

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica

**SVILUPPO DI UN CRITERIO ENERGETICO CON EFFETTO DELLA
TENSIONE MEDIA PER L'ANALISI SPERIMENTALE DELLA VITA A
FATICA DI PROVINI IN ACCIAIO INOSSIDABILE**

Relatore: prof. Giovanni Meneghetti

Correlatori: ing. Mauro Ricotta
prof. Bruno Atzori

Laureando: Giuseppe Sottana
IM 1012757

Anno Accademico 2013/2014

Alla mia famiglia.

INDICE

INDICE	1
Capitolo 1: INTRODUZIONE ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA ATTRAVERSO L'APPROCCIO BASATO SULL'ENERGIA DISSIPATA DAL MATERIALE.....	5
1.1 INTRODUZIONE.....	5
1.2 MODELLI ENERGETICI	7
1.2.1 Modello Feltner-Morrow-Halford (F.M.H.) [12].....	7
1.2.2 Modello Kaleta [13]	8
1.2.3 Modello Meneghetti [1],[6].....	8
1.3 OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO	14
Capitolo 2: DEFINIZIONE E CALCOLO DELLA COSTANTE TERMOELASTICA.....	15
2.1 INTRODUZIONE.....	15
2.2 CENNI STORICI SULL'EFFETTO TERMOELASTICO	15
2.3 TERMOELASTICITÀ E RILIEVO DELLE TENSIONI A "TUTTO CAMPO"	16
2.4 FENOMENI TERMICI ASSOCIATI ALLA DEFORMAZIONE ED ALLO SMORZAMENTO INTERNO NEI SOLIDI REALI [16].....	17
2.5 ANALISI TEORICA DELL'EFFETTO TERMOELASTICO [16]	19
2.5.1 Effetto termoelastico per materiale isotropo [16]	23
2.6 SINTESI DELLE PROVE ESEGUITE PER LA DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE TERMOELASTICA.....	25
2.6.1 Protocollo di prova per la determinazione della costante termoelastica K_m	26
2.7 CONCLUSIONI.....	36
Capitolo 3: VERIFICA DELL'INNESCO E PROPAGAZIONE DELLA CRICCA TRAMITE L'ESAME CON I LIQUIDI PENETRANTI.....	39
3.1 INTRODUZIONE.....	39
3.2 PRINCIPIO DELL'ESAME CON LIQUIDI PENETRANTI.....	39
3.2.1 Proprietà' dei liquidi penetranti.....	40
3.2.2 Proprietà' dei rilevatori.....	40
3.3 CARATTERISTICHE DI IMPIEGO DEI LIQUIDI PENETRANTI.....	42
3.3.1 Asportabilità' dei liquidi penetranti.....	42
3.3.2 Percepibilità' del penetrante.....	42
3.4 CLASSIFICAZIONE DEI LIQUIDI PENETRANTI SULLA BASE DELLA LORO COSTITUZIONE.....	43

3.4.1	Penetranti colorati	43
3.4.2	Penetranti fluorescenti.....	43
3.4.3	Classificazione dei penetranti dal punto di vista della sensibilita' dell'esame ..	44
3.5	TIPI DI RILEVATORI	45
3.6	MODALITA' ESECUTIVE DELL'ESAME CON LIQUIDI PENTRANTI.....	46
3.6.1	Pulizia della superficie.....	46
3.6.2	Applicazione del penetrante	47
3.6.3	Tempo di penetrazione	48
3.6.4	Asportazione del penetrante.....	50
3.6.5	Applicazione del rilevatore.....	51
3.6.6	L'esame dei segnali	52
3.7	SEGNALAZIONE DELLE DISCONTINUITA'	52
3.7.1	Elaborazione dei risultati dell'esame.....	53
3.7.2	Criterio per la valutazione delle discontinuita'.....	53
3.7.3	Interpretazione dei segnali indicativi.....	54
3.8	MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R0.5.....	57
3.9	MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R=0.1	63
3.10	MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R=-1	69
3.11	CONCLUSIONI.....	75
Capitolo 4: VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO.....		77
4.1	PREMESSA	77
4.2	GEOMETRIA DEI PROVINI.....	78
4.3	APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE.....	79
4.3.1	Risultati delle prove assiali a R-1	80
4.3.2	Risultati delle prove assiali a R0,1	81
4.3.3	Risultati delle prove assiali a R0,5	83
4.3.4	Risultati delle prove assiali a R -1,5.....	85
4.3.5	Confronto delle prove a R=-1.5, R=-1, R=0.1 e R=0.5 in termini di ampiezza di tensione	87
4.4	APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA.....	90
4.4.1	Risultati delle prove per rapporti di ciclo R=-1.....	97
4.4.2	Risultati delle prove per rapporti di ciclo R=0.1.....	99

4.4.3	Risultati delle prove per rapporti di ciclo $R=0.5$	101
4.4.4	Risultati delle prove per rapporti di ciclo $R=-1.5$	103
4.4.5	Confronto in termini di $Q-N_f$ fra i differenti rapporti di ciclo.....	105
4.5	INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO.....	106
4.6	CONCLUSIONI.....	115
Capitolo 5: VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI INTAGLIATI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO.....		
5.1	PREMESSA.....	117
5.2	DESCRIZIONE DEI PROVINI.....	118
5.3	ANALISI DELLE TENSIONI PRINCIPALI PER LE DIFFERENTI GEOMETRIE DI INTAGLIO.....	119
5.3.1	Intaglio ad U con raggio di raccordo di 5mm.....	121
5.3.2	Intaglio a V con raggio di raccordo di 3mm.....	126
5.4	APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE.....	132
5.4.1	Risultati delle prove assiali per provini intagliati.....	132
5.4.2	Risultati delle prove per provini con intaglio ad U.....	135
5.4.3	Risultati delle prove per provini con intaglio a V.....	136
5.4.4	Risultati delle prove per provini con intaglio non assialsimmetrico.....	137
5.5	APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA.....	138
5.5.1	Risultati delle prove per provini con intaglio ad U.....	146
5.5.2	Risultati delle prove per provini con intaglio a V.....	152
5.5.3	Risultati delle prove per provini con intaglio non assialsimmetrico.....	158
5.5.4	Confronto fra i risultati delle prove per provini con intaglio ad U e a V.....	161
5.6	CONCLUSIONI.....	161
CONCLUSIONI DEL LAVORO DI TESI.....		
Appendice A: RISULTATI PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=0.5$		175
Appendice B: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=0,1$		196
Appendice C: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1$		206
Appendice D: RISULTATI PROVE TORSIONALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1$		209
Appendice E: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1$ E INTAGLIO AD U.....		220

Appendice F: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1$ E INTAGLIO A V	234
Appendice G: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1$ ED INTAGLIO NON ASSIALSIMMETRICO	253
Appendice H: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-2$	262
Appendice I: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO $R=-1.5$	272
Appendice J: PROCEDURE PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA ASSIALE..	283
Appendice K: PROTOCOLLO DI PROVA A FATICA SU MFL ASSIALE.....	296
Appendice L: APDL PARAMETRICA PER L'ANALISI DELLE TENSIONI SU PROVINI CILINDRICI CON INTAGLIO ASSIALSIMMETRICO	301
BIBLIOGRAFIA.....	302

Capitolo 1: INTRODUZIONE ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA ATTRAVERSO L'APPROCCIO BASATO SULL'ENERGIA DISSIPATA DAL MATERIALE

1.1 INTRODUZIONE

In questo primo capitolo si vogliono brevemente presentare vari modelli, proposti da differenti autori, idealizzati per poter analizzare la resistenza di componenti meccanici sottoposti a cicli di carico di tipo affaticante. In particolar modo, si vuole porre l'attenzione nella descrizione del modello proposto da G. Meneghetti in [1]. Quest'ultimo si pone l'obiettivo di poter stimare la vita di un componente tramite l'energia dissipata dal materiale costituente sottoposto a fatica basandosi sull'equazione del bilancio energetico.

Il danneggiamento che il materiale di un provino subisce durante una prova a fatica, è stato da tempo correlato al manifestarsi dell'incremento della temperatura superficiale [2]. In particolare, in una prova di fatica ad ampiezza di carico crescente, è stato osservato sperimentalmente che un rapido incremento della temperatura superficiale rileva il superamento del limite di fatica a causa dell'inizio di scorrimenti plastici che avvengono a livello microscopico. Questa caratteristica dei materiali metallici è stata utilizzata per definire una procedura sperimentale atta a determinare il limite di fatica di provini e componenti esposta in [3] e, successivamente, è stata estesa alla determinazione della vita a termine in [4]. I metodi, fra cui quello applicato in questo lavoro, sono un'evoluzione delle tecniche termografiche basate sulla temperatura stabilizzata e con tali approcci, vengono utilizzati dei modelli energetici di diversa complessità ed astrazione. Infatti, solo da pochi anni a questa parte [5], è stato evidenziato che la temperatura non è direttamente correlabile con il danneggiamento a fatica, perché dipende non solo dall'ampiezza di tensione applicata ma, anche, dalla frequenza di prova, dalla geometria del provino e dalle condizioni ambientali che influenzano le condizioni di scambio termico fra il provino e l'ambiente. Infatti, la temperatura, si è rivelata un parametro per la stima della vita a fatica difficilmente estendibile a differenti geometrie per il provino e per condizioni di prova diverse da quelle di riferimento.

La naturale evoluzione delle tecniche termografiche basate sulla misura di temperatura superficiale, eseguita a stabilizzazione avvenuta, ha portato a proporre in [1] l'energia dissipata per unità di volume e per ciclo Q come indicatore del danneggiamento a fatica.

L'energia dissipata per unità di volume e per ciclo, infatti, è un parametro molto promettente perché, almeno per gli articoli pubblicati fin ora, risulta indipendente dalle condizioni di prova e, allo stesso tempo, è 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 , una parte ΔU 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.

Infatti, come si è visto nel paragrafo precedente, il bilancio energetico su un generico volume V di materiale sottoposto a un test a fatica coinvolge tre differenti forme di energia: l'energia meccanica W , l'energia convertita in calore Q e l'energia immagazzinata nel materiale ΔU .

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. Questi vari parametri caratteristici nascono da una fonte comune quale il bilancio energetico su un generico volume V di materiale sottoposto a test di fatica esposto nel paragrafo precedente.

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.) [12]

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 σ_{ij} e $d\varepsilon_{ij}$ 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. Queste tipologie di grafici possono essere utilizzati come curva di progetto per stimare la vita a fatica di un componente realizzato nello stesso materiale e soggetto alla stessa tipologia di materiale.

Il limite di tale procedura è che la tensione $\sigma(t)$ in un generico punto non può essere misurata direttamente ma sempre e solo ricavata tramite calcolo o partendo dalle deformazioni. Il fatto che l'energia meccanica W non possa essere direttamente misurata nel punto critico del componente impone che la valutazione dell'indice di danneggiamento sia sempre affetta da limiti di precisione ed affidabilità.

1.2.2 Modello Kaleta [13]

L'autore propose in questo modello che l'energia presa come parametro per la valutazione della vita a fatica sia quella interna immagazzinata dal materiale ΔU . Quest'ultima tipologia di energia è effettivamente responsabile del danneggiamento nel materiale base, tuttavia, ΔU è stata determinata come differenza tra l'energia meccanica spesa W e l'energia convertita in calore Q . Proprio le modalità di calcolo per ottenere ΔU rappresentano il limite di questo metodo che richiede particolare accuratezza nell'esecuzione dei test e nell'analisi dei dati. Quest'ultima osservazione pone l'attenzione sulla grande incertezza di misura affetto da questo modello nello stimare l'energia interna immagazzinata dal materiale ΔU .

1.2.3 Modello Meneghetti [1],[6]

Questo modello verrà utilizzato in questo lavoro e quindi verrà descritto con maggior dettaglio rispetto ai due precedenti.

In questo modello l'autore propone di utilizzare come parametro indice del danneggiamento a fatica quella parte dell'energia meccanica che viene smaltita dal materiale verso l'ambiente circostante sottoforma di calore Q secondo l'equazione (1-1).

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

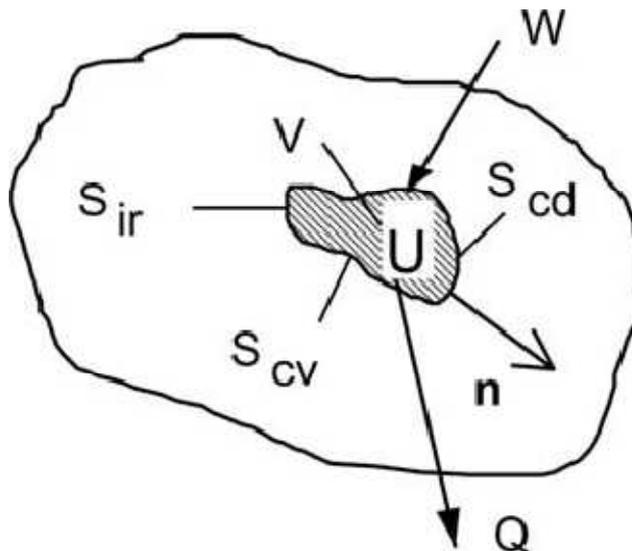


Figura 1.1: Bilancio energetico per un materiale sottoposto a fatica [1]

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 le note modalità di scambio termico: convezione, conduzione e irraggiamento. La relazione generale del primo principio della termodinamica (1-1) può essere riscritta in termini di potenza come riporta l'equazione (1-3) che segue:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_V \left(\oint \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \right) f dV = \\
 &= \int_V -\lambda \nabla^2 T dV + \int_{S_{cv}} \alpha (T - T_\infty) dS_{cv} + \int_{S_{ir}} k \sigma_n (T^4 - T_\infty^4) dS_{ir} \quad (1-3) \\
 &+ \int_V \left(\rho c \frac{\delta T}{\delta t} + \dot{E}_p \right) dV
 \end{aligned}$$

dove λ è la conducibilità termica, α è il coefficiente di convezione, k è l'emissività della superficie, ρ è la densità, c il calore specifico del materiale, T_∞ è la temperatura ambiente, f la frequenza della prova, σ_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 induce all'impilamento di piani di dislocazioni generando delle microcricche a fatica.

Per semplificare la trattazione trattiamo il problema monodimensionalmente ad esempio considerando un provino come quello indicato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

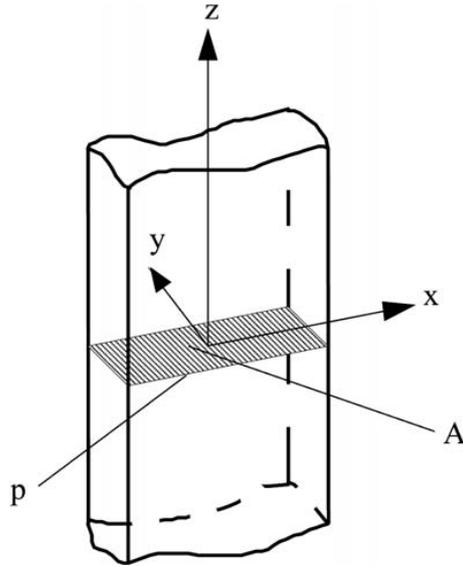


Figura 1.2: Provino con area A e perimetro p [1]

La relazione (1-3) può essere riscritta, in questo caso monodimensionale, come segue:

$$W = -\lambda \nabla^2 T dV + \alpha(T - T_\infty) \frac{p}{A} + \sum_i k_i l_i \frac{\sigma_n}{A} (T^4 - T_\infty^4) + \left(\rho c \frac{\delta T}{\delta t} + \dot{E}_p \right) \quad (1-4)$$

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 (1-4), applicata dopo un intervallo di tempo sufficientemente lungo da permettere alla temperatura del pezzo di stabilizzarsi, può essere ulteriormente semplificata come segue:

$$W = \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = H + \dot{E}_p = (H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}) + \dot{E}_p \quad (1-5)$$

dove il termine H rappresenta la potenza termica dissipata per unità di volume tramite la modalità di scambio termico rispettivamente conduttivo, convettivo e per 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.

Riprendendo dunque dalla relazione (1.1) e, riscrivendola in termini di potenza si ottiene:

$$W f = \left(\rho c \frac{\delta T}{\delta t} + \dot{E}_p \right) + H \quad (1-7)$$

Dopo un certo periodo di tempo dall'applicazione della sollecitazione affaticante 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. Tipicamente, questa temperatura di stabilizzazione è tanto più elevata quanto maggiore è l'ampiezza di tensione applicata[6]. In queste condizioni l'ammontare della potenza termica totale dissipata si può pensare uguale ad un'equivalente potenza termica interna H generata dal materiale e la (1.7) si può semplificare come segue:

$$W f = \dot{E}_p + H \quad (1-8)$$

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

Si supponga ora di fermare bruscamente la prova di fatica all'istante t^* e di poter registrare l'andamento della temperatura in un certo punto. Il risultato della misura sarà del tipo mostrato in Figura 1.3 in cui la temperatura stabilizzata del materiale tende alla temperatura ambiente con un certo gradiente.

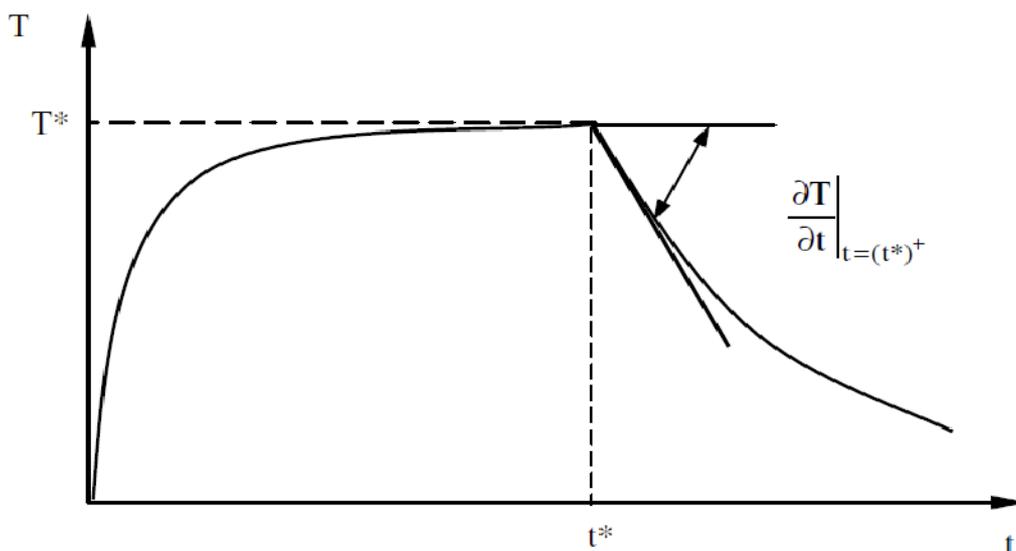


Figura 1.3 Esempio di raffreddamento [1]

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 poiché 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 dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo 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 appieno come procedere dal punto di vista pratico quando si utilizza l'approccio sopracitato viene riportato un elenco di operazioni da fare tratto da [6].

-Avendo a disposizione varie serie di provini e di differente geometria li si sottopongono a prove di fatica a rapporto di ciclo costante e a diverse condizioni di carico.

-Durante l'esecuzione delle singole prove si deve acquisire la temperatura superficiale del provino. Qualora la temperatura si sia stabilizzata, si devono eseguire in vari momenti della

vita del provino dei raffreddamenti interrompendo istantaneamente l'applicazione del carico e continuando a misurare la temperatura.

-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 imposto o per un certo livello di deformazione imposta, un particolare andamento di Q in funzione del numero di cicli eseguiti.

-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. Poiché nella realtà sperimentale il valore di Q non rimane costante durante la prova ma, varia entro un certo intervallo, si sono definite le seguenti regole per la sua determinazione: 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 vita totale 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.

-Una volta ottenuti i valori caratteristici di Q , si riporta in un grafico doppio logaritmico il numero di cicli o alternanze a rottura N_f in termini energetici ($Q-N_f$) e per singolo rapporto di sollecitazione.

-Deve seguire un'analisi statistica ipotizzando un adeguato criterio di distribuzione delle probabilità di sopravvivenza con relativo grado di confidenza. Così facendo ogni curva si presenterà come una retta con pendenza costante che collega alte e basse numero di alternanze e con espressione del tipo:

$$Q^k 2N_f = cost \quad (1-11)$$

Dove $2N_f$ è il numero di delle alternanze a rottura.

Qualora gli andamenti di Q in funzione di N_f per provini lisci e intagliati e per diversi rapporti di sollecitazione collassassero in un'unica curva, si potrebbe definire con certezza che la curva ($Q-N_f$) possa essere interpretato come una curva di progetto per stimare la vita a fatica per un componente fatto con lo stesso acciaio e soggetto alle stesse condizioni di carico.

Il vantaggio maggiore di utilizzare Q come parametro per la valutazione della vita a fatica è di permettere 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 [7], 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 facile estendibilità 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

Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo di continuare il lavoro svoltosi in [8] e [9], allo scopo di poter giungere alla definizione di un criterio energetico con effetto della tensione media per la previsione sperimentale della vita a fatica di componenti in acciaio inossidabile AISI304L trafilato a freddo. Il lavoro si basa su una serie di prove sperimentali nelle quali dei provini di acciaio inossidabile AISI304L sono stati sollecitati con carico affaticante applicato in modo assiale e torsionale rispetto alla geometria assialsimmetrica dei provini. Per la prima modalità di sollecitazione, ossia con applicazione assiale del carico, sono state eseguite prove a diverso rapporto di ciclo, in particolare verranno eseguite prove a fatica assiale a rapporto di ciclo $R=-1$ $R=0,1$ allo scopo di poter infittire le curve ottenute in [9] e validare il metodo energetico proposto da Meneghetti 2007 precedentemente descritto in riferimento ad [1] al variare dell'operatore e delle condizioni ambientali al contorno. Successivamente è stato esplorato l'intero campo delle prove a fatica assiale a rapporto di ciclo $R=0,5$ e $R=-2$ con l'intento di creare un unico grafico che possa sintetizzare tramite il parametro energetico Q [MJ/m³ ciclo] il comportamento del materiale al variare di un'ampia gamma di differenti rapporti di ciclo R .

Tuttavia, i risultati di tutte le prove sono stati 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 [1].

Un ulteriore obiettivo vuole essere la caratterizzazione, per ogni tipo di geometria di provino utilizzata e per ogni rapporto di ciclo applicato, il monitoraggio dell'innesco e della propagazione delle cricche generate dall'applicazione del carico affaticante.

Capitolo 2: DEFINIZIONE E CALCOLO DELLA COSTANTE TERMOELASTICA

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo verrà esposto la procedura di prova e i risultati ottenuti nel calcolo della costante termoelastica K_m . Prima però, si vuole fornire delle nozioni basilari sul concetto della termoelasticità e l'intera trattazione sull'analisi teorica dell'effetto termoelastico tratto da [16].

2.2 CENNI STORICI SULL'EFFETTO TERMOELASTICO

Il fenomeno della variazione di temperatura in un materiale quando è deformato fu notato per la prima volta da Gough nel 1805 che fece alcuni semplici esperimenti utilizzando la gomma indiana. Questi materiali tuttavia si comportano in modo opposto a quello dei metalli. La prima reale osservazione dell'effetto termoelastico sui metalli è attribuibile a Weber nel 1830. Osservando una corda vibrante, Weber notò che la stabilizzazione della frequenza propria sul valore modificato, in conseguenza di un improvviso incremento della tensione di trazione, non era così repentina come si sarebbe aspettato. Egli capì che questo effetto transitorio era causato da una variazione temporanea di temperatura della corda in concomitanza all'aumento di tensione. Tuttavia questo accorgimento non fornì una valida spiegazione dell'effetto osservato e bisognò attendere fino al 1851 perché Lord Kelvin (William Thompson) fornisse una chiara trattazione scientifica dell'effetto termoelastico. Tra i suoi numerosi lavori, egli sviluppò una teoria termodinamica valida per materiali isotropi sottoposti ad un campo di tensione generalizzato. Le variazioni di temperatura da lui teorizzate per un ampio numero di materiali sono state successivamente confermate sperimentalmente da Joule nel 1858 ed a Haga nel 1852. Molto importanti sono in successivi lavori di Zener del 1938, che mostrò l'esistenza di una relazione tra la componente dello smorzamento strutturale e la termoelasticità (il cosiddetto smorzamento termodinamico).

Ulteriori passi avanti sono stati fatti nel 1956 grazie ai lavori di Biot, che analizzò le variazioni di entropia dei materiali deformati.

Dal punto di vista sperimentale il fenomeno ha avuto per molti anni interesse puramente accademico a causa dell'estrema difficoltà nel rilevare le modeste variazioni di temperature associate ai gradienti di tensione normalmente presenti nelle strutture meccaniche. Soltanto negli ultimi decenni, in seguito agli sviluppi della tecnologia delle fotocamere a raggi infrarossi, è stato possibile valutare con precisione tali minime variazioni di temperatura.

2.3 TERMOELASTICITÀ E RILIEVO DELLE TENSIONI A “TUTTO CAMPO”

E' ben noto a tutti che i gas cambino la loro temperatura quando vengono sottoposti a variazione di pressione; è meno noto, invece, che lo stesso fenomeno si verifica anche nei solidi. La maggior parte dei materiali si raffreddano quando vengono sottoposti a tensione positiva, cioè ad un carico di trazione; mentre un carico di compressione produce, nella generalità dei casi, un riscaldamento. Le variazioni di temperatura nei solidi sono però molto più piccole a differenza di quelle ottenibili con i gas a parità di pressione applicata. Nell'acciaio dolce, ad esempio, una veloce rampa di carico in trazione fino al limite dello snervamento produce una diminuzione di temperatura dell'ordine di 0.2°C. Quest'effetto di variazione termica connessa con la tensione applicata nei materiali solidi viene chiamato effetto termoelastico.

L'analisi termoelastica delle tensioni consiste nel rilievo sperimentale dello stato di sollecitazione di una struttura mediante la misura della risposta termica conseguente all'applicazione di un carico in campo elastico. Dal momento che le variazioni di temperatura indotte sono transitorie, a causa dei noti fenomeni di trasmissione del calore, l'analisi della risposta termoelastica delle strutture viene normalmente effettuata in condizioni dinamiche ed in particolare in condizioni di variazione sinusoidale del carico con frequenza sufficientemente elevata da rendere trascurabili gli scambi di calore.

La misura della distribuzione delle temperature viene effettuata senza contatto e viene eseguita su strutture anche di grandi dimensioni e può essere utilizzata in ambienti tecnici (ad esempio ad elevata temperatura). I risultati sono di semplice interpretazione e possono essere facilmente confrontati con i risultati delle analisi numeriche ad elementi finiti.

Uno dei principali svantaggi è sicuramente da individuarsi nel costo elevato; è importante poi ricordare che la struttura va inevitabilmente sottoposta a carico dinamico di tipo sinusoidale e

che è necessario ci sia accesso ottico alla superficie in esame, eventualmente per mezzo di un opportuno specchio. La calibrazione dello strumento, a partire dalle caratteristiche del materiale costituente della struttura, è piuttosto complessa. Essa richiede infatti una conoscenza precisa di dati fisici di non facile reperimento. In molti casi risulta preferibile ricorrere o ad una rosetta estensi metrica incollata sulla struttura o ad un provino, costruito con lo stesso materiale della struttura in esame, sollecitato con tensione nota. E' importante infine controllare gli errori che possono derivare dalle variazioni della temperatura ambiente e dalle variazioni della struttura sollecitata in direzione perpendicolare a quella di visione.

L'interesse per l'analisi termoelastica delle tensioni è cresciuta negli ultimi anni a causa della comparsa sul mercato di sistemi a scansione a raggi infrarossi con risoluzione tale da rilevare con sufficiente precisione la distribuzione delle temperature e di conseguenza lo stato tensionale nel caso di strutture in materiale metallico. In condizioni adiabatiche tali variazioni sono proporzionali alle variazioni locali di volume, le quali sono a loro volta proporzionali al primo invariante delle tensioni (la somma delle tensioni principali). Il rilievo delle tensioni a "tutto campo" rivela la propria utilità nel momento in cui si osserva che le tecniche per il rilievo locale, come ad esempio la tecnica estensimetrica, spesso richiedono la conoscenza preventiva delle zone di concentrazione delle tensioni e delle zone scarsamente sollecitate non sempre note a priori. Negli altri casi la determinazione sperimentale della distribuzione delle tensioni sulla struttura reale sottoposta ai carichi di esercizio fornisce indicazioni fondamentali per il progetto della struttura stessa e per la verifica di eventuali modelli numerici.

2.4 FENOMENI TERMICI ASSOCIATI ALLA DEFORMAZIONE ED ALLO SMORZAMENTO INTERNO NEI SOLIDI REALI [16]

Nei solidi sollecitati da carichi esterni si verificano differenti tipi di processi deformativi. Questi processi deformativi variano secondo:

- la natura del solido sollecitato,
- la struttura microcristallina,
- le sue particolari condizioni fisiche, quali il livello di tensione, la temperatura, la velocità di applicazione del carico.

Molti materiali metallici presentano un comportamento elasto-plastico, con una piccola componente di comportamento viscoelastico. Ad alta temperatura, tuttavia, si verifica

generalmente il fenomeno del creep (scorrimento viscoso). In ogni caso, sia le deformazioni di tipo viscoelastico, sia quelle dovute al creep ad alta temperatura, sono caratterizzate da lentissime velocità di deformazione ed implicano generazione di calore trascurabile. In altri materiali invece, come ad esempio i polimeri, il fenomeno viscoelastico assume importanza decisamente maggiore e, quindi, non trascurabile.

Nei materiali metallici le deformazioni elastiche sono connesse con le variazioni delle distanze interatomiche, senza alcuna modificazione del reticolo cristallino. Le deformazioni plastiche sono, invece, connesse con il movimento e con l'aumento delle dislocazioni, cioè dei difetti del reticolo. Il movimento di una singola dislocazione è impedito da più meccanismi; il superamento di tali impedimenti implica comunque la conversione di energia meccanica in energia termica. Il movimento delle dislocazioni è in genere bloccato in corrispondenza di punti caratteristici come ad esempio l'intersezione con un'altra dislocazione, un'impurità o il bordo di un grano. Le dislocazioni sono in grado comunque di sbloccarsi al raggiungimento di una determinata tensione di soglia ma, tuttavia, il moto viene nuovamente arrestato quando viene incontrato un altro ostacolo. L'irreversibilità della deformazione plastica è connessa con la natura del suo meccanismo microscopico: quando una dislocazione si è mossa in materiale sollecitato, essa non torna indietro quando la tensione viene rimossa, ma l'inversione del moto della dislocazione richiede un'inversione della tensione stessa. Tuttavia, una complessa rete di dislocazioni non è in grado di invertire il suo moto. In conclusione, all'interno di un materiale deformato plasticamente, viene immagazzinata energia di deformazione connessa al microscopico e complesso campo di moto dovuto alla rete delle dislocazioni.

La trattazione teorica dei fenomeni esposti è possibile soltanto mediante un preciso approccio termodinamico al processo deformativo dei solidi. In particolare, è necessario poter valutare le variazioni di entropia fra ogni stato possibile in modo da poter definire i valori locali di energia interna ed energia libera. La definizione dello stato fisico di un elemento volumico solido, avviene mediante variabili macroscopiche come il tensore delle tensioni e la temperatura, e da variabili microscopiche connesse con la sua microstruttura (reticolo cristallino, distribuzione di difetti, rete di dislocazioni, struttura del grano, presenza di precipitati). Molto spesso la descrizione completa dello stato microstrutturale in termini di un numero limitato di variabili non è possibile. La teoria della deformazione dei solidi necessita di prendere in considerazione soltanto le caratteristiche che si modificano con il processo deformativo e non tutte quelle che rimangono invariate. In ogni caso è necessario distinguere tra i processi deformativi i quali implicano deformazioni microstrutturali, che possono essere

descritte da un insieme relativamente piccolo di variabili interne, da quelli per i quali questa descrizione non è possibile. Nel primo caso, ossia quando i processi deformativi implicano deformazioni microstrutturali descrivibili da un insieme piccolo di variabili, è possibile definire in modo preciso lo stato termodinamico del solido mediante un insieme di variabili macroscopiche (esterne) ed interne, mentre nel secondo caso tale definizione non è possibile. Il caso più semplice è quello del solido elastico: in esso la microstruttura non viene alterata e lo stato del sistema è completamente definito mediante variabili macroscopiche; pertanto una teoria termodinamica può essere sviluppata in modo rigoroso.

2.5 ANALISI TEORICA DELL'EFFETTO TERMOELASTICO [16]

Viene di seguito riportata l'intera trattazione teorica dell'effetto termoelastico che conduce alla definizione dell'espressione (2-37) utilizzata in questo lavoro per la determinazione della costante termoelastica.

L'espressione generale dell'equazione termoelastica, nel caso più generale del materiale anisotropo, è stata derivata da Poter e Greaves legando, in condizioni adiabatiche la variazione di temperatura di un solido alle variazioni del suo campo di deformazione.

Il primo principio della termodinamica afferma che:

$$du = \delta w + \delta q \quad (2-1)$$

dove u è l'energia interna del sistema, w il lavoro fatto sul sistema e q è il calore fornito allo stesso. Sono stati utilizzati due simboli diversi d e δ per indicare rispettivamente i differenziali esatti ed inesatti, cioè i differenziali di funzioni che dipendono soltanto dallo stato del sistema (u) e quelli di funzioni dipendenti anche dalla particolare trasformazione seguita dal sistema per passare da uno stato ad un altro come (q,w) . Il lavoro elementare fatto per deformare un'unità di volume di materiale è dato da :

$$\delta w = \{\sigma\}^T \{d\varepsilon\} \quad (2-2)$$

utilizzando i consueti simboli per indicare le tensioni e le deformazioni.

L'equazione (2-1) e l'equazione (2-2) si combinano nella:

$$du = \{\sigma\}^T \{d\varepsilon\} + \delta q \quad (2-3)$$

Se si assume che la trasformazione seguita sia reversibile, il secondo principio della termodinamica stabilisce che

$$dS = \frac{\delta q'}{T} \quad (2-4)$$

dove T è la temperatura assoluta, S è l'entropia massica del sistema misurata in (J/kg) e q' è il calore fornito all'unità di massa. Inserendo la definizione del secondo principio della termodinamica all'equazione dell'energia si ottiene

$$du = \{\sigma\}^T \{d\varepsilon\} + \rho T dS \quad (2-5)$$

E' utile, a questo punto, introdurre anche un'altra funzione di stato: l'energia libera del sistema A:

$$A = u - \rho T S \quad (2-6)$$

Ed il suo differenziale totale che, tenendo conto della conservazione della massa e imponendo la densità costante, assume la forma:

$$dA = du - \rho T dS - \rho S dT \quad (2-7)$$

sostituendo la (2-5) nella (2-7) si ottiene:

$$dA = \{\sigma\}^T \{d\varepsilon\} - \rho S dT \quad (2-8)$$

Inserendo a questo punto la legge costitutiva del materiale, con particolare riferimento al solido perfettamente elastico, si ottiene il seguente noto legame fra il tensore delle tensioni, il tensore delle deformazioni e la temperatura:

$$\{\sigma\} = [C](\{\varepsilon\} - \{\alpha\}\Delta T) \quad (2-9)$$

Dove si è indicato con $\{\alpha\}$ il vettore contenete i coefficienti di dilatazione termica e con $[C]$ la matrice di rigidità. L'equazione sopra riportata è stata scritta nella più familiare notazione vettoriale, ottenuta raccogliendo in colonna le componenti dei tensori; si ricorda tuttavia che la colonna così ottenuta, non rappresenta a rigore una quantità vettoriale, nel senso che le sue componenti non si trasformano a fronte di un cambiamento del sistema di riferimento, con le regole caratteristiche delle componenti vettoriali.

In base all'equazione (2-9) soltanto due fra le variabili $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}$ e T sono indipendenti, pertanto lo stato del sistema può essere identificato utilizzando soltanto T ed $\{\varepsilon\}$. Allora essendo A una funzione di stato, si può scrivere:

$$A = f(\{\varepsilon\}, T) ; dA = \left\{ \frac{\partial A}{\partial \{\varepsilon\}} \right\}^T d\{\varepsilon\} + \frac{\partial A}{\partial T} dT \quad (2-10)$$

Dove si è indicato con la notazione $\left\{\frac{\partial A}{\partial \{\varepsilon\}}\right\}$ un vettore le cui componenti sono pari alle derivate parziali della funzione di stato A rispetto alle componenti del tensore delle deformazioni $\{\partial A / \partial \varepsilon_{xx}, \partial A / \partial \varepsilon_{yy}, \dots\}$. Dal confronto fra (2-10) e (2-8) si ottengono, nel caso particolare di studio, i seguenti valori delle derivate parziali dell'energia libera A :

$$\left(\left\{\frac{\partial A}{\partial \{\varepsilon\}}\right\}\right)^T = \{\sigma\}^T ; \frac{\partial A}{\partial T} = \rho S \quad (2-11)$$

Anche l'entropia S è funzione di stato, e quindi per essa si può scrivere:

$$S = f(\{\varepsilon\}, T) ; dS = \left\{\frac{\partial S}{\partial \{\varepsilon\}}\right\}^T d\{\varepsilon\} + \frac{\partial S}{\partial T} dT \quad (2-12)$$

E quindi tenendo conto della seconda di (2-11):

$$\rho dS = -\left(\left\{\frac{\partial^2 A}{\partial \{\varepsilon\} \partial T}\right\}\right)^T d\{\varepsilon\} - \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} dT \quad (2-13)$$

Il passo successivo consiste nell'eliminazione dei termini in S ed in A nell'equazione precedente; a tal fine è utile derivare rispetto alla temperatura la prima delle (2-11) ottenendo

$$\left(\left\{\frac{\partial^2 A}{\partial T \partial \{\varepsilon\}}\right\}\right)^T = \frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} \quad (2-14)$$

La quale sostituita unitamente alla (2-4) nella (2-13) la si scrive come:

$$\rho \frac{\delta q'}{T} = -\frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} d\{\varepsilon\} - \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} dT \quad (2-15)$$

E' possibile ricavare un'utile espressione della derivata seconda dell'energia libera che compare nell'equazione sopra riportata sostituendo nella stessa equazione i differenziali con l'operatore di derivazione parziale $(\partial / \partial T)_\varepsilon$.

$$\frac{\rho}{T} \left(\frac{\partial q'}{\partial T}\right)_\varepsilon = -\frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} \left(\frac{\partial \{\varepsilon\}}{\partial T}\right)_\varepsilon - \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)_\varepsilon \quad (2-16)$$

Ricordando infatti che la derivazione parziale è effettuata a deformazione costante, come evidenziato dal pedice ε , l'equazione si semplifica nella:

$$\frac{\rho}{T} \left(\frac{\partial q'}{\partial T} \right)_{\varepsilon} = - \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} \quad (2-17)$$

Introducendo poi la capacità termica massica a deformazione costante $C_{\varepsilon} = (\partial q' / \partial T)_{\varepsilon}$ si può scrivere :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = - \frac{\rho C_{\varepsilon}}{T} \quad (2-18)$$

Riprendendo l'equazione (2-15) e sostituendovi l'espressione appena ricavata si ottiene:

$$\rho \frac{\delta q'}{T} = - \frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} d\{\varepsilon\} + \frac{\rho C_{\varepsilon}}{T} dT \quad (2-19)$$

E' inoltre possibile eliminare il vettore delle tensioni nell'equazione appena ricavata utilizzando l'equazione costitutiva del materiale (2-9) derivata rispetto alla temperatura a deformazione costante:

$$\left(\frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} \right)_{\varepsilon} = \left(\frac{\partial [C]}{\partial T} \right)_{\varepsilon} (\{\varepsilon\} - \{\alpha\} \Delta T) - [C] (\{\alpha\} + \Delta T \left(\frac{\partial \{\alpha\}}{\partial T} \right)_{\varepsilon}) \quad (2-20)$$

E quindi omettendo l'indicazione di derivazione a deformazione costante che, è ridondante essendo intrinseca alla definizione stessa di derivazione parziale:

$$\frac{\partial \{\sigma\}^T}{\partial T} = (\{\varepsilon\}^T - \{\alpha\}^T \Delta T) \frac{\partial [C]}{\partial T} - (\{\alpha\}^T + \Delta T \frac{\partial \{\alpha\}^T}{\partial T}) [C] \quad (2-21)$$

La quale introdotta nella (2-19) permette di scrivere:

$$\rho \frac{\delta q'}{T} = - \left[(\{\varepsilon\}^T - \{\alpha\}^T \Delta T) \frac{\partial [C]}{\partial T} - (\{\alpha\}^T + \Delta T \frac{\partial \{\alpha\}^T}{\partial T}) [C] \right] d\{\varepsilon\} + \frac{\rho C_{\varepsilon}}{T} dT \quad (2-22)$$

Ed in condizioni adiabatiche, essendo $\delta q'$ nullo:

$$\frac{\rho C_{\varepsilon}}{T} dT = [(\{\varepsilon\}^T - \{\alpha\}^T \Delta T) \frac{\partial [C]}{\partial T} - (\{\alpha\}^T + \Delta T \frac{\partial \{\alpha\}^T}{\partial T}) [C]] d\{\varepsilon\} \quad (2-23)$$

Essendo infine che la temperatura di riferimento rispetto alla quale è stata scritta l'equazione costitutiva sia la temperatura media del materiale sollecitato sinusoidalmente, allora il ΔT rappresenta l'escursione di temperatura causata dalla deformazione ciclica applicata $\Delta\{\varepsilon\}$ e l'equazione precedente può essere così riscritta:

$$\rho C_{\varepsilon} \frac{\Delta T}{T} = [(\{\varepsilon\}^T - \{\alpha\}^T \Delta T) \frac{\partial [C]}{\partial T} - (\{\alpha\}^T + \Delta T \frac{\partial \{\alpha\}^T}{\partial T}) [C]] \Delta\{\varepsilon\} \quad (2-24)$$

Quest'espressione è la base dell'analisi termoelastica delle tensioni, essa è scritta in forma generale e tiene conto anche delle variazioni delle caratteristiche del materiale con la temperatura e con la direzione.

2.5.1 Effetto termoelastico per materiale isotropo [16]

Nel caso di un materiale isotropo, come è noto, la matrice di rigidità $[C]$ contiene soltanto due parametri indipendenti ed il vettore dei coefficienti di dilatazione termica lineare ne contiene soltanto uno. In particolare, nella matrice di rigidità si inseriscono il modulo di elasticità normale E ed il coefficiente di contrazione trasversale ν . Per quanto riguarda invece le componenti del vettore dei coefficienti di dilatazione lineare, queste sono uguali all'unico parametro indipendente α per quanto riguarda il contributo alle deformazioni normali e a zero per quanto riguarda il contributo agli scorrimenti:

$$\{\alpha\}^T = \{\alpha, \alpha, \alpha, 0, 0, 0\} \quad (2-25)$$

Tenendo poi conto che, per le applicazioni qui considerate, è possibile trascurare le variazioni con la temperatura delle caratteristiche elastiche e dei coefficienti di dilatazione termica nel caso della maggior parte dei materiali:

$$\frac{\partial [C]}{\partial T} = 0; \quad \frac{\partial \{\alpha\}^T}{\partial T} = 0 \quad (2-26)$$

La (2-24) diventa semplicemente:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\Delta T}{T} = -\{\alpha\}^T [C] \Delta\{\varepsilon\} \quad (2-27)$$

Cioè,sviluppando il secondo membro:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(1+\nu), (1+\nu), (1+\nu)\}^T \Delta\{\varepsilon\} \quad (2-28)$$

E quindi:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \frac{E}{(1-2\nu)} (\Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{zz}) = -\alpha \frac{E}{(1-2\nu)} (\Delta I_{1,\varepsilon}) \quad (2-29)$$

E' conveniente riscrivere l'equazione sopra riportata facendo comparire il primo invariante del tensore delle tensioni invece di quello delle deformazioni ricavando la relazione esistente tra di essi sulla base dell'equazione costitutiva (2-9):

$$\Delta I_{1,\varepsilon} = \frac{(1-2\nu)}{E} \Delta I_{1,\sigma} + 3\alpha \Delta T \quad (2-30)$$

Ottenendo:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \Delta I_{1,\sigma} - 3\alpha^2 \frac{E}{(1-2\nu)} (\Delta T) \quad (2-31)$$

Raccogliendo i termini contenenti ΔT è possibile riscrivere l'equazione sopra riportata nel modo seguente:

$$\left(C_\varepsilon + 3 \frac{\alpha^2 T}{\rho} \frac{E}{(1-2\nu)} \right) \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \Delta I_{1,\sigma} \quad (2-32)$$

Se si considera la relazione esistente tra il calore specifico a deformazione costante C_ε quello a tensione costante C_σ le cose si semplificano.

$$\delta q = \rho C_\sigma dT ; \delta q' = C_\sigma dT \quad (2-33)$$

Indicando senza apice la quantità relativa all'unità di volume e con apice quella relativa all'unità di massa

Inserendo l'equazione (2-33) nell'equazione (2-22) e tenendo conto di tutte le ipotesi semplificative adottate nel presente paragrafo si ottiene:

$$\rho \frac{C_\sigma}{T} dT = \frac{E}{(1-2\nu)} \Delta I_{1,\varepsilon} + \frac{\rho C_\varepsilon}{T} dT \quad (2-34)$$

Inserendo il valore del primo invariante delle deformazioni, pari a $3\alpha dT$ dal momento che si sta considerando un caso di sollecitazione costante, si ottiene la seguente relazione che lega il calore specifico a deformazione costante a quello a tensione costante:

$$C_\sigma = 3 \frac{\alpha^2 T}{\rho} \frac{E}{(1-2\nu)} + C_\varepsilon \quad (2-35)$$

Relazione che permette di scrivere semplicemente l'equazione (2-32) come:

$$\rho C_\sigma \frac{\Delta T}{T} = -\alpha \Delta I_{1,\sigma} = -\alpha \Delta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = -\alpha \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2-36)$$

La variazione locale di temperatura è quindi direttamente proporzionale alla variazione del primo invariante $\Delta I_{1,\sigma}$ dello stato puntuale. In conclusione, nel caso del solido omogeneo elastico ed isotropo, trascurando la variazione con la temperatura delle caratteristiche meccaniche e termiche del materiale, è possibile scrivere in forma compatta:

$$\Delta T = -\frac{\alpha T \Delta I_{1,\sigma}}{\rho C_\sigma} = -K_m T \Delta I_{1,\sigma} \quad (2-37)$$

La costante K_m nell'equazione (2-37) è spesso chiamata costante termoelastica del materiale costituente. Si ricorda che il valore di K_m è costante soltanto se sono trascurabili le variazioni con la temperatura di tutte le costanti utilizzate per la caratterizzazione del materiale.

2.6 SINTESI DELLE PROVE ESEGUITE PER LA DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE TERMOELASTICA

La variazione locale di temperatura, come dimostrato nel paragrafo 2.5.1, per un materiale omogeneo elastico ed isotropo, sollecitato in campo lineare elastico, in condizioni di adiabaticità e trascurando la variazione con la temperatura delle caratteristiche meccaniche e termiche del materiale è esprimibile dall'equazione (2-38):

$$\Delta T = -\frac{\alpha T \Delta I_{1,\sigma}}{\rho C_\sigma} = -K_m T \Delta I_{1,\sigma} \quad (2-38)$$

dove ΔT [K] indica la variazione di temperatura del materiale, α [K⁻¹] indica il coefficiente di dilatazione termica, ρ [kg/m³] e C_σ [J/kgK] sono rispettivamente la densità ed il calore specifico a tensione costante del materiale, $\Delta I_{1,\sigma}$ [Pa] la variazione del primo invariante delle tensioni ed, in fine, T [K] è la temperatura del materiale prima dell'applicazione del carico.

Si vuole ora esplicitare l'espressione della costante termoelastica K_m riportata nell'equazione (2-37) come:

$$K_m = \frac{\Delta T}{T \Delta I_{1,\sigma}} \rightarrow \frac{T_{the}}{T_0 \Delta I_{1,\sigma}}; \quad K_m = \frac{\alpha}{\rho C_\sigma} \rightarrow \frac{\alpha}{\rho C_p} \quad (2-39)$$

D'ora innanzi, per facilitare la lettura ed evitare incomprensioni di sorta, si vuole chiamare il calore specifico a tensione costante C_σ più semplicemente con C_p [J/kgK], la variazione di temperatura dovuta all'effetto termoelastico verrà indicata con il simbolo T_{the} anziché ΔT e, la temperatura iniziale (quando la tensione applicata è pari a zero) con il simbolo T_0 anziché T .

La temperatura termoelastica T_{the} corrispondente all'applicazione del carico massimo del ciclo di fatica può essere valutata sperimentalmente sollecitando in campo lineare elastico il provino ed estrapolando la relazione (temperatura - tempo) sincronizzata con la relazione (tensione applicata - tempo) al variare del primo invariante delle tensioni, che nello stato di tensione puramente assiale, coincide con la tensione massima σ_{max} .

Dovendo restare nel tratto lineare della curva σ - ϵ 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 l'intero tratto lineare della curva σ - ϵ valutando anche il tratto in compressione. In questo modo si deve far riferimento, nei calcoli, non più al valore di tensione massima applicata 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 $K_m = \frac{T_{the}}{T_0 \Delta I_{1,\sigma}}$.

La velocità di applicazione del carico dovrà essere sufficientemente elevata da rendere trascurabili gli effetti di scambio termico con l'ambiente al fine di assolvere alle condizioni al contorno di adiabaticità.

Una volta note le condizioni ambientali e, stabilito il valore di: $\frac{\alpha}{\rho c_p} T_0 = \frac{T_{the}}{\Delta I_{1,\sigma}}$ questa ne risulta una caratteristica del materiale, ottenendo così la relazione tra la tensione applicata al materiale e la sua variazione di temperatura che cerchiamo.

2.6.1 Protocollo di prova per la determinazione della costante termoelastica K_m

I provini utilizzati per determinare la costante termoelastica sono ottenuti a partire da barre di acciaio inossidabile AISI 304 L trafilate a freddo e aventi diametro pari a 25 mm e tensione di scostamento dalla proporzionalità di 468 MPa. La geometria dei provini è rappresentata in Figura 2.1 .

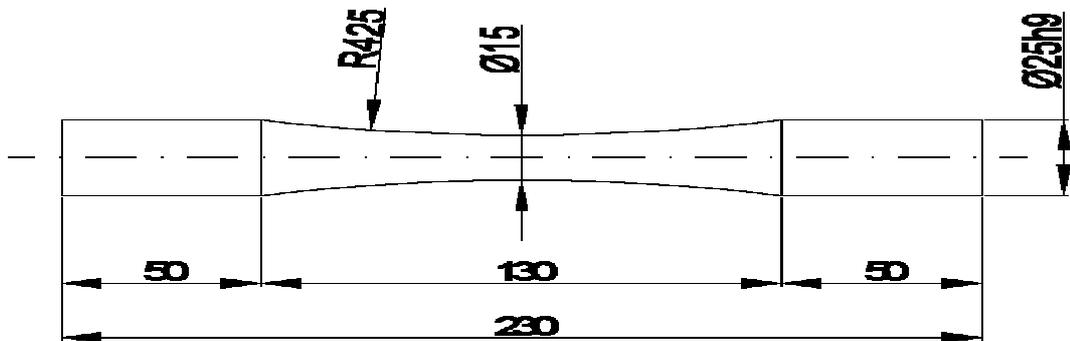


Figura 2.1: geometria dei provini utilizzati per determinare la costante termoelastica

Per determinare il legame tra tensione applicata e variazione di temperatura, per poi ricavare il valore della costante termoelastica K_m , è necessario aver a disposizione una macchina per prove di trazione e un sistema di acquisizione di temperatura a cui si deve collegare la termocoppia incollata nella sezione ristretta del provino.

In tutte le prove eseguite, la temperatura è stata monitorata con termocoppie rame-costantina di diametro pari a 0.127 mm ed un'accuratezza di 0.02° C. Le termocoppie sono state incollate in corrispondenza della sezione ristretta in prossimità della mezzeria del

provino, utilizzando una colla epossidica caricata argento. I segnali di temperatura provenienti dalle termocoppie sono stati acquisiti con una centralina di acquisizione Agilent Technologies HP 34970A, avente una frequenza massima di campionamento dei dati, f_{acq} , di 22 Hz. 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.



Figura 2.2: Schenck Hydropuls PSA 100

Per la misura sperimentale della costante termoelastica K_m , si è utilizzato una macchina servoidraulica Schenck Hydropuls PSA 100 con cella di carico da 100 kN e controllore digitale Trio Sistemi RT3. La forza è stata applicata ai provini imponendo delle rampe di carico lineari in controllo di forza con pendenze differenti (quindi con diverse velocità di applicazione del carico).

La relazione (2-38) è valida, come visto in precedenza, 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.

Le prove di trazione sono state eseguite con segnale di comando a rampa a diverse velocità di applicazione del carico. Il valore di riferimento per la costante $\frac{T_{the}}{\Delta I_{1,\sigma}}$, ricavato utilizzando come coefficiente di dilatazione termica, densità e calore specifico ricavati in letteratura per un acciaio inossidabile è pari a:

$$\frac{\alpha}{\rho C_p} T_0 = 1,26 \times 10^{-09} \left[\frac{K m^3}{J} \right] \quad (2-40)$$

considerando il coefficiente di dilatazione termica $\alpha=1.17 \cdot 10^{-5} [K^{-1}]$, densità $\rho=7940 [kg/m^3]$, il calore specifico $C_p=507 [J/kgK]$ e in fine, $T_0=293.15 K [K]$ è il valore della temperatura del pezzo prima dell'esecuzione delle prove pari alla temperatura ambiente di $20^\circ C$. Proprio l'esecuzione delle diverse prove ha permesso di poter affermare che il valore della

temperatura del pezzo T_0 prima dell'applicazione del carico ha un'influenza trascurabile sul valore della costante quando le prove siano eseguite in condizioni ambientali simili. Per questo motivo, nelle tabelle seguenti il valore di T_0 è costante e uguale a 298.65K.

Si riassumono nella Tabella 2.1 le diverse prove effettuate con un segnale in forza tipo rampa a diverse velocità di applicazione del carico e a parità di livello di tensione pari a 300MPa:

Velocità	n° prova	ΔT [°C]	Tiniziale[K]	$\Delta T/T_{iniziale}$	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta T/\Delta\sigma$ [°C/MPa]
4.98 MPa/s	1	0.3093	298.65	0.0010	299.42	1.03E-09
	2	0.3755	298.65	0.0013	298.99	1.26E-09
0.88kN/s	3	0.4301	298.65	0.0014	297.69	1.44E-09
	4	0.3944	298.65	0.0013	299.78	1.32E-09
19.23 MPa/s	1	0.3524	298.65	0.0012	298.37	1.18E-09
	2	0.3733	298.65	0.0012	300.02	1.24E-09
3.39kN/s	3	0.3630	298.65	0.0012	297.65	1.22E-09
	4	0.3767	298.65	0.0013	298.27	1.26E-09
36.69 MPa/s	1	0.3486	298.65	0.0012	294.06	1.19E-09
	2	0.3386	298.65	0.0011	285.97	1.18E-09
6.48kN/s	3	0.3529	298.65	0.0012	300.54	1.17E-09
	4	0.3289	298.65	0.0011	299.12	1.10E-09
54 MPa/s	1	0.3444	298.65	0.0012	297.19	1.16E-09
	2	0.3334	298.65	0.0011	296.91	1.12E-09
9.54kN/s	3	0.3368	298.65	0.0011	297.49	1.13E-09
	4	0.3339	298.65	0.0011	296.25	1.13E-09
72.83 MPa/s	1	0.3288	298.65	0.0011	299.42	1.10E-09
	2	0.3226	298.65	0.0011	299.42	1.08E-09
12.87kN/s	3	0.3231	298.65	0.0011	297.31	1.09E-09
	4	0.3311	298.65	0.0011	295.55	1.12E-09

Tabella 2.1: Prove eseguite con fascetta per la determinazione sperimentale della costante $\Delta T/\Delta\sigma$

Si descrive nel seguito la procedura utilizzata nell'eseguire le prove:

- 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 prima dell'esecuzione delle prove sarà un'onda quadra in controllo di forza, e la velocità di applicazione del carico;
- Impostare i limiti di spostamento e forza della macchina in funzione del carico applicato;
- Eseguire alcuni cicli di carico per valutare se effettivamente la forza applicata al provino segue in modo regolare il comando di forza;

Qualora si presentino anomalie o overshoot nell'inseguimento del comando di forza aprire la sezione "Tuning" ed modificare i parametri di controllo PID. Nel caso della Schenk Hydropuls

PSA 100 si sono utilizzati i seguenti valori: Proporzionale=1.1, Derivativo=0.2, Integrativo=0.06.

-Una volta che il segnale acquisito dalla cella di carico della macchina insegue in maniera corretta il comando di forza, dal software che controlla la macchina, impostare il tipo di sollecitazione, che ora sarà una rampa in controllo di forza e, la velocità di applicazione del carico;

-Impostare il salvataggio del file.dat che contiene le acquisizioni di tempo, forza e spostamento applicate dalla macchina di trazione durante la prova indicando il numero di prova e la relativa velocità di applicazione del carico in modo da catalogare le varie prove in maniera sistematica. Ad esempio il file 20MPa_s_prova2.dat indica che all'interno ci saranno le acquisizioni riferite alla seconda prova in cui si è applicato una velocità di carico nominale di 20MPa al secondo;

-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;

-Applicare un carico di compressione pari a -150MPa in modalità rampa e, seconda la velocità desiderata, sempre con l'acquisizione di temperatura attiva, attendere che venga eseguita la rampa completa;

-Mantenere il carico di compressione fino a quando il segnale di temperatura si stabilizzi cioè verificando che la temperatura del provino non cresca ulteriormente e, allo stesso tempo, raggiunga l'equilibrio termico con l'ambiente. Quest'ultimo valore della temperatura sarà denominato T_0 e verrà trascritto in una tabella in quanto verrà utilizzato nel seguito;

-Una volta stabilizzato il segnale della temperatura, applicare la rampa di trazione secondo il valore prefissato di velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}$ fino a +150MPa sfruttando al massimo il tratto lineare elastico del materiale;

-Mantenere il carico di trazione fino a quando il segnale di temperatura si stabilizzi cioè verificando che la temperatura del provino non diminuisca ulteriormente e, allo stesso tempo, di non dar modo e tempo al provino di scambiare calore con l'ambiente verificando un incremento della temperatura;

-Una volta stabilizzato il segnale della temperatura, scaricare il provino ossia imporre un carico pari a zero;

-Una volta stabilizzato il segnale della temperatura, fermare l'acquisizione di temperatura e salvare il file.txt con lo stesso nome utilizzato per il file.dat ottenuto tramite la macchina di trazione 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. È dunque immediato costruire il grafico temperatura-tempo che sarà simile al Grafico 2-1.

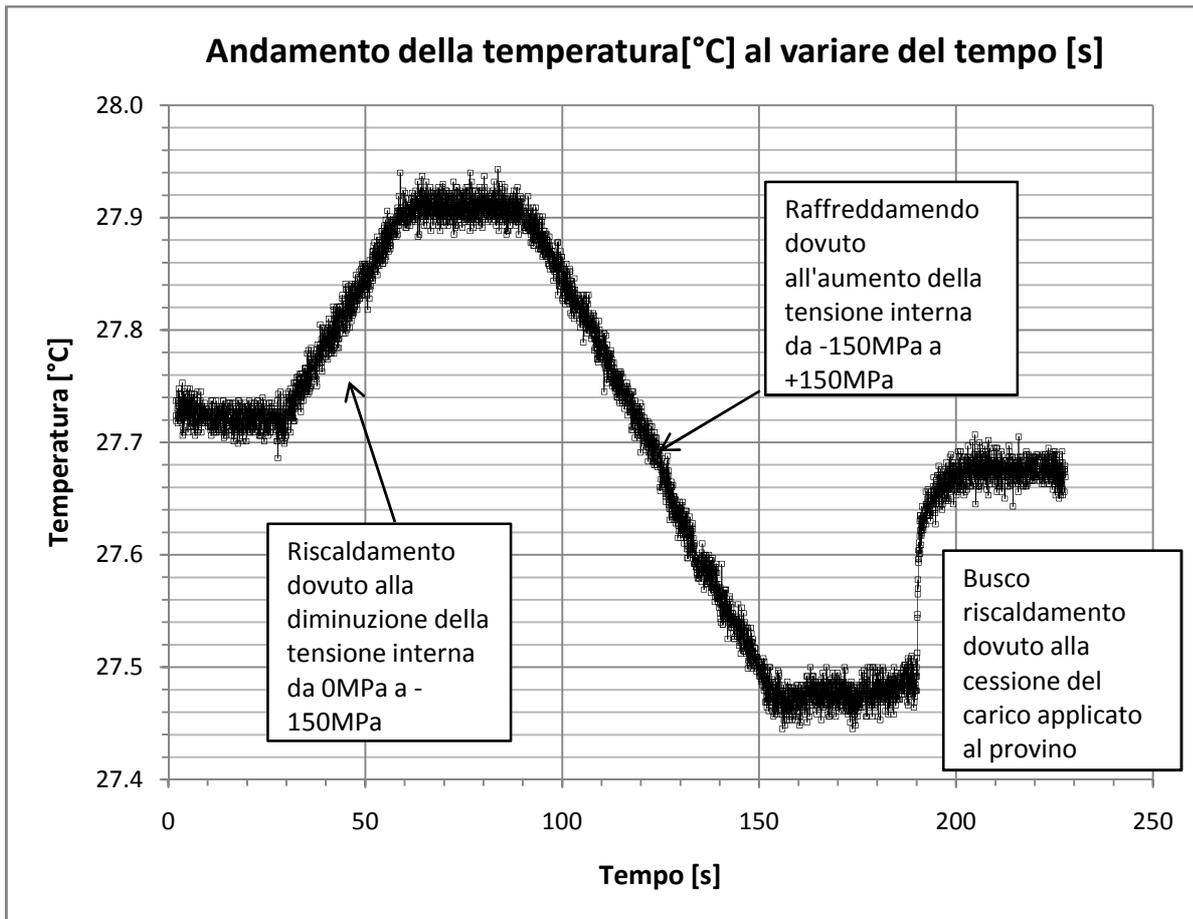


Grafico 2-1: Andamento della temperatura durante una prova a 5MPa/s

-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 edita in una colonna a fianco, partendo dal carico, la tensione applicata in MPa ($\frac{FORZA [N]}{AREA [mm^2]}$) e si costruisce il grafico tensione applicata-tempo che sarà simile al Grafico 2-2.

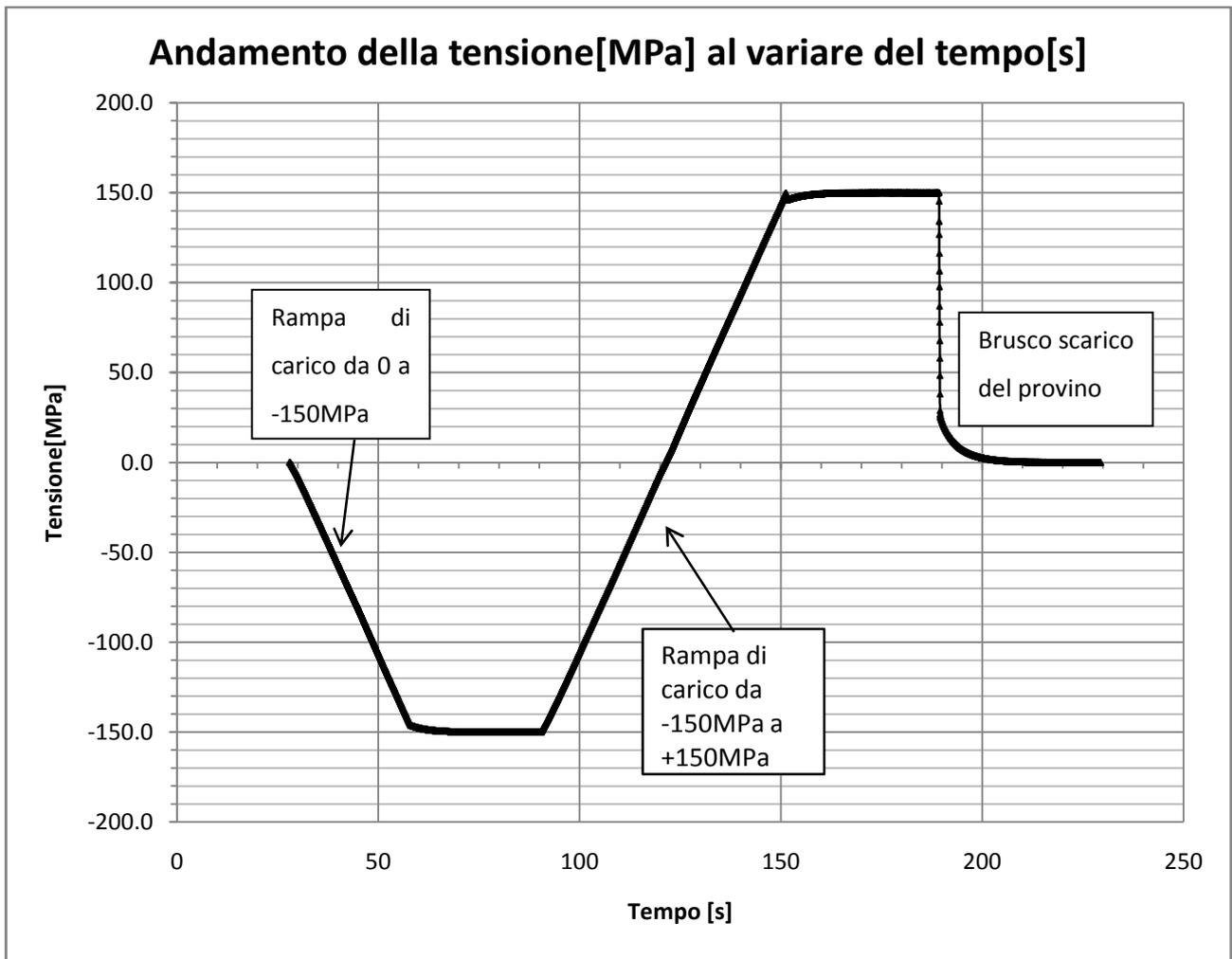


Grafico 2-2: Andamento della tensione applicata durante una prova a 5MPa/s

-Una volta aperti i due file e verificato tramite i grafici che non ci siano anomalie nell'andamento della tensione e della temperatura, si deve procedere alla sincronizzazione delle acquisizioni di temperatura e tensione. Copiare, quindi, le acquisizioni della temperatura (tempo - temperatura) nel file delle acquisizioni delle tensioni (tempo - forza). Importare nel grafico (tensione - tempo) anche la curva (temperatura - tempo). Per ottenere la corretta relazione tra variazione della tensione e quella di temperatura, partendo dal grafico temperatura-tempo si incrementano o si diminuiscono i valori temporali delle acquisizioni della temperatura come riportato nel Grafico 2-3.

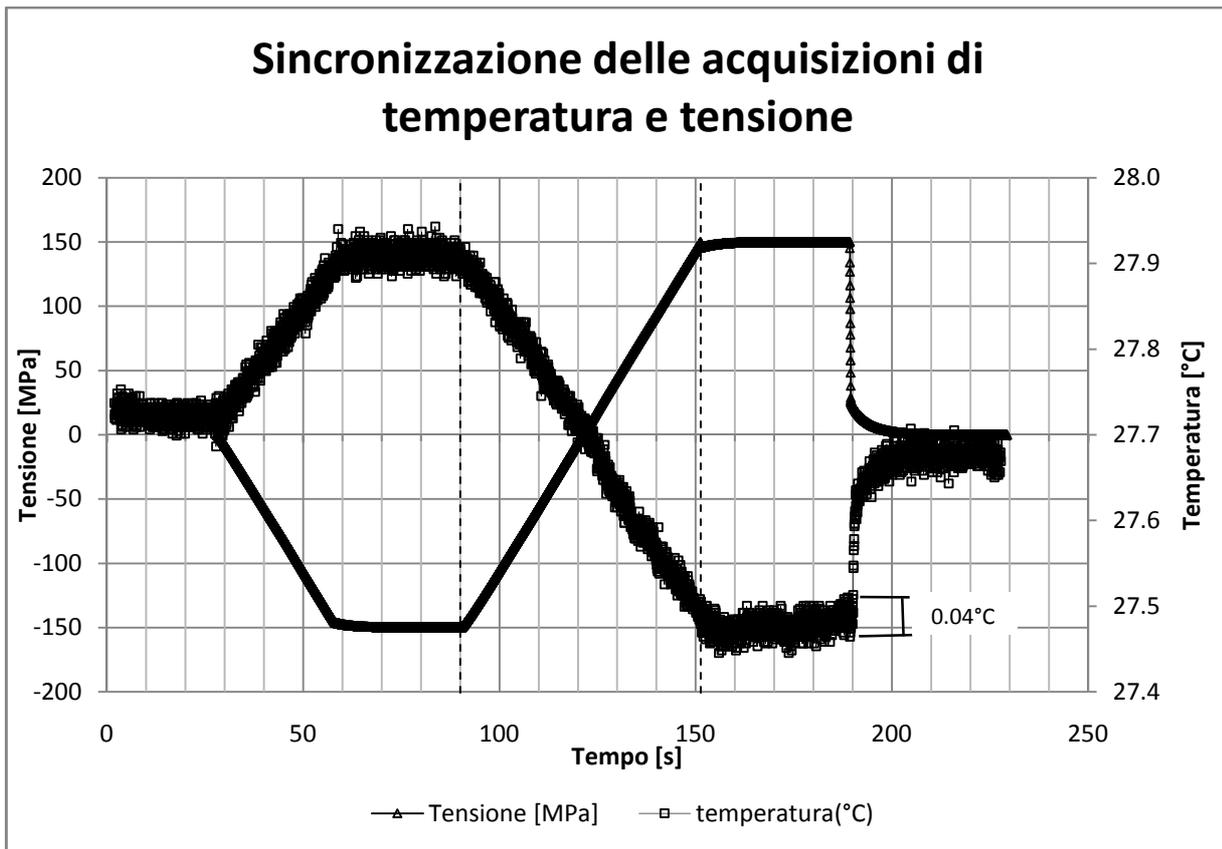


Grafico 2-3: Andamento della tensione e della temperatura al variare del tempo

-In questo modo si sono sincronizzati i due grafici ed è ora possibile valutare nello stesso intervallo di tempo Δt sia la variazione di temperatura ΔT , ossia T_{the} , che la variazione effettiva di tensione $\Delta\sigma$.

-Una volta determinate le variabili T_0 [K], T_{the} [K], $\Delta\sigma$ [Pa], si procede al calcolo di T_{the}/T_0 , $T_{the}/\Delta\sigma$ [°C/Pa] per ogni singola prova. Successivamente si calcola il valore medio ottenuto dalle quattro prove per la singola velocità di applicazione del carico come riportato Tabella 2.2 .

-In prima analisi si è eseguito un grafico per valutare l'andamento $T_{the}/\Delta\sigma$ [°C/Pa] al variare della velocità applicazione del carico.

-Successivamente si è calcolato il valore della costante termoelastica per ogni singola prova al variare della velocità con cui si è applicato il carico come riportato in Tabella 2.3 e quindi si è valutato il valore medio per ogni velocità di applicazione del carico.

-In fine si è eseguito un grafico per valutare l'andamento della costante termoelastica K_m [1/Pa] al variare della velocità di applicazione del carico.

Rampa carico [MPa/s]	n° prova	T _{the} [°C]	T ₀ [K]	T _{the} /T ₀	Δσ [MPa]	T _{the} /Δσ [°C/Pa]	MEDIA T _{the} /Δσ [°C/Pa]
4.98 MPa/s	1	0.3093	299.66	0.0010	299.42	1.03E-09	1.26E-09
	2	0.3755	300.94	0.0012	298.99	1.26E-09	
	3	0.4301	301.07	0.0014	297.69	1.44E-09	
	4	0.3944	301.06	0.0013	299.78	1.32E-09	
19.23 MPa/s	1	0.3524	300.07	0.0012	298.37	1.18E-09	1.23E-09
	2	0.3733	300.11	0.0012	300.02	1.24E-09	
	3	0.3630	301.12	0.0012	297.65	1.22E-09	
	4	0.3767	301.08	0.0013	298.27	1.26E-09	
36.69 MPa/s	1	0.3486	300.22	0.0012	294.06	1.19E-09	1.16E-09
	2	0.3386	300.99	0.0011	285.97	1.18E-09	
	3	0.3529	300.90	0.0012	300.54	1.17E-09	
	4	0.3289	300.96	0.0011	299.12	1.10E-09	
54 MPa/s	1	0.3444	301.11	0.0011	297.19	1.16E-09	1.14E-09
	2	0.3334	301.21	0.0011	296.91	1.12E-09	
	3	0.3368	301.16	0.0011	297.49	1.13E-09	
	4	0.3339	300.96	0.0011	296.25	1.13E-09	
72.83 MPa/s	1	0.3288	300.12	0.0011	299.42	1.10E-09	1.10E-09
	2	0.3226	300.02	0.0011	299.42	1.08E-09	
	3	0.3231	300.09	0.0011	297.31	1.09E-09	
	4	0.3311	301.03	0.0011	295.55	1.12E-09	

Tabella 2.2: sintesi dei dati ottenuti per le singole prove

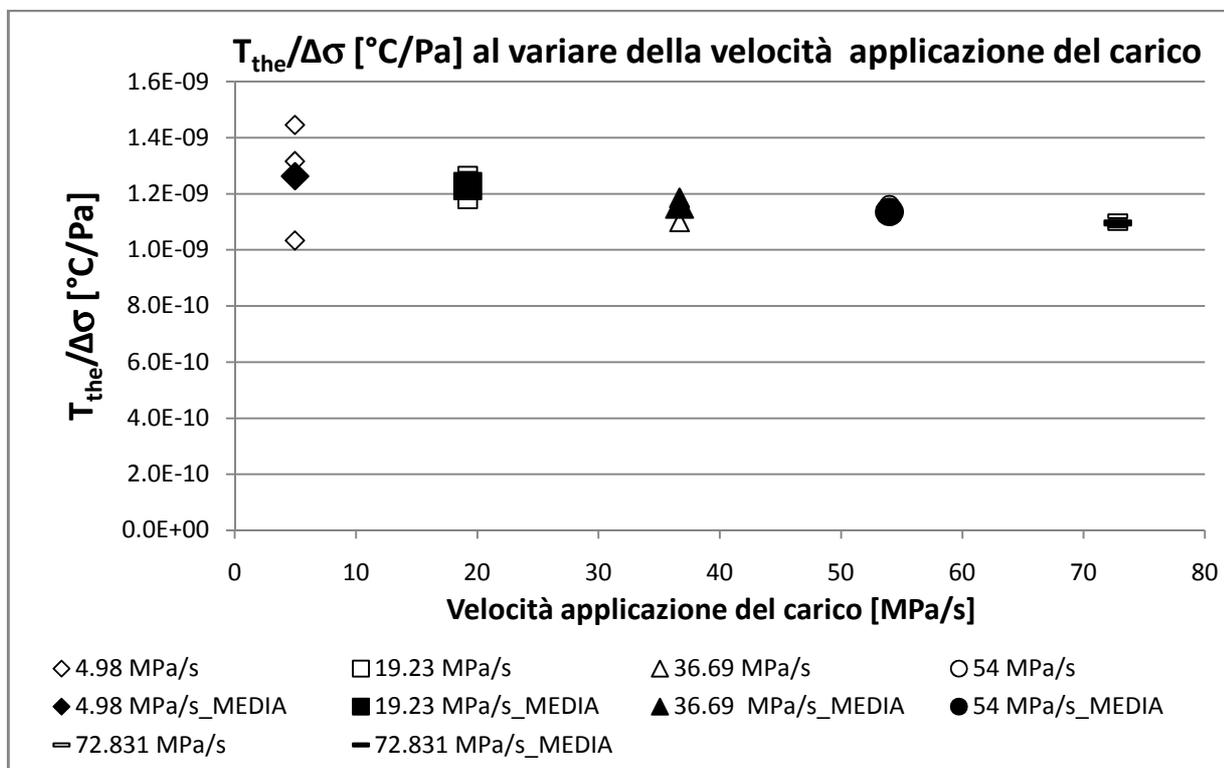


Grafico 2-4 : T_{the}/Δσ [°C/Pa] al variare della velocità applicazione del carico

Velocità [MPa/s]	n° prova	$(T_{the}/T_0)/\Delta\sigma$ [1/Pa]	MEDIA $(T_{the}/T_0)/\Delta\sigma$ [1/Pa]
4.98 MPa/s	1	3.45E-12	4.20E-12
	2	4.17E-12	
	3	4.80E-12	
	4	4.37E-12	
19.23 MPa/s	1	3.94E-12	4.08E-12
	2	4.15E-12	
	3	4.05E-12	
	4	4.19E-12	
36.69 MPa/s	1	3.95E-12	3.86E-12
	2	3.93E-12	
	3	3.90E-12	
	4	3.65E-12	
54 MPa/s	1	3.85E-12	3.77E-12
	2	3.73E-12	
	3	3.76E-12	
	4	3.74E-12	
72.83 MPa/s	1	3.66E-12	3.65E-12
	2	3.59E-12	
	3	3.62E-12	
	4	3.72E-12	

Tabella 2.3: Valori della costante termoelastica K_m

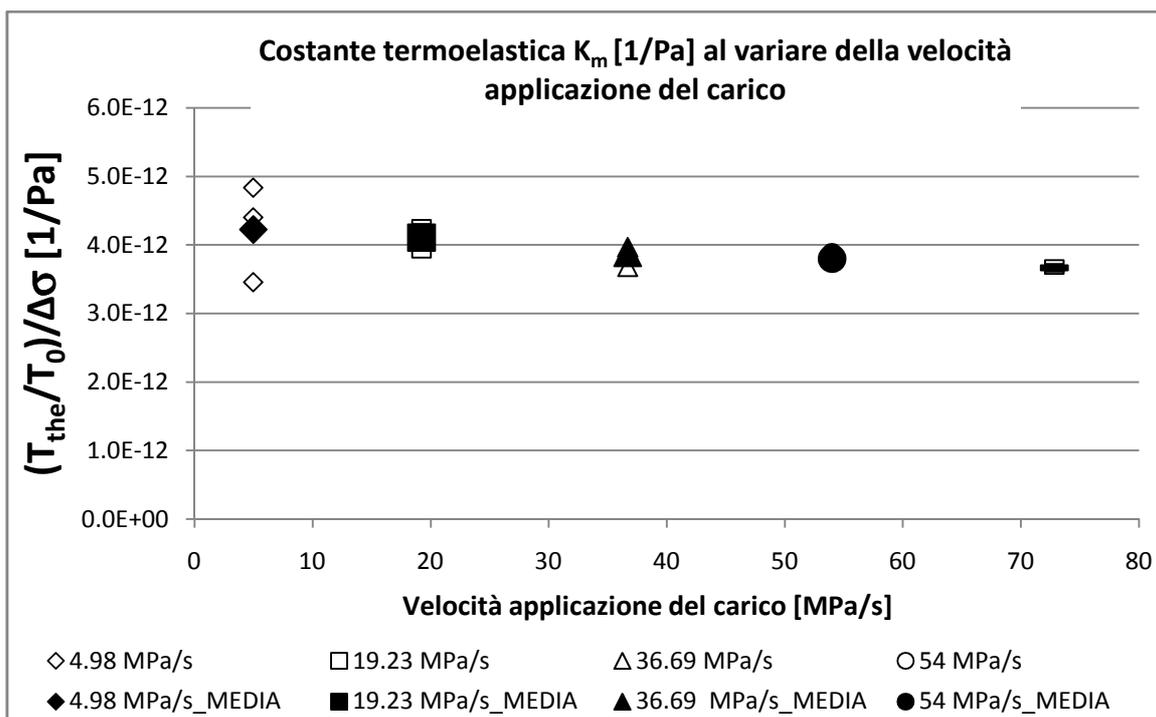


Grafico 2-5: Costante termoelastica K_m [1/Pa] al variare della velocità applicazione del carico

Il **Grafico 2-1** riporta i valori della costante termoelastica K_m misurati in tutte le prove eseguite a differente velocità di applicazione del carico. Si può osservare che, all'aumentare della velocità di applicazione del carico, diminuisce la dispersione dei dati attorno al valor medio e che variando la $\dot{\sigma}$ di un fattore circa 2 (da 37 a 73 MPa/s) il valor medio di K_m diminuisce del 5.4% (da $3.86 \cdot 10^{-12}$ a $3.65 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹). Da un punto di vista ingegneristico si può quindi concludere che, per le condizioni di prova e per il materiale qui analizzati, le condizioni di adiabaticità in una prova statica di trazione possono essere raggiunte con velocità di applicazione della tensione $\dot{\sigma} \geq 37$ MPa/s.

La norma UNI EN 10002 [17], del gennaio 1992, che definisce il metodo nell'eseguire la prova di trazione a temperatura ambiente, afferma che la velocità di incremento del carico segue le proprietà del materiale da caratterizzare. In particolare, la velocità di applicazione del carico e di deformazione influenzano:

- Il carico massimo, che tende ad aumentare all'aumentare della velocità di deformazione;
- Il limite di snervamento, che ad alte velocità di deformazione tende ad aumentare ma può addirittura scomparire.

La norma UNI EN 10002 [17] stabilisce la velocità di applicazione del carico che risulta differente in funzione del modulo elastico del materiale da testare come illustrato nella Figura 2.3 in particolare: fra 2 e 20 MPa s⁻¹ se $E < 150$ GPa; fra 6 e 60 MPa s⁻¹ se $E > 150$ GPa.

Prospetto III — Velocità di incremento del carico		
Modulo di elasticità del materiale N/mm ²	Velocità di incremento del carico N/mm ² × s ⁻¹	
	min.	max.
< 150 000	2	10
≥ 150 000	6	30

Figura 2.3: velocità di incremento del carico secondo UNI EN 10002[17]

Negli elaborati precedentemente svolti, in particolare in [9], si sono valutate le caratteristiche meccaniche dell'acciaio AISI 304L (fornito da Acciaierie Valbruna S.p.A. in barre cilindriche trafilate a freddo di diametro $\varnothing = 25$ mm h9 e lunghezza 3 metri) testato in queste prove sono riportate nella Tabella 2.4 :

E [MPa]	$\sigma_{p0,2}$ [MPa]	σ_R [MPa]
192192	450	683

Tabella 2.4: Caratteristiche meccaniche ricavate dalle prove di trazione statica[9]

Essendo il valore del modulo elastico superiore a 150GPa, le condizioni di adiabaticità sono garantite adottando una velocità di applicazione del carico leggermente superiore a quelle in uso in una comune prova di trazione. Questo vuol dire che, nell'esecuzione di prove a fatica con comuni attrezzature, si può garantire l'adiabaticità nella conduzione della prova.

Il valore di K_m che è utilizzato in tutte le prove riportate in questo elaborato è stato considerato pari alle media dei valori ottenuti per le seguenti velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}=37, 54$ e 73 MPa/s e risulta pari quindi a $3.76 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹. Stimando il valore di K_m da [16] con $\alpha=16 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ si ottiene $3.97 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹, in buon accordo con il valore sperimentale.

2.7 CONCLUSIONI

Le varie prove per la determinazione della costante termoelastica K_m sono state eseguite con rampe di carico a diverse velocità al fine di valutare il valore minimo della velocità di applicazione della tensione $\dot{\sigma}$ da imporre per garantire condizioni di prova adiabatiche. In particolare, le prove sono state eseguite con le seguenti velocità di applicazione del carico: $\dot{\sigma} = 5; 19; 37; 54$ e 73 MPa/s. Tutte le prove sono state eseguite applicando al provino una tensione di compressione pari a -150 MPa e successivamente è stata implementata una rampa di carico fino a $+150$ MPa. Il valore di tensione di 150 MPa è stato scelto con il fine di restare all'interno del campo di comportamento lineare elastico del materiale. Per ciascuna velocità impostata sono state eseguite quattro prove da cui si è valutato il valor medio per la costante termoelastica K_m .

Il Grafico 2-5 riporta i valori di K_m misurati in tutte le prove statiche eseguite a differenti velocità di applicazione del carico. Si può osservare che, all'aumentare della velocità di applicazione del carico, diminuisce la dispersione dei dati attorno al valor medio e che variando la velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}$ di un fattore circa 2 (da 37 a 73 MPa/s) il valor medio di K_m diminuisce del 5.4% (da $3.86 \cdot 10^{-12}$ a $3.65 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹). Da un punto di vista ingegneristico si può quindi concludere che, per le condizioni di prova e per il materiale qui analizzati, le condizioni di adiabaticità in una prova statica di trazione possono essere raggiunte con velocità di applicazione della tensione $\dot{\sigma} \geq 37$ MPa/s. Il valore di K_m che sarà di seguito utilizzato è stato considerato pari alle media dei valori ottenuti per velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}=37, 54$ e 73 MPa/s e pari quindi a $3.76 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹. Stimando il valore

di K_m da [16] con $\alpha=16\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ si ottiene $3.97\cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, in buon accordo con il valore sperimentale.

Inoltre, dato che la norma UNI EN 10002 [17] impone per il materiale qui testato velocità di carico pari a 30MPa/s nell'eseguire prove di trazione, le condizioni di adiabaticità sono garantite adottando una velocità di applicazione del carico leggermente superiore a quelle in uso in una comune prova di trazione. Questo vuol dire che, nell'esecuzione di prove a fatica con comuni attrezzature, si può garantire con semplicità l'adiabaticità nella conduzione della prova.



Capitolo 3: VERIFICA DELL'INNESCO E PROPAGAZIONE DELLA CRICCA TRAMITE L'ESAME CON I LIQUIDI PENETRANTI

3.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si vuole fornire al lettore una visione d'insieme dell'esame tramite l'ausilio dei liquidi penetranti con le relative specificità. Segue la procedura dettagliata utilizzata in laboratorio per monitorare l'inesco e l'eventuale propagazione della cricca. In fine sono riportati i risultati ottenuti nella determinazione dell'inesco della cricca in relazione alle curve di Wohler espresse sia in termini di ampiezza di tensione σ_a , sia in termini di energia dissipata per unità di volume e per ciclo Q al fine di poter dare un'indicazione su quanto e in che modo si devono traslare le curve per passare dal numero di cicli a rottura al numero di cicli ad innesco di una cricca di lunghezza 1mm.

3.2 PRINCIPIO DELL'ESAME CON LIQUIDI PENETRANTI

L'esame con i liquidi penetranti consente il rilevamento delle discontinuità sfocianti alla superficie del pezzo da esaminare e viene attuato in due tempi distinti.

Nel primo tempo viene impiegato un liquido chiamato penetrante, applicato alla superficie del pezzo da esaminare, in modo tale che il penetrante si insinui nelle discontinuità sfocianti alla superficie del pezzo.

In un secondo tempo viene applicato alla superficie del pezzo uno strato di una sostanza chiamata rilevatore. Il rilevatore assorbe il penetrante dalla discontinuità creando un segnale che informa sulla discontinuità sottostante.

Il principio descritto viene riprodotto nei vari metodi di esame con liquidi penetranti, ciascuno adatto per il rilevamento di discontinuità di particolari caratteristiche. I vari metodi si differenziano in base alle proprietà dei materiali utilizzati, soprattutto del penetrante. Risultano così rilevabili sia le discontinuità strette e profonde, sia quelle larghe e poco profonde, una volta adottati i materiali idonei.

L'esame con liquidi penetranti può essere utilizzato su tutti i materiali (compresi quelli non metallici). L'unica limitazione è data dai pezzi da verificare che presentino superfici di natura porosa (es. ghisa) per i quali il metodo non consente un esame attendibile.

Un'altra limitazione del metodo, per quanto ovvia, riguarda la posizione delle discontinuità, che per essere rilevate debbono sfociare (almeno in parte) alla superficie.

3.2.1 Proprieta' dei liquidi penetranti

Per garantire il rilevamento di una discontinuità, il penetrante deve innanzitutto assicurare la sua inserzione nella discontinuità stessa, anche nel caso che si tratti di una fenditura molto sottile. Questa capacità dipende dalla proprietà chiamata capillarità. L'azione capillare manifestata da un liquido dipende da certe proprietà fisiche del liquido stesso. Queste proprietà sono:

a) la tensione superficiale;

b) la capacità del liquido di bagnare una superficie solida (bagnatura);

c) la viscosità.

-La tensione superficiale è un'azione che si manifesta alla superficie di un liquido. Una goccia di un liquido sotto l'effetto della tensione superficiale tende a mantenere la forma sferica.

-La bagnatura si manifesta con la capacità di un liquido di spandersi sulla superficie di appoggio anziché mantenere la forma sferica. Tensione superficiale e bagnatura agiscono quindi in senso opposto. Se prevale tensione superficiale il liquido non bagna la superficie di appoggio; se invece prevale la bagnatura, il liquido bagna la superficie di appoggio.

-La viscosità è una manifestazione di resistenza da parte di un liquido a scorrere su di una superficie. Maggiore è la viscosità, più lento risulta il movimento.

La capillarità di un liquido e quindi, la sua attitudine a penetrare in fenditure sottili, è legata ad un adeguato valore della tensione superficiale, della bagnatura e della viscosità.

3.2.2 Proprieta' dei rilevatori

I rilevatori debbono innanzitutto favorire l'assorbimento del penetrante trattenuto nelle discontinuità. Questo assorbimento è ancora il risultato dell'azione capillare del liquido penetrante.

Il rilevatore deve favorire l'azione di assorbimento, realizzando uno strato in cui siano presenti condotti di piccolissima sezione. Questa situazione è realizzata con uno strato di particelle piccolissime di sostanze a base di talco, gesso o silice amorfa, che creano appunto

una rete fittissima di piccoli canalini entro cui può inserirsi il penetrante sotto l'effetto della capillarità.

In secondo luogo il rilevatore deve favorire la percepibilità del segnale, favorendo la sua dilatazione ed eventualmente, creare un contrasto che esalta l'apparizione del segnale stesso.

Infine, il rilevatore deve livellare le eventuali asperità superficiali del pezzo.

3.3 CARATTERISTICHE DI IMPIEGO DEI LIQUIDI PENETRANTI

I liquidi penetranti debbono possedere le seguenti caratteristiche:

- essere asportabili dalla superficie del pezzo in esame;
- essere percepibili dopo il loro assorbimento nel rilevatore, in modo che vengano segnalate le discontinuità sottostanti.

3.3.1 Asportabilità dei liquidi penetranti

I liquidi penetranti sono prodotti a base di petrolio e pertanto non possono essere asportati agendo direttamente con l'acqua. La loro asportazione dalla superficie del pezzo richiede una delle seguenti circostanze:

- uso di un solvente, capace di sciogliere il penetrante;
- l'emulsificazione del penetrante, che consiste nella frantumazione del liquido in minutissime goccioline sotto l'azione dell'acqua. Quest'ultimo può così trascinare via il penetrante. L'emulsificazione è ottenuta aggiungendo al penetrante una sostanza chiamata agente emulsificante.

