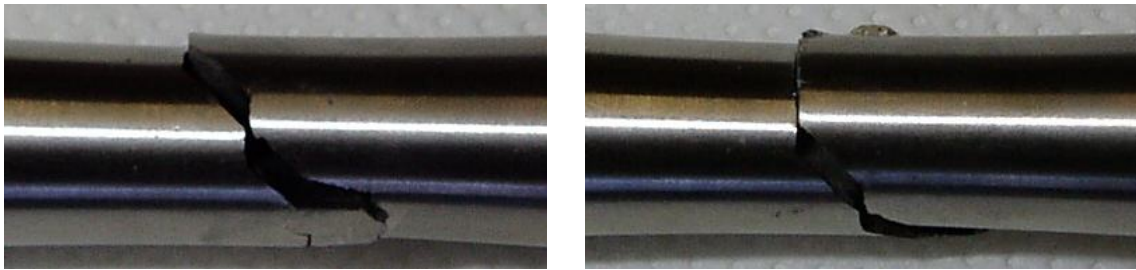


Figura C5.4 Due viste della zona di rottura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_05

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_06</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 231,9 \text{ Nm}$	$M_{MIN} = -231,9 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 0 \text{ Nm}$	$M_a = 231,9 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 350 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -350 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 350 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 7235 \text{ cicli}</math></b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 2477 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	1012	14,0%	18,6	0,25	0,3271	1292,05	5168,18
2	2005	27,7%	18,6	0,2	0,1647	650,57	3252,83
3	3218	44,5%	18,6	0,3	0,1881	743,00	2476,65
4	5255	72,6%	18,6	0,4	0,1904	752,08	1880,20

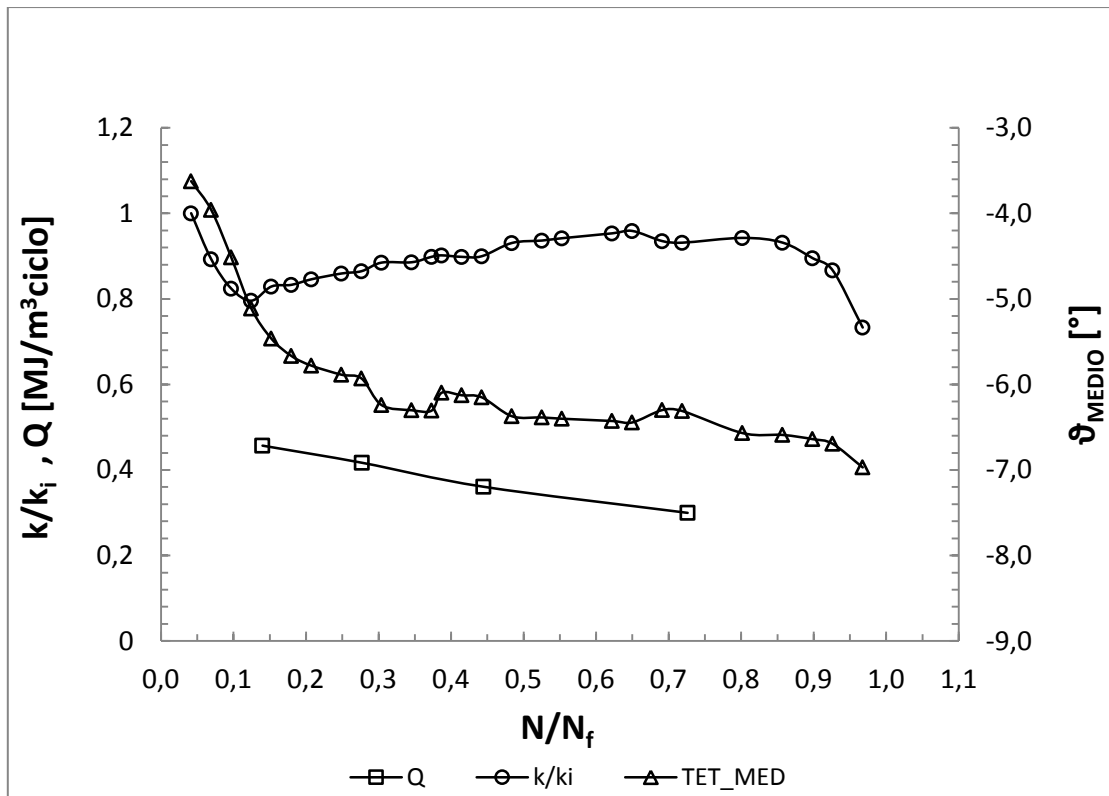


Figura C6.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_06

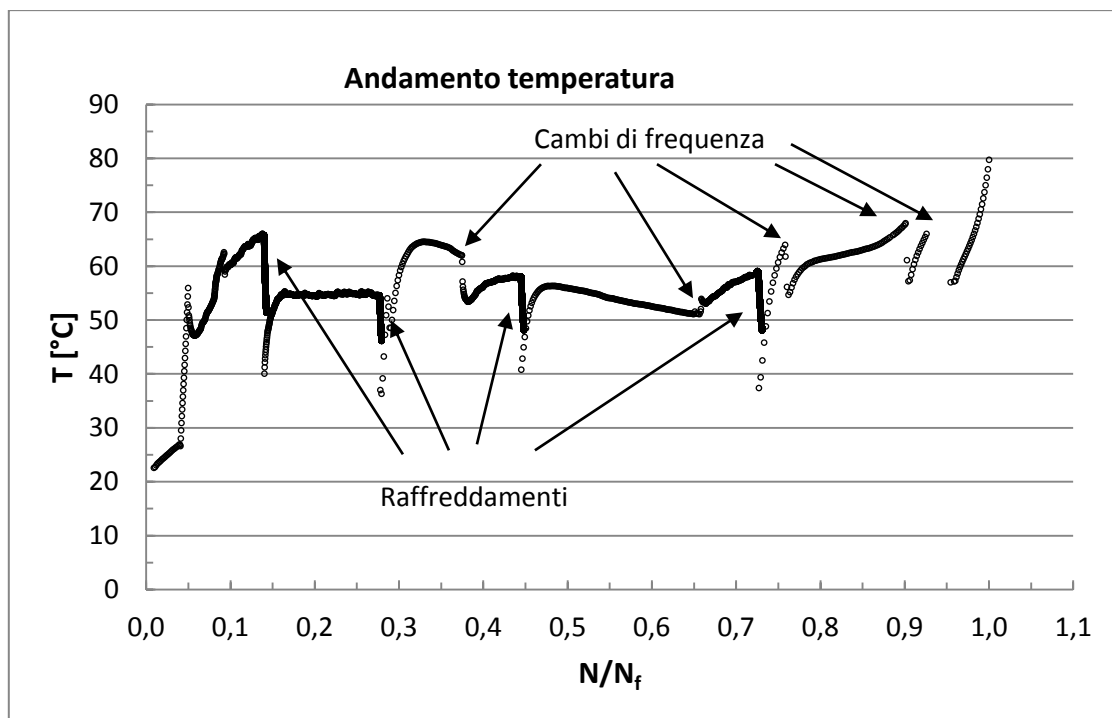


Figura C6.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_06

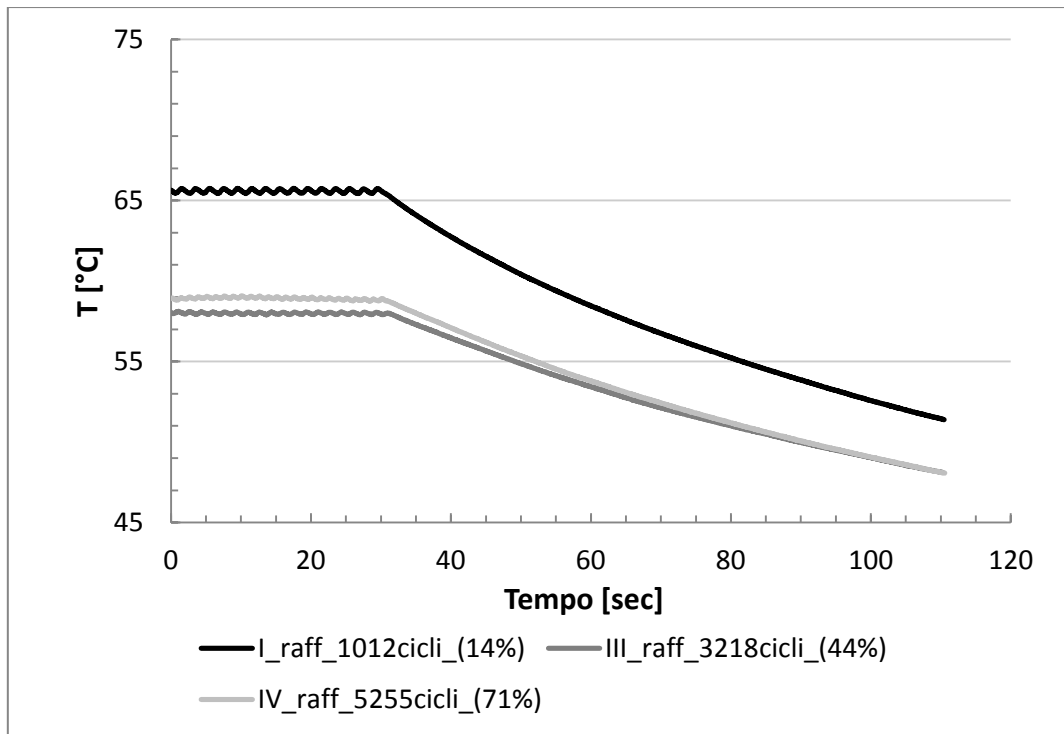


Figura C6.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_06



Figura C6.4 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_06

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_07</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 178,9 Nm	M <sub>MIN</sub> = -178,9 Nm	M <sub>MED</sub> = 0 Nm	M <sub>a</sub> = 178,9 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 270 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -270 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 270 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 684811 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 267 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	30154	4,4%	14,5	3	0,2868	1132,86	377,62
2	100836	14,7%	14,1	4	0,3163	1249,39	312,35
3	180457	26,4%	13,5	4,5	0,3142	1241,09	275,80
4	301255	44,0%	14,5	5	0,3384	1336,68	267,34
5	517447	75,6%	15,7	5	0,2667	1053,47	210,69



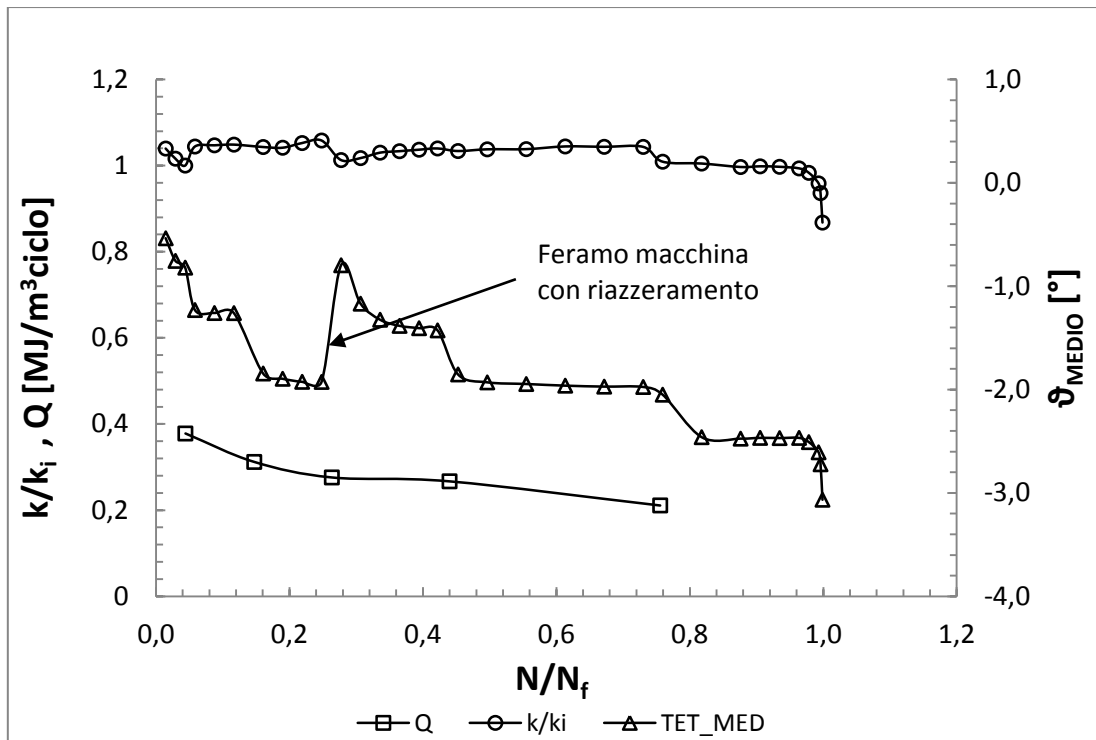


Figura C7.1 Andamento della rigidezza relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