3.3.2 Percepibilità del penetrante

La visibilità di un penetrante è ottenuta creando le condizioni di massimo contrasto con il sottofondo su cui comparare il segnale dopo l'assorbimento del penetrante nel rilevatore. Questo risultato è ottenuto in due modi:

- aggiungendo al penetrante un pigmento capace di imprimere una intensa colorazione rossa, che contrasta con il sottofondo del rilevatore di colore bianco;
- aggiungendo al penetrante una sostanza fluorescente. Dopo l'assorbimento del penetrante nello strato di rilevatore, la proiezione di "luce" ultravioletta provoca la luminosità del segnale. In questo caso l'esame deve essere eseguito in ambiente poco illuminato per realizzare il massimo contrasto.

3.4 CLASSIFICAZIONE DEI LIQUIDI PENETRANTI SULLA BASE DELLA LORO COSTITUZIONE

Le caratteristiche d'impiego dei penetranti dipendono dalla particolare soluzione adottata per consentire la loro asportazione e la loro percezione. I penetranti si dividono innanzitutto in base alle caratteristiche di percezione, nelle due categorie:

- Penetranti colorati;
- Penetranti fluorescenti.

Nell'ambito di ciascuna categoria i penetranti si suddividono ulteriormente in tre sottogruppi, in base alle condizioni di asportabilità:

- 1) penetranti auto lavanti;
- 2) penetranti postemulsificabili;
- 3) penetranti rimovibili con solvente.

Si hanno quindi complessivamente 6 tipi di penetranti:

3.4.1 Penetranti colorati

Nei penetranti colorati, viene aggiunto del pigmento rosso, in grado di assicurare una colorazione sufficientemente intensa, anche quando la quantità di penetrante che partecipa alla formazione del segnale è trascurabile (caso di discontinuità strette e poco profonde).

In queste condizioni in cui nel penetrante manca l'agente emulsificante, il penetrante non può essere asportato con sola acqua. Per poter asportare il penetrante colorato, occorre scioglierlo con solvente oppure aggiungere l'elemento emulsificante, operazione che può essere compiuta successivamente dopo l'applicazione del penetrante sulla superficie del pezzo e prima dell'applicazione del rilevatore.

Un penetrante impiegato nel modo descritto corrisponde al tipo definito "postemulsificabile". Se non viene effettuata l'aggiunta dall'agente emulsificante, il penetrante deve essere rimosso con solvente.

Nei penetranti auto lavanti viene aggiunto dal fabbricatore l'agente emulsificante per cui il prodotto può essere direttamente asportato con l'acqua.

3.4.2 Penetranti fluorescenti

Anziché il pigmento colorato, in questi penetranti viene aggiunta una sostanza fluorescente. In questo caso la quantità richiesta per assicurare la visibilità del segnale nel caso di discontinuità sottili e poco profonde, è inferiore a quella necessaria con i penetranti colorati.

Ciò per le migliori condizioni di percepibilità: è infatti più facile percepire la luce nel buio anziché il colore rosso nel bianco.

A parte questa differenza, che riguarda la percepibilità, la distinzione dei penetranti fluorescenti dal punto di vista della loro asportabilità è analoga a quanto visto per quelli colorati.

Se cioè non viene aggiunto affatto l'agente emulsificante, il penetrante fluorescente risulterà rinnovabile solo con solvente.

L'aggiunta successiva dell'agente emulsificante prima dell'applicazione del rilevatore darà luogo al penetrante fluorescente postemulsificabile.

Infine l'aggiunta dell'agente emulsificante da parte del fabbricante darà luogo a un penetrante fluorescente auto lavante.

3.4.3 Classificazione dei penetranti dal punto di vista della sensibilità dell'esame

L'esame con liquidi penetranti risulta tanto più sensibile quanto più piccola e sottile è la discontinuità che può essere rilevata. Infatti le discontinuità sottili e poco profonde possono porre dei problemi al loro rilevamento a causa:

- della difficoltà da parte del penetrante ad inserirsi in fenditure molto sottili;
- della modesta quantità del penetrante che partecipa alla formazione del segnale.

La capacità di penetrazione diminuisce quanto più la composizione del penetrante si allontana dalle condizioni "naturali", rappresentate dalla base derivata dal petrolio.

L'aggiunta delle altre sostanze quali i pigmenti colorati o fluorescenti e dell'emulsificatore, rende il prodotto più "carico" e quindi di più difficile introduzione nelle fenditure sottili.

Si può quindi affermare che i penetranti fluorescenti siano superiori a quelli colorati in quanto richiedono una minore quantità di sostanza fluorescente rispetto a quella colorata per assicurare la visibilità. In altre parole il penetrante fluorescente meno "carico" di quello colorato, possiede una mobilità superiore che gli permette di inserirsi nelle fenditure sottili più facilmente di un penetrante colorato.

La presenza dell'agente emulsificante costituisce un'ulteriore aggiunta alla base, che porta ad un prodotto più carico rispetto ai penetranti privi di agente.

Pertanto i penetranti rimovibili con solvente e quelli postemulsificabili sono avvantaggiati rispetto a quelli auto lavanti. La superiorità spetta però ai penetranti rimovibili con solvente. Infatti i penetranti post emulsificabili non contengono l'emulsificante nella fase di penetrazione, mentre lo contengono nella fase di assorbimento essendo l'emulsificante stato aggiunto prima dell'applicazione del rilevatore.

Nei penetranti rimovibili con solvente, invece, il penetrante mantiene le sue caratteristiche sia nella fase di preparazione che in quella di assorbimento.

In conclusione la scala di merito della sensibilità nei confronti di discontinuità sottili e poco profonde aumenta passando dai penetranti colorati a quelli fluorescenti. Nell'ambito di ciascuna categoria si ha la seguente graduatoria:

- 1) penetranti rimovibili con solventi;
- 2) penetranti postemulsificabili;
- 3) penetranti auto lavanti.

3.5 TIPI DI RILEVATORI

I rilevatori sono costituiti da talco, gesso o silice amorfa, finemente suddivisi. L'impiego del rilevatore può essere fatto:

- a) direttamente come polvere applicato al pezzo mediante soffiello o distributore automatico ad aria compressa;
- b) sciogliendo o disperdendo la polvere in acqua;
- c) disperdendo il rilevatore in un solvente.

I rilevatori in solvente sono utilizzati esclusivamente con i penetranti rimovibili con solvente, sui quali esercitano un'azione benefica. Quest'azione devia l'effetto diluente che il rilevatore per il tempo in cui resta liquido, esercita nei confronti del penetrante presente nella discontinuità sottostanti. La modesta diluizione rimuove ogni principio di essiccamento, ripristinando così le eccellenti condizioni di mobilità per il penetrante. Questa circostanza esalta pertanto la superiorità dei penetranti rimovibili con solvente nel rilevamento di fenditure sottili.

I rilevatori in acqua sono convenienti per l'esame di superfici molto estese.

I rilevatori in polvere convengono invece per l'esame di superfici molto ruvide e sono usati solo in combinazione con penetranti fluorescenti.

3.6 MODALITA' ESECUTIVE DELL'ESAME CON LIQUIDI PENTRANTI

L'esame con liquidi penetranti può essere condotto con sei modi diversi, in base al tipo di penetrante utilizzato. Una prima suddivisione distingue i penetranti fluorescenti da colorati.

Ciascun gruppo è inoltre ulteriormente divisibile in tre sottogruppi, a seconda che il penetrante impiegato sia di tipo:

- autolavante
- postemulsificabile
- rinnovabile con solvente.

3.6.1 Pulizia della superficie

Questa operazione è indispensabile per assicurare l'efficacia dell'esame. Serve per rimuovere dalla superficie sostanze estranee quali grassi e sporcizia che provocherebbero:

- a) la contaminazione del penetrante, modificando le sue proprietà fisiche e la sua visibilità;
- b) l'impossibilità da parte del liquido di una corretta bagnatura della superficie;
- c) l'ostruzione delle discontinuità strette.

Il metodo più veloce e semplice della pulizia della superficie soprattutto nel caso di zone di limitata estensione (caso delle saldature), è quello con solvente. La superficie viene pulita utilizzando uno straccio pulito imbevuto di solvente o tramite aerosol. La pulizia preliminare del pezzo è fondamentale perché una superficie sgrassata e priva di oli ha un'elevata energia superficiale e questo agevola la dispersione del penetrante.

Altri metodi utilizzati per la pulizia delle superfici impiegano:

- detergenti
- solventi per pitture
- soluzioni disossidanti, decappanti.

La sabbiatura è un metodo da evitare: essa infatti potrebbe sigillare le discontinuità sottili attraverso il ricalcamento dei loro bordi. La rimozione della ruggine e delle scaglie di laminazione può essere sufficientemente effettuata mediante spazzolatura.

Nelle prove riportate in questo lavoro di tesi per pulire le superfici sulle quali si sono eseguite le prove con i liquidi penetranti, si è utilizzato il solvente con le seguenti specifiche:

SOLVENTE & CLEANER PRO 153 è una miscela di solventi con grado di polarità a largo spettro indicata per sgrassare a fondo la superficie da controllare.

IDENTIFICATORI DI PRODOTTO: aerosol con dispositivo di nebulizzazione sigillato. Acetone[50-70%], Nafta(ragia minerale dearomatizzata) [5-10%], Propellente [20-30%], propano, n-butano, isobutano.

A livello operativo si deve applicare il solvente con la bomboletta, riportata in Figura 3.1, aspettare che il provino si asciughi perfettamente e successivamente fare un controllo visivo al fine di verificare l'assenza di macchie, aloni, sostanze estranee ed impurità sulla superficie del pezzo da analizzare.



Figura 3.1: Solvente per la pulizia del provino

3.6.2 Applicazione del penetrante

L'applicazione del penetrante va fatta dopo la completa asciugatura della superficie precedentemente pulita. L'applicazione può essere fatta:

- per immersione del pezzo in un recipiente contenente il liquido penetrante (metodo particolarmente indicato per piccoli e numerosi pezzi);
- con pennello o spazzola;
- a spruzzo, utilizzando sia un getto a moderata pressione uscente da un tubo collegato, tramite una pompa a serbatoio di penetrante, sia utilizzando bombolette spray.

In ogni caso il penetrante deve costituire uno strato uniforme esteso a tutta la superficie da esaminare. Nel caso di zone limitate (es. saldature), l'area ricoperta deve stendersi per circa 25mm oltre il margine delle zone stesse.

Nelle prove riportate in questo lavoro di tesi per l'applicazione del penetrante si è utilizzato il penetrante colorato autolavante con le seguenti specifiche:

PENETRANTE ROSSO PRO 151:aerosol con dispositivo di nebulizzazione sigillato. Nafta (ragia minerale de aromatizzata) [50-75%], dicloropropano [1-5%], Ottifenolo etossilato [1-5%], propellente [30-50%]:propano, n-butano, isobutano.



Figura 3.2:
Penetrante colorato autolavante



Figura 3.3:Aspetto del provino subito dopo l'applicazione del penetrante

A livello operativo si deve applicare il penetrante con la bomboletta riportata in Figura 3.2. L'aspetto del provino a seguito dell'applicazione del penetrante deve essere di colore rosso il più possibile omogeneo come riportato in Figura 3.3.

3.6.3 Tempo di penetrazione

Il penetrante applicato alla superficie si inserisce sotto l'azione della capillarità, nelle discontinuità presenti, si tratta di un movimento tanto più lento quanto più sottile è la discontinuità. Quest'ultima è bene che sia riempita completamente. Si ha così la possibilità di ricavare un'informazione approssimata sulla sezione della discontinuità attraverso l'entità del segnale.

Occorre pertanto lasciare al penetrante il tempo di inserirsi e riempire le discontinuità. Questo tempo è chiamato "tempo di penetrazione".

È però opportuno che questo tempo non si prolunghi eccessivamente oltre quello necessario. In caso contrario si potrebbe verificare un principio di essiccamento del penetrante e quindi una sua fuoriuscita difficoltosa nella fase di assorbimento da parte del rilevatore.

Il valore del tempo di penetrazione dipende:

- dal grado di apertura delle discontinuità;
- dal volume della discontinuità;
- dal materiale del pezzo;
- dal prodotto da esaminare.

I maggiori tempi di penetrazione sono richiesti da discontinuità molto sottili o di grande sezione.

In linea orientativa il tempo minimo di penetrazione è:

- 5minuti per i fusi e le saldature;
- 10minuti per gli altri prodotti.

La temperatura del pezzo deve essere inoltre compresa tra i 16 e i 52°C. Temperature inferiori ai 16°C o superiori a 52°C comportano una verifica del metodo di prova, effettuabile con blocco di comparazione [21] [22].

A livello operativo, l'aspetto del provino dopo un giusto tempo di penetrazione deve essere come quello riportato in Figura 3.4. A differenza di Figura 3.3, ora si può notare l'aspetto del provino che sembra maculato in cui a tratti il penetrante sembra quasi assente e a tratti è molto concentrato in piccole macchioline. Questo è l'effetto dell'asciugatura del penetrante! Qualora l'effetto maculato fosse molto più evidente, ed fossero presenti aree più ampie in cui il colore rosso ha perso di intensità, la prova è da rifare in quanto il tempo di penetrazione è stato eccessivamente prolungato.



Figura 3.4: Aspetto del provino a seguito dell'attesa del tempo di penetrazione del liquido penetrante

3.6.4 Asportazione del penetrante

Questa operazione deve consentire il completo lavaggio della superficie, senza che venga



Figura 3.5: Asportazione del penetrante dal provino tramite lavaggio con acqua a temperatura ambiente.

asportato il penetrante residuo nelle discontinuità sottostanti. Lavaggi incompleti tolgono l'efficacia all'esame, a causa di macchie luminose che si formano nelle zone poco pulite e che impediscono di percepire i segnali corrispondenti a piccole discontinuità.

I penetranti auto lavanti vengono asportati mediante un getto di acqua a temperatura ambiente, eventualmente indirizzato con una inclinazione di circa 45° rispetto alla superficie del pezzo .

A livello operativo, l'aspetto del provino dopo un accurato e minuzioso lavaggio con successiva asciugatura dell'acqua di lavaggio senza alcuna azione meccanica (avvalersi eventualmente di un ventilatore per accelerare i tempi di asciugatura) deve essere

come quello riportato in Figura 3.6. Come si può notare non sono presenti alcuna macchia o alone del penetrante precedentemente applicato.



Figura 3.6: Provino a seguito del lavaggio con acqua e della successiva asciugatura

L'asciugatura della superficie può essere accelerata con aria calda, purché la sua temperatura non superi i 52°C; in modo da evitare un principio di essiccamento del penetrante contenuto nelle discontinuità.

3.6.5 Applicazione del rivelatore

Il rivelatore può essere applicato:

a) se di tipo in acqua:

- per immersione del pezzo;

- con pennello.

b) se di tipo in solvente:

- a spruzzo;

- con pennello.

c) se in polvere:

- con soffietto;

- con distributore automatico ad aria compressa.

L'azione assorbente del rivelatore inizia dopo la sua completa asciugatura. I rivelatori in solvente asciugano rapidamente per evaporazione spontanea.

I rivelatori in acqua vengono generalmente asciugati con un getto di aria calda, in modo analogo a quanto praticato per l'asciugatura della superficie del pezzo.

L'asciugatura con aria dei rivelatori in acqua conviene in quanto l'evaporazione spontanea può essere troppo lenta con il pericolo di un principio di essiccamento del penetrante contenuto nelle discontinuità.

Nelle prove riportate in questo lavoro di tesi per l'applicazione del rivelatore si è utilizzato il rivelatore bianco di tipo in solvente e disponibile in bomboletta spray con le seguenti specifiche:

RILEVATORE BIANCO PRO 164 è un prodotto composto da una miscela bilanciata di solventi anidri e da vari tipi di polveri bianche ad elevato potere assorbente. La dimensione media dei microgranuli che compongono le polveri è 2 millesimi di millimetro.

IDENTIFICATORI DI PRODOTTO: aerosol con dispositivo di nebulizzazione sigillato. Acetone[30-50%] Nafta[1-5%], polveri bianche (distribuzione granulometrica: 99% minore di 10µm), propellente[30-50%]: propano, n-butano, isobutano.

A livello operativo si è applicato il rivelatore bianco con la bomboletta riportata in Figura 3.8 cercando di realizzare una leggera e soprattutto omogenea pellicola bianca. La bomboletta si deve tenere ad una distanza minima di 30cm dal provino per evitare di creare effetti tipo "colature".

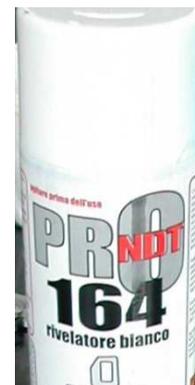


Figura 3.7:
Rilevatore bianco
di tipo a solvente

Segnale generato dal non perfetto lavaggio del provino a seguito dell'applicazione del penetrante



Figura 3.8: Provino a cui è stato applicato il rilevatore bianco e che non presenta alcun segnale di danneggiamento superficiale

3.6.6 L'esame dei segnali

L'assorbimento del penetrante da parte del rilevatore dà luogo alla formazione dei segnali, (che appaiono quando viene proiettata la luce nera nel caso dei liquidi penetranti fluorescenti).

L'esame dei segnali deve essere fatto dopo che sia trascorso un certo tempo, chiamato tempo di rilevamento. Questo tempo varia da un minimo di 7 ad un massimo di 30 minuti.

Più sottile e profonda è la discontinuità, più lungo è il tempo di rilevamento. Con il trascorrere del tempo, il segnale si allarga a macchia in conseguenza della sua diffusione nello strato assorbente di rilevatore.

3.7 SEGNALAZIONE DELLE DISCONTINUITA'

Lo scopo dell'esame con liquidi penetranti è quello di segnalare la presenza di discontinuità sfocianti alla superficie del pezzo da esaminare. Ciò allo scopo di stabilire se il pezzo è affidabile, ossia se può essere impiegato senza che vi siano da temere inconvenienti nel suo uso o, come in questo caso, nella ricerca a scopo didattico dell'innesco di un'eventuale cricca generata dall'affaticamento del materiale.

Non sempre però ad un segnale corrisponde un'effettiva anomalia del pezzo. Condizioni esecutive non corrette dell'esame possono portare alla formazione di segnali senza che il pezzo presenti la minima discontinuità.

Altre volte l'esame può segnalare discontinuità che corrispondono a condizioni caratteristiche del pezzo stesso e non ad anomalie.

I segnali si dividono in tre categorie:

- a) segnali indicativi: sono quelli che si riferiscono a discontinuità rappresentanti reali anomalie del pezzo;
- b) segnali non indicativi: sono quelli che non si riferiscono ad anomalie ma a situazioni note e caratteristiche del pezzo;
- c) segnali falsi: non corrispondono ad alcuna anomalia nel pezzo.

3.7.1 Elaborazione dei risultati dell'esame

Sulla base dei segnali disponibili, l'operatore deve procedere nel modo seguente:

- a) individuazione dei segnali falsi e non indicativi;
- b) interpretazione dei segnali indicativi;
- c) valutazione delle discontinuità.

I segnali falsi e quelli non indicativi non vengono evidentemente presi in considerazione

L'interpretazione di segnali indicativi consiste nell'individuare il tipo di discontinuità cui essi si riferiscono. La presenza di una discontinuità non significa che sia automaticamente compromessa l'affidabilità del pezzo o, in questo caso si sia innescata una cricca.

Alcune discontinuità infatti, se contenute entro certi limiti, pur rappresentando un'effettiva anomalia, non danno luogo a inconvenienti e possono quindi essere tollerate. Quando invece una discontinuità non può essere tollerata, viene considerata un difetto e va rimossa.

3.7.2 Criterio per la valutazione delle discontinuità

La tollerabilità o meno di una discontinuità spetta ai così detti documenti di riferimento, che per ciascuna discontinuità indicano i limiti di tollerabilità a seconda dei vari casi pratici.

Il grado di tolleranza di una discontinuità viene stabilito da questi documenti sulla base dei seguenti elementi:

- a) condizioni previste per il funzionamento del pezzo;
- b) tipo di discontinuità (cricca, proprietà, inclusione, etc);
- c) forma, dimensioni ed orientamento della discontinuità;
- d) materiale del pezzo.

TIPI DI SEGNALI INDICATIVI

I segnali indicativi ottenibili nell'esame con liquidi penetranti possono essere suddivisi in 4 categorie:

- SEGNALI CONTINUI, costituiti da un tratto rettilineo o curvo, diritto o frastagliato;
- SEGNALI INTERMITTENTI: costituiti da una linea a tratti, rettilinea o curva;
- SEGNALI ROTONDEGGIANTI, costituiti da macchie con contorno più o meno circolare;
- SEGNALI DIFFUSI, costituiti da un agglomerato di punti che nella zona centrale sono spesso molto concentrati.

TIPI DI SEGNALI NON INDICATIVI

Sono costituiti da macchie o da linee, originate in corrispondenza di discontinuità geometriche caratteristiche del pezzo esaminato.

Questi segnali possono provenire da varie circostanze, le più tipiche delle quali sono:

- impronte delle mani dell'operatore
- impronte dovute al contatto con parti contenute penetrante
- impronte dovute al lavaggio incompleta
- impronte dovute al residui lasciati dai panni

3.7.3 Interpretazione dei segnali indicativi

Per una corretta interpretazione dei segnali indicativi è necessario che l'operatore conosca:

- a)le lavorazioni cui è stato sottoposto il pezzo da esaminare;
- b)le condizioni di servizio quando il pezzo venga esaminato dopo che ha funzionato per un certo tempo (sollecitazioni statiche, sollecitazioni a fatica, sollecitazioni direzionali);
- c)il tipo di discontinuità;
- d)l'aspetto del segnale.

SEGNALI CORRISPONDENTI ALLE DISCONTINUITA'

Le discontinuità vengono raggruppate in tre categorie distinte in base al momento della loro formazione nel pezzo.

- a)discontinuità primarie:sono quelle che si formano durante il processo di fabbricazione dei così detti "semilavorati",

b) discontinuità finali: sono quelle ritrovabili nel pezzo finito che ha subito le seguenti lavorazioni:

- asportazione di truciolo alle macchine utensili o molatura;
- formatura per deformazione plastica;
- trattamenti termici;
- saldatura.

c) discontinuità di servizio: sono quelle che si formano durante il funzionamento del pezzo.

Di seguito, verrà posta in analisi solo le discontinuità interessanti i casi possibili sui provini analizzati in questo lavoro di tesi :

CRICCHE DA FATICA

Tipo di discontinuità: discontinuità di servizio riscontrabile in pezzi sottoposti a sforzi continuamente ripetuti o sottoposti a vibrazioni;

Origine della discontinuità: la discontinuità inizia da variazioni geometriche nel pezzo oppure dalla presenza di intagli superficiali;

Posizione della discontinuità: superficiale e quindi perfettamente rilevabile all'esame con liquidi penetranti;

Aspetto del segnale: continuo, generalmente frastagliato e più o meno marcato a seconda dello stato di avanzamento della cricca.

Di seguito è riportata una foto di un tipico segnale ottenuta a seguito di un'azione affaticante di tipo torsionale per una prova a medio-basso carico e quindi a medio-alto numero di cicli a rottura.

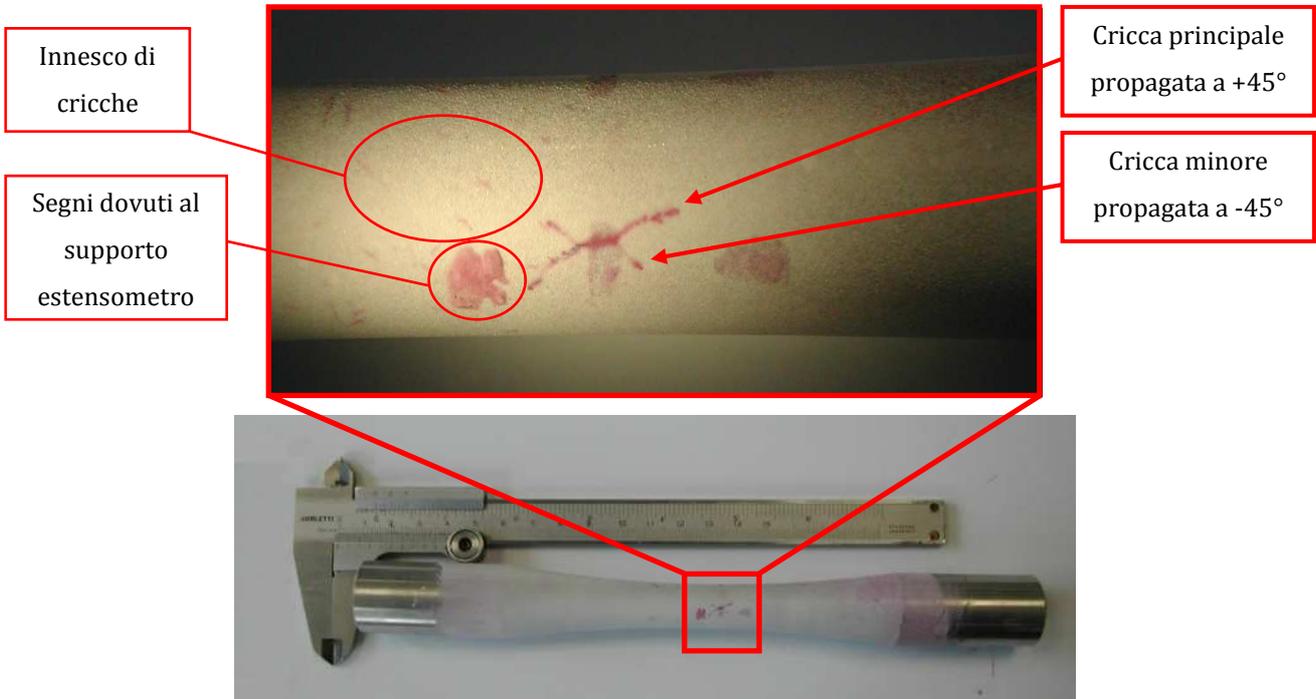


Figura 3.9: Tipico segnale di discontinuità prodotto da un'azione affaticate di tipo torsionale su provino con sezione netta pari $\varnothing 15\text{mm}$. Monitoraggio della cricca eseguito a 116022 cicli a fronte di un totale cicli a rottura pari a 143368. Provino Torq_liscio_R-1_15; $\tau_a=310\text{MPa}$, $M_t=\pm/-205.43\text{Nm}$

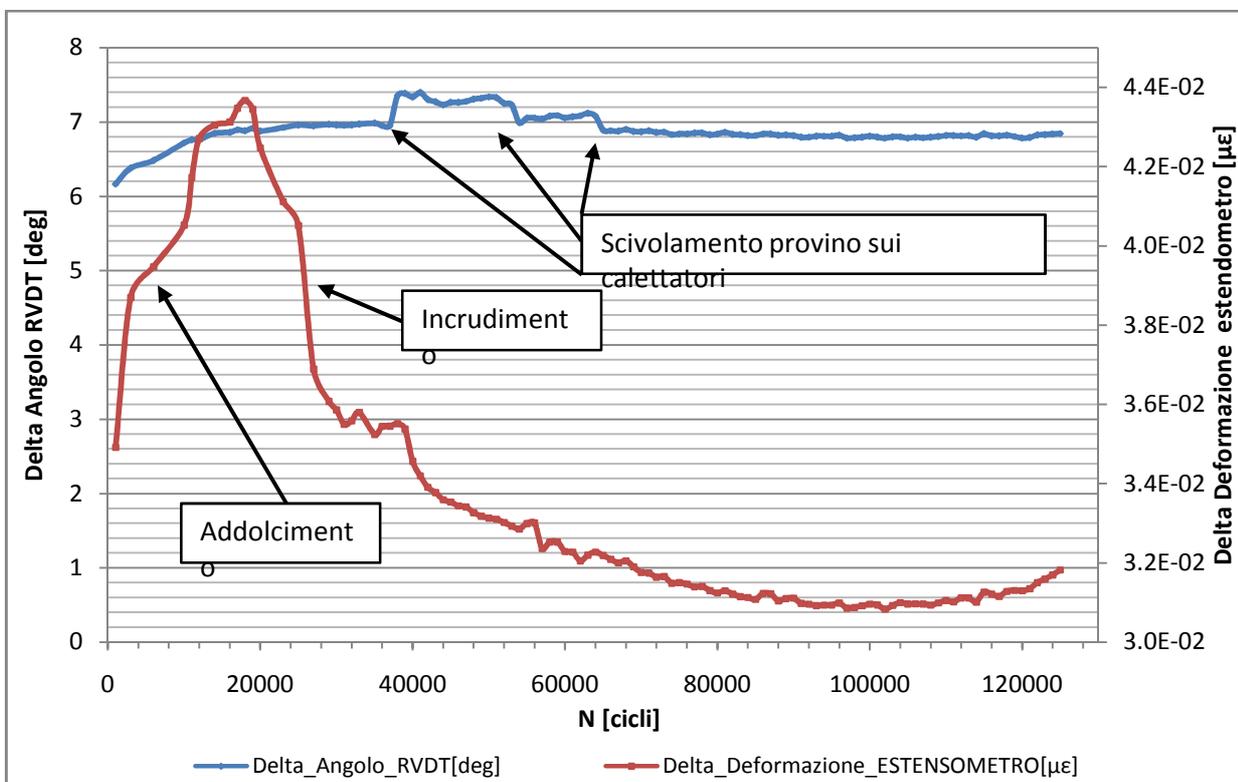


Figura 3.10: Andamento dell'ampiezza dell'angolo di torsione acquisito con sensore RVDT e dell'ampiezza di deformazione acquisita con estensometro in funzione del numero di cicli per in provino Torq_liscio_R-1_15; $\tau_a=310\text{MPa}$, $M_t=\pm/-205.43\text{Nm}$

3.8 MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R0.5

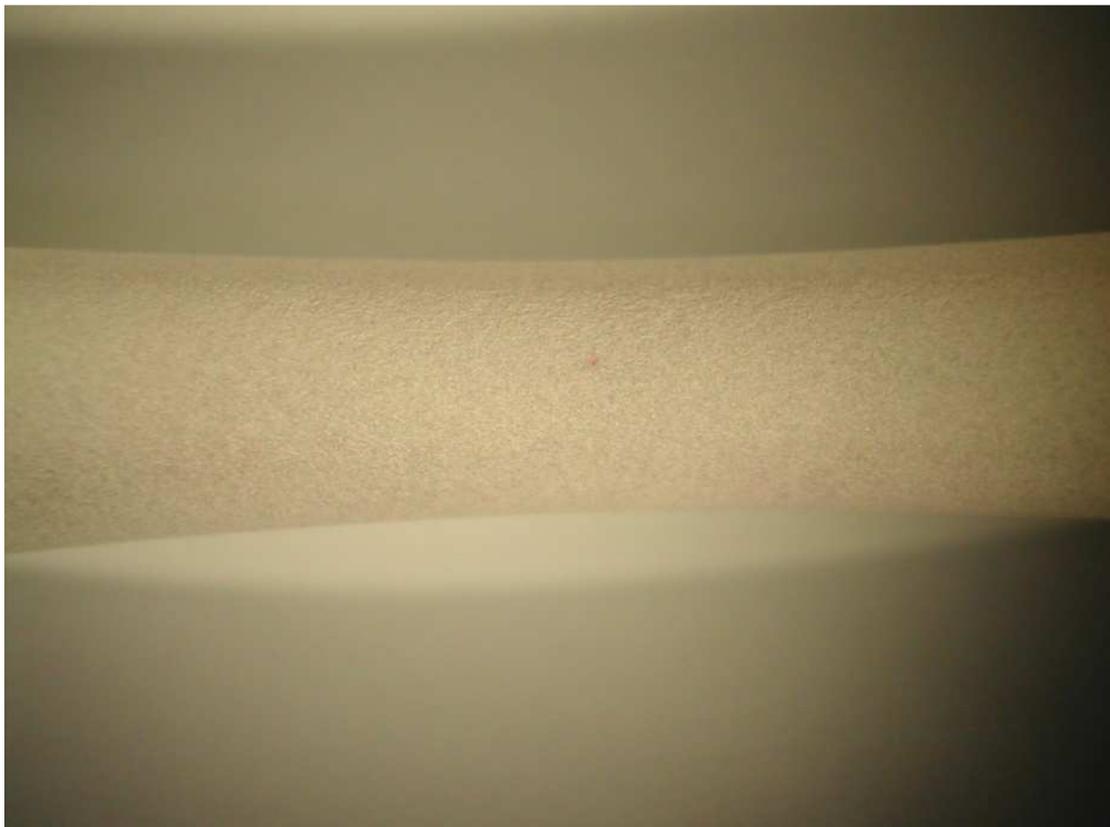
Nel monitorare l'innesco di cricca per prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R=0.5 si sono utilizzati due provini i cui dati di prova sono sintetizzati di seguito:

PROVA : Traz_liscio_R0,5_08				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l =130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 54.98 kN	F _{MIN} = 27.49 kN	F _{MED} = 41.235 kN	F _a = 13.745 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 700 MPa	σ_{MIN} = 350 MPa	σ_{MED} = 525 MPa	σ_a = 175 MPa
Numero di cicli a rottura:	102404 cicli			

TENSIONE MASSIMA NOMINALE= 700MPa →TENSIONE MASSIMA EFFETTIVA= 1080.21MPa

AMPIEZZA DI TENSIONE NOMINALE= 175MPa →AMPIEZZA DI TENSIONE EFFETTIVA= 270.05MPa

A 80085 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 365 pixel

Diametro provino:Ø8.05mm

Lunghezza dell'unica cricca apprezzabile: 5 pixel

365pixel : 8.05mm = 5pixel : X mm →X = lunghezza cricca =0.11 mm

A 95000 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 413pixel

Diametro provino:Ø8.05 mm

Lunghezza della cricca principale precedentemente analizzata: 39 pixel

$413\text{pixel} : 8.05\text{mm} = 39\text{ pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.76\text{ mm}$

A 102404 cicli: ROTTURA DEL PROVINO



n° prova	n° cicli	[mm]
3° prova liquidi penetranti	80085	0.11
4° prova liquidi penetranti	95000	0.76
rottura provino	102404	8.05

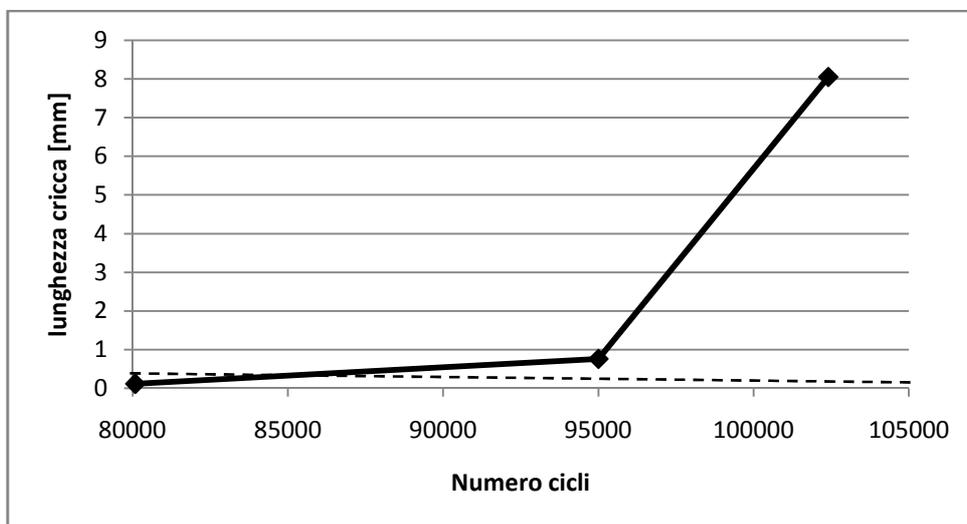


Figura 3.11: Stima dell'andamento della lunghezza di cricca in funzione del numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R0,5_08

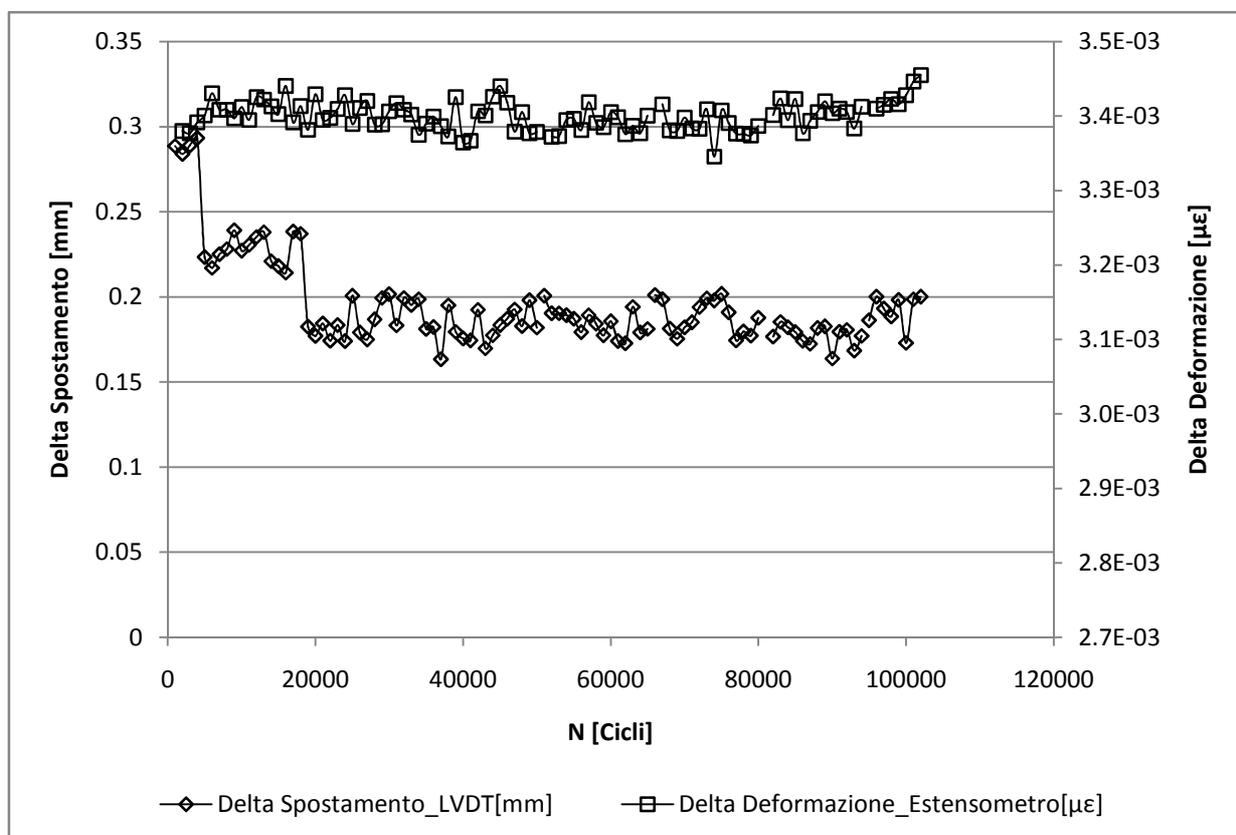


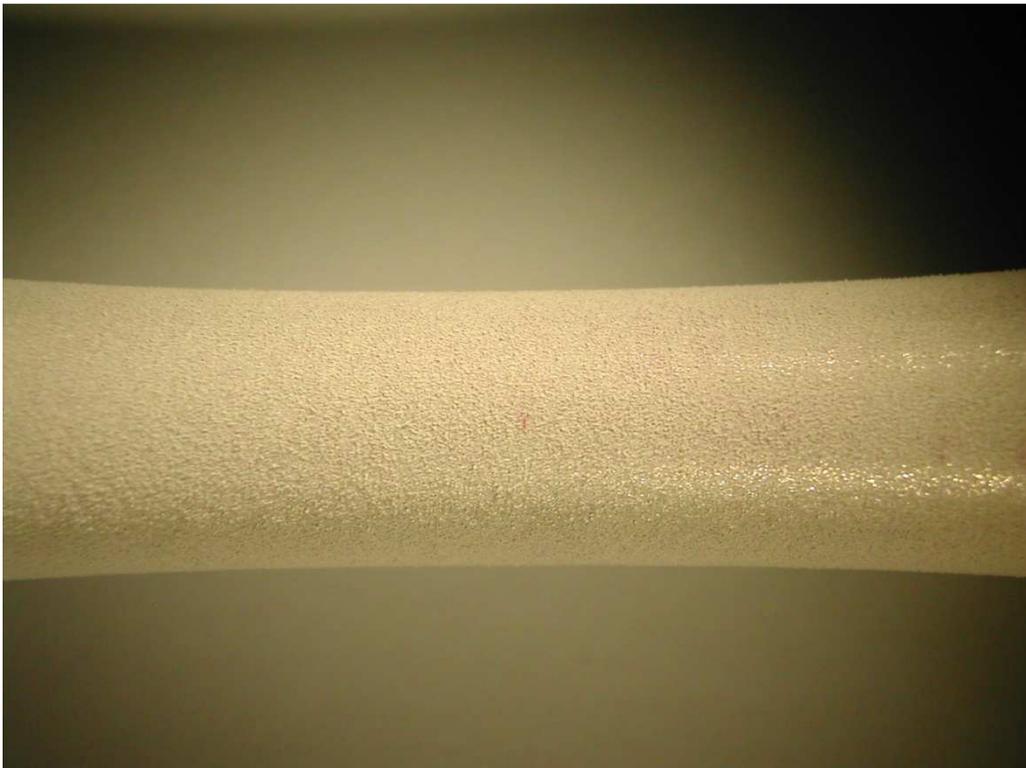
Figura 3.12: Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [µε] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0,5_08

PROVA : Traz_liscio_R0,5_09				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 50.265 kN	F _{MIN} = 25.133 kN	F _{MED} =37.699 kN	F _a = 12.566 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 640 MPa	σ_{MIN} = 320 MPa	σ_{MED} = 480 MPa	σ_a = 160 MPa
Numero di cicli a rottura:	865881 cicli			

TENSIONE MASSIMA NOMINALE=640MPa → TENSIONE MASSIMA EFFETTIVA=790.12MPa

AMPIEZZA DI TENSIONE NOMINALE= 160MPa → AMPIEZZA DI TENSIONE EFFETTIVA= 197.53

A 773235 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

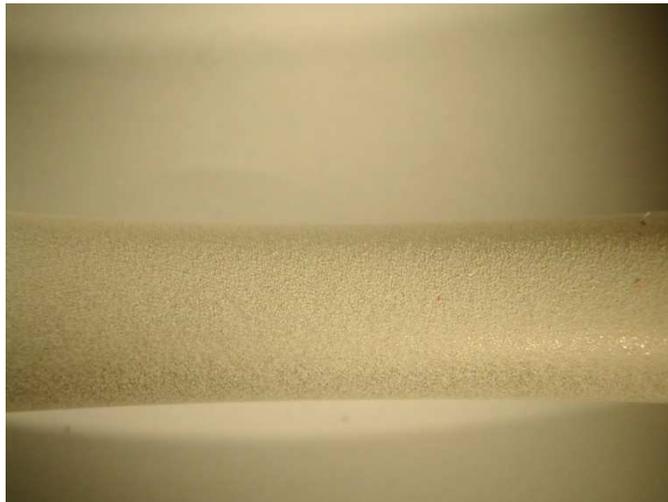
Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 431pixel

Diametro provino:Ø8.75 mm

Lunghezza dell'unica cricca "singola": 11 pixel

431pixel : 8.75mm = 11pixel : X mm → X = lunghezza cricca =0.223 mm

A 802083 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 431pixel

Diametro provino:Ø8.75 mm

Lunghezza dell'unica cricca "singola": 15 pixel

$424\text{pixel} : 8.75\text{mm} = 12\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.247\text{ mm}$

A 834107 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 407pixel

Diametro provino:Ø8.75 mm

Lunghezza dell'unica cricca "singola": 27 pixel

$407\text{pixel} : 8.75\text{mm} = 27\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.58\text{ mm}$

A 865881 cicli:

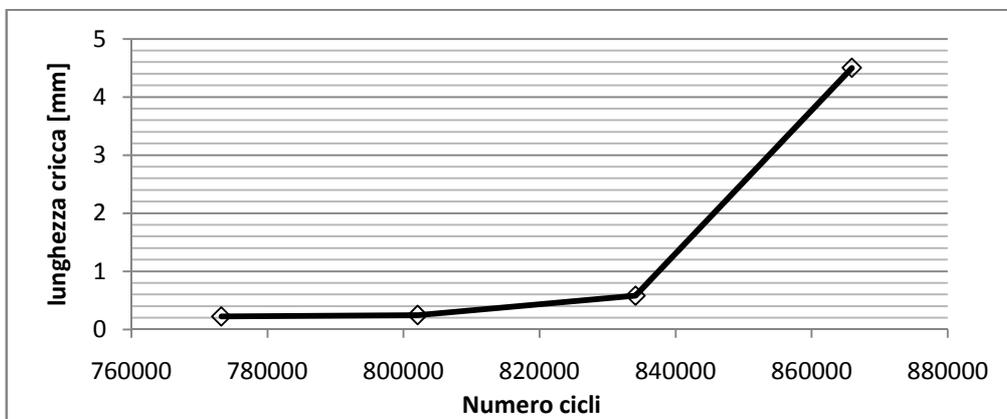
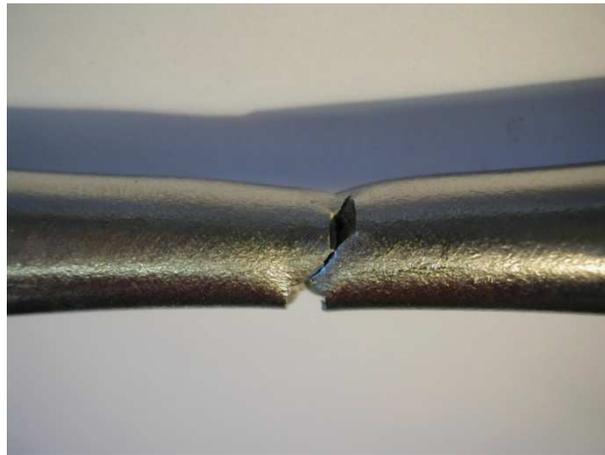


Figura 3.13: Stima dell'andamento della lunghezza di cricca in funzione del numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R0,5_09

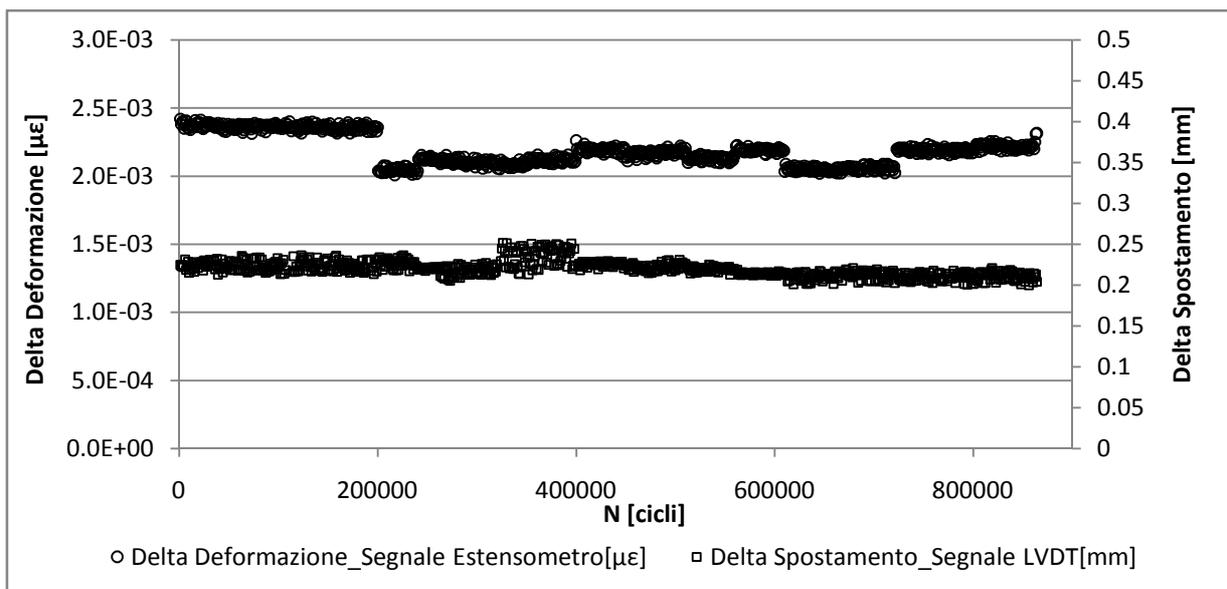


Figura 3.14: Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [µε] all'aumentare del numero di cicli per il provino

3.9 MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R=0.1

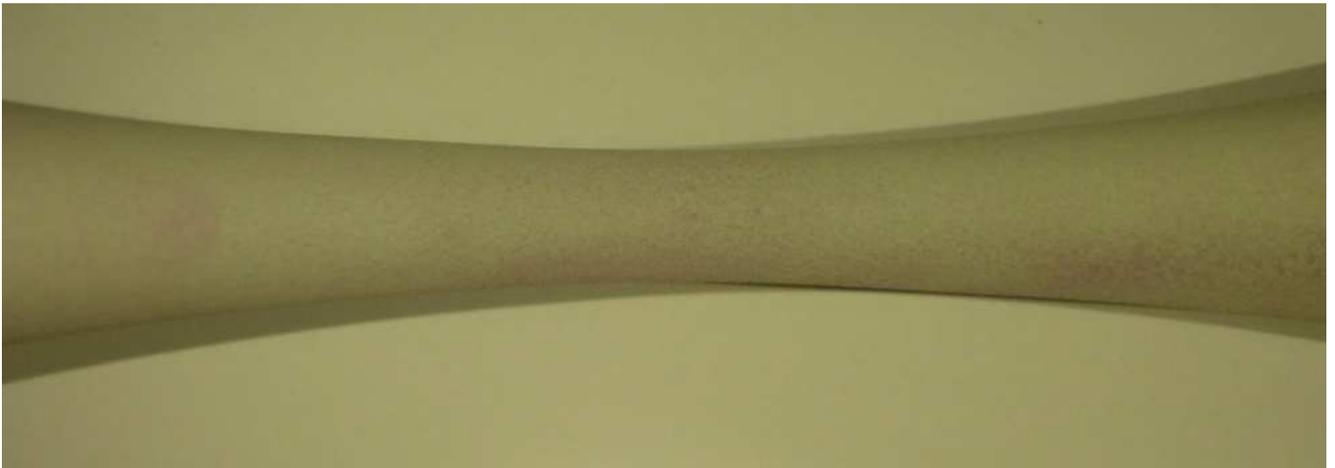
Nel monitorare l'innesco di cricca per prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R=0.1 si sono utilizzati due provini i cui dati di prova sono sintetizzati di seguito:

PROVA : Traz_liscio_R0,1_20				
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	$\phi = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 44.104 kN	F _{MIN} = 4.4104kN	F _{MED} =24.257kN	F _a = 19.84kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 622.22 MPa	σ_{MIN} = 62.22 MPa	σ_{MED} = 342.22 MPa	σ_a = 280 MPa
ROTTO: a 46585 cicli				

TENSIONE MASSIMA NOMINALE=622.21MPa →TENSIONE MASSIMA EFFETTIVA=728.45MPa

AMPIEZZA DI TENSIONE NOMINALE= 280MPa →AMPIEZZA DI TENSIONE EFFETTIVA= 327.803MPa

A 32018 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 447pixel

Diametro provino:Ø8.78 mm

Lunghezza della cricca "maggiore": 7 pixel

447pixel : 8.78mm = 7pixel : X mm →X = lunghezza cricca =0.14 mm

Lunghezza della cricca "minore": 5 pixel

447pixel : 8.78mm = 5pixel : X mm →X = lunghezza cricca =0.1 mm

A 36017 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 431pixel

Diametro provino:Ø8.78 mm

Lunghezza della cricca "maggiore": 19 pixel

$243\text{pixel} : 8.78\text{mm} = 19\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.68\text{ mm}$

Lunghezza della cricca "minore": 12 pixel

$243\text{pixel} : 8.78\text{mm} = 12\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.43\text{ mm}$

A 40018 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 441pixel

Diametro provino:Ø8.78 mm

Lunghezza della cricca "maggiore": 49 pixel

$441\text{pixel} : 8.78\text{mm} = 49\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.97\text{ mm}$

Lunghezza della cricca "minore": 30 pixel

$441\text{pixel} : 8.78\text{mm} = 30\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.59\text{ mm}$

A 46585 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 407pixel

Diametro provino: $\varnothing 8.13$ mm

Lunghezza della cricca "maggiore": 213 pixel

$407\text{pixel} : 8.13\text{mm} = 213\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 4.25$ mm

Lunghezza della cricca "minore": 117 pixel

$407\text{pixel} : 8.13\text{mm} = 117\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 2.34$ mm

	n° cicli	lunghezza cricca	
		maggiore [mm]	minore [mm]
1° prova liquidi penetranti	32018	0.14	0.1
2° prova liquidi penetranti	36017	0.68	0.43
3° prova liquidi penetranti	40018	0.97	0.59
rottura provino	46585	4.25	2.34

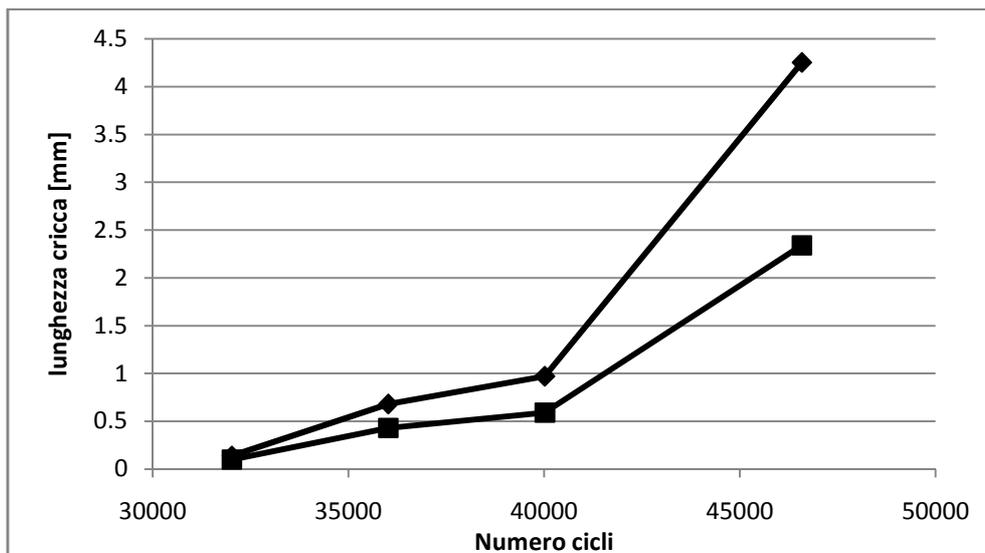


Figura 3.15:Stima dell'andamento della lunghezza della cricca maggiore e della cricca minore in funzione del numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R0,1_20

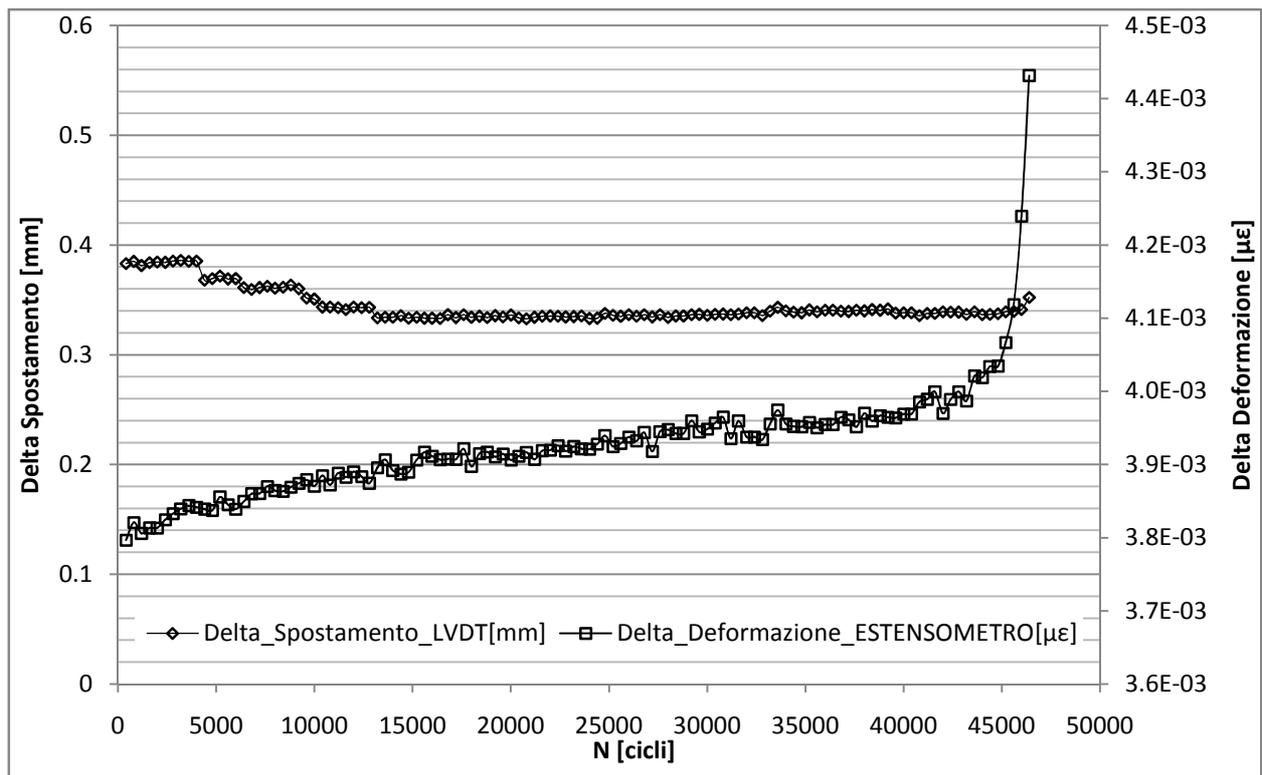


Figura 3.16: Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [με] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_20

PROVA : Traz_liscio_R0,1_21				
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	$\phi = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 38.591 kN	F _{MIN} = 3.859kN	F _{MED} =21.22kN	F _a = 17.36kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 544.4 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 54.4 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 299.38 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 245 \text{ MPa}$
ROTTO: a 322457 cicli				

TENSIONE MASSIMA NOMINALE=544.4MPa →TENSIONE MASSIMA EFFETTIVA=560.8MPa

AMPIEZZA DI TENSIONE NOMINALE= 245MPa →AMPIEZZA DI TENSIONE EFFETTIVA= 252.38MPa

A 297054 cicli:



Assenza di fessurazioni o cricche a 297054 cicli. L'innesco ha quindi avuto luogo successivamente ai 297054 e, a fronte di un totale numero di cicli a rottura pari a 322457, si può affermare che l' innesco è avvenuto dopo il 92.1% di vita. In questo caso l'innesco e la propagazione, nel diagramma di Woehler, si confondono essendo espresso in scale logaritmiche

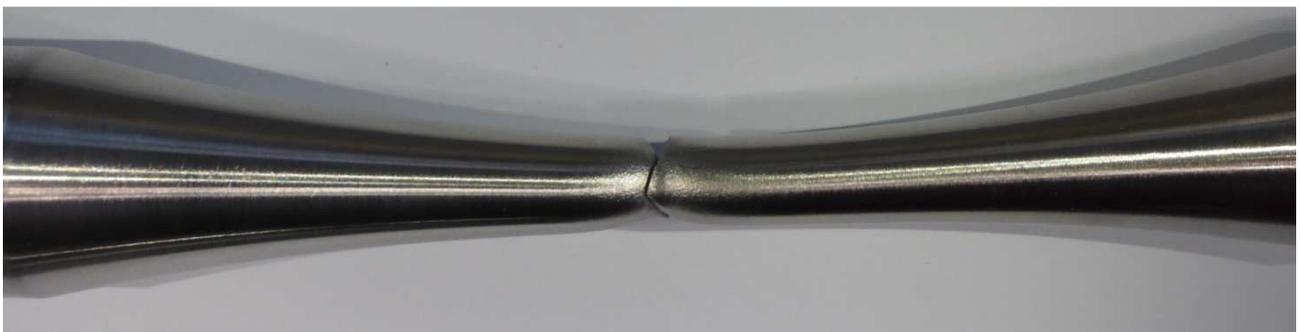


Figura 3.17: Dettaglio superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.1_21

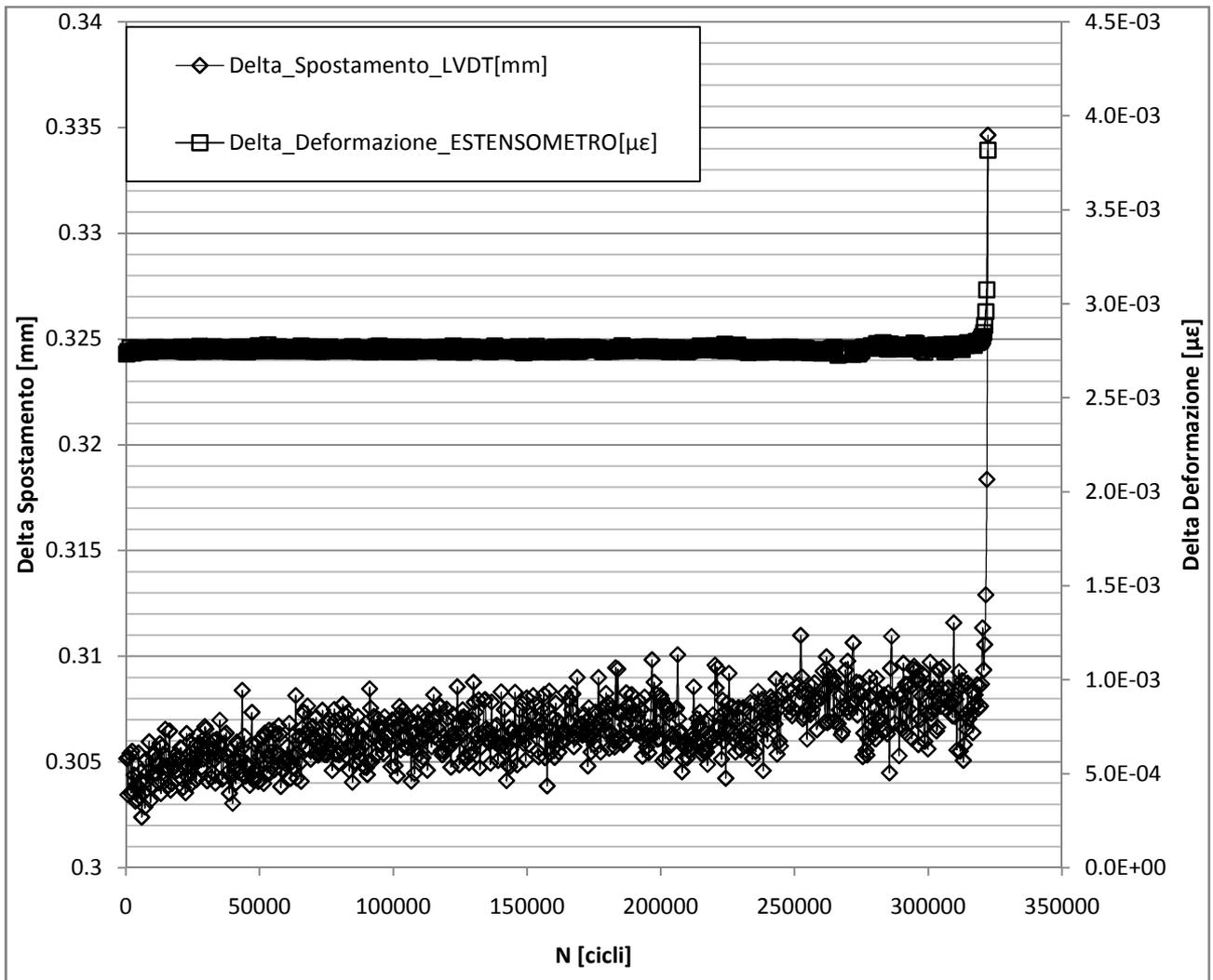


Figura A.21.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [με] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_21

3.10 MONITORAGGIO INNESCO DI CRICCA PER RAPPORTI DI CICLO R=-1

Nel monitorare l'innesco di cricca per prove a fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1 si sono utilizzati due provini i cui dati di prova sono sintetizzati di seguito:

PROVA : Traz_liscio_R-1_21				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 27.09 kN	F _{MIN} = -27.09 kN	F _{MED} = 0 kN	F _a = 27.09 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 345 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -345 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 345 \text{ MPa}$
ROTTO: a 127570 cicli				

A 125011 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 451pixel

Diametro provino: $\phi 10.1 \text{ mm}$

Lunghezza della cricca con dimensioni maggiori: 67 pixel

451pixel : 10.1mm = 67pixel : X mm $\rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 1.5 \text{ mm}$

A 127007 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 541pixel

Diametro provino: \varnothing 10.1 mm

Lunghezza della cricca con dimensioni maggiori: 16 pixel

$541\text{pixel} : 10.1\text{mm} = 116\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 2.17\text{ mm}$

A 127570 cicli: Rottura del provino



n° prova	n° cicli	lunghezza cricca [mm]
5° prova liquidi penetranti	125011	1.5
6° prova liquidi penetranti	127007	2.17
rottura provino	127570	10

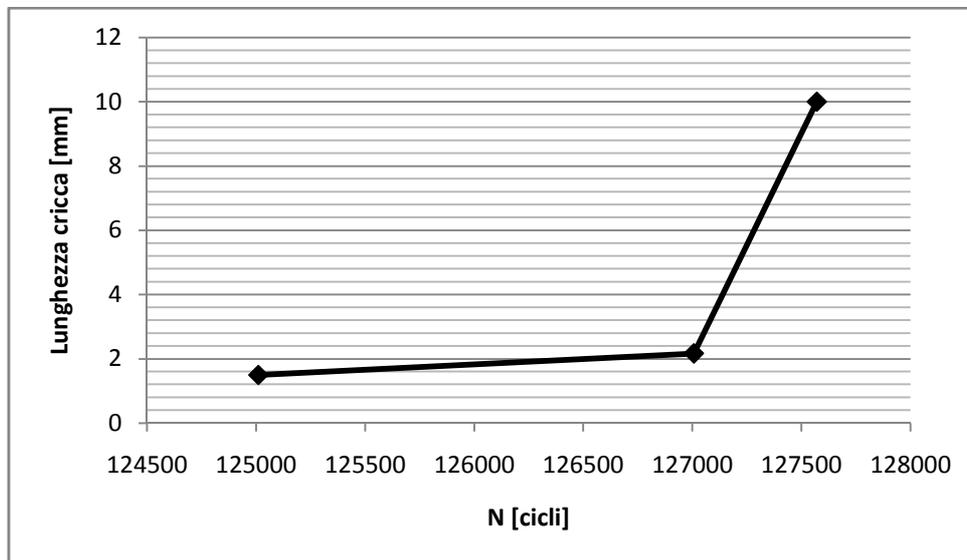


Figura 3.18:Stima dell'andamento della lunghezza della cricca maggiore e della cricca minore in funzione del numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R-1_21

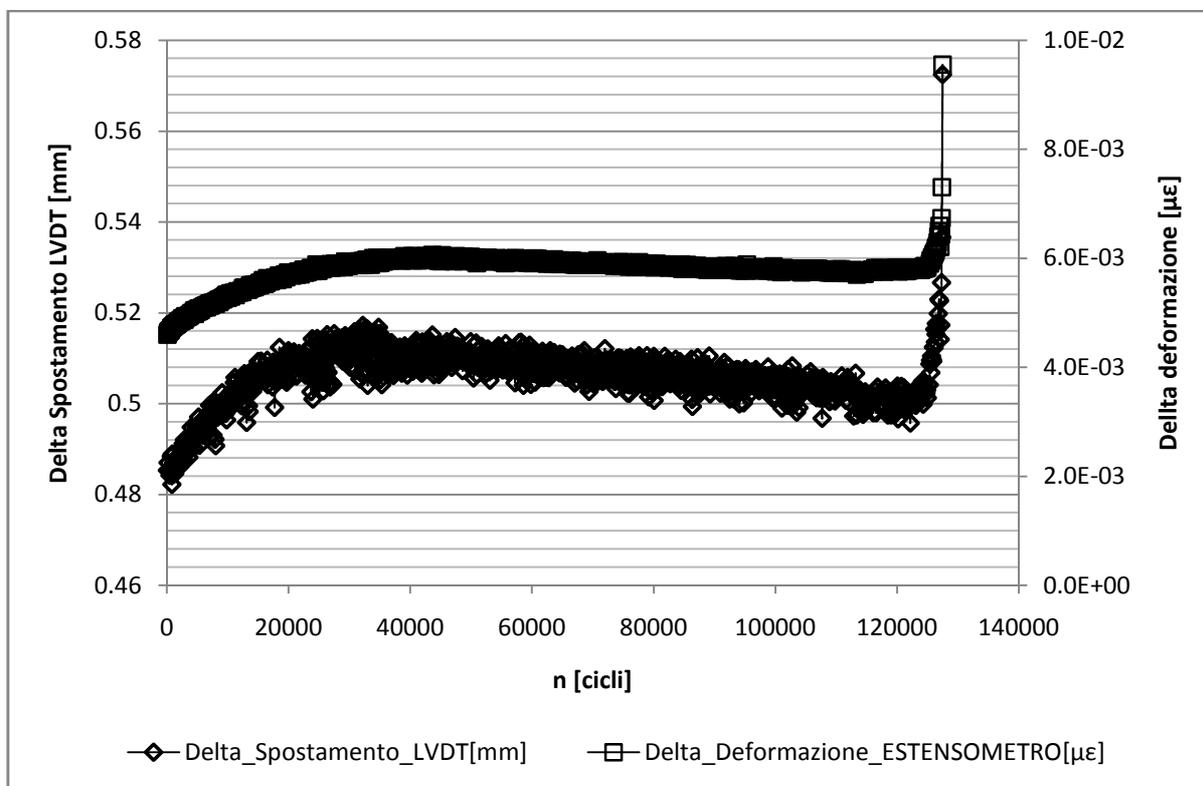


Figura 3.19:Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [με] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R-1_21

PROVA : Traz_liscio_R-1_18				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 24.74 kN	F _{MIN} = -24.74 kN	F _{MED} = 0 kN	F _a = 24.74 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 315 MPa	σ_{MIN} = -315 MPa	σ_{MED} = 0 MPa	σ_a = 315 MPa
ROTTA:	a 588680 cicli			

A 540018 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

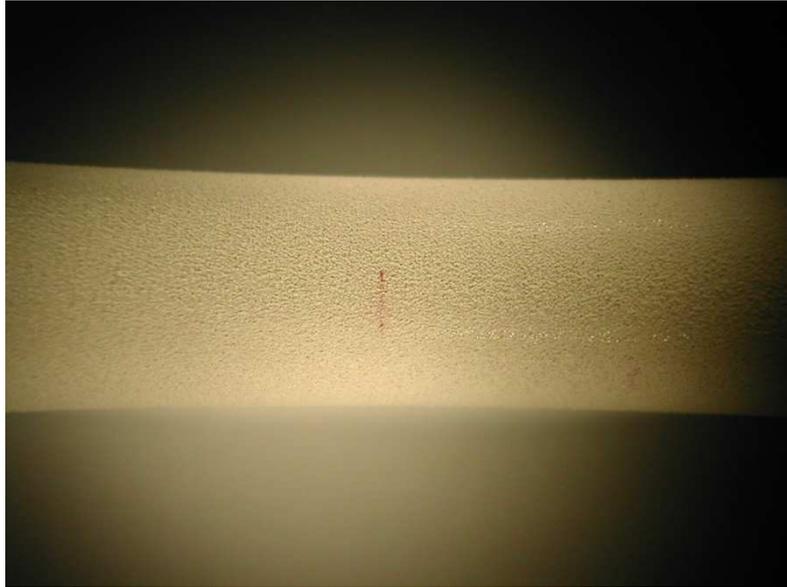
Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 480pixel

Diametro provino:Ø10 mm

Lunghezza dell'unica cricca visibile: 10 pixel

480pixel : 10mm = 10pixel : X mm → X = lunghezza cricca =0.208 mm

A 580025 cicli:



HP:pixel di forma quadrata

Lunghezza linea verticale (corrispondente al diametro del provino): 466pixel

Diametro provino: \varnothing 10 mm

Lunghezza della cricca con dimensioni maggiori: 25 pixel

$466\text{pixel} : 10\text{mm} = 25\text{pixel} : X\text{ mm} \rightarrow X = \text{lunghezza cricca} = 0.536\text{ mm}$

A 588681 cicli: Rottura del provino



n° prova	n° cicli	lunghezza cricca [mm]
5° prova liquidi penetranti	540018	0.208
6° prova liquidi penetranti	580025	0.536
rottura provino	588680	6

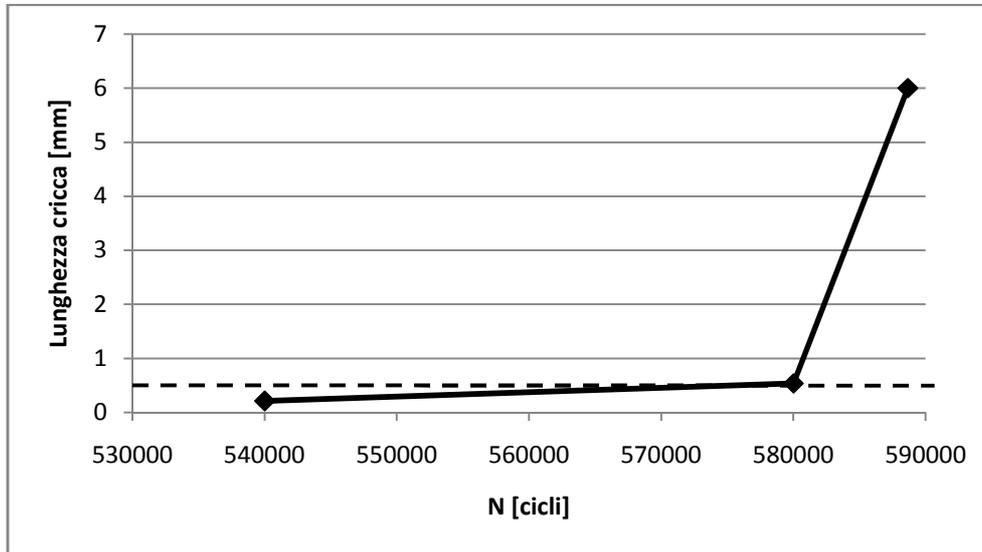


Figura 3.20: Stima dell'andamento della lunghezza della cricca maggiore e della cricca minore in funzione del numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R-1_18

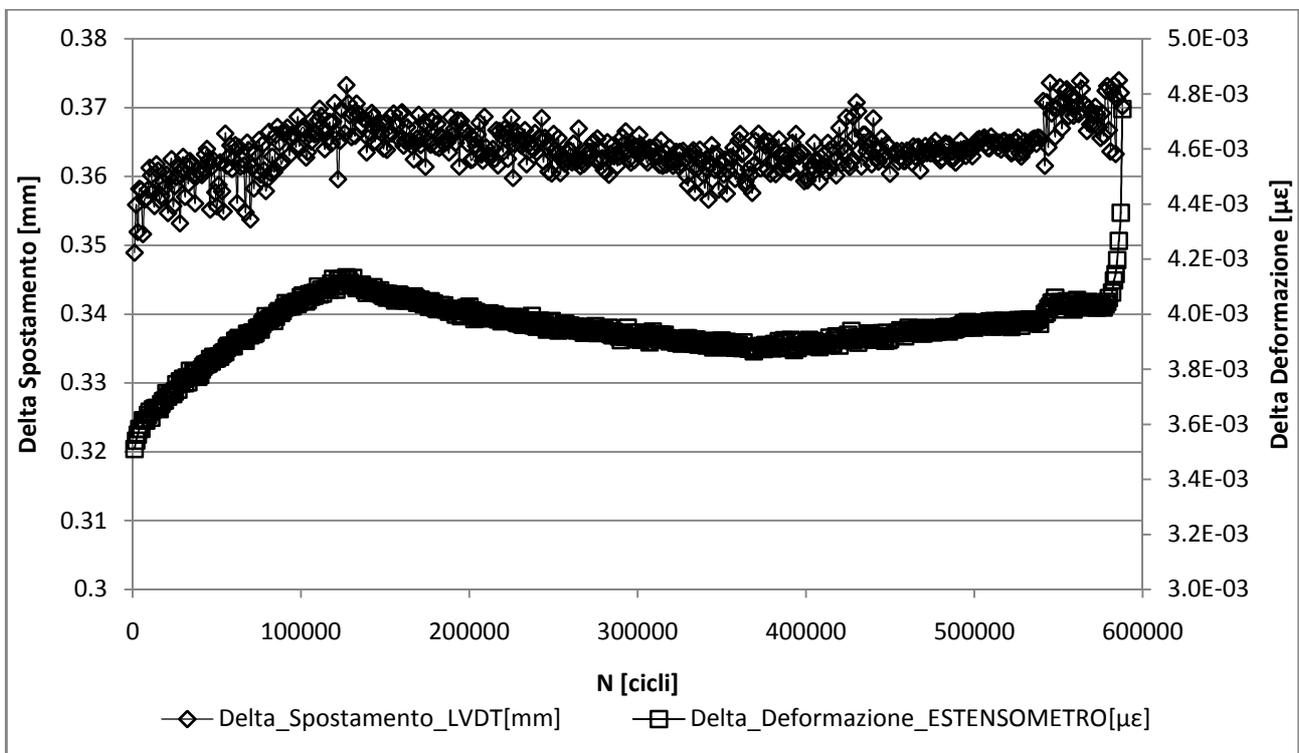


Figura 3.21: Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [µε] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R-1_18

3.11 CONCLUSIONI

A seguito del monitoraggio dell'innesco di cricca, si riporta di seguito la Figura 3.22 per poter fare sintesi e per visualizzare quanto precede la formazione di una cricca di ampiezza pari a 0.5mm (in termini di cicli) rispetto al numero di cicli a rottura.

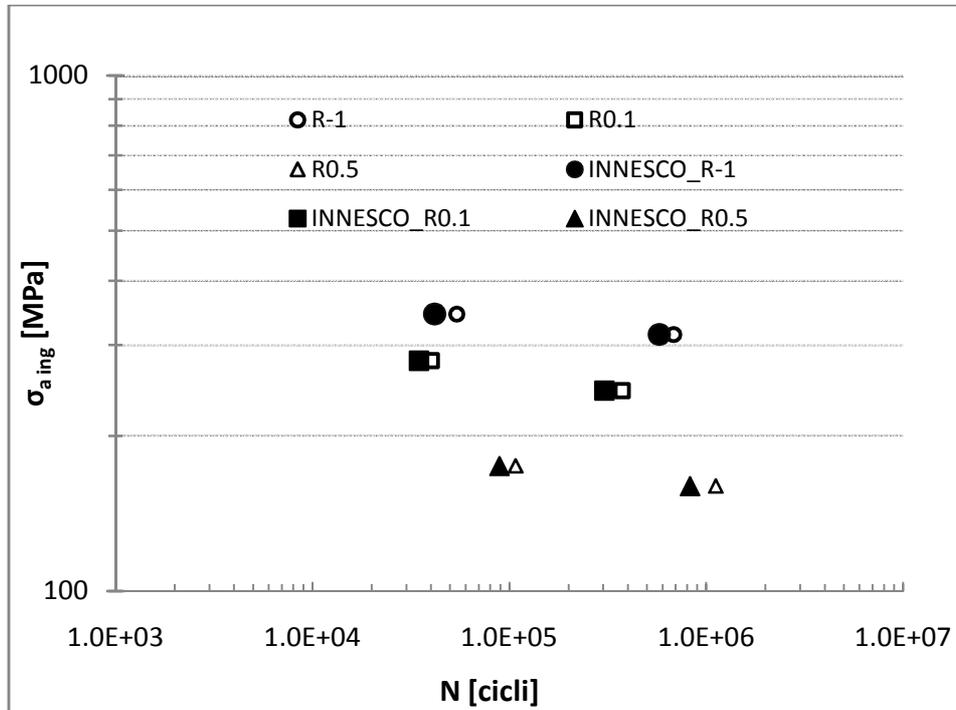


Figura 3.22: Visualizzazione della formazione di una cricca di lunghezza 0.5mm rispetto alla vita a termine espressa come numero di cicli a rottura su provini lisci testati a tre differenti rapporti di ciclo per prove a fatica assiale

Di seguito è riportata la tabella che evidenzia, in termini di percentuali di vita del provino, la formazione di una cricca di lunghezza pari a 0.5mm rispetto al numero di cicli a rottura.

	Alto carico	Basso carico
	$N_{i,0.5mm}/N_f$	$N_{i,0.5mm}/N_f$
Traz_liscio_R-1	0.77	0.84
Traz_liscio_R0,1	0.87	0.81
Traz_liscio_R0.5	0.83	0.74

Tabella 3.1: Percentuale di vita per giungere alla formazione di una cricca di lunghezza pari a 0.5mm su provini lisci testati a tre differenti rapporti di ciclo per prove a fatica assiale

L'informazione data dalla Tabella 3.1 è di fondamentale importanza in quanto l'analisi in termini energetici (grafici $Q-N_f$) che seguiranno nei capitoli successivi, è sempre espressa in funzione del numero di cicli a rottura. Questo non è sempre corretto in quanto la valutazione energetica dovrebbe essere fatta in funzione del numero di cicli ad innesco. Questo perché, qualora si innescasse una cricca sotto lo spot di colla che vincola la termocoppia al provino, la misura della potenza termica dissipata, espressa dall'equazione(1-9) sarebbe errata!



Capitolo 4: VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI LISCI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOEHLER CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO

4.1 PREMESSA

In questo capitolo vengono presentati i risultati di una serie di prove sperimentali eseguite in controllo di forza su macchina MFL assiale su provini lisci di acciaio inossidabile AISI304L trafilati a freddo. Le prove in controllo di forza sono state eseguite imponendo un carico di tipo sinusoidale a frequenze variabili tra 0,3 e 26Hz e per varie ampiezze di tensione. Per controllare la temperatura del provino sotto al limite massimo dei 60-65°C e allo stesso tempo accelerare la prova, è stato utilizzato un ventilatore. Circa 10 minuti prima di ogni raffreddamento si spegneva il ventilatore e contemporaneamente si riduceva la frequenza di prova in modo da mantenere costante la temperatura del materiale e porlo in equilibrio termico con l'ambiente. Quindi si interrompeva bruscamente l'applicazione del carico per misurare il gradiente di raffreddamento. Sono state eseguite prove assiali a diversi rapporti di ciclo quali, $R=0.5$, $R=0,1$, $R=-1$, $R=-2$, $R=-1.5$ 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.

Si sono 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 quindi alla rigidità del provino testato) 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 tipo T rame-costantana incollate in corrispondenza alla sezione minima del provino, ovvero dove le tensioni raggiungono il valore nominale corrispondente al diametro di 10mm 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.

4.2 GEOMETRIA DEI PROVINI

Per la nuova campagna di prove a rapporto di ciclo $R=0.5$ e per rimarcare alcuni punti sulla curva a rapporto di ciclo $R=-1$ e $R=0.1$, sono stati utilizzati i provini con una nuova geometria riportata di seguito nella Figura 4.1.

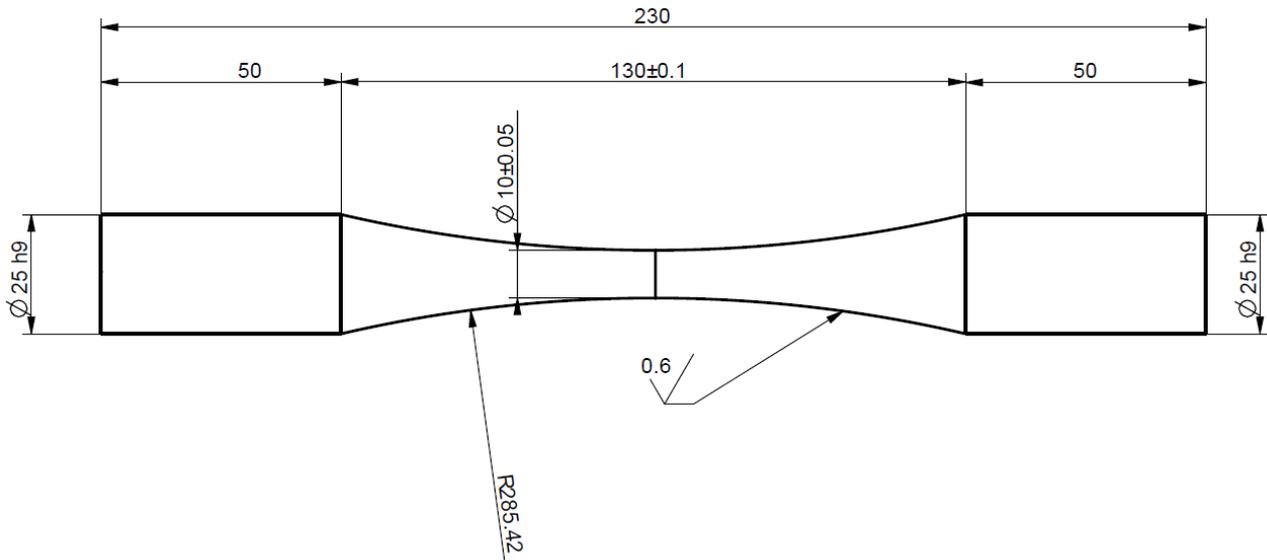


Figura 4.1: Geometria per i provini denominati "lisci" utilizzata per rapporti di ciclo $R=-1$, $R=0.1$, $R=0.5$

La nuova geometria di provini lisci prevede un diametro, nella sezione netta, di $\varnothing 10$ mm (anziché $\varnothing 15$ mm utilizzata nella campagna prove riportata in [9]) allo scopo di ridurre le forze da applicare al provino a parità di tensione applicata. Questo ha consentito di ridurre solo in parte i problemi di scivolamento tra provino e afferraggi (ganasce) della MFL assiale, in quanto quest'ultimi risultano molto usurati. Rispetto alla riduzione della sezione netta e,

quindi alla riduzione del raggio di raccordo tra il diametro di afferraggio $\varnothing 25\text{mm}$ e il diametro $\varnothing 10\text{mm}$, la variazione del coefficiente K_t è trascurabile e sempre definibile di valore unitario. Per l'ulteriore campagna di prove a rapporto di ciclo $R=-2$ e $R=-1.5$ sono stati utilizzati i provini con una nuova geometria riportata di seguito nella Figura 4.2

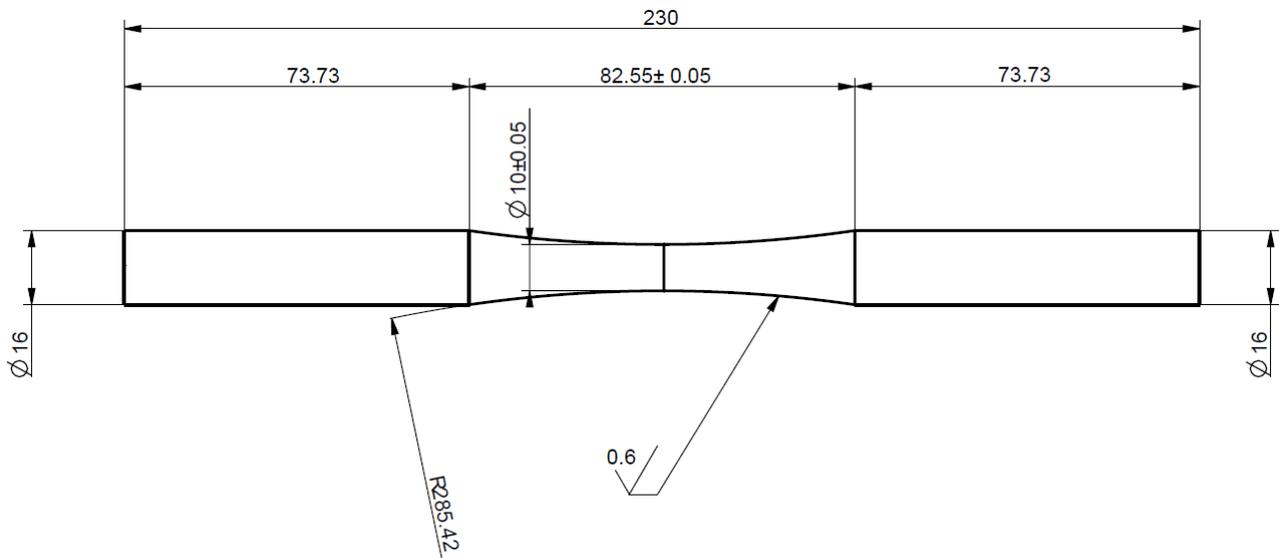


Figura 4.2: Geometria per i provini denominati "lisci" utilizzata per rapporti di ciclo $R=-1.5$ e $R=-2$

Quest'ultima geometria di provini lisci prevede la riduzione della luce libera ad inflessione che passa da 130mm a 82.5mm. Questa riduzione è stata ottenuta in quanto si è partiti da provini riportati in Figura 4.1 a cui si sono tornite le estremità di afferraggio portandole da $\varnothing 25\text{mm}$ a $\varnothing 16\text{mm}$ (diametro minimo per garantire una buona chiusura sulle ganasce della MFL assiale).

4.3 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 σ_a . Sono dunque presentati grafici σ_a-N_f per rapporti di ciclo $R=-1.5$, $R=-1$, $R=0,1$, $R=0.5$. 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 ultime misurazioni sono state possibili per i provini in cui è stato utilizzato l'estensometro assiale.

Come visibile nelle figure riportate di seguito e, più in generale, nelle schede tecniche dedicate ai singoli provini riportate in appendice, le misure dell'estensometro non sono sempre di facile interpretazione. Essendo infatti uno strumento molto sensibile si notano alcune discontinuità. 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. 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 decisamente più grossolane.