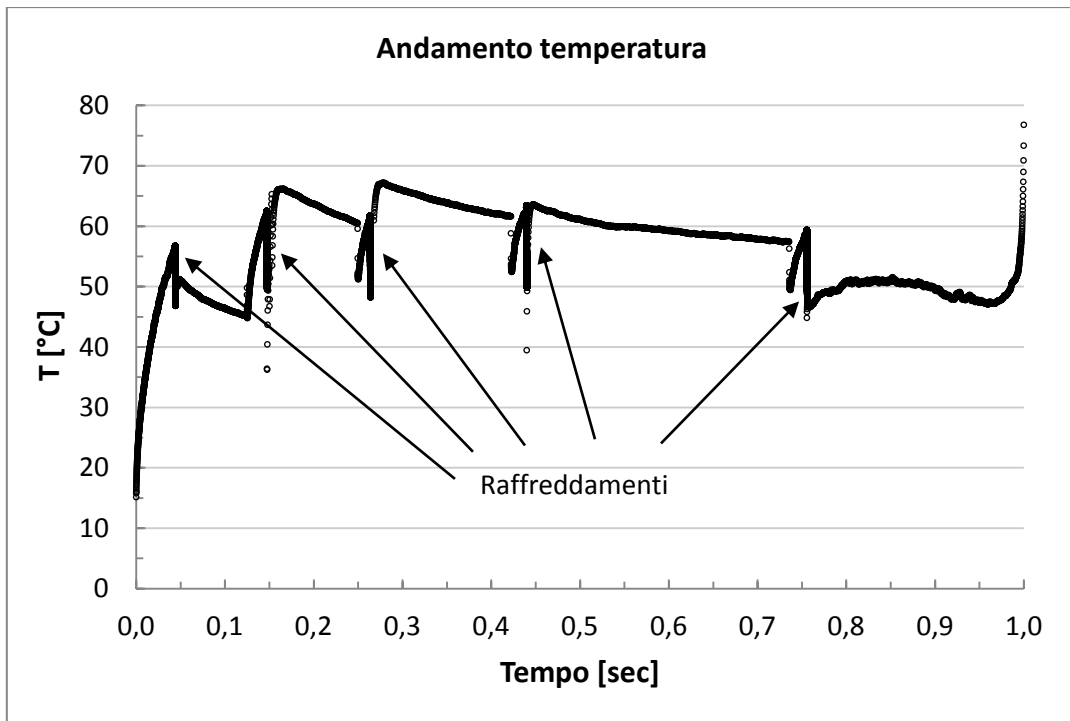


Figura C7.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

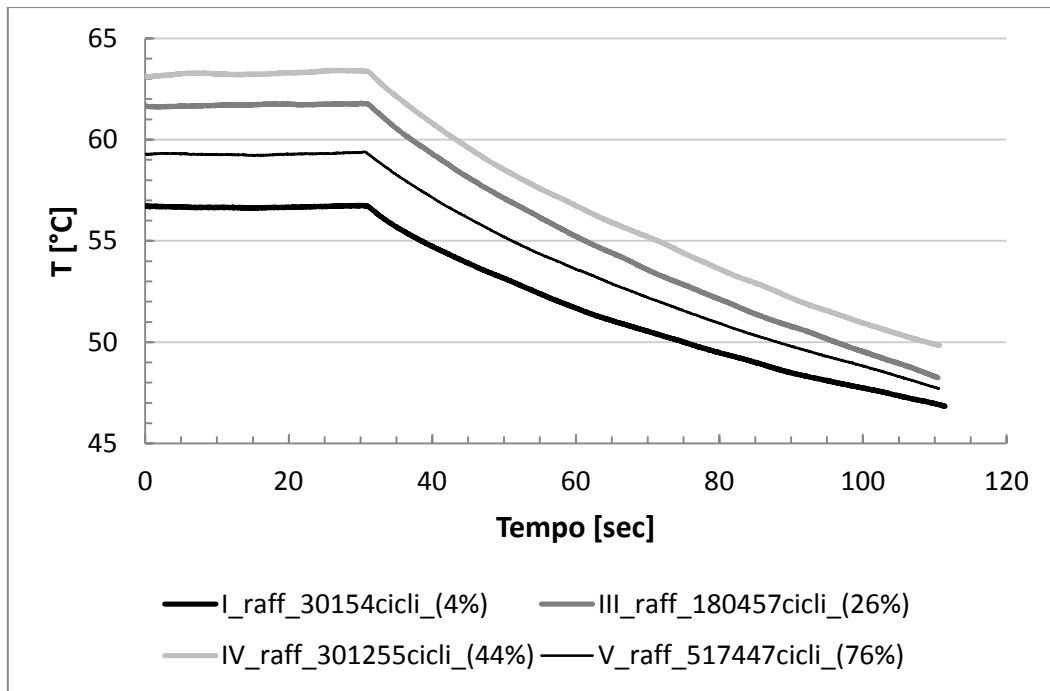


Figura C7.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

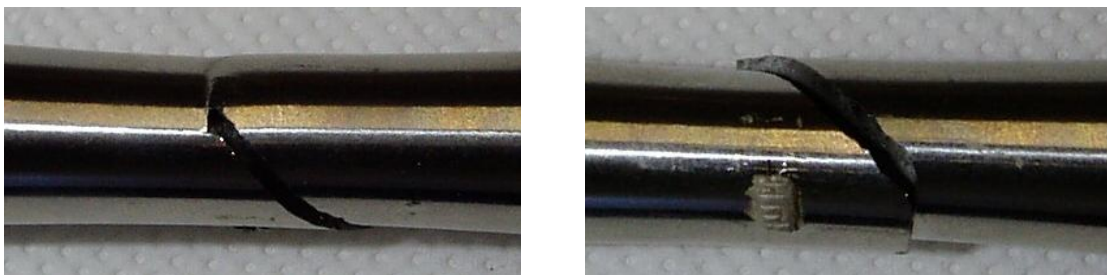


Figura C7.4 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

<b>PROVA : Torq_liscio_R-1_08</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = -1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 165,7 Nm	M <sub>MIN</sub> = -165,7 Nm	M <sub>MED</sub> = 0 Nm	M <sub>a</sub> = 165,7 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 250 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -250 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 250 \text{ MPa}$

<b>NON ROTTO :</b>	<b>fermato a 2000000 di cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 112 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	51258	2,6%	21,0	10	0,395	1560,25	156,03
2	104907	5,2%	21,5	7	0,2131	841,75	120,25
3	305276	15,3%	22,0	7	0,1897	749,32	107,05
4	502999	25,1%	23,0	7	0,1804	712,58	101,80
5	970447	48,5%	18,0	7	0,1985	784,08	112,01
6	1325957	66,3%	21,5	7	0,1762	695,99	99,43
7	1605945	80,3%	21,8	7	0,1744	688,88	98,41

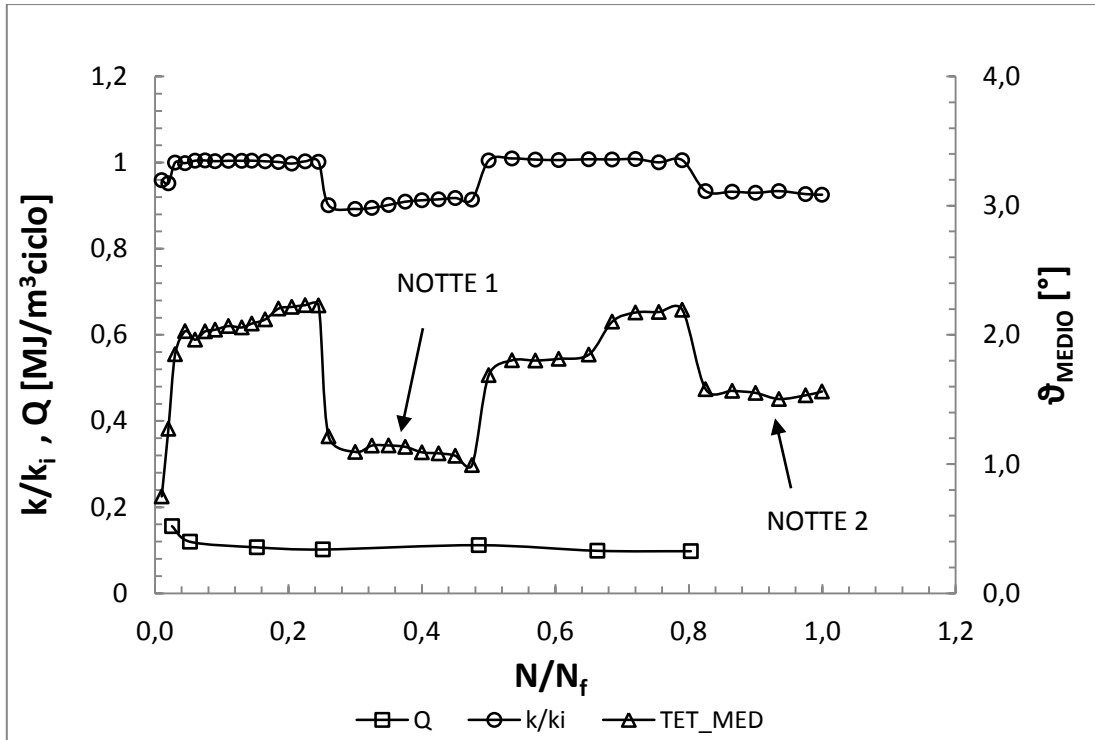


Figura C8.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R-1\_08

## Appendice D

### RISULTATI PROVE TORSIONALI A RAPPORTO DI CICLO R0,1

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica torsionale a rapporto di ciclo R0,1. Ciascuna scheda presenta i dati caratteristici relativi alle modalità di prova e quelli relativi ai diversi raffreddamenti svolti per ciascun provino. Vengono inoltre riportati il grafico dell'energia specifica dissipata Q in funzione del numero di cicli e l'andamento della temperatura in corrispondenza a raffreddamenti eseguiti in diverse fasi della vita (tra parentesi viene indicata proprio la percentuale di vita a cui viene eseguito quel raffreddamento).

Non avendo a disposizione un estensometro torsionale i dati di rigidezza e rotazione angolare sono stati ricavati dal sensore angolare della macchina di torsione.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura A.1.

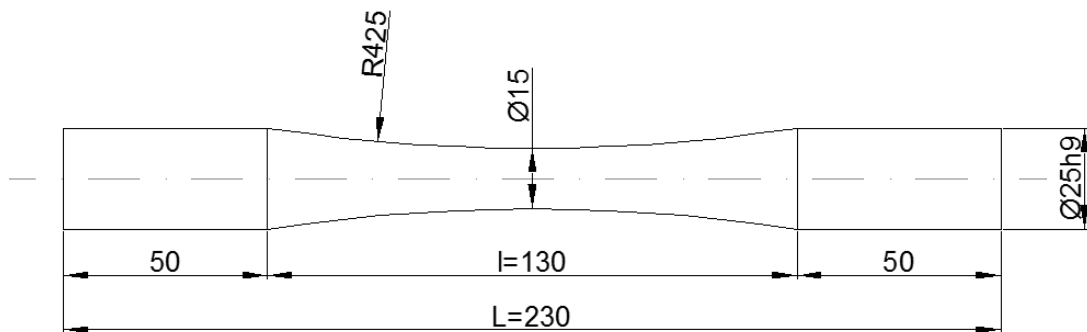


Figura D.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove

<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_01</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 368,2 Nm	M <sub>MIN</sub> = 36,82 Nm	M <sub>MED</sub> = 202,5 Nm	M <sub>a</sub> = 165,69 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 555,56 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = 55,56 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 305,6 \text{ MPa}$	$\tau_a = 250 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 225063 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 130 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	2826	1,3%	16,0	2	0,0649	256,36	128,18
2	7696	3,4%	16,1	4	0,1337	528,12	132,03
3	12249	5,4%	15,9	4	0,1303	514,69	128,67
4	17384	7,7%	16,2	4	0,1338	528,51	132,13
5	25740	11,4%	16,4	5	0,1655	653,73	130,75
6	42599	18,9%	16,8	5	0,152	600,40	120,08
7	60237	26,8%	16,9	5	0,1574	621,73	124,35
8	111522	49,6%	17,0	6	0,1978	781,31	130,22
9	207660	92,3%	16,4	7	0,2133	842,54	120,36

NOTE: Non è stato possibile valutare gli andamenti di rigidezza e rotazione angolare in quanto i valori di quest'ultima hanno superato i limiti della scala utilizzata dal software MTS che erano pari a  $\pm 30^\circ$ . Per i provini successivi si è utilizzata la scala con limiti di  $\pm 130^\circ$  che è la massima disponibile.

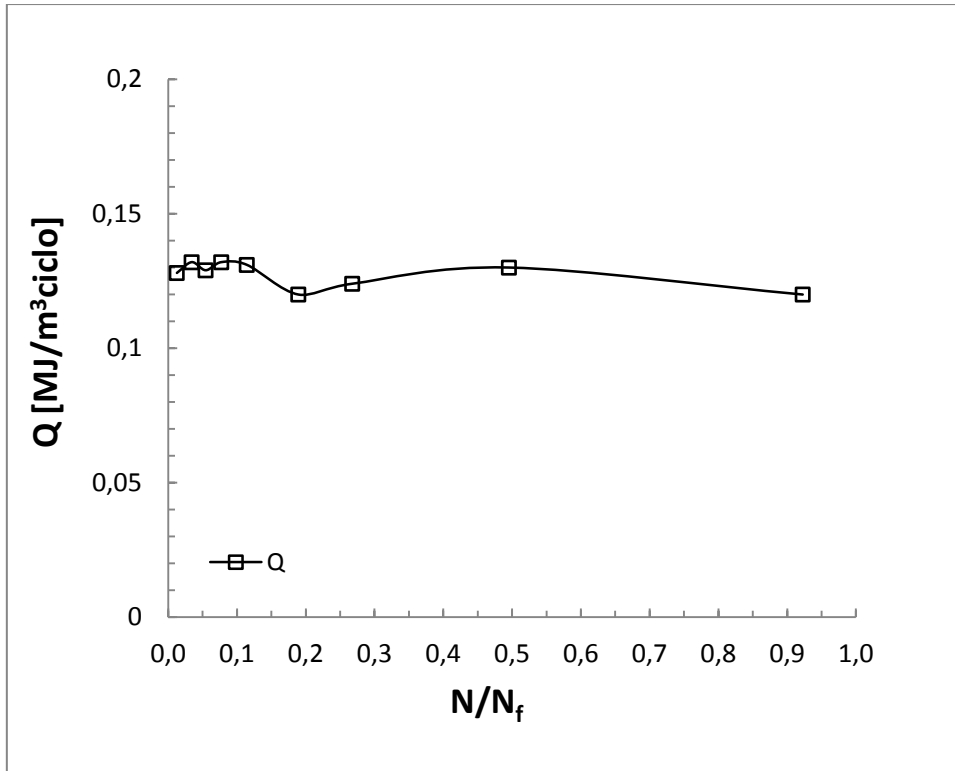


Figura D1.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_01

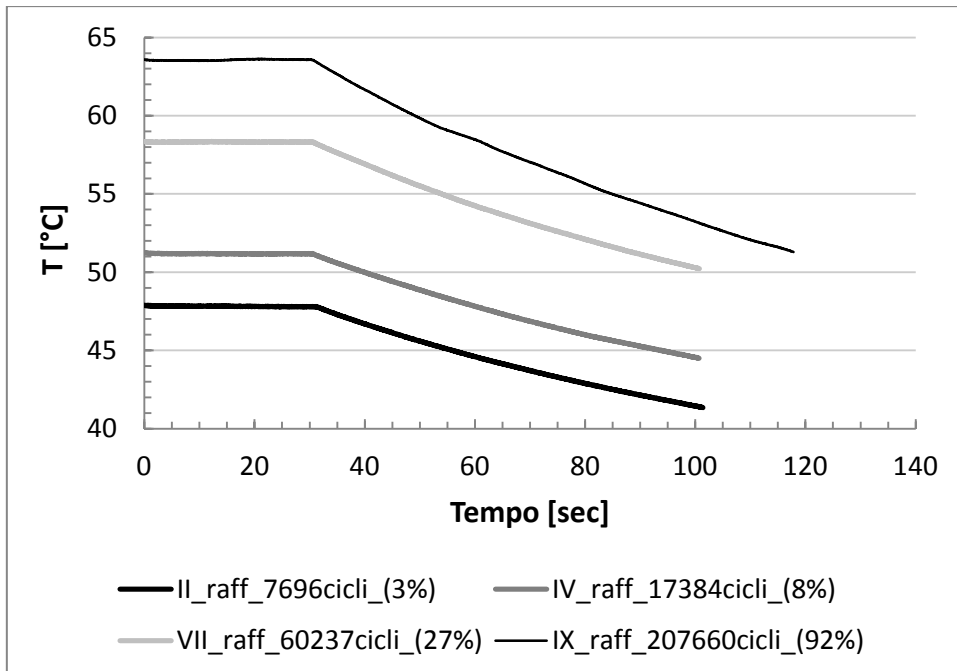


Figura D1.2 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_01

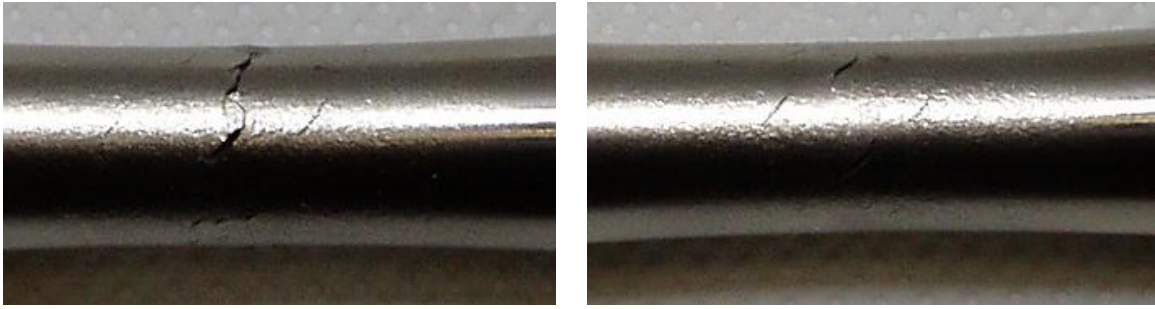


Figura D1.3 Due viste delle cricche innescate per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_01



<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_02</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 412,3 \text{ Nm}$	$M_{MIN} = 41,23 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 226,8 \text{ Nm}$	$M_a = 185,6 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 622,2 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = 62,22 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 342,2 \text{ MPa}$	$\tau_a = 280 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 184775</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 139 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	6228	3,4%	18,0	3	0,141	556,95	185,65
2	13152	7,1%	18,5	3,5	0,13	513,50	146,71
3	20179	10,9%	18,6	4	0,1327	524,17	131,04
4	35083	19,0%	19,5	4	0,1531	604,75	151,19
5	65062	35,2%	19,7	4	0,1508	595,66	148,92
6	100904	54,6%	19,8	4,5	0,1471	581,05	129,12
7	183327	99,2%	20,0	4,5	0,2306	910,87	202,42