4.3.1 Risultati delle prove assiali a R-1

La Tabella 4.1 riporta tutte le prove eseguite dal sottoscritto mentre il Grafico 4-1 riporta i risultati di tutte le prove di fatica assiale eseguite su provini lisci a rapporto di ciclo R-1 comprese quelle riportate in [9]. Inoltre le prove sono sintetizzate in termini di ampiezza di tensione reale (che coincide con l'ampiezza di tensione ingegneristica in quanto non si raggiunge mai lo snervamento del materiale), con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in tensione T_σ ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	$\sigma_{a \text{ true}} [\text{MPa}]$	$\sigma_{m \text{ true}} [\text{MPa}]$	$\sigma_{\max \text{ true}} [\text{MPa}]$	$f_{\text{prova}} [\text{Hz}]$
Traz_liscio_R-1_17*	775034	315	0	315	6.5
Traz_liscio_R-1_18*	588681	315	0	315	6.5
Traz_liscio_R-1_19*	10082	350	0	350	2
Traz_liscio_R-1_20*	23520	345	0	345	2.5
Traz_liscio_R-1_21*	127570	345	0	345	2.5
Traz_liscio_R-1_22*	84203	345	0	345	2.5

* no acquisizioni calorimetriche

** numero cicli a rottura

Tabella 4.1: Listato delle prove eseguite su provini lisci (di Figura 4.1) ad R=-1 nel periodo compreso tra il 21/6 e il 1/8

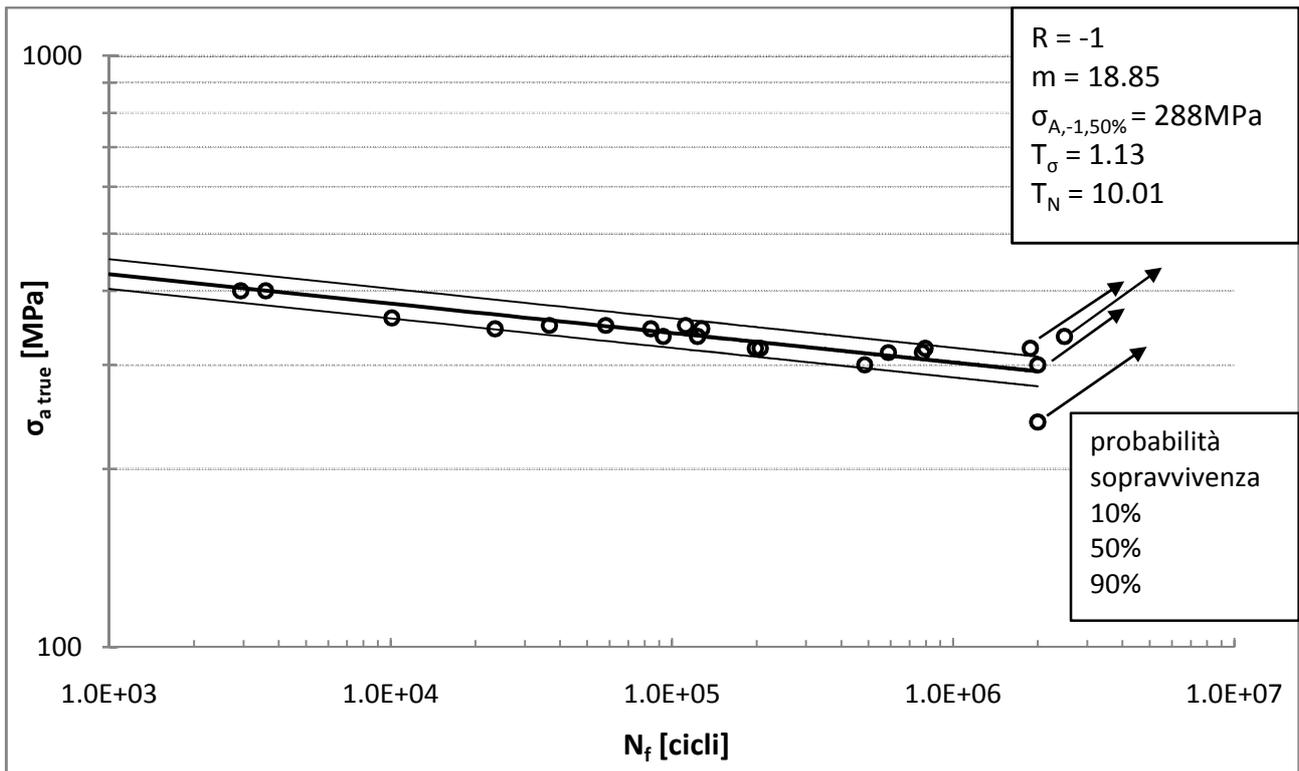


Grafico 4-1: Curva di Wohler con $\sigma_{a,true}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ed in [9] ad R=-1

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.13^{18.85} = 10.01$$

4.3.2 Risultati delle prove assiali a R=0,1

La Tabella 4.2 e i corrispettivi Grafico 4-2 e Grafico 4-3 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R=0,1 sintetizzati in termini di ampiezza di tensione ingegneristica e reale, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in tensione T_σ ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{a \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ true}}$ [MPa]	Q [kJ/m ³ ciclo]	f [Hz]
Traz_liscio_R0,1_18	324022	245	252.38	299.4	308.46	544	560.85	53.6	8-9
Traz_liscio_R0,1_19	472269	245	252.38	299.4	308.46	544	560.85	63.4	8-9
Traz_liscio_R0,1_20*	46585	280	327.8	342.2	400.64	622	728	/	4-6
Traz_liscio_R0,1_21*	322457	245	252.38	299.4	308.46	544	560.85	/	9.5

* no acquisizioni calorimetriche

**numero di cicli a rottura

Tabella 4.2: Listato delle prove eseguite su provini lisci (di Figura 4.1) ad R=0.1 nel periodo compreso tra il 24/5 e il 28/5

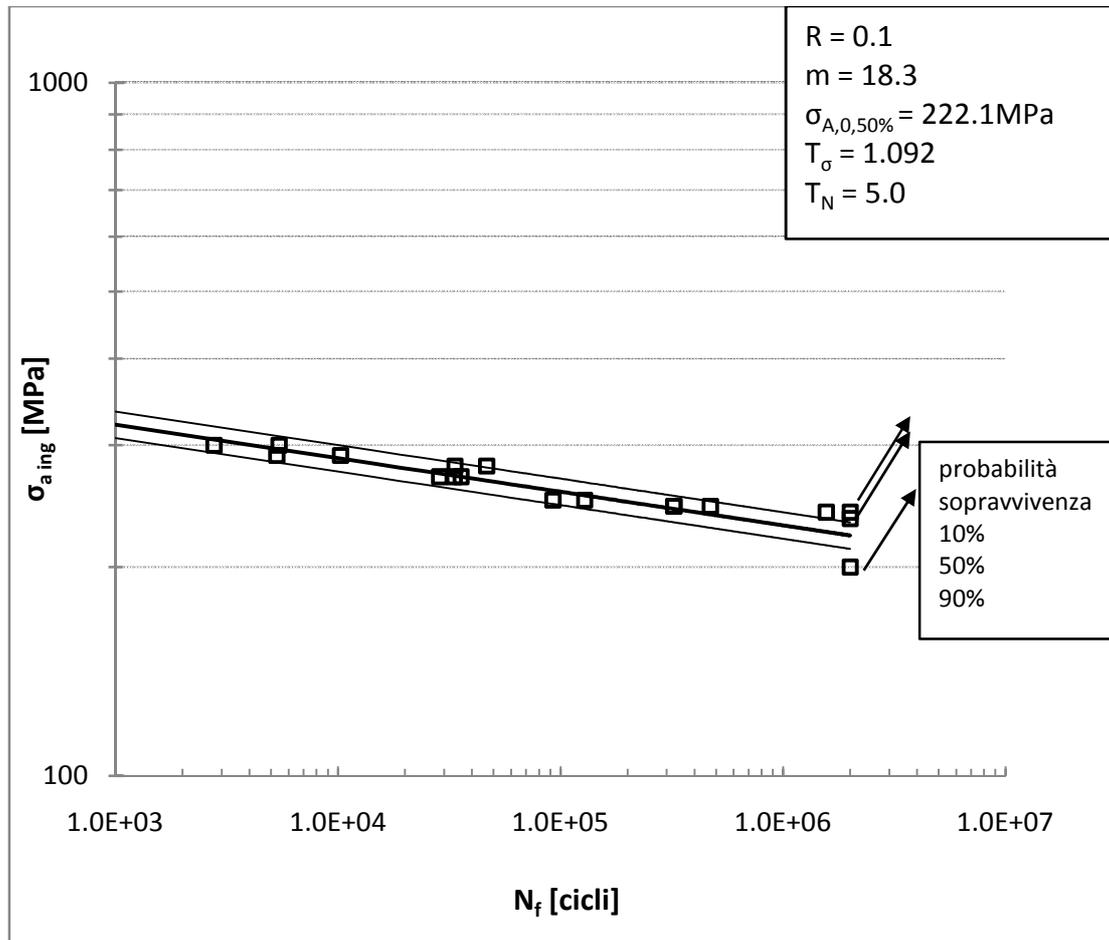


Grafico 4-2: Curva di Wohler con $\sigma_{a \text{ ing}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ed in [9] ad R=0.1

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.092^{18.3} = 5$$

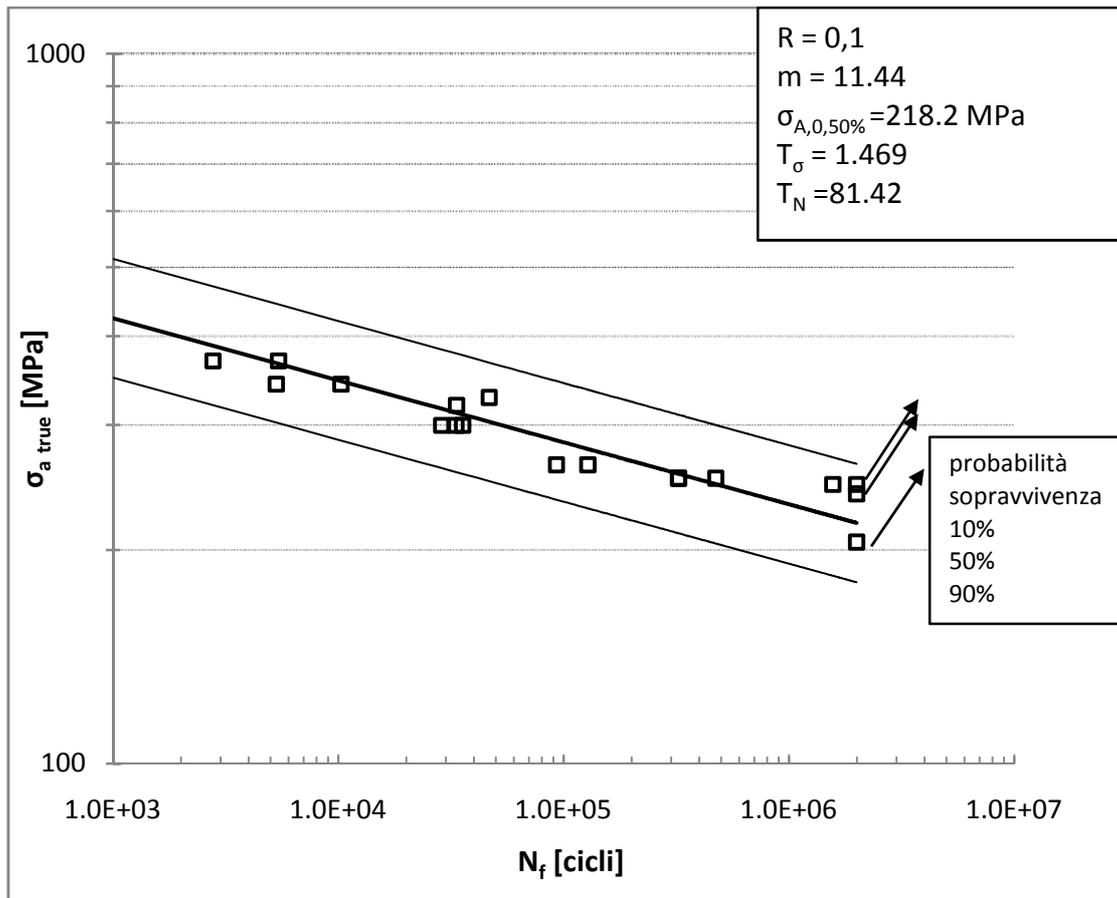


Grafico 4-3: Curva di Wohler con $\sigma_{a \text{ true}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ed in [9] ad $R=0.1$

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.469^{11.44} = 81.42$$

4.3.3 Risultati delle prove assiali a $R=0,5$

La Tabella 4.3 e i corrispettivi Grafico 4-4 e Grafico 4-5 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad $R=0,5$ sintetizzati in termini di ampiezza di tensione ingegneristica e reale, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in tensione T_σ ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N _f **	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _{a ing} [MPa]	σ _{a true} [MPa]	σ _{m ing} [MPa]	σ _{m true} [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max true} [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R0.5_01	370837	19.51	160	197.53	480	592.59	640	790	18-22
Traz_liscio_R0.5_03	2000000	11.90	155	187.17	465	561.53	620	749	26
Traz_liscio_R0.5_04	1350165	13.98	165	213.07	495	639.20	660	852	20-22
Traz_liscio_R0.5_05	101003	17.70	175	270.05	525	810.15	700	1080	20
Traz_liscio_R0.5_06	118753	19.89	175	270.05	525	810.15	700	1080	15
Traz_liscio_R0.5_07	517578	15.43	165	213.07	495	639.20	660	852	22
Traz_liscio_R0.5_08 *	102404	/	175	270.05	525	810.15	700	1080	15
Traz_liscio_R0.5_09 *	865881	/	160	197.53	480	592.59	640	790	18
Traz_liscio_R0.5_10 *	2000000	/	140	153.50	420	460.51	560	614	5
Traz_liscio_R0.5_11	1364468	14.75	160	197.53	480	592.59	640	790	22

* no acquisizioni
calorimetriche

**numero di cicli a
rottura

Tabella 4.3: Listato delle prove eseguite su provini lisci (di Figura 4.1) ad R=0.5 nel periodo compreso tra il 27/5 e il 12/6

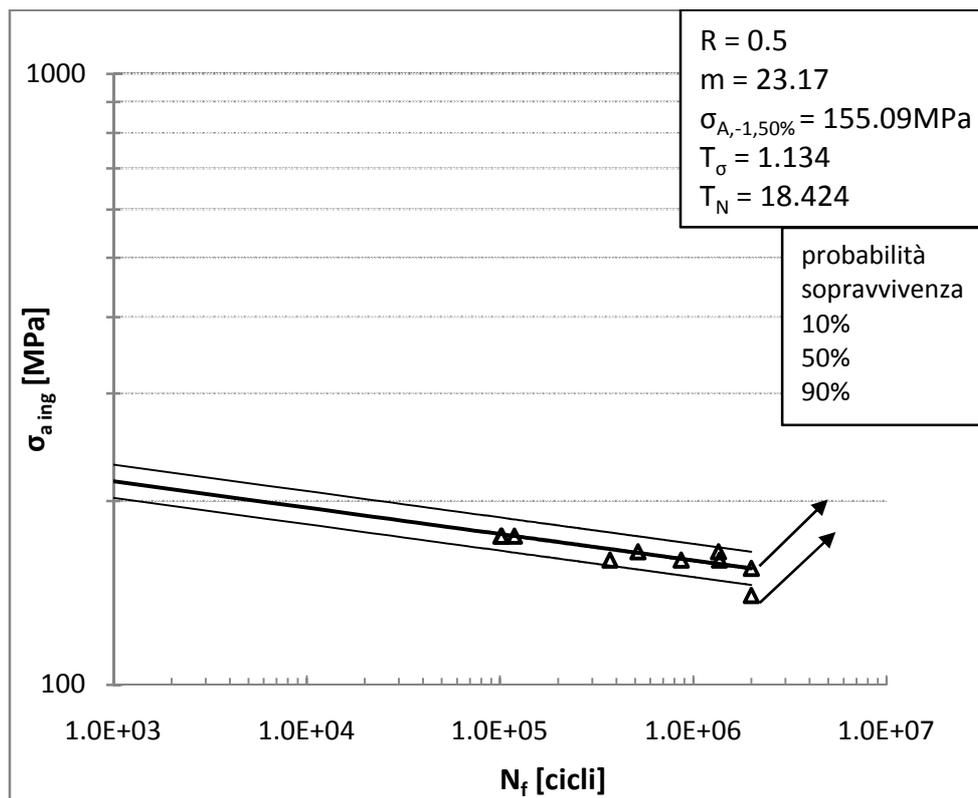


Grafico 4-4: Curva di Wohler con $\sigma_{a \text{ ing}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ad R=0.5

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.134^{23.17} = 18.42$$

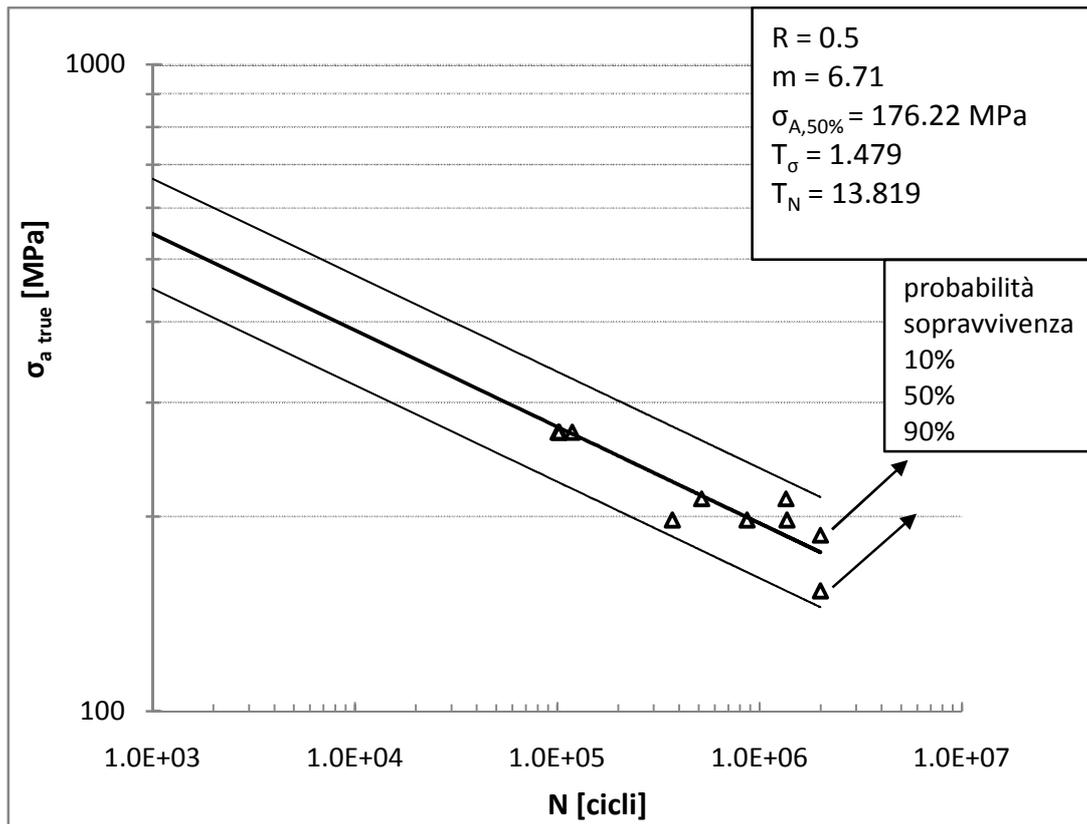


Grafico 4-5: Curva di Wohler con $\sigma_{a \text{ true}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ad $R=0.5$

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_{\sigma}^m = 1.479^{6.71} = 13.819$$

4.3.4 Risultati delle prove assiali a $R=-1,5$

La Tabella 4.4 e nel corrispettivo Grafico 4-6 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad $R=-1,5$ sintetizzati in termini di ampiezza di tensione reale, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in tensione T_{σ} ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	Q [kJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{a \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ true}}$ [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R-1.5_02	104074	720	355	355	-71	-71	284	284	1-1.5
Traz_liscio_R-1.5_04	166909	718.68	350	350	-70	-70	280	280	1.5-2.5
Traz_liscio_R-1.5_05	182374	655.24	345	345	-69	-69	276	276	1.5-2
Traz_liscio_R-1.5_06	2000000	259.15	330	330	-66	-66	264	264	1.5-2.5
Traz_liscio_R-1.5_07	170434	657.29	340	340	-68	-68	272	272	1.5-2

** numero cicli a rottura

Tabella 4.4: Listato delle prove eseguite su provini lisci (di Figura 4.1) ad R=-1.5 nel periodo compreso tra il 15/11 e il 3/12

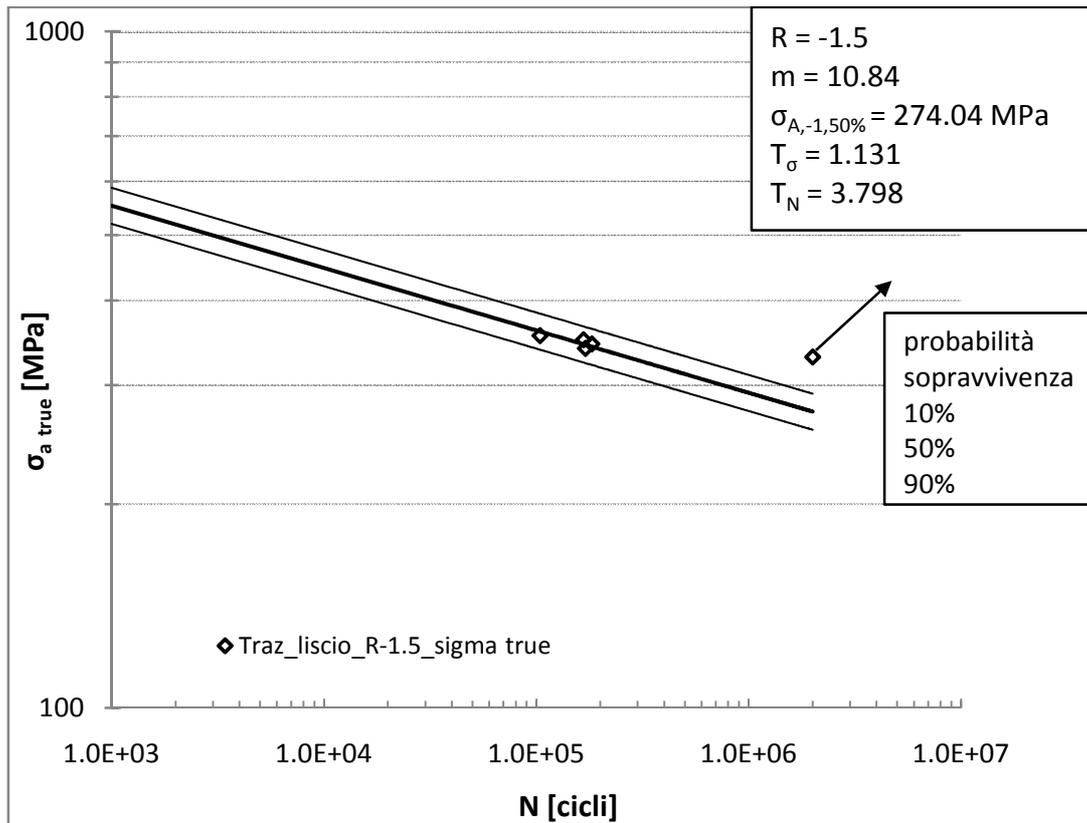


Grafico 4-6: Curva di Wohler con σ_a true in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci testati in questo lavoro di tesi ad R=-1.5

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.131^{10.84} = 3.798$$

4.3.5 Confronto delle prove a R=-1.5, R=-1, R=0.1 e R=0.5 in termini di ampiezza di tensione

Nel Grafico 4-7 e nel Grafico 4-8 si riassumono infine i dati ottenuti in termini di $\sigma_{a\ ing}$ e $\sigma_{a\ true}$ per i quattro diversi rapporti di ciclo per poter effettuare un confronto tra le quattro serie di dati.

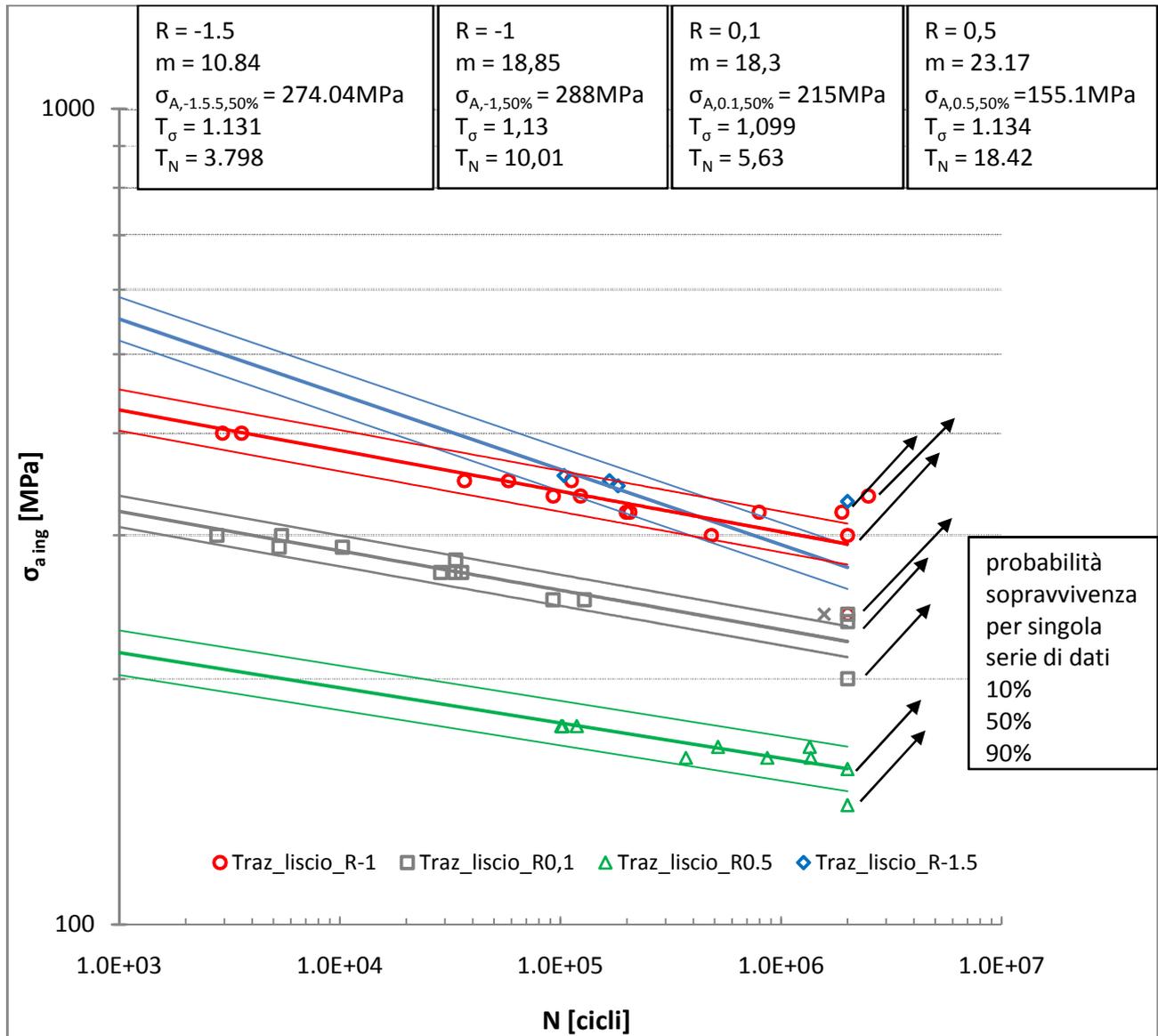


Grafico 4-7: Confronto fra le curve a fatica espresse in termini di $\sigma_{a\ ing}-N_f$ per provini sollecitati a rapporto di ciclo R=-1.5, R=-1, R=0.1, R=0.5

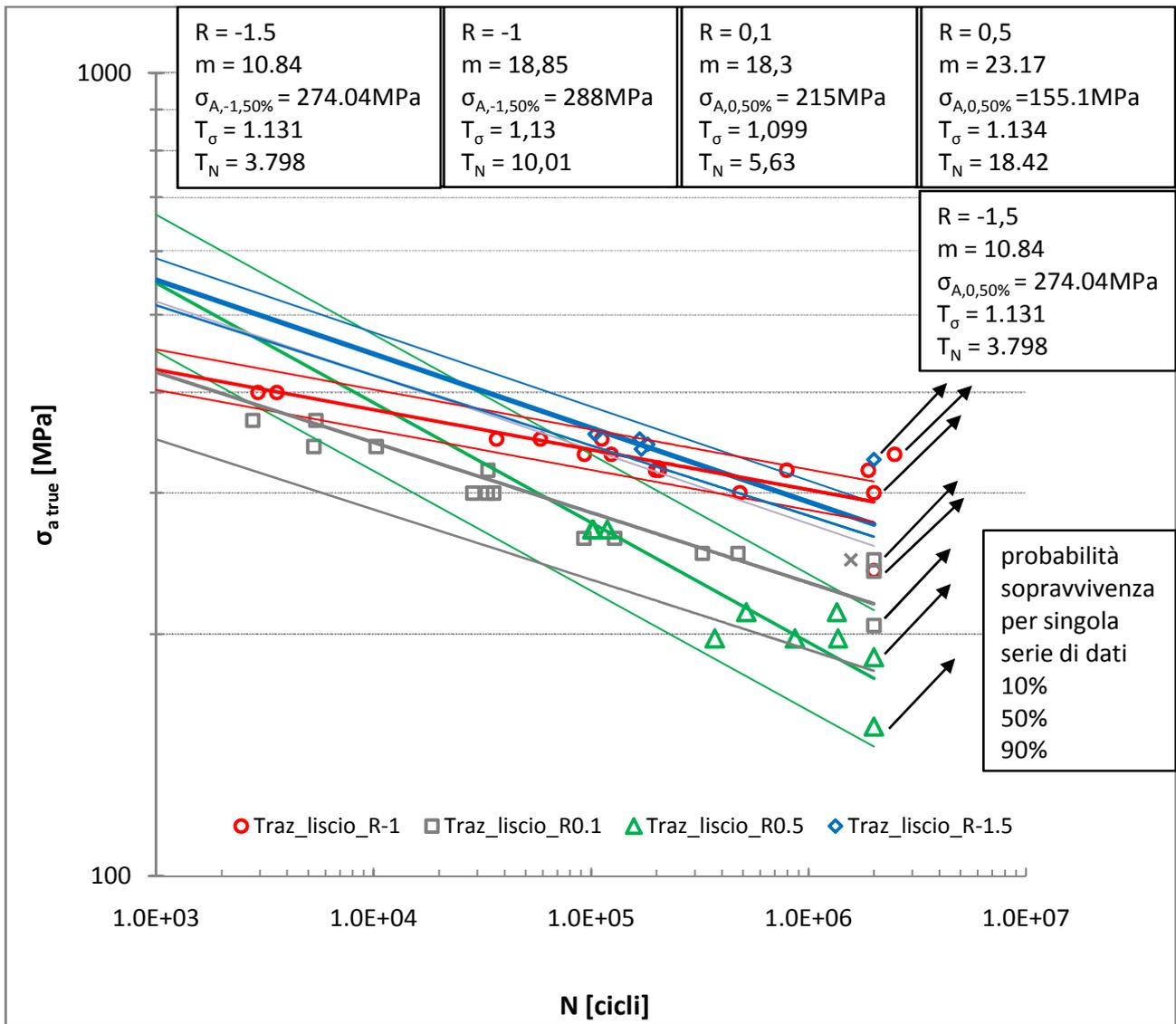


Grafico 4-8: Confronto fra le curve a fatica espresse in termini di $\sigma_{a \text{ true}}-N_f$ per provini sollecitati a rapporto di ciclo $R=-1.5$, $R=-1$, $R=0.1$, $R=0.5$

Dall'analisi del Grafico 4-7 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 piuttosto che ad R0.5. Questo fatto è abbastanza intuitivo in quanto, come riportato in [19], il valore della tensione massima è nel primo caso pari al valore dell'ampiezza di tensione $\sigma_{a \text{ ing}}$ mentre nel secondo caso è molto più elevato a causa della presenza di una tensione media maggiore di zero.

Viceversa, non è di facile comprensione il Grafico 4-8 che mette a confronto i diversi rapporti di ciclo secondo l'ampiezza di tensione $\sigma_{a \text{ true}}$ in cui non si valuta più la tensione ingegneristica

applicata al provino bensì la reale ampiezza di tensione! In particolare le bande di dispersione a rapporto di ciclo $R=0.1$ e $R=0.5$ cambiano pendenza e intersecano la banda di dispersione ottenuta a rapporto di ciclo $R=-1$ e $R=-1.5$. In effetti, valutando l'ampiezza di tensione reale, si ha un forte aumento di pendenza inducendo un incremento di criticità nel dimensionamento a fatica. Questo incremento di pendenza è dovuto al fatto che per aver un numero sufficiente di punti sperimentali per poi poter tracciare una curva, si è dovuti uscire dal campo lineare elastico con un conseguente plasticizzazione del provino in corrispondenza della sezione netta e di conseguenza una riduzione della sezione resistente. Come evidenziato da precedenti lavori, si può far notare che il materiale AISI 304L cambia notevolmente la sua sensibilità all'azione affaticante a seguito di una decisa plasticizzazione.

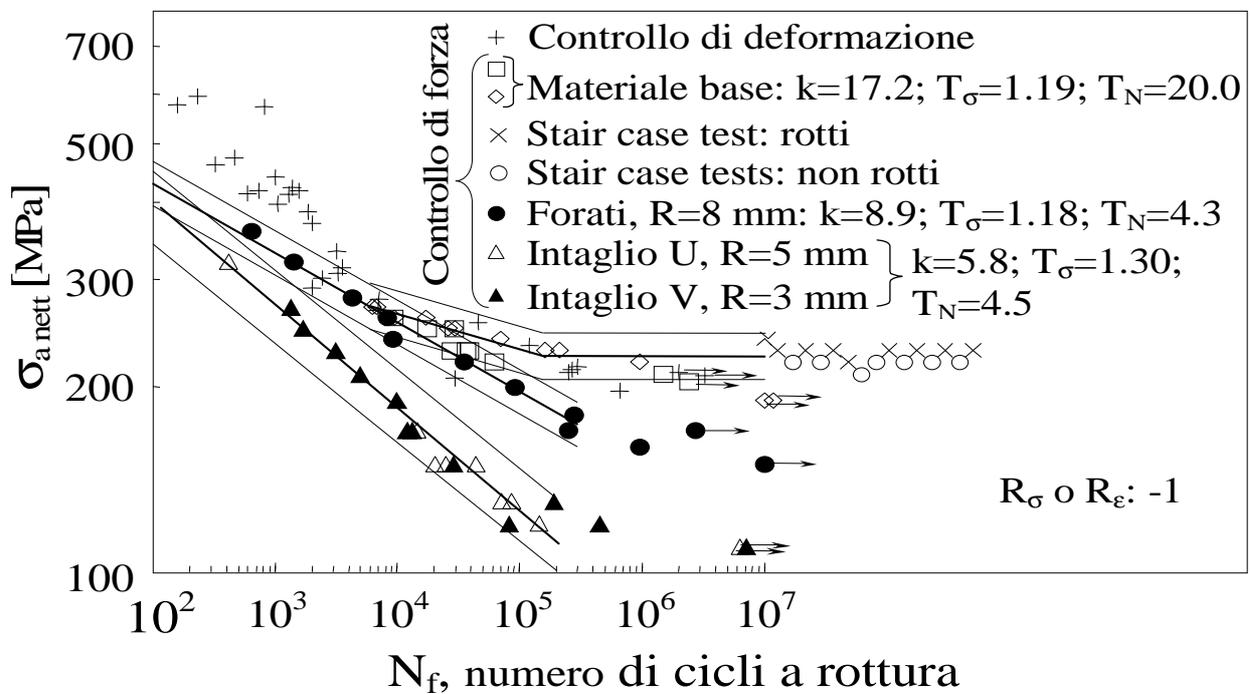


Figura 4.3: Sintesi dei risultati delle prove a fatica in termini di ampiezza di tensione netta (circa 100 dati) eseguite su acciaio AISI 304L e tratto da [20]

Come si può notare dal grafico di Figura 4.3 per le prove eseguite in controllo di deformazione, i cui risultati sono stati pubblicati in [19], si può notare come la curva assuma due pendenze. Un primo tratto molto pendente per numero di cicli a rottura compreso tra 100 e 10000 ed un secondo tratto meno pendente compreso tra 10000 e 2000000. La forte pendenza del primo tratto è dovuta al fatto che le prove in controllo di deformazione abbiano imposto una notevole plasticizzazione del materiale ridefinendo così, la sua reale sensibilità al carico a affaticante.

4.4 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA

In questo paragrafo si presentano i risultati di tutte le prove di fatica analizzati in termini di energia Q dissipata dal materiale verso l'ambiente. Sono dunque presentati i grafici $Q-N_f$ per il rapporti di ciclo $R=-1.5$, realizzata con provini lisci di geometria riportata in Figura 4.2, e per i rapporti di ciclo $R=-1$, $R=0.5$, $R=0.1$ in cui si è utilizzato la geometria di provino liscio riportate in Figura 4.1.

Il valore di Q è rilevabile solo quando la temperatura del provino si è stabilizzata al fine di rientrare nelle condizioni al contorno che portano dall'equazione espressa in termini di potenza (1-7), all'equazione (1-8) di capitolo 1.

Di seguito, in Figura 4.4, è riportato un classico esempio dell'andamento della temperatura di provini con geometria di Figura 4.1 per l'intera durata della prova espressa come rapporto fra il numero di cicli di carico eseguiti N e in numero di cicli a rottura N_f .

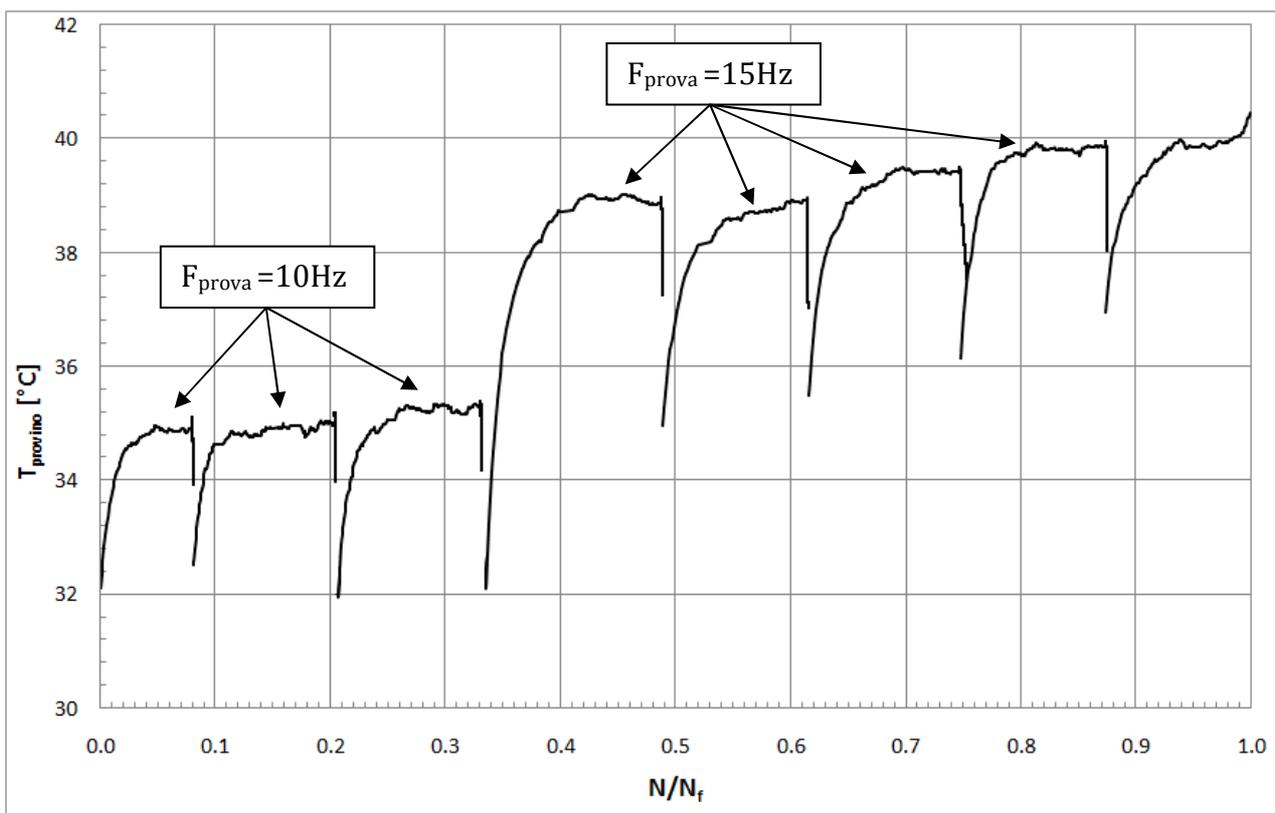


Figura 4.4: Andamento della temperatura del provino Traz_liscio_R0.5_06 (con geometria di Figura 4.1) in funzione del rapporto numero di cicli eseguiti su numero di cicli a rottura (dati della prova: $\sigma_a=175\text{MPa}$, $\sigma_{\max}=700\text{MPa}$, $\sigma_{\min}=350\text{MPa}$, $N_f=118753$ cicli, $T_{\text{amb}}=27.2-28.8^\circ\text{C}$)

E' possibile notare in Figura 4.4 i 7 raffreddamenti eseguiti ogni qualvolta la temperatura del provino si fosse stabilizzata e i diversi livelli di temperatura assunti dal provino in funzione della frequenza di prova.

Ogni qualvolta la temperatura si sia stabilizzata, è quindi possibile interrompere la prova in maniera istantanea al valore di carico in cui si trova la macchina. Qualche secondo prima dell'interruzione dell'applicazione del carico sinusoidale si avvia, ad elevata frequenza di campionamento (22Hz), l'acquisizione del segnale di temperatura proveniente dalla termocoppie in modo tale da poter valutare la velocità di raffreddamento con maggior cura.

Di seguito, in Figura 4.5, è riportato un classico esempio dell'andamento della temperatura di un provino con geometria riportata in Figura 4.1 e rapporto di ciclo $R=0.5$ in funzione del numero di cicli di carico applicati N (provino Traz_liscio_R0.5_06, temperatura ambiente 27.3°C , frequenza di prova 10Hz , $\sigma_a=175\text{MPa}$, $\sigma_{\max}=700\text{MPa}$, $\sigma_{\min}=350\text{MPa}$, $N_f=118753\text{cicli}$).

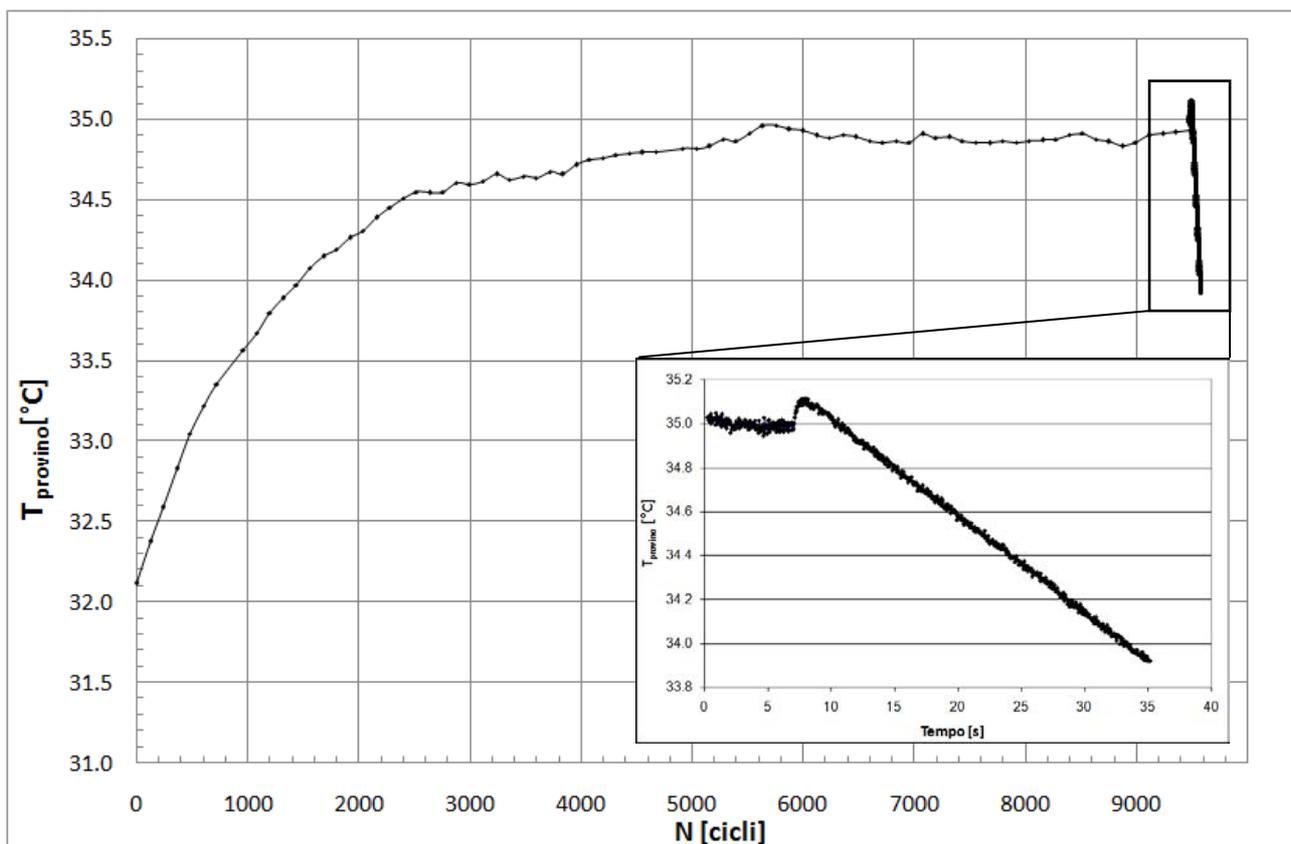


Figura 4.5: Andamento della temperatura ed acquisizione del primo raffreddamento per il provino Traz_liscio_R0.5_06 (con geometria di Figura 4.1) eseguito a temperatura ambiente di 27.3°C ed applicazione del carico alla frequenza di 10Hz .

Una volta acquisito il gradiente di raffreddamento si passa alla valutazione della pendenza del raffreddamento negli istanti immediatamente successivi all'interruzione della prova come mostrato in Figura 4.6 .

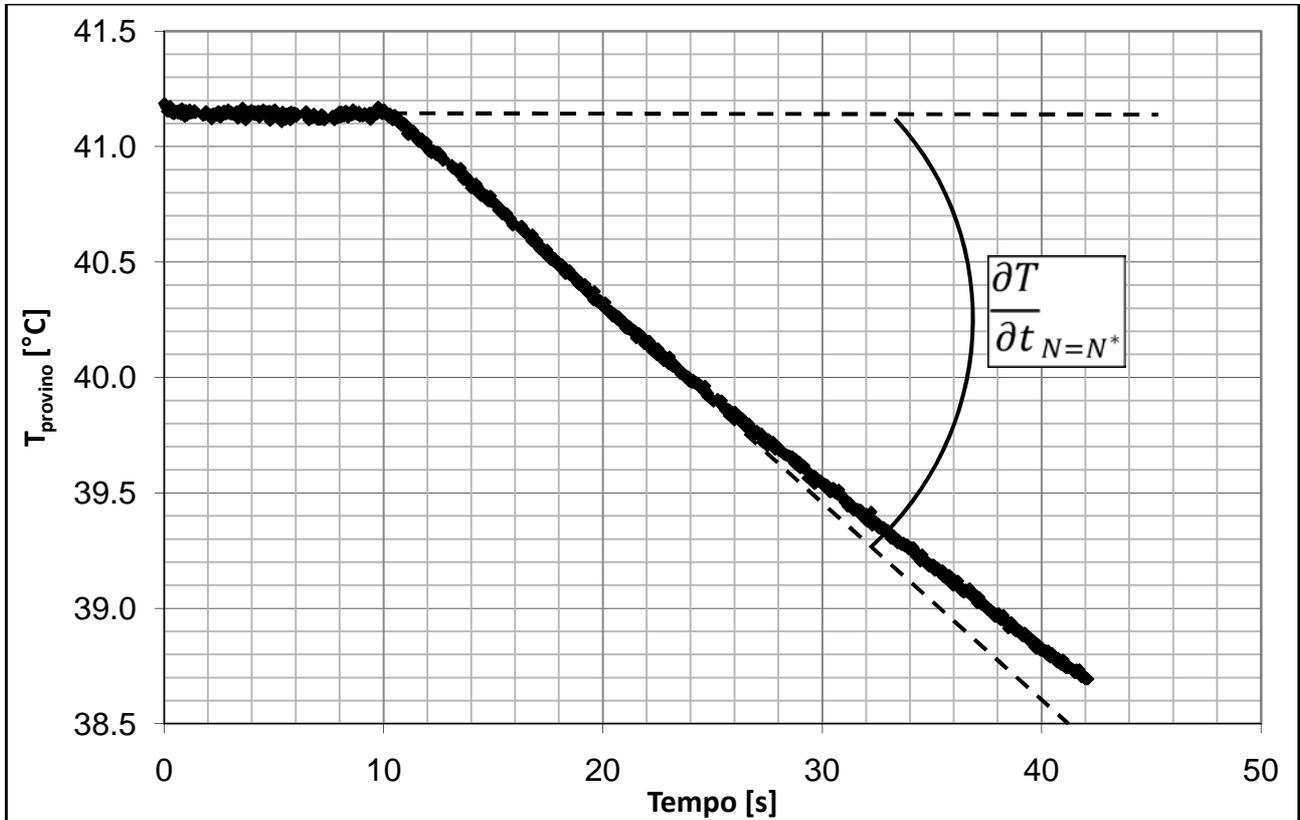


Figura 4.6: Valutazione della velocità di raffreddamento per l'ottavo raffreddamento del provino Traz_liscio_R0.5_07 con geometria di Figura 4.1 eseguito al ciclo 387879 (su una vita di 517578 cicli) e alla temperatura ambiente di 28.2°C e alla frequenza di 22Hz

Successivamente, conoscendo le caratteristiche del materiale ossia, la densità e il calore specifico, si può facilmente ricavare il valore della potenza termica H secondo l'equazione (1-9) e qui sotto riportata:

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

$$H = \rho c_s \frac{dT}{dt} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{s}} \right]$$

Risulta immediato, a questo punto, calcolare il valore dell'energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q secondo la (1-10) e sotto riportata:

$$Q = \frac{H}{f} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{ciclo}} \right]$$

Per uno stesso provino sono stati effettuati più raffreddamenti allo scopo di valutare la variazione di Q in funzione 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 adimensionalizzato rispetto al numero di cicli a rottura. 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 (caso tipico per $R=-1$), mentre in altri casi l'energia dissipata ha un andamento sempre crescente (prove ad alto carico e basso numero di cicli a rottura) oppure semplicemente stazionario (ossia quando non ci sono forti variazioni) come riportato in Figura 4.7 che riassume l'andamento di Q per tutte le prove eseguite a rapporto di ciclo $R=0.5$.

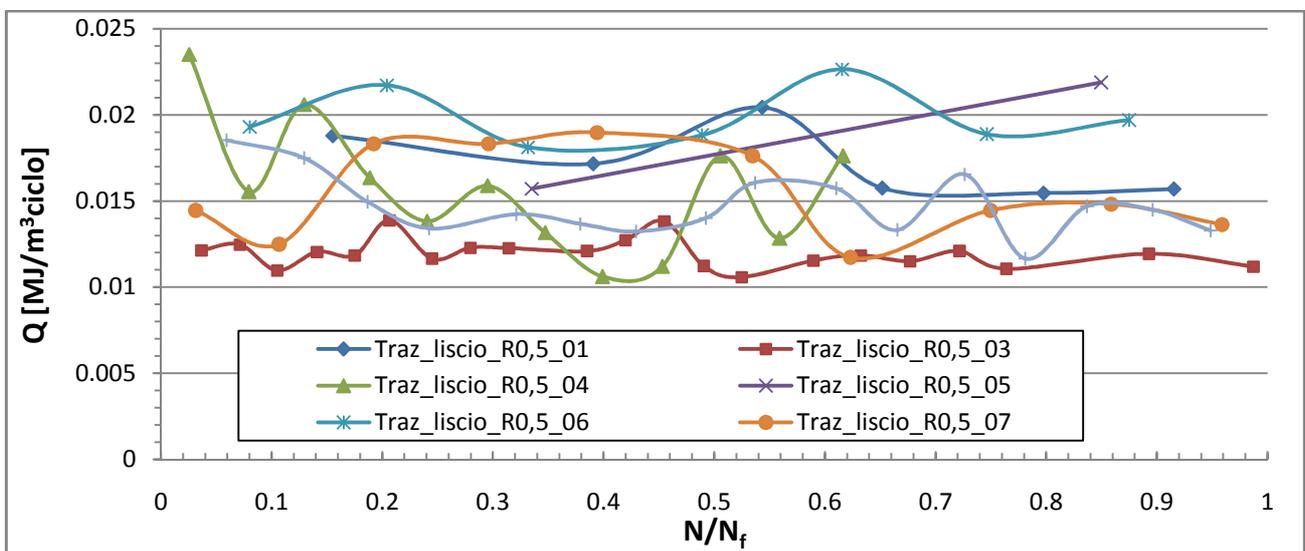


Figura 4.7: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli adimensionalizzato rispetto al numero di cicli a rottura per le geometrie di provini lisci di Figura 4.1 testate a $R=0.5$

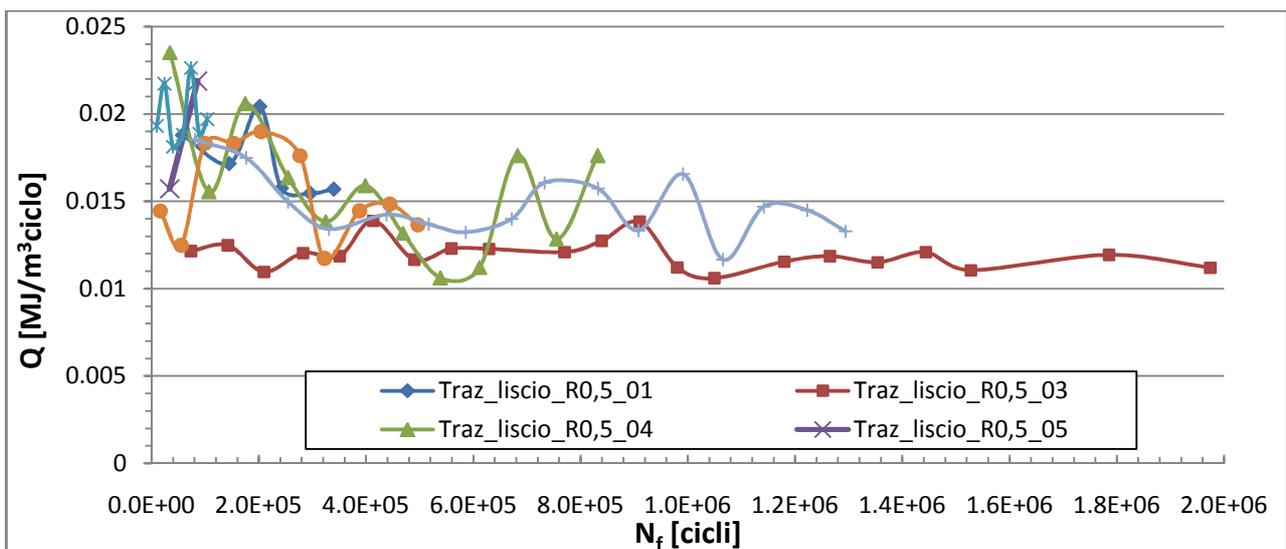


Figura 4.8: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli a rottura per le geometrie di provini lisci di Figura 4.1 testate a $R=0.5$

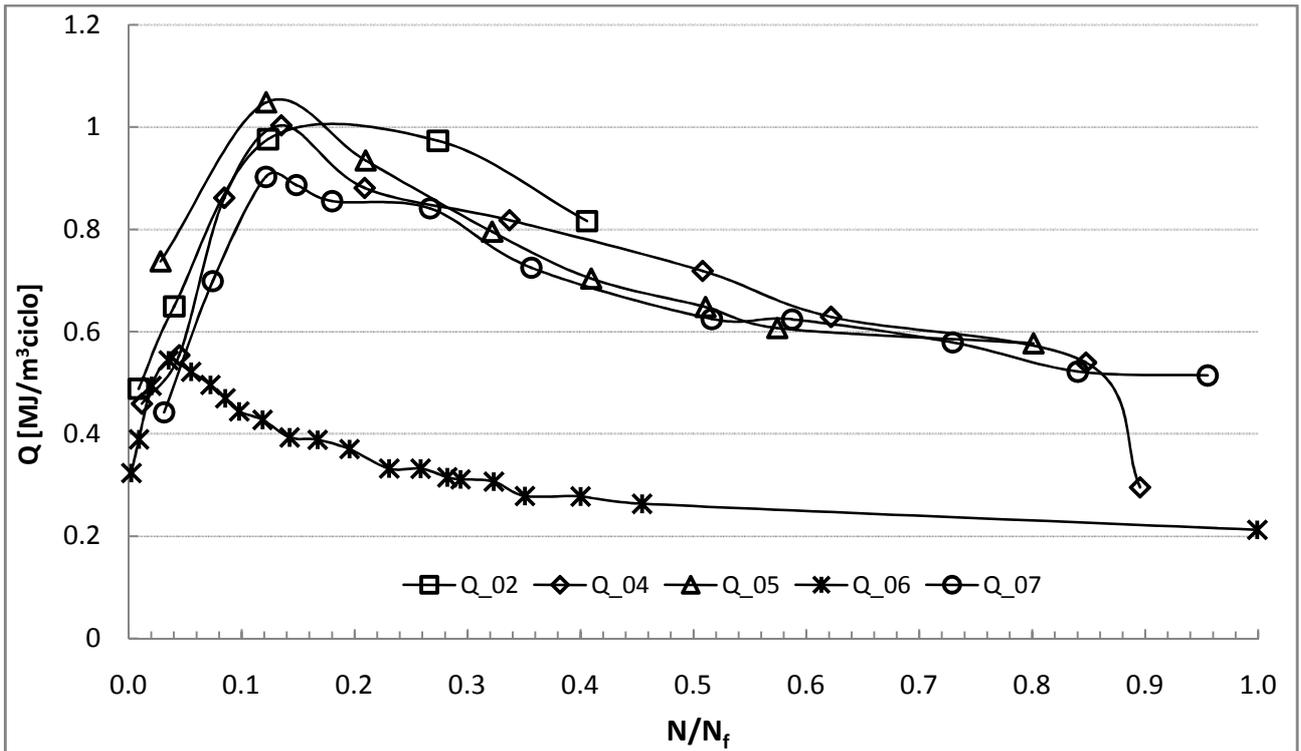


Figura 4.9: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli adimensionalizzato rispetto il numero di cicli a rottura per le geometrie di provini lisci di Figura 4.2 testate a $R=-1.5$

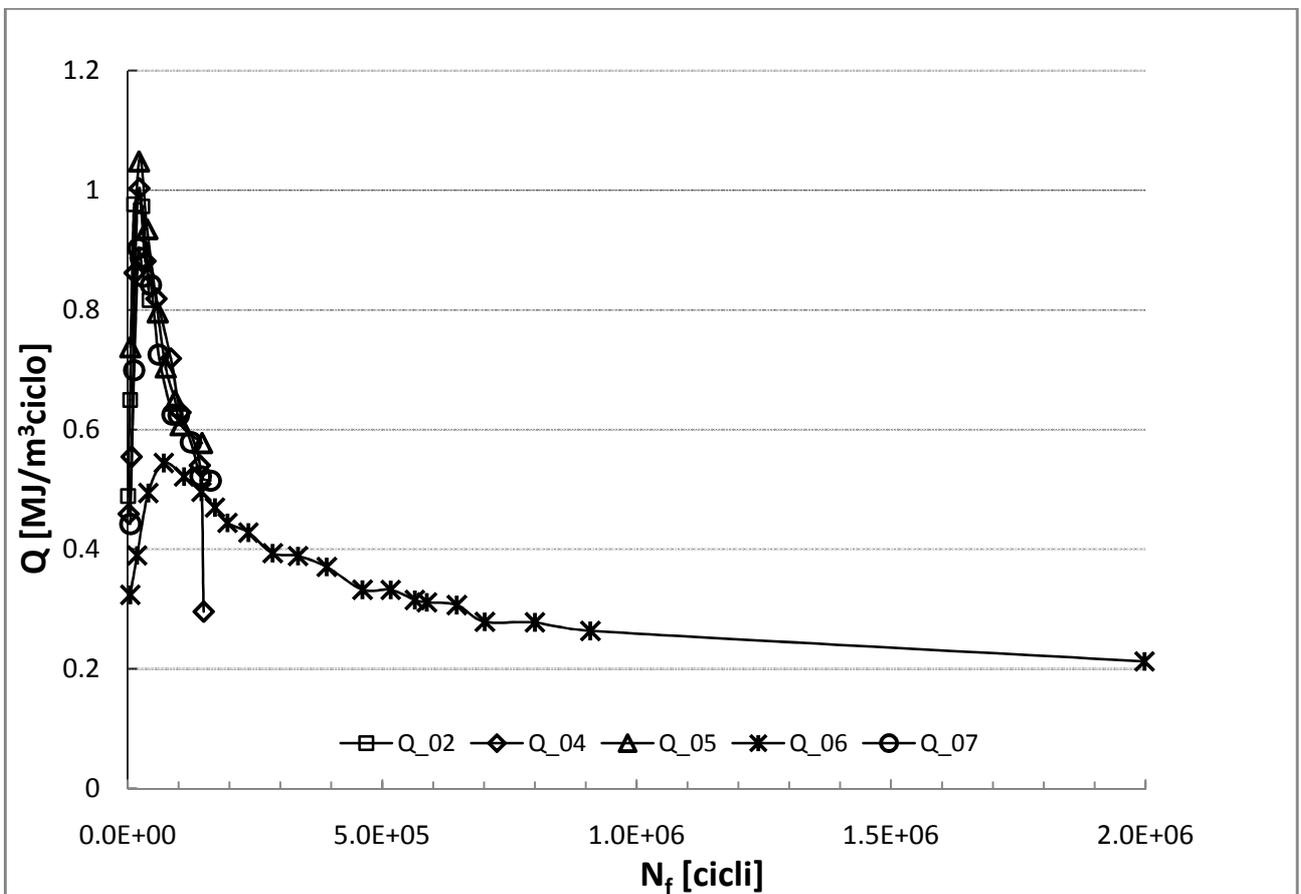


Figura 4.10: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli a rottura per le geometrie di provini lisci di Figura 4.2 testate a $R=-1.5$

Andamento del tutto diverso si ha per i rapporti di ciclo $R=-1.5$ in cui si ritrova in maniera sistematica un aumento iniziale del calore ceduto per poi decrescere verso un valore di stabilizzazione come si può notare in Figura 4.10.

A differenza degli andamenti di Q per i provini intagliati, riportati nel paragrafo 5.5, non ci sono forti escursioni sul valore di Q per una stessa prova in quanto la componente termoelastica della temperatura del provino risulta trascurabile. Quest'assunzione è tanto più reale tanto la temperatura del provino si discosta in valore assoluto dal valore della temperatura ambiente.

Riprendendo quanto detto nel secondo capitolo, l'incremento di temperatura in campo lineare elastico è descritto dall'equazione (2-38) :

$$\Delta T = -\frac{\alpha T \Delta I_{1,\sigma}}{\rho C_\sigma} = -K_m T \Delta I_{1,\sigma}$$

dove ΔT [K] indica la variazione di temperatura del materiale dovuta all'effetto termoelastico, α [K⁻¹] indica il coefficiente di dilatazione termica, ρ [kg/m³] e C_σ [J/kgK] sono rispettivamente la densità ed il calore specifico a tensione costante del materiale, $\Delta I_{1,\sigma}$ [Pa] la variazione del primo invariante delle tensioni ed, in fine, T [K] è la temperatura del materiale prima dell'applicazione del carico. Qualora si valuti la forma contratta dell'equazione (2-38), la variabile K_m indica la costante termoelastica che, come esposto nel capitolo 2.6 , ha valore $3.76 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹.

Altro aspetto che ha contribuito fortemente al buon esito della misurazione di Q è la geometria del provino. Infatti, essendo il provino liscio, c'è un'ampia zona in cui il materiale base è sollecitato ad un campo di tensione simile. Questo fa sì che si crei una buona capacità termica tale da poter misurare buoni gradienti di raffreddamento anche con la strumentazione a disposizione (HP Agilent 34970A) che può acquisire solo ad un massimo di 22 campionamenti al secondo.

Fatte queste valutazioni sull'andamento qualitativo di Q , 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 si deve, per ogni provino, ricavare un Q che lo rappresenti. Nella più generale delle ipotesi, si possono presentare 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 raggiunge 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, sempre decrescente o che non raggiunga mai la stabilizzazione 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, mediando il valore di Q tramite una regressione lineare. Tutto ciò è possibile vederlo ed analizzarlo per singolo provino e suddiviso per singolo rapporto di ciclo nelle appendici A, B, C, I.

Con il valore di Q così ricavato, caratteristico per ciascun provino, e relazionandolo al numero di cicli a rottura si può tracciare una curva di Wohler modificata in cui in ascissa si ha ancora il numero di cicli a rottura mentre in ordinata si ha il parametro energetico Q (curve che si possono apprezzare dal paragrafo 4.4.1 in poi).

Una curva completa si può ottenere eseguendo una serie di prove a differenti ampiezze di tensione (a parità di geometria e di rapporto di ciclo R) in un campo sufficientemente ampio da garantire la corretta caratterizzazione del materiale.

4.4.1 Risultati delle prove per rapporti ci ciclo R=-1

Nella Tabella 4.5 e nel corrispettivo Grafico 4-9 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1 per i provini lisci di Figura 4.1 sintetizzati in termini di energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N _f ^{**}	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _{a ing} [MPa]	σ _{a true} [MPa]	σ _{m ing} [MPa]	σ _{m true} [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max true} [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R-1_02 [#]	2000000	48	240	240	0	0	240	240	5-12
Traz_liscio_R-1_03 [#]	2931	3483	400	400	0	0	400	400	0.2-0.4
Traz_liscio_R-1_04 [#]	58260	992	350	350	0	0	350	350	1-2
Traz_liscio_R-1_05 [#]	793881	246	320	320	0	0	320	320	2.5-3
Traz_liscio_R-1_06 [#]	2000000	140	300	300	0	0	300	300	10-12
Traz_liscio_R-1_07 [#]	123424	512	335	335	0	0	335	335	2-4
Traz_liscio_R-1_08 [#]	111949	751	350	350	0	0	350	350	1.3-3
Traz_liscio_R-1_09 [#]	2489072	252	335	335	0	0	335	335	2.5-6
Traz_liscio_R-1_10 [#]	198187	252	320	320	0	0	320	320	3.2-7
Traz_liscio_R-1_11 [#]	1882442	275	320	320	0	0	320	320	3.8-8
Traz_liscio_R-1_12 [#]	3589	3278	400	400	0	0	400	400	0.35
Traz_liscio_R-1_13 [#]	36728	716	350	350	0	0	350	350	1.2-2.8
Traz_liscio_R-1_14 [#]	92926	500	335	335	0	0	335	335	3-6
Traz_liscio_R-1_15 *	206195	/	320	320	0	0	320	320	3
Traz_liscio_R-1_16 *	483510	/	300	300	0	0	300	300	5.2
Traz_liscio_R-1_17 *	775034	/	315	315	0	0	315	315	6.5
Traz_liscio_R-1_18 *	588681	/	315	315	0	0	315	315	6.5
Traz_liscio_R-1_19 *	10082	/	360	350	0	0	360	350	2
Traz_liscio_R-1_20 *	23520	/	345	345	0	0	345	345	2.5
Traz_liscio_R-1_21 *	127570	/	345	345	0	0	345	345	2.5
Traz_liscio_R-1_22*	84203	/	345	345	0	0	345	345	2.5

* no acquisizioni
calorimetriche

** numero cicli a
rottura

prove eseguite in
[9]

Tabella 4.5: Risultati ottenuti per le prove su provino liscio di Figura 4.1 eseguite a rapporto di ciclo R=-1 nel periodo compreso tra 21/6 e 2/8

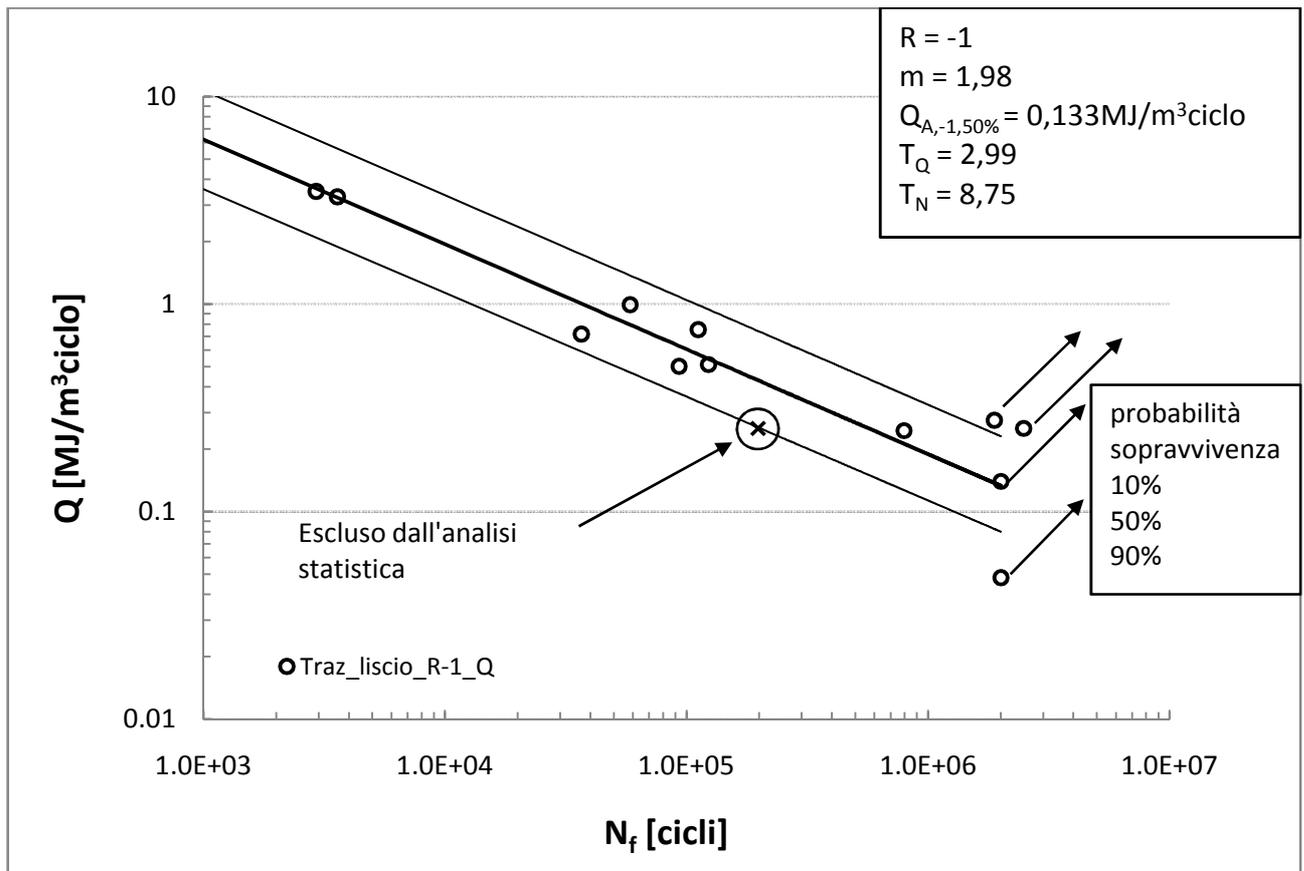


Grafico 4-9: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci il cui carico è stato applicato a rapporto di ciclo R=-1

Il valore di dispersione secondo il numero di cicli a rottura N_f si calcola come:

$$T_N = T_Q^m 2.99^{1.98} = 8.75$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché in questo caso non si è voluto determinare nel dettaglio il valore del calore a vita infinita $Q_{A,50\%}$.

4.4.2 Risultati delle prove per rapporti di ciclo R=0.1

Nella Tabella 4.6 e nel corrispondente Grafico 4-10 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=0.1 per i provini lisci di Figura 4.1 sintetizzati in termini di energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	Q [kJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{a \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ true}}$ [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R0,1_01 [#]	2000000	24	200	205.13	200	250.71	444	456	20
Traz_liscio_R0,1_02 [#]	92656	72	250	263.53	250	322.09	556	586	10
Traz_liscio_R0,1_03* [#]	33460	/	280	320.06	280	391.18	622	711	6
Traz_liscio_R0,1_05 [#]	28649	85	270	299.80	270	366.42	600	666	8.5
Traz_liscio_R0,1_06 [#]	2000000	46	235	239.77	235	293.05	522	533	13
Traz_liscio_R0,1_09 [#]	128110	56	250	263.53	250	322.09	556	586	10
Traz_liscio_R0,1_10 [#]	1564740	49	240	247.53	240	302.54	533	550	12.5
Traz_liscio_R0,1_11 [#]	33273	79.5	270	299.80	270	366.42	600	666	8
Traz_liscio_R0,1_12 [#]	35658	77	270	299.80	270	366.42	600	666	8
Traz_liscio_R0,1_13 [#]	5430	205	300	369.55	300	451.67	667	821	3.5
Traz_liscio_R0,1_14* [#]	2773	/	300	369.55	300	451.67	667	821	4
Traz_liscio_R0,1_15* [#]	5307	/	290	342.63	290	418.77	644	761	4.5
Traz_liscio_R0,1_16 [#]	10275	136	290	342.63	290	418.77	644	761	4.5
Traz_liscio_R0,1_17 [#]	2000000	50	240	247.53	240	302.54	533	550	12.5
Traz_liscio_R0,1_18	324022	53.6	245	252.382	299.4	308.47	544	561	8-9
Traz_liscio_R0,1_19	472269	63.4	245	252.382	299.4	308.47	544	561	8-11
Traz_liscio_R0,1_20*	46585	/	280	327.8	342.2	400.64	622	728	6
Traz_liscio_R0,1_21*	322457	/	245	252.382	299.4	308.47	544	561	9

* no acquisizioni
calorimetriche

** numero cicli a rottura

prove eseguite in [9]

Tabella 4.6: Risultati ottenuti per le prove su provino liscio di Figura 4.1 eseguite a rapporto di ciclo R=0.1 nel periodo compreso tra 24/5 e 31/5

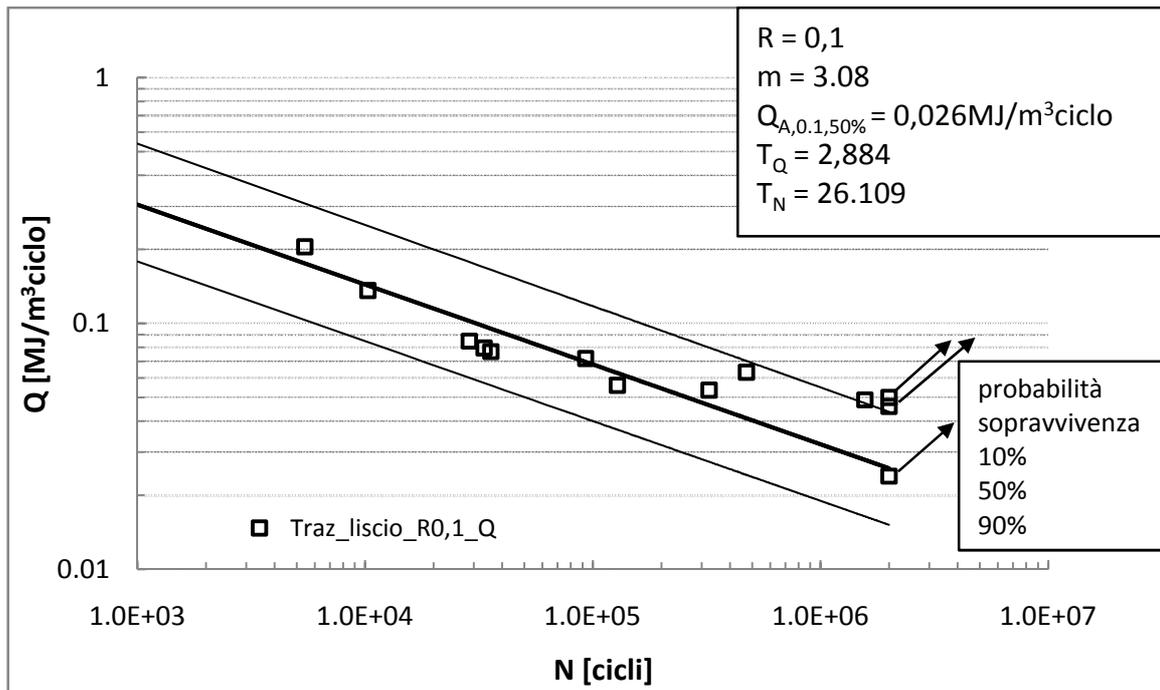


Grafico 4-10: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci il cui carico è stato applicato a rapporto di ciclo R=0.1

Il valore di dispersione secondo il numero di cicli a rottura N_f si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 2.884^{3.08} = 26.108$$

E' da sottolineare come anche in questo caso non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché non si è voluto determinare nel dettaglio il valore del calore a vita infinita

$Q_{A,50\%}$.

4.4.3 Risultati delle prove per rapporti di ciclo R=0.5

Nella Tabella 4.7 e nel corrispondente Grafico 4-11 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=0.5 per i provini lisci di Figura 4.1 sintetizzati in termini di energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	Q [kJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{a \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ true}}$ [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R0.5_01	370837	19.51	160	197.53	480	592.59	640	790	18-22
Traz_liscio_R0.5_03	2000000	11.90	155	187.18	465	561.53	620	749	22-30
Traz_liscio_R0.5_04	1350165	13.98	165	213.07	495	639.20	660	852	26
Traz_liscio_R0.5_05	101003	17.70	175	270.05	525	810.15	700	1080	20-22
Traz_liscio_R0.5_06	118753	19.89	175	270.05	525	810.15	700	1080	20
Traz_liscio_R0.5_07	517578	15.43	165	213.07	495	639.20	660	852	15
Traz_liscio_R0.5_08 *	102404	/	175	270.05	525	810.15	700	1080	22
Traz_liscio_R0.5_09 *	865881	/	160	197.53	480	592.59	640	790	15
Traz_liscio_R0.5_10 *	2000000	/	140	153.50	420	460.51	560	614	18
Traz_liscio_R0.5_11	1364468	14.75	160	197.53	480	592.59	640	790	5

* no acquisizioni
calorimetriche

** numero cicli a
rottura

Tabella 4.7: Risultati ottenuti per le prove su provino liscio di Figura 4.1 eseguite a rapporto di ciclo R=0.5 nel periodo compreso tra 31/5 e 19/6

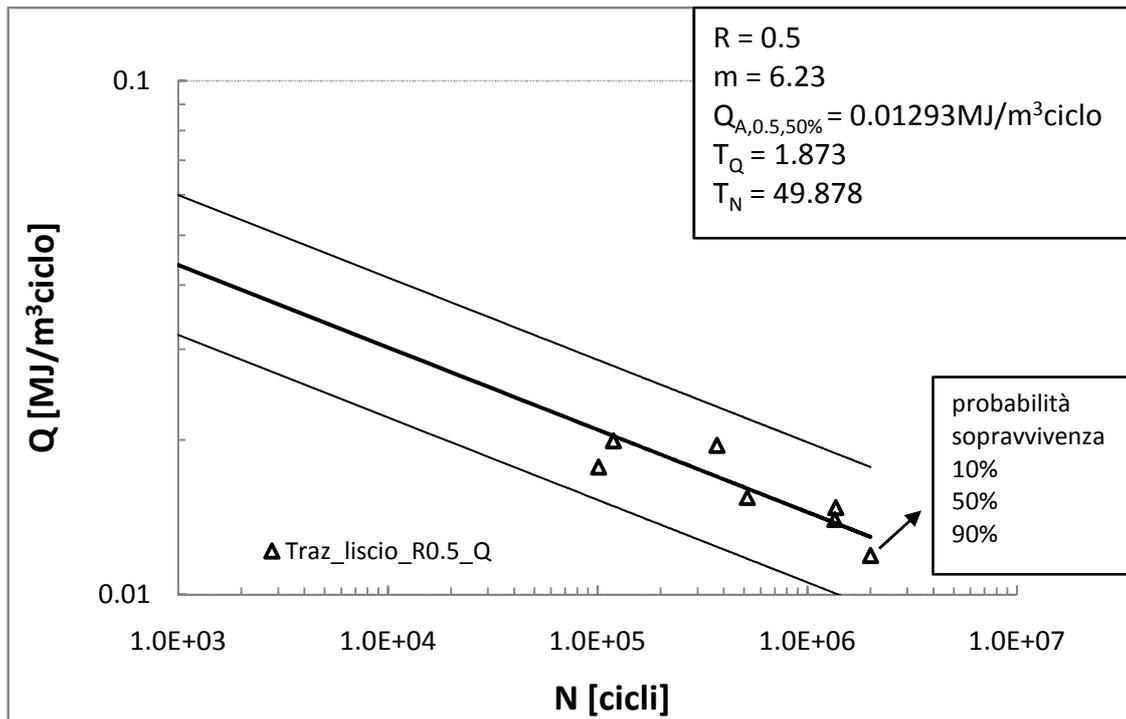


Grafico 4-11: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci il cui carico è stato applicato a rapporto di ciclo $R=0.5$

Il valore di dispersione secondo il numero di cicli a rottura N_f si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 1.873^{6.23} = 49.878$$

La curva per le prove eseguite a $R=0.5$ risulta molto meno inclinata rispetto alle precedenti eseguite a $R=-1$ e $R=0.1$, per cui, risulta naturale un valore molto ampio sulla dispersione in funzione del numero di cicli a rottura.

E' da sottolineare come anche in questo caso non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché non si è voluto determinare nel dettaglio il valore del calore a vita infinita $Q_{A,50\%}$.

4.4.4 Risultati delle prove per rapporti di ciclo R=-1.5

Nella Tabella 4.8 e nel corrispondente Grafico 4-12 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1.5 per i provini lisci di Figura 4.2 sintetizzati in termini di energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

PROVINO	N_f^{**}	Q [kJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{a \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{m \text{ true}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ ing}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ true}}$ [MPa]	f [Hz]
Traz_liscio_R-1.5_02	104074	720	355	355	-71	-71	284	284	1-1.5
Traz_liscio_R-1.5_04	166909	718.7	350	350	-70	-70	280	280	1.5-2.5
Traz_liscio_R-1.5_05	182374	655.2	345	345	-69	-69	276	276	1.5-2
Traz_liscio_R-1.5_06	2000000	259.1	330	330	-66	-66	264	264	1.5-2
Traz_liscio_R-1.5_07	170434	657.3	340	340	-68	-68	272	272	1.5-2
Traz_liscio_R-1.5_10*	289672	/	340	340	-68	-68	272	272	1.5-2.5

* no acquisizioni calorimetriche

** numero cicli a rottura

Tabella 4.8: Risultati ottenuti per le prove su provino liscio di Figura 4.2 eseguite a rapporto di ciclo R=-1.5 nel periodo compreso tra 15/11 e 6/12

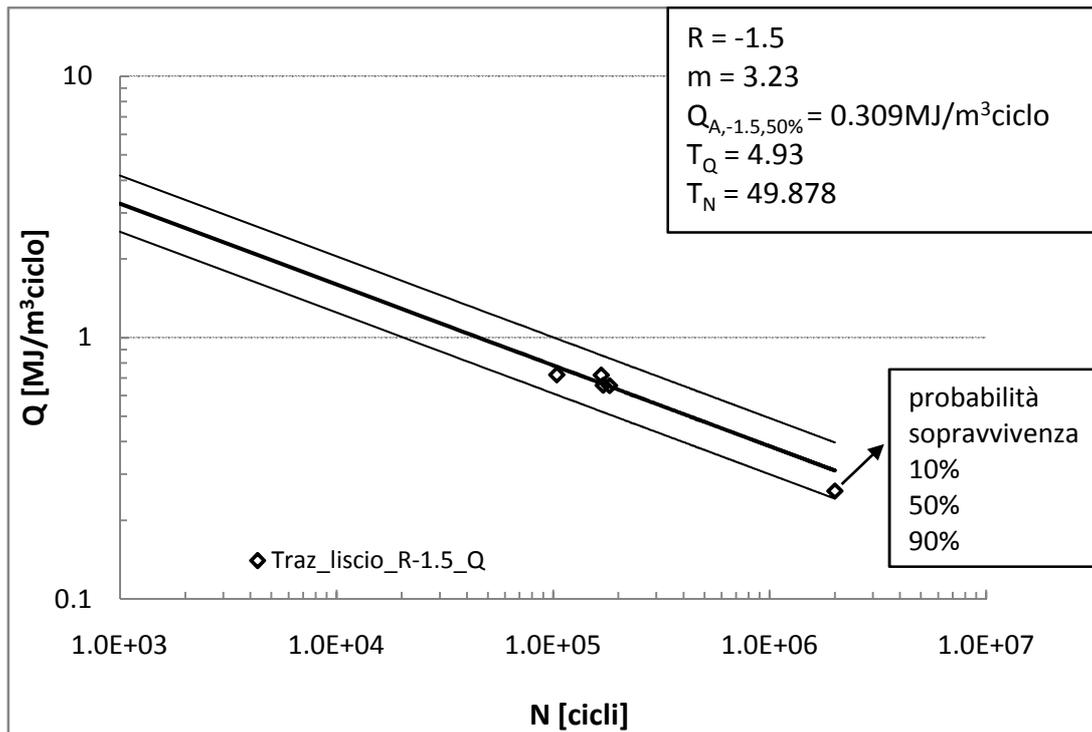


Grafico 4-12: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci il cui carico è stato applicato a rapporto di ciclo R=-1.5

Il valore di dispersione secondo il numero di cicli a rottura N_f si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 4.93^{3.23} = 49.878$$

La curva per le prove eseguite a R=-1.5 risulta molto poco definita in termini di prove in quanto in un range di ampiezza di tensione pari a 25MPa si passa dall'instabilizzazione del provino in compressione all'interruzione della prova per il raggiungimento di 2milioni di cicli che coincide con il criterio di vita infinita.

4.4.5 Confronto in termini di $Q-N_f$ fra i differenti rapporti di ciclo

Di seguito nel Grafico 4-13 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale sintetizzati in termini di energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura. L'obiettivo del seguente grafico è quello di poter mettere a confronto i differenti rapporti di ciclo con le loro peculiarità. Per ogni serie di dati è diagrammata la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

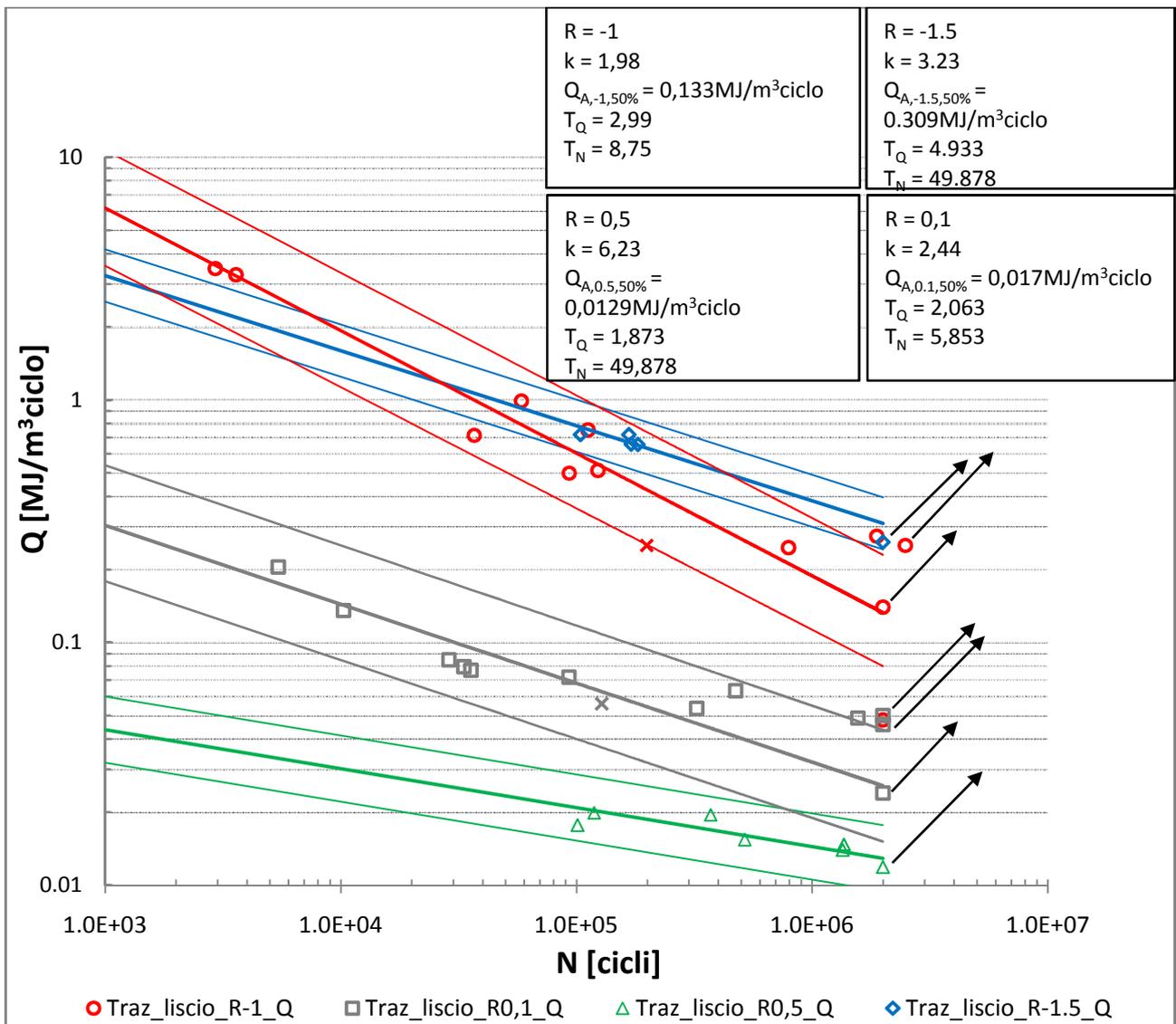


Grafico 4-13: Confronto fra le curve a fatica di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini lisci il cui carico è stato applicato a rapporto di ciclo $R=-1.5$; $R=-1$; $R=0.1$; $R=0.5$

Come si può vedere, dal Grafico 4-13 e dal Grafico 4-7, lo stesso materiale, sottoposto a sollecitazioni di fatica a diverso rapporto di ciclo, presenta comportamenti diversi sia in termini di ampiezza di tensione, sia in termini di energia dissipata. In particolare i risultati non possono essere riassunti da un'unica banda di dispersione in quanto si nota come, a parità di vita a termine, i provini sollecitati ad $R=-1.5$ presentano valori dell'energia dissipata Q più elevati rispetto ai provini sollecitati ad $R=0,5$ in buon accordo con quanto riportato nel Grafico 4-7 in cui si è valutato la curva di Wohler classica cioè espressa come ampiezza di tensione in funzione del numero di cicli a rottura.

4.5 INFLUENZA DEL RAPPORTO DI CICLO

Di seguito è riportata l'intera trattazione sulla valutazione dell'influenza del rapporto di ciclo espressa sia in termini di tensioni ingegneristiche (tensioni nominali applicate ai singoli provini), sia in termini di tensioni vere (tensioni reali che effettivamente sono applicate ai provini).