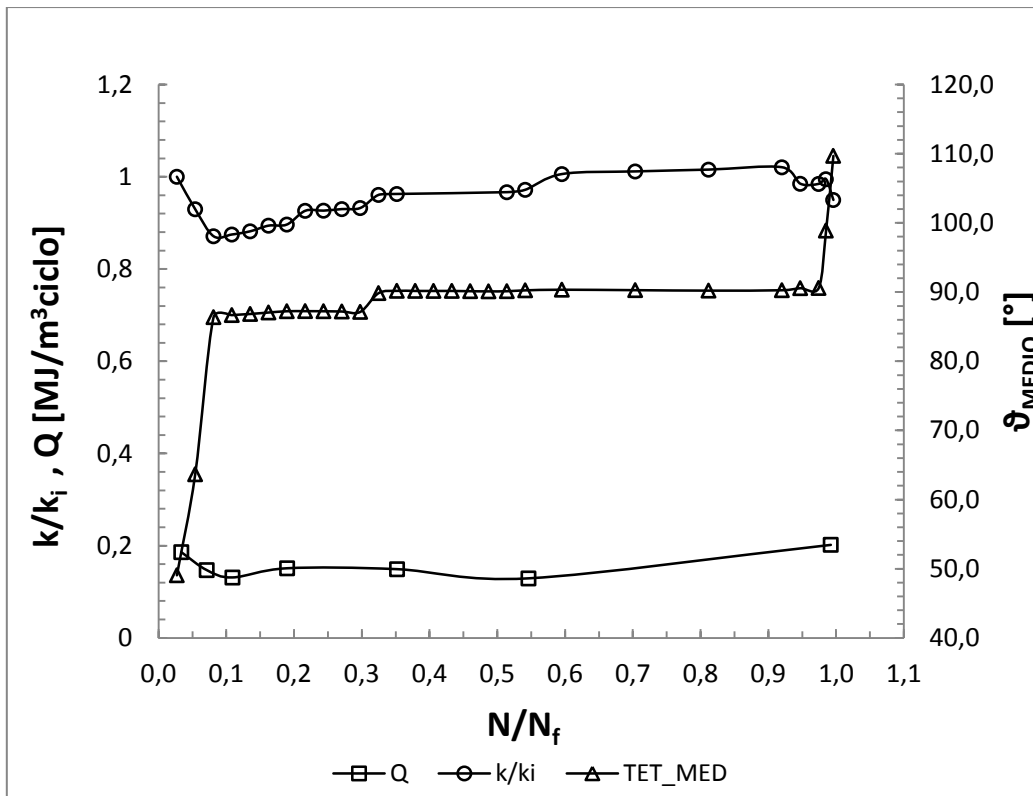


Figura D2.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_02

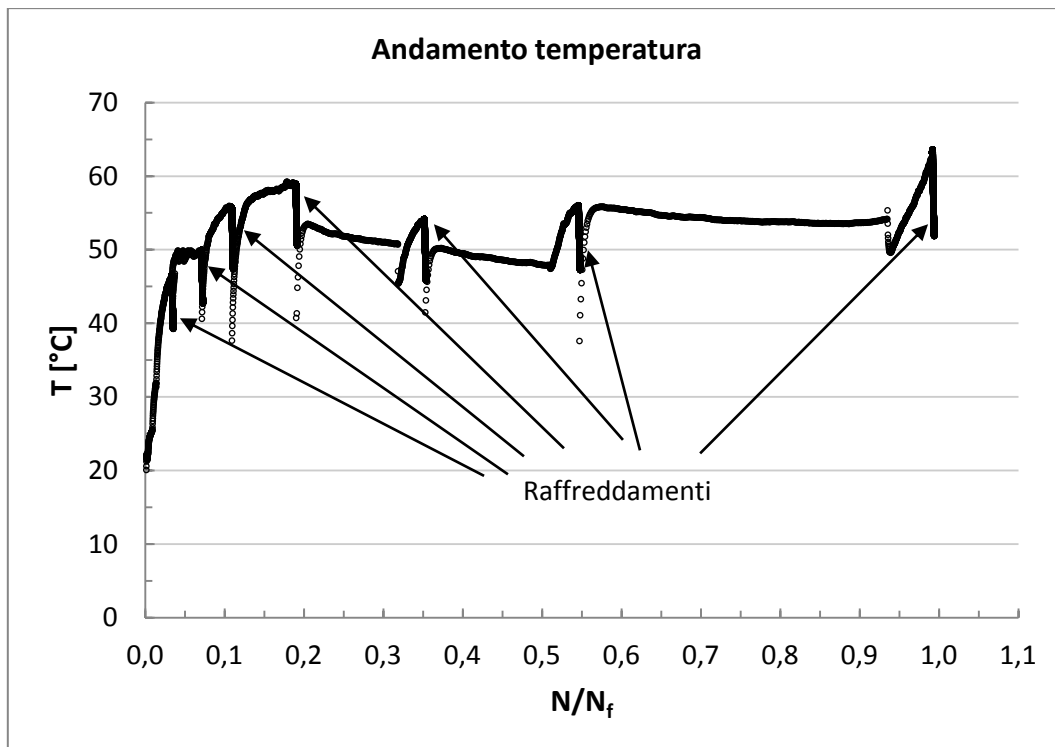


Figura D2.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_02

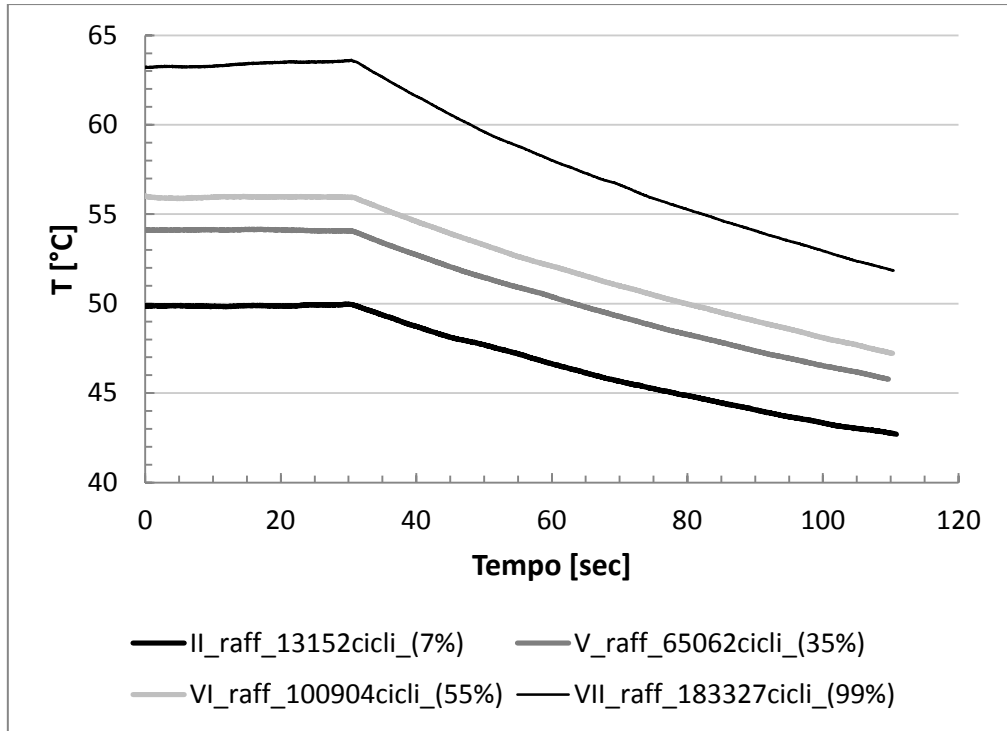


Figura D2.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_02

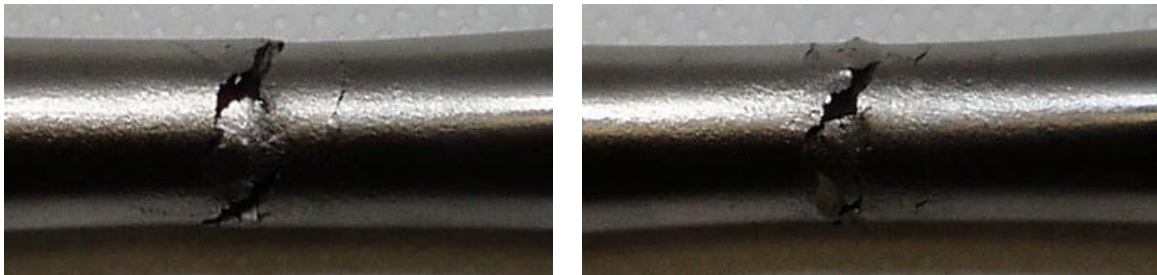


Figura D2.4 Due viste delle cricche innescate per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_02

<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_03</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 441,8 Nm	M <sub>MIN</sub> = 44,18 Nm	M <sub>MED</sub> = 243,0 Nm	M <sub>a</sub> = 198,8 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 666,7 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = 66,7 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 366,7 \text{ MPa}$	$\tau_a = 300 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 102403 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 173 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	4444	4,3%	19,2	3	0,1332	526,14	175,38
2	12119	11,8%	19,5	4	0,1782	703,89	175,97
3	20166	19,7%	20,0	4	0,1859	734,31	183,58
4	40259	39,3%	20,3	4	0,1776	701,52	175,38
5	72186	70,5%	20,5	4	0,1735	685,33	171,33

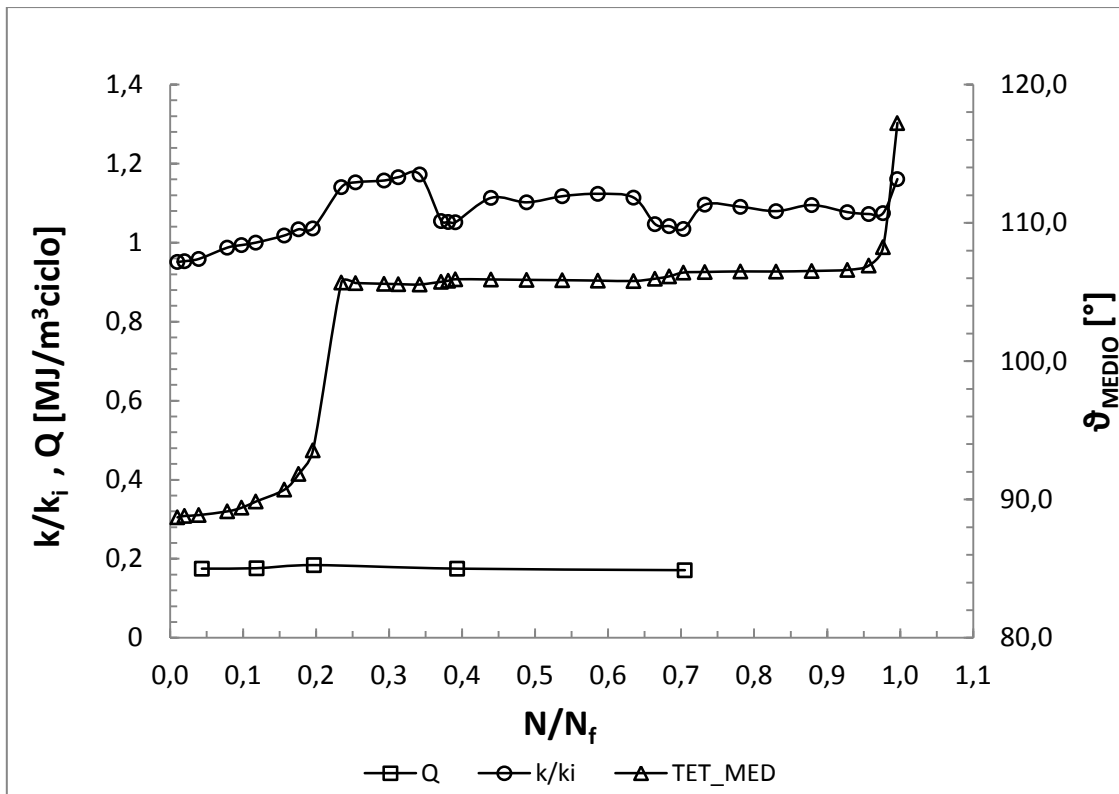


Figura D3.1 Andamento della rigidezza relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_03

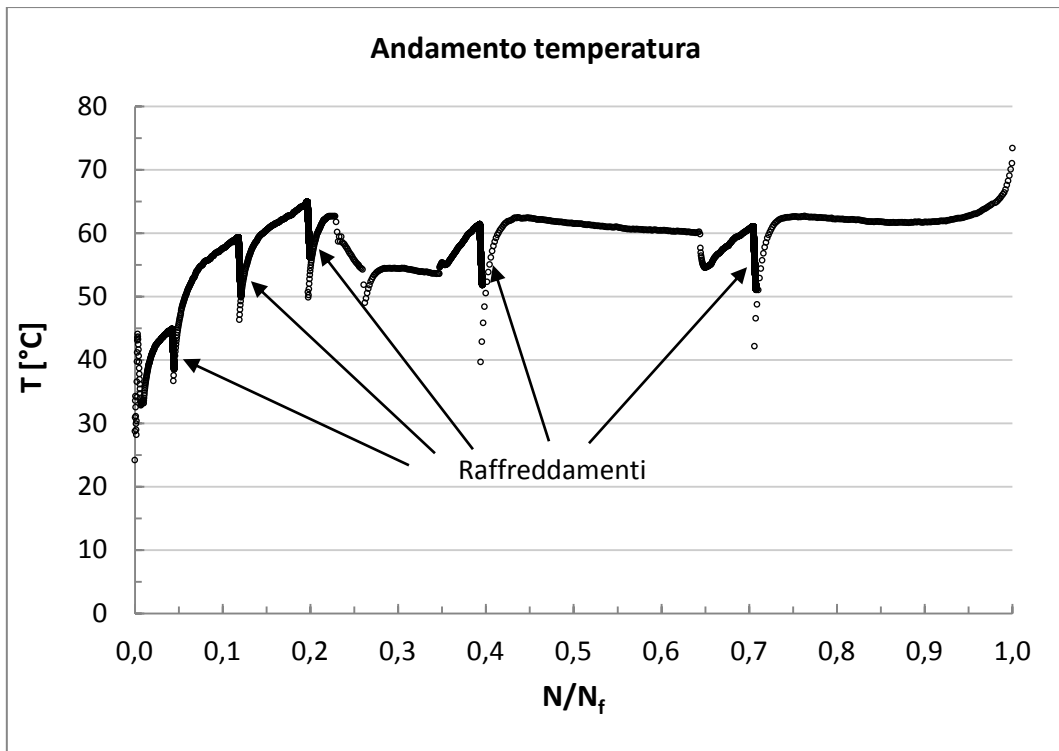


Figura D3.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_03

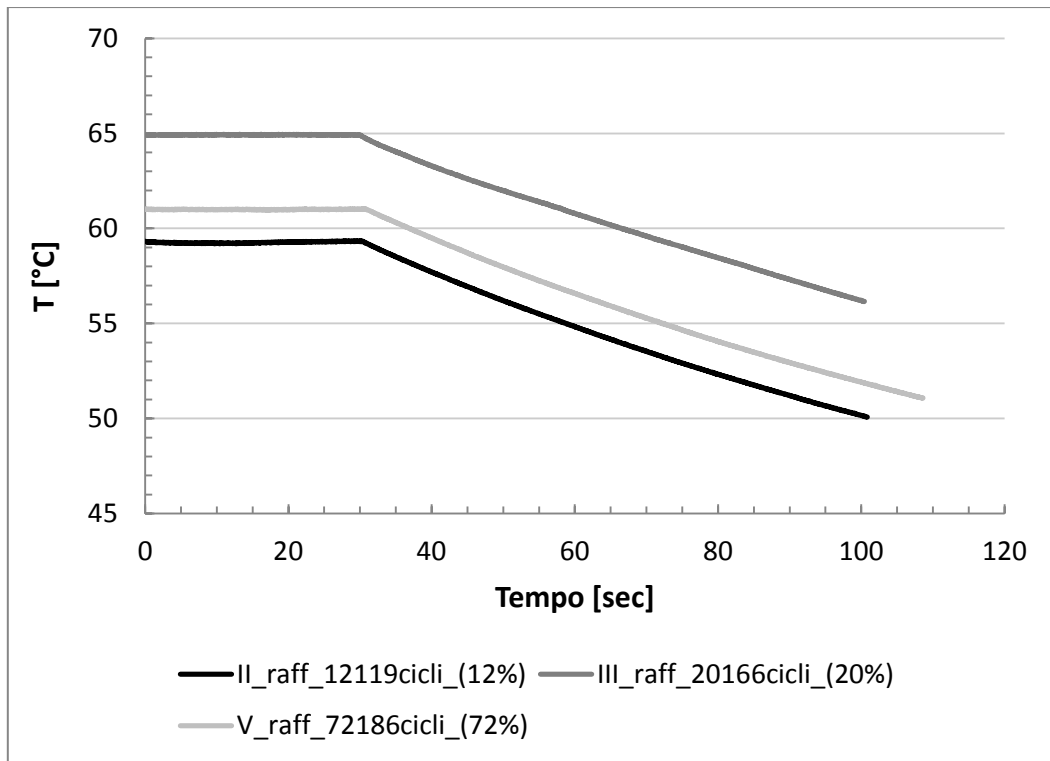


Figura D3.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_03

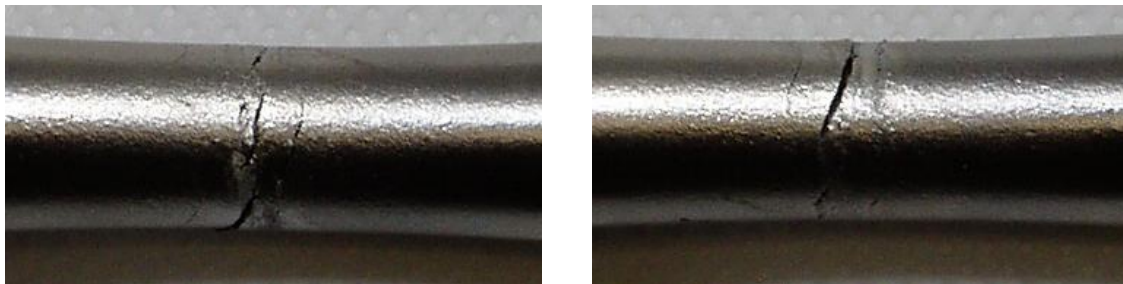


Figura D3.4 Due viste della zona di rottura per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_03

PROVA : Torq_liscio_R0,1_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	M <sub>MAX</sub> = 324 Nm	M <sub>MIN</sub> = 32,4 Nm	M <sub>MED</sub> = 178,2 Nm	M <sub>a</sub> = 145,8 Nm
TENSIONI APPLICATE	$\tau_{MAX} = 488,9 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = 48,89 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 268,9 \text{ MPa}$	$\tau_a = 220 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura:	<b>N<sub>f</sub> = 751016 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 64 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	10718	1,4%	20,5	7	0,1332	526,14	75,16
2	20337	2,7%	20,5	8,5	0,1782	703,89	82,81
3	110454	14,7%	21,0	10	0,1859	734,31	73,43
4	231051	30,8%	18,6	10	0,1776	701,52	70,15
5	305265	40,6%	19,8	13	0,1735	685,33	52,72
6	501018	66,7%	20,0	12	0,1694	669,13	55,76
7	648897	86,4%	20,3	12,5	0,1653	652,94	52,23

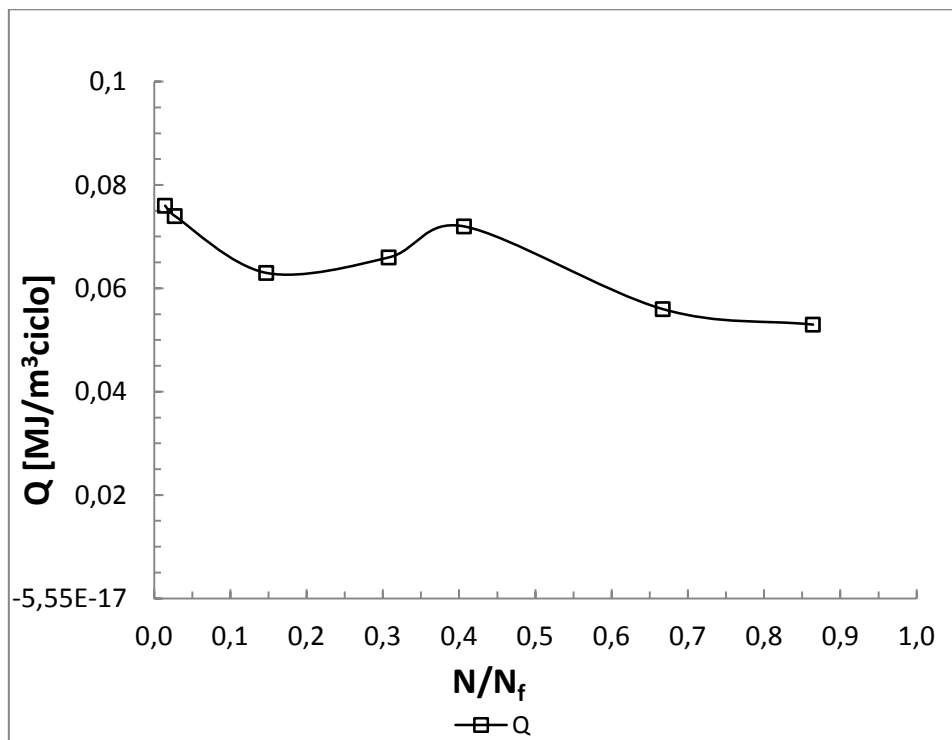


Figura D4.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_04

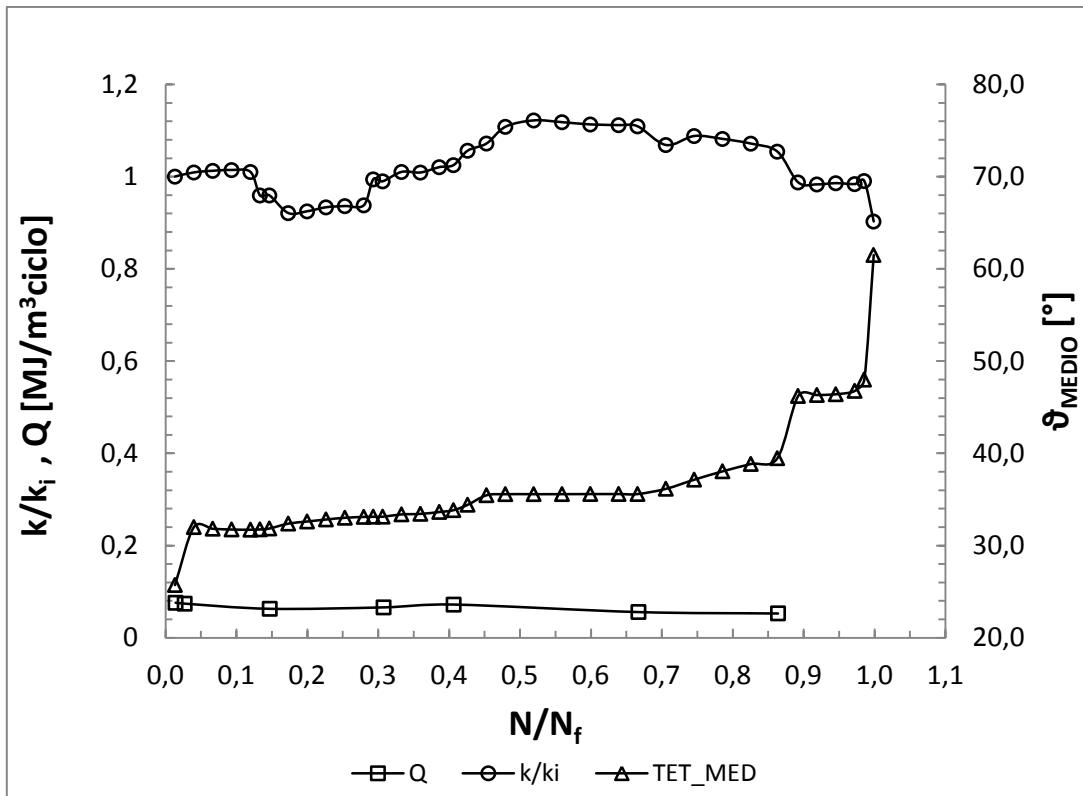


Figura D4.2 Andamento della rigidezza relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_04