Con riguardo alla possibilità di rendere indipendente lo studio del fenomeno della fatica dal rapporto di sollecitazione è possibile vedere in [9] che raggruppando le prove assiali in base al numero di cicli a rottura è possibile individuare una serie di curve in un grafico $Q-\sigma_{MAX}$, chiamate curve isodurata, in cui non si tiene conto del rapporto di ciclo di ciascuna prova ma soltanto del numero di cicli a rottura. Inoltre queste curve, in un grafico doppio logaritmico, tendono ad avere una pendenza costante, motivo per il quale si è utilizzato un valore medio tra le pendenze di quest'ultime al fine di definire una nuova caratteristica del materiale testato (AISI 304L trafilato a freddo). Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti (entro un certo intervallo inferiore ai 2 000 000 di cicli) in uno stesso intervallo di cicli indipendentemente dal rapporto di sollecitazione R applicato durante la prova, è possibile ricavare per ciascun punto il valore della costante definita nel seguente modo dall'equazione (4-1):

$$C = Q * \sigma_{MAX}^{h_{MEDIA}} \quad (4-1)$$

dove $h_{MEDI A}$ indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata su un grafico doppio logaritmico $Q - \sigma_{MAX,n}$. Diagrammando, poi, il valore della costante C in funzione del numero di cicli a rottura di ciascun provino, si possono ottenere una serie di punti che vengono ben approssimati da una curva di equazione (4-2) del tipo:

$$Q \cdot \sigma_{MAX}^{h_{MEDI A}} \cdot N_f^m = COST \quad (4-2)$$

che rappresenta ancora una retta in un grafico doppio logaritmico $Q \sigma_{MAX}^{h_{MEDI A}} - N_f$.

La presenza nell'equazione (4-2) del parametro σ_{MAX} non consente di applicare in metodo proposto da Meneghetti [1] 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. Si è quindi sostituito il parametro σ_{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 termoelasticità riportati nel capitolo 2 si è giunti alla determinazione di un nuovo parametro caratteristico del materiale AISI 304L, trafilato a freddo, in sostituzione della tensione massima σ_{MAX} . Il nuovo parametro deriva dall'equazione (2-38) ed è descritto dal rapporto $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ che sostituito alla σ_{MAX} nell'equazione (4-2) permette di ottenere una nuova costante energetica per la sintesi dei dati in funzione del numero di cicli a rottura.

Il nuovo parametro $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ è infatti funzione di sole proprietà fisiche del materiale e del primo invariante delle tensioni come esplicitato nell'equazione (4-3):

$$\frac{T_{the}}{T_0} = -\frac{\alpha \Delta I_{1,\sigma}}{\rho C_\sigma} = -K_m \Delta I_{1,\sigma} \quad (4-3)$$

dove T_{the} [K] indica la variazione di temperatura del materiale a seguito dell'applicazione del carico, α [K⁻¹] indica il coefficiente di dilatazione termica, ρ [kg/m³] e C_σ [J/kgK] sono rispettivamente la densità ed il calore specifico a tensione costante del materiale, $\Delta I_{1,\sigma}$ [Pa] la variazione del primo invariante delle tensioni ed, in fine, T [K] è la temperatura del materiale prima dell'applicazione del carico, ed in fine, la costante termoelastica K_m il cui valore è stato definito nel capitolo 2 e pari a 3.75935e-12 Pa⁻¹. Nel caso in esame, essendo la trattazione di

questo capitolo è fatta sui soli provini lisci, la sollecitazione affaticante è definibile puramente monoassiale. Di conseguenza, la variazione del primo invariante delle tensioni $\Delta I_{1,\sigma}$, coincide con la tensione massima $\sigma_{MAX,n}$.

Fatta quest'ampia premessa su come si andrà a valutare l'effetto della tensione media per l'analisi sperimentale della vita a fatica, si procede ora con il riportare i diagrammi, doppio logaritmico $Q-\sigma_{MAX,n}$, in cui sono descritte le curve isodurata. L'intera trattazione è espressa sia in termini di tensioni ingegneristiche (tensioni nominali applicate ai singoli provini), sia in termini di tensioni vere (tensioni reali che effettivamente sono applicate ai provini).

Si riportano le 4 curve isodurata relative a provini che si sono rotti rispettivamente nei seguenti intervalli di cicli: 0-28000(4 provini); 28000-112000 (10 provini); 112000-450000 (9 provini); 450000-1400000(5 provini) mentre sono esclusi tutti i provini che sono arrivati a 2000000 di cicli non rotti (9 provini).

LINEA_0-28 000

PROVINO	N_f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ_a [MPa]	$\sigma_{max\ ing}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tru}$ [MPa]
Traz_liscio_R-1_03	2931	-1	3483	400	400	400
Traz_liscio_R-1_12	3589	-1	3278	400	400	400
Traz_liscio_R0,1_13	5430	0.1	205	300	666.67	821.22
Traz_liscio_R0,1_16	10275	0.1	136	290	644.44	756.34

LINEA_28 000-112 000

PROVINO	N_f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ_a [MPa]	$\sigma_{max\ ing}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tru}$ [MPa]
Traz_liscio_R-1_04	58260	-1	992	350	350	350
Traz_liscio_R-1_13	36728	-1	716	350	350	350
Traz_liscio_R0,1_02	92656	0.1	72	250	555.56	586.21
Traz_liscio_R0,5_05	101003	0.5	17.70	175	700	1080
Traz_liscio_R-1.5_02	104074	-1.5	720	355	284	284
Traz_liscio_R-1_14	92926	-1	500	335	335	335
Traz_liscio_R-1_08	111949	-1	751	350	350	350
Traz_liscio_R0,1_05	28649	0.1	85	270	600	666.22
Traz_liscio_R0,1_11	33273	0.1	79.5	270	600	666.22
Traz_liscio_R0,1_12	35658	0.1	77	270	600	666.22

LINEA_112 000-450 000

PROVINO	N _f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _a [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max tru} [MPa]
Traz_liscio_R-1_07	123424	-1	512	335	335	335
Traz_liscio_R0,1_09	128110	0.1	56	250	555.56	586.21
Traz_liscio_R0,5_06	118753	0.5	19.89	175	700	1080
Traz_liscio_R-1.5_04	166909	-1.5	718.68	350	280	280
Traz_liscio_R-1.5_05	182374	-1.5	655.24	345	276	276
Traz_liscio_R-1.5_07	170434	-1.5	657.29	340	272	272
Traz_liscio_R-1_10	198187	-1	252	320	320	320
Traz_liscio_R0,1_18	324022	0.1	53.56	245	544	562
Traz_liscio_R0,5_01	370837	0.5	19.5	160	640	790

LINEA_450000-1400000

2.98

PROVINO	N _f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _a [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max tru} [MPa]
Traz_liscio_R0,1_19	472269	0.1	63.4	245	544.44	561.85
Traz_liscio_R-1_05	793881	-1	246	320	320	320
Traz_liscio_R0,5_07	517578	0.5	15.4	165	660	852
Traz_liscio_R0,5_04	1350165	0.5	13.9832	165	660	852.27
Traz_liscio_R0,5_11	1364468	0.5	14.8	160	640	790.12

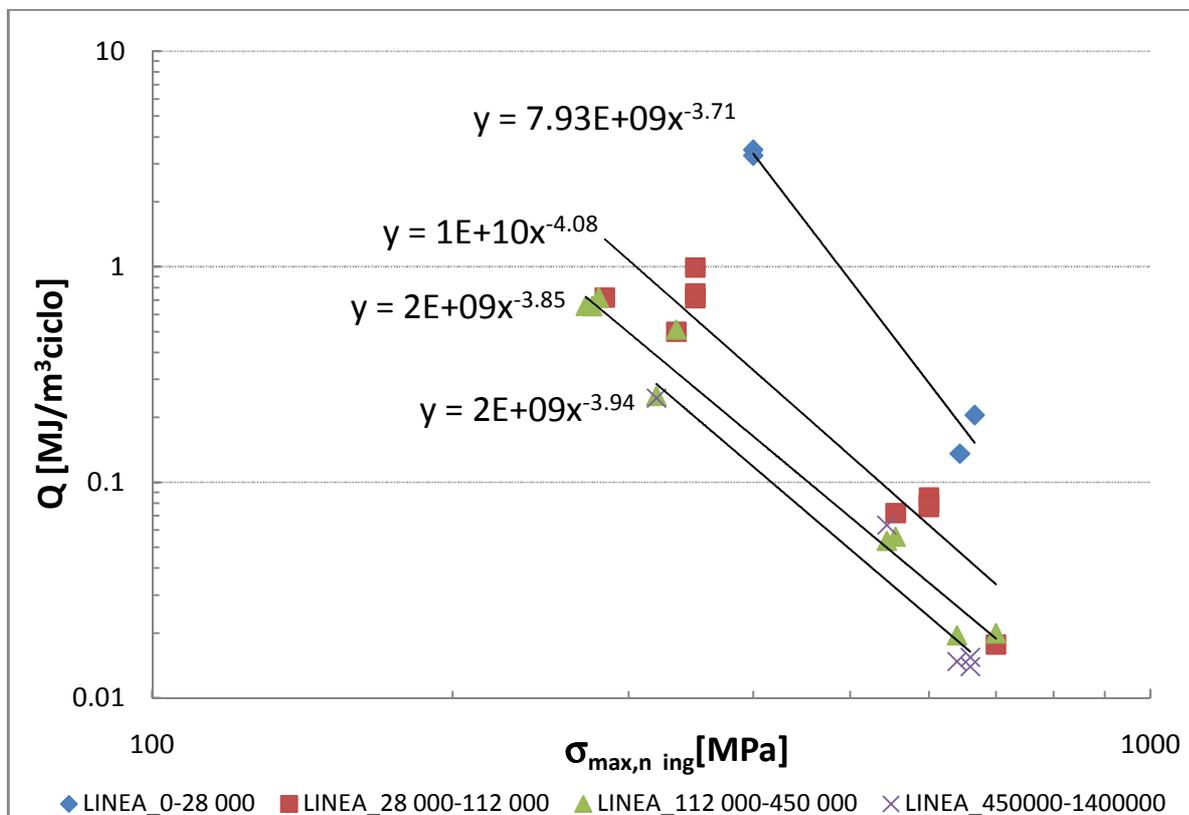


Grafico 4-14: Curve isodurata valutate con la tensione ingegneristica massima netta

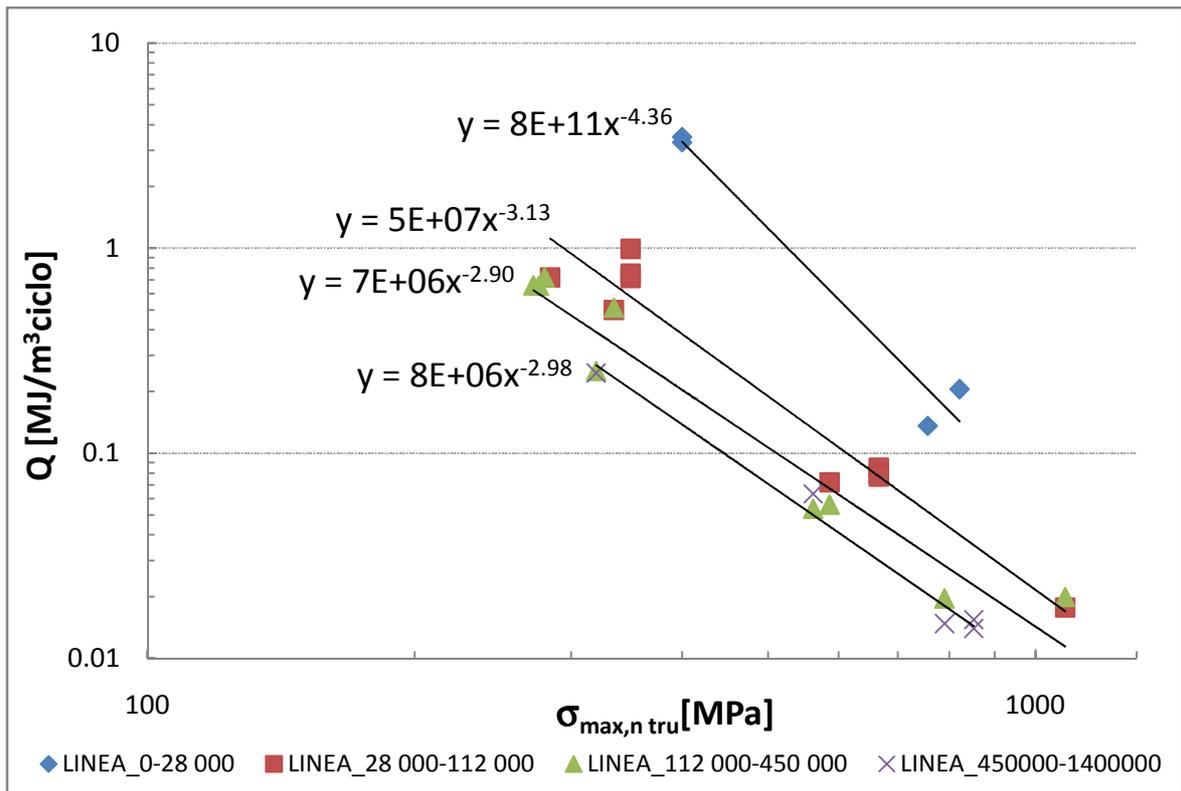


Grafico 4-15: Curve isodurata valutate con la tensione reale massima netta

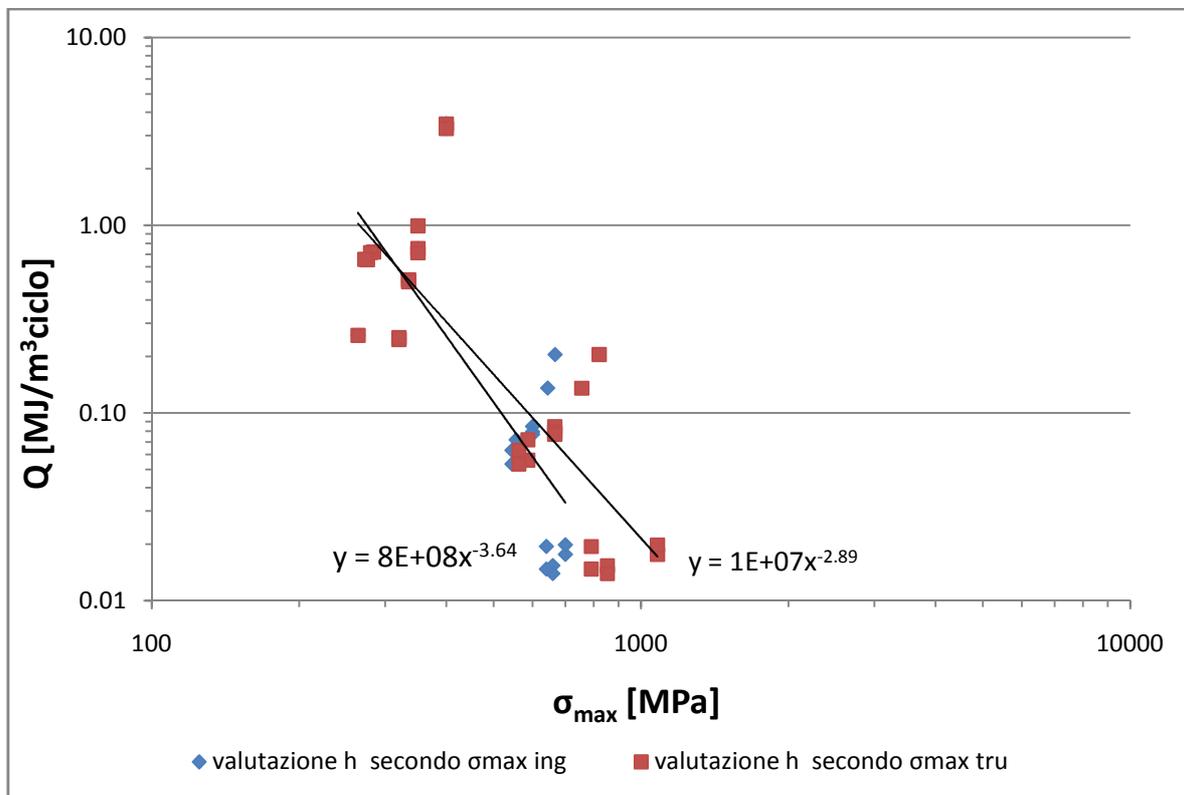


Grafico 4-16: confronto fra la determinazione della costante h ottenute senza la suddivisione dei provini secondo il numero di cicli a rottura utilizzando le tensioni massime ingegneristiche e le tensioni massime reali

Si riportano in Tabella 4.9 i valori caratteristici delle costanti h determinati valutando le tensioni ingegneristiche e le tensioni reali.

RANGE CICLI	0-28 000	28 000-112 000	112 000-450 000	450000-1400000	VALORI MEDI
h_{ING}	3.71	4.08	3.85	3.94	3.895
h_{TRUE}	4.36	3.13	2.9	2.98	3.343

Tabella 4.9: sintesi delle pendenze h delle singole curve isodurata suddivise per intervalli di cicli a rottura e valore medi

Una volta ottenuto il valore medio della pendenze delle curve isodurata, si può procedere al calcolo del rapporto $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ e della costante $C = Q * \sigma_{MAX}^{h_{medio}} = Q * \left(\frac{T_{the}}{T_0}\right)^{h_{medio}}$ sempre considerando sia le tensioni ingegneristiche e le tensioni reali.

PROVINO	N_f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a\ ing}$ [MPa]	$\sigma_{max\ ing}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tru}$ [MPa]	$(T_{Ther}/T_0)_{ing}$	$(T_{Ther}/T_0)_{tru}$	$C = Q(T_{Ther}/T_0)_{ing}^{h_{medio}}$ [MJ/m ³ ciclo]	$C = Q(T_{Ther}/T_0)_{tru}^{h_{medio}}$ [MJ/m ³ ciclo]
Traz_liscio_R-1_02	2000000	-1	48	240	240	240	9.022E-04	9.022E-04	6.64E-14	3.19E-12
Traz_liscio_R-1_03	2931	-1	3483	400	400	400	1.504E-03	1.504E-03	3.52E-11	1.28E-09
Traz_liscio_R-1_04	58260	-1	992	350	350	350	1.316E-03	1.316E-03	5.97E-12	2.33E-10
Traz_liscio_R-1_05	793881	-1	246	320	320	320	1.203E-03	1.203E-03	1.04E-12	4.28E-11
Traz_liscio_R-1_06	2000000	-1	140	300	300	300	1.128E-03	1.128E-03	4.62E-13	1.96E-11
Traz_liscio_R-1_07	123424	-1	512	335	335	335	1.259E-03	1.259E-03	2.60E-12	1.04E-10
Traz_liscio_R-1_08	111949	-1	751	350	350	350	1.316E-03	1.316E-03	4.52E-12	1.76E-10
Traz_liscio_R-1_09	2489072	-1	252	335	335	335	1.259E-03	1.259E-03	1.28E-12	5.11E-11
Traz_liscio_R-1_10	198187	-1	252	320	320	320	1.203E-03	1.203E-03	1.07E-12	4.39E-11
Traz_liscio_R-1_11	1882442	-1	275	320	320	320	1.203E-03	1.203E-03	1.17E-12	4.79E-11
Traz_liscio_R-1_12	3589	-1	3278	400	400	400	1.504E-03	1.504E-03	3.32E-11	1.20E-09
Traz_liscio_R-1_13	36728	-1	716	350	350	350	1.316E-03	1.316E-03	4.31E-12	1.68E-10
Traz_liscio_R-1_14	92926	-1	500	335	335	335	1.259E-03	1.259E-03	2.54E-12	1.01E-10

PROVINO	N _f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _{a ing} [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max tru} [MPa]	(T _{Ther} /T ₀) _{ing}	(T _{Ther} /T ₀) _{tru}	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{ing} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{tru} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]
Traz_liscio_R0,1_01	2000000	0.1	24	200	444.44	455.84	1.671E-03	1.714E-03	3.66E-13	1.36E-11
Traz_liscio_R0,1_02	92656	0.1	72	250	555.56	586.21	2.089E-03	2.204E-03	2.62E-12	9.48E-11
Traz_liscio_R0,1_05	28649	0.1	85	270	600.00	666.22	2.256E-03	2.505E-03	4.17E-12	1.72E-10
Traz_liscio_R0,1_06	2000000	0.1	46	235	522.22	532.82	1.963E-03	2.003E-03	1.31E-12	4.40E-11
Traz_liscio_R0,1_09	128110	0.1	56	250	555.56	586.21	2.089E-03	2.204E-03	2.04E-12	7.37E-11
Traz_liscio_R0,1_10	1564740	0.1	49	240	533.33	550.07	2.005E-03	2.068E-03	1.52E-12	5.22E-11
Traz_liscio_R0,1_11	33273	0.1	79.5	270	600.00	666.22	2.256E-03	2.505E-03	3.90E-12	1.61E-10
Traz_liscio_R0,1_12	35658	0.1	77	270	600.00	666.22	2.256E-03	2.505E-03	3.78E-12	1.56E-10
Traz_liscio_R0,1_13	5430	0.1	205	300	666.67	821.22	2.506E-03	3.087E-03	1.52E-11	8.33E-10
Traz_liscio_R0,1_16	10275	0.1	136	290	644.44	756.34	2.423E-03	2.843E-03	8.82E-12	4.20E-10
Traz_liscio_R0,1_17	2000000	0.1	50	240	533.33	550.073	2.005E-03	2.068E-03	1.55E-12	5.32E-11
Traz_liscio_R0,1_18	324022	0.1	53.6	245	544.44	560.84	2.047E-03	2.108E-03	1.80E-12	6.08E-11
Traz_liscio_R0,1_19	472269	0.1	63.4	245	544.44	560.84	2.047E-03	2.108E-03	2.13E-12	7.20E-11

PROVINO	N _f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _{a ing} [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max tru} [MPa]	(T _{Ther} /T ₀) _{ing}	(T _{Ther} /T ₀) _{tru}	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{ing} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{tru} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]
Traz_liscio_R0,5_01	370837	0.5	19.5	160	640	790.12	2.41E-03	2.97E-03	1.23E-12	6.97E-11
Traz_liscio_R0,5_03	2000000	0.5	11.9	155	620	748.70	2.33E-03	2.81E-03	6.64E-13	3.55E-11
Traz_liscio_R0,5_04	1350165	0.5	14.0	165	660	852.27	2.48E-03	3.20E-03	9.95E-13	6.43E-11
Traz_liscio_R0,5_05	101003	0.5	17.697	175	700	1080.21	2.63E-03	4.06E-03	1.58E-12	1.80E-10
Traz_liscio_R0,5_06	118753	0.5	19.889	175	700	1080.21	2.63E-03	4.06E-03	1.78E-12	2.02E-10
Traz_liscio_R0,5_07	517578	0.5	15.4	165	660	852.27	2.48E-03	3.20E-03	1.10E-12	7.10E-11
Traz_liscio_R0,5_11	1364468	0.5	14.8	160	640	790.12	2.41E-03	2.97E-03	9.31E-13	5.27E-11

PROVINO	N _f	R	Q [kJ/m ³ ciclo]	σ _{a ing} [MPa]	σ _{max ing} [MPa]	σ _{max tru} [MPa]	(T _{Ther} /T ₀) _{ing}	(T _{Ther} /T ₀) _{tru}	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{ing} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]	C = Q(T _{Ther} /T ₀) _{tru} ^{hmedio} [MJ/m ³ ciclo]
Traz_liscio_R-1.5_02	104074	-1.5	720	355	284	284	1.07E-03	1.07E-03	1.92E-12	8.41E-11
Traz_liscio_R-1.5_04	166909	-1.5	718.68	350	280	280	1.05E-03	1.05E-03	1.81E-12	8.01E-11
Traz_liscio_R-1.5_05	182374	-1.5	655.24	345	276	276	1.04E-03	1.04E-03	1.56E-12	6.96E-11
Traz_liscio_R-1.5_06	2000000	-1.5	259.15	330	264	264	9.92E-04	9.92E-04	5.20E-13	2.37E-11
Traz_liscio_R-1.5_07	170434	-1.5	657.29	340	272	272	1.02E-03	1.02E-03	1.48E-12	6.65E-11

Nel Grafico 4-17 e nel Grafico 4-18 si riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1.5; R=-1; R=0.1; R=0.5 per i provini lisci di Figura 4.1 e Figura 4.2 sintetizzati in termini di $C = Q * \sigma_{MAX}^{h_{medio}} = Q * \left(\frac{T_{the}}{T_0}\right)^{h_{medio}}$ e diagrammati in funzione del numero di cicli a rottura, con la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m, il coefficiente di dispersione in tensione T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N calcolati con livello di confidenza pari al 95%.

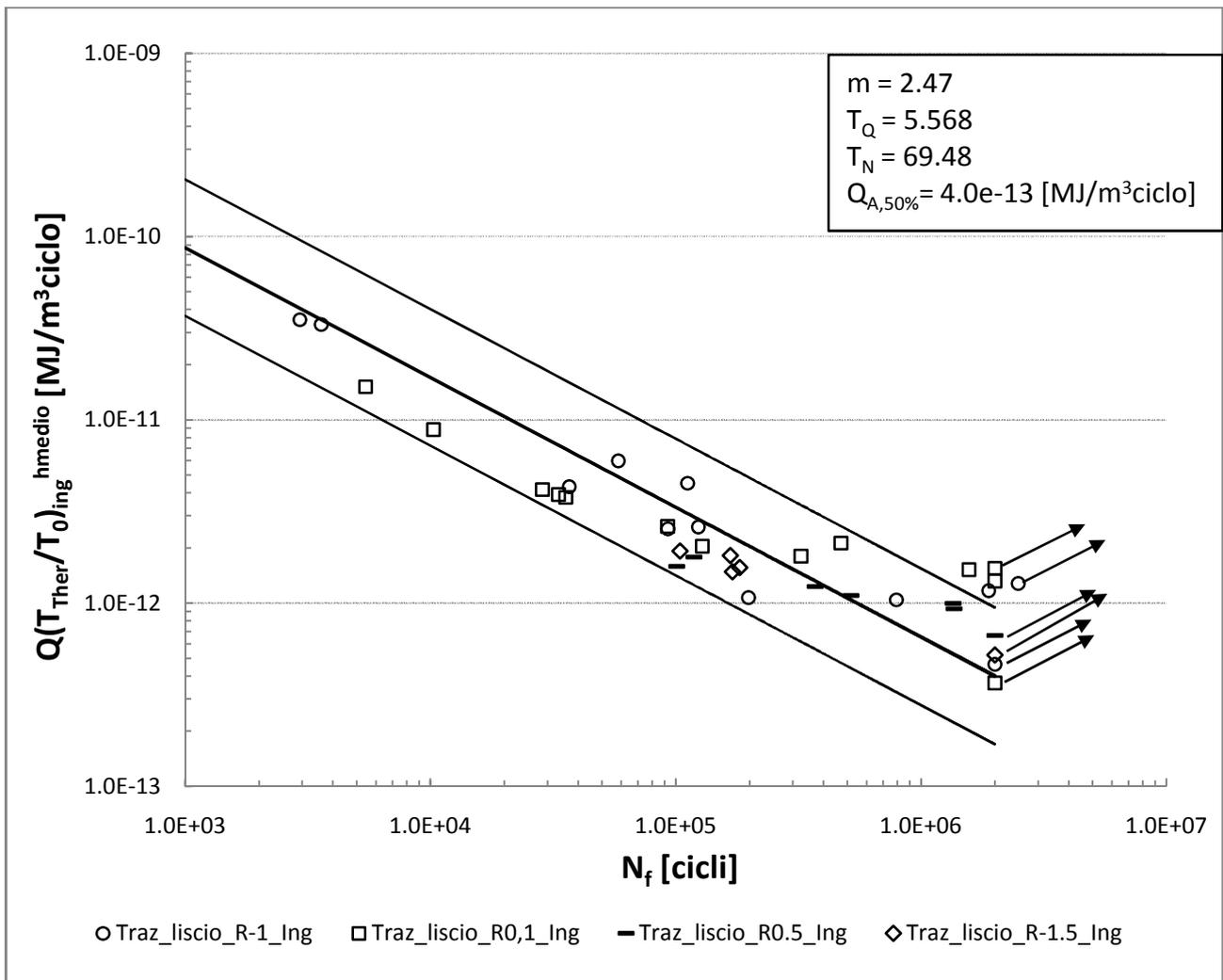


Grafico 4-17: $Q(T_{Ther}/T_0)_{ing}^{hmedio}$ valutato secondo la tensione massima ingegneristica per tutti i provini lisci sollecitati a differenti rapporti di ciclo ed espressa in funzione del numero di cicli a rottura

Il Grafico 4-17 riassume tutti i dati, in modo indipendente dal rapporto di ciclo a cui è stata eseguita la prova, in un'unica banda di dispersione di pendenza $m=2.47$, con coefficienti di dispersione in energia $T_Q=5.568$ ed il coefficiente di dispersione in vita $T_N= 69.48$.

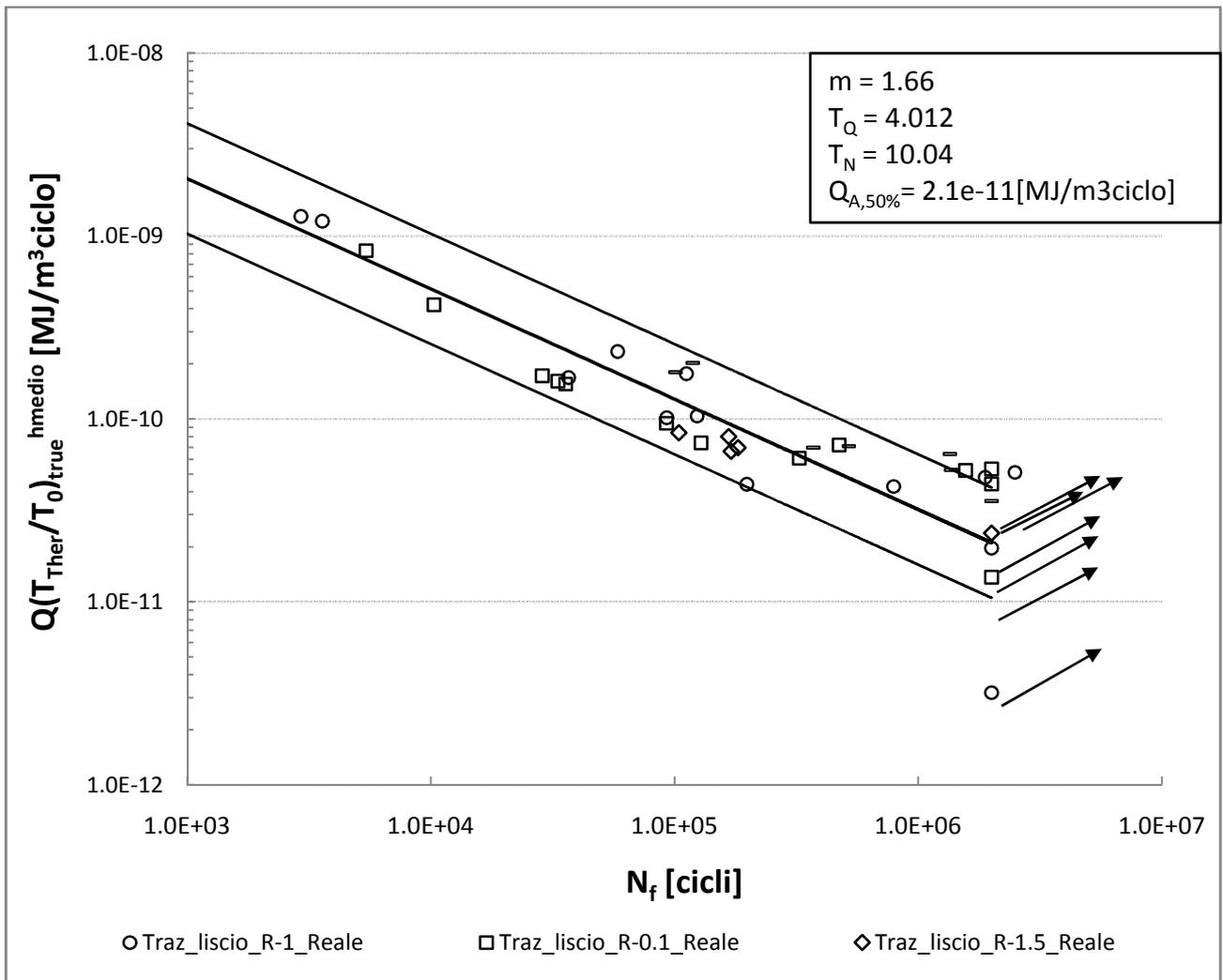


Grafico 4-18: $Q(T_{\text{Ther}}/T_0)_{\text{true}}^{h_{\text{medio}}}$ valutato secondo la tensione massima reale per tutti i provini lisci sollecitati a differenti rapporti di ciclo ed espressa in funzione del numero di cicli a rottura

Il Grafico 4-18 riassume tutti i dati, in modo indipendente dal rapporto di ciclo a cui è stata eseguita la prova, in un'unica banda di dispersione di pendenza $m=1.66$, con coefficienti di dispersione in energia $T_Q=4.012$ ed il coefficiente di dispersione in vita $T_N= 10.04$.

Risulta rilevante la valutazione sui coefficienti di dispersione in energia tra il Grafico 4-17 e il Grafico 4-18 in quanto il valutare il parametro $C = Q * (\frac{T_{the}}{T_0})^{h_{medio}}$ in termini di tensioni reali induce una forte riduzione portando T_Q da $=5.568$ a 4.012 . Quest'aspetto è in pieno accordo con il fenomeno fisico in quanto il calore misurato è indice del danneggiamento del materiale quindi riconducibile alla massima tensione reale imposta al materiale e non alla massima tensione ingegneristica.

4.6 CONCLUSIONI

In questo capitolo si sono analizzati i dati ottenuti in questo lavoro di tesi e quelli prodotti in [9] per diverse campagne di prove a fatica assiale a diverso rapporto di ciclo eseguite su provini lisci di Figura 4.1 e Figura 4.2 realizzati in acciaio inossidabile AISI304L trafilato a freddo. I risultati ottenuti sono stati confrontati sia in termini di tensione netta (ingegneristica e reale), sia utilizzando l'approccio basato sulla densità di energia dissipata.

Dall'analisi classica in termini di ampiezza di tensione, le quattro curve realizzate a diverso rapporto di ciclo, restano ben separate e non è possibile realizzare un grafico, con un'unica banda di dispersione, che descriva allo stesso tempo il comportamento del materiale ai differenti rapporti di ciclo.

In maniera diversa, l'analisi in termini di energia dissipata verso l'ambiente, ha prodotto tutt'altro risultato. Infatti, raggruppando le prove in base al numero di cicli a rottura è stato possibile individuare una serie di curve, chiamate curve isodurata, in un grafico doppio logaritmico $Q-\sigma_{MAX}$ (Grafico 4-14 e Grafico 4-15) in cui non si tiene conto del rapporto di ciclo di ciascuna prova ma soltanto del numero di cicli a rottura. Queste curve di isodurata tendono ad avere una pendenza costante e si è utilizzato il valore medio tra le pendenze calcolate come caratteristica del materiale[9].

Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti entro un certo intervallo di 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:

$$C = Q \cdot \sigma_{MAX}^{h_{MEDI A}}$$

dove $h_{MEDI A}$ indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata sul grafico doppio logaritmico (Grafico 4-14 e Grafico 4-15).

Successivamente si è sostituito il parametro σ_{MAX} con un altro parametro legato sempre ad una variazione di temperatura, e quindi ancora rilevabile con l'utilizzo della sola termocoppia, ossia $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$. Quest'ultimo, permette di ottenere una nuova costante energetica per la sintesi dei dati in funzione del numero di cicli a rottura.

La banda di dispersione del Grafico 4-17 e del Grafico 4-18 riassume i dati delle prove di fatica assiali in modo indipendente dal rapporto di ciclo attraverso la seguente equazione:

$$Q \cdot \left(\frac{T_{the}}{T_0} \right)_{ad}^{h_{media}} \cdot N_f^m = COST$$

dove m è la pendenza della curva (uguale 2.47 nel caso della valutazione delle tensioni ingegneristica, mentre vale 1.66 nel caso della valutazione delle tensioni reali); mentre h 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. Infatti è possibile misurare il volere di Q arrestando istantaneamente la sollecitazione a cui è sottoposto il componente da verificare e misurando il raffreddamento; come anche è possibile misurare il volere di $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ attraverso la misurazione del raffreddamento subito dal componente in corrispondenza all'applicazione di un carico statico che non superi il limite di $\sigma_{p0,2}$ precedentemente definito.

La validità del metodo deve essere confermata dall'esecuzione di altri accertamenti, anche a geometrie di provini differenti da quelli utilizzati in questa campagna di prove. Importante sarà il fatto di utilizzare per le prove sempre lo stesso materiale utilizzato in questo lavoro.

Capitolo 5: VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELLA VITA A TERMINE IN PROVINI INTAGLIATI SOLLECITATI A FATICA ASSIALE CON L'APPROCCIO DI WOehler CLASSICO E L'APPROCCIO ENERGETICO

5.1 PREMESSA

In questo capitolo vengono presentati i risultati di una serie di prove sperimentali eseguite in controllo di forza su macchina MFL assiale su provini con diverse tipologie di intaglio e realizzati in acciaio inossidabile AISI304L trafilato a freddo. Le prove in controllo di forza sono state eseguite imponendo un carico di tipo sinusoidale per varie ampiezze di tensione e a frequenze variabili tra 6 e 25Hz per i provini V3AXSY con intaglio assialsimmetrico a V di 90° e raggio di fondo intaglio $r=3\text{mm}$; tra 8 e 26Hz per i provini U5AXSY con intaglio assialsimmetrico a U e raggio di fondo intaglio $r=5\text{mm}$ e; tra 0.5 e 3.2Hz per i provini U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico e con raggio $r=10.5\text{mm}$. A differenza dei provini lisci, con queste tipologie di provini intagliati non si hanno mai avuto difficoltà nel controllare la temperatura massima del provino sotto al limite massimo dei 70°C. Tuttavia, per i provini con intaglio assial simmetrico a V e ad U, si sono riscontrate notevoli difficoltà nel portare la temperatura del provino a +8°C rispetto alla temperatura ambiente. Le prove sono state eseguite tutte a rapporto di ciclo $R=-1$ allo scopo di verificare quanto esposto nel precedente elaborato di tesi [8], ossia come i valori di Q relativi ai provini lisci e a quelli intagliati con geometria ad U e a V collassino in un' unica curva confermando ciò che era accaduto in [6]. In altri termini, si è voluto verificare il concetto messo in luce tramite le prove riportate in [8] da cui si è potuto affermare che Q è un parametro locale indipendente dalla forma dell'eventuale intaglio del provino.

Per tutte le prove si è valutato la relazione tra ampiezza di tensione e numero di cicli a rottura con conseguente costruzione delle curve di Woehler classiche, utili nella progettazione a fatica.

Si sono 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. Successivamente, sono stati poi confrontati i due diversi approcci allo scopo di valutarne eventuali vantaggi e svantaggi.

Durante le prove sono stati quindi registrati i valori di spostamento, acquisiti dal sensore LVDT, e di forza, acquisita dalla cella di carico +/-250kN, a disposizione nella macchina MFL. Da questi parametri si è quindi risaliti alla deformazione media e alla rigidezza 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 netta. I segnali di temperatura provenienti dalle termocoppie sono stati acquisiti con una centralina di acquisizione Agilent Technologies HP34970° ad una frequenza massima di 22Hz.

5.2 DESCRIZIONE DEI PROVINI

Le geometrie dei provini intagliati utilizzati in questa campagna di prove sono riportati nel seguito con relative quote dimensionali, tolleranze geometriche, tolleranze dimensionali e, finitura superficiale dell'intero intaglio, espressa come rugosità R_a [μm].

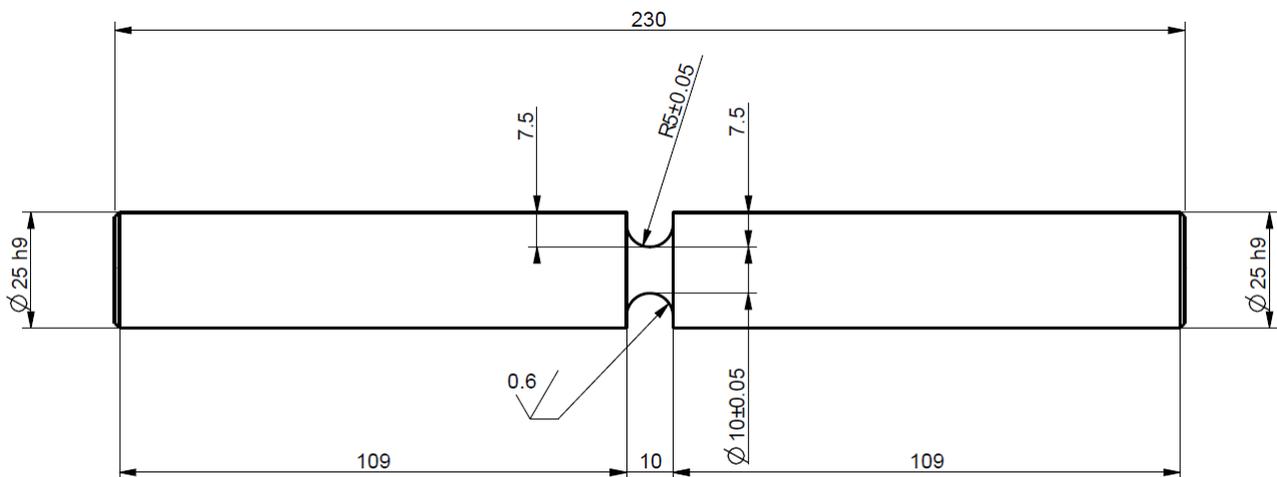


Figura 5.1: Geometria del provino U5AXSY con intaglio assialsimmetrico ad U, raggio di 5mm e $K_{t, \text{nett}}=1.407$ realizzato in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

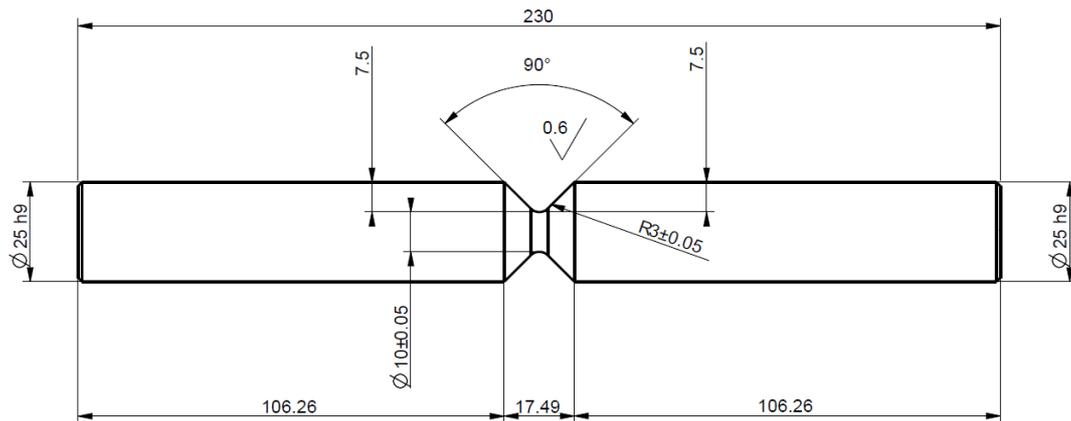


Figura 5.2: Geometria del provino V3AXSY con intaglio assialsimmetrico a V, raggio di 3mm e $K_{t_{netto}}=1.614$ realizzato in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

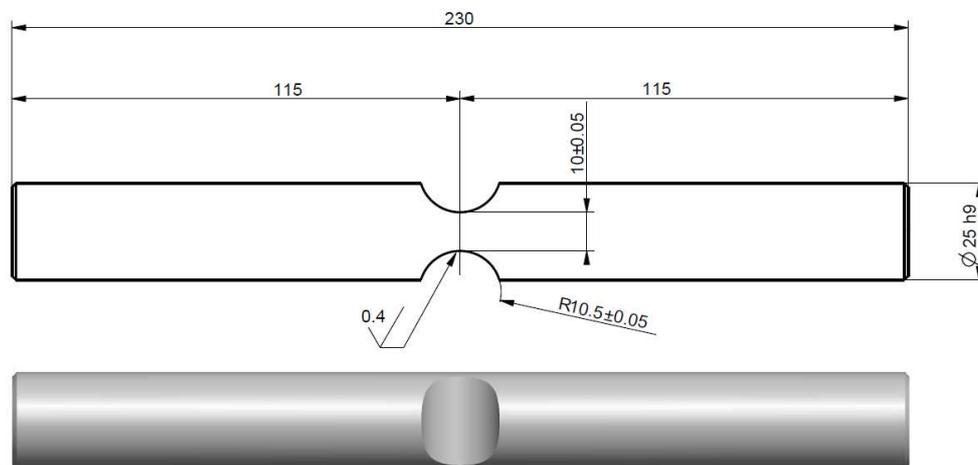


Figura 5.3: Geometria del provino U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico, raggio di 10.5mm e $K_{t_{netto}}=1.738$ realizzato in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

Per tutte e tre le geometrie la lunghezza dedicata all'afferraggio in macchina assiale è di 50mm su entrambe le estremità.

5.3 ANALISI DELLE TENSIONI PRINCIPALI PER LE DIFFERENTI GEOMETRIE DI INTAGLIO

Di seguito si riportano i valori e gli andamenti delle tensioni che si hanno sulla superficie esterna per le differenti tipologie di intaglio ricavati su piastra o su barra cilindrica. Scopo di questo paragrafo è quello di mettere a confronto il campo di tensione generato per i provini testati da Parolin Damiano in [8] con quelli testati in questo lavoro di tesi. I provini con intaglio ad U e a V testati in [8] hanno rispettivamente la geometria riportata in Figura 5.4 e in Figura 5.5. Seguono le indicazioni su come sono state condotte le analisi agli elementi finiti per singola geometria di provino.

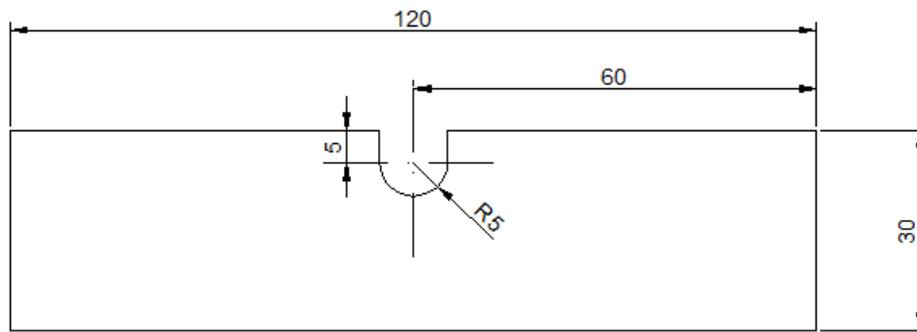


Figura 5.4: Geometria provino U5P, con intaglio ad U, ricavato da piastra con spessore 6mm, testati in [8] con $K_{t,nett}=3.0$ e realizzato in acciaio AISI 304L laminato a caldo

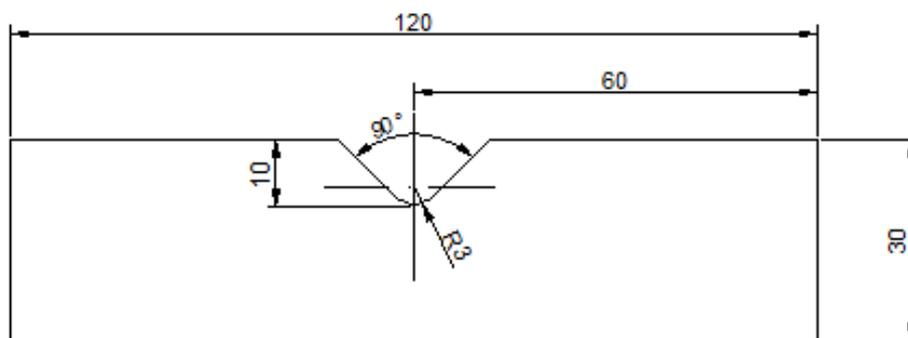


Figura 5.5: Geometria provino V3P, con intaglio a V, ricavato da piastra con spessore 6mm, testati in [8] con $K_{t,nett}=3.7$ e realizzato in acciaio AISI 304L laminato a caldo

5.3.1 Intaglio ad U con raggio di raccordo di 5mm

L'analisi FEM del provino U5P di Figura 5.4 (testato in [8]) è stata condotta imponendo le condizioni sotto riportate:

-Scelta e definizione del tipo di elemento → Per modellare in tre dimensioni il provino è stata creata una geometria piana scegliendo l'elemento PLANE 42 e successivamente è stata estrusa la mesh per il semispessore della piastra utilizzando l'elemento SOLID 45.

-Definizione proprietà del materiale → Materiale: AISI 304L laminato a caldo: Modulo elastico $E=194700$ MPa ; Coefficiente di Poisson $\nu=0.3$.

-Creazione del modello e della mesh → Per modellare il provino, con l'obiettivo finale di ottenere una mesh tridimensionale di tipo "mapped" ad elementi quadrangolari, si è creato la geometria piana e successivamente estrusa secondo il semispessore di 3mm.

I comandi utilizzati sono:

```
Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Element exp Opts>Solid45.
```

```
Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset.
```

Per ottimizzare le risorse di calcolo, si è sfruttato anche la simmetria del provino rispetto il piano di mezzeria dell'intaglio. Inoltre, nel modello non compare la parte di volume che viene stretta dalle morse in quanto si muove di moto rigido con le ganasce stesse. A lato è riportata un'immagine della Mesh

-Definizione dei vincoli e dei carichi → L'assegnazione delle condizioni al contorno necessita di individuare uno schema strutturale semplice adatto allo scopo dell'analisi. Per simulare la

parte di materiale sottostante alle ganasce, si sono utilizzate le coupling equations che impongono a ciascun nodo della superficie appena sottostante agli afferraggi, un uguale spostamento. Il comando per l'applicazione delle coupling equations una volta selezionati tutti i nodi della superficie interessata è :

```
Preprocessor>Coupling equations>Couple DOF>Nset=1>UY
```

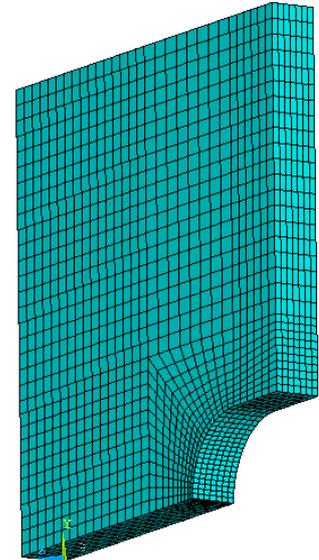


Figura 5.6: Geometria e mesh per l'analisi FEM su provino U5P

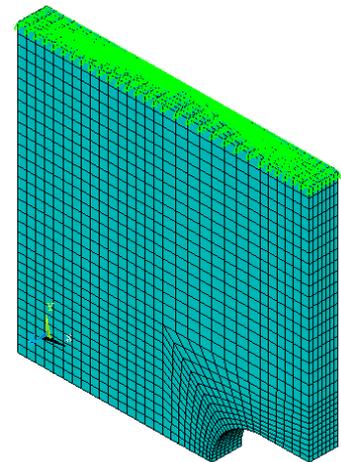


Figura 5.7: Applicazione delle Coupling Equations

Inoltre si sono imposte le condizioni di simmetria sui due piani di simmetria con il comando:

Preprocessor>Symmetry Boundary conditions>On Areas

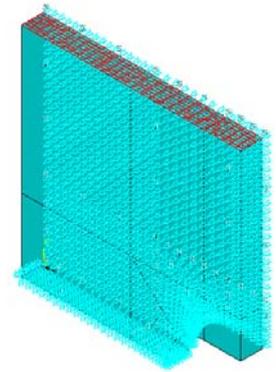


Figura 5.8: Applicazione della simmetria e della pressione

Condizioni di carico → si è applicata nella sezione lorda (pari a 180mm²) una pressione negativa pari a -0.67MPa allo scopo di ottenere sulla sezione netta (120mm²) una tensione unitaria pari a 1MPa.

Tensione principale: di seguito, in Figura 5.9, è raffigurato l'andamento qualitativo della tensione principale σ_1 .

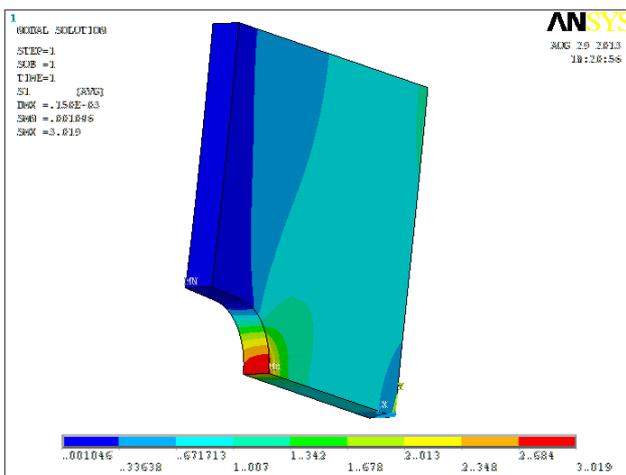


Figura 5.9: Andamento della tensione principale σ

Il valore della tensione σ_1 riportato nel Grafico 2-1 è stato ottenuto alla quarta iterazione in cui la dimensione del lato dell'elemento di mesh non superava mai i 0.4mm e un "refine at line" lungo l'intero intaglio profondità

4elementi.

L'analisi FEM del provino U5AXSY di Figura 5.4 è stata condotta imponendo le condizioni sotto riportate:

-Scelta e definizione del tipo di elemento → Per modellare in tre dimensioni il provino e, allo stesso tempo ottimizzare le risorse di calcolo, è stata creata una geometria piana scegliendo l'elemento PLANE 42 con l'attivazione, tramite element options, dell' AXIS-SIMMETRY.

-Definizione proprietà del materiale → Materiale: AISI 304L trafilato a freddo: Modulo elastico E=192192 MPa, Coefficiente di Poisson $\nu=0.3$

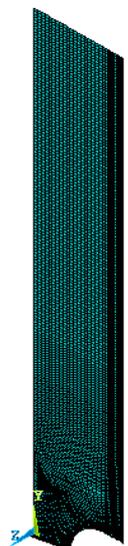


Figura 5.10: Geometria modello U5AXSY

-Creazione del modello e della mesh→ Per modellare il provino, si è creato la geometria piana e per ottimizzare le risorse di calcolo, si è sfruttato la simmetria del provino rispetto il piano di mezzeria dell'intaglio. Inoltre, nel modello non compare la parte di volume che viene stretta dalle morse (di lunghezza pari a 50mm) in quanto si muove di moto rigido con le ganasce stesse. Il modello e la mesh sono riportati in Figura 5.10 e Figura 5.11.

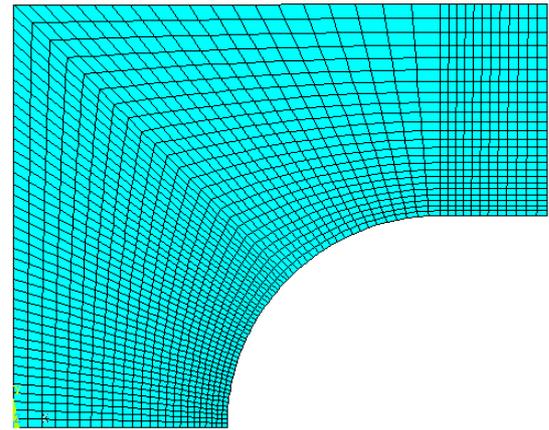


Figura 5.11: Dettaglio mesh in prossimità dell'intaglio

-Definizione dei vincoli e dei carichi→ L'assegnazione delle condizioni al contorno necessita di individuare uno schema strutturale semplice adatto allo scopo dell'analisi. Per simulare la parte di materiale sottostante alle ganasce, si sono utilizzate le coupling equations che impongono a ciascun nodo, della superficie appena sottostante agli afferraggi, un uguale spostamento. Il comando per l'applicazione delle coupling equations una volta selezionati tutti i nodi della linea interessata è :

Preprocessor>Coupling equations>Couple DOF>Nset=1>UY

Inoltre si è imposto la condizione di simmetria sul piano di simmetria dell'intaglio con il comando:

Preprocessor>Symmetry Boundary conditions>On Lines

Condizioni di carico→si è applicata nella sezione lorda (pari a 490.87mm²) una pressione negativa pari a -0.16MPa allo scopo di ottenere sulla sezione netta (78.539mm²) una tensione unitaria pari a 1MPa.

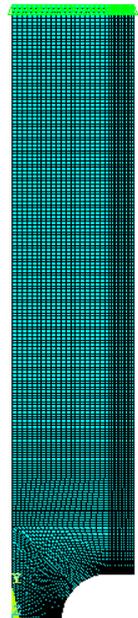
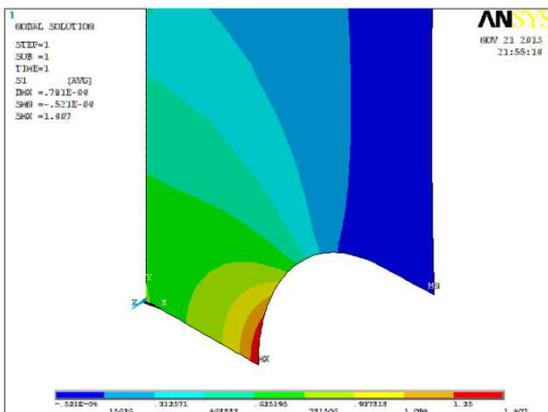


Figura 5.12: Applicazione delle Coupling Equations



Tensione principale: di seguito, in Figura 5.13 è raffigurato l'andamento qualitativo della tensione principale σ_1 .

Figura 5.13: Andamento della tensione principale σ_1

Di seguito sono riportati gli andamenti delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio ad U praticato su piastra U5P di spessore 6 mm e su barra cilindrica U5AXSY di diametro $\varnothing=25\text{mm}$.

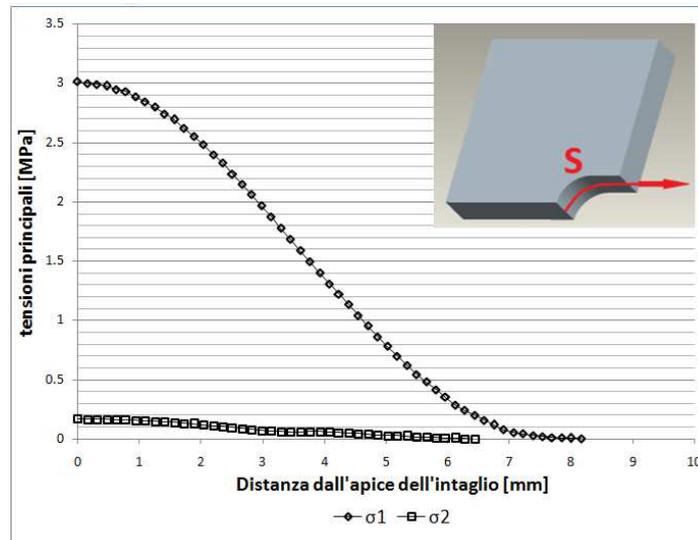


Grafico 5-1: Andamento delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio ad U praticato su piastra U5P di spessore 6mm (Figura 5.4) imposta una tensione unitaria sulla sezione netta

tensioni principali	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
valore max	3.0145	0.1723

Dati i valori massimi riportati dalla tabella, si può dire che nell'intaglio ad U su piastra di spessore 6mm, σ_2 vale 5.717MPa posto $\sigma_1=100\text{MPa}$.

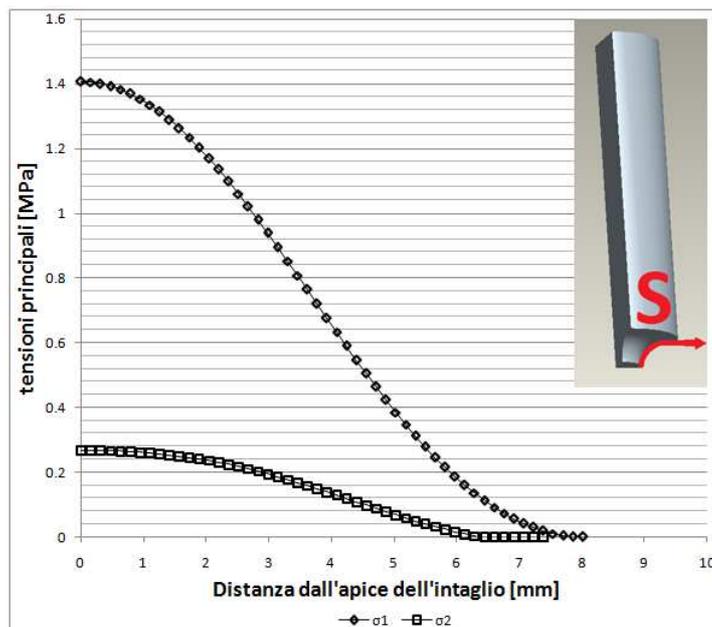


Grafico 5-2: Andamento delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio ad U praticato su cilindro U5AXSY (Figura 5.1) imposta una tensione unitaria sulla sezione netta

tensioni	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
valore max	1.4068	0.2682

Dati i valori massimi riportati dalla tabella si può dire che, su un intaglio ad U su barra cilindrica, σ_2 vale 19.063MPa posto $\sigma_1=100$ MPa . Con questo si vuole porre l'attenzione sulla presenza di un campo di tensione biassiale non trascurabile in cui, la geometria assisimmetrica, impone una forte compartecipazione del materiale in prossimità dell'intera circonferenza di diametro $\varnothing=10$ mm.

Con il Grafico 5-3 si vuole evidenziare come, nell'allontanarsi dall'apice dell'intaglio, nei due materiali costituenti la tensione principale σ_1 , raffrontata alla tensione principale massima σ_{1max} , vari con lo stesso andamento.

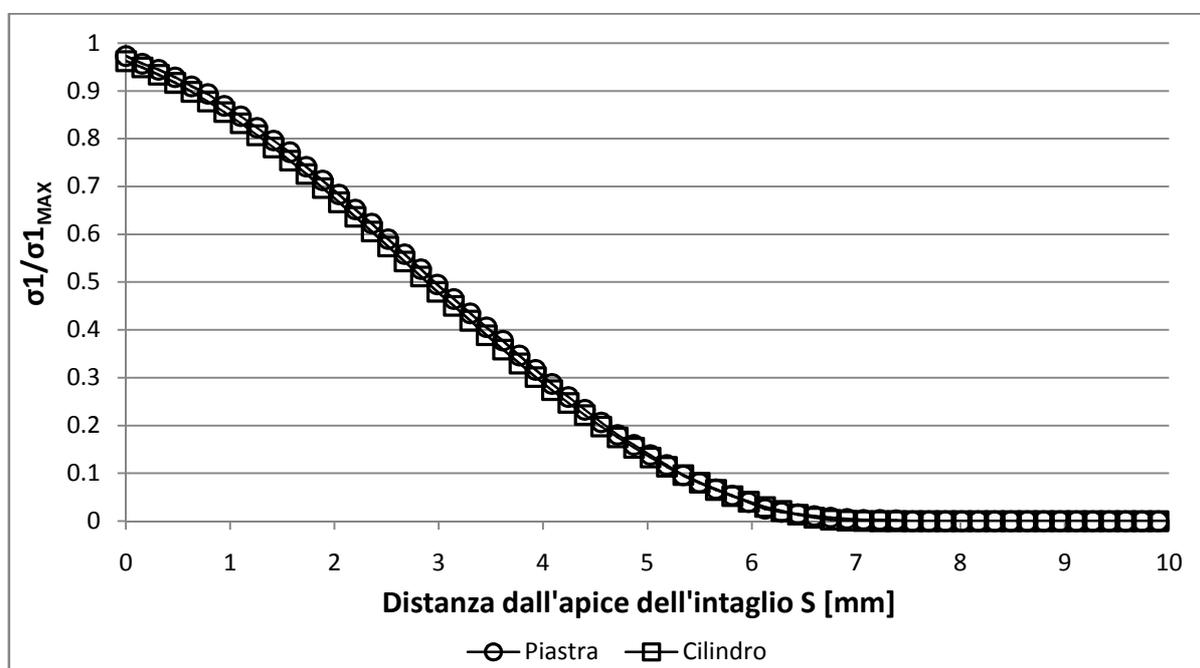


Grafico 5-3: Rapporto fra la tensione principale σ_1 con la massima σ_{1max} per l'intaglio ricavato su piastra USP (Figura 5.4) e su barra cilindrica U5AXSY (Figura 5.1)

Il Grafico 5-3 illustra come, a parità di tensione all'apice dell'intaglio, la termocoppia nella sua area di incollaggio sia influenzata in ugual modo nelle due tipologie di provini in quanto il materiale è sottoposto ad un'uguale estensione del campo di tensione. Tuttavia, la σ_{1MAX} valutata nei provini U5P è maggiore rispetto ai provini U5AXSY e, qualora si volesse valutare una misurazione puntuale della temperatura con la stessa precisione ottenuta con i provini testati in [8], si dovrebbero avere a disposizione nuovi strumenti e una nuova procedura per l'incollaggio della termocoppia sul provino al fine di poter ridurre l'area di incollaggio.

5.3.2 Intaglio a V con raggio di raccordo di 3mm

L'analisi FEM del provino V3P di Figura 5.5 (testato in [8]) è stata condotta imponendo le condizioni sotto riportate:

-Scelta e definizione del tipo di elemento → Per modellare in tre dimensioni il provino è stata creata una geometria piana scegliendo l'elemento PLANE 42 e successivamente è stata estrusa la mesh per il semispessore della piastra utilizzando l'elemento SOLID 45.

-Definizione proprietà del materiale → Materiale: AISI 304L laminato a caldo: Modulo elastico $E=194700$ MPa ; Coefficiente di Poisson $\nu=0.3$.

-Creazione del modello e della mesh → Per modellare il provino, con l'obiettivo finale di ottenere una mesh tridimensionale di tipo "mapped" ad elementi quadrangolari, si è creato la geometria piana e successivamente estrusa secondo il semispessore di 3mm.

I comandi utilizzati sono:

Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Element exp Opts>Solid45.

Preprocessor>Modelling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset.

Per ottimizzare le risorse di calcolo, si è sfruttato anche la simmetria del provino rispetto il piano di mezzzeria dell'intaglio. Inoltre, nel modello non compare la parte di volume che viene stretta dalle morse in quanto si muove di moto rigido con le ganasce stesse. A lato è riportata un'immagine della mesh.

-Definizione dei vincoli e dei carichi → L'assegnazione delle condizioni al contorno necessita di individuare uno schema strutturale semplice adatto allo scopo dell'analisi. Per simulare la parte di materiale sottostante alle ganasce, si sono utilizzate le coupling equations che impongono a ciascun nodo della superficie appena sottostante agli afferraggi, un uguale spostamento. Il comando per l'applicazione delle coupling equations una volta selezionati tutti i nodi della superficie interessata è :

Preprocessor>Coupling equations>Couple DOF>Nset=1>UY

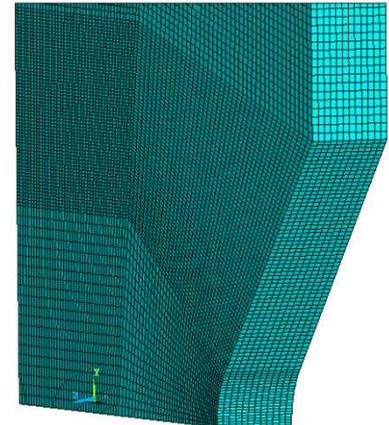


Figura 5.14: Geometria e mesh per l'analisi FEM su provino V3P

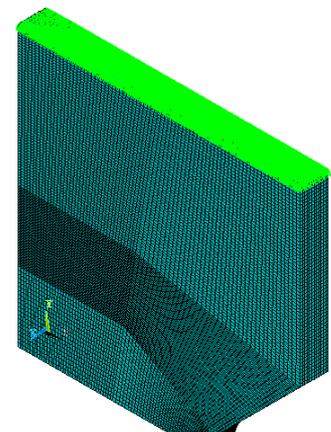


Figura 5.15: Applicazione delle Coupling Equations

Inoltre si sono imposte le condizioni di simmetria sui due piani di simmetria con il comando:

Preprocessor>Symmetry Boundary conditions>On Areas

Condizioni di carico → si è applicata nella sezione lorda (pari a 180mm^2) una pressione negativa pari a -0.67MPa allo scopo di ottenere sulla sezione netta (120mm^2) una tensione unitaria pari a 1MPa .

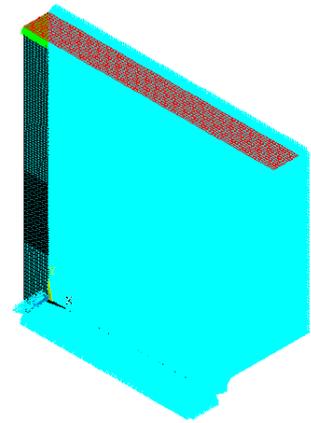
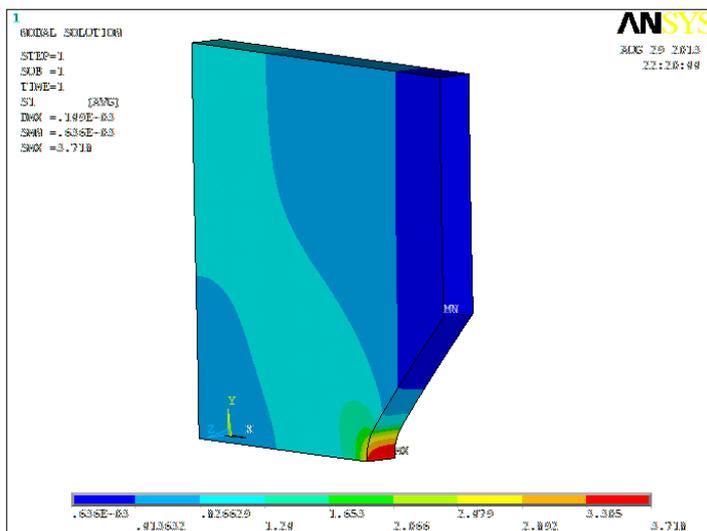


Figura 5.16: Applicazione delle condizioni di simmetria e della pressione

Tensione principale: di seguito, in Figura 5.17, è raffigurato l'andamento qualitativo della tensione principale σ_1 .



tensione principale σ_1 .

Figura 5.17: Andamento della tensione principale σ_1 per il provino V3P

Il valore della tensione σ_1 riportato nel Grafico 5-4 è stato ottenuto alla quarta iterazione in cui la dimensione del lato dell'elemento di mesh non superava mai i 0.4mm e un "refine at line" lungo l'intero intaglio con profondità 4

elementi.

L'analisi FEM del provino U5AXSY di Figura 5.4 è stata condotta imponendo le condizioni sotto riportate:

-Scelta e definizione del tipo di elemento → Per modellare in tre dimensioni il provino e, allo stesso tempo ottimizzare le risorse di calcolo, è stata creata una geometria piana scegliendo l'elemento PLANE 42 con l'attivazione, tramite element options, dell' AXIS-SIMMETRY.

-Definizione proprietà del materiale → Materiale: AISI 304L trafilato a freddo: Modulo elastico $E=192192\text{MPa}$, Coefficiente di Poisson $\nu=0.3$

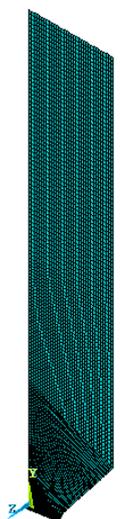


Figura 5.18: Geometria modello V3AXSY

-Creazione del modello e della mesh→ Per modellare il provino, si è creato la geometria piana e per ottimizzare le risorse di calcolo, si è sfruttato la simmetria del provino rispetto il piano di mezzeria dell'intaglio. Inoltre, nel modello non compare la parte di volume che viene stretta dalle morse (di lunghezza paria a 50mm) in quanto si muove di moto rigido con le ganasce stesse. Il modello e la mesh sono riportati in Figura 5.10 e Figura 5.11.

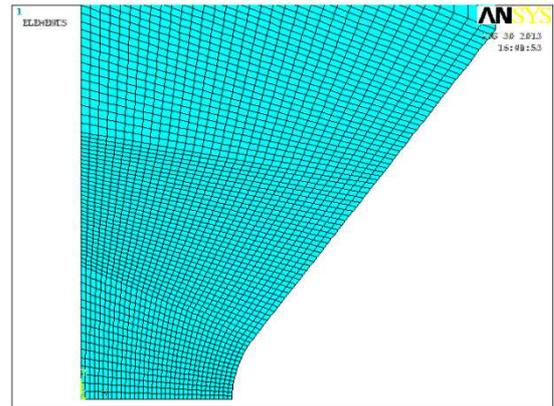


Figura 5.19: Dettaglio mesh in prossimità dell'intaglio

-Definizione dei vincoli e dei carichi→ L'assegnazione delle condizioni al contorno necessita di individuare uno schema strutturale semplice adatto allo scopo dell'analisi. Per simulare la parte di materiale sottostante alle ganasce, si sono utilizzate le coupling equations che impongono a ciascun nodo, della superficie appena sottostante agli afferraggi, un uguale spostamento. Il comando per l'applicazione delle coupling equations una volta selezionati tutti i nodi della linea interessata è :

Preprocessor>Coupling equations>Couple DOF>Nset=1>UY

Inoltre si è imposto la condizione di simmetria sul piano di simmetria dell'intaglio con il comando:

Preprocessor>Symmetry Boundary conditions>On Lines

Condizioni di carico→si è applicata nella sezione lorda (pari a 490.87mm²) una pressione negativa pari a -0.16MPa allo scopo di ottenere sulla sezione netta (78.539mm²) una tensione unitaria pari a 1MPa.

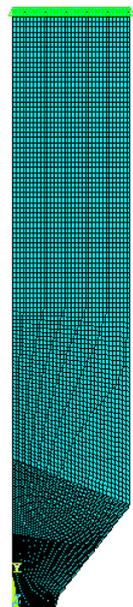
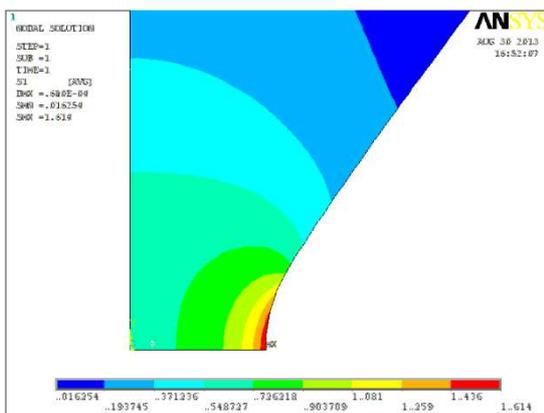


Figura 5.20: Applicazione delle Coupling Equations



Tensione principale: di seguito, in Figura 5.21, è raffigurato l'andamento qualitativo della tensione principale σ_1 .

Figura 5.21: Andamento qualitativo della tensione principale σ_1

Di seguito sono riportati gli andamenti delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio a V praticato su piastra V3P di spessore 6 mm e su barra cilindrica V3AXSY di diametro $\varnothing=25\text{mm}$ a partire da fondo intaglio.

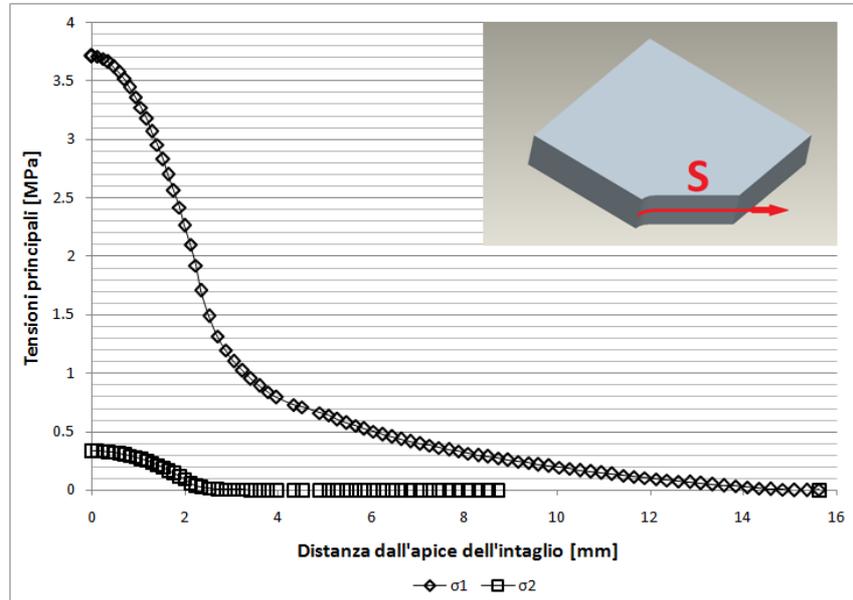


Grafico 5-4: Andamento delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio a V praticato su piastra V3P di Figura 5.5 imposta una tensione unitaria sulla sezione netta

tensioni[MPa]	σ_1	σ_2
valori max	3.7161	0.3378

Dati i valori riportati dalla tabella si può dire che per la geometria V3P $\sigma_2=9.089\text{MPa}$ qualora sia posta una tensione principale $\sigma_1=100\text{MPa}$.

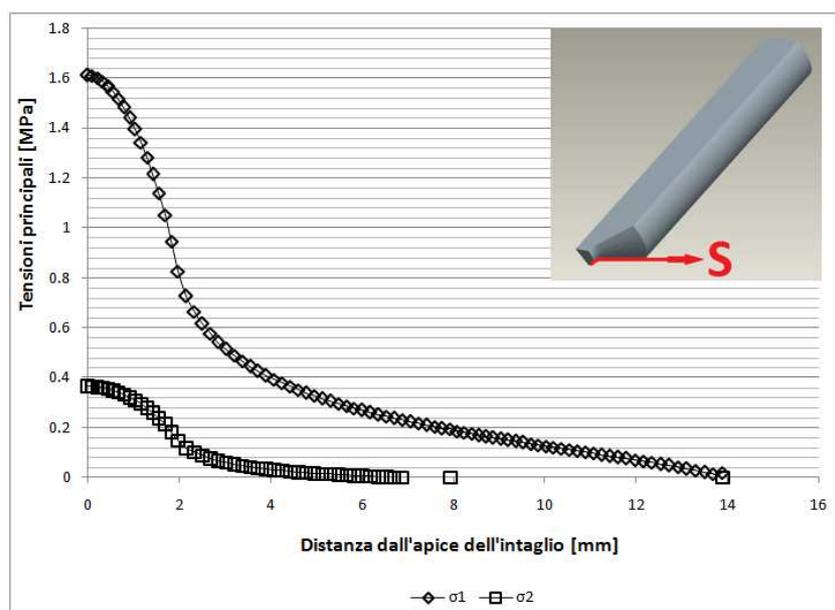


Grafico 5-5: Andamento delle tensioni principali sulla superficie libera dell'intaglio a V praticato su barra cilindrica V3AXSY di Figura 5.2 imposta una tensione unitaria sulla sezione netta

tensioni[MPa]	σ_1	σ_2
valori max	1.6137	0.3673

Dati i valori riportati dalla tabella si può dire che per la geometria V3AXSY $\sigma_2=0.3673\text{MPa}$ qualora sia posta una tensione principale $\sigma_1=100\text{MPa}$.

Con questo si vuole porre l'attenzione, anche per questa tipologia di intaglio, sulla presenza di un campo di tensione biassiale non trascurabile in cui, la geometria assilmetrica, impone un forte compartecipazione del materiale in prossimità dell'intera circonferenza di diametro $\varnothing=10\text{mm}$.

Di seguito, sono riportate due tabelle rispettivamente Tabella 5.2 per intaglio a V e Tabella 5.1 per intaglio ad U per dimostrare quanto imputato all'assilmetrica in merito al campo di tensione non più semplicemente monoassiale. Questi risultati sono stati ottenuti tramite un APDL parametrizzato rispetto al diametro massimo del provino, al diametro minimo misurabile sulla sezione ristretta, al raggio di raccordo di fondo intaglio e all'angolo di apertura dell'intaglio che si può leggere in appendice.

Angolo apertura	σ_2 [MPa]
10°	19.05
20°	19.05
30°	19.05
40°	19.05
50°	19.05
60°	19.03
70°	18.79
80°	18.78
90°	18.68
100°	18.57
110°	18.39
120°	18.00
130°	17.42
140°	16.56
150°	15.20
160°	13.03

Tabella 5.1: Valori della tensione σ_2 all'aumentare dell'angolo di apertura per l'intaglio ad U su geometria U5AXSY imposta una tensione principale $\sigma_1=100\text{MPa}$

Tabella 5.2: Valori della tensione σ_2 all'aumentare dell'angolo di apertura per l'intaglio ad V su geometria V3AXSY imposta una tensione principale $\sigma_1=100\text{MPa}$

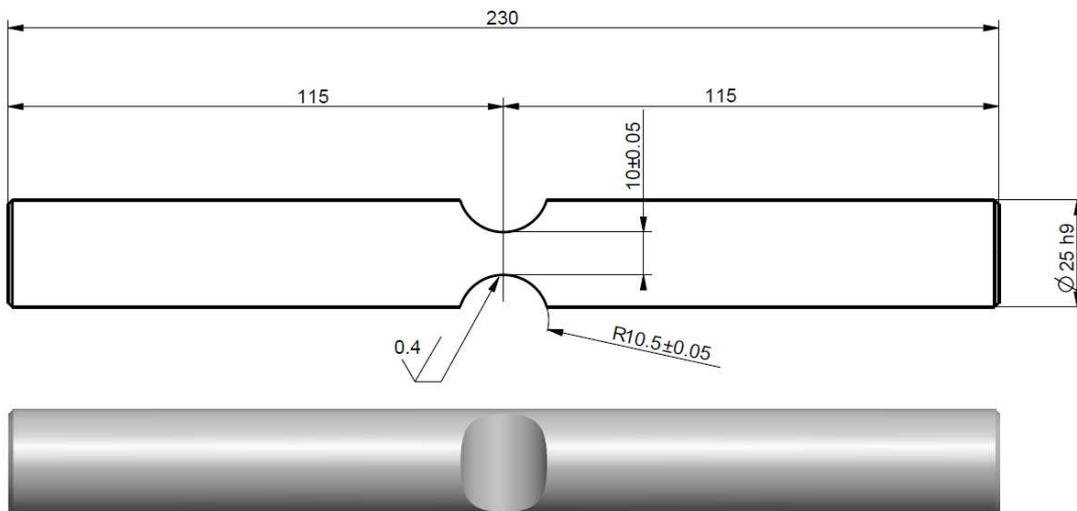
Angolo apertura	σ_2 [MPa]
90°	23.48
100°	23.17
110°	22.69
120°	21.99
130°	20.94
140°	19.62
150°	17.75
160°	14.94

Questi valori sono stati ottenuti con una mesh più grossolana rispetto a quella utilizzata nel calcolo del Kt per la singola geometria al fine di non appesantire il lavoro di analisi FEM.

Tuttavia, dai dati riportati in Tabella 5.1 e Tabella 5.2 si evince che, per quanto si possa ampliare l'angolo di apertura dell'intaglio nella geometria cilindrica, non si potrà mai ottenere lo stesso rapporto di tensione σ_1/σ_2 che si ha con i provini ricavati da piatto dovendo prevedere una valutazione dell'effetto dovuto allo stato di tensione biassiale.

La geometria del provino cilindrico e intaglio non assialsimmetrico U10.5NAXSY è stata definita in modo tale da poter ottenere lo stesso rapporto percentuale tra le tensioni principali σ_1 e σ_2 che nel lavoro di tesi [8] caratterizzava il provino U5P ottenuto da piatto con intaglio ad U. In maniera iterativa si è variato il raggio di intaglio fino ad ottenere i seguente risultati:

PROVINO CILINDRICO CON INTAGLIO NON ASSIALSIMMETRICO		
RAGGIO INTAGLIO	10.5	mm
SEZIONE LORDA	490.87	mm ²
SEZIONE NETTA	300.44	mm ²
σ_1	1.738	MPa
σ_2	0.099	MPa
σ_2 posta $\sigma_1=100\text{MPa}$	5.701	MPa



5.4 APPROCCIO BASATO SULL'AMPIEZZA DI TENSIONE

In questo paragrafo sono riportati i risultati di tutte le prove di fatica assiale analizzati in termini di ampiezza di tensione σ_a . Si vuole quindi riportare i grafici σ_a-N_f per tutte le tipologie di geometrie di provini. In particolare le leggende dei grafici riportano la denominazione Traz_r5mm_R-1 che è associata alla geometria assialsimmetrica con intaglio ad U U5AXSY, la denominazione Traz_r3mm_R-1 che è associata alla geometria assialsimmetrica con intaglio ad V V3AXSY, la denominazione Traz_r10.5mm_R-1 che è associata alla geometria non assialsimmetrica con intaglio ad U U10.5NAXSY. Sono presentati inoltre gli andamenti della rigidità, ottenuti partendo dal segnale in uscita dal sensore LVDT della macchina MFL, 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 acquisizioni ottenute dal sensore LVDT non sono sempre di facile interpretazione. Essendo molto usurata la superficie corrugata delle ganasce e, dovendo talvolta ripartire con la prova alte frequenze a seguito dei raffreddamenti, si notano alcune discontinuità nelle misurazioni della rigidità del provino. Queste discontinuità sono dovute essenzialmente allo scorrimenti del provino rispetto alle ganasce della MFL provocate principalmente da cambi di frequenza e fermate istantanee per l'esecuzione dei raffreddamenti.

5.4.1 Risultati delle prove assiali per provini intagliati

La Tabella 5.4 e il corrispettivo Grafico 5-6 riportano i risultati di tutte le prove di fatica assiale ad R-1 espressi 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 m , il coefficiente di dispersione in tensione T_σ ed il coefficiente di dispersione in vita T_N ottenuto precedentemente nel paragrafo 4.3 con i provini lisci.

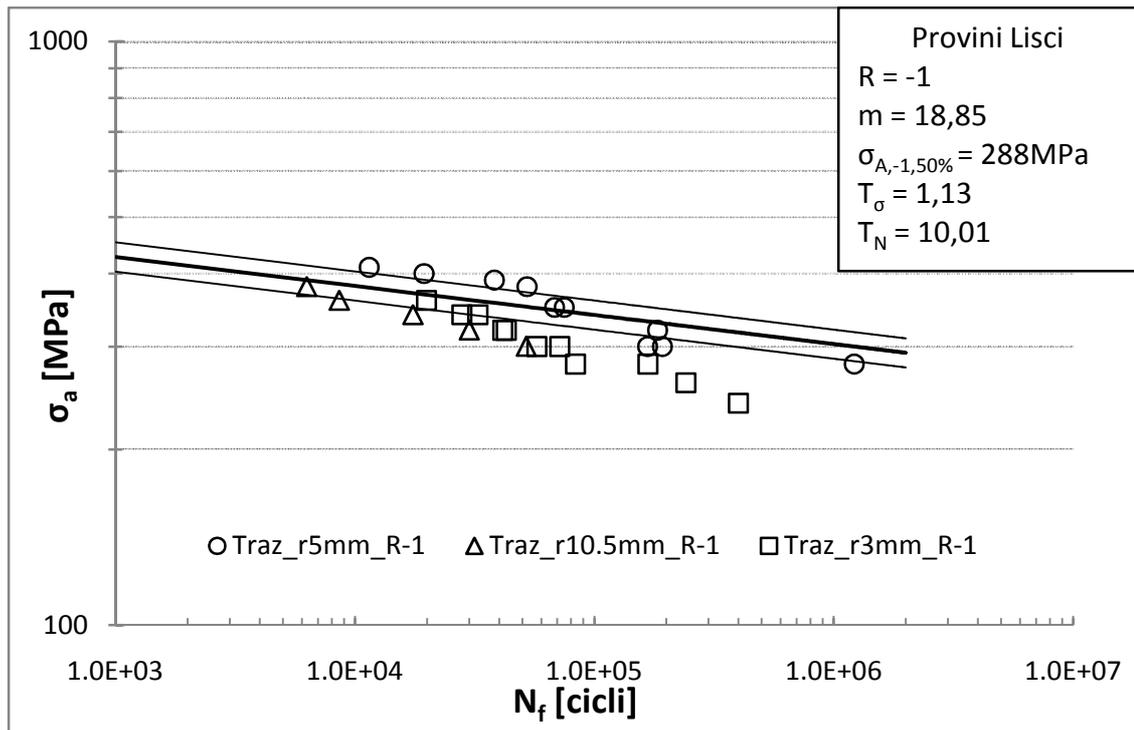


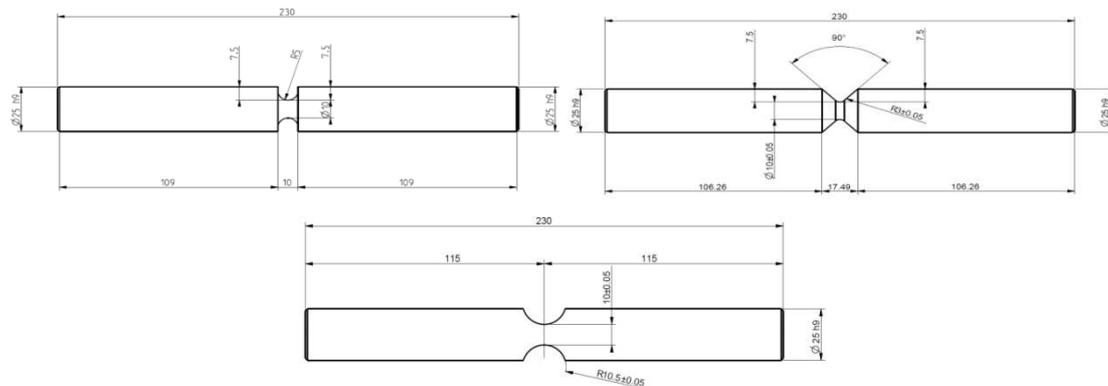
Grafico 5-6 :Distribuzione dei punti sperimentali per le differenti tipologie di intaglio rispetto alla banda di dispersione dei provini lisci ottenuta nel paragrafo 4.3

Come si può notare in Grafico 5-6, la pendenza con cui si distribuiscono i vari risultati sperimentali nella curva di Woehler varia con quella che risulta la severità di intaglio.

In particolare, si vuole di seguito riportare i valori delle tensioni principali che si ottengono all'apice dell'intaglio, qualora si applichi una tensione unitaria sulla sezione netta espressa in [MPa] per le differenti tipologie di geometrie:

Tipo di intaglio	Raggio di fondo intaglio	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]
U5AXSY: intaglio assialsimmetrico ad U	r=5mm	1.4068	0.2682	0
V3AXSY: intaglio assialsimmetrico a V	r=3mm	1.6137	0.3673	0
U10.5NAXSY: intaglio non assialsimmetrico	r=10.5mm	1.7386	0.0991	0

Tabella 5.3:valori delle tensioni principali all'apice dell'intaglio, posta una tensione unitaria sulla sezione netta



Di seguito si riporta la Tabella 5.4 come riassunto di tutte le prove eseguite su i provini con differente geometria di intaglio catalogati per differente ampiezza di tensione applicata.