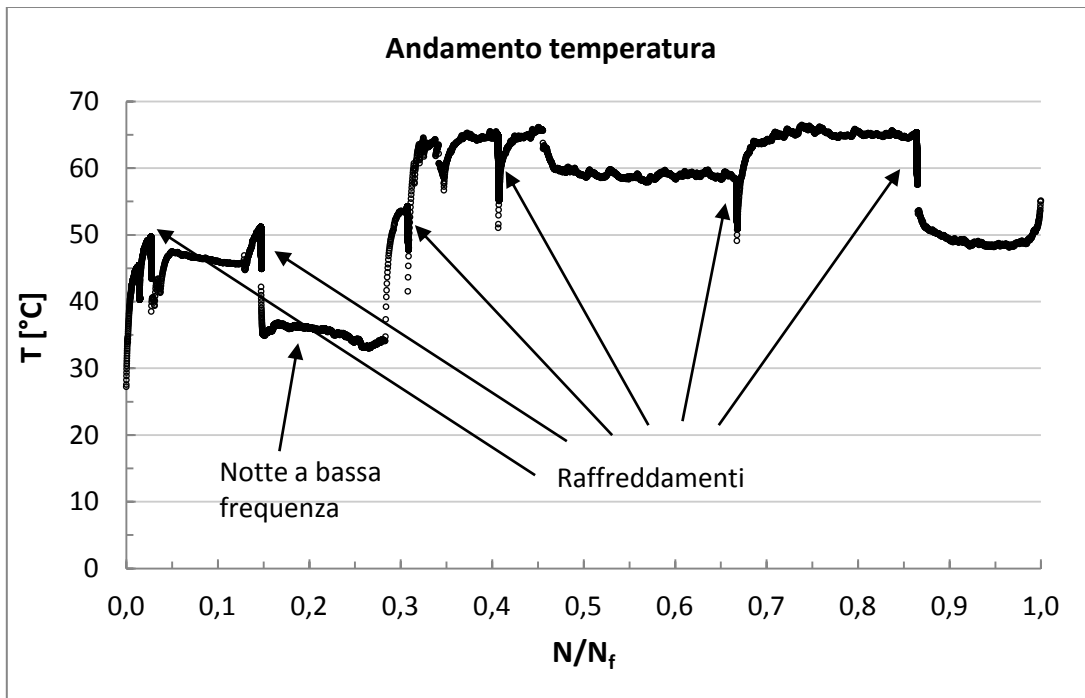


Figura D4.3 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_04



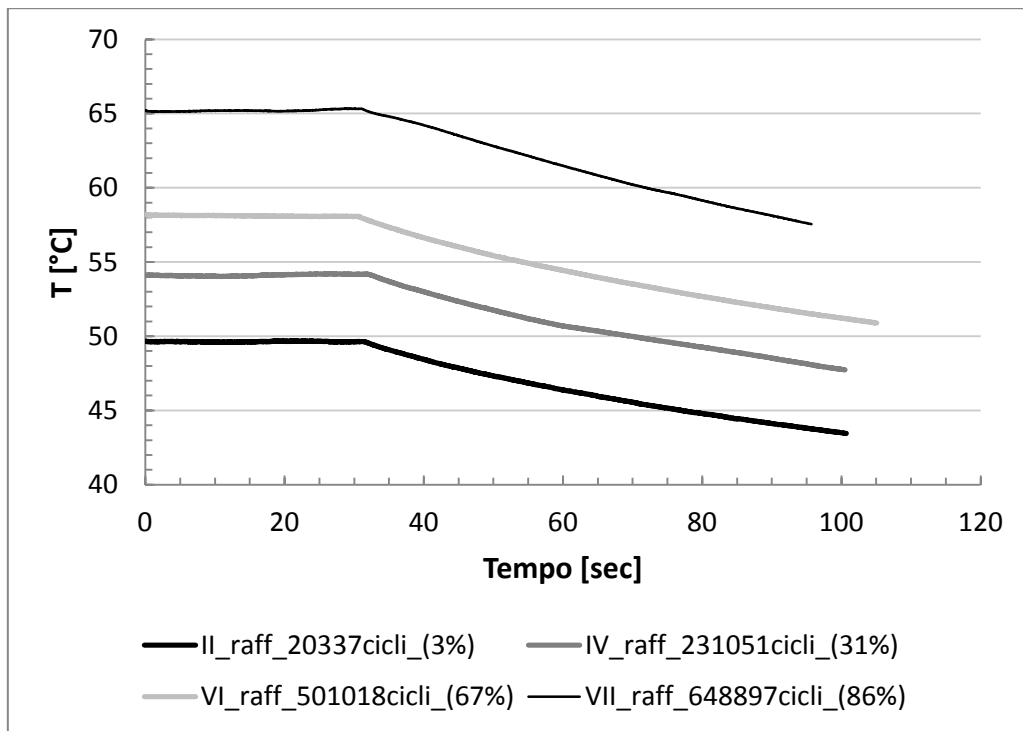


Figura C4.4 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_04

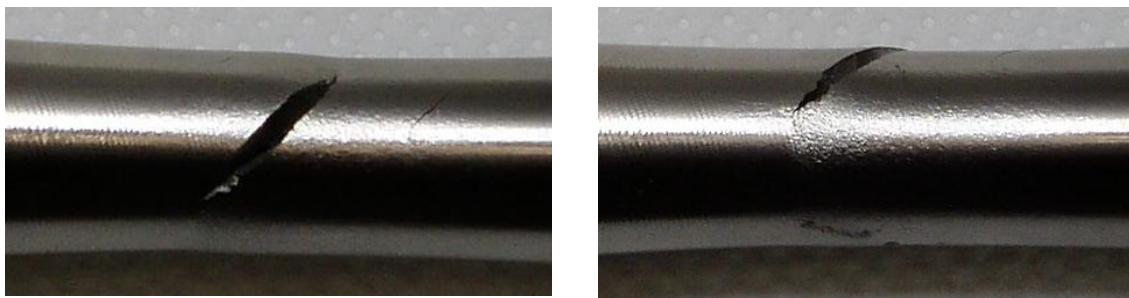


Figura D4.5 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_04

<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_05</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 294,52Nm	M <sub>MIN</sub> = 29,45 Nm	M <sub>MED</sub> = 162 Nm	M <sub>a</sub> = 132,55 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 444,4 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = 44,44 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 244,4 \text{ MPa}$	$\tau_a = 200 \text{ MPa}$

<b>NON ROTTO:</b>	<b>fermato a N = 2000000 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 32 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	50485	2,5%	18,2	20	0,1161	458,60	22,93
2	100834	5,0%	18,4	20	0,1079	426,21	21,31
3	200737	10,0%	18,9	20	0,1418	560,11	28,01
4	401748	20,1%	18,5	20	0,1587	626,87	31,34
5	801459	40,1%	16,7	20	0,1188	469,26	23,46
6	1000539	50,0%	18,0	20	0,1624	641,48	32,07
7	1290152	64,5%	19,0	20	0,136	537,20	26,86

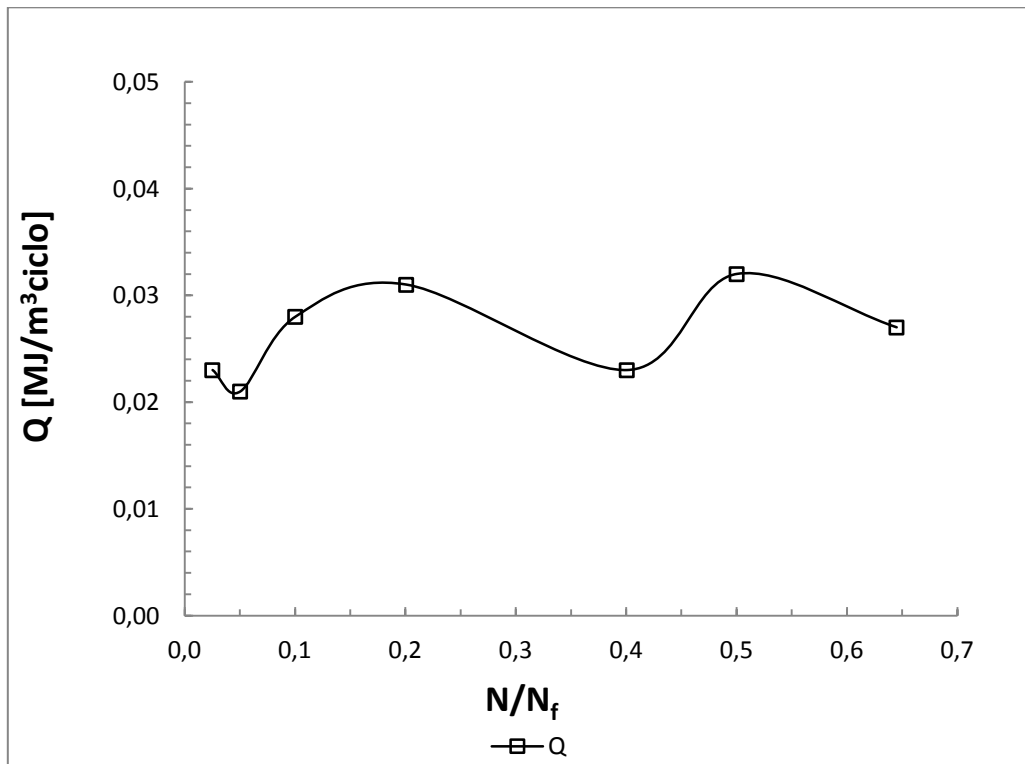


Figura D5.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_05

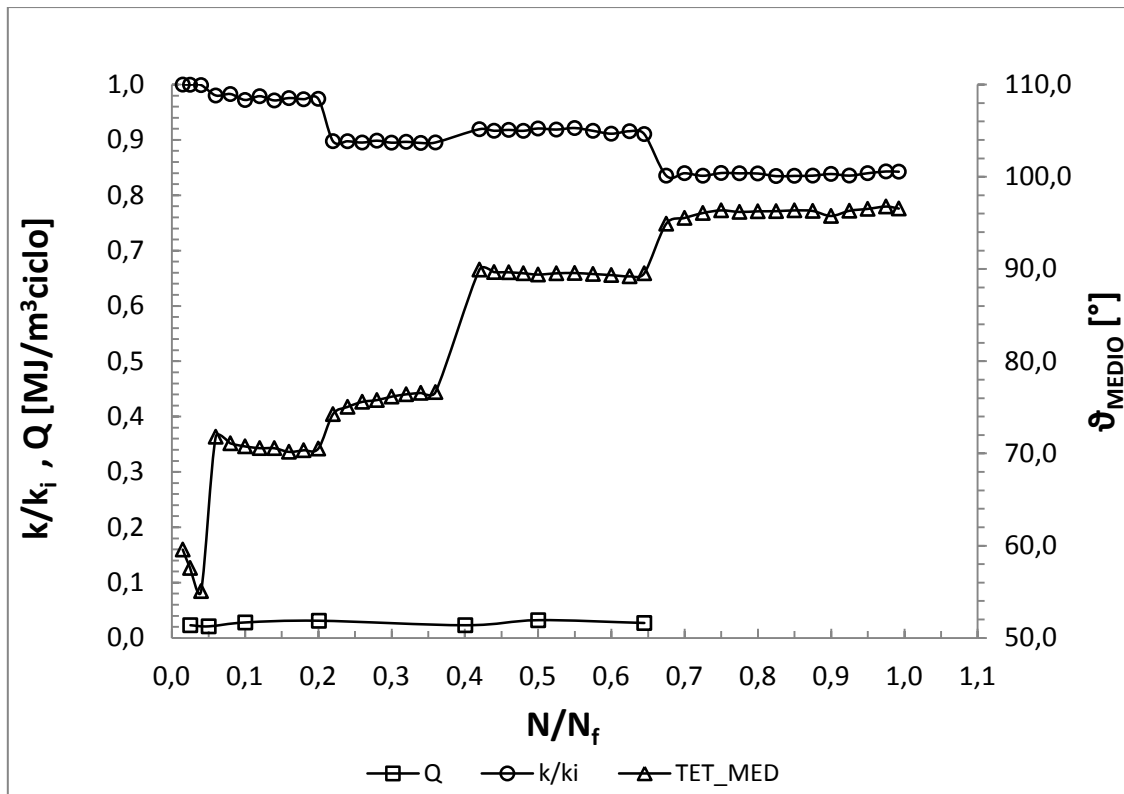


Figura D5.2 Andamento della rigidezza relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_05

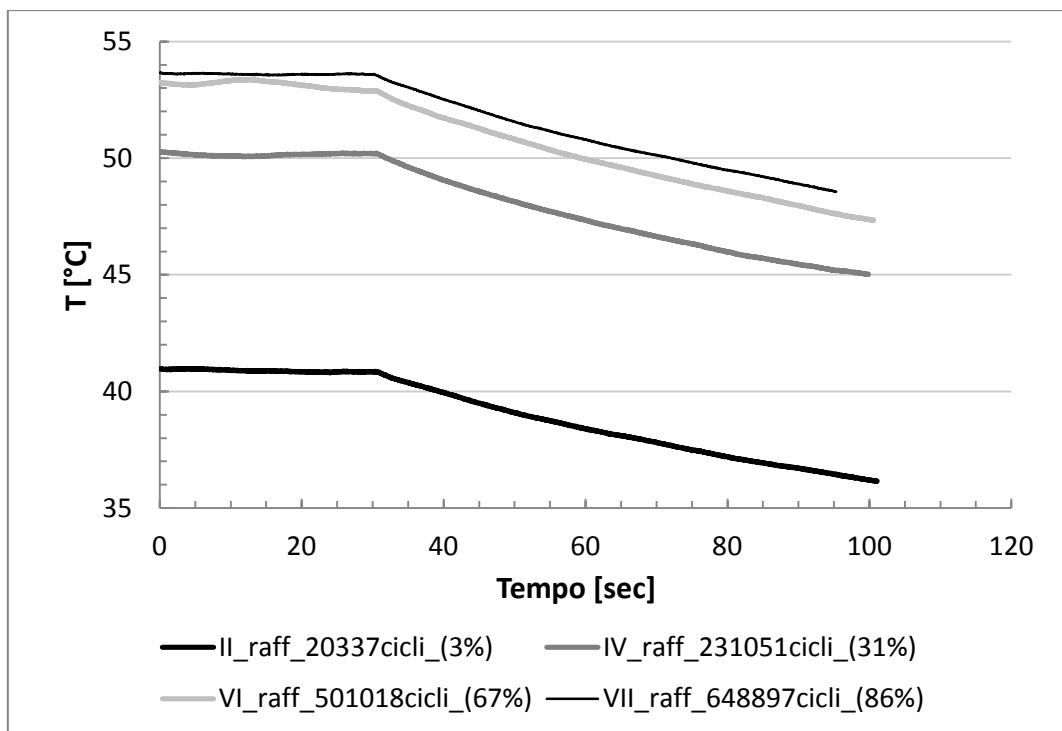


Figura D5.3 Esempi di raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_05

<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_06</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	$M_{MAX} = 471,24\text{Nm}$	$M_{MIN} = 47,12 \text{ Nm}$	$M_{MED} = 259,2 \text{ Nm}$	$M_a = 212,1 \text{ Nm}$
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 711,11\text{MPa}$	$\tau_{MIN} = 71,11 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 391,1 \text{ MPa}$	$\tau_a = 320 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b><math>N_f = 7180</math> cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b><math>Q_{50\%} = 392 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}</math></b>

<b>n° raff</b>	<b>cicli</b>	<b>% vita</b>	<b>T [°C]</b>	<b>f [Hz]</b>	<b>grad [°C/s]</b>	<b>H [kW/m<sup>3</sup>ciclo]</b>	<b>Q [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>
1	2398	33,4%	21,5	2	0,2011	794,35	397,17
2	5009	69,8%	21,7	2	0,1957	773,02	386,51

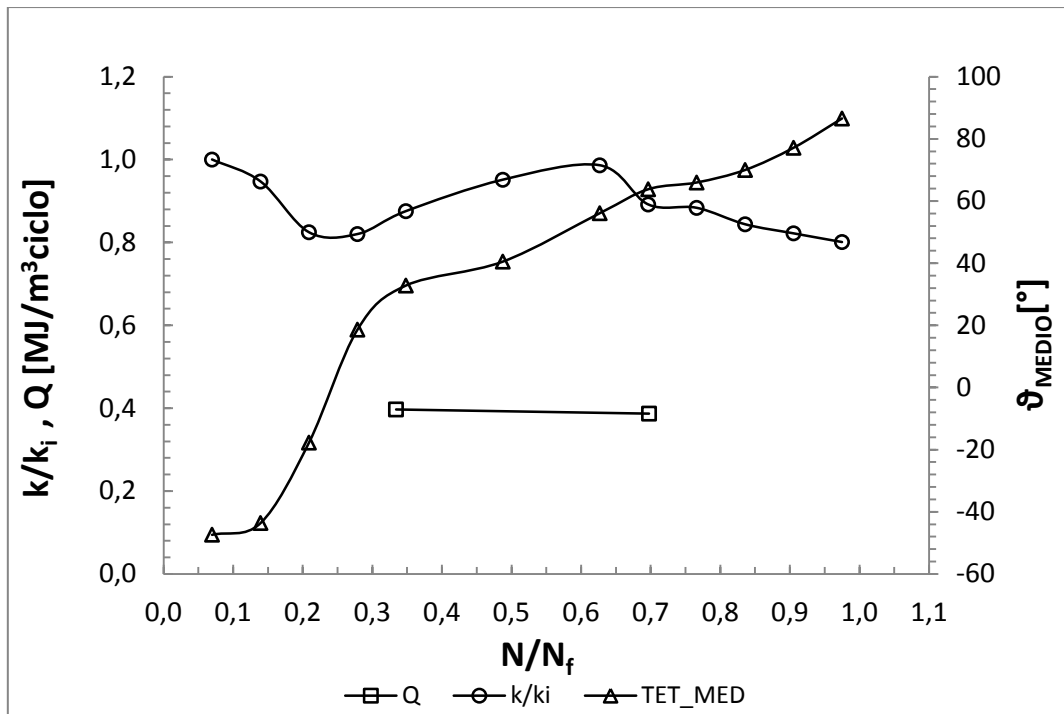


Figura D6.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_06

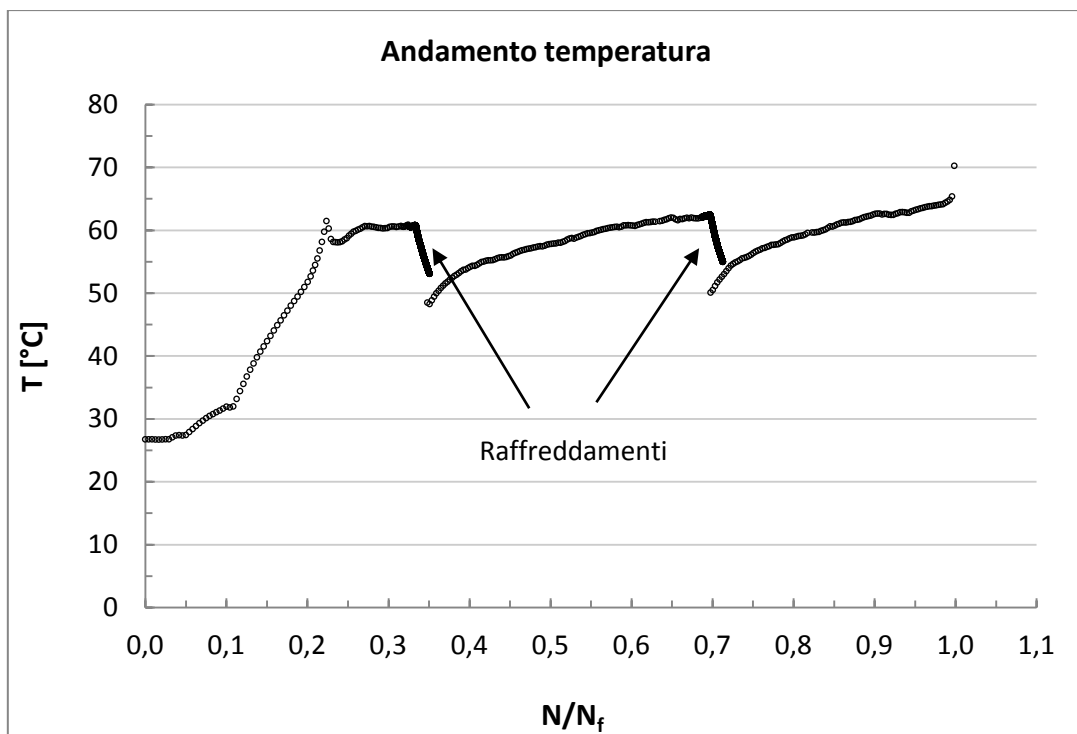


Figura D6.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_06

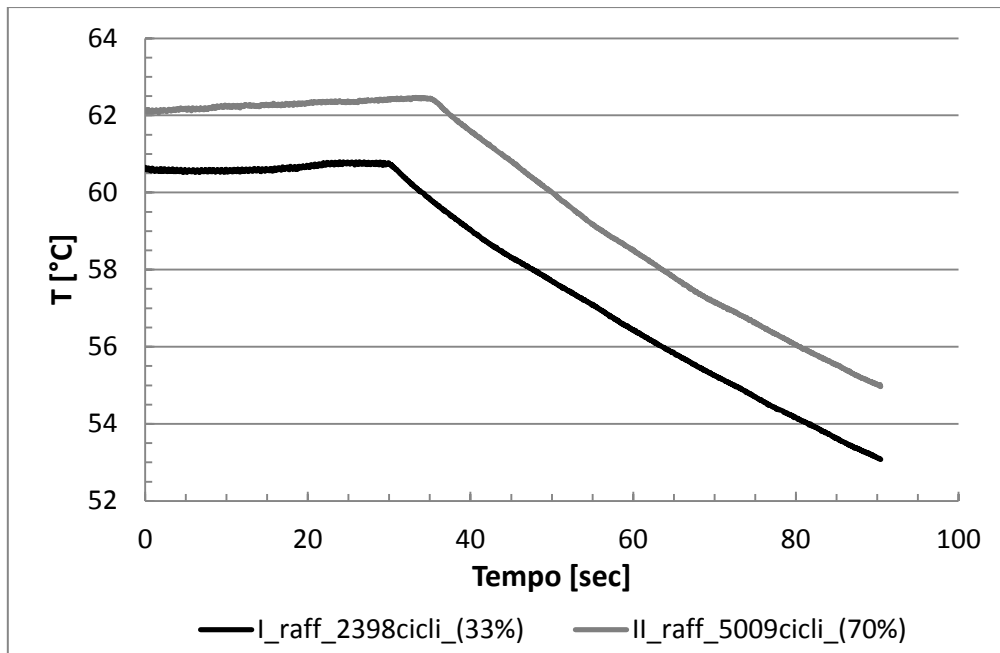


Figura D6.3 Raffreddamenti per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_06

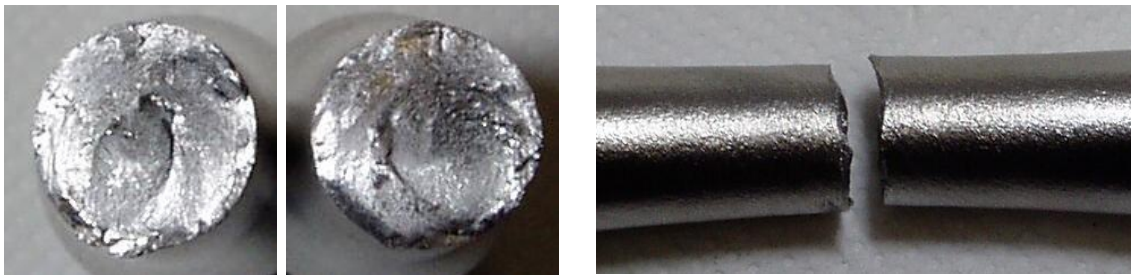


Figura D6.4 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_06

<b>PROVA : Torq_liscio_R0,1_07</b>				
<b>RAPPORTO DI CICLO</b>	R = 0,1			
<b>MATERIALE</b>	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
<b>GEOMETRIA</b>	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
<b>CARICHI APPLICATI</b>	M <sub>MAX</sub> = 441,79Nm	M <sub>MIN</sub> = 44,18 Nm	M <sub>MED</sub> = 242,99Nm	M <sub>a</sub> = 198,8 Nm
<b>TENSIONI APPLICATE</b>	$\tau_{MAX} = 666,67\text{MPa}$	$\tau_{MIN} = 66,67 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 366,67\text{MPa}$	$\tau_a = 300 \text{ MPa}$

<b>Numero di cicli a rottura:</b>	<b>N<sub>f</sub> = 8648 cicli</b>
<b>Q valutato al 50% della vita:</b>	<b>Q<sub>50%</sub> = 290 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	6043	69,9%	22,0	2	0,1468	579,86	289,93