Intaglio e Rapporto ciclo	Provino	N_f^{***} [cicli]	σ_a nett [MPa]	Q [kJ/m3ciclo]	f_{raff} [Hz]	T_{ambiet} [°C]
U5AXSY Intaglio assialsimmetrico U Raggio fondo intaglio r=5mm Rapporto di ciclo R-1	Traz_r5mm_R-1_01	74793	350	506.1	15-18	28.3-28.7
	Traz_r5mm_R-1_02	68171	350	316.6	14-16	28.8-29.3
	Traz_r5mm_R-1_03	183547	320	94.1	14-20	27.7-29.6
	Traz_r5mm_R-1_04	192593	300	109.3	18-26	28.9-29.6
	Traz_r5mm_R-1_05	1216364	280	48.6	20-26	27.9-30.0
	Traz_r5mm_R-1_06	166791	300	58.1	23	26.7-27.3
	Traz_r5mm_R-1_07	52358	380	179.8	15	22.3-22.7
	Traz_r5mm_R-1_08	38219	390	217.5	10-12	21.8-22.3
	Traz_r5mm_R-1_09	19447	400	396.1	8-10	21.5-21.6
	Traz_r5mm_R-1_10	11475	410	277.8	6-8	21.3-21.5
U10.5NAXSY Intaglio non assialsimmetrico Raggio fondo intaglio r=10.5mm Rapporto di ciclo R-1	Traz_r10,5mm_R-1_01	6299	380	2868	0.5-1	22.9-23.1
	Traz_r10,5mm_R-1_02*	8612	360	2796.01	1.1	22.6-22.7
	Traz_r10,5mm_R-1_03	17495	340	1625.4	1.8	21.2-22.2
	Traz_r10,5mm_R-1_04	30056	320	493.5	1.4-3	22.1-22.7
	Traz_r10,5mm_R-1_05	51958	300	755.6	1-3	20.7-22.3
V3AXSY Intaglio assialsimmetrico V Raggio fondo intaglio r=3mm Rapporto di ciclo R-1	Traz_r3mm_R-1_01	71703	300	65.4	8-20	21.8-22.7
	Traz_r3mm_R-1_02	41431	320	122.8	6-14	22.1-22.3
	Traz_r3mm_R-1_03	167459	280	66.6	20-24	23.8-24.4
	Traz_r3mm_R-1_04	241450	260	42.3	20-24	23.6-24
	Traz_r3mm_R-1_05**	399853	240	/	20-25	23.5
	Traz_r3mm_R-1_06	32607	340	189.4	10-14	24.7-25
	Traz_r3mm_R-1_07	42858	320	70.3	6-14	23.6-24.2
	Traz_r3mm_R-1_08#	83424	280	37.7	15-24	24.9-25.2
	Traz_r3mm_R-1_09#	19884	360	66.7	15-24	24.2-24.4
	Traz_r3mm_R-1_10#	27962	340	64.2	15-25	24.2-24.6
	Traz_r3mm_R-1_11#	57489	300	36.6	20-25	24.4-24.5

*** N_f =Cicli a rottura

** no acquisizioni calorimetriche

* termocoppia parzialmente staccata

nuova procedura: stop solo in fasi di compressione

Tabella 5.4: lista delle prove su provini intagliati eseguite nel periodo 20/8/10/2013 - 31/10/2013

5.4.2 Risultati delle prove per provini con intaglio ad U

Nel Grafico 5-7 si riassumono i dati ottenuti per i provini U5AXSY con intaglio ad U e raggio di raccordo di 5mm.

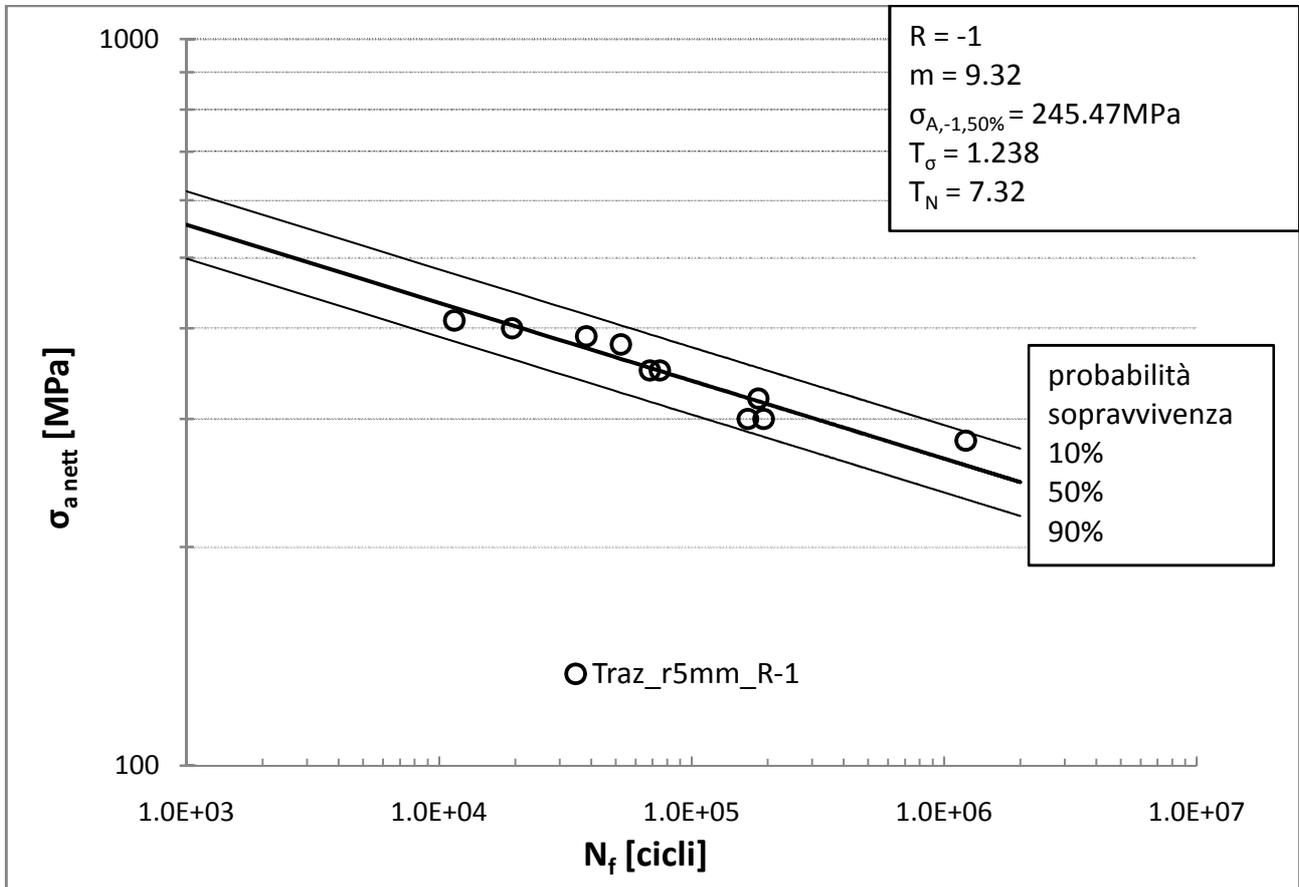


Grafico 5-7: Curva di Wohler con $\sigma_{a\text{nett}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U5AXSY intagliati ad U r=5mm di Figura 5.1

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.238^{9.32} = 7.32$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché in questo caso non è stato determinato il valore della tensione a vita infinita $\sigma_{A,\infty,-1}$.

5.4.3 Risultati delle prove per provini con intaglio a V

Nel Grafico 5-8 si riassumono i dati ottenuti per i provini V3AXSY con intaglio a V e raggio di raccordo di 3mm.

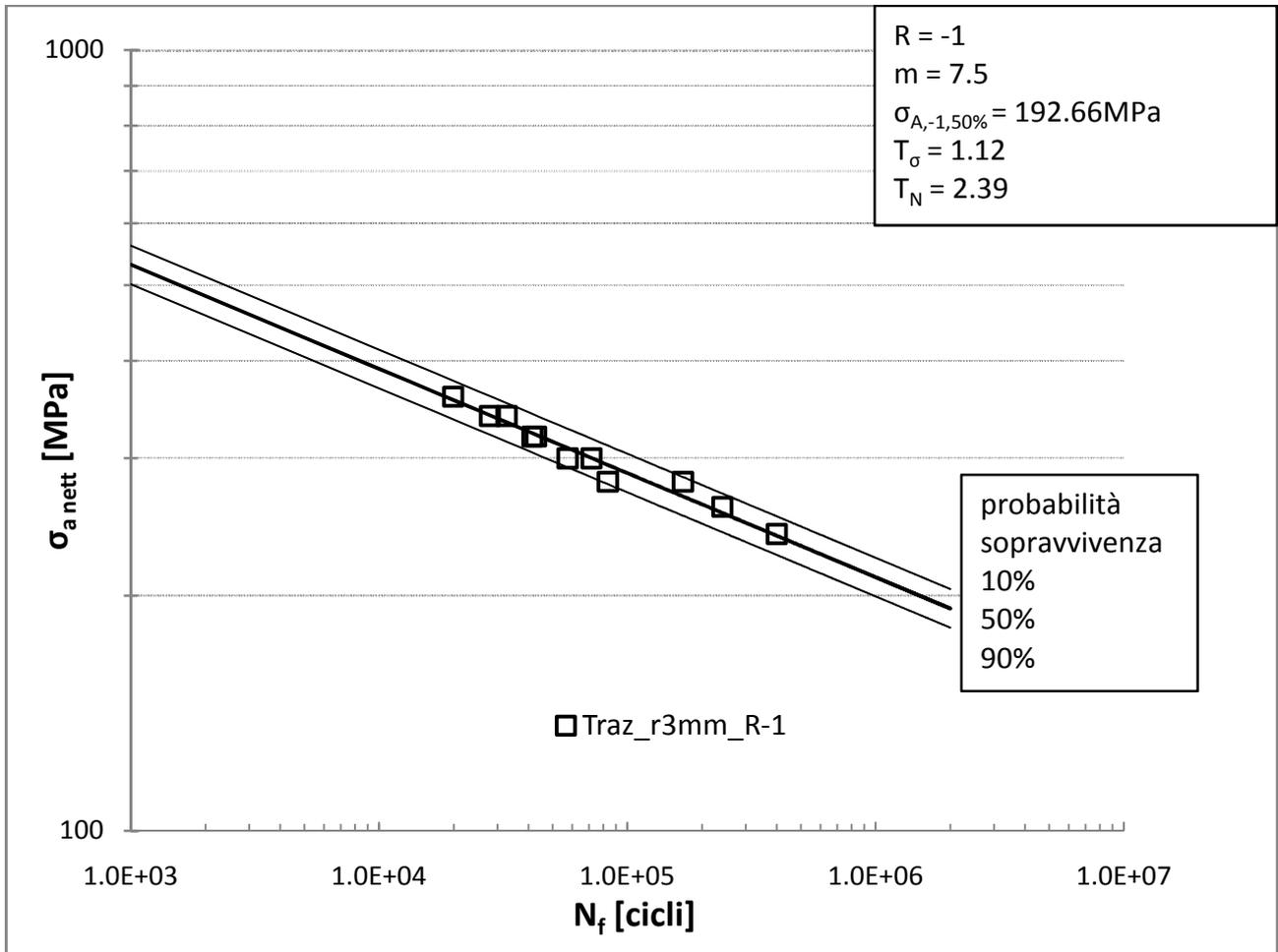


Grafico 5-8: Curva di Wohler con $\sigma_{a \text{ nett}}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini V3AXSY intagliati a V con $r=3\text{mm}$ di Figura 5.2

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.12^{7.5} = 2.39$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché in questo caso non è stato determinato il valore della tensione a vita infinita $\sigma_{A,\infty,-1}$.

Sebbene la pendenza della curva per i provini V3AXSY sia maggiore, evidenziando la maggiore criticità dell'intaglio a V rispetto a quello ad U, la banda di dispersione di quest'ultima serie risulta maggiore rispetto alla banda di dispersione σ_a -N degli omologhi provini intagliati a V.

5.4.4 Risultati delle prove per provini con intaglio non assialsimmetrico

Nel Grafico 5-9 si riassumono i dati ottenuti per i provini U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico e raggio di raccordo di 10.5mm.

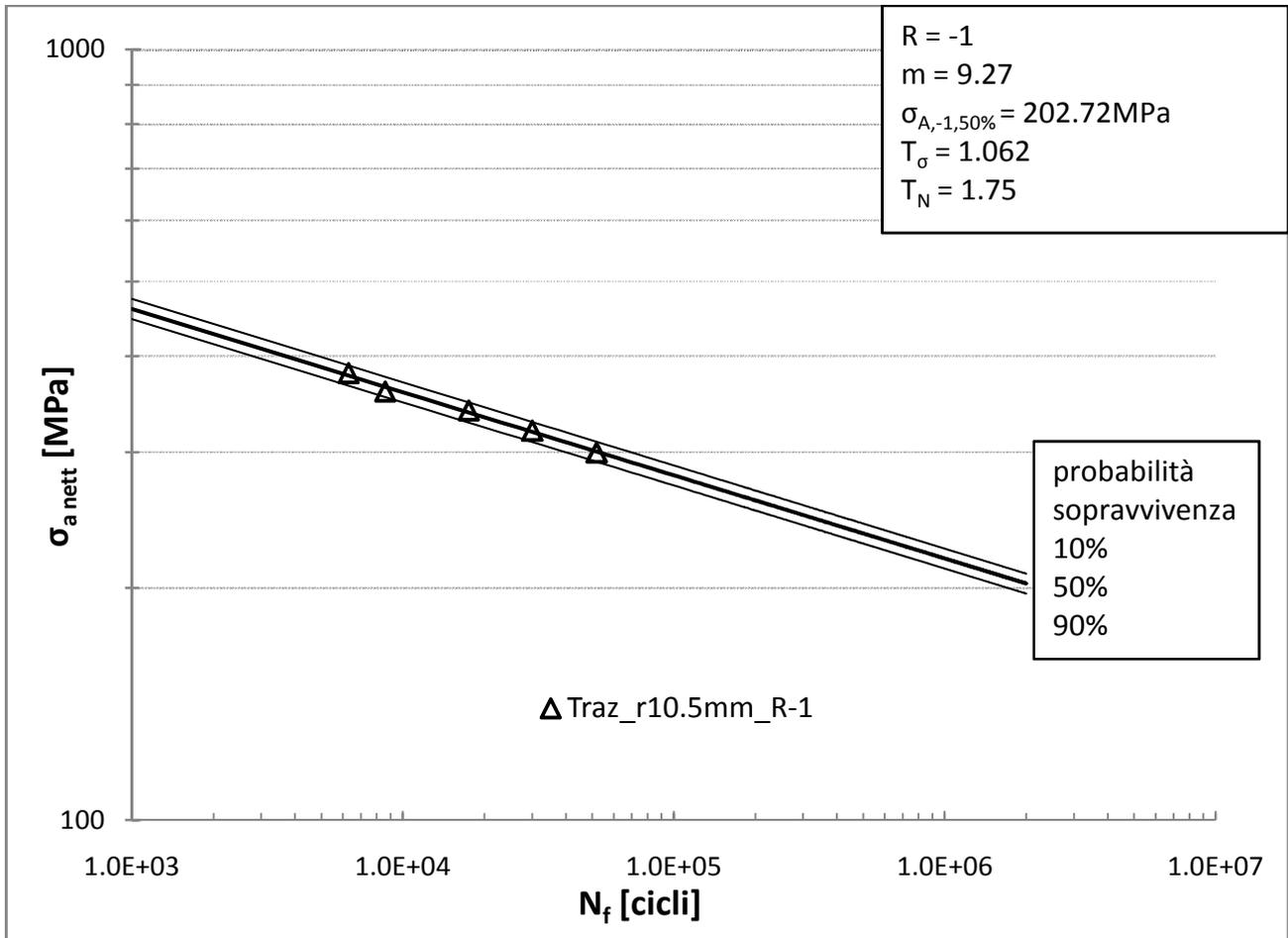


Grafico 5-9: Curva di Wohler con $\sigma_{a,nett}$ in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico ed $r=10.5\text{mm}$ di Figura 5.3

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_\sigma^m = 1.062^{9.27} = 1.74$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché anche in questo caso non è stato determinato il valore della tensione a vita infinita $\sigma_{A\infty,-1}$.

Sebbene la pendenza della curva per i provini con intaglio non assialsimmetrico sia minore rispetto alle precedenti, evidenziando la minore criticità dell'intaglio in assoluto, la banda di dispersione di quest'ultima serie risulta minore rispetto alla banda di dispersione σ_a -N dei provini U5AXSY e V3AXSY.

5.5 APPROCCIO BASATO SULLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA

In questo paragrafo sono presentati i risultati di tutte le prove di fatica analizzati in termini di energia dissipata dal materiale verso l'ambiente Q . Sono dunque presentati grafici $Q-N_f$ a rapporto di ciclo $R=-1$ per le differenti geometrie di intaglio.

Il valore di Q è rilevabile solo quando la temperatura del provino si è stabilizzata al fine di rientrare nelle condizioni al contorno che portano dall'equazione espressa in termini di potenza (1-7), all'equazione (1-8) di capitolo 1.

Di seguito, in Figura 5.22, è riportato un classico esempio dell'andamento della temperatura di provini con geometria V3AXSY per l'intera durata della prova espressa come rapporto fra il numero di cicli di carico eseguiti N e in numero di cicli a rottura N_f .

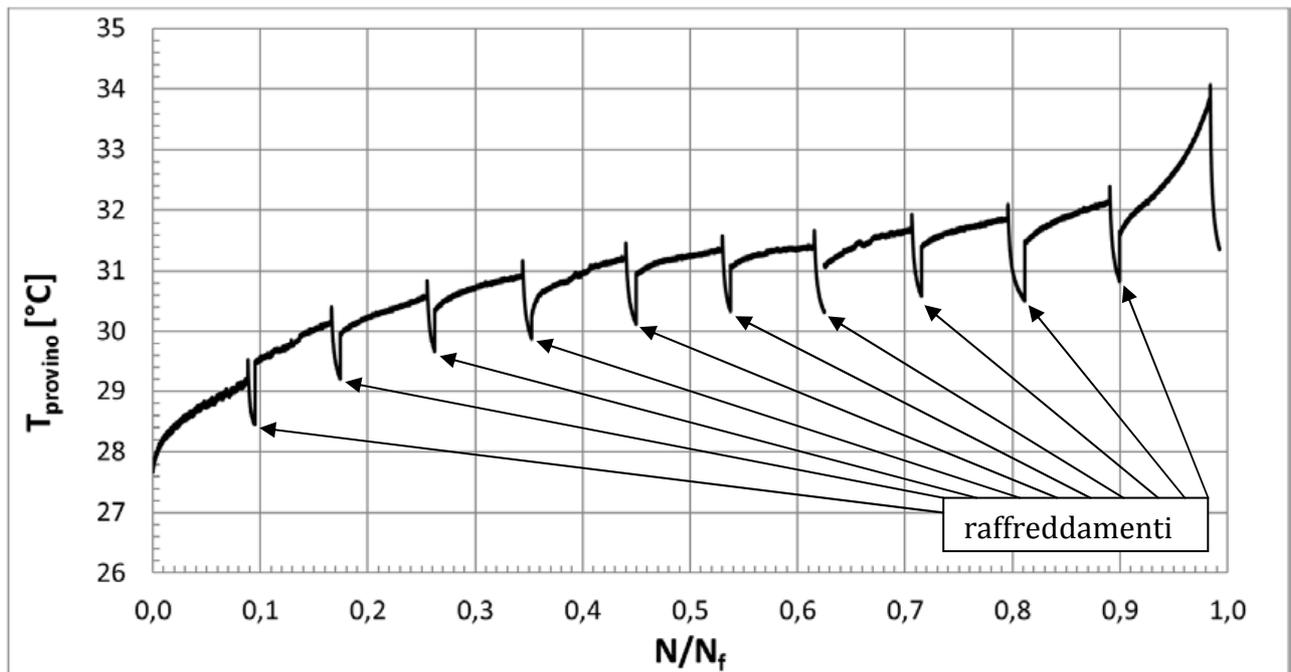


Figura 5.22: Andamento della temperatura del provino Traz_r3mm_R-1_11 (con geometria V3AXSY) in funzione del rapporto numero alternanze eseguite su numero alternanze a rottura

E' possibile notare in Figura 5.22 i 10 raffreddamenti eseguiti ogni qualvolta la temperatura del provino si fosse stabilizzata.

Ogni qualvolta la temperatura si sia stabilizzata, è quindi possibile interrompere la prova in maniera istantanea al valore di carico in cui si trova la macchina. Qualche secondo prima dell'interruzione dell'applicazione del carico sinusoidale si avvia, ad elevata frequenza di

campionamento (22Hz), l'acquisizione del segnale di temperatura proveniente dalla termocoppie in modo tale da poter valutare la velocità di raffreddamento con maggior cura. Di seguito, in Figura 5.23, è riportato un classico esempio dell'andamento della temperatura di un provino con geometria U10.5NAXSY in funzione del numero di cicli di carico applicati N .

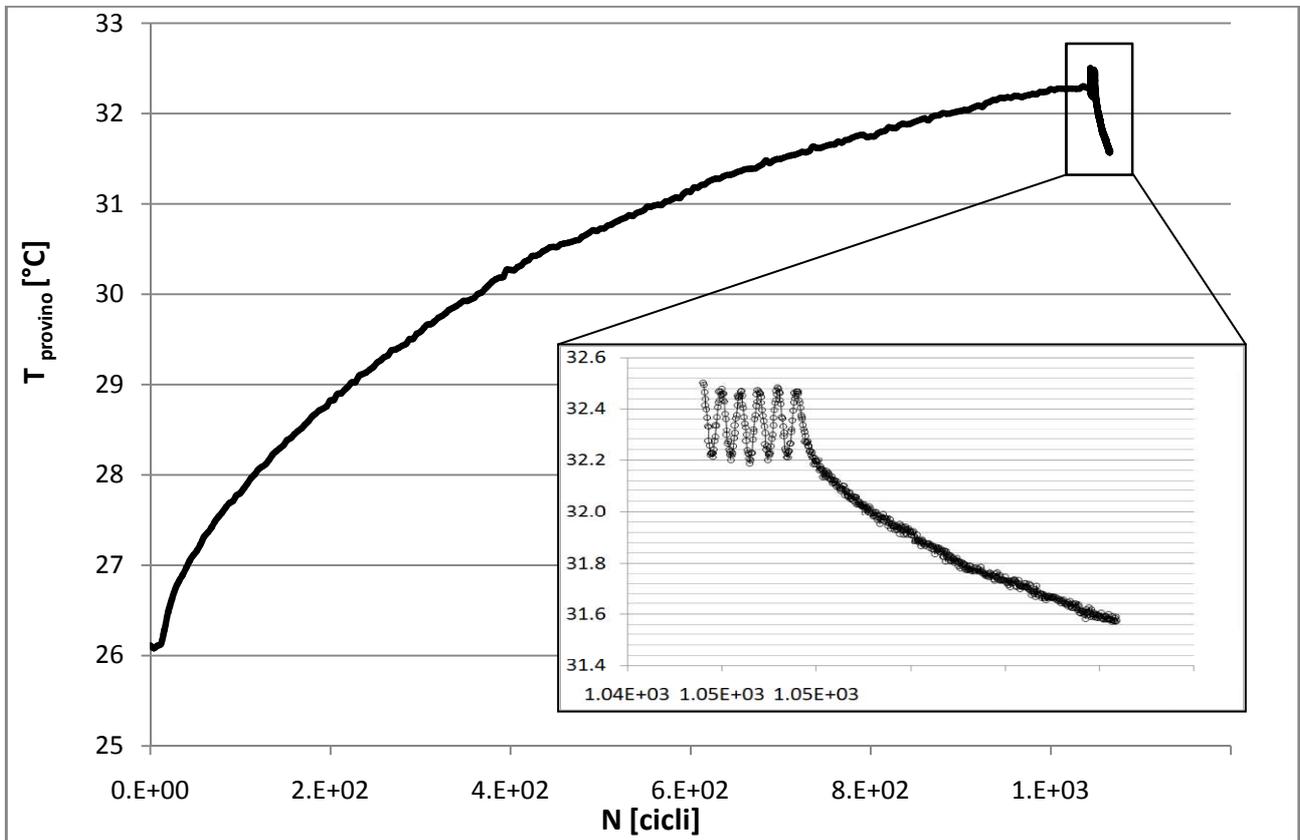


Figura 5.23: Andamento della temperatura ed acquisizione del primo raffreddamento per il provino Traz_r10.5mm_R-1_04 con geometria U10.5NAXSY

Una volta acquisito il gradiente di raffreddamento si passa alla valutazione della pendenza del raffreddamento negli istanti immediatamente successivi all'interruzione della prova come mostrato in Figura 5.24 .

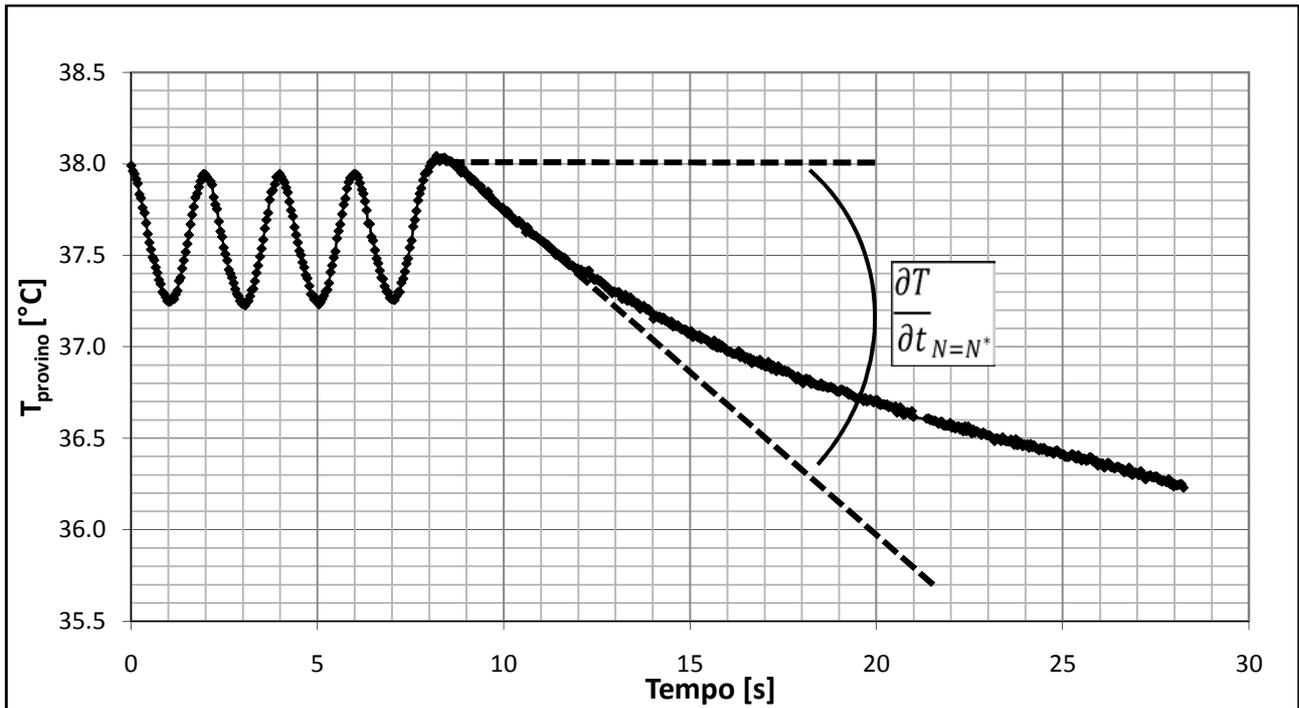


Figura 5.24: Valutazione della velocità di raffreddamento per il secondo gradiente di raffreddamento del provino Traz_r10.5_R-1_01 con geometria U10.5NAXSY eseguito al ciclo 1124 e alla temperatura ambiente di 23.1°C

Successivamente, conoscendo le caratteristiche del materiale ossia, la densità e il calore specifico, si può facilmente ricavare il valore della potenza termica H secondo l'equazione (1-9) e qui sotto riportata:

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

$$H = \rho c_s \frac{dT}{dt} \left[\frac{kJ}{m^3s} \right]$$

Risulta immediato, a questo punto, calcolare il valore dell'energia specifica dissipata dal materiale per unità di volume e per ciclo Q secondo la (1-10) e sotto riportata:

$$Q = \frac{H}{f} \left[\frac{kJ}{m^3 ciclo} \right]$$

Per uno stesso provino sono stati effettuati più raffreddamenti allo scopo di valutare la variazione di Q in funzione 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 adimensionlizzato rispetto al numero di cicli a rottura. 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 come riportato in Figura 5.25 e Figura 5.26.

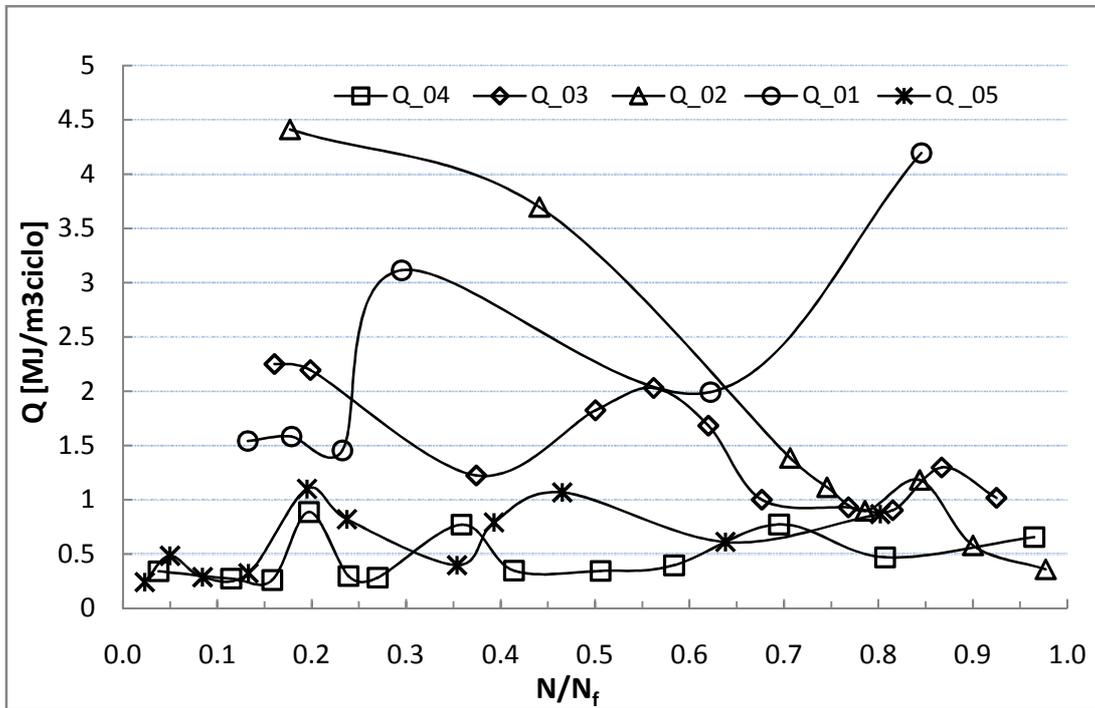


Figura 5.25: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli adimensionalizzato rispetto il numero di cicli a rottura per le geometrie di provini U10.5NAXSY testate a R=-1

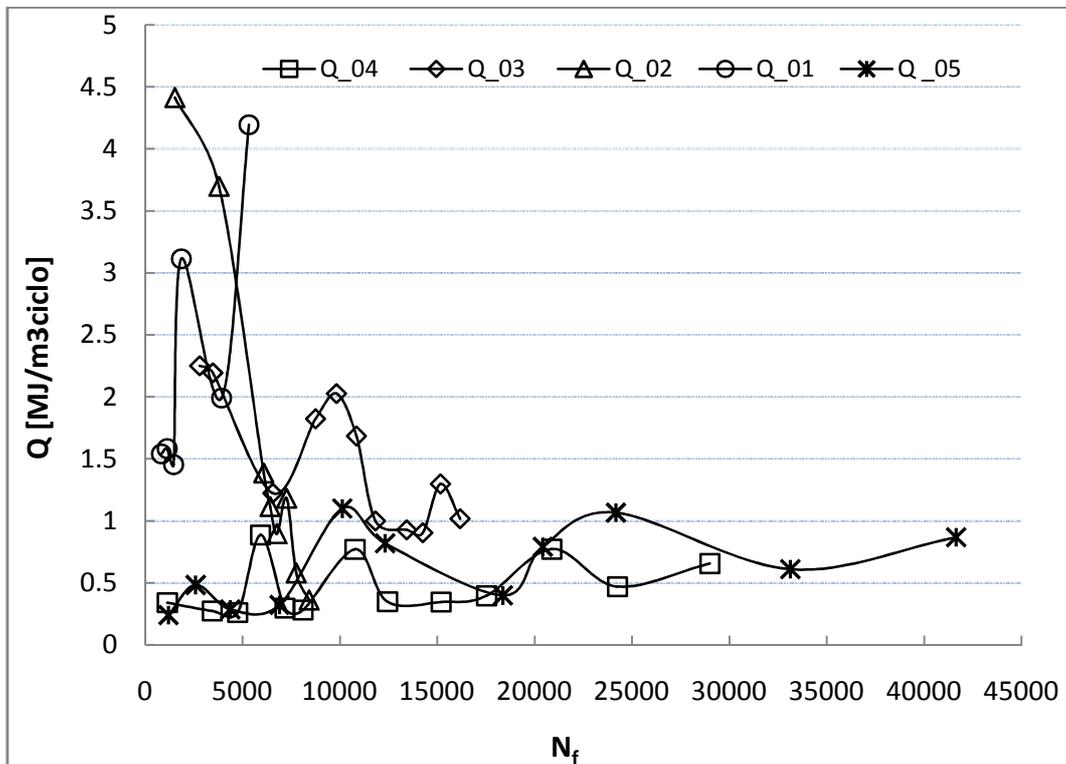


Figura 5.26: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli a rottura per le geometrie di provini U10.5NAXSY testate a R=-1

Tuttavia, per i provini in cui non si è utilizzata la procedura che prevede l'interruzione dell'applicazione della forza sempre in compressione, l'andamento risulta oscillante con escursioni particolarmente elevate come descritto nelle figure seguenti:

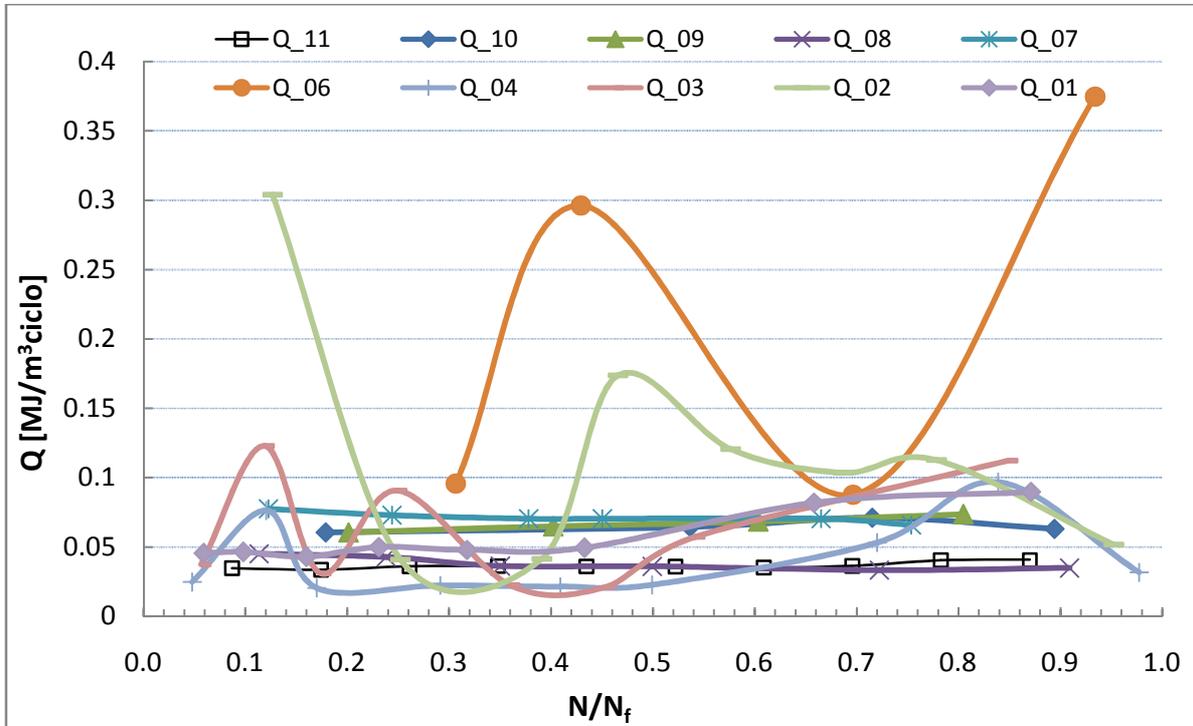


Figura 5.27: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli adimensionalizzato rispetto il numero di cicli a rottura per le geometrie di provini V3AXSY testate a $R=-1$

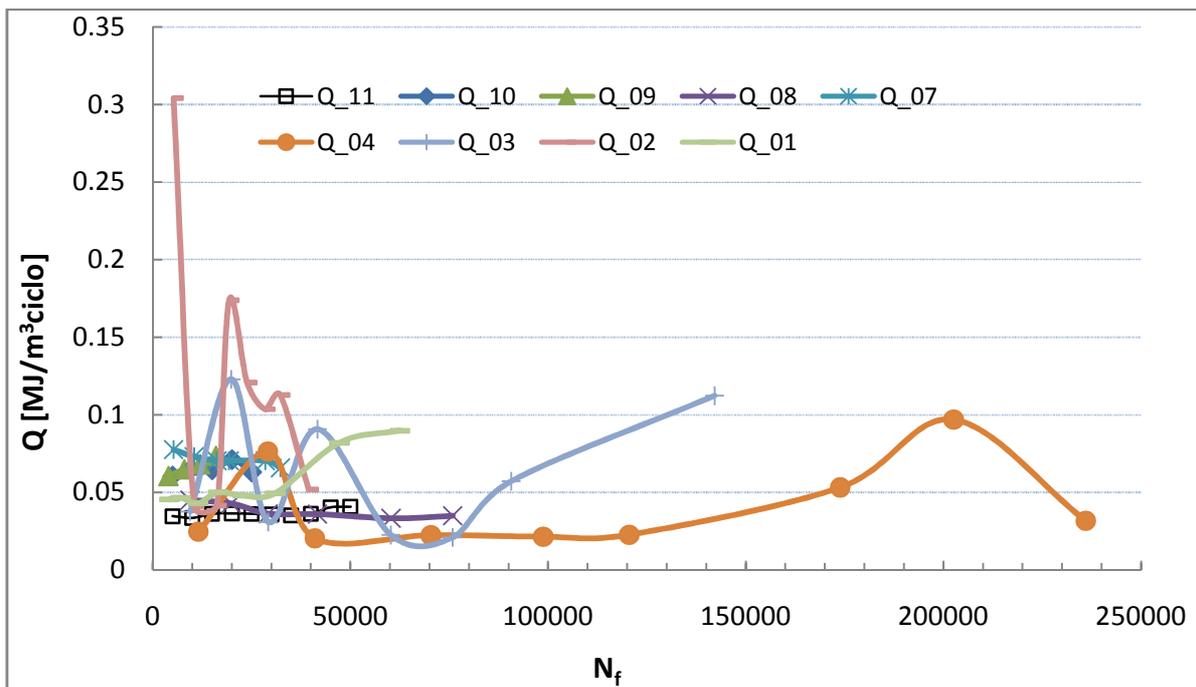


Figura 5.28: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli a rottura per le geometrie di provini V3AXSY testate a $R=-1$

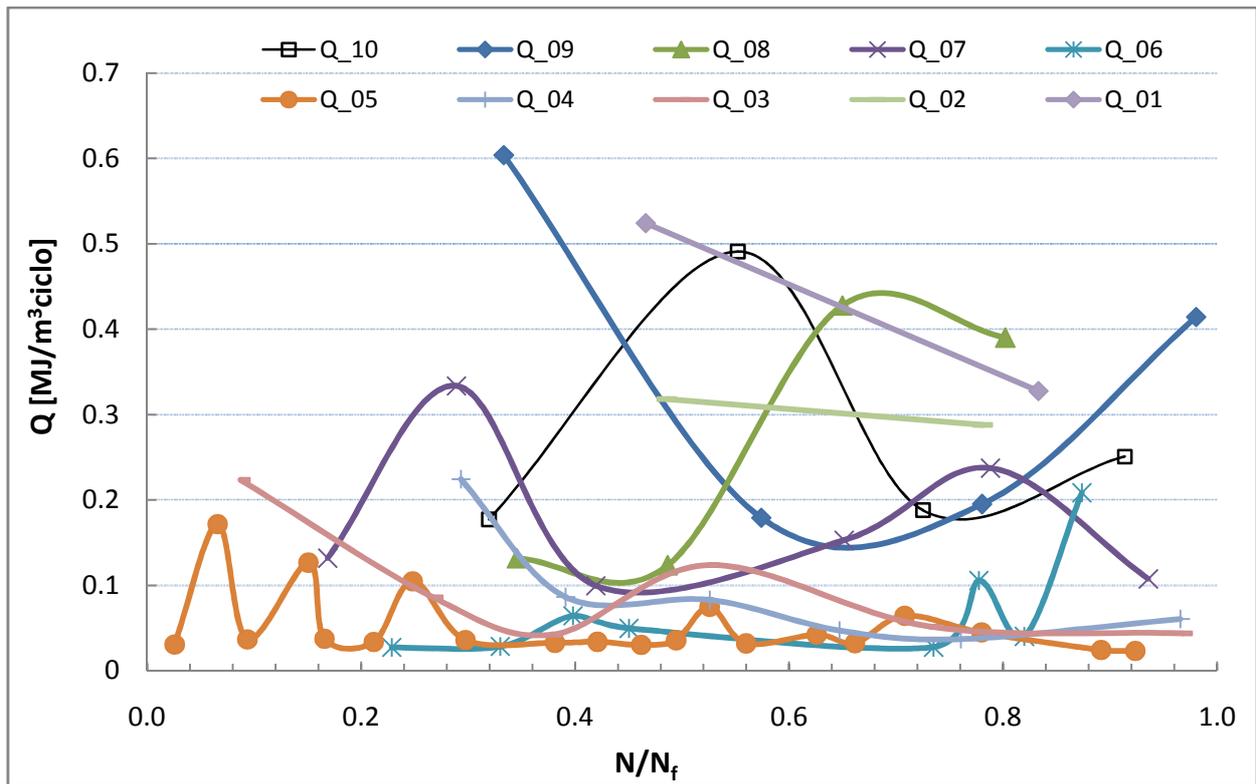


Figura 5.29: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli adimensionalizzato rispetto il numero di cicli a rottura per le geometrie di provini U5AXSY testate a $R=-1$

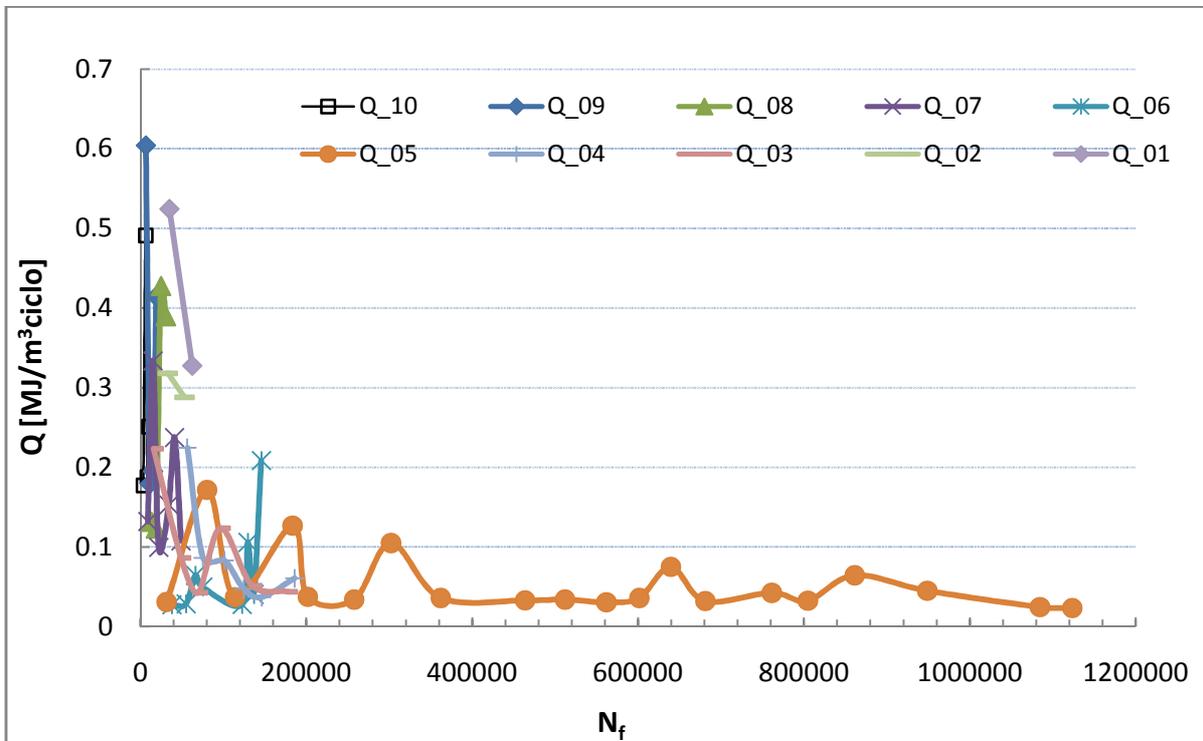


Figura 5.30: Andamento dell'energia dissipata Q in funzione del numero di cicli a rottura per le geometrie di provini U5AXSY testate a $R=-1$

Queste forti escursioni sono dovute alla componente termoelastica che risulta non trascurabile qualora la temperatura del provino sia prossima alla temperatura dell'ambiente. Viceversa, il contributo dovuto all'effetto termoelastico risulta tanto più trascurabile quanto più la temperatura del provino aumenta, discostandosi dalla temperatura ambiente.

Riprendendo quanto detto nel secondo capitolo, l'incremento di temperatura in campo lineare elastico è descritto dall'equazione (2-38) :

$$\Delta T = -\frac{\alpha T \Delta I_{1,\sigma}}{\rho C_\sigma} = -K_m T \Delta I_{1,\sigma}$$

dove ΔT [K] indica la variazione di temperatura del materiale dovuta all'effetto termoelastico, α [K⁻¹] indica il coefficiente di dilatazione termica, ρ [kg/m³] e C_σ [J/kgK] sono rispettivamente la densità ed il calore specifico a tensione costante del materiale, $\Delta I_{1,\sigma}$ [Pa] la variazione del primo invariante delle tensioni ed, in fine, T [K] è la temperatura del materiale prima dell'applicazione del carico. Qualora si valuti la forma contratta dell'equazione (2-38), la variabile K_m indica la costante termoelastica che, come esposto nel capitolo 2.6 , ha valore $3.76 \cdot 10^{-12}$ Pa⁻¹.

Il contributo dato dalla termoelasticità comporta un incremento della velocità di raffreddamento del provino, qualora il provino venga bloccato in trazione, ed un decremento della velocità di raffreddamento , qualora il provino venga bloccato in compressione.

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 si deve, per ogni provino, ricavare un Q che lo rappresenti. Nella più generale delle ipotesi, si possono presentare tre 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 raggiunge una stabilizzazione.
- l'andamento di Q misurato nei diversi raffreddamenti al variare del numero di cicli non raggiunga mai una stabilizzazione variando in maniera oscillatoria.

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, sempre decrescente o che non raggiunga mai la stabilizzazione 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, mediando il valore di Q tramite una regressione lineare.

Il grafico di Q in funzione del numero di cicli a rottura può avere diversi andamenti. 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 Wohler modificata in cui in ascissa si ha ancora il numero di cicli a rottura mentre in ordinata si ha il parametro energetico Q.

Una curva completa si può ottenere eseguendo una serie di prove a differenti ampiezze di tensione (a parità di geometria e di rapporto di ciclo R) in un campo sufficientemente ampio da garantire la corretta caratterizzazione del materiale.

5.5.1 Risultati delle prove per provini con intaglio ad U

Nel Grafico 5-10 si riassumono i dati ottenuti per i provini con intaglio a U e raggio di raccordo di 5mm per tutte le prove eseguite inizialmente in cui non si è tenuto conto del carico che applicava la macchina MFL assiale nel momento in cui si bloccava la prova per l'acquisizione del gradiente di raffreddamento. Prima, però, si riporta la Tabella 5.5 di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici.

PROVINO	N _f [cicli]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	σ _a nett [MPa]	f [Hz]
Traz_r5mm_R-1_01	74793	506.06	0.50606	350	15-18
Traz_r5mm_R-1_02	68171	316.64	0.31664	350	14-16
Traz_r5mm_R-1_03	183547	94.11	0.09411	320	14-20
Traz_r5mm_R-1_04	192593	109.26	0.10926	300	18-26
Traz_r5mm_R-1_05	1216364	48.63	0.04863	280	20-26
Traz_r5mm_R-1_06	166791	58.08	0.05808	300	23
Traz_r5mm_R-1_07	52358	179.8	0.1798	380	15
Traz_r5mm_R-1_08	38219	217.5	0.2175	390	10-12
Traz_r5mm_R-1_09	19447	396.09	0.39609	400	8-10
Traz_r5mm_R-1_10	11475	277.83	0.27783	410	6-8

Tabella 5.5: Risultati ottenuti per le prove su geometrie U5AXSY con intaglio ad U in cui non si è valutato le condizioni di mantenimento del carico applicato dalla macchina MFL assiale durante la fase di acquisizione del gradiente di temperatura

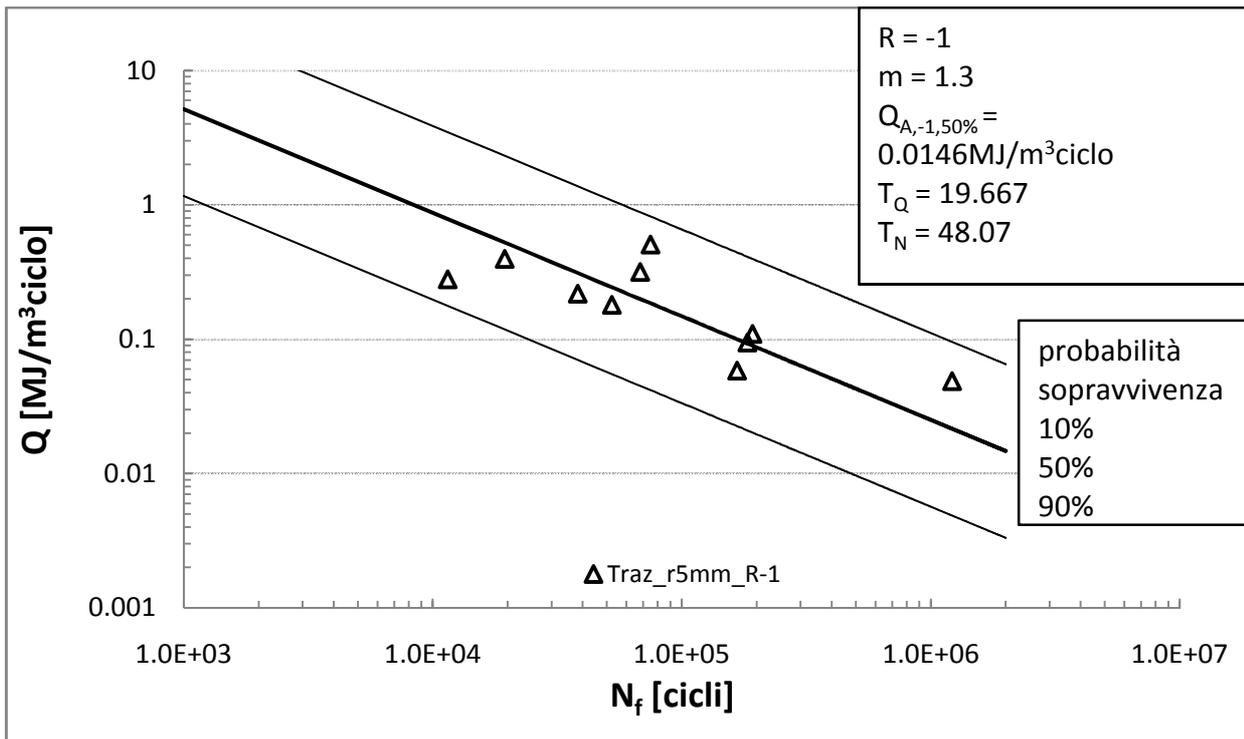


Grafico 5-10: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U5AXSY intagliati ad U con r=5mm U in cui non si è valutato le condizioni di mantenimento del carico applicato dalla macchina MFL assiale durante la fase di acquisizione del gradiente di temperatura

Il valore di dispersione lungo N risulta molto elevato e si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 19.667^{1.3} = 48.07$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché in questo caso non è stato determinato il valore della tensione a vita infinita $Q_{A,50\%}$.

Nel Grafico 5-11 si riassumono i dati ottenuti per i provini con intaglio a U e raggio di raccordo di 5mm esposti nel Grafico 5-10 in cui si sono rivisti tutti i raffreddamenti, eliminandone tutti coloro che evidenziavano un palese fermo macchina in fase di trazione. Prima, però, si riporta la Tabella 5.6 di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici.

PROVINO	N_f [cicli]	Q [kJ/m³ciclo]	Q [MJ/m³ciclo]	σ_{a nett} [MPa]	f [Hz]
Traz_r5mm_R-1_01	74793	327.74	0.32774	350	15-18
Traz_r5mm_R-1_02	68171	265.52	0.26552	350	14-16
Traz_r5mm_R-1_03	183547	59.33	0.05933	320	14-20
Traz_r5mm_R-1_04	192593	72.6	0.0726	300	18-26
Traz_r5mm_R-1_05	1216364	33.61	0.03361	280	20-26
Traz_r5mm_R-1_06	166791	34.54	0.03454	300	23
Traz_r5mm_R-1_07	52358	123.39	0.12339	380	15
Traz_r5mm_R-1_08	38219	122.44	0.12244	390	10-12
Traz_r5mm_R-1_09	19447	173.65	0.17365	400	8-10
Traz_r5mm_R-1_10	11475	188.86	0.18886	410	6-8

Tabella 5.6: Risultati ottenuti per le prove su geometrie U5AXSY con intaglio ad U rivisti interamente nei raffreddamenti, eliminandone tutti coloro che evidenziavano un palese fermo macchina in fase di trazione

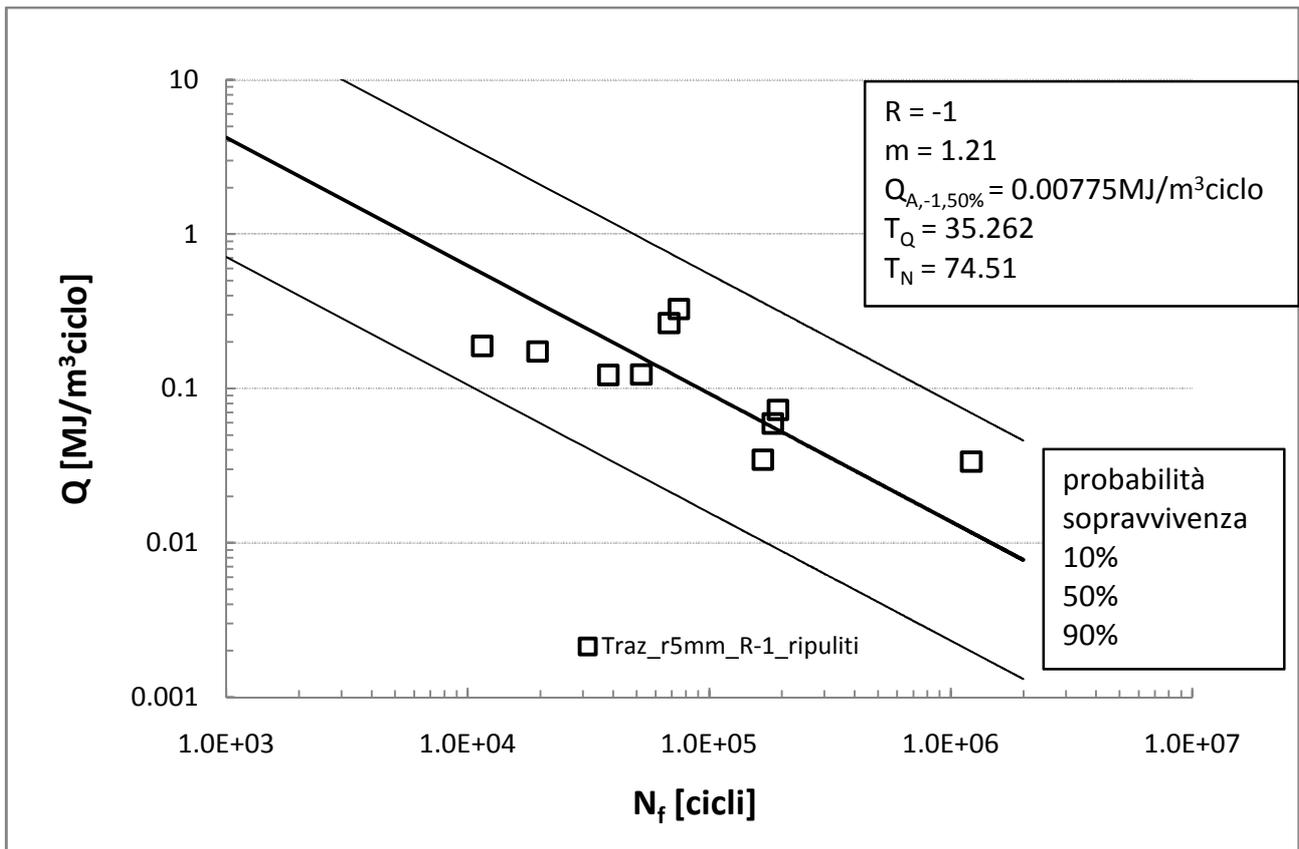


Grafico 5-11: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U5AXSY intagliati ad U con r=5mm, di cui si sono decurtati i raffreddamenti in cui la macchina MFL assiale bloccava in fase di trazione

Sebbene la rivisitazione dei dati sperimentali imponga una maggiore rigidità e selettività al metodo di acquisizione, il valore di dispersione lungo N risulta maggiore rispetto a quello riportato nel Grafico 5-10. Il valore numerico si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 35.262^{1.21} = 74.51$$

Sebbene la pendenza della curva $Q-N_f$ in cui non si è tenuto conto dei raffreddamenti iniziati in fase di trazione sia maggiore, la banda di dispersione risulta maggiore rispetto alla banda di dispersione degli omologhi provini intagliati a U in cui non si è distinto lo stato tensionale del provino ad inizio raffreddamento. Questo può dire con forza che, se non si adotta una procedura particolare per bloccare la macchina prima dell'inizio del raffreddamento, la distribuzione statistica risulta comunque fortemente dispersa!

Nel Grafico 5-12 si riassumono infine i dati ottenuti per le due differenti serie di dati valutate per tutti i provini precedentemente valutati singolarmente. Anche in questo caso, qui di seguito si riporta la tabella di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici

	PROVINO	N_f [cicli]	Q [kJ/m³ciclo]	Q [MJ/m³ciclo]	σ_a nett [MPa]
U5AXSY Traz_r5mm_R-1	Traz_r5mm_R-1_01	74793	506.06	0.50606	350
	Traz_r5mm_R-1_02	68171	316.64	0.31664	350
	Traz_r5mm_R-1_03	183547	94.11	0.09411	320
	Traz_r5mm_R-1_04	192593	109.26	0.10926	300
	Traz_r5mm_R-1_05	1216364	48.63	0.04863	280
	Traz_r5mm_R-1_06	166791	58.08	0.05808	300
	Traz_r5mm_R-1_07	52358	179.8	0.1798	380
	Traz_r5mm_R-1_08	38219	217.5	0.2175	390
	Traz_r5mm_R-1_09	19447	396.09	0.39609	400
	Traz_r5mm_R-1_10	11475	277.83	0.27783	410
U5AXSY Traz_r5mm_R-1 RIVISTI	Traz_r5mm_R-1_01	74793	327.74	0.32774	350
	Traz_r5mm_R-1_02	68171	265.52	0.26552	350
	Traz_r5mm_R-1_03	183547	59.33	0.05933	320
	Traz_r5mm_R-1_04	192593	72.6	0.0726	300
	Traz_r5mm_R-1_05	1216364	33.61	0.03361	280
	Traz_r5mm_R-1_06	166791	34.54	0.03454	300
	Traz_r5mm_R-1_07	52358	123.39	0.12339	380
	Traz_r5mm_R-1_08	38219	122.44	0.12244	390
	Traz_r5mm_R-1_09	19447	173.65	0.17365	400
	Traz_r5mm_R-1_10	11475	188.86	0.18886	410

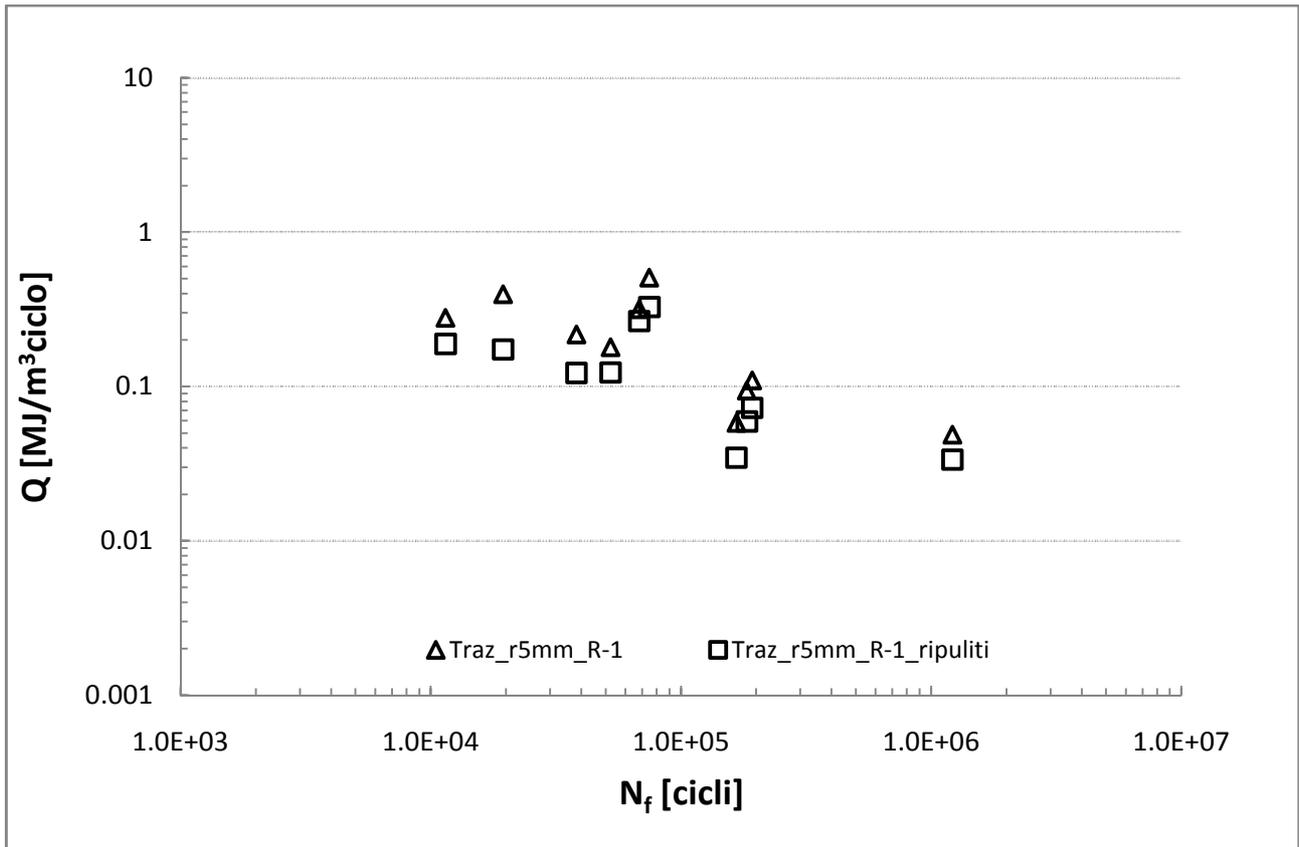


Grafico 5-12: Distribuzione delle misurazioni di Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U5AXSY intagliati ad U con $r=5\text{mm}$, sia di cui si sono decurtati i raffreddamenti in cui la macchina MFL assiale bloccava in fase di trazione, sia di cui si son presi tutti i raffreddamenti indistintamente

Dall'analisi del Grafico 5-12 si vede come, per i provini in cui sono stati esclusi i raffreddamenti in concomitanza con applicazioni di carico di tensione (Traz_r5mm_R-1_ripuliti), il valore del calore dissipato verso l'ambiente sia generalmente in valore assoluto più basso rispetto alla serie di dati in cui non si sono trascurati i raffreddamenti in fase di trazione (Traz_r5mm_R-1).

Inoltre, tra le due serie di dati, viene mantenuta una forte dispersione statistica attorno al valor medio che non aiuta a metter in luce eventuali altri contributi alla comprensione del fenomeno.

5.5.2 Risultati delle prove per provini con intaglio a V

Nel Grafico 5-13 si riassumono tutti i dati ottenuti per i provini V3AXSY con intaglio a V e raggio di raccordo di fondo intaglio pari a 3mm, sebbene si siano utilizzati procedure differenti nel condurre le prove. Prima, però, si riporta una tabella di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici.

PROVINO	N _f [cicli]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	σ _a nett [MPa]	f [Hz]
Traz_r3mm_R-1_01	71703	65.39	0.06539	300	8-20
Traz_r3mm_R-1_02	41431	122.8	0.1228	320	6-14
Traz_r3mm_R-1_03	167459	66.6	0.0666	280	20-24
Traz_r3mm_R-1_04	241450	42.3	0.0423	260	20-24
Traz_r3mm_R-1_05**	399853	/	/	240	20-25
Traz_r3mm_R-1_06	32607	189.4	0.1894	340	10-14
Traz_r3mm_R-1_07#	42858	70.33	0.07033	320	6-14
Traz_r3mm_R-1_08#	83424	37.67	0.03767	280	15-24
Traz_r3mm_R-1_09#	19884	66.7	0.0667	360	15-24
Traz_r3mm_R-1_10#	27962	64.18	0.06418	340	15-25
Traz_r3mm_R-1_11#	57489	36.64	0.03664	300	20-25

** no acquisizioni di calore

nuova procedura: stop solo in fase di compressione

Tabella 5.7: Sintesi dei risultati ottenuti per le prove su geometrie V3AXSY con intaglio a V

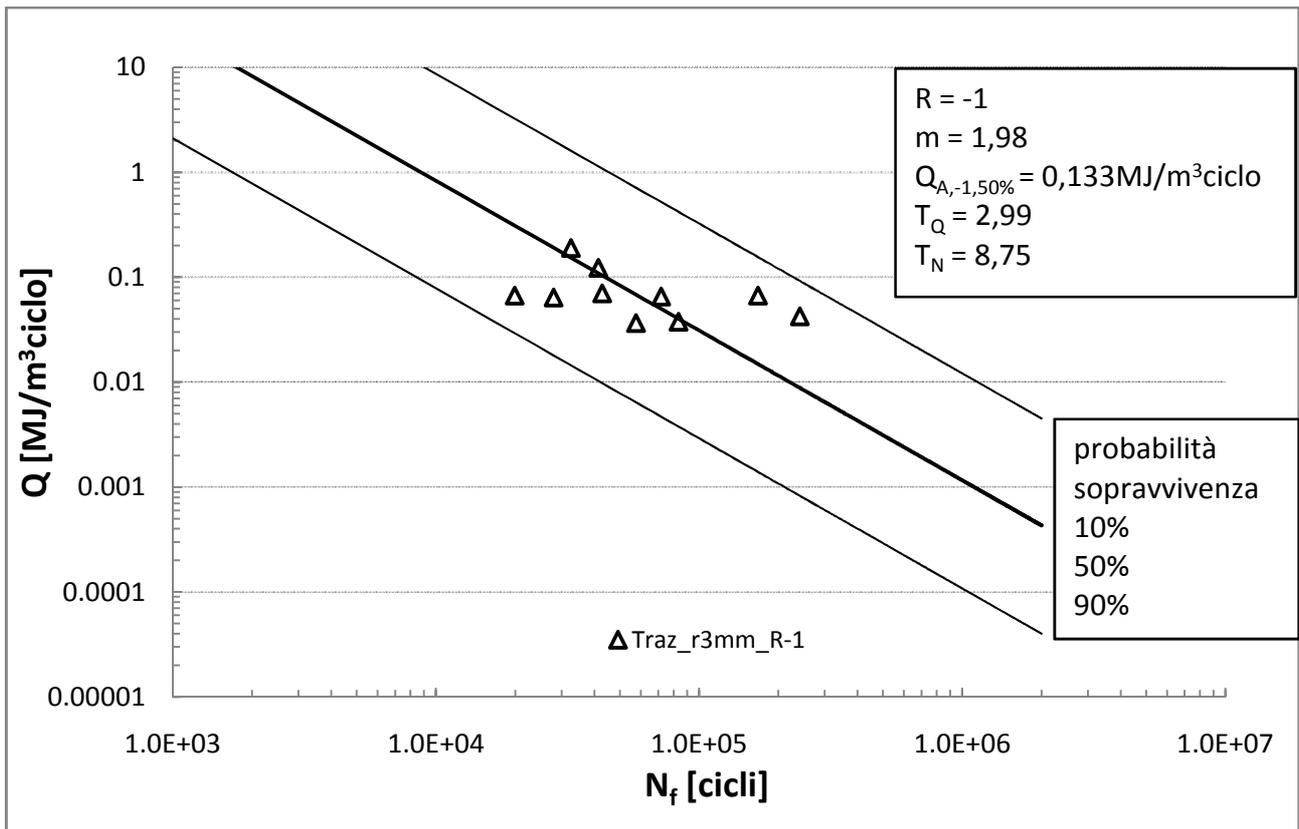


Grafico 5-13: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini V3AXSY intagliati a V con r=3mm, per tutti i dati di Tabella 5.7

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 2.99^{1.98} = 8.75$$

E' da sottolineare come non sia presente il ginocchio della curva di Wohler poiché anche in questo caso non è stato determinato il valore della tensione a vita infinita $Q_{A,50\%}$.

Sebbene le procedure per ottenere questi punti sperimentali siano differenti, la banda di dispersione di quest'ultima serie risulta fortemente minore rispetto alla banda di dispersione Q-N degli omologhi provini intagliati a U.

Nel Grafico 5-14 si riassumono i dati ottenuti per i provini con intaglio a V e raggio di raccordo di fondo intaglio pari a 3mm per le prime prove in cui la procedura nel condurre le prove non prevedeva il fermo macchina in fase di sola compressione. Di conseguenza, nella tabella e nel grafico sotto illustrato, sono riportati i valori ottenuti eliminando tutti i raffreddamenti ottenuti con la macchina stoppata in fase di trazione e quindi riscontrante un più rapido raffreddamento che comporta un valore di Q scambiato verso l'ambiente maggiore!

PROVINO	N_f	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	σ_a nett [MPa]
Traz_r3mm_R-1_01	71703	50.42	0.05042	300
Traz_r3mm_R-1_02	41431	44.19	0.04419	320
Traz_r3mm_R-1_03	167459	17.71	0.01771	280
Traz_r3mm_R-1_04	241450	24.82	0.02482	260
Traz_r3mm_R-1_06	32607	91.77	0.09177	340

Tabella 5.8: Risultati ottenuti per le prove su geometrie V3AXSY con intaglio a V rivisti interamente nei raffreddamenti, eliminandone tutti coloro che evidenziavano un palese fermo macchina in fase di trazione

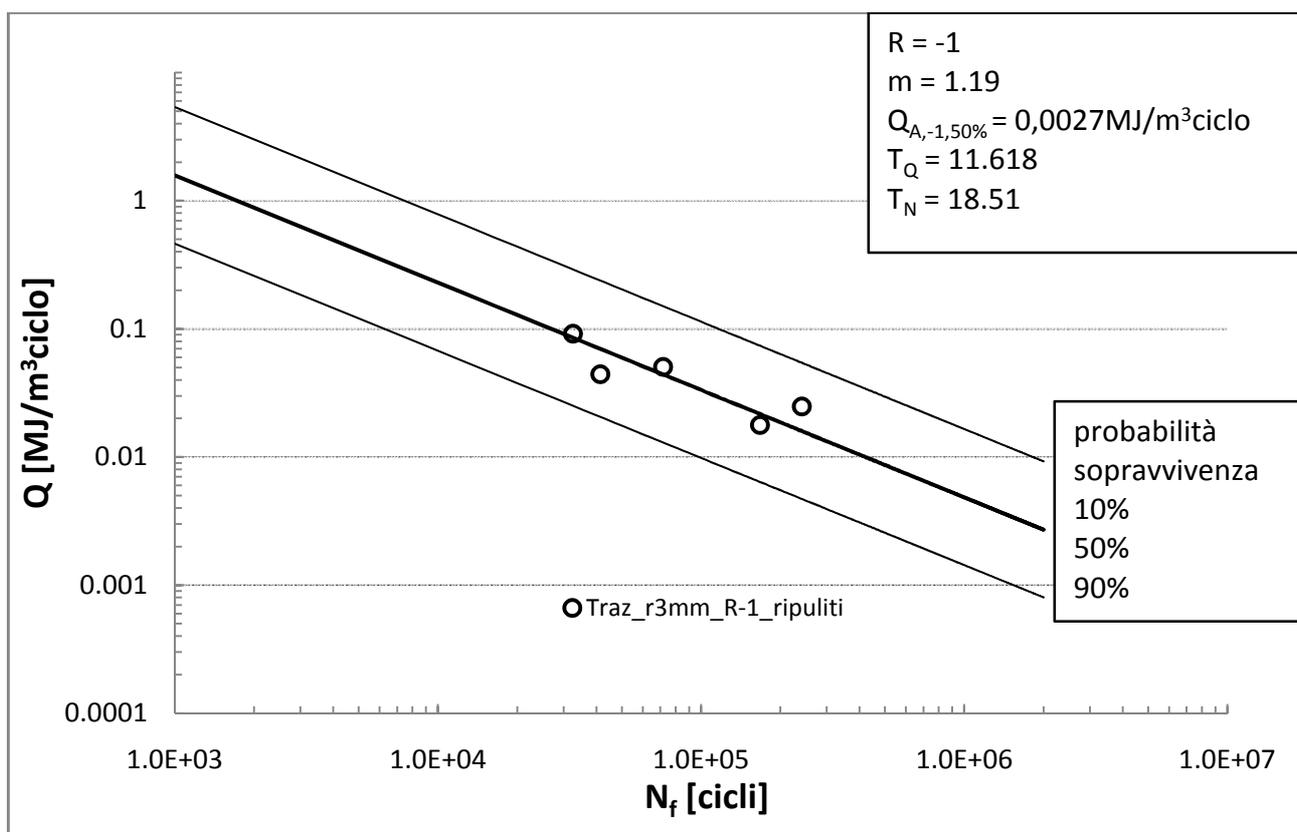


Grafico 5-14: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini V3AXSY intagliati a V con r=3mm, rivisti interamente nei raffreddamenti, eliminandone tutti coloro che evidenziavano un palese fermo macchina in fase di trazione (solo i dati di Tabella 5.8)

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 11.618^{1.19} = 18.51$$

Nel Grafico 5-15 si riassumono i dati ottenuti per i provini con intaglio a V e raggio di raccordo di fondo intaglio pari a 3mm per i quali si è adottata una nuova procedura che prevede, tramite il tasto “program hold”, il mantenimento del carico applicato al provino nel valore di massima compressione di ciclo.

PROVINO	N_f	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a \text{ ing}}$ [MPa]
Traz_r3mm_R-1_07	42858	70.33	0.07033	320
Traz_r3mm_R-1_08	83424	37.67	0.03767	280
Traz_r3mm_R-1_09	19884	66.7	0.0667	360
Traz_r3mm_R-1_10	27962	64.18	0.06418	340
Traz_r3mm_R-1_11	57489	36.64	0.03664	300

Tabella 5.9: Risultati ottenuti per le prove su geometrie V3AXSY con intaglio a V, per i quali si è adottato la nuova procedura con "program hold" in fase di compressione

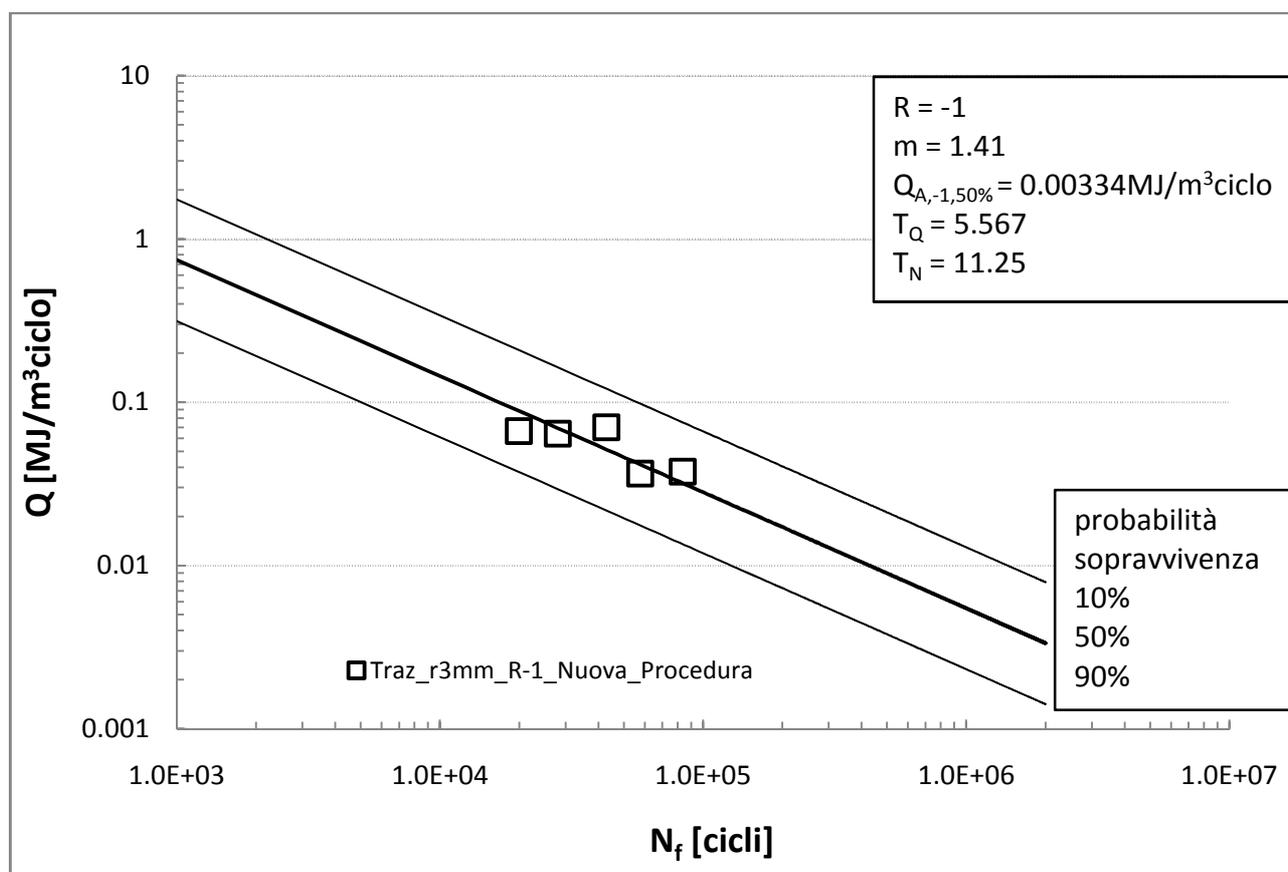


Grafico 5-15 : Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini V3AXSY intagliati a V con r=3mm, per i quali si è adottato la nuova procedura con "program hold" in fase di compressione (solo i dati di Tabella 5.9)

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 5.567^{1.41} = 11.25$$

Come si può valutare dai valori numerici, l'adozione di una procedura rigida che prevede sempre il mantenimento del carico in fase di massima compressione durante i raffreddamenti, comporta una riduzione nella dispersione statistica!

Nel Grafico 5-16 si mettono a confronto i risultati ottenuti tramite la nuova procedura con fermo macchina in fase di compressione del Grafico 5-15 con quelli ottenuti dalla rivisitazione di tutti i gradienti e relativa eliminazione di quelli in fase di trazione riportati nel Grafico 5-14

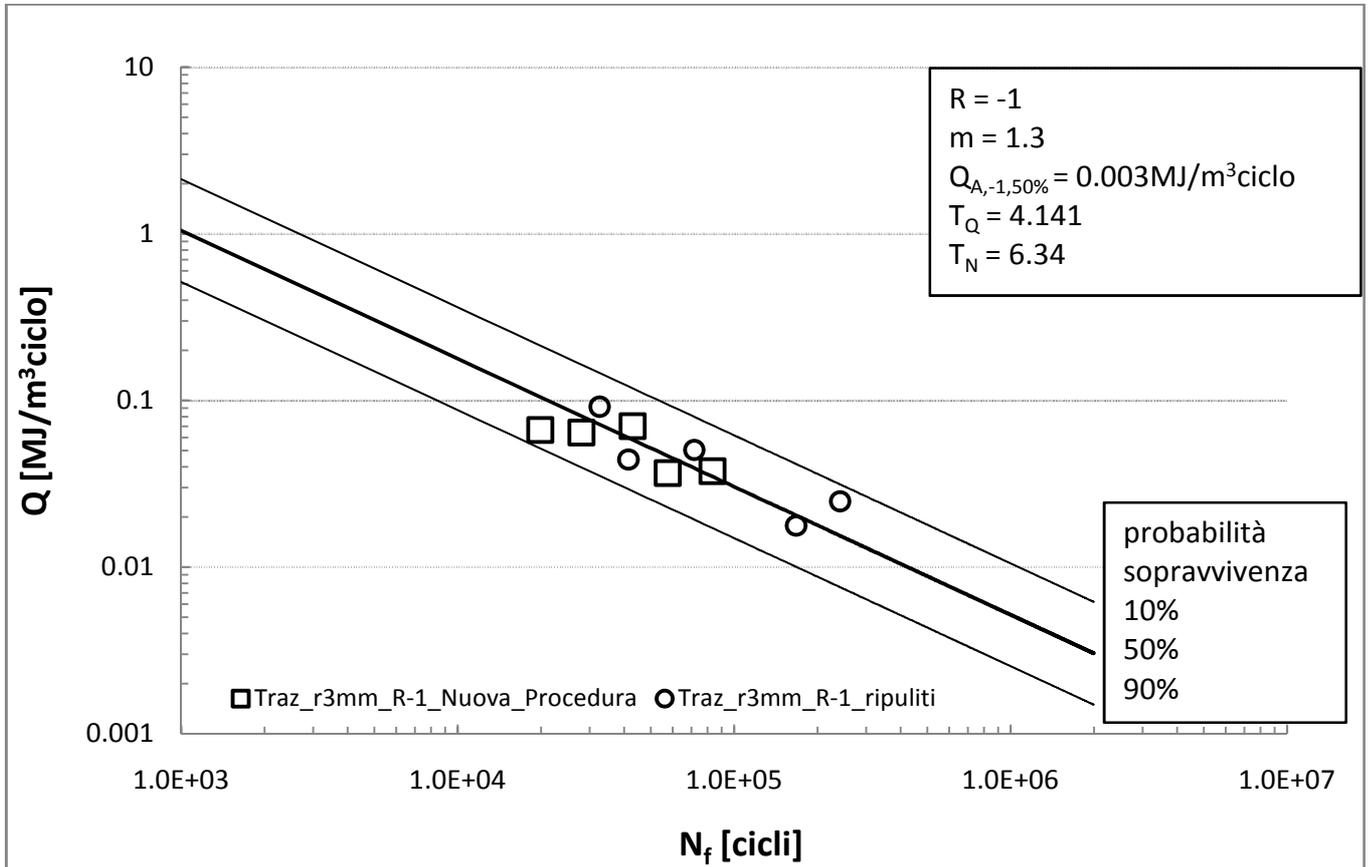


Grafico 5-16: Confronto fra i risultati ottenuti tramite la nuova procedura con fermo macchina in fase di compressione con quelli ottenuti dalla rivisitazione di tutti i gradienti e la relativa eliminazione di quelli in fase di trazione (dati di Tabella 5.8 e Tabella 5.9)

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 4.141^{1.3} = 6.34$$

Nel Grafico 5-17 si mettono a confronto tutti i risultati ottenuti tramite le prove sperimentali con quelli ottenuti tramite rielaborazione di dati.

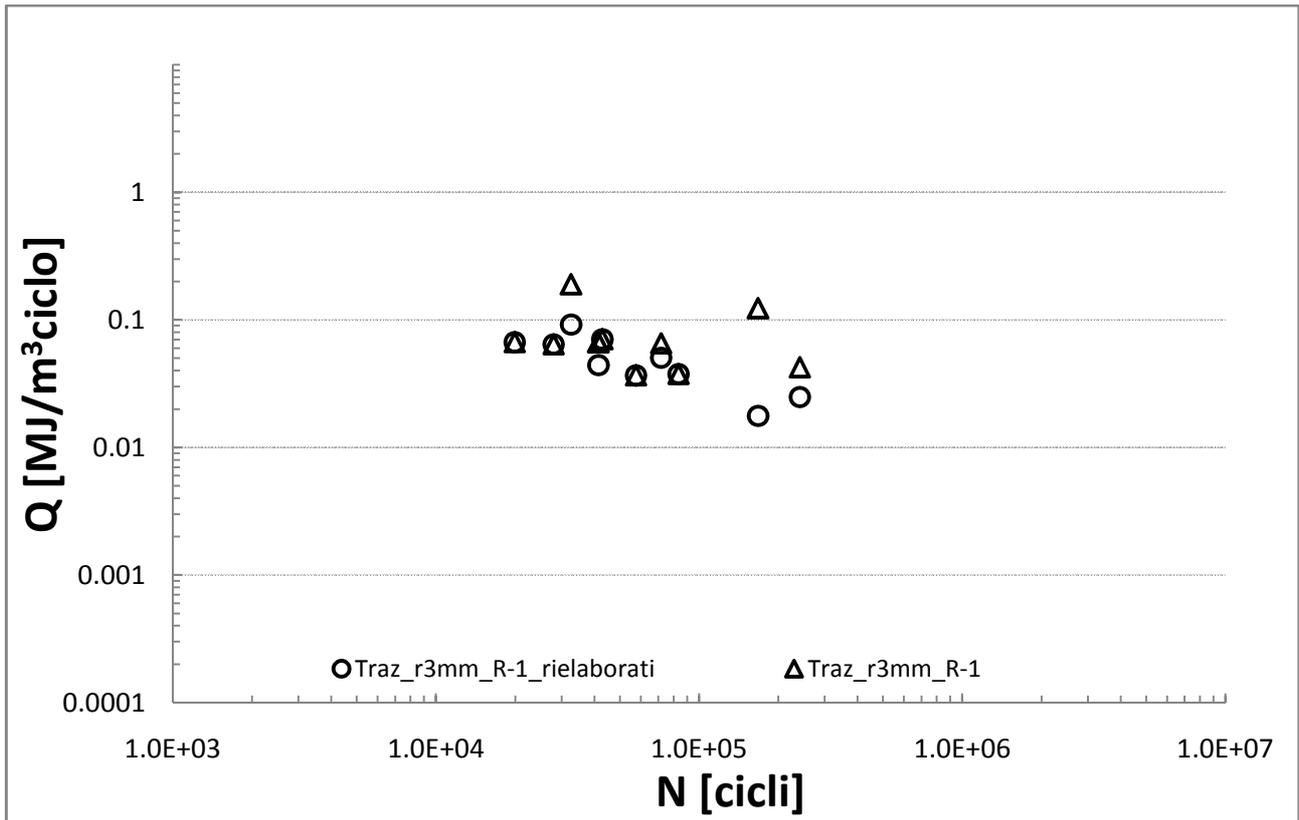


Grafico 5-17: Confronto per i provini V3AXSY fra tutti i risultati ottenuti tramite prove sperimentali (Tabella 5.7) e quelli ottenuti tramite rielaborazione (Tabella 5.8 e Tabella 5.9)

Sebbene, nella generalità dei casi, la pendenza della curva $Q-N_f$ per i provini a V sia minore rispetto a quello ad U, la dispersione di quest'ultima serie di dati risulta maggiore rispetto alla dispersione degli omologhi provini intagliati a V. Viceversa, i provini con intaglio a V richiedono mediamente un minore quantitativo di calore ceduto all'ambiente per poter arrivare a condizioni di vita infinita rispetto ai provini con intaglio ad U. Quest'ultima osservazione è in accordo con le curve σ_a-N_f riportate precedentemente in quanto, a parità di ampiezza di tensione applicata, per la geometria con intaglio a U si dissipa mediamente meno calore verso l'ambiente e quindi danneggiando molto meno il materiale base costituente il provino.

5.5.3 Risultati delle prove per provini con intaglio non assialsimmetrico

Nel Grafico 5-18 si riassumono tutti i dati ottenuti per i provini con intaglio non assialsimmetrico e raggio di raccordo di fondo intaglio pari a 10.5mm. Prima, però, si riporta una tabella di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici.

PROVINO	N_f [cicli]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	σ_a nett [MPa]	f [Hz]
Traz_r10,5mm_R-1_01	6299	2868	2.868	380	0.5-1
Traz_r10,5mm_R-1_02	8612	2796.05	2.79605	360	1.1
Traz_r10,5mm_R-1_03	17495	1625.39	1.62539	340	1.8
Traz_r10,5mm_R-1_04	30056	493.56	0.49356	320	1.4-3
Traz_r10,5mm_R-1_05	51958	755.6	0.7556	300	1-3

Tabella 5.10: Risultati ottenuti per le prove su geometrie con intaglio non assialsimmetrico e raggio r=10.5mm

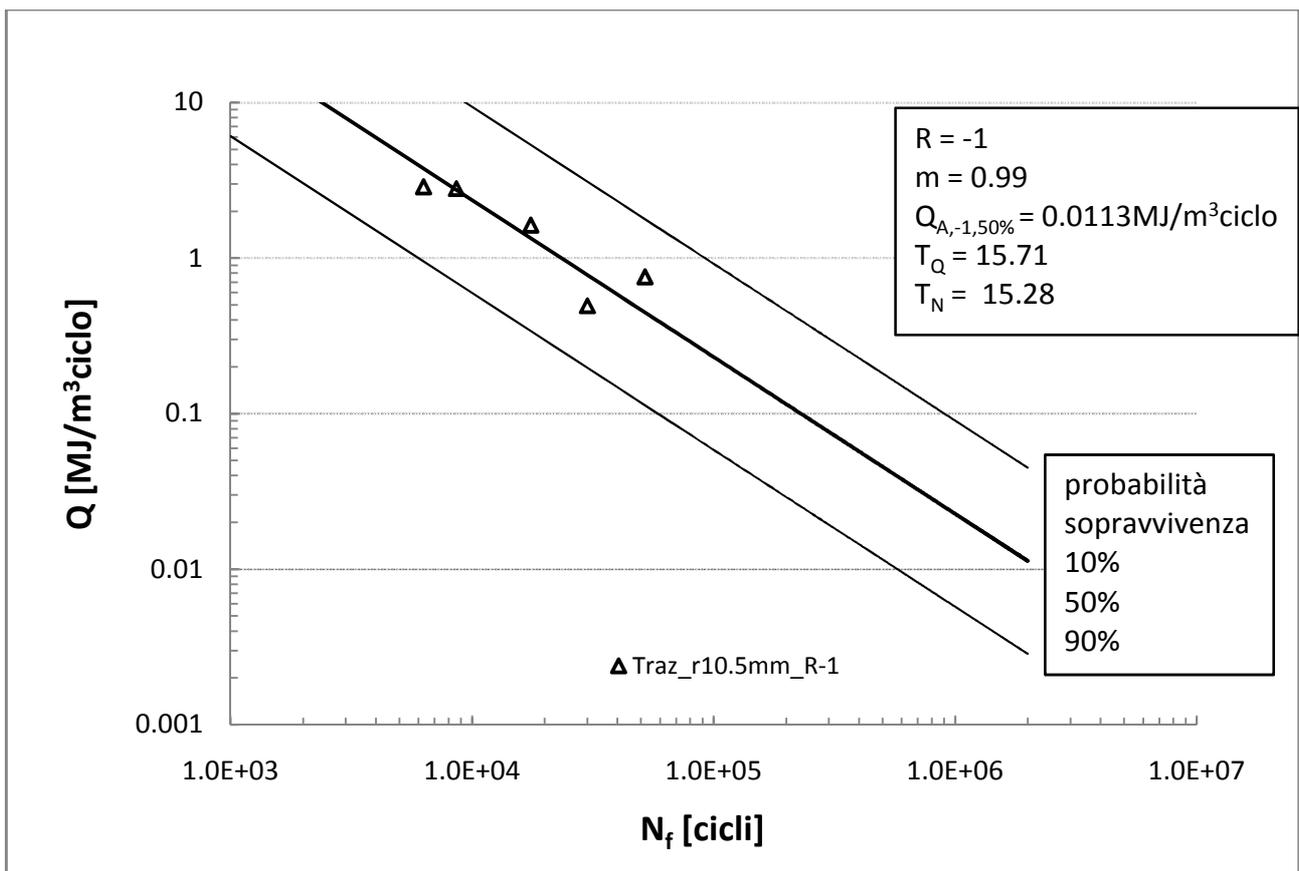


Grafico 5-18: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico e raccordo r=10.5mm

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 15.71^{0.99} = 15.28$$

Nel Grafico 5-19 si riassumono tutti i dati ottenuti per i provini con intaglio non assialsimmetrico e raggio di raccordo di fondo intaglio pari a 10.5mm rivisti nei gradienti di raffreddamenti e decurtati di quelli ottenuti in fase di trazione. Prima, però, si riporta una tabella di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici.

PROVINO	N _f [cicli]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	σ _a nett [MPa]
Traz_r10,5mm_R-1_01	6299	1847.7	1.8477	380
Traz_r10,5mm_R-1_02	8612	2043.89	2.04389	360
Traz_r10,5mm_R-1_03	17495	1424	1.424	340
Traz_r10,5mm_R-1_04	30056	397.60	0.39760	320
Traz_r10,5mm_R-1_05	51958	515.89	0.51589	300

Tabella 5.11: Risultati ottenuti per le prove su geometrie U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico e raggio r=10.5mm per i quali si sono eliminati i contributi dei raffreddamenti ottenuti in fase di trazione

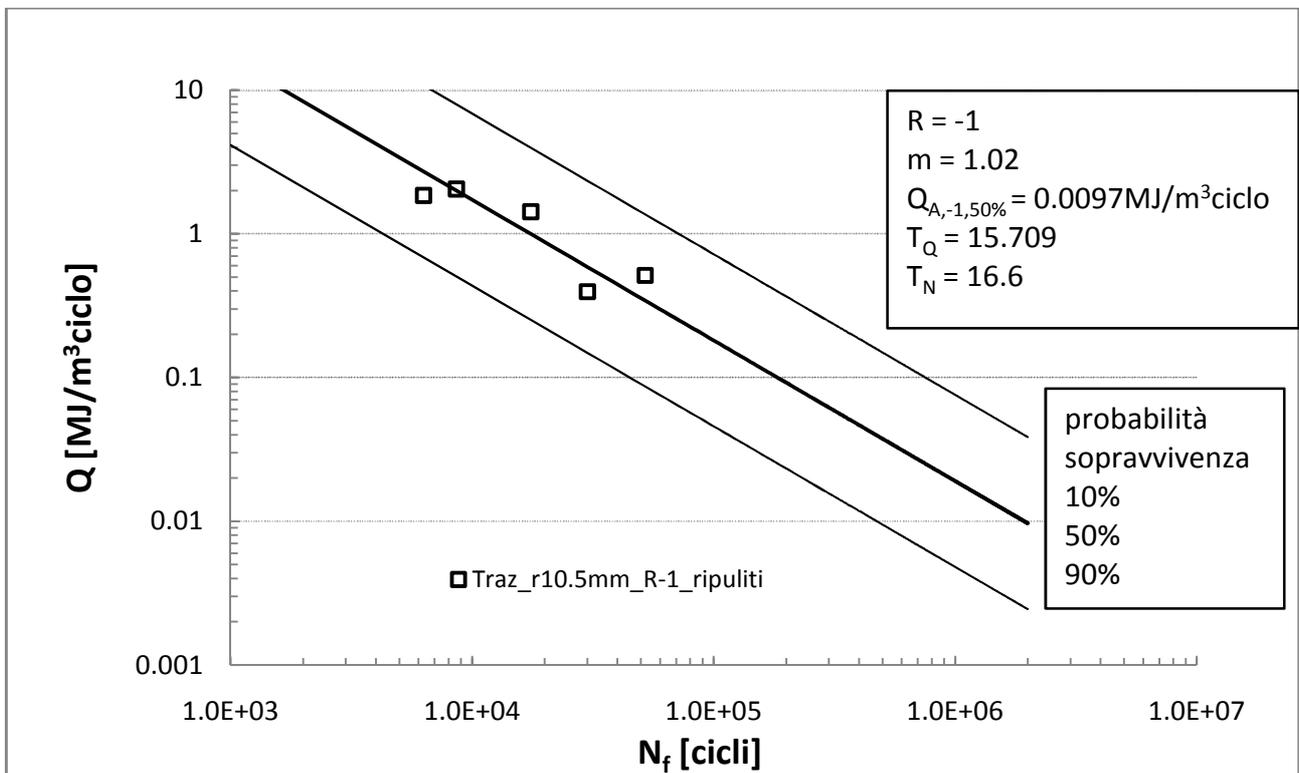


Grafico 5-19: Curva di Wohler Q in funzione del numero di cicli a rottura, per provini U10.5NAXSY con intaglio non assialsimmetrico e raccordo r=10.5mm, per i quali si sono rivisti tutti i raffreddamenti eliminandone tutti quelli ottenuti in fase di trazione

Il valore di dispersione lungo N si calcola come:

$$T_N = T_Q^m = 15.709^{1.02} = 16.6$$

Come si può valutare dai valori numerici, il rividere tutti i raffreddamenti eliminandone quelli ottenuti in fase di trazione senza un'adeguata procedura per l'ottenimento di dati sperimentali in modo sistematico, non è sufficiente a ridurre la dispersione statistica!

Nel Grafico 5-20 si riassumono infine i dati ottenuti per le due differenti serie di dati valutate per tutti i provini precedentemente valutate singolarmente. Anche in questo caso, si riporta una tabella di sintesi delle prove per una più immediata comprensione dei valori numerici

	PROVINO	N_f [cicli]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Q [MJ/m ³ ciclo]	$\sigma_{a\ ing}$ [MPa]
Traz_r10.5mm_R-1	Traz_r10,5mm_R-1_01	6299	2868	2.868	380
	Traz_r10,5mm_R-1_02	8612	2796.05	2.79605	360
	Traz_r10,5mm_R-1_03	17495	1625.39	1.62539	340
	Traz_r10,5mm_R-1_04	30056	493.56	0.49356	320
	Traz_r10,5mm_R-1_05	51958	755.6	0.7556	300
Traz_r10.5mm_R-1 RIVISITATI	Traz_r10,5mm_R-1_01	6299	1847.7	1.8477	380
	Traz_r10,5mm_R-1_02	8612	2043.89	2.04389	360
	Traz_r10,5mm_R-1_03	17495	1424	1.424	340
	Traz_r10,5mm_R-1_04	30056	397.60	0.39760	320
	Traz_r10,5mm_R-1_05	51958	515.89	0.51589	300

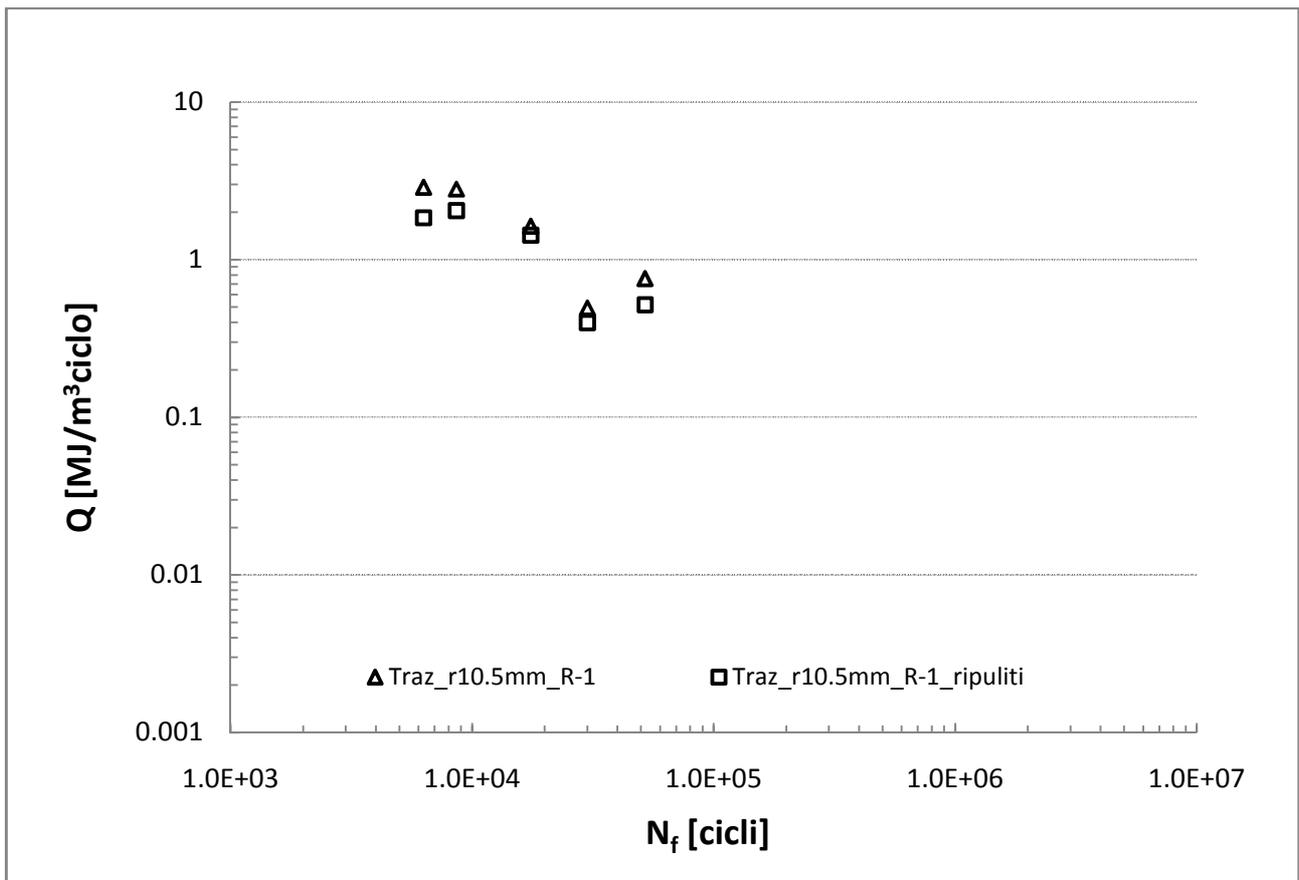


Grafico 5-20: Confronto fra geometrie U10.5NAXSY tra i risultati ottenuti rivedendo i raffreddamenti e decurtandone il contributo misurato in fase di compressione (Tabella 5.10) e quelli ottenuti con la procedura classica (Tabella 5.11)

5.5.4 Confronto fra i risultati delle prove per provini con intaglio ad U e a V

Rispetto alle analisi condotte con l'approccio basato sull'ampiezza di tensione, si può dire che i provini con intagli a V hanno prodotto una curva di Wohler con pendenza maggiore rispetto ai provini con intaglio ad U (rispettivamente $m_U=9.32$; $m_V=7.5$) in buon accordo con la severità della tipologia di intaglio. Tuttavia, dall'analisi statistica si può dire che i provini con intaglio ad U hanno prodotto una forte dispersione attorno al valore medio $T_N = T_\sigma^m = 1.238^{9.32} = 7.32$ rispetto ai provini con intaglio a V che, invece, risulta molto più contenuta $T_N = T_\sigma^m = 1.12^{7.5} = 2.39$.

Rispetto alle analisi condotte con l'approccio basato sulla dissipazione di energia, le pendenze delle due curve $Q-N_f$ risultano comparabili non essendoci importanti differenze, viceversa sul fronte dell'analisi statistica i provini con intaglio ad U danno ottenuto una forte dispersione attorno al valore medio rispetto ai provini con intaglio a V. In particolare si sono ottenuti rispettivamente per i provini con intaglio ad U $m_U=1.3$ e $T_N = T_\sigma^m = 19.667^{1.3} = 48.07$; mentre per i provini con intaglio a V $m_V=7.5$ e $T_N = T_\sigma^m = 8.75^{1.98} = 8.75$.

5.6 CONCLUSIONI

Allo scopo di poter fare sintesi di quanto esposto in questo capitolo in merito alle misurazioni calorimetriche, si riporta il Grafico 5-21 in cui si possono vedere come si distribuiscono i valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio. Viene, inoltre, riportata la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in tensione T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N ottenuto precedentemente con i provini lisci di capitolo 4 ottenuto al paragrafo 4.3.

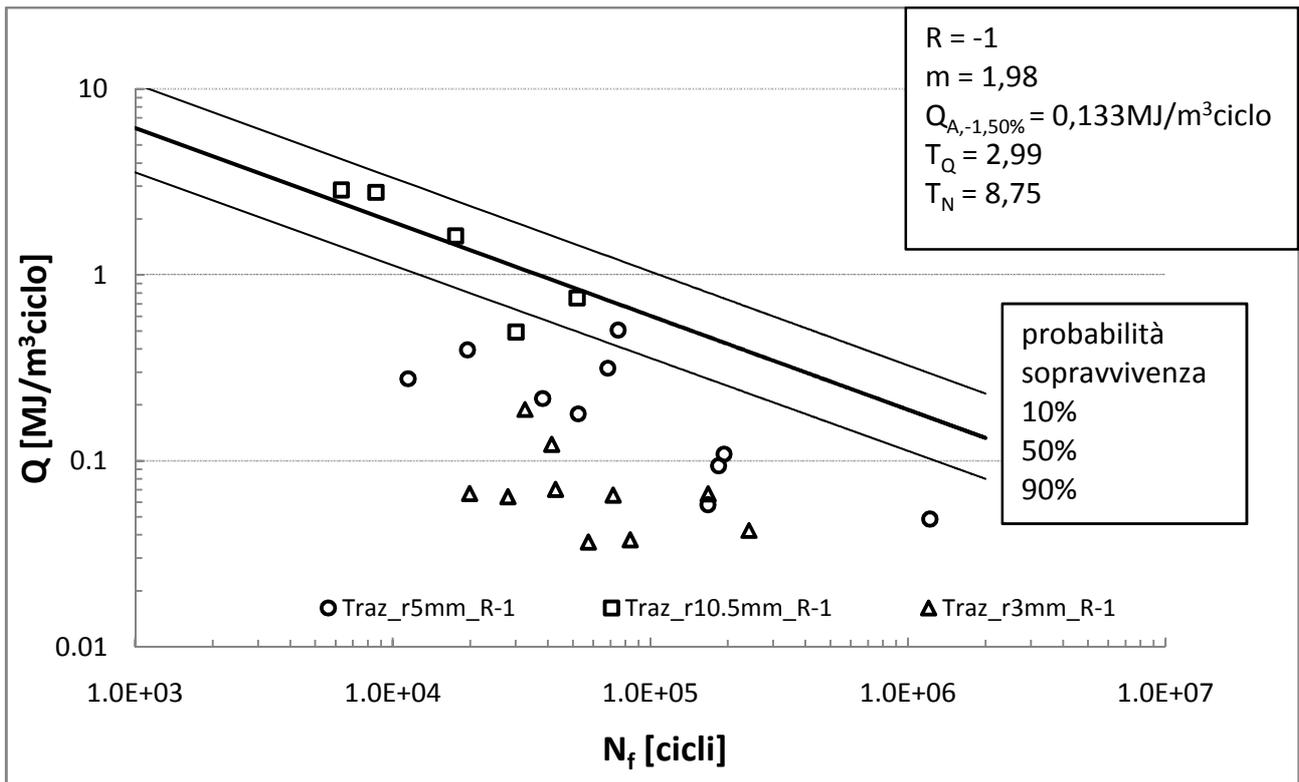


Grafico 5-21: Valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio rispetto alla banda di dispersione ottenuta per i provini lisci di capitolo 4.3

Di primo acchito si può valutare la forte dispersione statistica delle singole serie di dati mentre, in secondo luogo, si può osservare come una sola serie di dati entri nella banda di dispersione statistica dei provini lisci. Quest'ultima è la serie ottenuta con geometria di intaglio non assialsimmetrico e con rapporto tra le tensioni principali σ_1 e σ_2 uguale a quella testata da Parolin in [8]. Questo afferma che, qualora ci sia uno stato di tensione multi assiale non trascurabile, quanto affermato in [8] e quindi in [6] venga meno. Tuttavia, la forte dispersione statistica non aiuta a cogliere quali fenomeni fisici di disturbo si nascondino sotto la grande incertezza di misura riscontrate in queste prove. Di rilevante importanza sono state le bassissime temperature del provino durante la conduzione della prova (mai superiori ai 11°C rispetto alla temperatura ambiente) con l'ulteriore difficoltà dovuta alla condizione delle prove in periodo estivo; l'esigua sezione netta del provino in prossimità dell'intaglio con la relativa capacità termica (78mm² contro i 120mm² dei provini testati in [8]) e, la forte estrazione di calore dovuta a conduzione dalla sezione d'intaglio che si ha in quanto la tensione massima si ha sull'intero perimetro circolare e non su una piccola area rettangolare in prossimità dell'intaglio come nei provini testati in [8].

Allo scopo di poter fare ulteriore sintesi di quanto esposto in questo capitolo in merito alle misurazioni calorimetriche, si riporta il Grafico 5-22 in cui si possono vedere come si distribuiscono i valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio. Viene, inoltre, riportata la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in tensione T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N ottenuto nel lavoro pubblicato da Meneghetti, Ricotta e Atzori [18] per provini ottenuti da acciaio AISI 304L laminato a caldo.

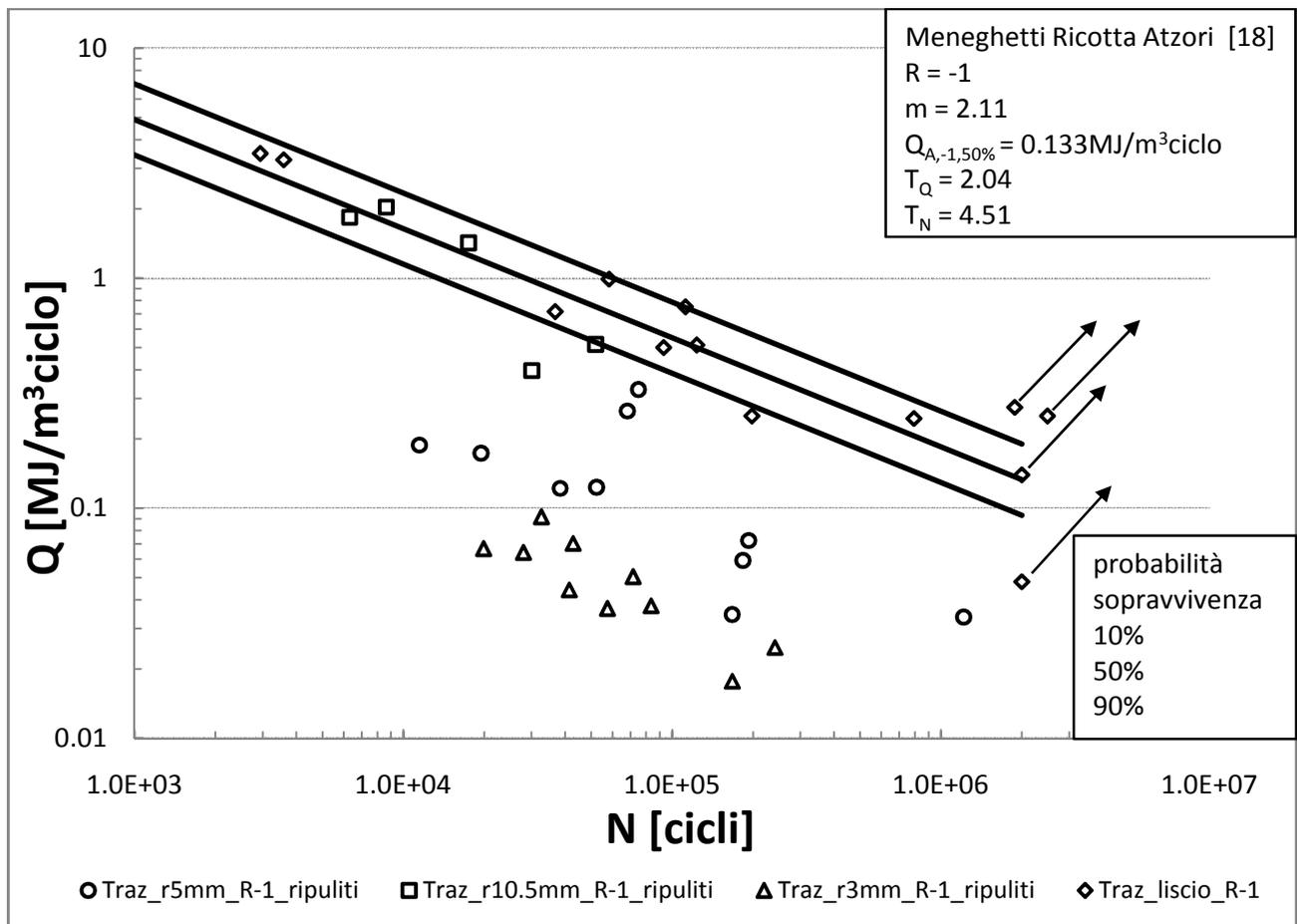


Grafico 5-22: Valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio, ottenuti in acciaio AISI 304L trafilato a freddo, rispetto alla banda di dispersione [18] ottenuta con provini lisci realizzati in acciaio AISI 304L laminato a caldo.

Come si può notare dal Grafico 5-22, seppure il materiale con cui si sono realizzati i provini testati in questo lavoro sia differente rispetto a quello utilizzato in [18], sia i provini lisci di che quelli con intaglio non assialsimmetrico U10.5NAXSY di Figura 5.3 ricadono all'interno della banda di dispersione confermando la validità del criterio riportato in [1].

Ulteriore valutazione nasce nel confrontare i provini intagliati testati in [8] con quelli testati in questo lavoro in termini di ampiezza di tensione e in termini di ampiezza di tensione di picco elastico in funzione del numero di cicli a rottura.

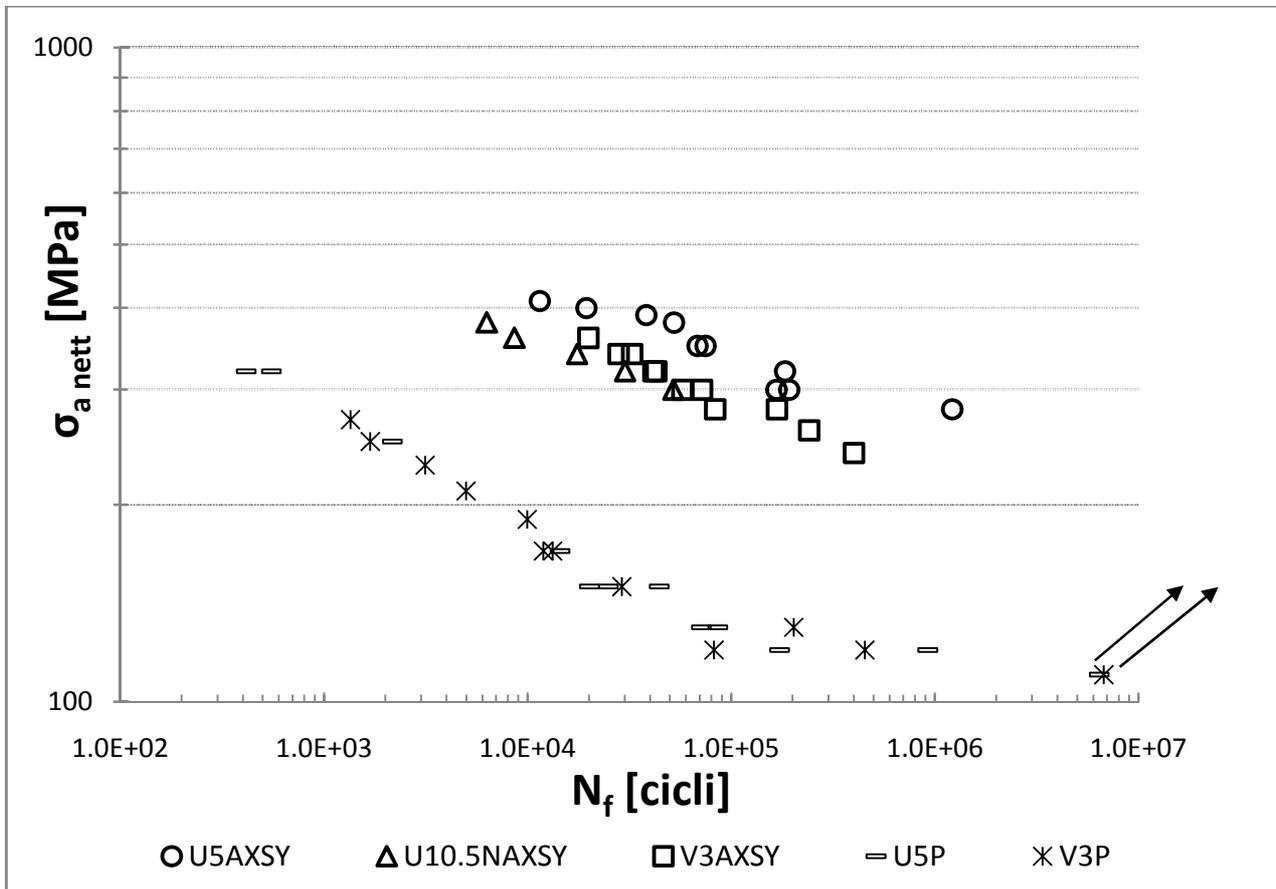


Grafico 5-23: Confronto in termini di ampiezza di tensione netta fra i provini intagliati testati in [8] (U5P e V3P) e quelli testati in questo lavoro (U5AXSY, V3ASXY, U10.5NAXSY)

Dal Grafico 5-23 si vede come le differenti tipologie di prove, fatte con materiali diversi, siano ben distinte secondo la tipologia di provino a parità di ampiezza di tensione ossia: a sinistra quelli ricavati da piastra U5P e V3P, mentre a destra quelli ricavati da barra cilindrica U5AXSY, V3ASXY, U10.5NASXY. Questo ribadisce come il materiale utilizzato nelle prove [8] sia molto meno performante rispetto alle prove eseguite in questo lavoro e come il K_t incida sulla pendenza delle distribuzioni dei punti sperimentali. Infatti per i provini U5P e V3P si nota una pendenza della distribuzione dei dati maggiore rispetto a U5AXSY, V3ASXY, U10.5NASXY. Tuttavia, le cose divengono comparabili qualora si potesse ipotizzare un comportamento puramente elastico del materiale anche qualora si superi $\sigma_{0.2\%}$ come riportato nel Grafico 5-24.

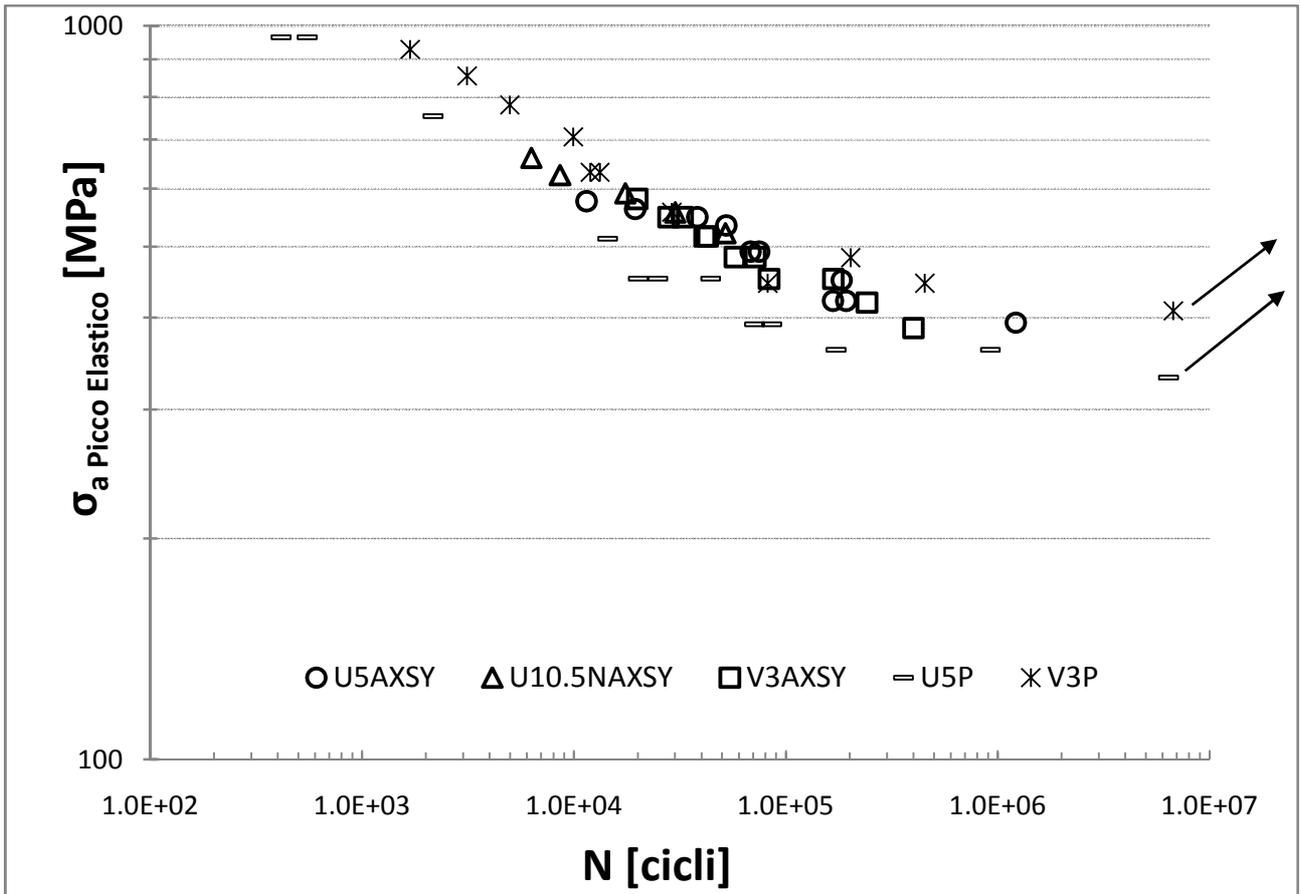


Grafico 5-24: Confronto in termini di ampiezza di tensione di picco elastico fra i provini intagliati testati in [8] (U5P e V3P) e quelli testati in questo lavoro (U5AXSY, V3ASXY, U10.5NAXSY)



CONCLUSIONI DEL LAVORO DI TESI

In questo lavoro di tesi sono state eseguite una serie di prove sperimentali nelle quali dei provini di acciaio inossidabile AISI304L trafilato a freddo sono stati sottoposti a prove di fatica assiale e torsionale. 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 $R=-1.5$, $R=-1$, $R=0.1$, $R=0.5$ e prove di fatica torsionali a rapporto di ciclo $R=1$.

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:

- continuare il lavoro svolto in [8] e [9], allo scopo di poter giungere alla definizione di un criterio energetico con effetto della tensione media per la previsione sperimentale della vita a fatica di componenti in acciaio inossidabile AISI304L . L'intento era la creazione di un unico grafico che possa sintetizzare tramite un nuovo parametro energetico il comportamento del materiale al variare di un'ampia gamma di differenti rapporti di ciclo. Al fine di adempiere questo obiettivo sarà necessario misurare sperimentalmente il valore della costante termoelastica K_m per il materiale utilizzato in questo lavoro di tesi (AISI 304L trafilato a freddo) e verificare se l'ipotesi dell'adiabaticità assunta nella teoria della termoelasticità sia rispettata nelle comuni prove a fatica realizzate con le macchine a disposizione del Dipartimento di Ingegneria Industriale;

- estendere la trattazione esposta nel punto precedente a provini intagliati secondo tre differenti geometrie ad un'uguale rapporto di ciclo pari a $R=-1$;

- caratterizzare, per ogni tipo di geometria di provino utilizzata e per ogni rapporto di ciclo applicato, il monitoraggio dell'innesco e della propagazione delle cricche generate dall'applicazione del carico affaticante;

Rispetto al primo obiettivo, si sono analizzati i dati ottenuti in questo lavoro di tesi e, quelli prodotti in [9], per le diverse campagne di prove a fatica assiale eseguite a diverso rapporto di ciclo su provini lisci di Figura 4.1 e Figura 4.2. I risultati ottenuti sono stati confrontati sia in termini di tensione netta (ingegneristica e reale) con l'approccio classico di Wohler, sia utilizzando l'approccio energetico basato sulla misura della densità di energia dissipata.

Dall'analisi classica in termini di ampiezza di tensione, le quattro curve realizzate a diverso rapporto di ciclo, restano ben separate e non è possibile realizzare un grafico, con un'unica banda di dispersione, che descriva allo stesso tempo il comportamento del materiale ai differenti rapporti di ciclo.

In maniera diversa, l'analisi in termini di energia dissipata verso l'ambiente, ha prodotto tutt'altro risultato. Infatti, raggruppando le prove in base al numero di cicli a rottura è stato possibile individuare una serie di curve, chiamate curve isodurata, in un grafico doppio logaritmico Q - σ_{MAX} (Grafico 4-14 e Grafico 4-15) in cui non si tiene conto del rapporto di ciclo di ciascuna prova ma soltanto del numero di cicli a rottura. Queste curve di isodurata tendono ad avere una pendenza costante e si è utilizzato il valore medio tra le pendenze calcolate come caratteristica del materiale[9].

Partendo dunque dalle curve isodurata relative a provini che si sono rotti entro un certo intervallo di 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:

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

dove h_{MEDIA} indica appunto la pendenza media delle curve isodurata calcolata sul grafico doppio logaritmico (Grafico 4-14 e Grafico 4-15).

Successivamente si è sostituito il parametro σ_{MAX} con un altro parametro legato sempre ad una variazione di temperatura, e quindi ancora rilevabile con l'utilizzo della sola termocoppia, ossia $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$. Quest'ultimo rapporto, permette di ottenere una nuova costante per la sintesi dei dati in funzione del numero di cicli a rottura.

La banda di dispersione del Grafico 4-17 e del Grafico 4-18 riassume i dati delle prove di fatica assiali in modo indipendente dal rapporto di ciclo attraverso la seguente equazione:

$$Q \cdot \left(\frac{T_{the}}{T_0} \right)_{ad}^{h_{media}} \cdot N_f^m = COST$$

dove m è la pendenza della curva (di valore pari a 2.47 nel caso della valutazione delle tensioni ingegneristica, mentre vale 1.66 nel caso della valutazione delle tensioni reali); e dove h è la pendenza media calcolata delle curve isodurata.

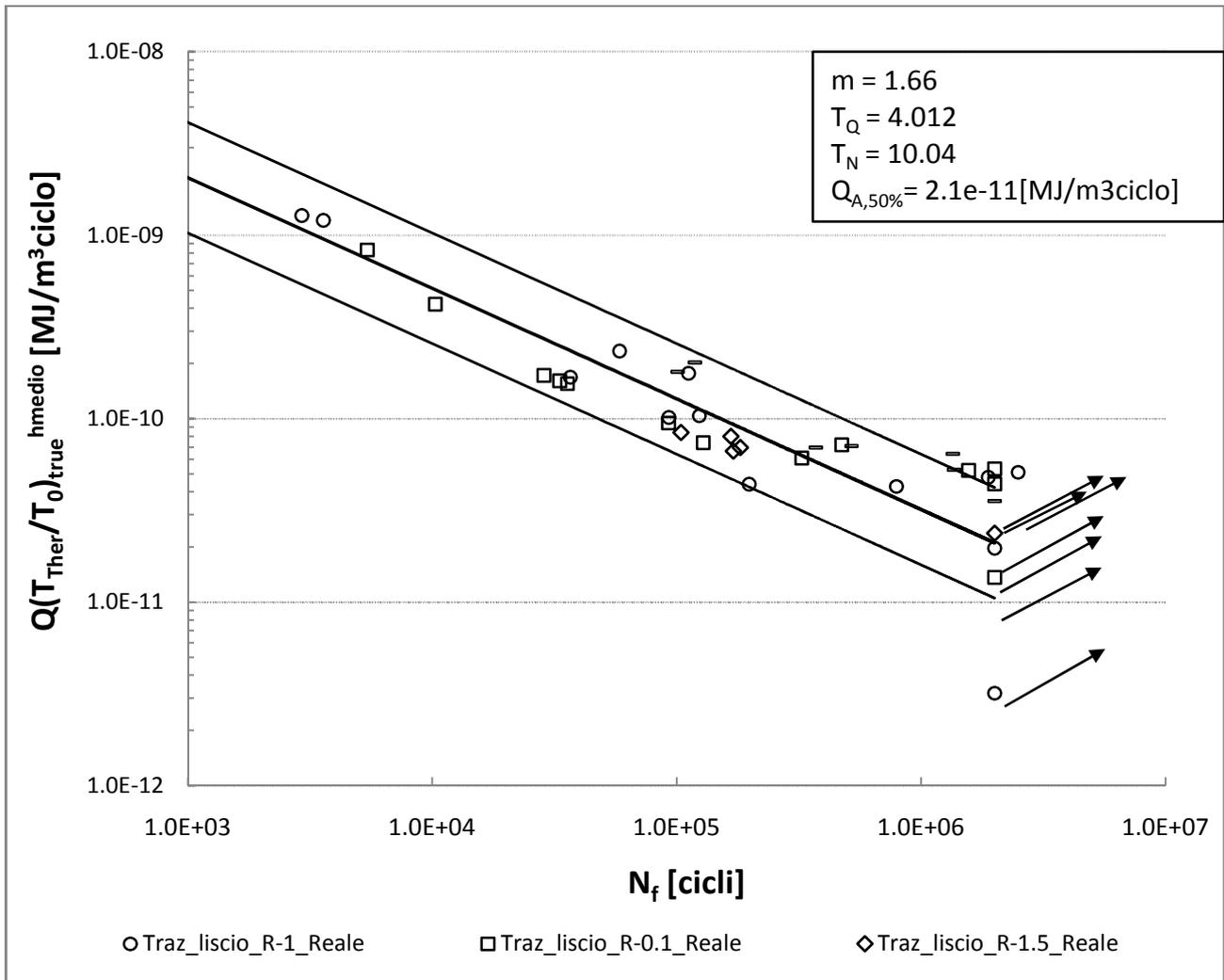


Grafico 5-25: $Q(T_{The}/T_0)_{true}^{h_{medio}}$ valutato secondo la tensione massima reale per tutti i provini lisci sollecitati a differenti rapporti di ciclo ed espressa in funzione del numero di cicli a rottura

Il Grafico 4-18 fornisce un'informazione molto importante in quanto riassume tutti i dati, in modo indipendente dal rapporto di ciclo a cui è stata eseguita la prova, in un'unica banda di dispersione di pendenza $m=1.66$, con coefficienti di dispersione in energia $T_Q=4.012$ ed il coefficiente di dispersione in vita $T_N= 10.04$.

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. Infatti è possibile misurare il volere di Q arrestando istantaneamente la sollecitazione a cui è sottoposto il componente da verificare e misurando il raffreddamento; come anche è possibile misurare il voler di $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ attraverso la misurazione del raffreddamento subito dal componente in corrispondenza all'applicazione di un carico statico che non superi il limite di $\sigma_{p0,2}$.

E' stato, quindi, possibile utilizzare la nuova variabile di stato $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ solo a seguito della determinazione della costante termoelastica K_m fatta nel capitolo 2. Infatti, la variabile di stato $(T_{the}/T_0)_{adiabatico}$ è legata alla costante termoelastica K_m secondo l'equazione (2-37) mentre di seguito si riporta la forma esplicita:

$$K_m = \frac{T_{the}}{T_0 \Delta I_{1,\sigma}}$$

Le varie prove per la determinazione quest'ultima costante sono state eseguite con rampe di carico a diverse velocità al fine di valutare il valore minimo della velocità di applicazione della tensione $\dot{\sigma}$ da imporre per garantire condizioni di prova adiabatiche. In particolare, le prove sono state eseguite con le seguenti velocità di applicazione del carico: $\dot{\sigma} = 5; 19; 37; 54$ e 73 MPa/s. Tutte le prove sono state eseguite applicando al provino una tensione di compressione pari a -150 MPa e successivamente è stata implementata una rampa di carico fino a $+150$ MPa. Il valore di tensione di 150 MPa è stato scelto con il fine di restare all'interno del campo di comportamento lineare elastico del materiale. Per ciascuna velocità imposta sono state eseguite quattro prove da cui si è valutato il valor medio per la costante termoelastica K_m .

Il Grafico 2-5 riporta i valori di K_m misurati in tutte le prove statiche eseguite a differenti velocità di applicazione del carico. Si può osservare che, all'aumentare della velocità di applicazione del carico, diminuisce la dispersione dei dati attorno al valor medio e che variando la velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}$ di un fattore circa 2 (da 37 a 73 MPa/s) il valor medio di K_m diminuisce del 5.4% (da $3.86 \cdot 10^{-12}$ a $3.65 \cdot 10^{-12}$ Pa $^{-1}$). Da un punto di vista ingegneristico si può quindi concludere che, per le condizioni di prova e per il materiale qui analizzati, l'adiabaticità in una prova statica di trazione può essere raggiunta con velocità di applicazione della tensione $\dot{\sigma} \geq 37$ MPa/s. Il valore di K_m utilizzato è stato considerato pari alle media dei valori ottenuti per velocità di applicazione del carico $\dot{\sigma}=37, 54$ e 73 MPa/s e pari quindi a $3.76 \cdot 10^{-12}$ Pa $^{-1}$. Stimando il valore di K_m da [16] con $\alpha=16 \cdot 10^{-6}$ K $^{-1}$ si ottiene $3.97 \cdot 10^{-12}$ Pa $^{-1}$, in buon accordo con il valore sperimentale.

Inoltre, dato che la norma UNI EN 10002 [17] impone per il materiale qui testato una velocità di carico non superiore a 30MPa/s nell'esecuzione di prove a trazione statiche, le condizioni di adiabaticità sono garantite adottando una velocità di applicazione del carico leggermente superiore a quelle in uso in una comune prova di trazione. Questo vuol dire che, nell'esecuzione di prove a fatica con comuni attrezzature a disposizione del Dipartimenti di Ingegneria Industriale, si può garantire con semplicità l'adiabaticità nella conduzione della prova.

Per concludere, si può affermare che la validità del metodo deve essere confermata dall'esecuzione di altri accertamenti con geometrie di provini differenti da quelli utilizzati in questa campagna di prove e con strumenti di acquisizione della temperatura che possano acquisire il segnale proveniente dalla termocoppia ad una frequenza molto più elevata (superiore all'attuale di un ordine di grandezza). Allo scopo di poter fare sintesi di quanto esposto nel capitolo 5 in merito alle misurazioni calorimetriche sui provini intagliati, si riporta il Grafico 5-21 in cui si possono vedere come si distribuiscono i valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio. Viene, inoltre, riportata la curva media, le relative bande di dispersione associate al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza, la pendenza inversa m , il coefficiente di dispersione in calore T_Q ed il coefficiente di dispersione in vita T_N ottenuto con i provini lisci di capitolo 4 al paragrafo 4.3.

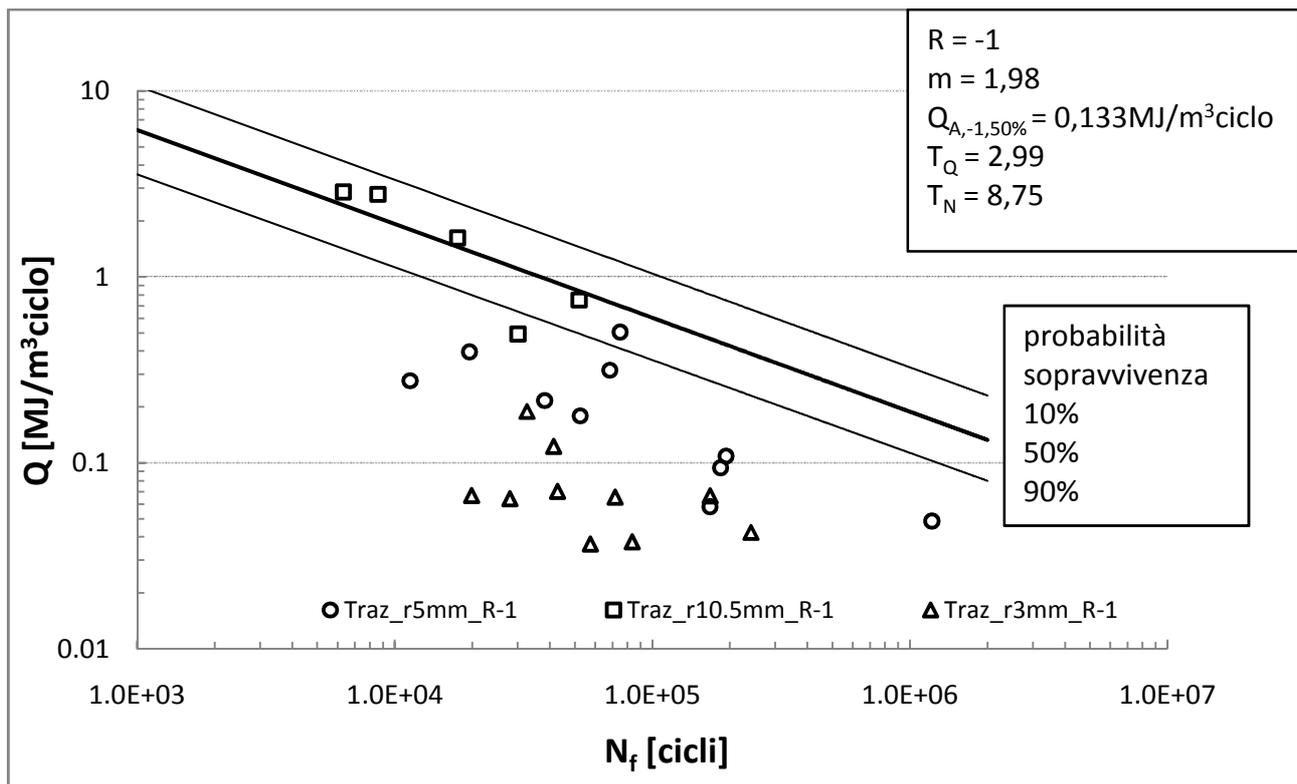


Grafico 5-26: Valori di $Q_{50\%}$ per le differenti prove di fatica assiale ad R-1 e per le differenti geometrie di intaglio rispetto alla banda di dispersione ottenuta per i provini lisci di capitolo 4.3

Di primo acchito si può valutare la forte dispersione statistica delle singole serie di dati mentre, in secondo luogo, si può osservare come una sola serie di dati entri nella banda di dispersione statistica dei provini lisci. Quest'ultima è la serie ottenuta con geometria di intaglio non assialsimmetrico e con rapporto tra le tensioni principali σ_1 e σ_2 uguale a quella testata in [8]. Questo afferma che, qualora ci sia uno stato di tensione multi assiale non trascurabile, quanto affermato in [8] e quindi in [6] venga meno secondo le acquisizioni di temperatura ottenibili con gli attuali strumenti a disposizione del Dipartimento di Ingegneria Industriale. A supporto di questa tesi, si può valutare anche la distribuzione dei punti sperimentali per le singole serie di dati. Tanto più l'intaglio del provino è gravoso (e quindi comporti un coefficiente di concentrazione delle tensioni maggiore) passando dalla serie con intaglio $r=10.5\text{mm}$ alla serie con $r=3\text{mm}$, tanto più la serie di dati sperimentali si allontana dalla banda di dispersione dei provini lisci. Questa osservazione si pone in antitesi con tutte le acquisizioni ottenute sui provini lisci per le quali si ha un incremento della generazione termica all'aumentare della sollecitazione affaticante imposta al provino.

Tuttavia, la forte dispersione statistica non aiuta a cogliere quali fenomeni fisici di disturbo si nascondono sotto la grande incertezza di misura riscontrate in queste prove. Di rilevante importanza sono state le bassissime temperature del provino durante la conduzione della prova (mai superiori ai 11°C rispetto alla temperatura ambiente) con l'ulteriore difficoltà

dovuta alla condizione delle prove in periodo estivo; l'esigua sezione netta del provino in prossimità dell'intaglio con la relativa capacità termica (78mm^2 contro i 120mm^2 dei provini testati in [8]) e, la forte estrazione di calore dovuta a conduzione dalla sezione d'intaglio che si ha in quanto la tensione massima si ha sull'intero perimetro circolare e non su una piccola area rettangolare in prossimità dell'intaglio come nei provini testati in [8].

Un'altra parte cospicua di questo lavoro di tesi è stato il monitoraggio con i liquidi penetranti dell'innesco di cricca generata per fatica su provini lisci. A seguito del monitoraggio dell'innesco di cricca su provini lisci per differenti rapporti di ciclo, si riporta di seguito la Figura 3.22 per visualizzare quanto precede (in termini di cicli) la formazione di una cricca, di ampiezza pari a 0.5mm , rispetto al numero di cicli a rottura.

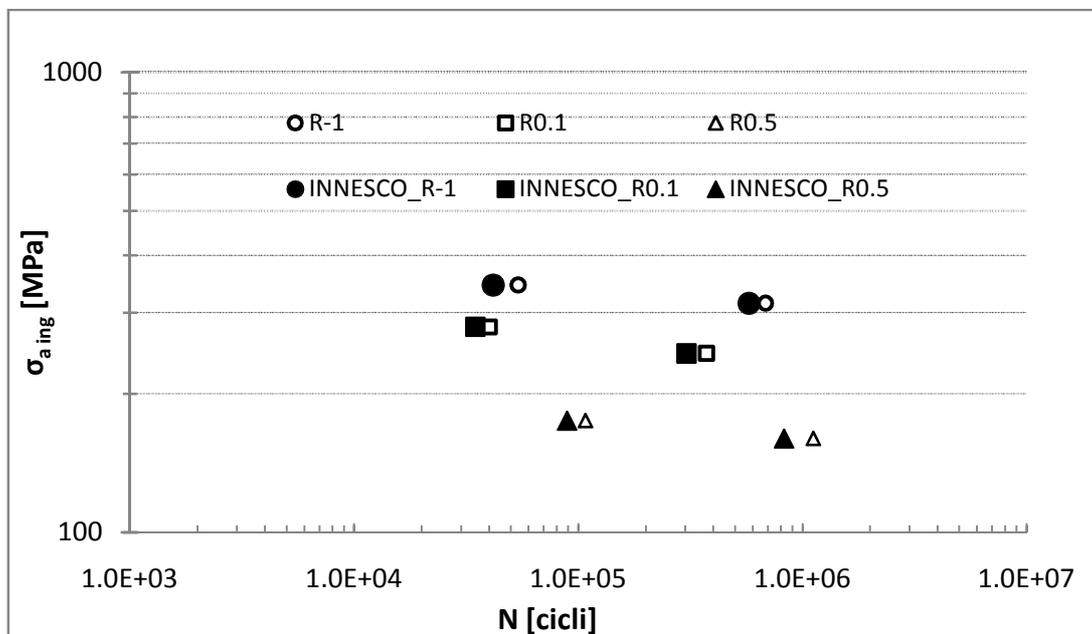


Figura 5.31: Visualizzazione della formazione di una cricca di lunghezza 0.5mm rispetto alla vita a termine espressa come numero di cicli a rottura su provini lisci testati a tre differenti rapporti di ciclo per prove a fatica assiale

Di seguito è riportata anche la tabella che evidenzia, in termini di percentuali di vita del provino, la formazione di una cricca di lunghezza pari a 0.5mm rispetto al numero di cicli a rottura.

	Alto carico	Basso carico
	$N_{i,0.5\text{mm}}/N_f$	$N_{i,0.5\text{mm}}/N_f$
Traz_liscio_R-1	0.77	0.84
Traz_liscio_R0,1	0.87	0.81
Traz_liscio_R0.5	0.83	0.74

Tabella 5.12: Percentuale di vita per giungere alla formazione di una cricca di lunghezza pari a 0.5mm su provini lisci testati a tre differenti rapporti di ciclo per prove a fatica assiale

L'informazione data dalla Tabella 3.1 è di fondamentale importanza in quanto l'analisi in termini energetici (grafici $Q-N_f$) eseguita nei capitoli 4 e 5 è sempre stata espressa in funzione del numero di cicli a rottura. Questo non è sempre corretto in quanto la valutazione energetica dovrebbe essere fatta in funzione del numero di cicli ad innesco. Questo perché, qualora si innescasse una cricca sotto lo spot di colla che vincola la termocoppia al provino, la misura della potenza termica dissipata, espressa dall'equazione(1-9) sarebbe errata! Avendo a disposizione i valori di Tabella 3.1 è ora possibile valutare di quanto si debba traslare le curve $Q-N_f$ per ottenere la corretta relazione Calore-numero cicli ad innesco $Q-N_i$

Appendice A: RISULTATI PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R 0.5

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo $R=0.5$. 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.

Con i provini 08, 09 e 10 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 deformazione media durante le prove.

Viste le difficoltà nel rendere stabile l'estensometro, soprattutto nell'esecuzione dei raffreddamenti dove la macchina viene bruscamente interrotta e l'estensometro può traslare, è stata eseguita una prova (provino: Traz_liscio_R0.5_10) senza effettuare né raffreddamenti, né fermi macchina, in modo da lasciarne indisturbata la misura. Per questo provino manca dunque il grafico relativo all'energia dissipata Q tuttavia, è stato possibile monitorare l'andamento e l'evoluzione continua dei cicli di isteresi. Inoltre mancano i grafici relativi all'energia dissipata Q anche per i provini Traz_liscio_R0.5_08 e Traz_liscio_R0.5_09 in quanto si è valutata la ricerca dell'innesco di cricca tramite l'ausilio dei liquidi penetranti. Tramite il primo provino si è voluto verificare l'innesco e la propagazione di cricche per un elevato carico applicato e quindi per un basso numero di cicli a rottura, viceversa, per il secondo provino, si è voluto monitorare la formazione di cricche per un basso carico applicato e quindi per un alto numero di cicli a rottura.

La geometria dei provini utilizzati in questa campagna di prove è la stessa e viene riportata per completezza in figura A.1.

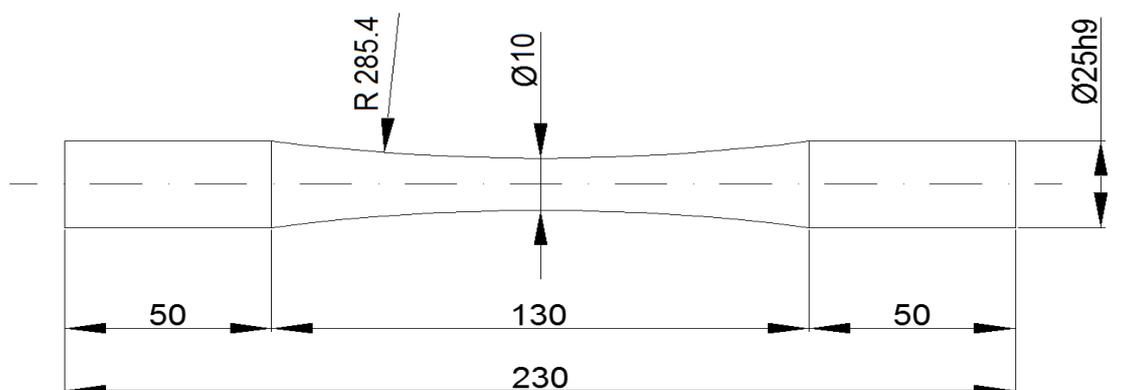


Figura A.1 Geometria dei provini utilizzata nella campagna di prove a $R=0.5$ realizzati in acciaio AISI 304 L

PROVA : Traz_liscio_R0,5_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 50.265 kN	F _{MIN} = 25.133 kN	F _{MED} = 37.699 kN	F _a = 12.566 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 640 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 480 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 160 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura:	324022 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 19.5 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	57544	15.5%	22.4	18	0.0856	338.12	18.78
2	144797	39.0%	23.2	18	0.0782	308.89	17.16
3	201430	54.3%	23.4	18	0.0931	367.75	20.43
4	241709	65.2%	23.7	18	0.0718	283.61	15.76
5	295733	79.7%	24.3	22	0.0861	340.10	15.46
6	339438	91.5%	23.9	22	0.0874	345.23	15.69

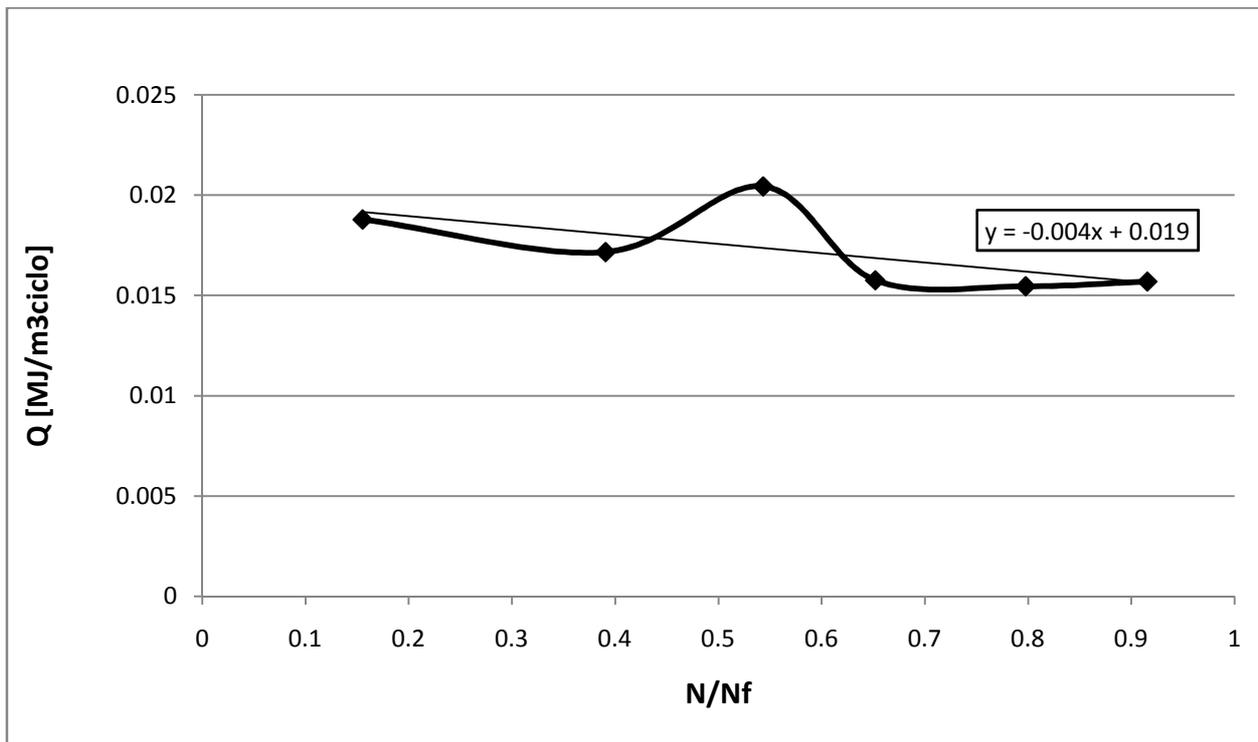


Figura A.1.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_01

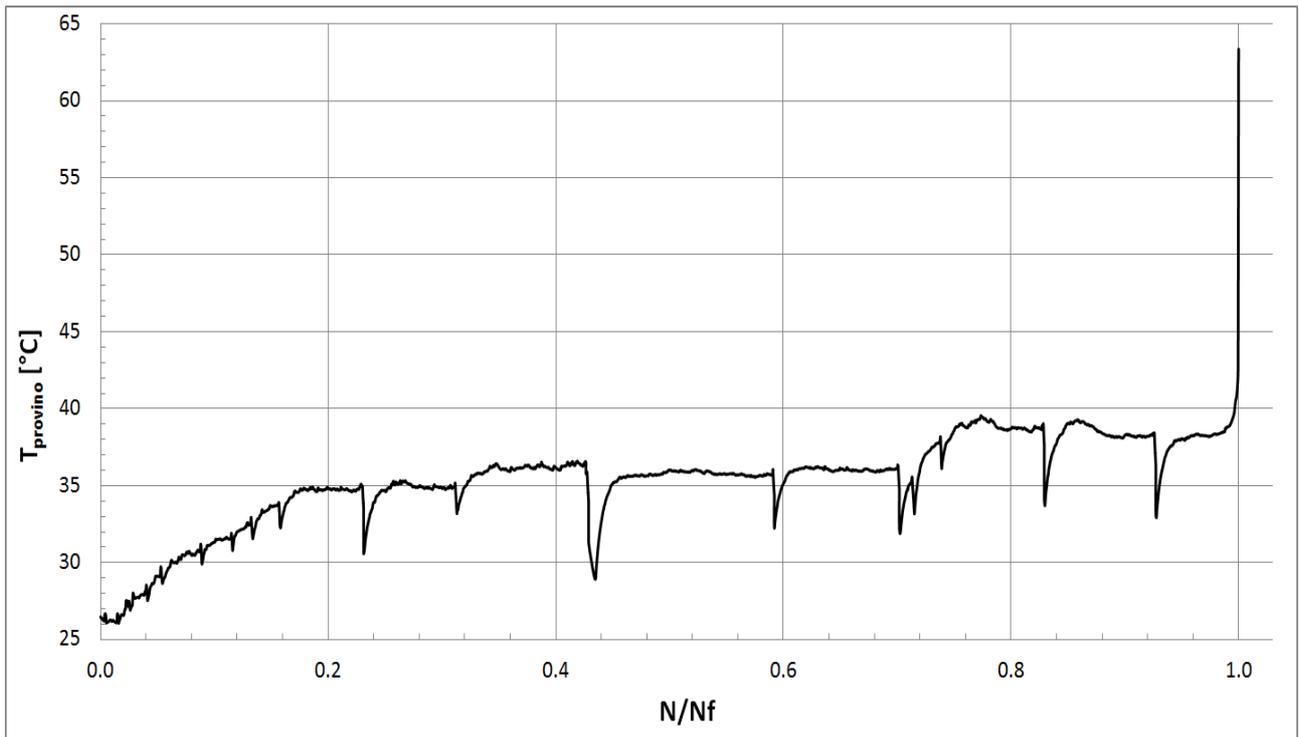


Figura A.1.2 Andamento della temperatura del provino in funzione del rapporto numero di cicli su numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R0.5_01

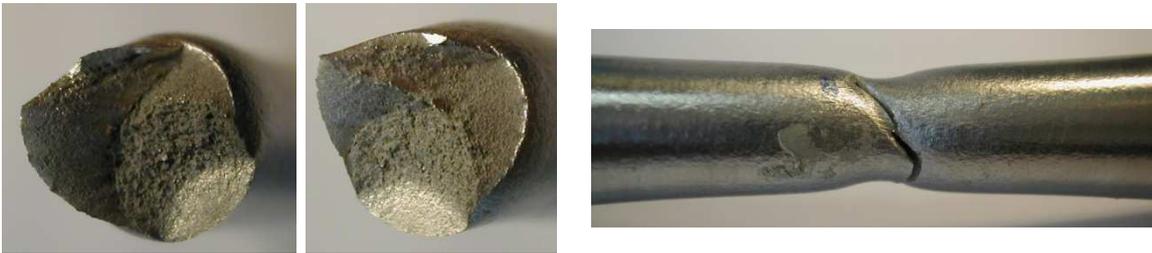


Figura A.1.3 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_01

PROVA : Traz_liscio_R0,5_03				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 48.69 kN	F _{MIN} = 24.35 kN	F _{MED} =36.52 kN	F _a = 12.17 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 620 MPa	σ_{MIN} = 310 MPa	σ_{MED} = 465 MPa	σ_a = 155 MPa

Prova Interrotta a: 2000000 cicli
Q valutato al 50% della vita: Q_{50%} = 11.90 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	Freq [Hz]	Grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	73375	3.7%	22.4	24	0.0738	291.51	12.15
2	142401	7.1%	22.6	24	0.0758	299.41	12.48
3	209708	10.5%	22.3	26	0.0722	285.19	10.97
4	282111	14.1%	22.8	26	0.0793	313.24	12.05
5	350258	17.5%	23.1	26	0.078	308.10	11.85
6	413020	20.7%	22.7	26	0.0914	361.03	13.89
7	489497	24.5%	22.3	26	0.0767	302.97	11.65
8	558726	27.9%	22.0	26	0.0809	319.56	12.29
9	628901	31.4%	22.6	26	0.0808	319.16	12.28
10	770332	38.5%	23.2	26	0.0796	314.42	12.09
11	839218	42.0%	23.8	26	0.0838	331.01	12.73
12	909843	45.5%	24.6	26	0.091	359.45	13.83
13	980425	49.0%	24.5	26	0.0739	291.91	11.23
14	1049231	52.5%	25.0	26	0.0697	275.32	10.59
15	1179279	59.0%	28.8	26	0.076	300.20	11.55
16	1264532	63.2%	28.6	26	0.078	308.10	11.85
17	1353634	67.7%	27.7	26	0.0758	299.41	11.52
18	1443378	72.2%	28.1	26	0.0796	314.42	12.09
19	1527534	76.4%	28.0	26	0.0728	287.56	11.06
20	1784985	89.2%	26.0	26	0.0785	310.08	11.93
21	1974376	98.7%	27.4	26	0.0737	291.12	11.20

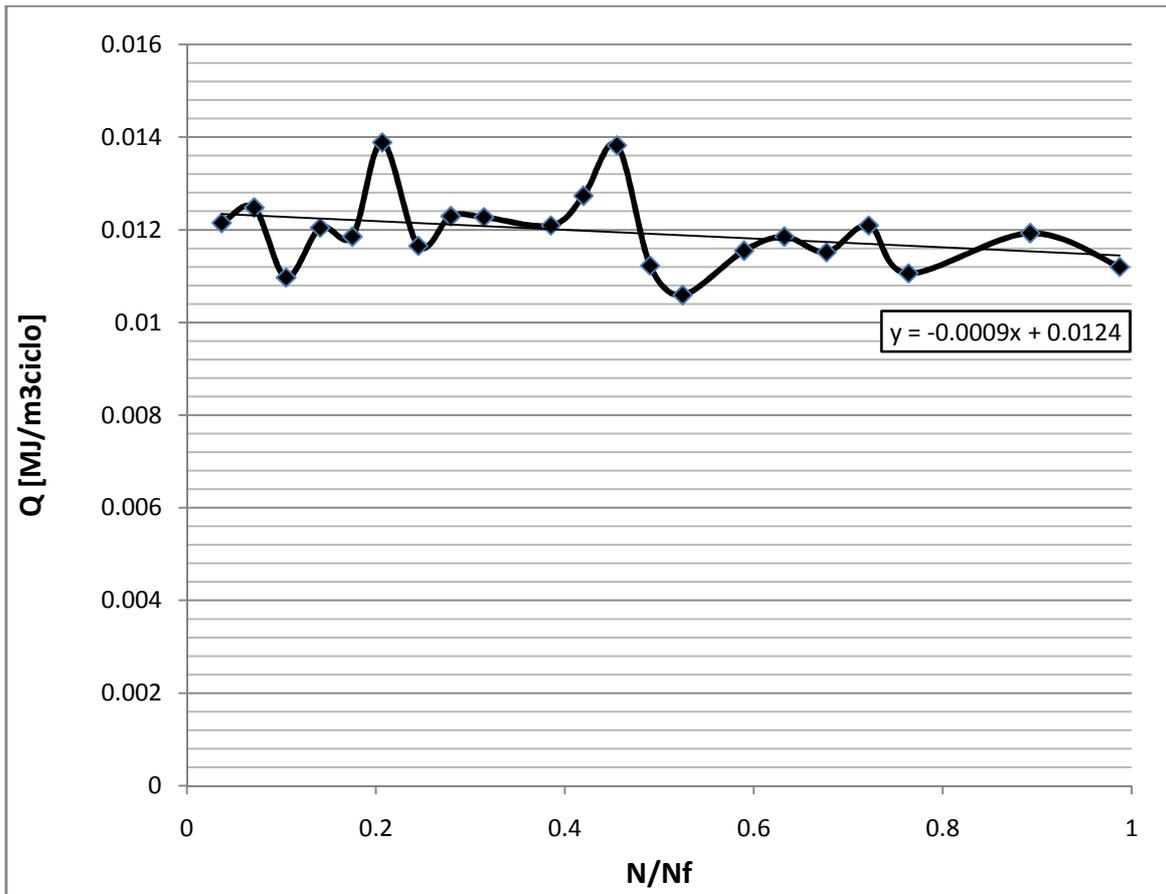


Figura A.3.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_03

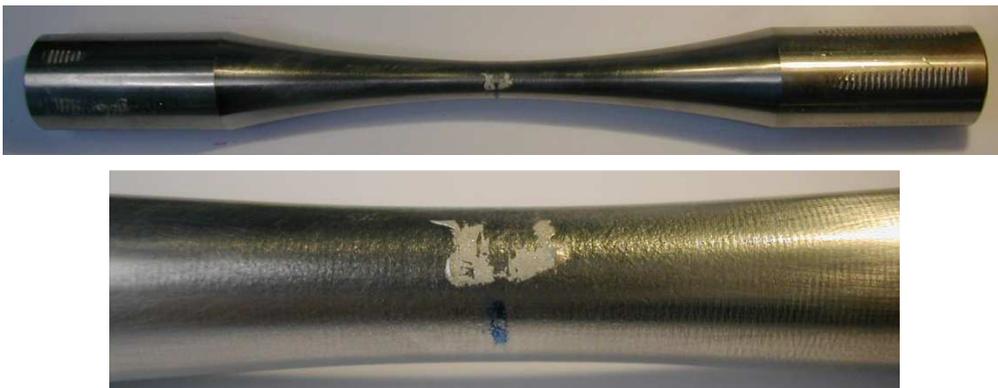


Figura A.3.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_03

PROVA : Traz_liscio_R0,5_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l =130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 51.84 kN	F _{MIN} = 25.92 kN	F _{MED} = 38.88 kN	F _a = 12.96 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 660 MPa	σ_{MIN} = 330 MPa	σ_{MED} = 495 MPa	σ_a = 165 MPa

Numero di cicli a rottura:	1350165 a cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 13.98 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	34424	2.5%	25.7	20	0.119	470.05	23.50
2	107103	7.9%	26.0	20	0.0787	310.87	15.54
3	174655	12.9%	26.3	22	0.1147	453.07	20.59
4	254649	18.9%	25.8	20	0.0828	327.06	16.35
5	324551	24.0%	25.8	20	0.07	276.50	13.83
6	398457	29.5%	25.8	22	0.0885	349.58	15.89
7	468722	34.7%	25.8	22	0.0733	289.54	13.16
8	538587	39.9%	25.8	22	0.0591	233.45	10.61
9	611592	45.3%	25.8	22	0.0624	246.48	11.20
10	682537	50.6%	25.8	22	0.0981	387.50	17.61
11	754852	55.9%	25.8	22	0.0715	282.43	12.84
12	832020	61.6%	25.8	22	0.0981	387.50	17.61

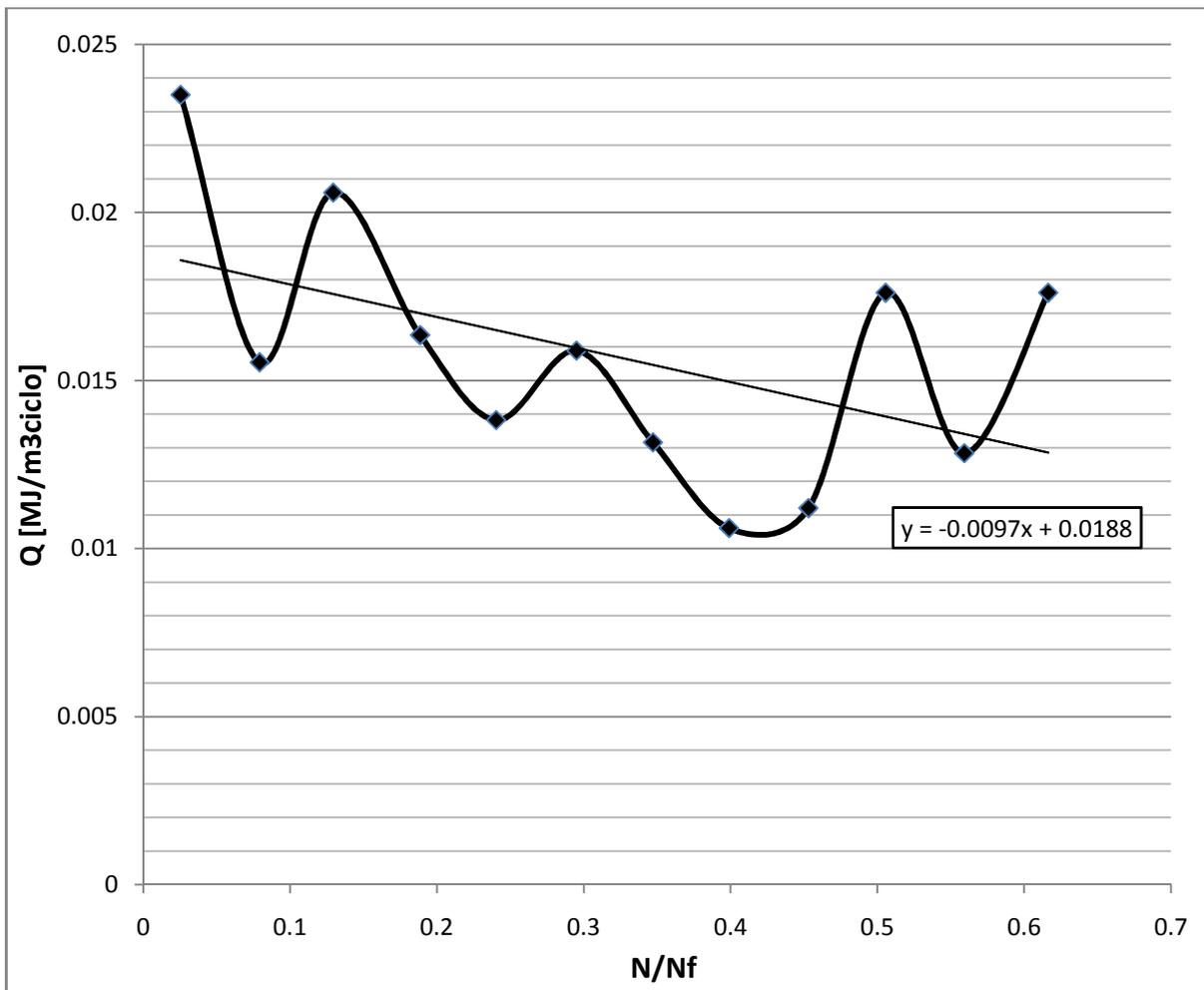


Figura A.4.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_04

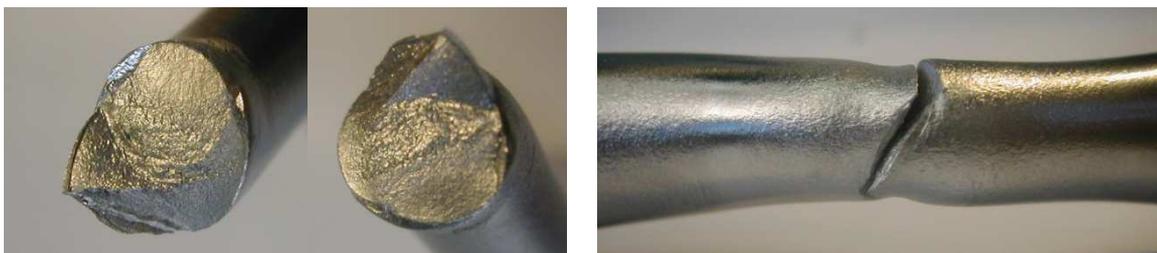


Figura A.4.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_04

PROVA : Traz_liscio_R0,5_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l =130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 54.98 kN	F _{MIN} = 27.49 kN	F _{MED} = 41.235 kN	F _a = 13.745 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 700 MPa	σ_{MIN} = 350 MPa	σ_{MED} = 525 MPa	σ_a = 175 MPa

Numero di cicli a rottura:	101003 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 17.69 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	33836	33.5%	26.8	15	0.0597	235.82	15.72
2	85815	85.0%	26.7	20	0.1108	437.66	21.88

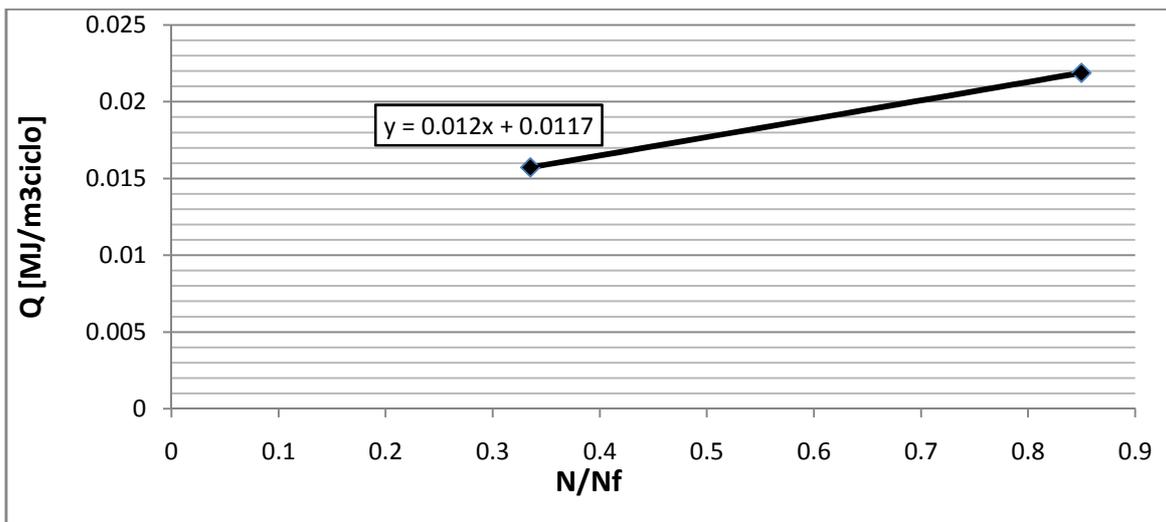


Figura A.5.1 Andamento della rigidità relativa e della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_05

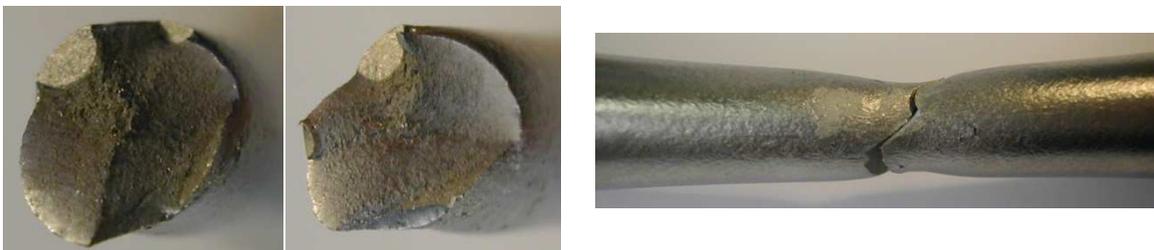


Figura A.5.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_05

PROVA : Traz_liscio_R0,5_06				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 54.98 kN	F _{MIN} = 27.49 kN	F _{MED} = 41.235 kN	F _a = 13.745 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 700 MPa	σ_{MIN} = 350 MPa	σ_{MED} = 525 MPa	σ_a = 175 MPa

Numero di cicli a rottura:	118753 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q _{50%} = 19.88 [kJ/m ³ ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	Freq [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	9539	8.0%	27.3	10	0.0489	193.16	19.32
2	24242	20.4%	27.6	10	0.055	217.25	21.73
3	39359	33.1%	28.0	10	0.0459	181.31	18.13
4	58063	48.9%	28.4	15	0.0715	282.43	18.83
5	73066	61.5%	27.8	15	0.086	339.70	22.65
6	88635	74.6%	28.2	15	0.0717	283.22	18.88
7	103889	87.5%	28.8	0.0748	295.46	19.70	

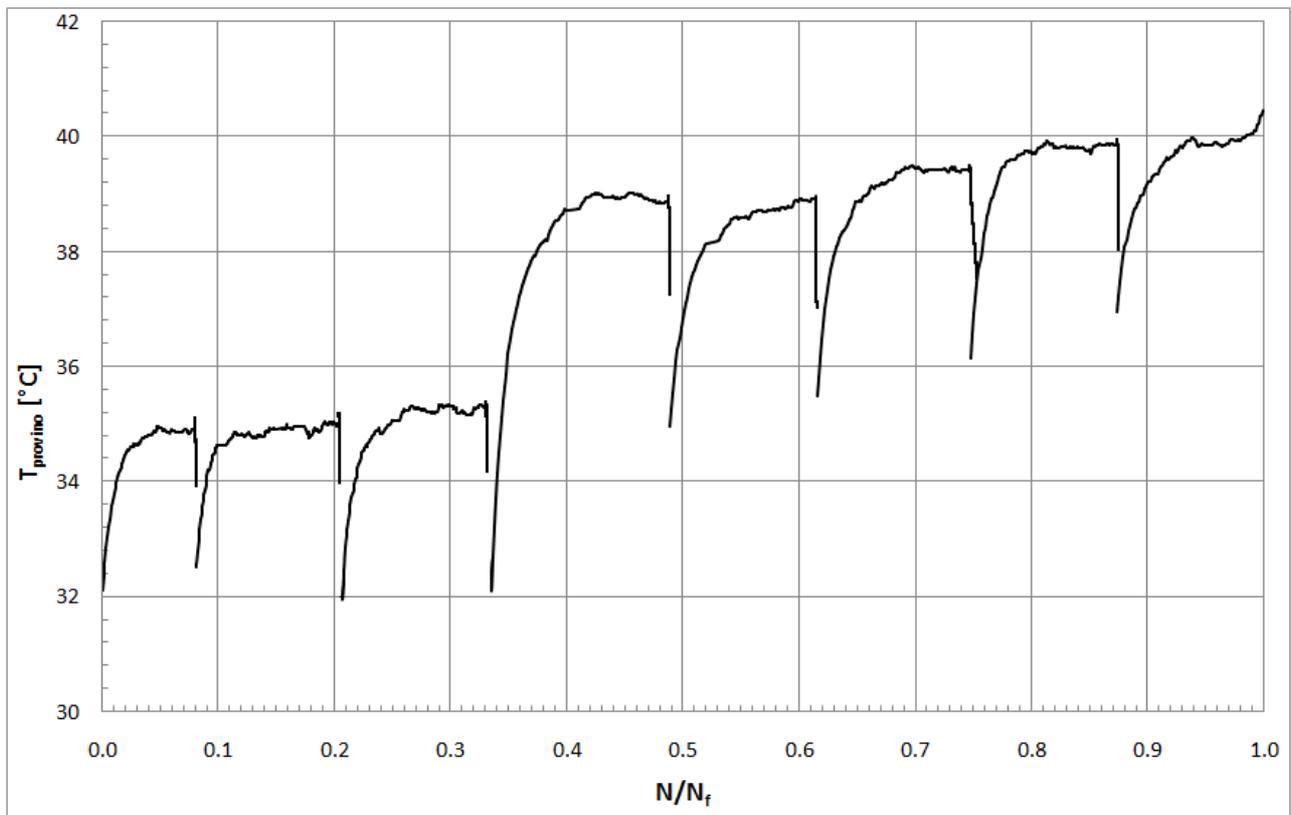


Figura A.6.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_06

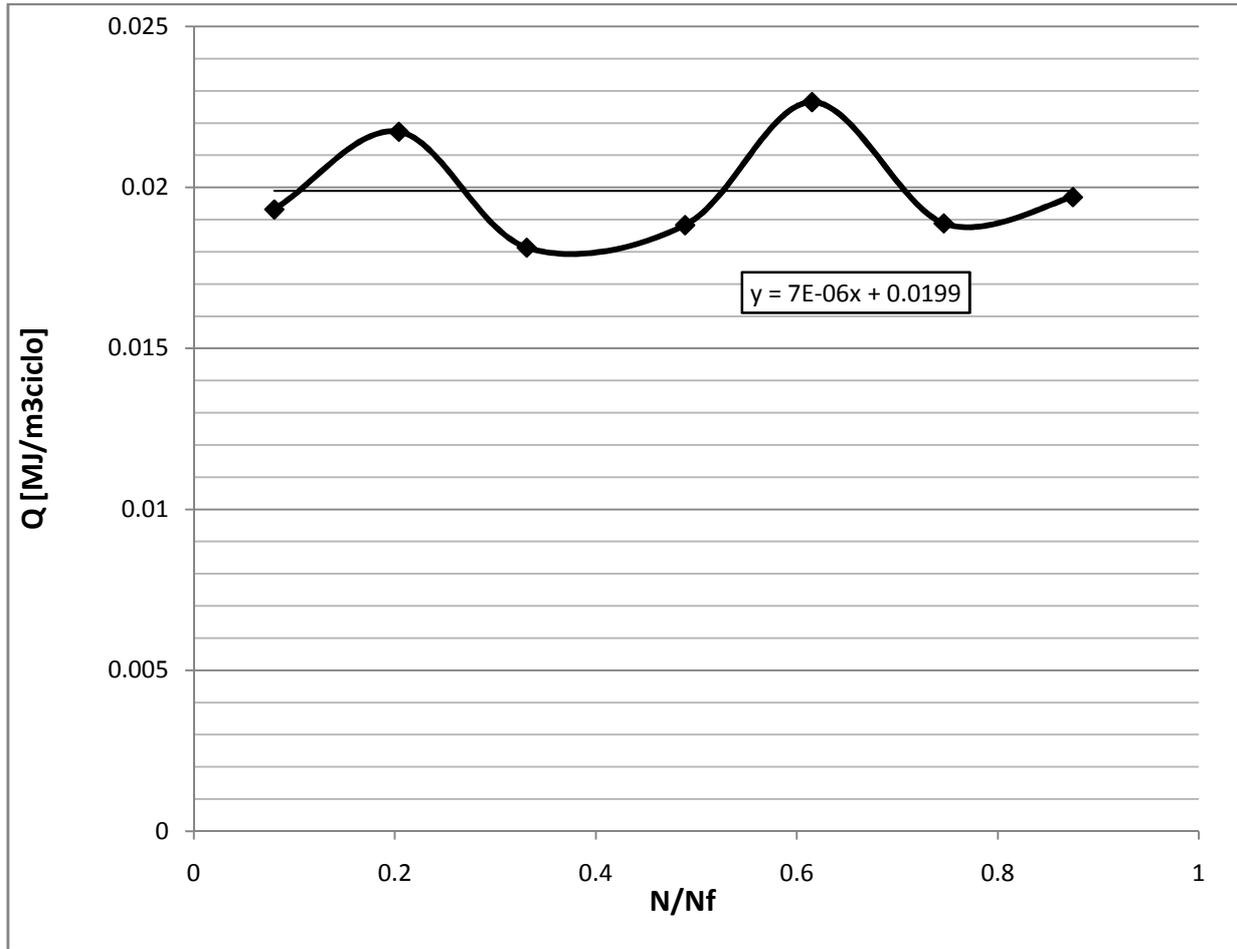


Figura A.6.2 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_06

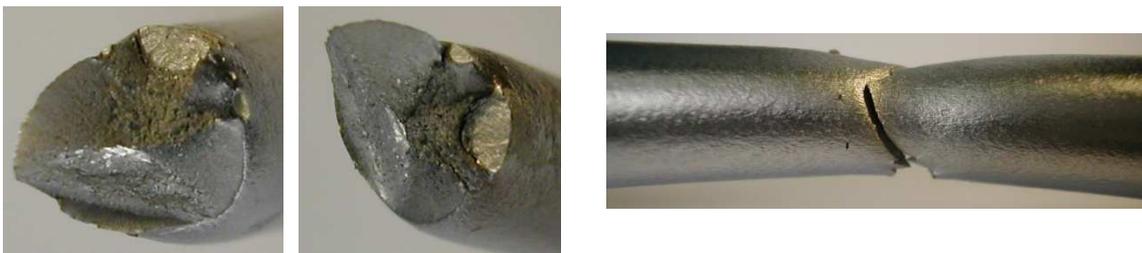


Figura A.6.3 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_06

PROVA : Traz_liscio_R0,5_07				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 51.84 kN	F _{MIN} = 25.92 kN	F _{MED} = 38.88 kN	F _a = 12.96 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 660 MPa	σ_{MIN} = 330 MPa	σ_{MED} = 495 MPa	σ_a = 165 MPa

Numero di cicli a rottura:	517578 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q _{50%} = 15.43 [kJ/m ³ ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	16262	3.1%	25.7	15	0.0549	216.86	14.46
2	55247	10.7%	26.4	20	0.0632	249.64	12.48
3	99522	19.2%	26.8	22	0.1021	403.30	18.33
4	153237	29.6%	27.0	22	0.1021	403.30	18.33
5	203980	39.4%	27.2	22	0.1057	417.52	18.98
6	276675	53.5%	27.4	18	0.0803	317.19	17.62
7	322388	62.3%	27.5	22	0.0653	257.94	11.72
8	387879	74.9%	28.2	22	0.0805	317.98	14.45
9	444367	85.9%	28.3	22	0.0826	326.27	14.83
10	496128	95.9%	28.5	22	0.076	300.20	13.65

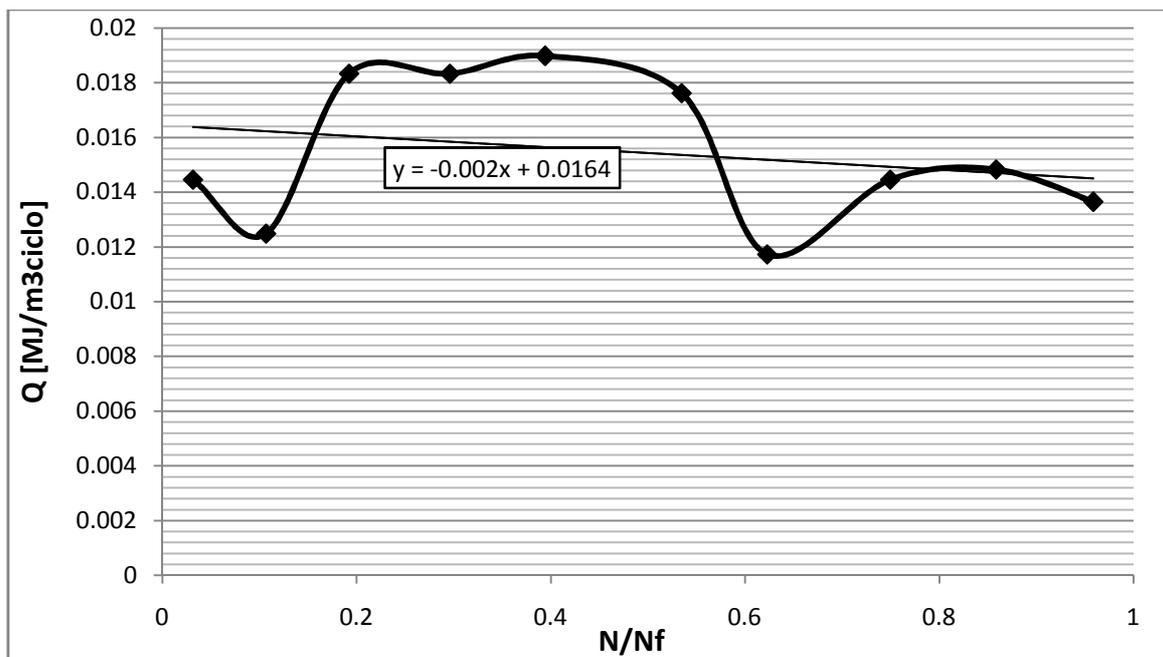


Figura A.7.1 Andamento della densità di energia dissipata Q in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_07

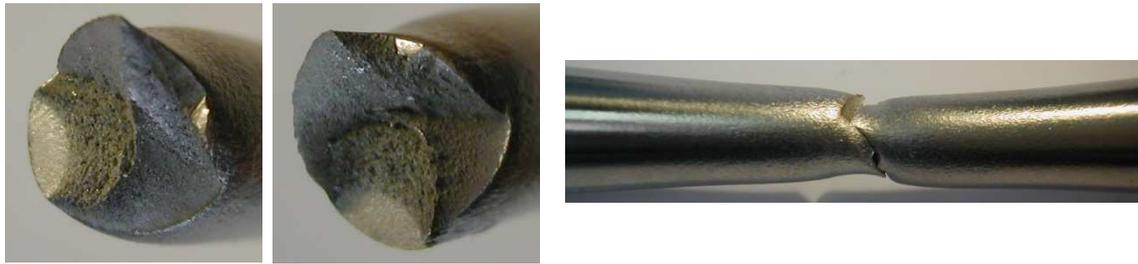


Figura A.7.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_07

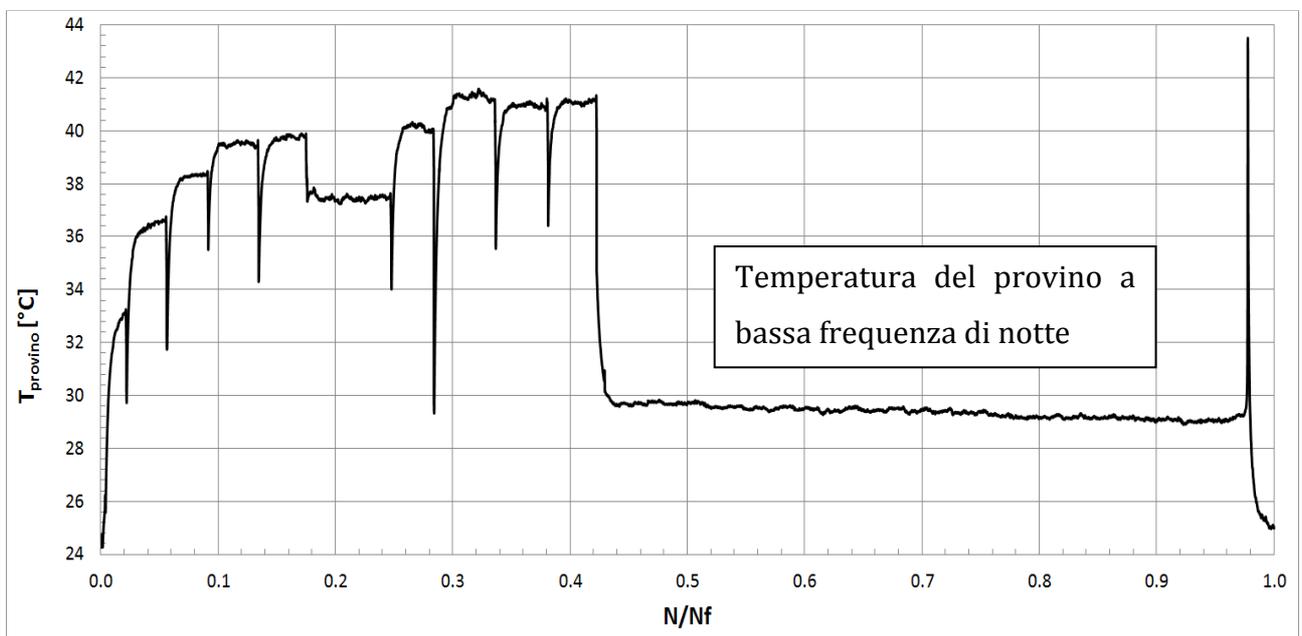


Figura A.7.3 Andamento della temperatura del provino in funzione del rapporto numero di cicli su numero di cicli a rottura per il provino Traz_liscio_R0.5_07

PROVA : Traz_liscio_R0,5_08				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 54.98 kN	F _{MIN} = 27.49 kN	F _{MED} = 41.235 kN	F _a = 13.745 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 700 MPa	σ_{MIN} = 350 MPa	σ_{MED} = 525 MPa	σ_a = 175 MPa

Numero di cicli a rottura: 102404 cicli

NOTE: prima prova in cui sono stati utilizzati i liquidi penetranti per il rapporto di ciclo R=0.5. La prova è stata condotta con l'ausilio dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato rispetto al sensore LVDT i valori di deformazione del provino la quale consente di avere un'indicazione sulla possibile creazione di una cricca. Con questo provino si vuole monitorare l'innesco di cricca per una condizione di alto carico e quindi per un basso numero di alternanze.