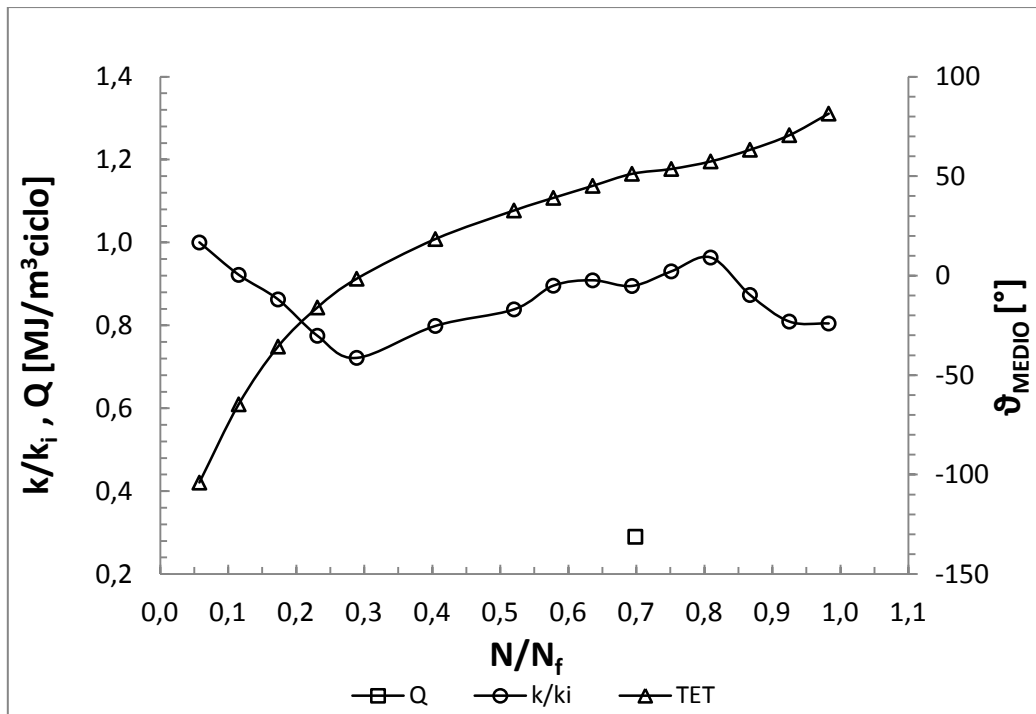


Figura D7.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_07

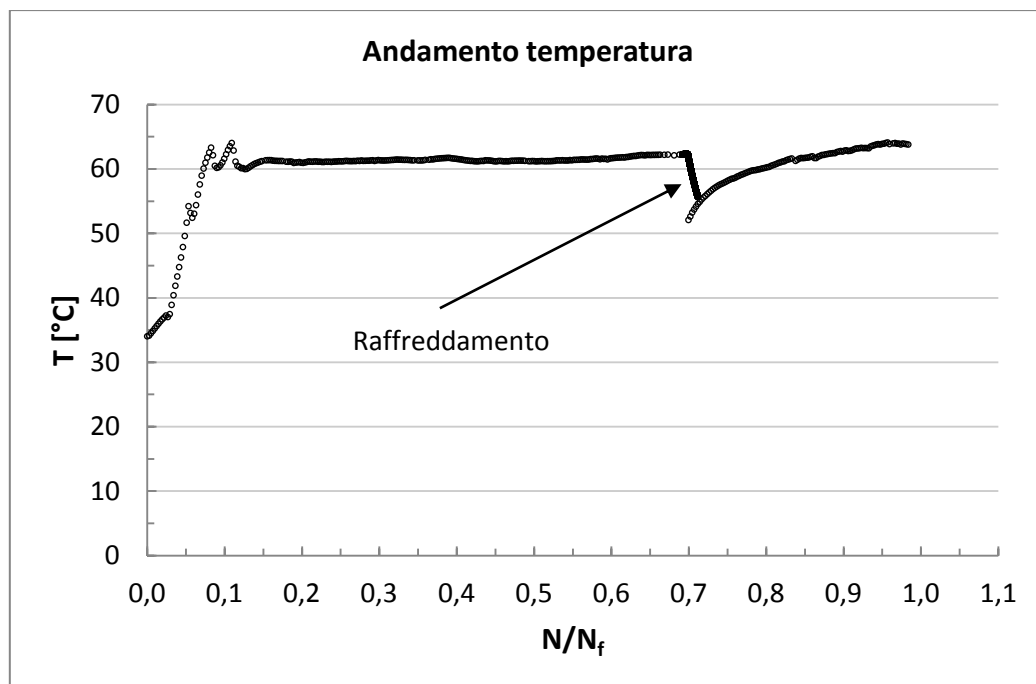


Figura D7.2 Andamento della temperatura durante la prova per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_07



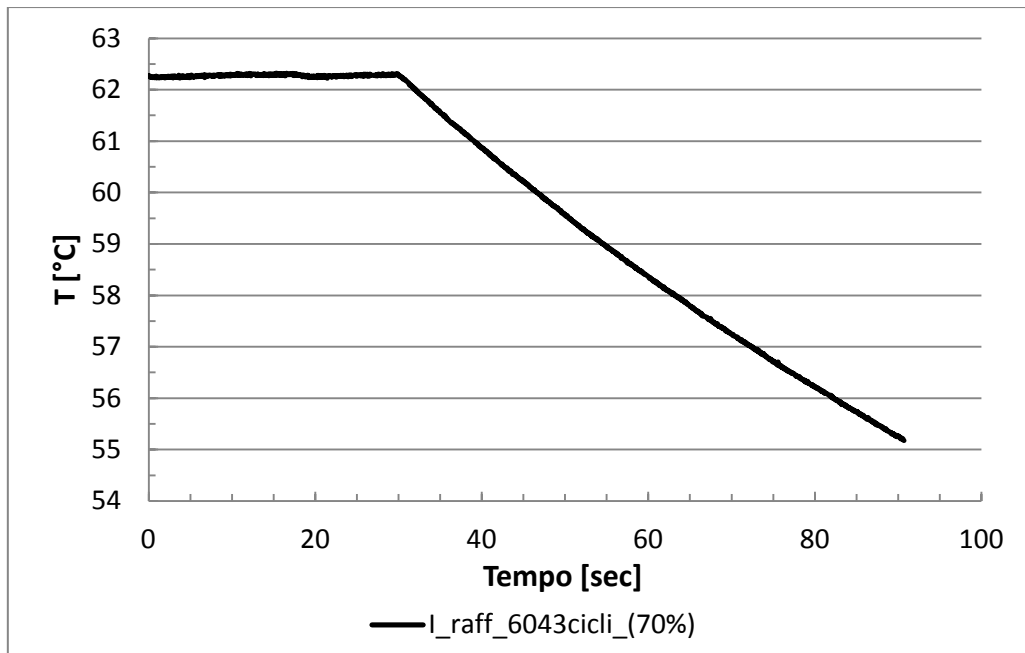


Figura D7.3 Raffreddamento per il provino Torq\_liscio\_R-1\_07

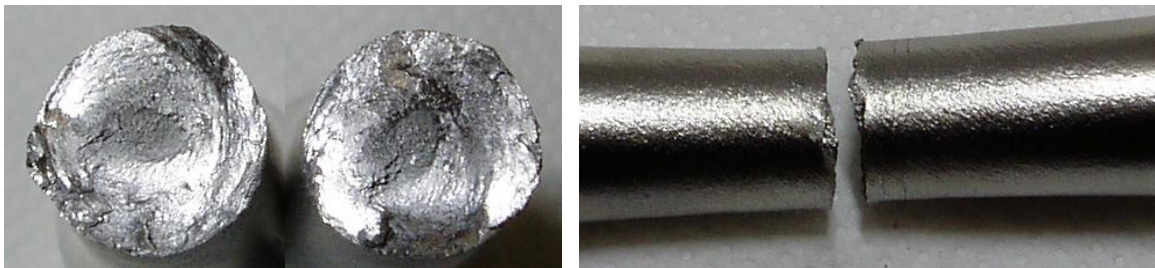


Figura D7.4 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_07

PROVA : Torq_liscio_R0,1_08				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 15,00\text{mm}$	A = 176,71 mm <sup>2</sup>
CARICHI APPLICATI	M <sub>MAX</sub> = 412,3Nm	M <sub>MIN</sub> = 41,23 Nm	M <sub>MED</sub> = 226,8 Nm	M <sub>a</sub> = 185,5 Nm
TENSIONI APPLICATE	$\tau_{MAX} = 622,2\text{MPa}$	$\tau_{MIN} = 62,22 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 342,2 \text{ MPa}$	$\tau_a = 280 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura:	<b>N<sub>f</sub> = 74450 cicli</b>
Q valutato al 50% della vita:	<b>Q<sub>50%</sub> = 208 [kJ/m<sup>3</sup>ciclo]</b>

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m <sup>3</sup> ciclo]	Q [kJ/m <sup>3</sup> ciclo]
1	4491	6,0%	21,0	3	0,1889	746,16	248,72
2	8746	11,7%	21,2	3	0,1589	627,66	209,22
3	17010	22,8%	21,5	3	0,1625	641,88	213,96
4	28546	38,3%	22,0	3	0,1708	674,66	224,89
5	50129	67,3%	22,2	3	0,1451	573,15	191,05

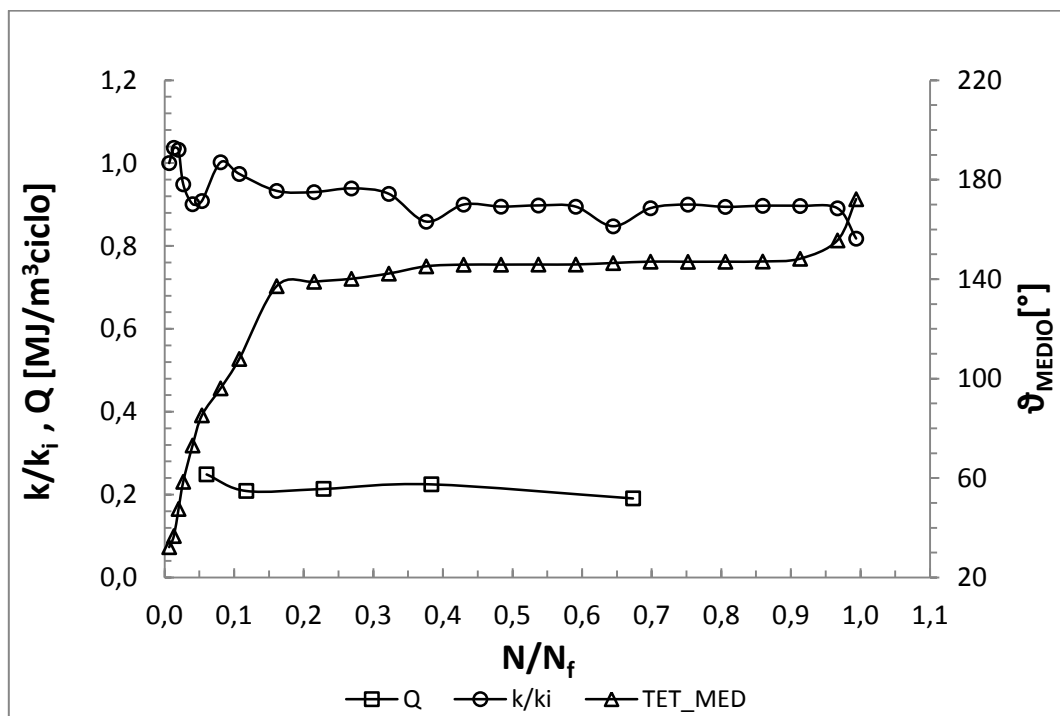


Figura D8.1 Andamento della rigidità relativa, della rotazione media e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_08

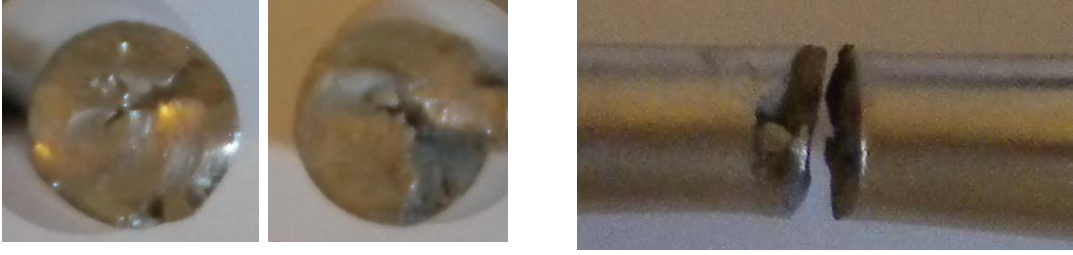


Figura D8.2 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq\_liscio\_R0,1\_08



## BIBLIOGRAFIA

- [1] G.Meneghetti, "Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation", International Journal of Fatigue, 29,81-94, 2007
  
- [2] G.Meneghetti, M.Ricotta, "The use of the specific heat loss to analyse the low- and high- cycle fatigue behaviour of plain and notched specimens made of a stainless steel", Engineering Fracture Mechanics, 2011
  
- [3] G.Meneghetti, M.Ricotta, D.Parolin, B.Atzori, "Sintesi del comportamento a fatica a trazione alterna di un acciaio inossidabile in termini di energia dissipata", AIAS 2012-63
  
- [4] D.Parolin, "Analisi dell'innesco a rottura per fatica e correlazione con l'energia specifica dissipata dal materiale", Tesi di laurea, Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, anno accademico 2011-2012
  
- [5] C.Guadagnin, "Energia dissipata da una ghisa sferoidale austemperata in prove di fatica torsionali", Tesi di laurea, Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, anno accademico 2003-2004
  
- [6] D.Locas, "Analisi della resistenza a fatica di un acciaio inossidabile AISI304L mediante misure di temperatura superficiale", Tesi di laurea, Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, anno accademico 2001-2002
  
- [7] G.Meneghetti, M.Ricotta, M.Bordignon, B.Atzori, "Experimental evaluation of fatigue damage in two-stage loading test based on the energy dissipation" 13th International Conference on Mesomechanics, MESO2011, Vicenza 6-8 July 2011, Italy
  
- [8] Feltner CE, Morrow JD. Microplastic strain hysteresis Energy as a criterion for fatigue fracture. Tran ASME, ser D:J Basic Eng 1961

[9] J.Kaleta, R.Blonty, H.Haring, "Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions" , J Test Eval 1990,19,326-33



Ringrazio il Prof. Giovanni Meneghetti per i consigli, la disponibilità ed il tempo dedicatomi ed il Prof. Mauro Ricotta sempre disponibile ad aiutarmi e seguirmi ad ogni passo del mio lavoro.