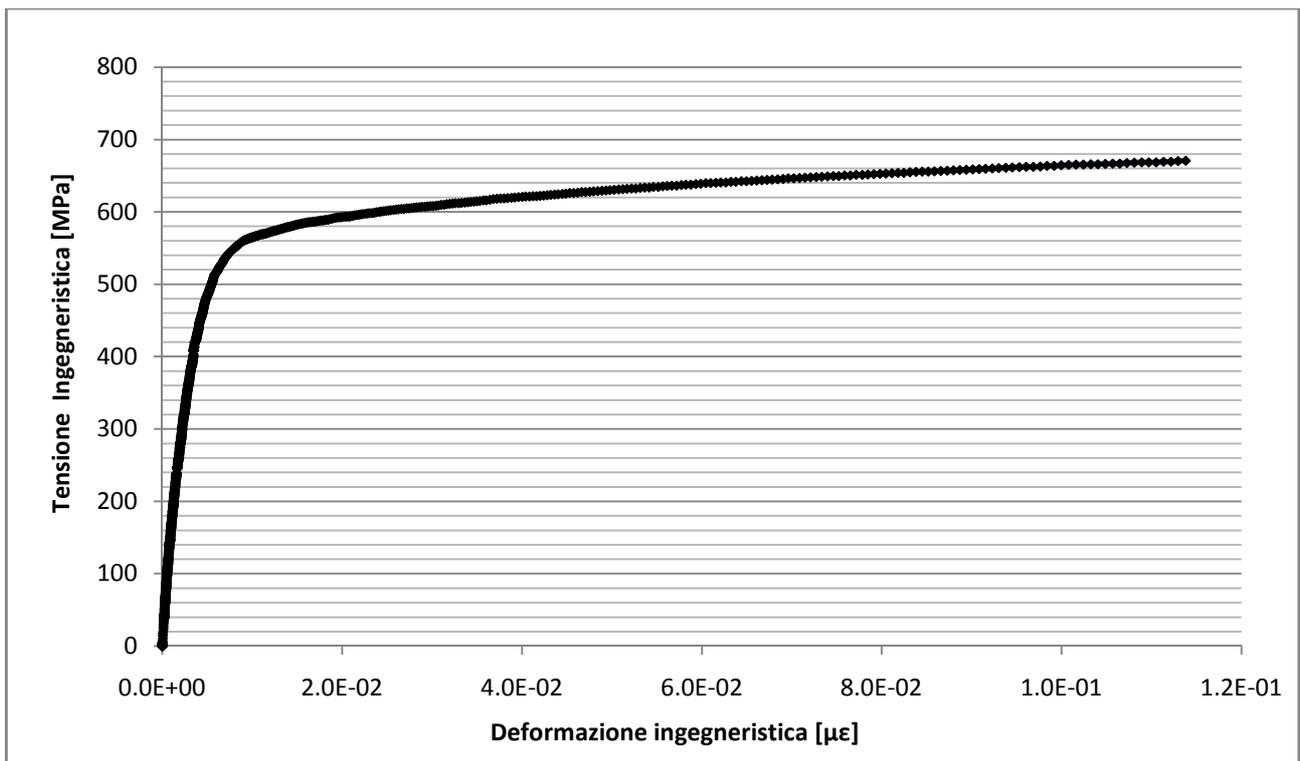


Figura A.8.1 Andamento della tensione ingegneristica al variare della deformazione nella prima alternanza per il provino Traz_liscio_R0.5_08

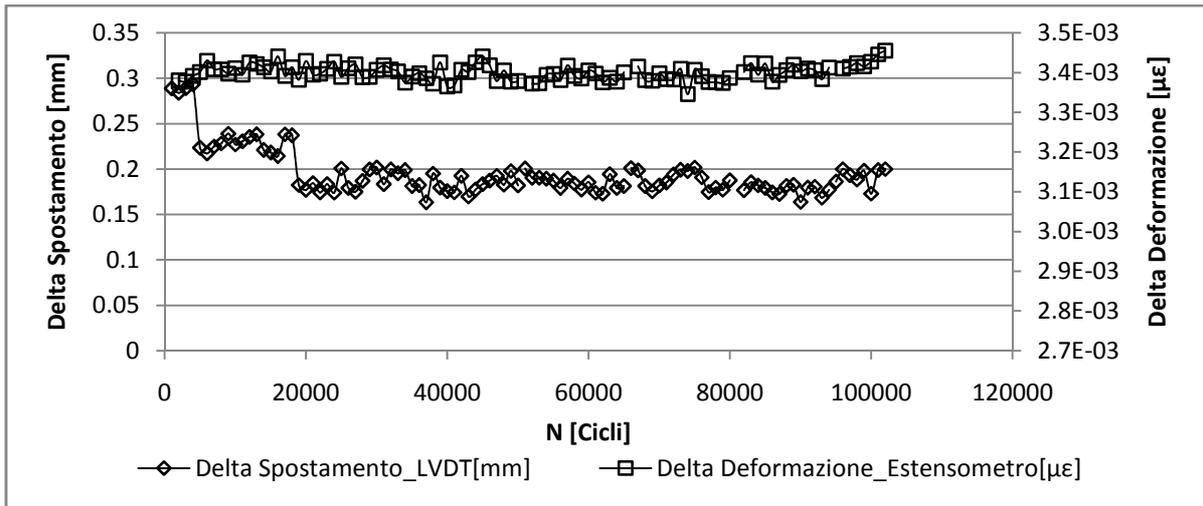


Figura A.8.2 Andamento dell'ampiezza dello spostamento [mm] acquisito tramite il sensore LVDT e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [µε] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.5_08

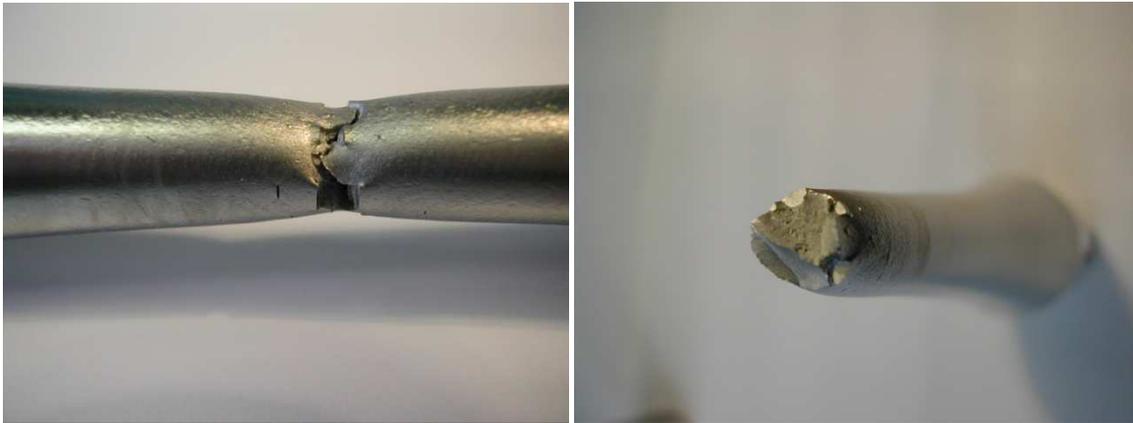


Figura A.8.3 Dettagli nella sezione di rottura che mettono in evidenza gli inneschi multipli per il provino Traz_liscio_R0.5_08

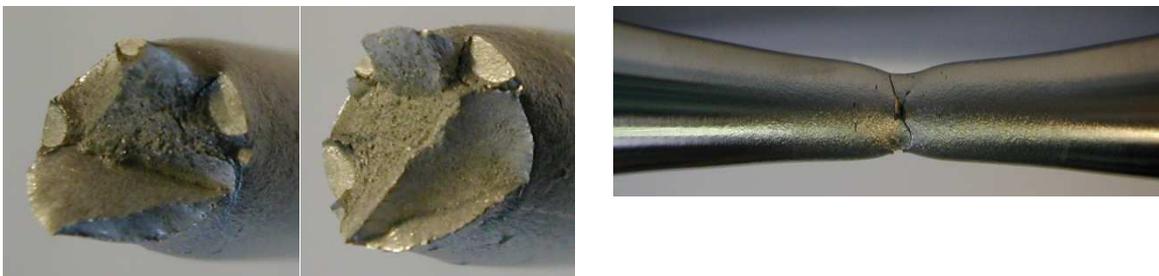


Figura A.8.4 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_08

PROVA : Traz_liscio_R0,5_09				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 50.265 kN	F _{MIN} = 25.133 kN	F _{MED} = 37.699 kN	F _a = 12.566 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 640 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 480 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 160 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura: 865881 cicli

NOTE: seconda prova in cui sono stati utilizzati i liquidi penetranti per il rapporto di ciclo R=0.5. La prova è stata condotta con l'ausilio dell'estensometro assiale che permette di misurare in modo più accurato rispetto al sensore LVDT i valori di deformazione del provino la quale consente di avere un'indicazione sulla possibile creazione di una cricca. Con questo provino si vuole monitorare l'innesco di cricca per una condizione di basso carico e quindi per un alto numero di alternanze.

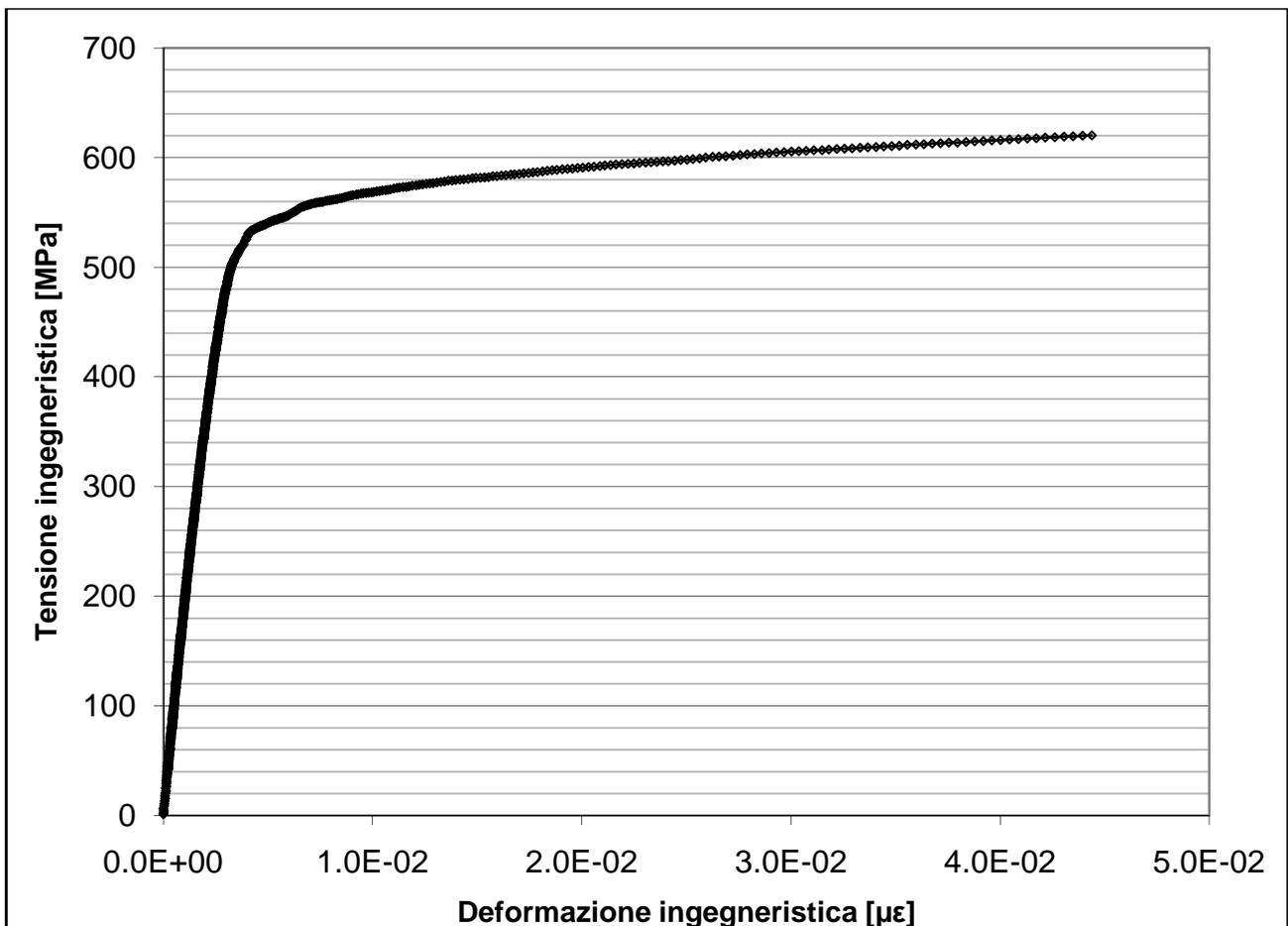


Figura A.9.1 Andamento della tensione ingegneristica al variare della deformazione del provino Traz_liscio_R0.5_09

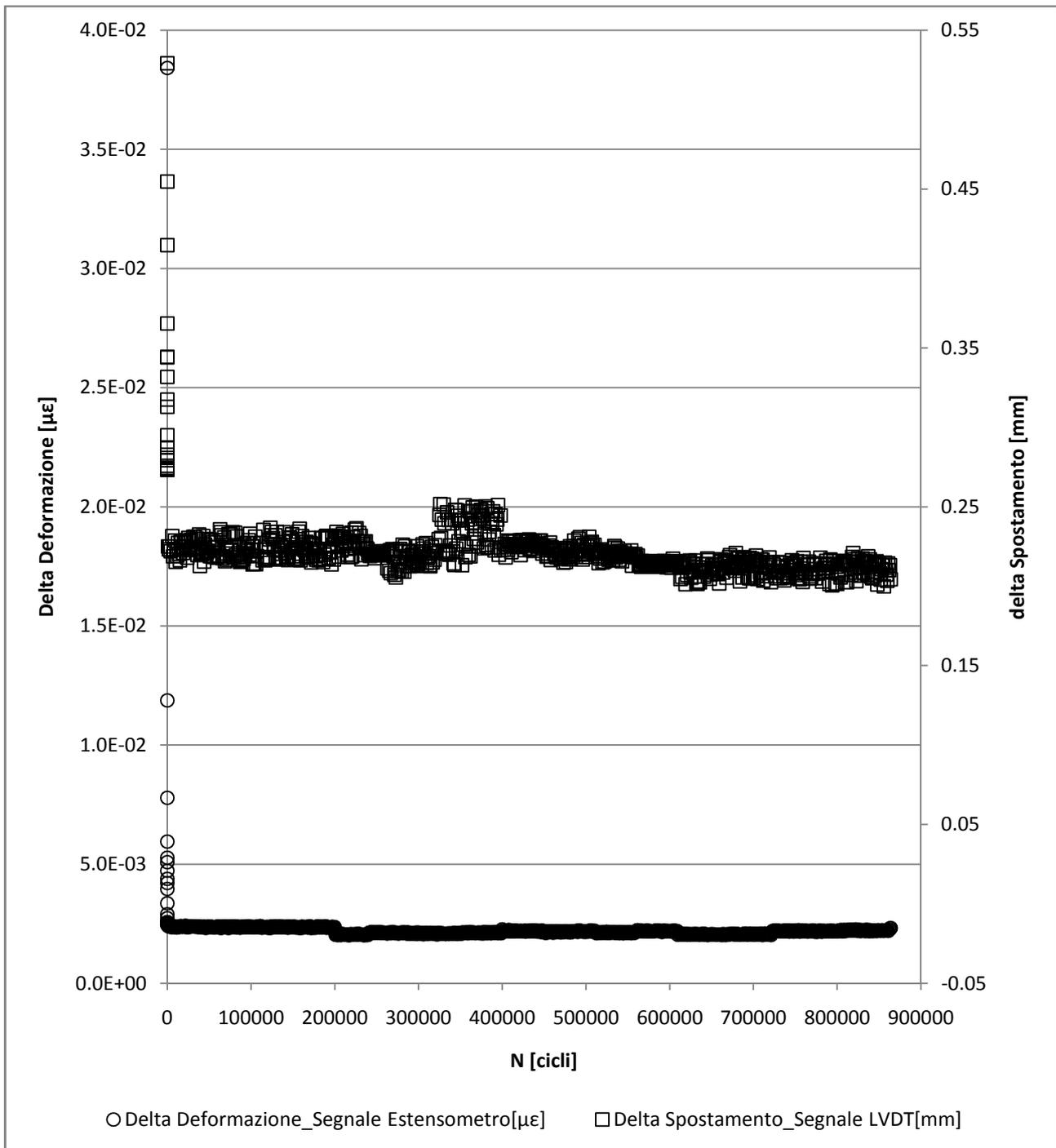


Figura A.9.2 Andamento dell'ampiezza dello spostamento [mm] acquisito tramite il sensore LVDT e dell'ampiezza di deformazione [µε] acquisita con l'estensometro all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.5_09

n° prova	n° cicli	Lunghezza cricca[mm]
13° prova liquidi penetranti	773235	0.223
14° prova liquidi penetranti	802083	0.247
15° prova liquidi penetranti	834107	0.58
rottura provino	865881	4.5

Figura A.9.3 Sintesi del monitoraggio dell'innesco e della propagazione della cricca per il provino Traz_liscio_R-0.5_09

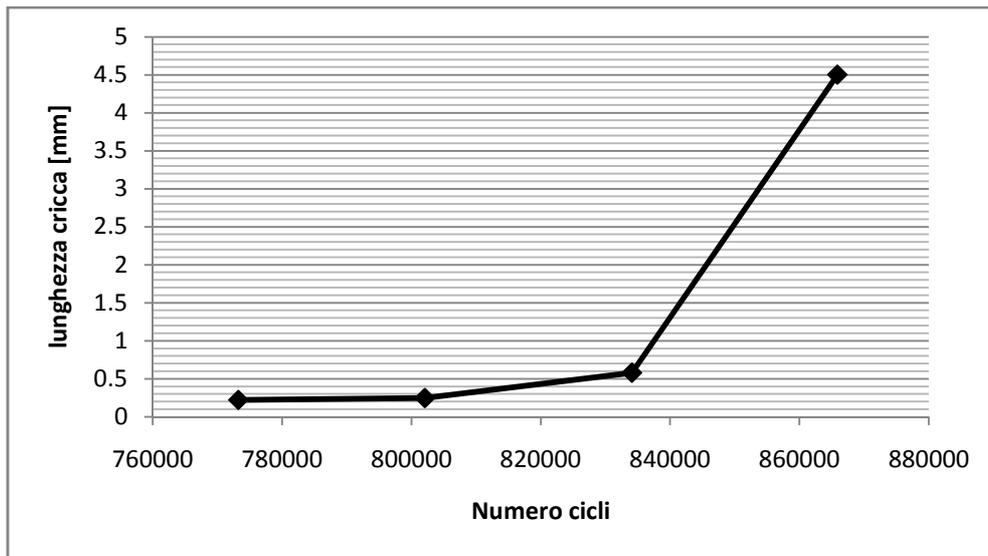


Figura A.9.4 Andamento della propagazione della cricca per il provino Traz_liscio_R-0.5_09

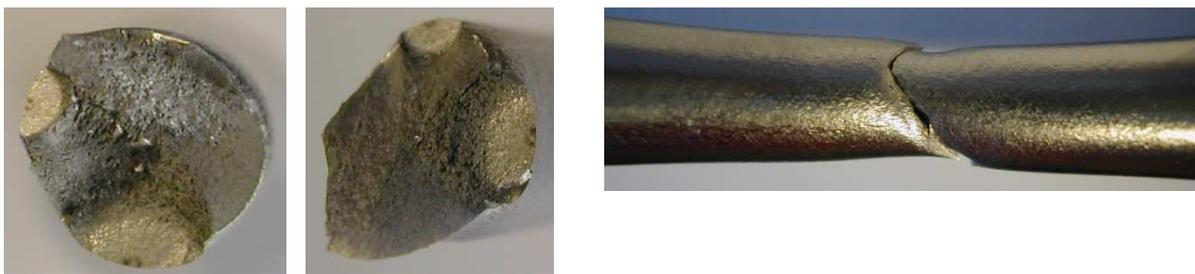


Figura A.9.5 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_09

PROVA : Traz_liscio_R0,5_10				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 43.982 kN	F _{MIN} = 21.991 kN	F _{MED} = 32.986 kN	F _a = 10.996 kN
TENSIONI APPLICATE	σ_{MAX} = 560 MPa	σ_{MIN} = 280 MPa	σ_{MED} = 420 MPa	σ_a = 140 MPa

Prova interrotta a : $N_f = 200000$ cicli

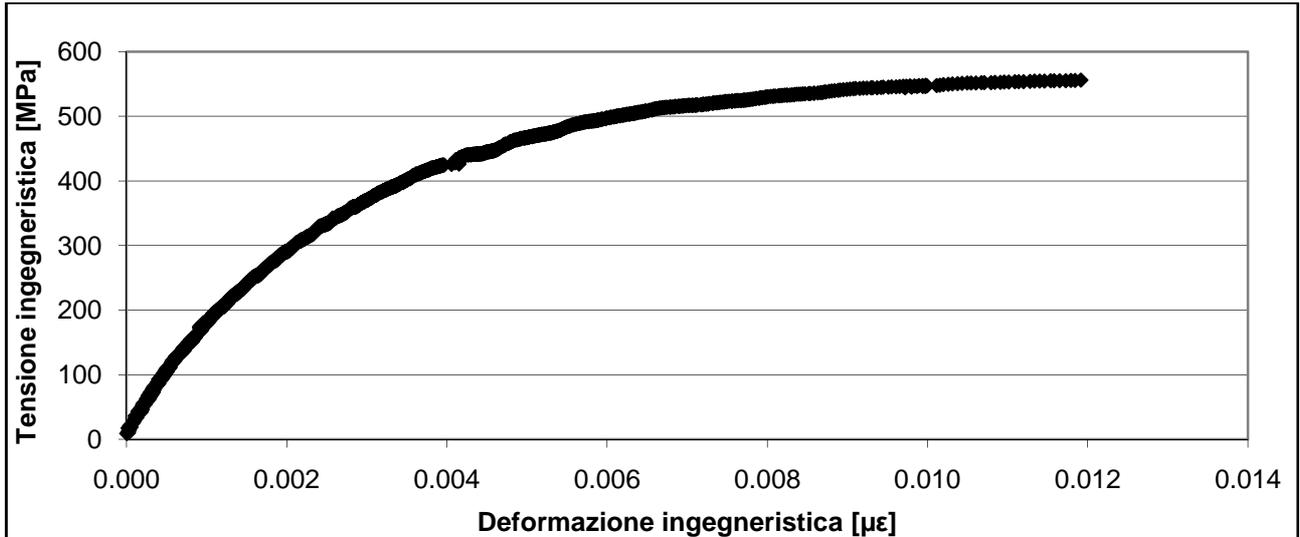


Figura A.10.1 Andamento della tensione ingegneristica al variare della deformazione del provino Traz_liscio_R0.5_10

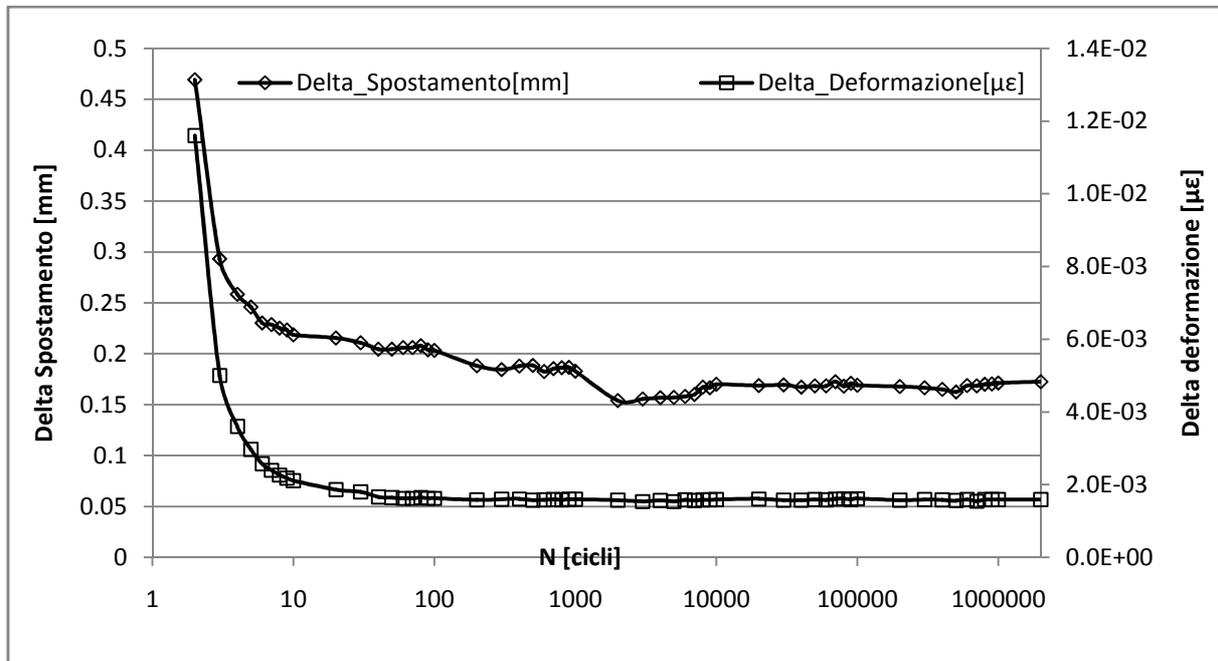


Figura A.10.2 Andamento dell'ampiezza dello spostamento [mm] acquisito tramite il sensore LVDT e dell'ampiezza di deformazione [µε] acquisita con l'estensometro all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R-0.5_10

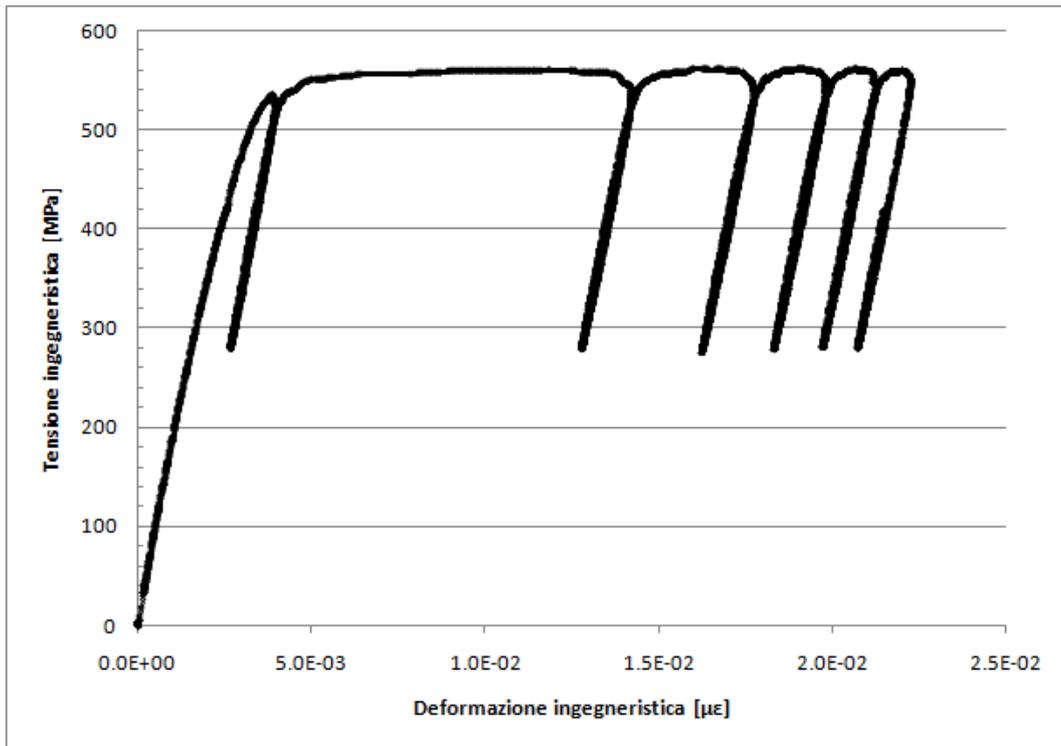


Figura A.10.3 Evoluzione del ciclo di isteresi durante l'intera prova per il provino Traz_liscio_R0.5_10

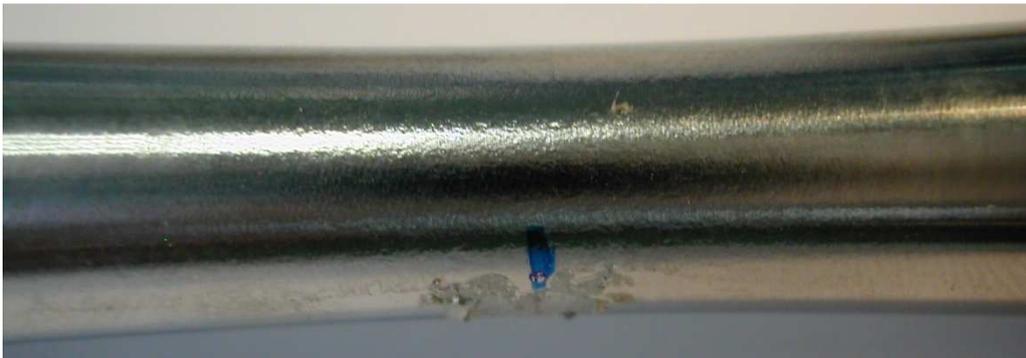


Figura A.10.5 Vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.5_10

PROVA : Traz_liscio_R0,5_11				
RAPPORTO DI CICLO	R = 0,5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 50.265 kN	F _{MIN} = 25.133 kN	F _{MED} =37.699 kN	F _a = 12.566 kN
TENSIONI APPLICATE	σ_{MAX} = 640 MPa	σ_{MIN} = 320 MPa	σ_{MED} = 480 MPa	σ_a = 160 MPa

Numero di cicli a rottura:	1364468 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q 50% = 14.75 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	80766	5.9%	33.5	22	0.1032	407.64	18.53
2	176466	12.9%	28.1	22	0.0974	384.73	17.49
3	254703	18.7%	31.1	22	0.0833	329.04	14.96
4	330490	24.2%	31.8	22	0.0747	295.07	13.41
5	437921	32.1%	31.4	22	0.0793	313.24	14.24
6	517093	37.9%	31.4	22	0.0762	300.99	13.68
7	585778	42.9%	31.7	22	0.0737	291.12	13.23
8	671826	49.2%	33.0	22	0.078	308.10	14.00
9	732720	53.7%	33.7	22	0.0895	353.53	16.07
10	832433	61.0%	29.8	22	0.0876	346.02	15.73
11	908063	66.6%	31.4	22	0.0742	293.09	13.32
12	991070	72.6%	31.0	22	0.0922	364.19	16.55
13	1065484	78.1%	32.6	22	0.0649	256.36	11.65
14	1141677	83.7%	32.2	22	0.0818	323.11	14.69
15	1222875	89.6%	32.8	22	0.0807	318.77	14.49
16	1294321	94.9%	33.9	22	0.074	292.30	13.29

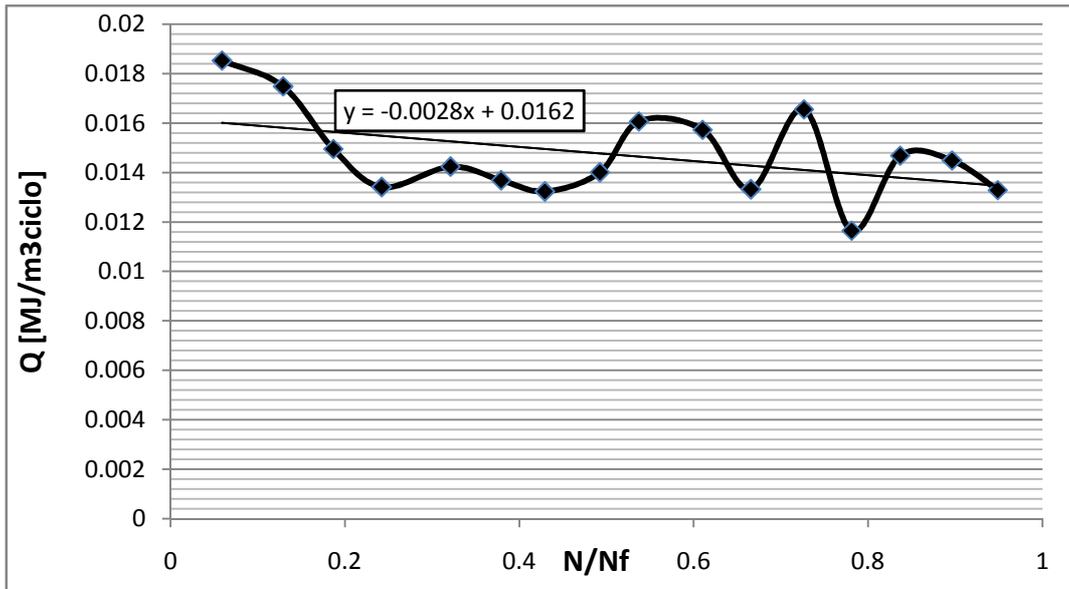


Figura A.11.1 Andamento della densità di energia dissipata Q in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0.5_11

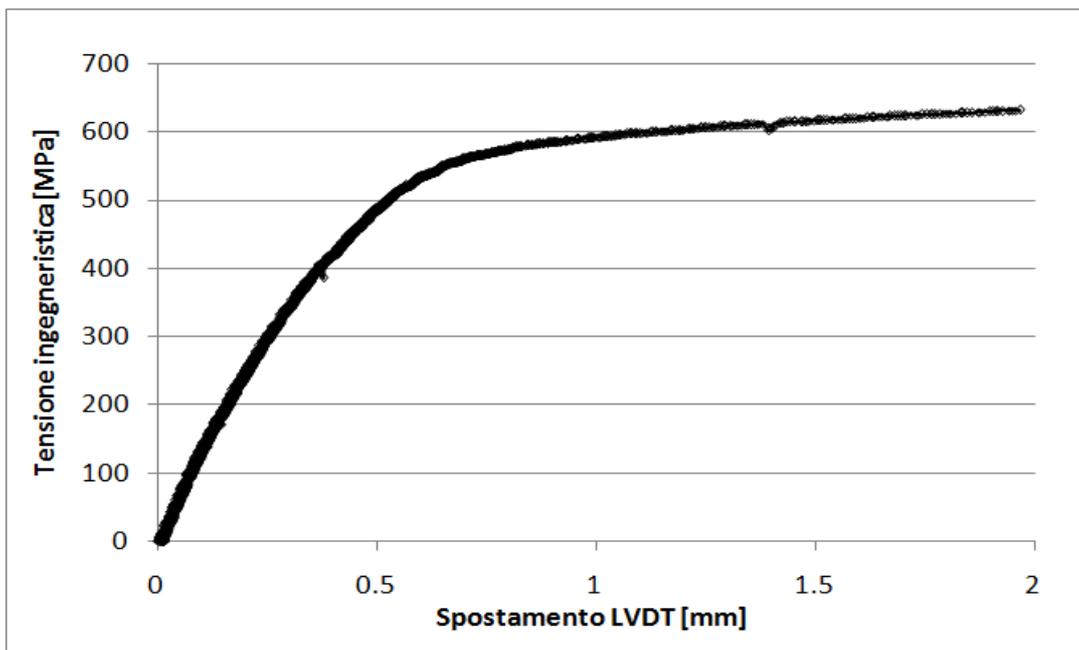


Figura A.11.2 Andamento della tensione ingegneristica al variare dell'allungamento del provino acquisito con il sensore LVDT nella prima semi alternanza per il provino Traz_liscio_R0.5_11

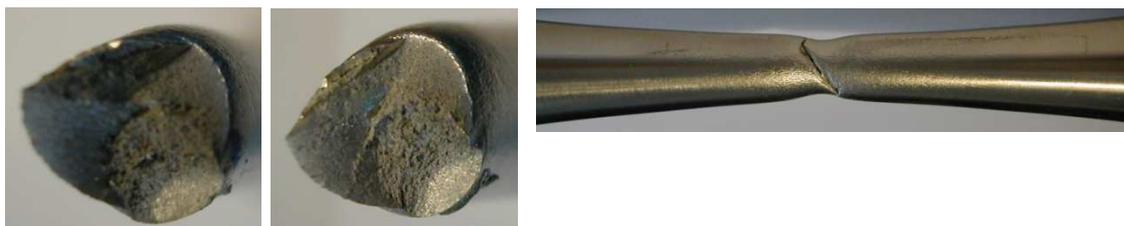


Figura A.11.3 Superfici di frattura e vista laterale del provino Traz_liscio_R0.5_11

Appendice B: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R0,1

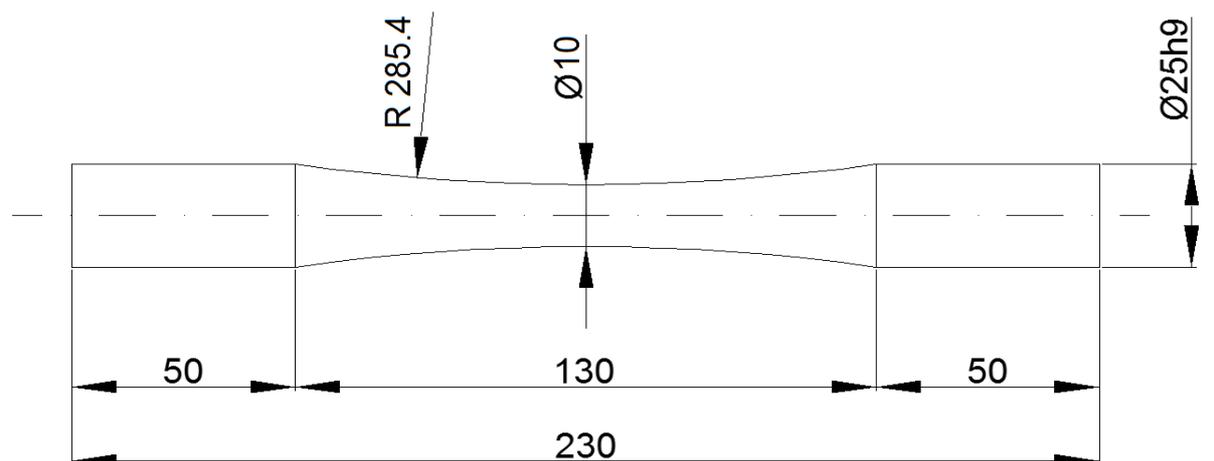
In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo $R=0,1$.

Per questo rapporto di ciclo si sono testati solamente due provini allo scopo di ottenere altri due punti sulla curva di Whöler e sulla curva “densità media di energia dissipata in funzione del numero di cicli”; inoltre è stato utile verificare, cambiando operatore, i risultati ottenuti nel lavoro di tesi precedentemente svolto da Negrisolò Luca in [9].

Inoltre sono stati testati altri due provini allo scopo di monitorare l’innescò e la propagazione di cricche a fatica. In questo modo si è potuto stimare in quale misura le curve di Whöler in tensione (σ_a-N_f) e in calore ($Q-N_f$).

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.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura B.1.



**Figura B.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove a $R=0.1$ realizzati in acciaio AISI 304L
trafilato a freddo**

PROVA : Traz_liscio_R0,1_18				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 42.76 kN	F _{MIN} = 4.28 kN	F _{MED} = 23.52 kN	F _a = 19.24 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 544.44 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = 54.44 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 299.44 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 245 \text{ MPa}$

ROTTO: a 324022 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 53.56 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	61865	19.1%	23.0	8	0.109	430.55	53.82
2	137376	42.4%	20.9	9	0.1169	461.76	51.31
3	208777	64.4%	22.6	9	0.1318	520.61	57.85
4	317465	98.0%	22.2	9	0.1486	586.97	65.22

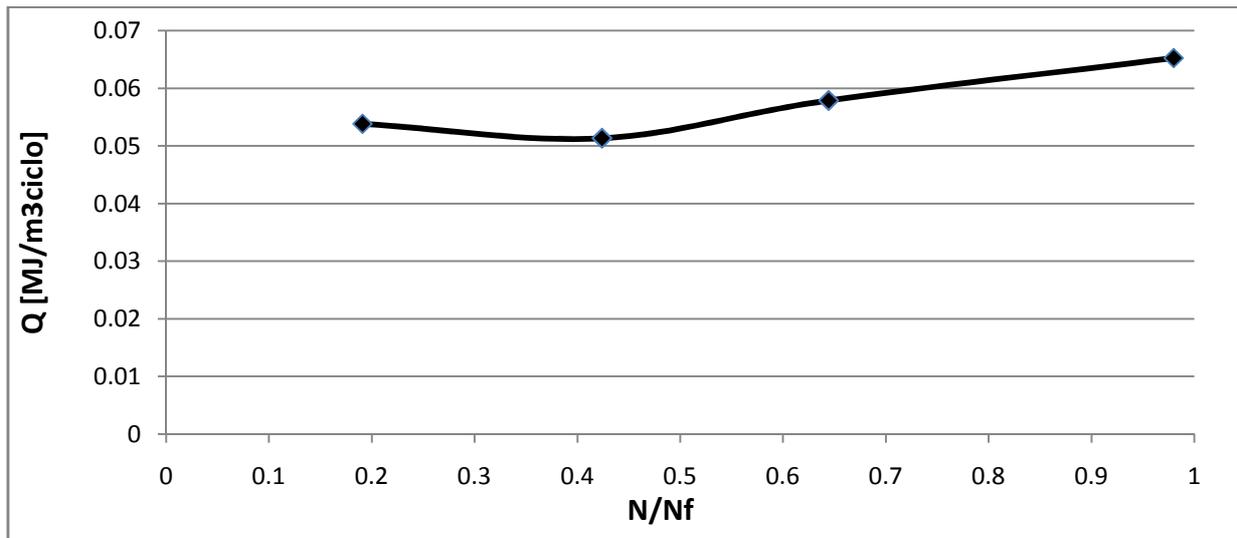


Figura B.18.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0,1_18

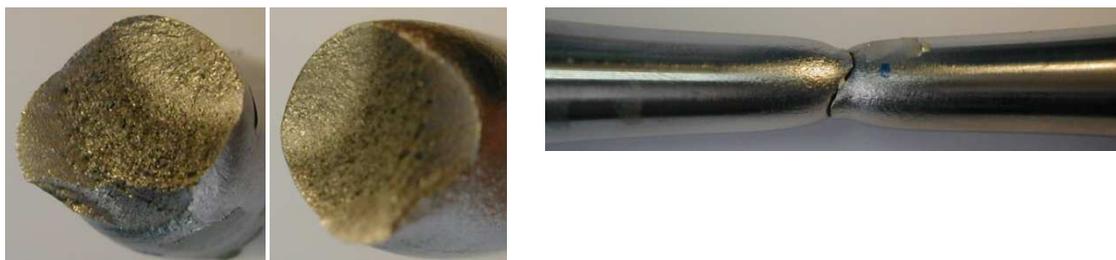


Figura B.18.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0,1_18

PROVA : Traz_liscio_R0,1_19				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 42.76 kN	F _{MIN} = 4.28kN	F _{MED} =23.52kN	F _a = 19.24kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 544.44 MPa	σ_{MIN} = 54.44 MPa	σ_{MED} = 299.44 MPa	σ_a = 245 MPa

ROTTO: a 472269 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 63.35 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	11899	2.5%	23.8	8	0.1786	705.47	88.18
2	113255	24.0%	22.4	9	0.1305	515.48	57.28
3	193118	40.9%	23.2	9	0.1197	472.82	52.54
4	251751	53.3%	23.4	9	0.1533	605.54	67.28
5	343765	72.8%	24.2	9	0.1485	586.58	65.18
6	407199	86.2%	23.8	9	0.1173	463.34	51.48

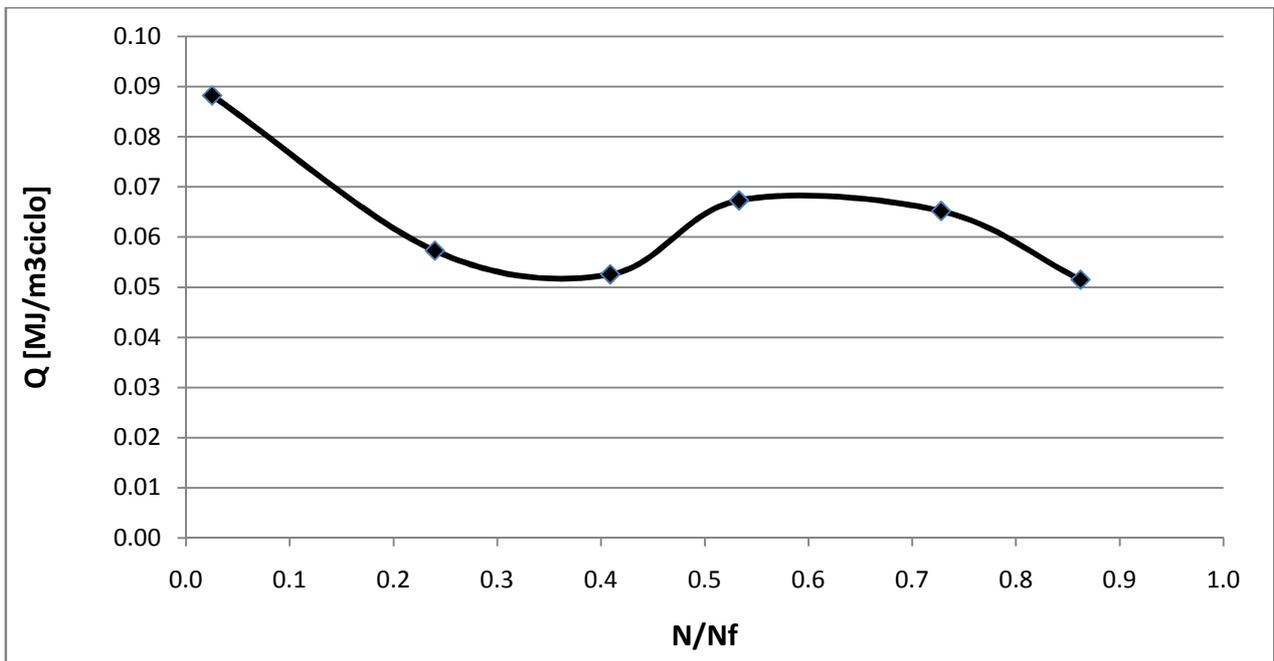


Figura B.19.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R0,1_19

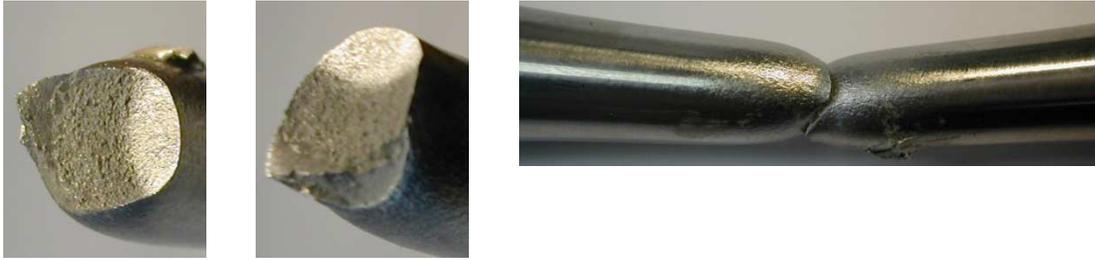


Figura B.19.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0,1_19

PROVA : Traz_liscio_R0,1_20				
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	$\phi = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 44.104 kN	F _{MIN} = 4.4104kN	F _{MED} =24.257kN	F _a = 19.84kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 622.22 MPa	σ_{MIN} = 62.22 MPa	σ_{MED} = 342.22 MPa	σ_a = 280 MPa

ROTTA: a 46585 cicli

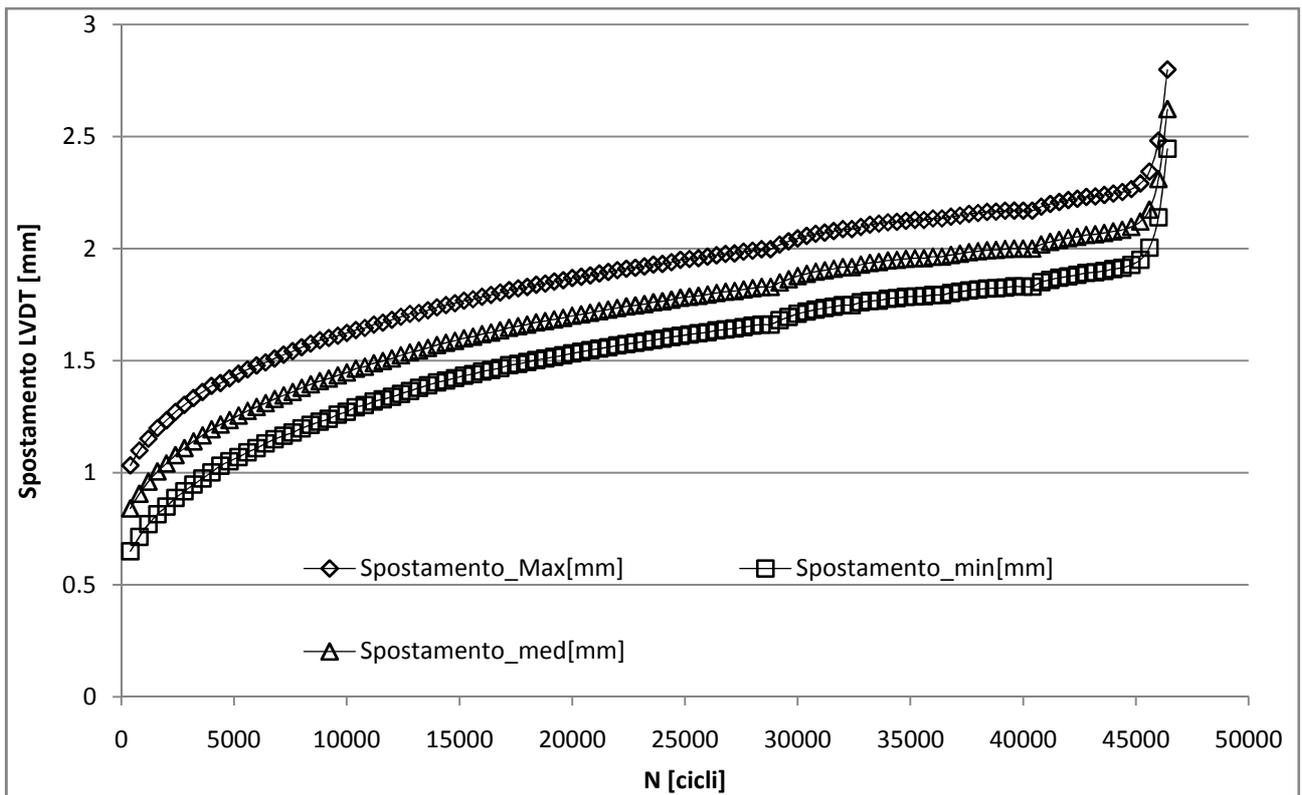


Figura A.20.1 Andamento dello spostamento del pistone [mm] acquisito tramite il sensore LVDT e della deformazione acquisita con l'estensometro [$\mu\epsilon$] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_20

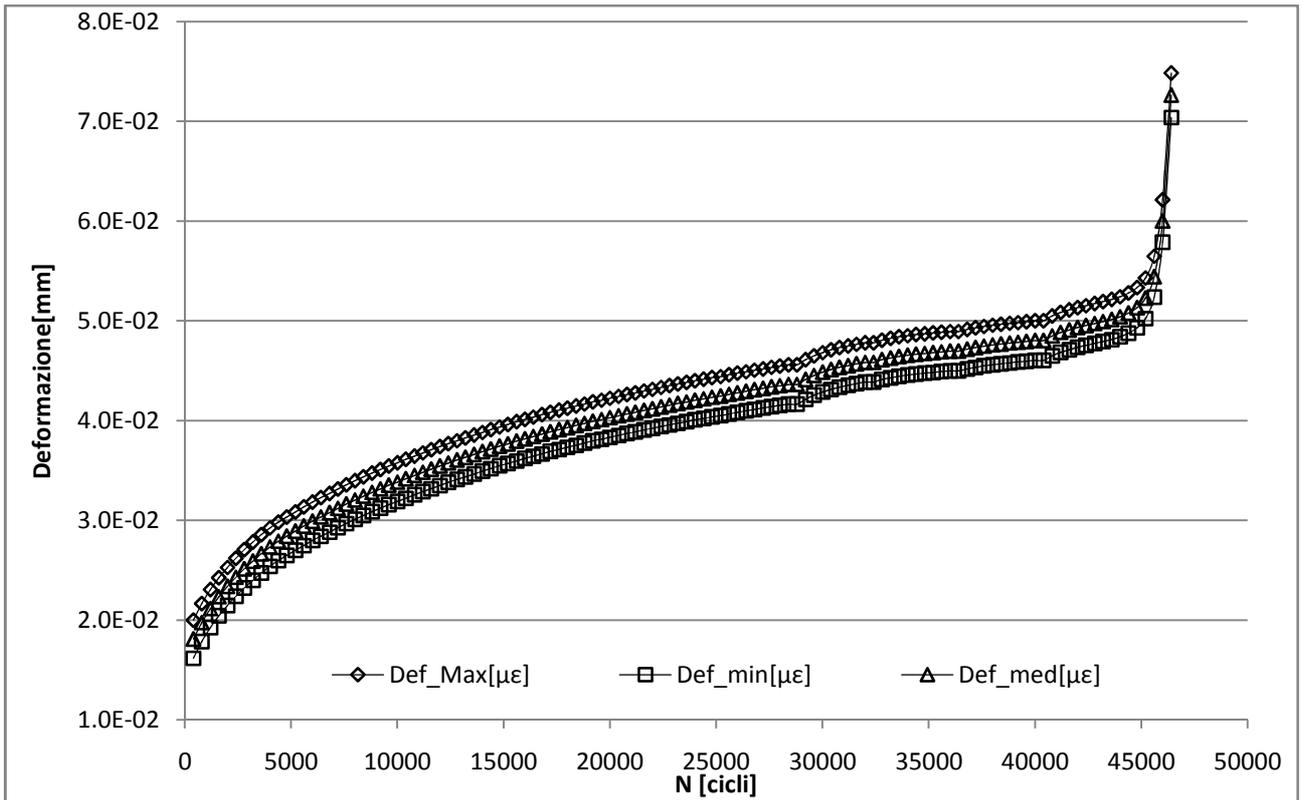


Figura A.20.2 Andamento della deformazione acquisita con l'estensometro [μϵ] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_20

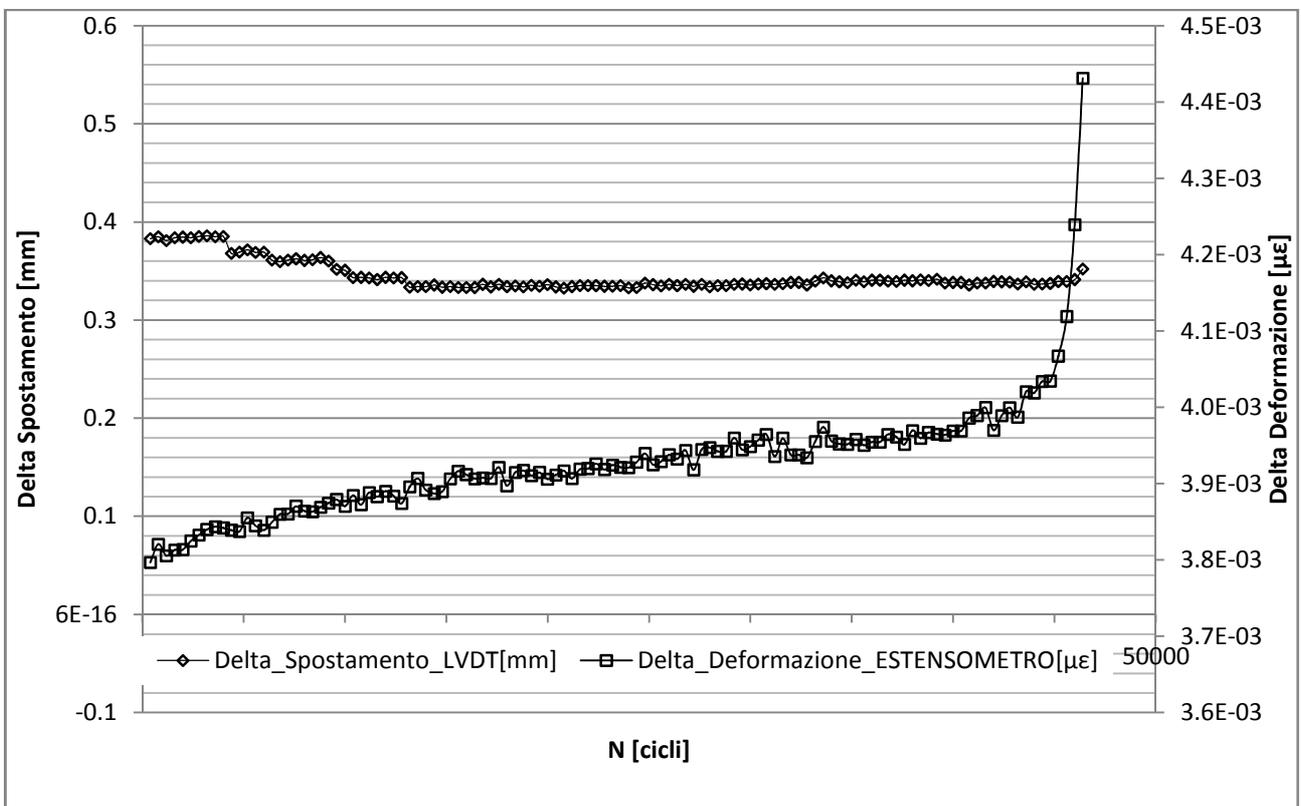


Figura A.20.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT [mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [μϵ] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_20

	n° cicli	lunghezza cricca	
		maggiore [mm]	minore [mm]
1° prova liquidi penetranti	32018	0.14	0.1
2° prova liquidi penetranti	36017	0.68	0.43
3° prova liquidi penetranti	40018	0.97	0.59
rottura provino	46585	4.25	2.34

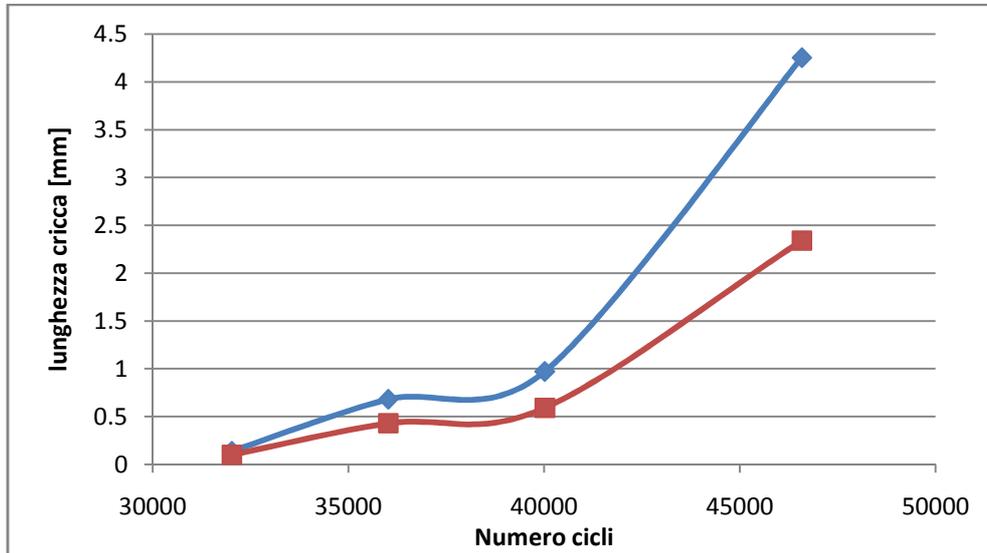


Figura A.20.4 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.1_20

PROVA : Traz_liscio_R0,1_21				
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	$\phi = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 38.591 kN	F _{MIN} = 3.859kN	F _{MED} =21.22kN	F _a = 17.36kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 544.4 MPa	σ_{MIN} = 54.4 MPa	σ_{MED} = 299.38 MPa	σ_a = 245 MPa

ROTTA: a 322457 cicli

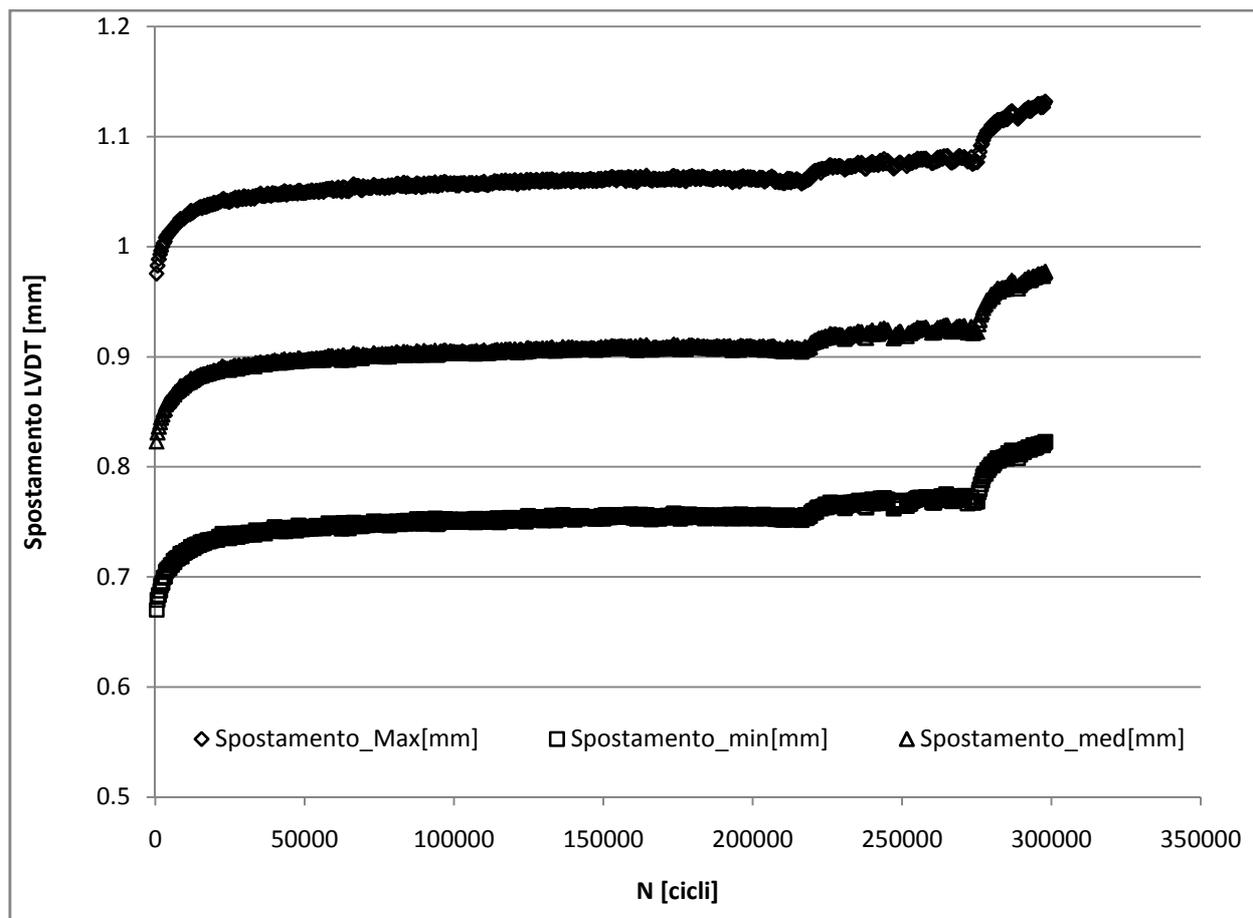


Figura A.21.1 Andamento dello spostamento del pistone [mm] acquisito tramite il sensore LVDT e della deformazione acquisita con l'estensometro [$\mu\epsilon$] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_21

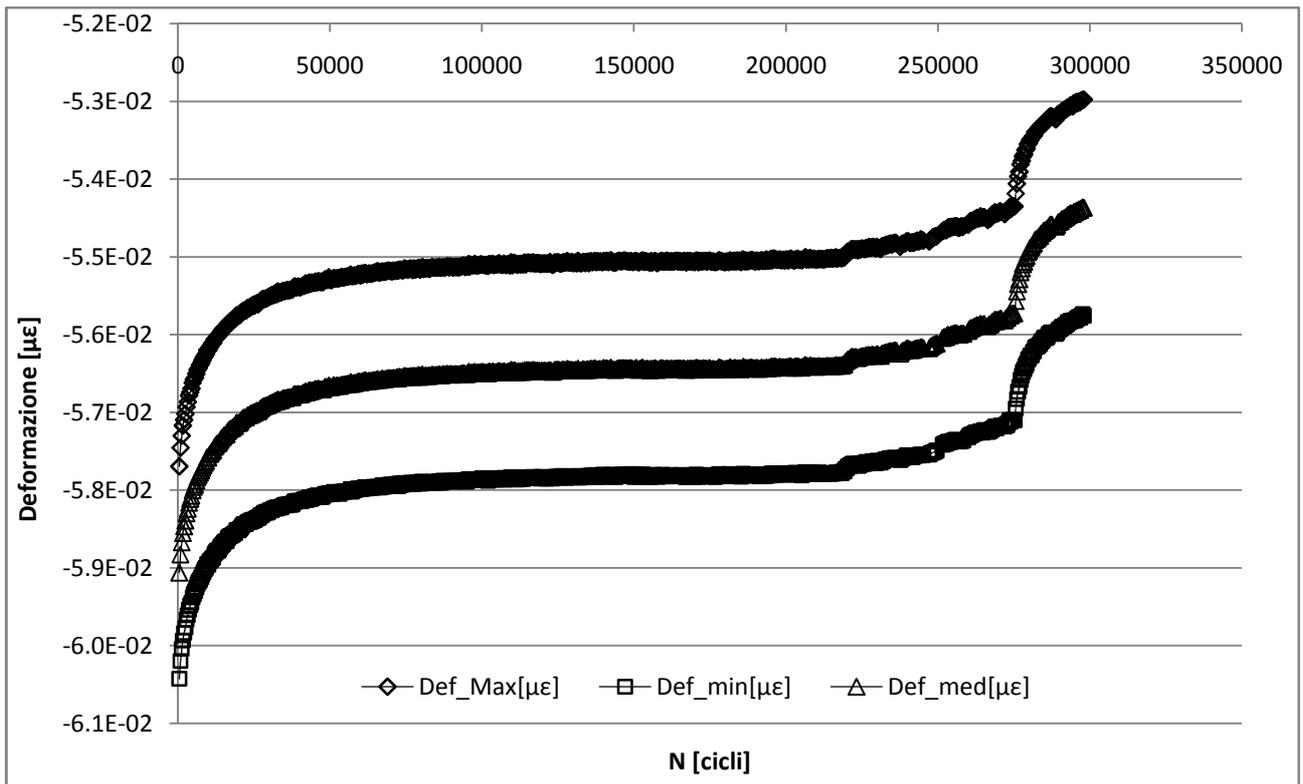


Figura A.21.2 Andamento della deformazione acquisita con l'estensometro [$\mu\epsilon$] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_21

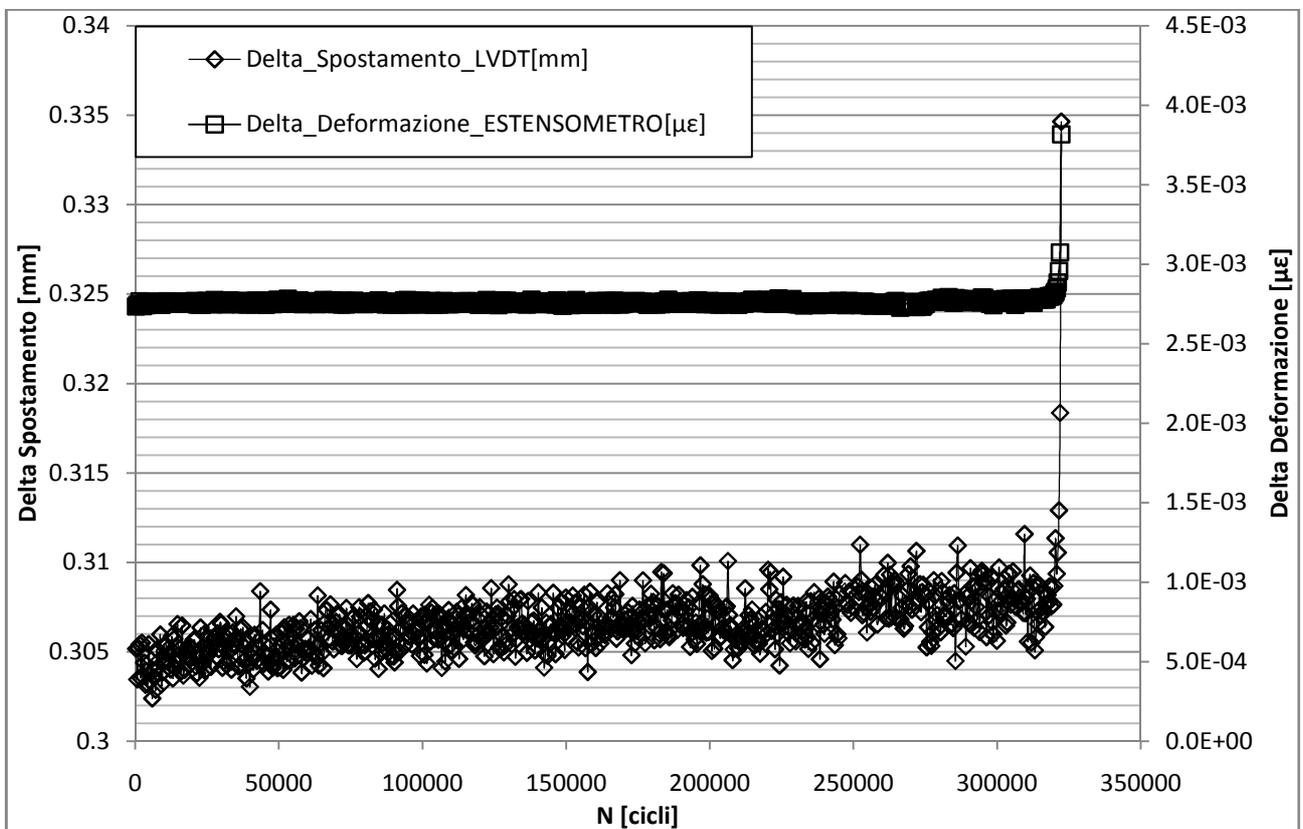


Figura A.21.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [$\mu\epsilon$] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R0.1_21



Figura A.21.4 Dettaglio superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0.1_21

**Appendice C: RISULTATI DELLE 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.

Per questo rapporto di ciclo si sono testati solamente sette provini non per ottenere altri punti sulla curva di Whöler e sulla curva “densità media di energia dissipata in funzione del numero di cicli”; bensì per ricercare l’innesco e la propagazione di cricche.

Ciascuna scheda presenta i dati caratteristici relativi alle modalità di prova.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura C.1.

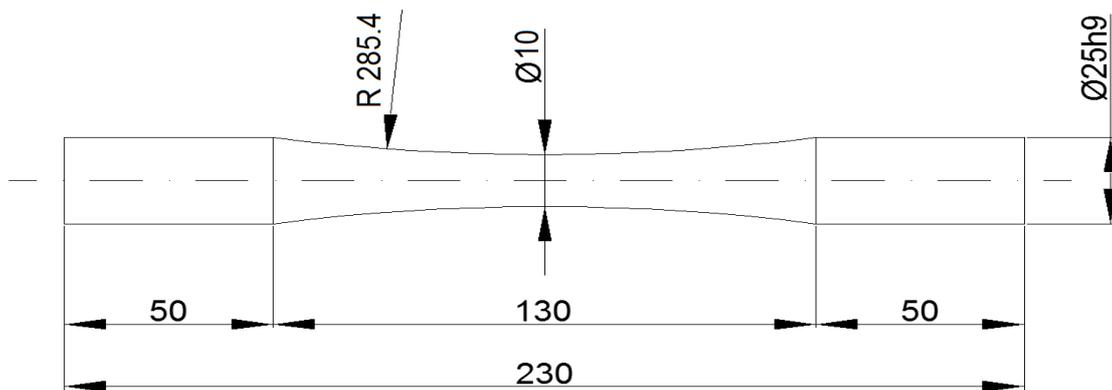


Figura C.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove aR=-1 realizzati in acciaio inossidabile AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Traz_liscio_R-1_18				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 24.74 kN	F _{MIN} = -24.74 kN	F _{MED} = 0 kN	F _a = 24.74 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	σ_{MAX} = 315 MPa	σ_{MIN} = -315 MPa	σ_{MED} = 0 MPa	σ_a = 315 MPa

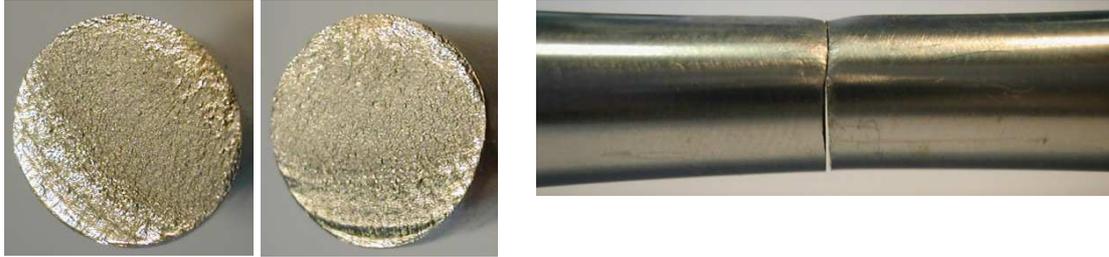


Figura C.18.1 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R-1_18

n° prova	n° cicli	lunghezza cricca [mm]
5° prova liquidi penetranti	540018	0.208
6° prova liquidi penetranti	580025	0.536
rottura provino	588680	6

Figura C.18.2 Sintesi del monitoraggio dell'innesco e della propagazione della cricca per il provino _liscio_R-1_18

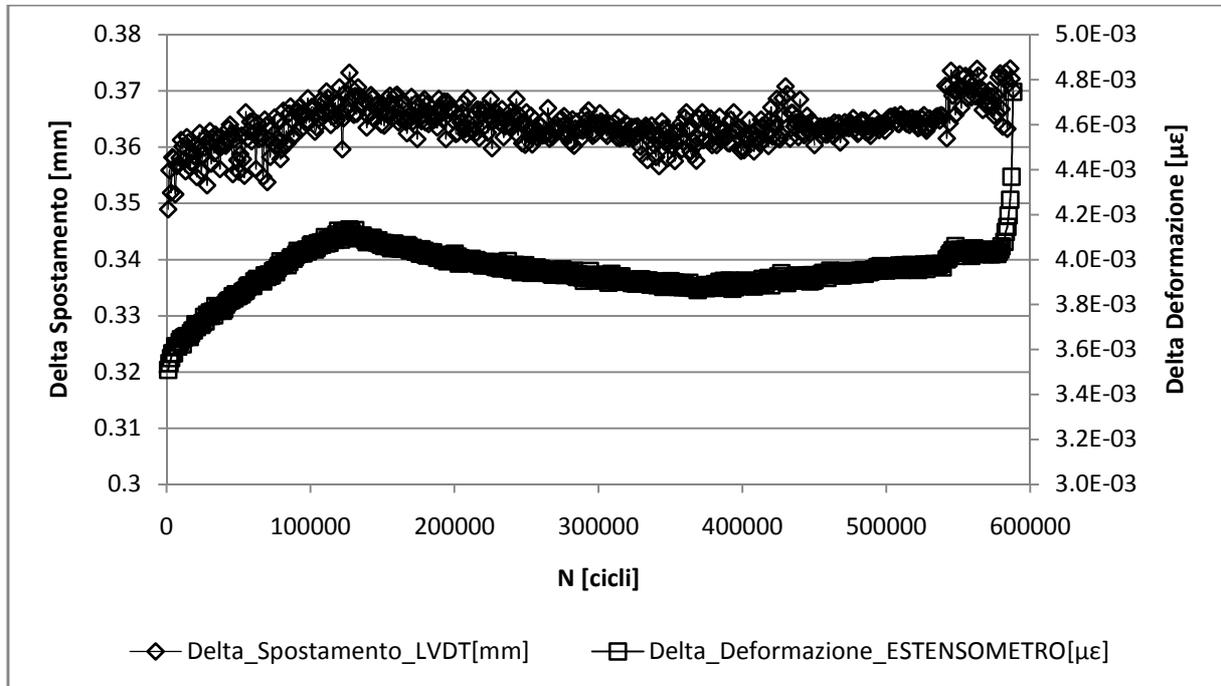


Figura C.18.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [µε] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R-1_18

PROVA : Traz_liscio_R-1_21				
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	$\phi = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} = 27.09 kN	F _{MIN} = -27.09 kN	F _{MED} = 0 kN	F _a = 27.09 kN
TENSIONI INGEGNERISTICHE	$\sigma_{MAX} = 345 \text{ MPa}$	$\sigma_{MIN} = -345 \text{ MPa}$	$\sigma_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 345 \text{ MPa}$

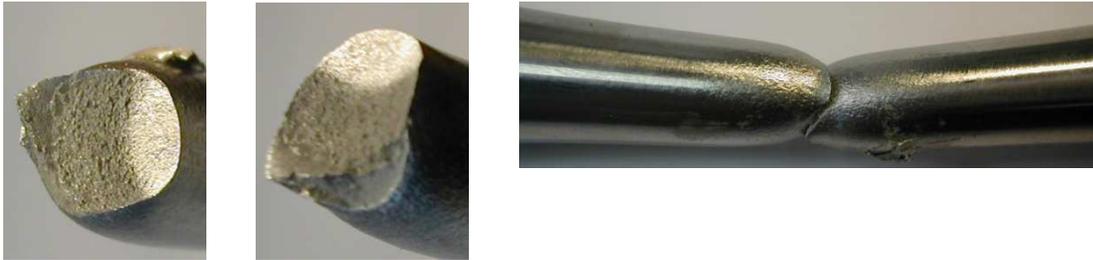


Figura C.21.1 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R0,1_21

n° prova	n° cicli	lunghezza cricca [mm]
5° prova liquidi penetranti	125011	1.5
6° prova liquidi penetranti	127007	2.17
rottura provino	127570	10

Figura C.21.2 Sintesi del monitoraggio dell'innesco e della propagazione della cricca per il provino _liscio_R-1_21

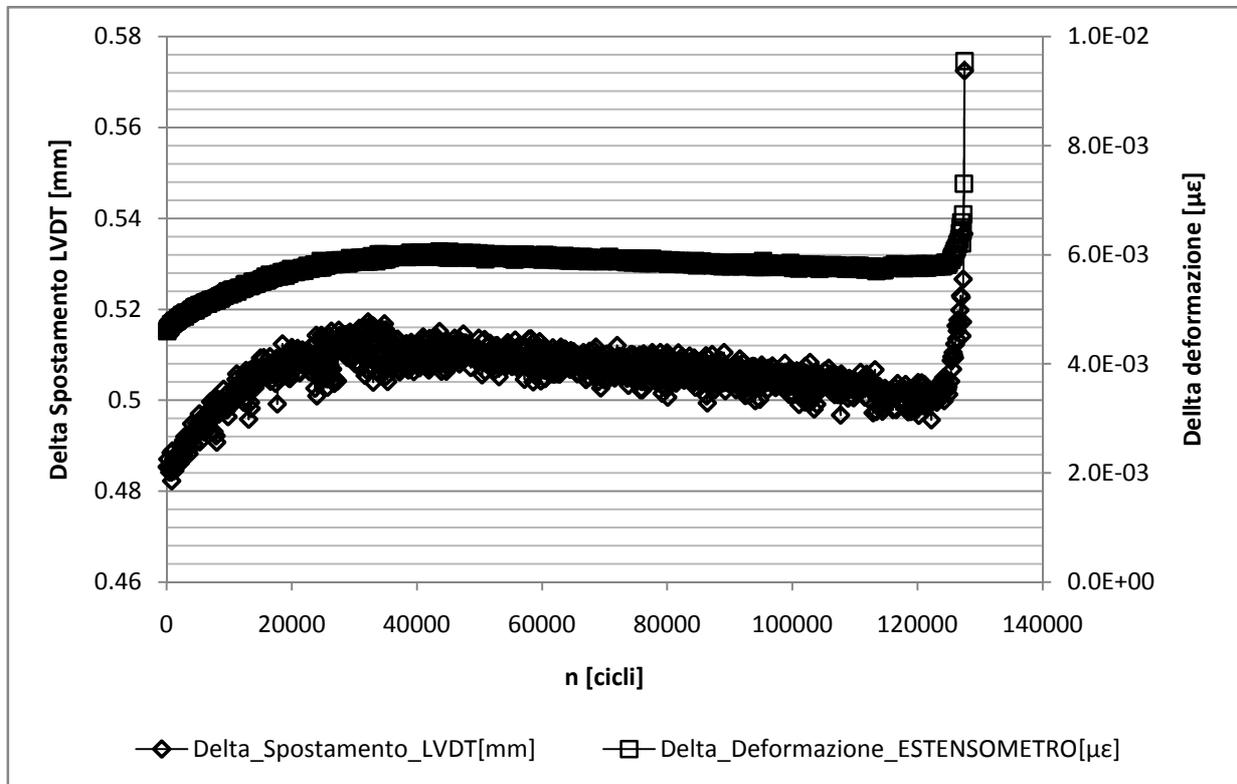


Figura C.21.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisito con LVDT[mm] e dell'ampiezza di deformazione acquisita con l'estensometro [με] all'aumentare del numero di cicli per il provino Traz_liscio_R-1_21

Appendice D: 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.

Non avendo a disposizione un estensometro torsionale i dati di rotazione angolare sono stati ricavati dal sensore angolare della macchina di torsione RVDT.

La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è la stessa e viene riportata per completezza in figura D.1.

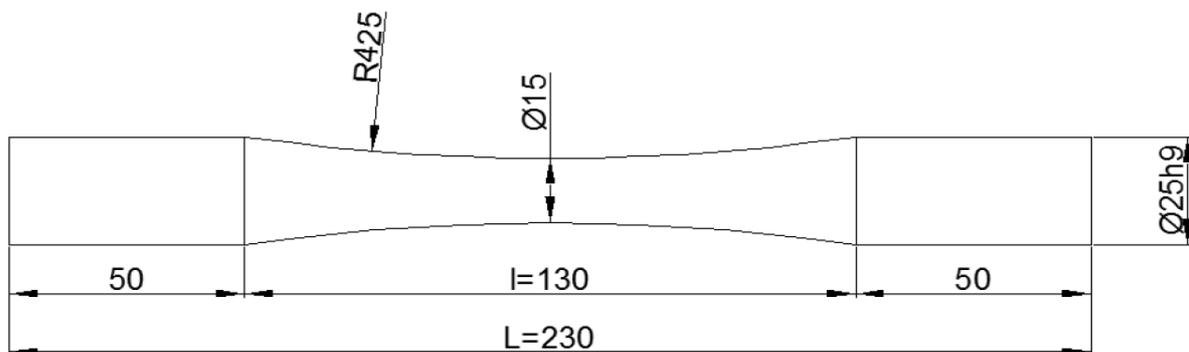


Figura D.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove a R=-1 realizzati in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Torq_liscio_R-1_09				
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	$\phi = 15\text{mm}$	A = 176.71mm ²
CARICHI APPLICATI	M _{MAX} = 212.05Nm	M _{MIN} = -212.05Nm	M _{MED} = 0 kN	M _a = 212.05Nm
TENSIONI INGEGNERISTICHE	τ_{MAX} = 320 MPa	τ_{MIN} = -320 MPa	τ_{MED} = 0 MPa	τ_a = 320 MPa

Numero di cicli a rottura:	N_f = 5994 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 2900.06 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2588	43.1%	21.9	0.4	0,295	1165.259	2913.12
2	4735	78.9%	22.3	0.35	0,256	1011.2	2897.043

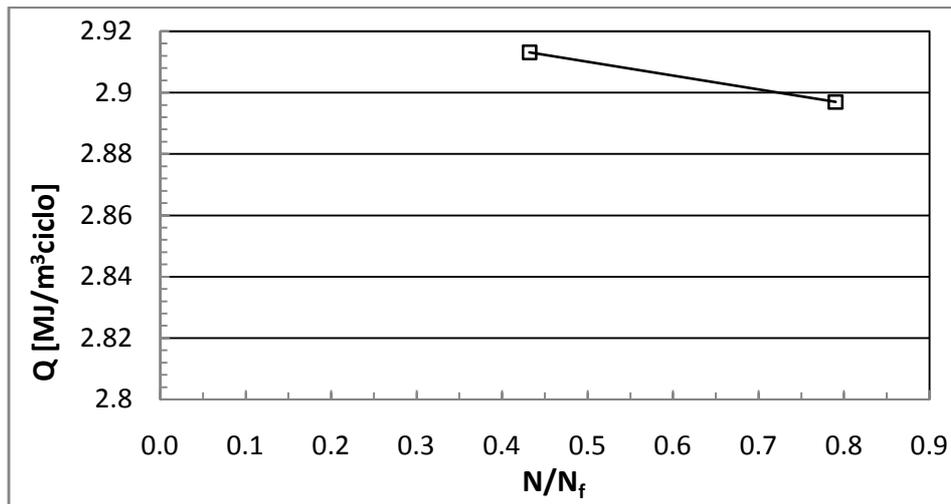


Figura D.9.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq_liscio_R-1_09



Figura D.9.2 Vista frontale e laterale delle superfici di frattura per il provino Torq_liscio_R-1_09

PROVA : Torq_liscio_R-1_10				
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	$\phi = 15\text{mm}$	A = 176,71 mm ²
CARICHI APPLICATI	M _{MAX} = 185.5 Nm	M _{MIN} = -185.5 Nm	M _{MED} = 0 Nm	M _a = 185.5 Nm
TENSIONI APPLICATE	τ_{MAX} = 280 Mpa	τ_{MIN} = -280 MPa	τ_{MED} = 0 MPa	τ_a = 280 MPa

Numero di cicli a rottura:	N_f = 345414 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 276.35 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	25974	7.5%	23.6	1.8	0.2401	948.39	526.88
2	39518	11.4%	24.08	1.8	0.2419	955.50	530.83
3	63543	18.4%	24.88	1.8	0.2235	882.825	490.45
4	107463	31.1%	23.07	1.8	0.1777	701.91	389.95
5	157301	45.5%	21.22	2	0.1683	664.78	332.39
6	322253	93.3%	24.68	2.2	0.1507	595.26	270.57

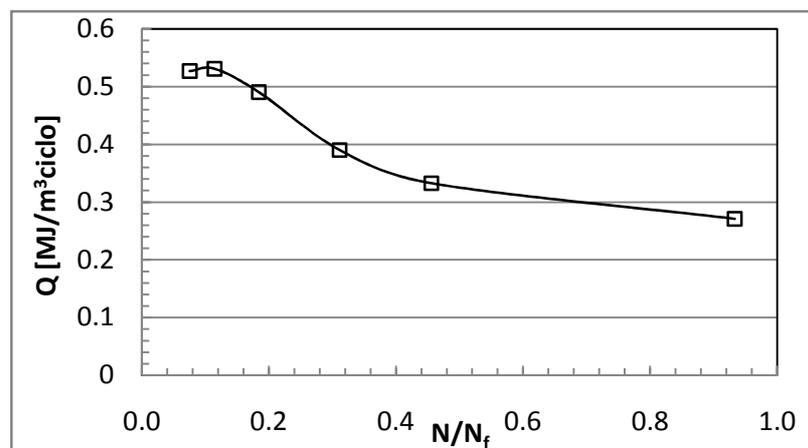


Figura D.10.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq_liscio_R-1_10



Figura D.10.2 Vista frontale e laterale delle superfici di frattura per il provino Torq_liscio_R-1_10

PROVA : Torq_liscio_R-1_11				
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	$\phi = 15\text{mm}$	A = 176,71 mm ²
CARICHI APPLICATI	M _{MAX} = 172.29 Nm	M _{MIN} = -172.29 Nm	M _{MED} = 0 Nm	M _a = 172.29 Nm
TENSIONI APPLICATE	$\tau_{MAX} = 260 \text{ Mpa}$	$\tau_{MIN} = -260 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 260 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura:	N_f = 1226839 cicli
Q valutato al 50% della vita:	Q_{50%} = 142.85 [kJ/m³ciclo]

n° raff	cicli	% vita	T [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	8659	0.7%	25.54	2	0.0753	297.435	148.71
2	86024	7.01%	23.17	1.5	0.0737	291.115	194.076
3	223641	18.22%	23.59	4	0.2167	855.96	213.99
4	358147	29.19%	25.17	4.5	0,1933	763.53	169.67
5	504265	41.10%	26.32	5	0.2326	918.77	183.75
6	606407	49.43%	26.2	5	0.1813	716.13	143.22
7	707127	57.64%	23.35	2	0.0698	275.71	137.855
8	900246	73.38%	25.52	4	0.1594	629.63	157.407

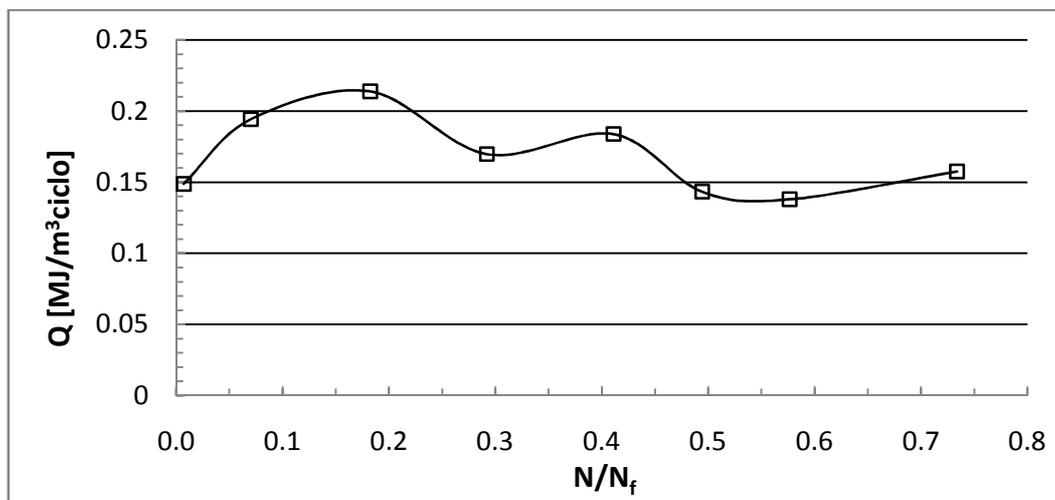


Figura D.11.1 Andamento della densità di energia dissipata in funzione della frazione di vita per il provino Torq_liscio_R-1_11

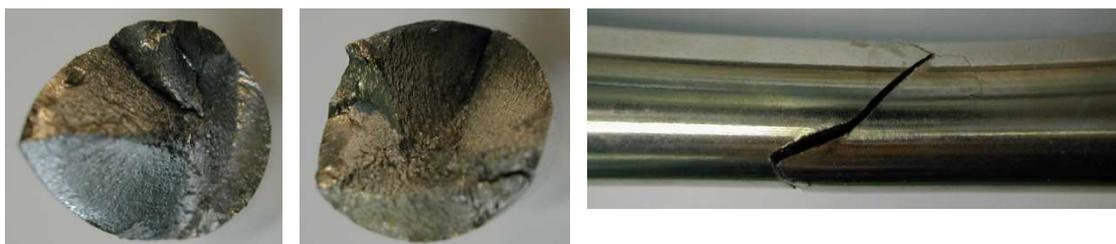


Figura D.11.2 Vista frontale e laterale delle superfici di frattura per il provino Torq_liscio_R-1_11

PROVA : Torq_liscio_R-1_14				
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	$\phi = 15\text{mm}$	A = 176,71 mm ²
CARICHI APPLICATI	M _{MAX} = 205.43 Nm	M _{MIN} = -205.43 Nm	M _{MED} = 0 Nm	M _a = 205.43 Nm
TENSIONI APPLICATE	$\tau_{MAX} = 310 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -310 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 310 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura: **N_f = 93283 cicli**

distanza tra le due "porta bandiere" di 1.5cm con uso di molle per vincolare l'estensometro

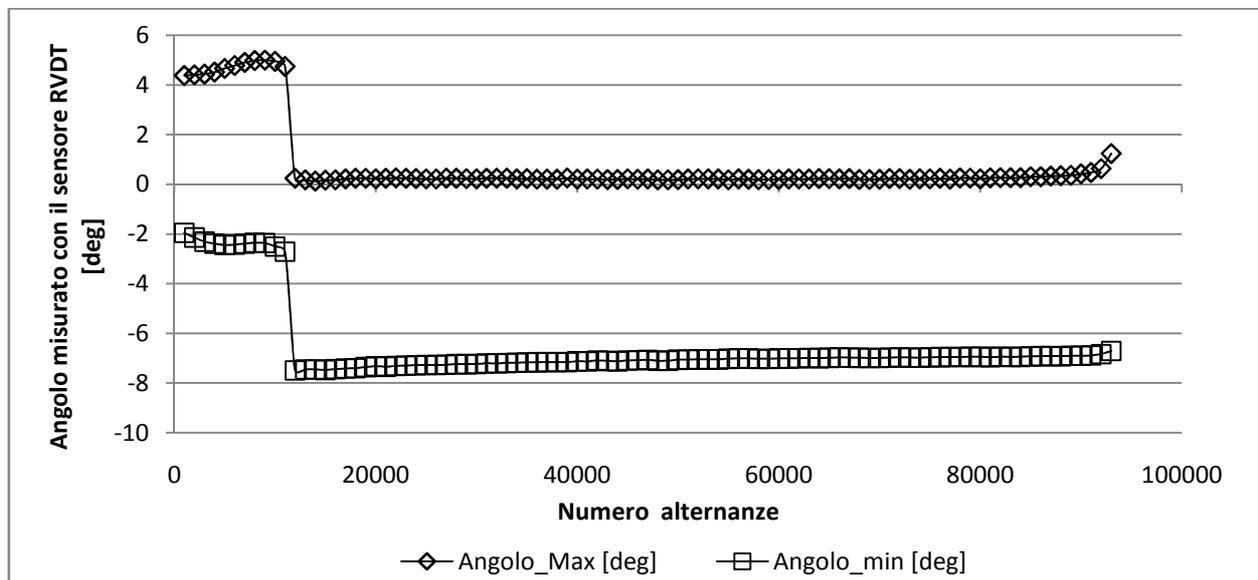


Figura D.14.1 Andamenti dell'angolo massimo e minimo spazzato dal sensore RVDT per singolo ciclo acquisito per il provino Torq_liscio_R-1_14

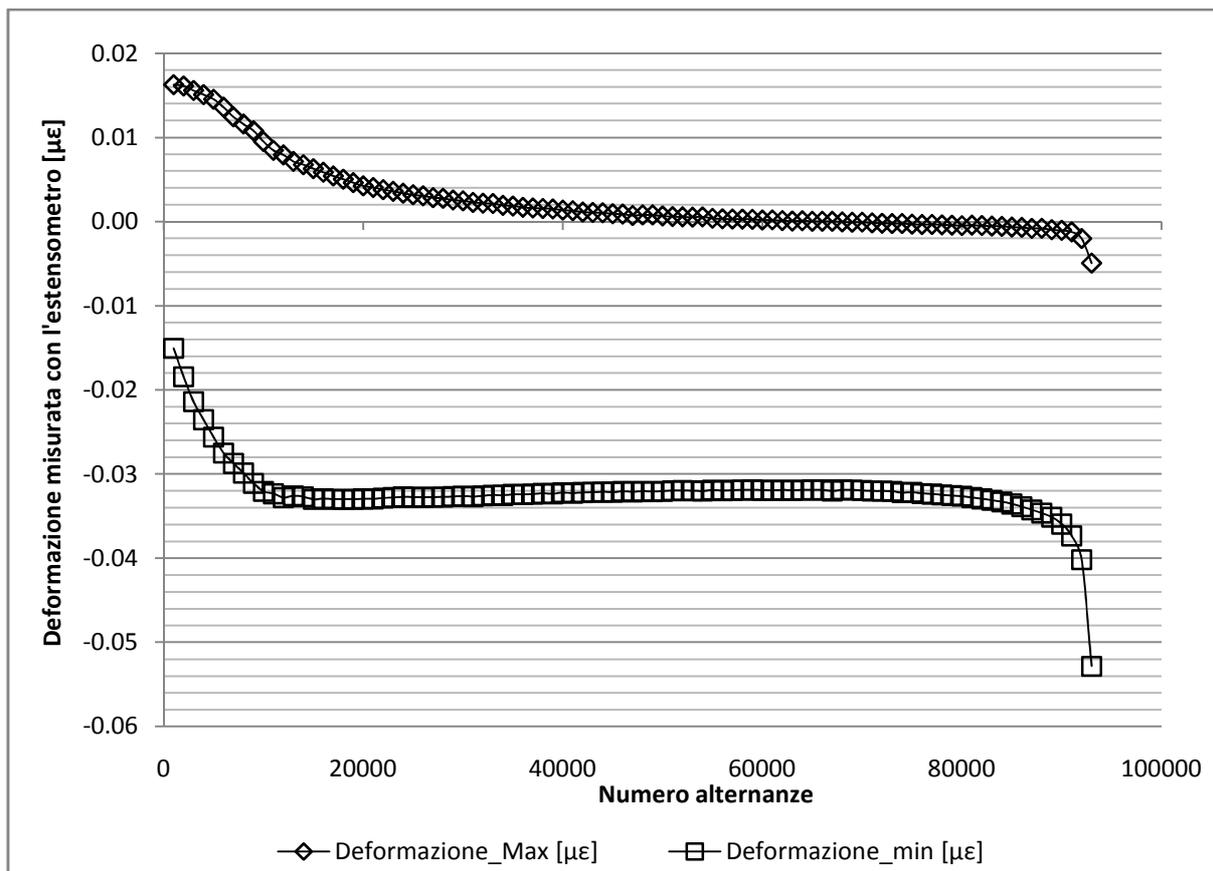


Figura D.14.2 Andamento dell'ampiezza, per singolo ciclo acquisito, della deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_14

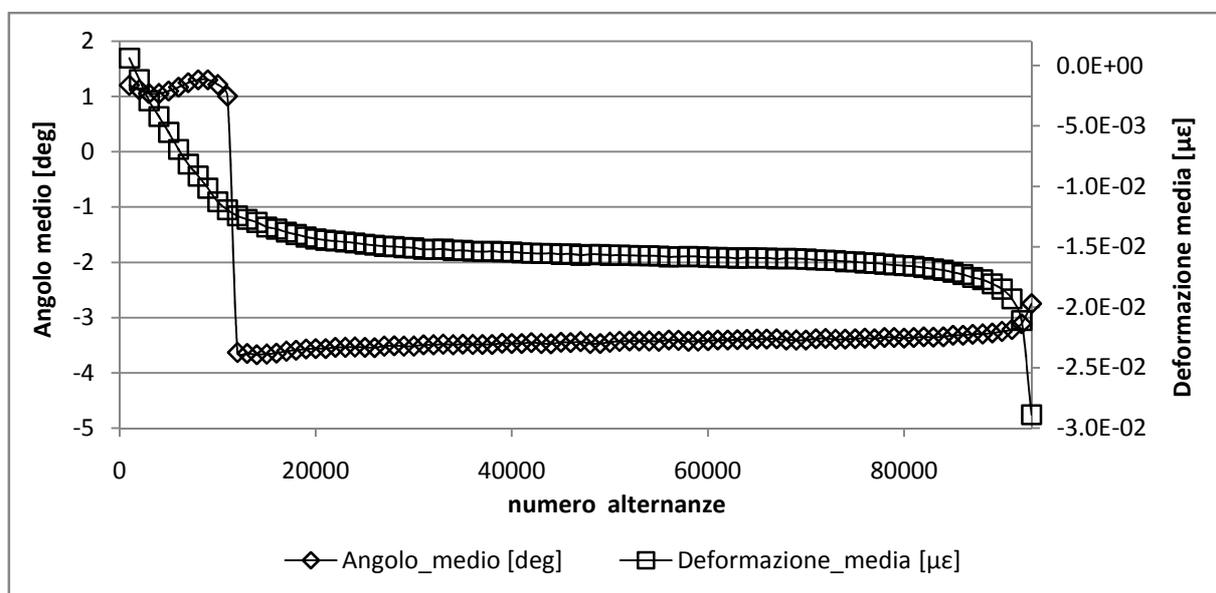


Figura D.14.3 Andamento dell'angolo medio e della deformazione media per il provino Torq_liscio_R-1_14

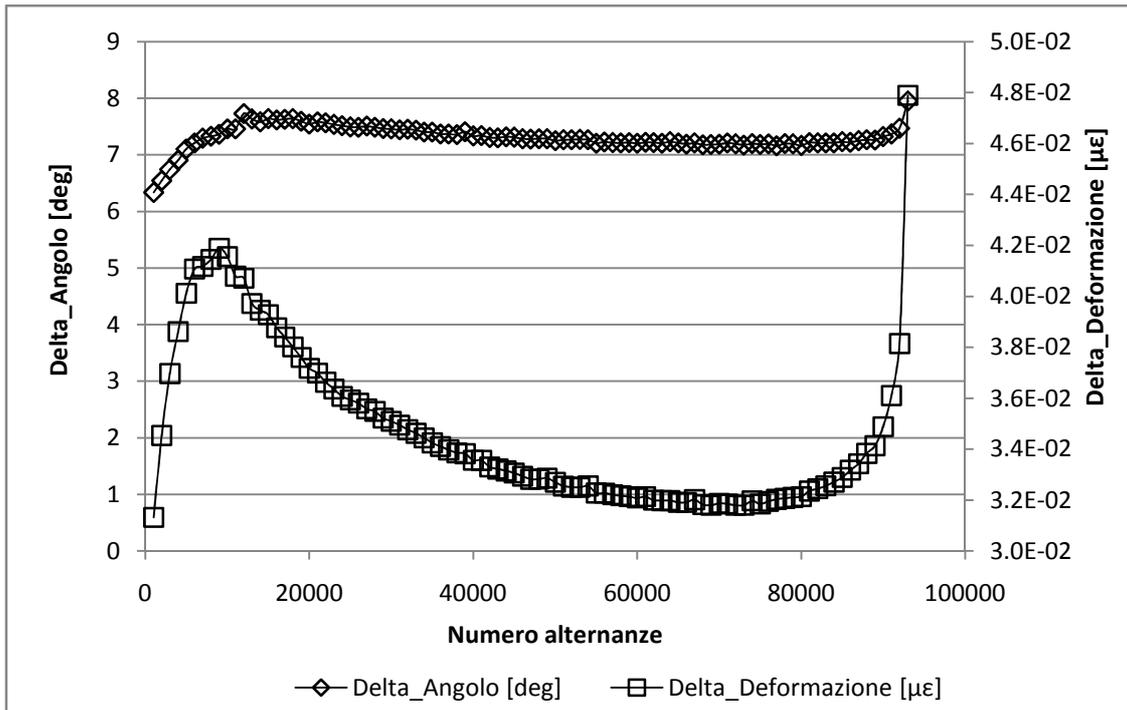


Figura D.14.4 Andamenti, per singola alternanza acquisita, dell'ampiezza dell'angolo spazzato dal sensore RVDT e della deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_14

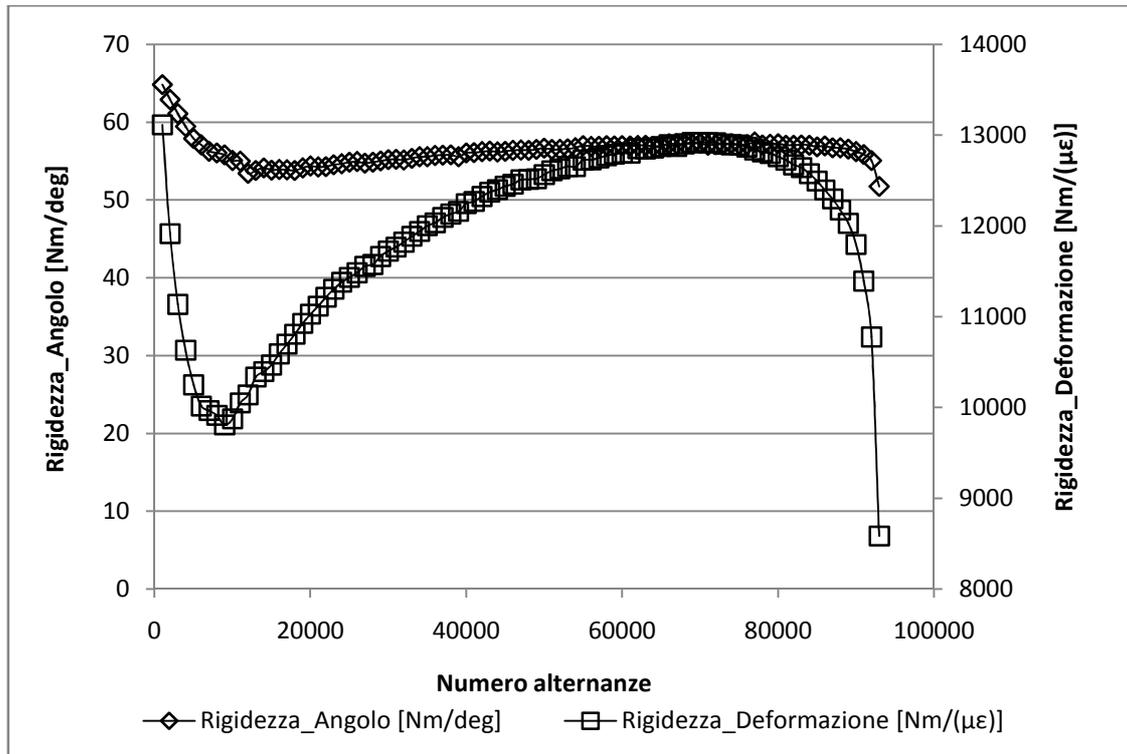


Figura D.14.5 Andamenti, per singola alternanza acquisita, della rigidezza del provino calcolata utilizzando rispettivamente l'ampiezza dell'angolo spazzato dal sensore RVDT e la deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_14

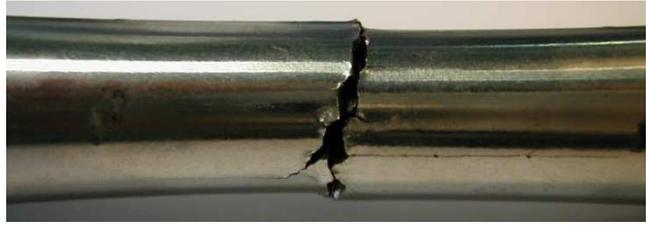
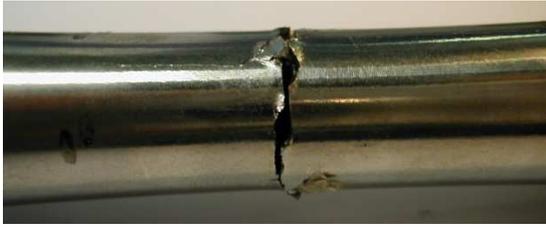


Figura D.14.6 Due viste della zona di rottura per il provino Torq_liscio_R-1_14

PROVA : Torq_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	$\phi = 15\text{mm}$	A = 176,71 mm ²
CARICHI APPLICATI	M _{MAX} = 205.43 Nm	M _{MIN} = -205.43 Nm	M _{MED} = 0 Nm	M _a = 205.43 Nm
TENSIONI APPLICATE	$\tau_{MAX} = 310 \text{ MPa}$	$\tau_{MIN} = -310 \text{ MPa}$	$\tau_{MED} = 0 \text{ MPa}$	$\tau_a = 310 \text{ MPa}$

Numero di cicli a rottura: $N_f = 143368$ cicli

distanza tra le due "porta bandiere" di 1.5cm con uso di molle per vincolare l'estensometro

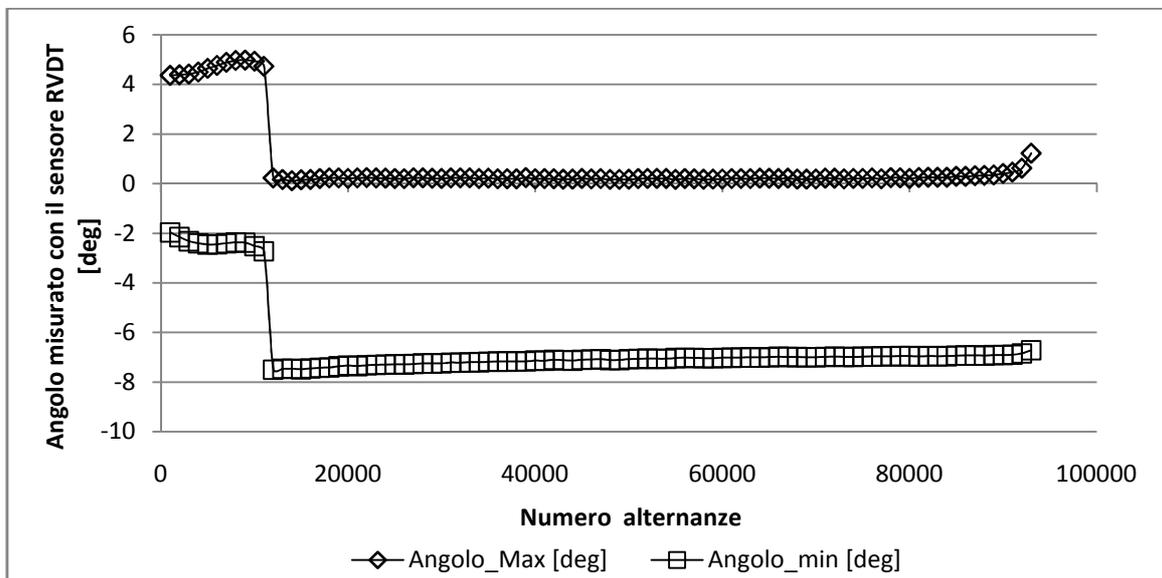


Figura D.15.1 Andamenti dell'angolo massimo e minimo spazzato dal sensore RVDT per singolo ciclo acquisito per il provino Torq_liscio_R-1_15

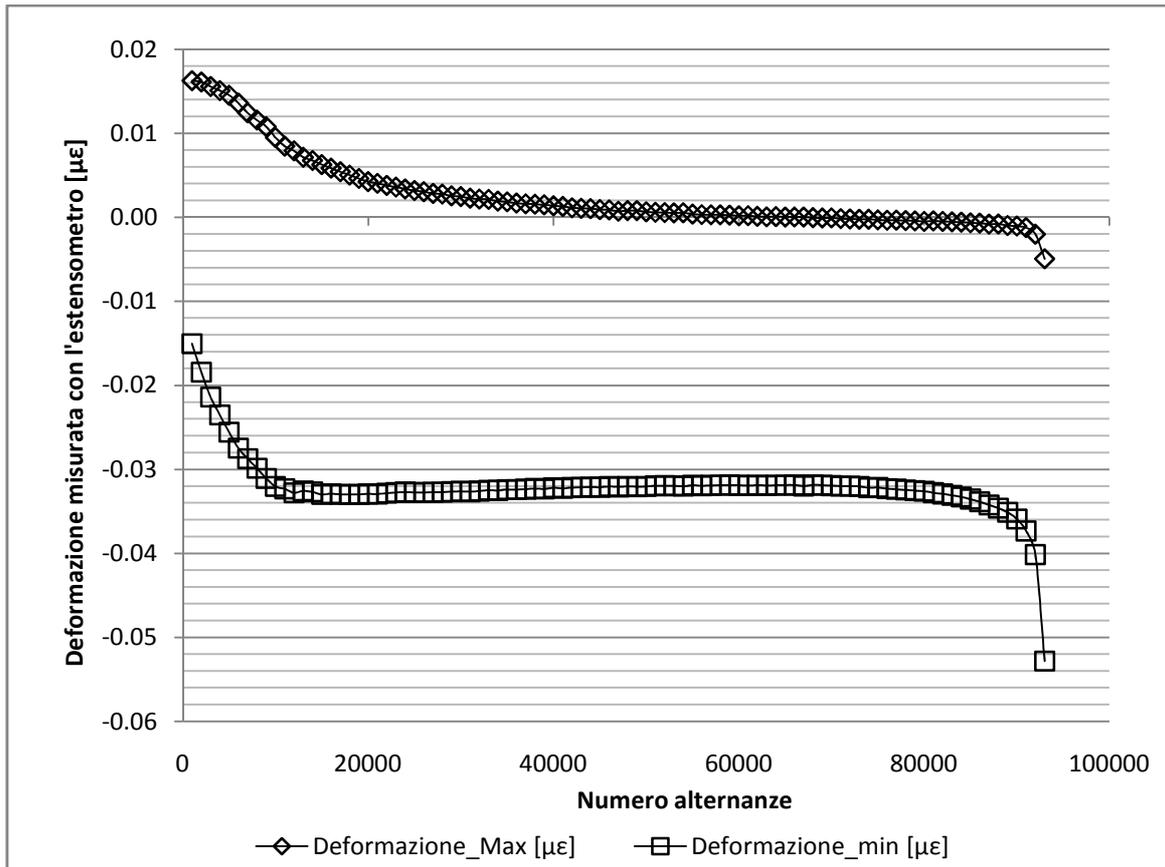


Figura D.15.2 Andamento dell'ampiezza, per singolo ciclo acquisito, della deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_15

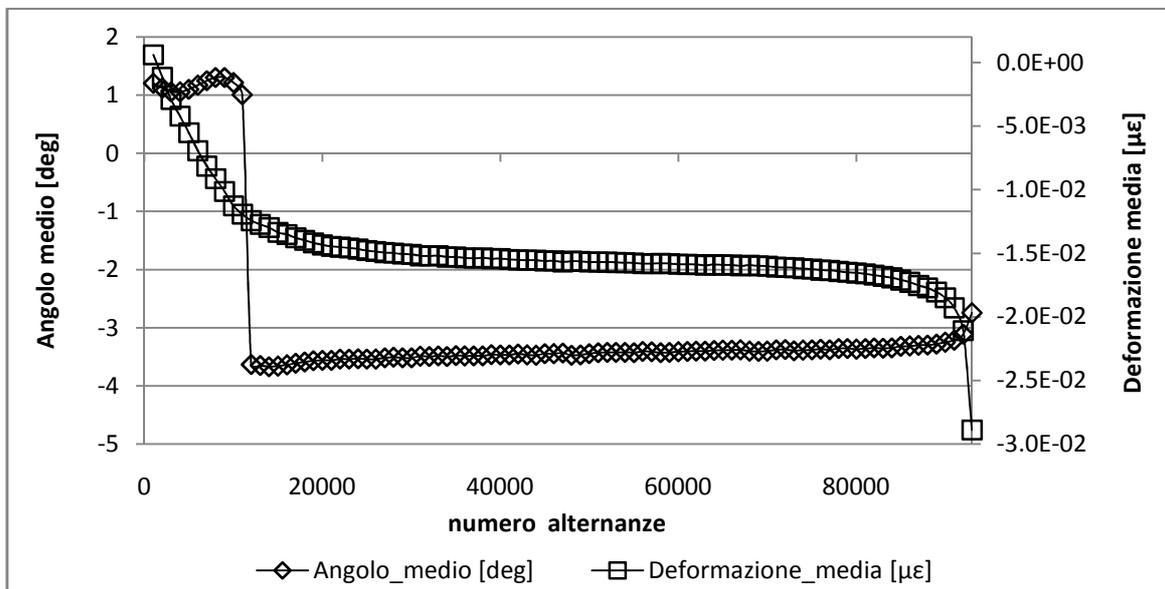


Figura D.15.3 Andamento dell'angolo medio e della deformazione media per il provino Torq_liscio_R-1_15

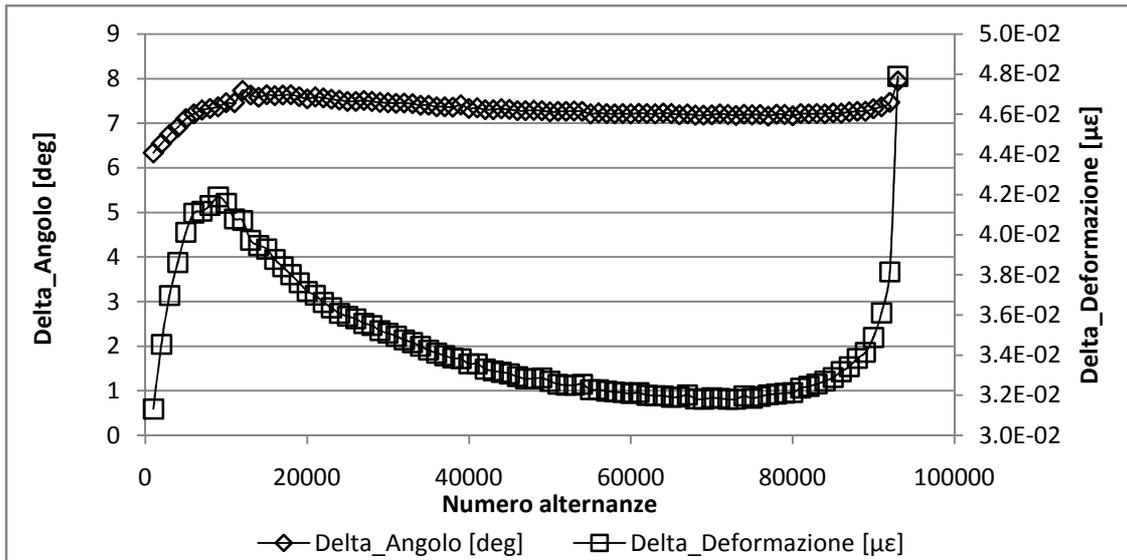


Figura D.15.4 Andamenti, per singola alternanza acquisita, dell'ampiezza dell'angolo spazzato dal sensore RVDT e della deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_15

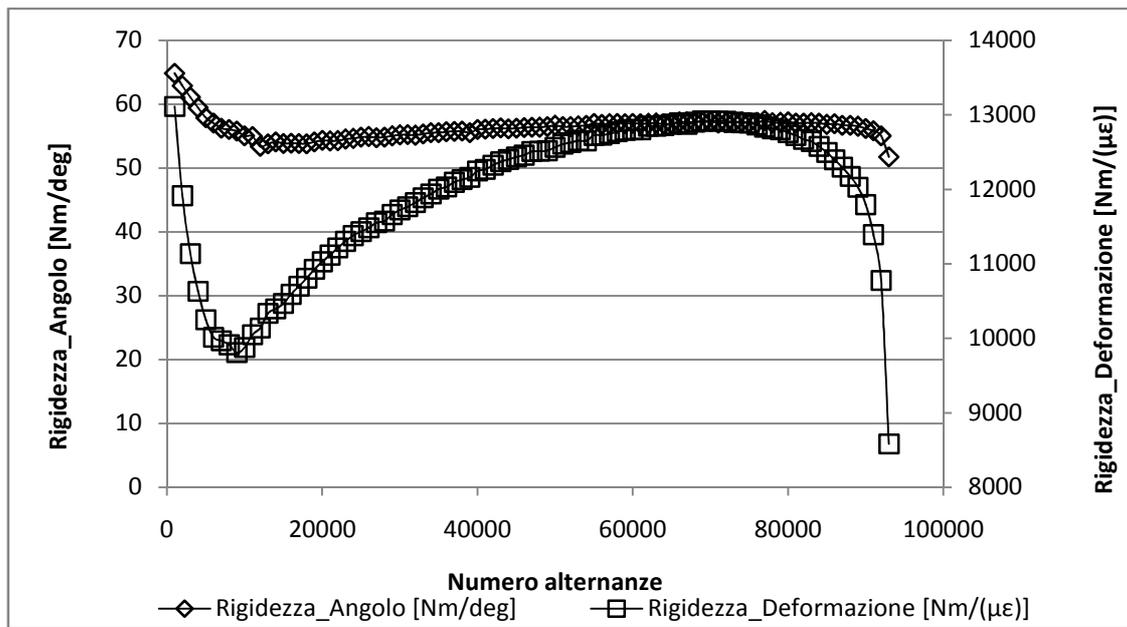


Figura D.15.5 Andamenti, per singola alternanza acquisita, della rigidezza del provino calcolata utilizzando rispettivamente l'ampiezza dell'angolo spazzato dal sensore RVDT e la deformazione acquisita con l'estensometro per il provino Torq_liscio_R-1_15

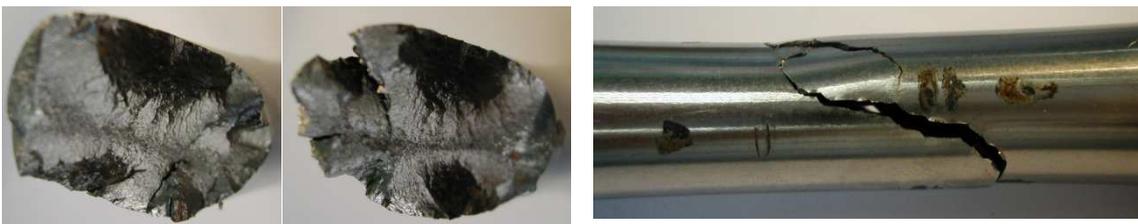


Figura D.15.6 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Torq_liscio_R-1_15

Appendice E: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R=-1 E INTAGLIO AD U

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1 con intaglio assialsimmetrico ad U e raggio di fondo intaglio $r=5\text{mm}$. 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 adimensionalizzato N/N_f e l'andamento della rigidità adimensionalizzata K/K_i sempre in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N/N_f .

Per questo rapporto di ciclo e per questa geometria si sono testati 10 provini. La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è riportata in Figura E.1.

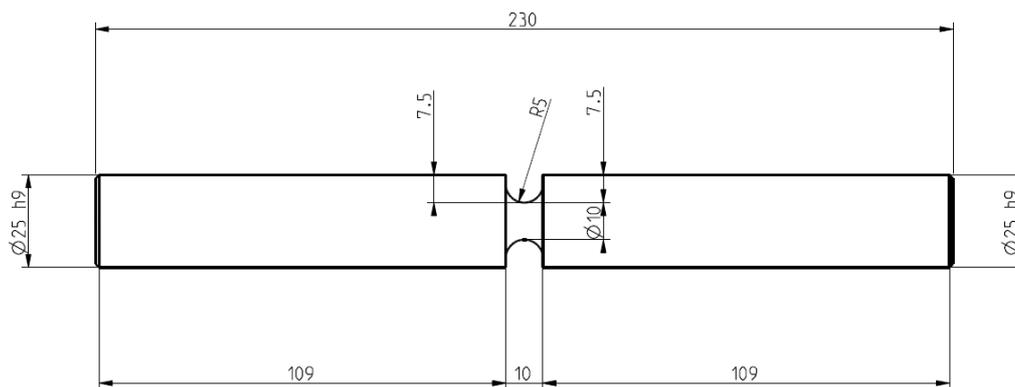


Figura E.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove denominata U5AXSY e realizzati in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Traz_r5mm_R-1_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\varnothing_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 27.489 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -27.489 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 27.489 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 350 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -350 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

ROTTO: a 74793 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 506.06 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	34841	46.6%	28.7	15	1.9913	7865.64	524.38
2	62289	83.3%	28.4	18	1.4935	5899.33	327.74

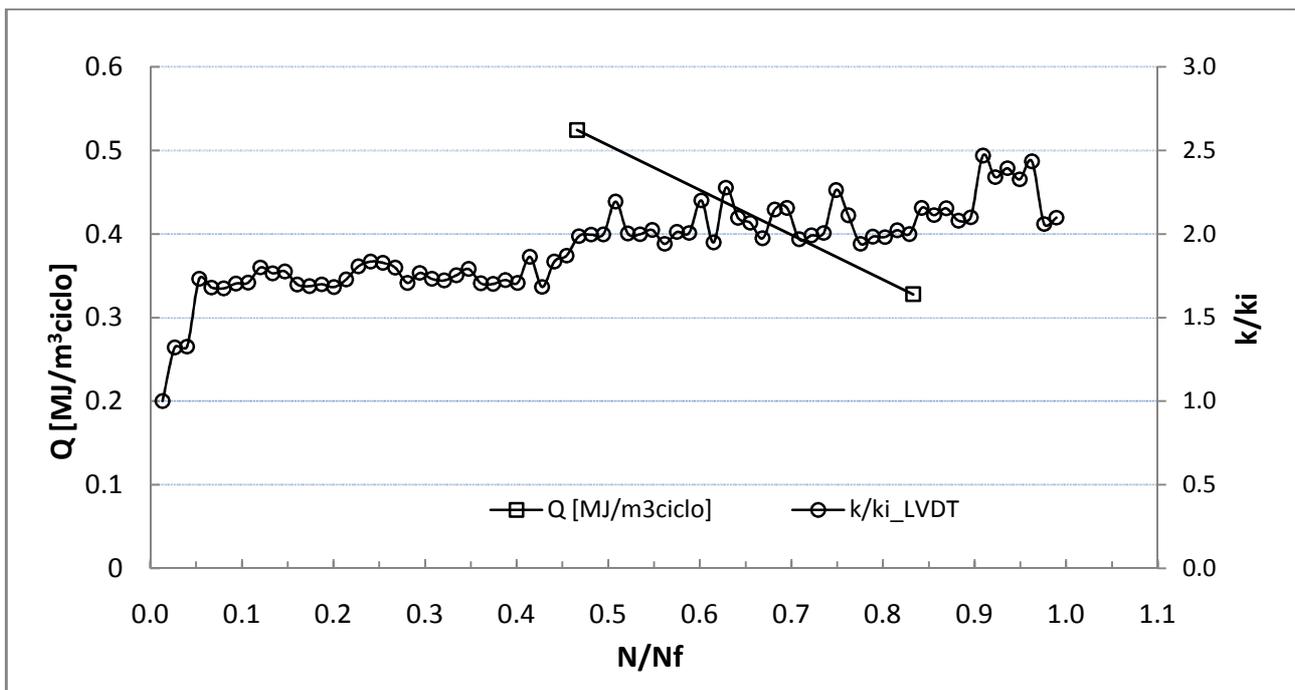


Figura E.1.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_01



Figura E.1.2 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Traz_r5mm_R-1_01

PROVA : Traz_r5mm_R-1_02				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\varnothing_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 27.489 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -27.489 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 27.489 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 350 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -350 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

ROTTO: a 68171 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 316.64 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	33090	48.5%	28.8	14	1.1276	4454.02	318.14
2	53229	78.1%	29.0	16	1.1659	4605.31	287.83

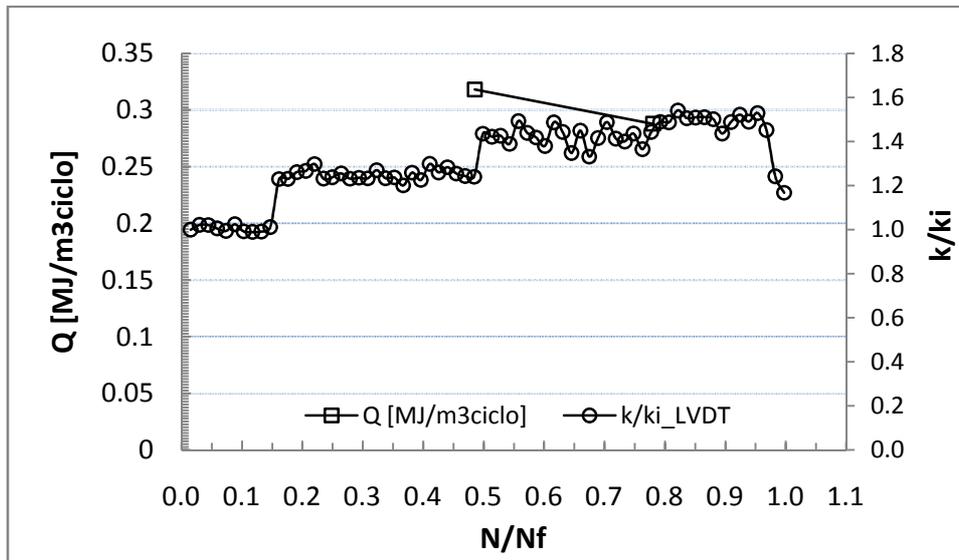


Figura E.2.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_02

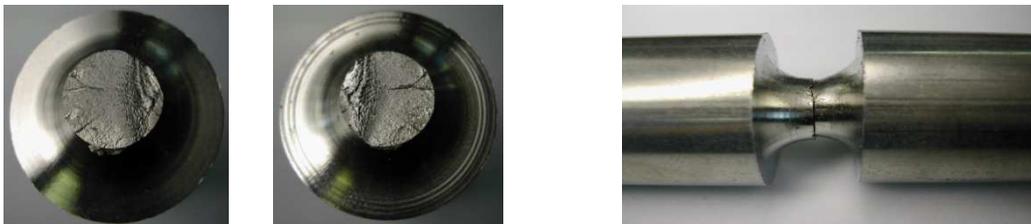


Figura E.2.2 Vista frontale e vista laterale delle superfici di frattura per il provino Traz_r5mm_R-1_02

PROVA : Traz_r5mm_R-1_03				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\varnothing_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 25.133 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -25.133 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 25.133 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

ROTTO: a 183547 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 91.28 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	15992	8.7%	29.6	15	0.8485	3351.58	223.44
2	49048	26.7%	28.8	18	0.3926	1550.77	86.15
3	69554	37.9%	29.5	20	0.2148	848.46	42.42
4	96455	52.6%	29.6	20	0.626	2472.70	123.64
5	134403	73.2%	27.9	15	0.1956	772.62	51.51
7	177587	96.8%	27.8	20	0.2218	876.11	43.81

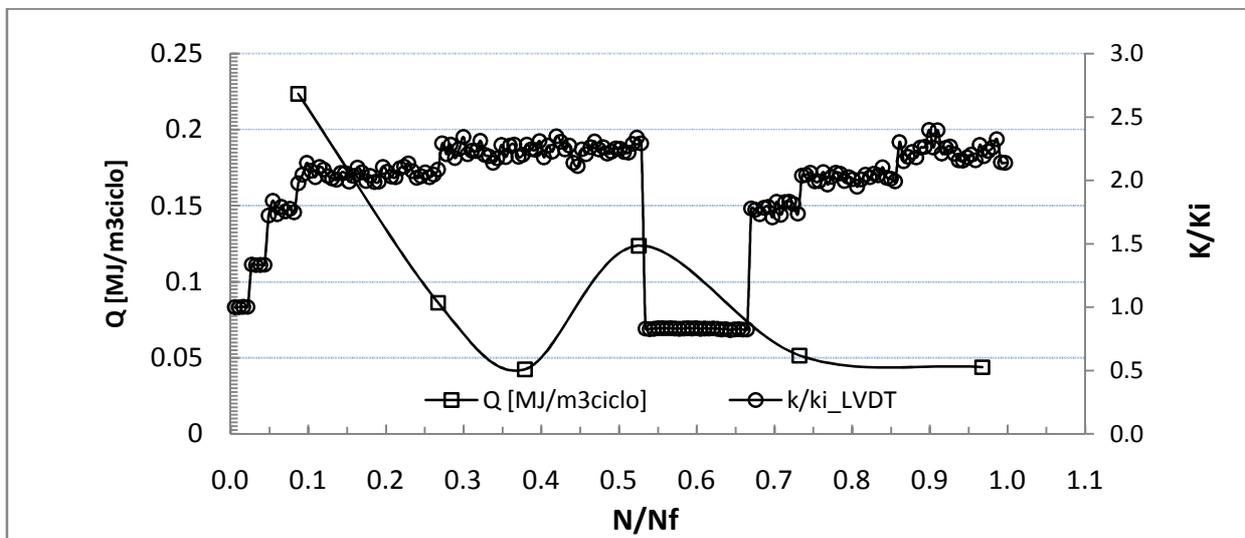


Figura E.3.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_03



Figura E.3.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_03

PROVA : Traz_r3mm_R-1_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =20.42 kN	F _{MIN} = -20.42 kN	F _{MED} =0 kN	F _a = 20.42 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 260 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -260 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 260 \text{ MPa}$

ROTTA: a 241450 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 42.3 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	11544	4.8%	24.0	15	0.0938	370.51	24.70
2	29102	12.1%	23.9	20	0.3861	1525.10	76.25
3	41017	17.0%	23.9	22	0.1138	449.51	20.43
4	70365	29.1%	23.9	22	0.1246	492.17	22.37
5	98778	40.9%	23.9	24	0.1302	514.29	21.43
6	120510	49.9%	23.9	24	0.1376	543.52	22.65
7	173890	72.0%	23.9	24	0.3229	1275.46	53.14
8	202582	83.9%	23.6	24	0.5878	2321.81	96.74
9	235995	97.7%	23.6	24	0.1923	759.59	31.65

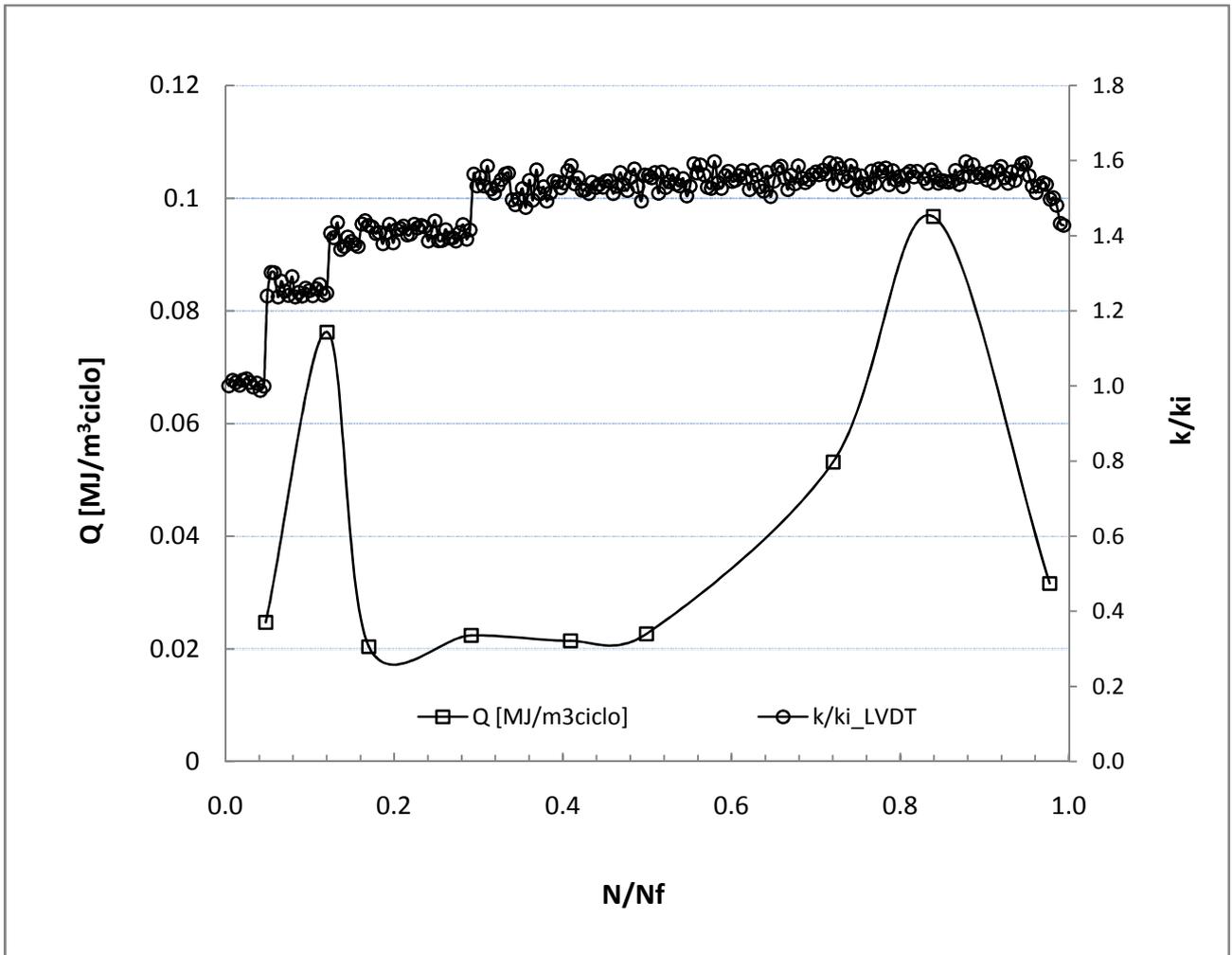


Figura E.4.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_04

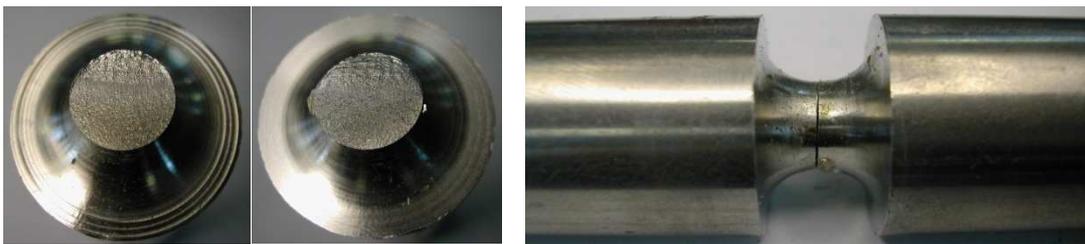


Figura E.4.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_04

PROVA : Traz_r5mm_R-1_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 21.991 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -21.991 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 21.991 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 280 \text{ MPa}$

ROTTO: a 1216364 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 48.63 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	31295	2.6%	29.3	20	0.1555	614.23	30.71
2	80223	6.6%	27.9	20	0.8688	3431.76	171.59
3	113992	9.4%	28.0	24	0.2231	881.25	36.72
4	183238	15.1%	28.3	26	0.8333	3291.54	126.60
5	201499	16.6%	28.7	26	0.246	971.70	37.37
6	257549	21.2%	28.6	26	0.2227	879.67	33.83
7	301953	24.8%	29.0	26	0.6903	2726.69	104.87
8	361830	29.7%	28.9	26	0.236	932.20	35.85
9	463509	38.1%	29.3	26	0.2158	852.41	32.79
10	511782	42.1%	29.2	26	0.223	880.85	33.88
11	561637	46.2%	29.6	26	0.2001	790.40	30.40
12	601361	49.4%	29.6	26	0.2358	931.41	35.82
13	639387	52.6%	29.2	26	0.4926	1945.77	74.84
14	680932	56.0%	29.6	26	0.2108	832.66	32.03
15	761147	62.6%	29.7	26	0.2783	1099.29	42.28
16	804530	66.1%	30.0	26	0.2132	842.14	32.39
17	861128	70.8%	29.9	26	0.4232	1671.64	64.29
18	948541	78.0%	28.8	26	0.2962	1169.99	45.00
19	1084462	89.2%	21.4	20	0.1233	487.04	24.35
20	1123363	92.4%	21.6	26	0.1531	604.75	23.26

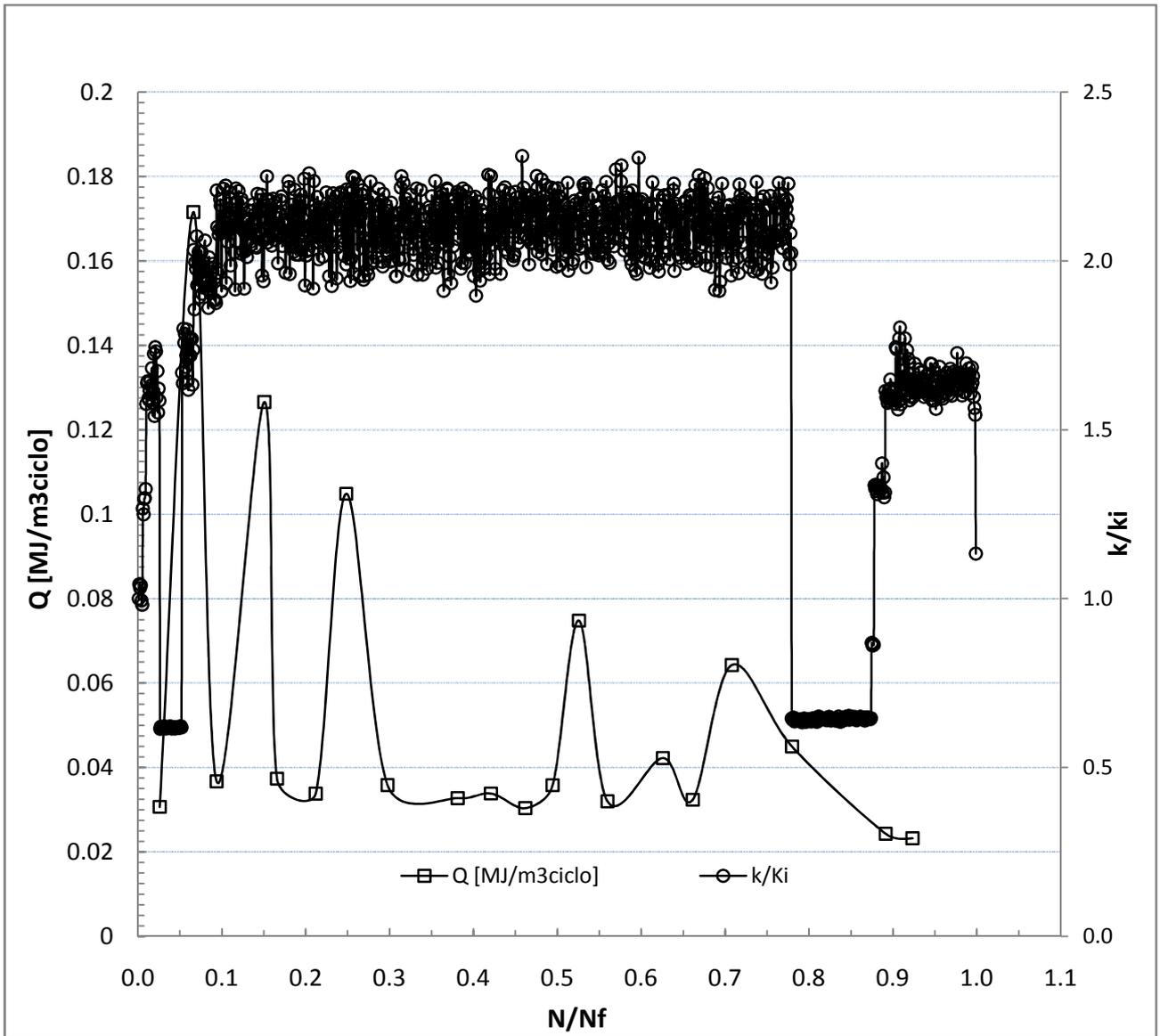


Figura E.5.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_05

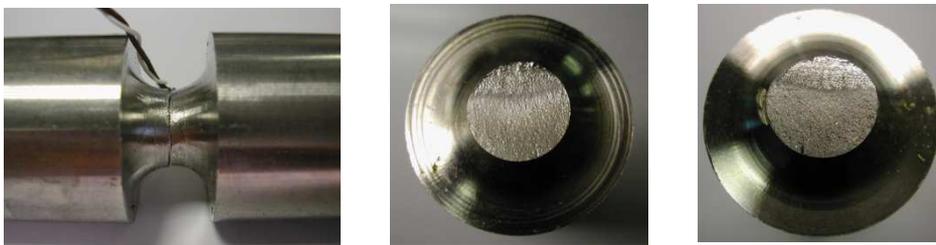


Figura E.5.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_05

PROVA : Traz_r5mm_R-1_06				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 23.562 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -23.562 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 23.562 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$

ROTTO: a 166791 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 58.08 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

Per questa prova si sono applicate 4 termocoppie (denominate CH1, CH3,CH4,CH5) poste a 90°l'una dall'altra nel tentativo di recuperare maggiori informazioni l'innesco di cricche e quindi rispetto ad una non assialsimmetria del calore ceduto all'ambiente.

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1° CH1	38132	22.9%	27.0	23	0.1589	627.66	27.29
1° CH3	55051	33.0%	26.8	23	0.1664	657.28	28.58
1° CH4	66373	39.8%	27.0	23	0.3747	1480.07	64.35
1° CH5	75097	45.0%	27.0	23	0.2887	1140.37	49.58
2° CH1	122599	73.5%	27.3	23	0.1606	634.37	27.58
2° CH3	129632	77.7%	27.0	23	0.6157	2432.02	105.74
2° CH4	136743	82.0%	27.0	23	0.2344	925.88	40.26
2° CH5	145707	87.4%	2702.0	23	1.2144	4796.88	208.56

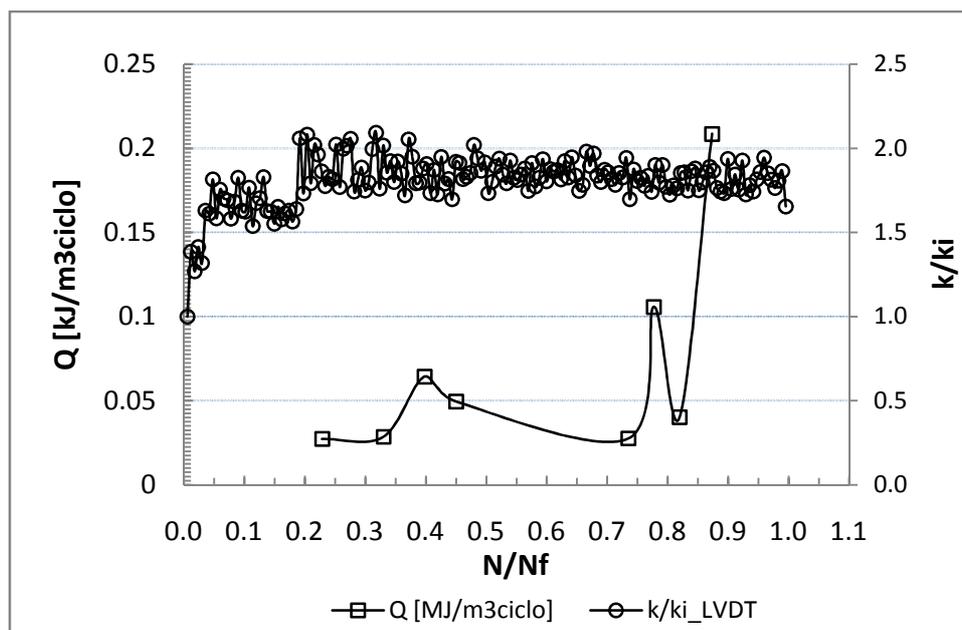


Figura E.6.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_06



Figura E.6.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_06

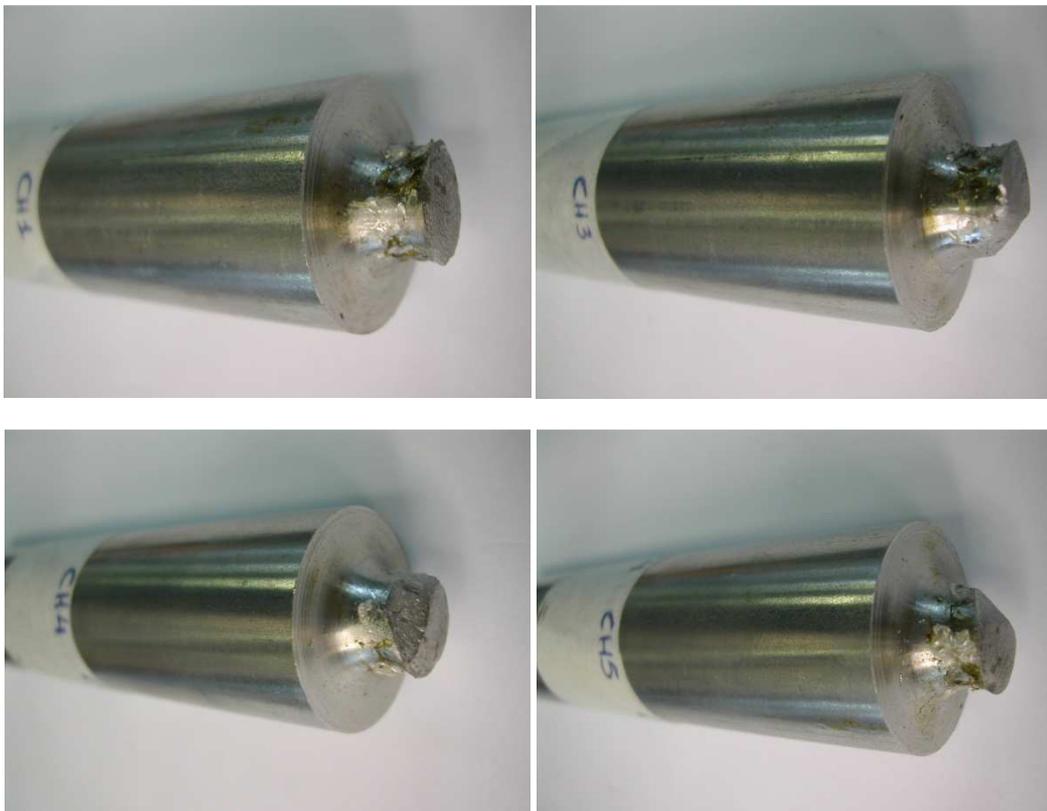


Figura E.6.3 Superfici di frattura in corrispondenza alla zona in cui si sono applicate le quattro termocoppie per il provino Traz_r5mm_R-1_06

PROVA : Traz_r5mm_R-1_07				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\varnothing_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 29,845 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -29,845 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 29,845 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 380 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -380 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 380 \text{ MPa}$

ROTTO: a 52358 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 179,8 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	8831	16.9%	22.3	15	0.5008	1978.16	131.88
2	15130	28.9%	22.5	15	1.2669	5004.26	333.62
3	21951	41.9%	22.6	15	0.3781	1493.50	99.57
4	34105	65.1%	22.5	15	0.5801	2291.40	152.76
5	41267	78.8%	22.6	15	0.9013	3560.14	237.34
6	48986	93.6%	22.7	15	0.4087	1614.37	107.62

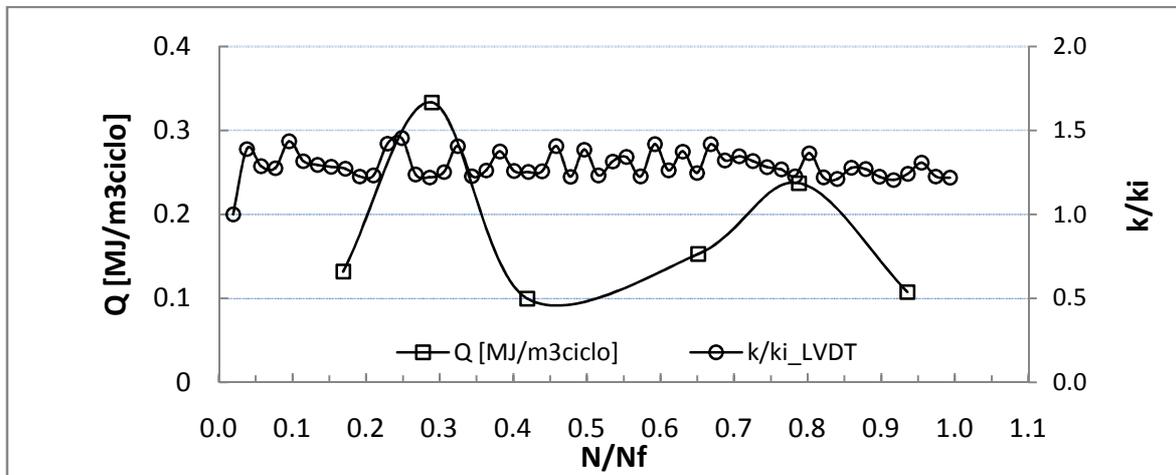


Figura E.7.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_07



Figura E.7.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_07

PROVA : Traz_r5mm_R-1_08				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 30,631 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -30,631 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 30,631 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 390 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -390 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 390 \text{ MPa}$

ROTTO: a 38219 cicli
 Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 217,5 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	13211	34.6%	21.8	10	0.3331	1315.75	131.57
2	18596	48.7%	21.9	10	0.312	1232.40	123.24
3	24839	65.0%	22.1	12	1.2996	5133.42	427.79
4	30649	80.2%	22.3	12	1.1845	4678.78	389.90

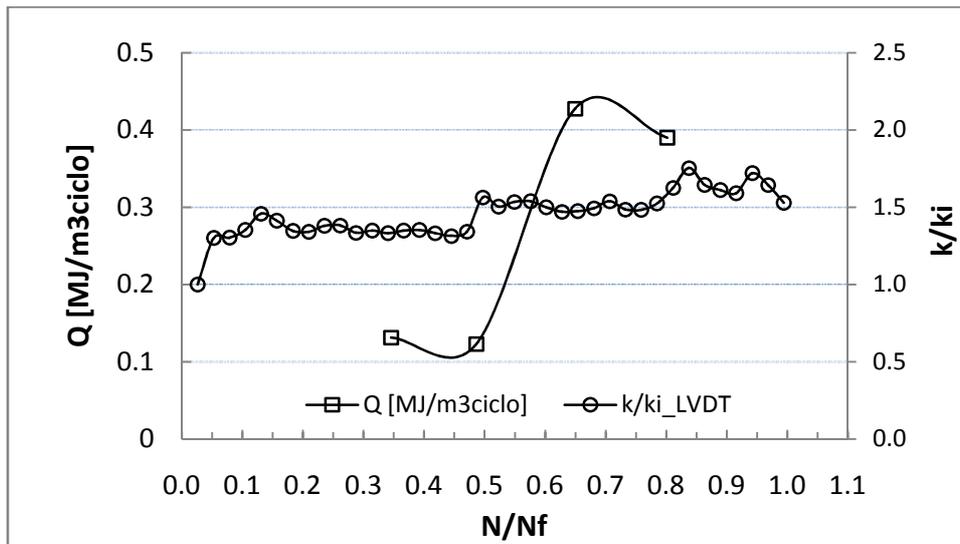


Figura E.8.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_08



Figura E.8.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_08

PROVA : Traz_r5mm_R-1_09				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$C_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=31.416 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -31.416 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a= 31.416 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 400 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -400 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 400 \text{ MPa}$

ROTTO: a 19447 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 396.09 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	6485	33.3%	21.6	8	1.2234	4832.43	604.05
2	11160	57.4%	21.6	10	0.4539	1792.91	179.29
3	15175	78.0%	21.6	10	0.4938	1950.51	195.05
4	19062	98.0%	21.6	10	1.0491	4143.95	414.39

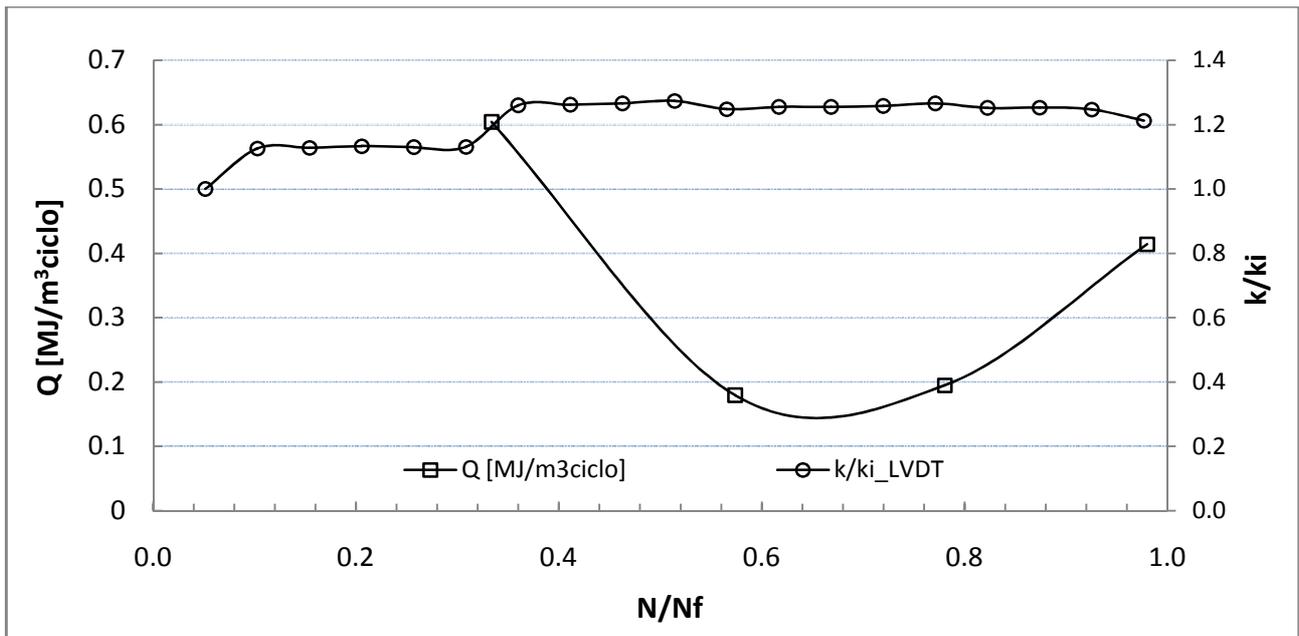


Figura E.9.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_09

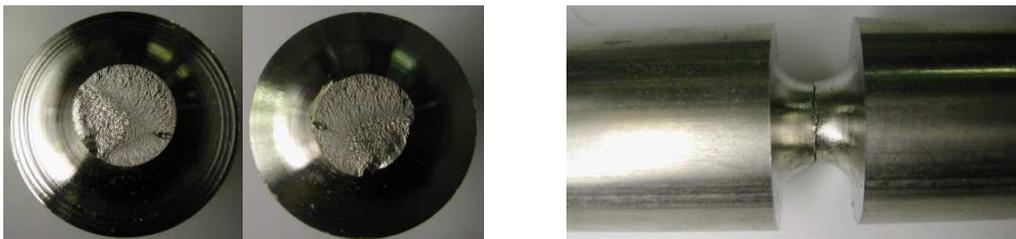


Figura E.9.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_09

PROVA : Traz_r5mm_R-1_10				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$C_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 5\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=32.201 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -32.201 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a= 32.201 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 410 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -410 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 410 \text{ MPa}$

ROTTO: a 11475 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 277.83 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3666	31.9%	21.3	6	0.2693	1063.74	177.29
2	6335	55.2%	21.5	8	0.9944	3927.88	490.99
3	8318	72.5%	21.5	8	0.3807	1503.77	187.97
4	10482	91.3%	21.5	8	0.5085	2008.58	251.07

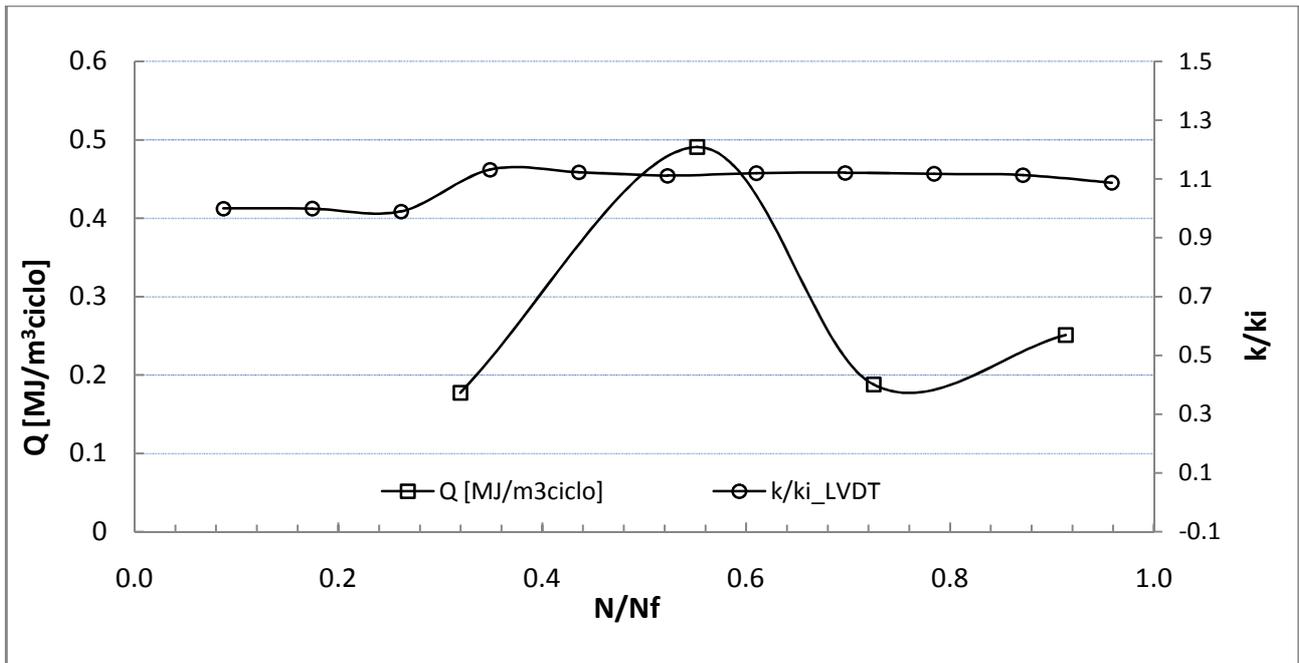


Figura E.10.1: Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r5mm_R-1_10



Figura E.10.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r5mm_R-1_10

Appendice F: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R=-1 E INTAGLIO A V

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1 con intaglio assialsimmetrico ad V e raggio di fondo intaglio $r=3\text{mm}$.

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 adimensionalizzato N/N_f e l'andamento della rigidezza adimensionalizzata K/K_i sempre in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N/N_f .

Per questo rapporto di ciclo e per questa geometria si sono testati 11 provini. La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è riportata in Figura F.1.

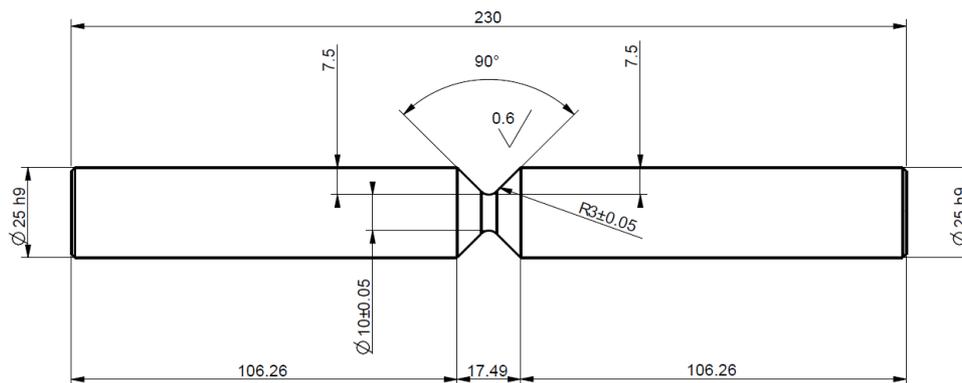


Figura F.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove denominata V3AXSY e realizzato in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Traz_r3mm_R-1_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =23.562 kN	F _{MIN} = -23.562 kN	F _{MED} =0 kN	F _a = 23.562 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$

ROTTO: a 71703 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 65.39 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	4229	5.9%	21.8	8	0.092	363.40	45.43
2	7020	9.8%	21.9	10	0.1174	463.73	46.37
3	11474	16.0%	22.0	12	0.1303	514.69	42.89
4	16570	23.1%	22.4	12	0.1519	600.01	50.00
5	22774	31.8%	22.5	14	0.1697	670.32	47.88
6	31032	43.3%	22.7	16	0.2	790.00	49.38
7	47199	65.8%	22.6	18	0.3731	1473.75	81.87
8	62449	87.1%	22.6	20	0.4546	1795.67	89.78

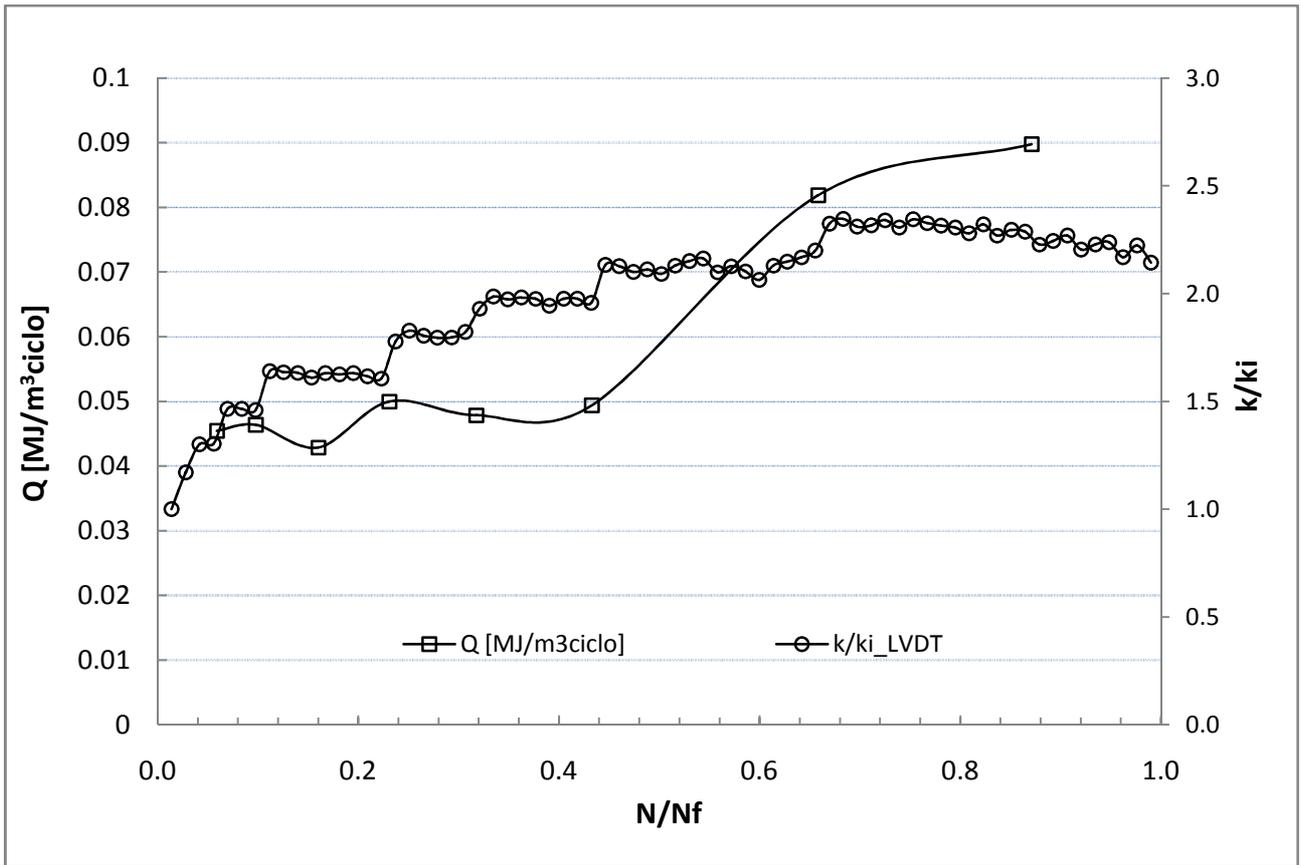


Figura F.1.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_01

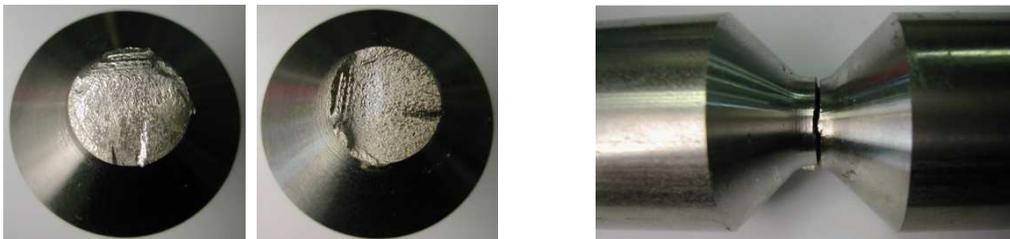


Figura F.1.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_01

PROVA : Traz_r3mm_R-1_02				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =25.133 kN	F _{MIN} = -25.133 kN	F _{MED} =0 kN	F _a = 25.133 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

ROTTA: a 41431 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 122.8 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5250	12.7%	22.3	6	0.4619	1824.51	304.08
2	10446	25.2%	22.3	6	0.0623	246.09	41.01
3	16196	39.1%	22.2	8	0.0839	331.41	41.43
4	19296	46.6%	22.4	10	0.4398	1737.21	173.72
5	23874	57.6%	22.3	12	0.3666	1448.07	120.67
6	28450	68.7%	22.2	14	0.3669	1449.26	103.52
7	32246	77.8%	22.1	14	0.3992	1576.84	112.63
8	39457	95.2%	22.1	14	0.1832	723.64	51.69

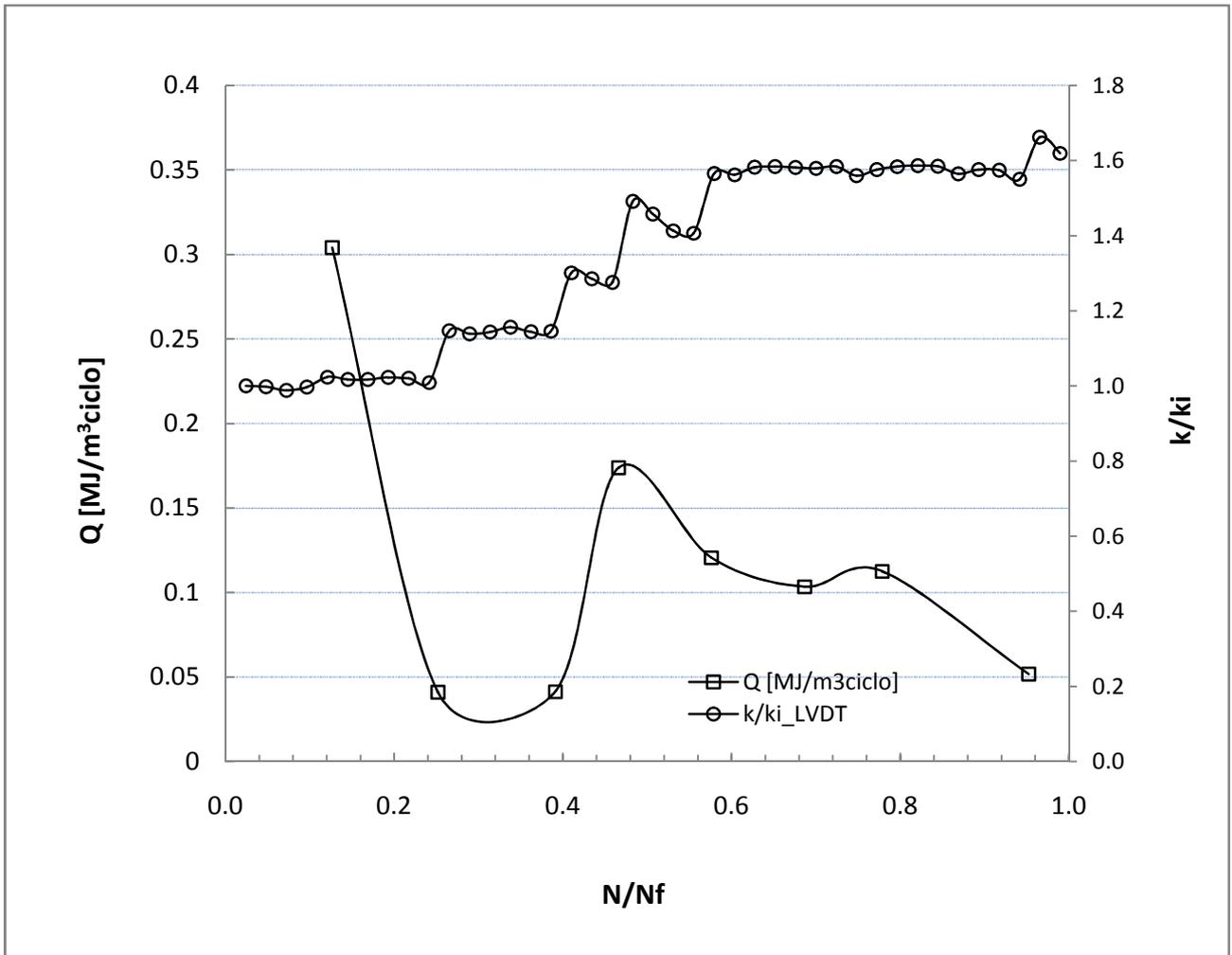


Figura F.2.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_02

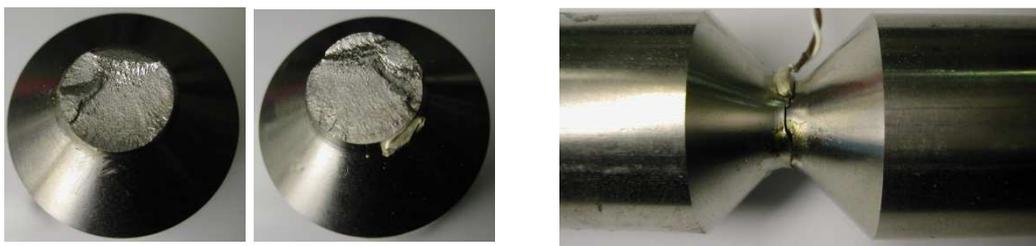


Figura F.2.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_02

PROVA : Traz_r3mm_R-1_03				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =21.991 kN	F _{MIN} = -21.991 kN	F _{MED} =0 kN	F _a = 21.991 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 280 \text{ MPa}$

ROTTO: a 167459 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 66.6 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	9453	5.6%	24.4	15	0.1426	563.27	37.55
2	19867	11.9%	24.4	20	0.6219	2456.51	122.83
3	29213	17.4%	23.8	22	0.1715	677.43	30.79
4	41656	24.9%	24.1	24	0.551	2176.45	90.69
5	60254	36.0%	24.1	24	0.1365	539.18	22.47
6	75831	45.3%	24.1	24	0.1272	502.44	20.94
7	90696	54.2%	24.0	24	0.3475	1372.63	57.19
8	142109	84.9%	24.1	24	0.6821	2694.30	112.26

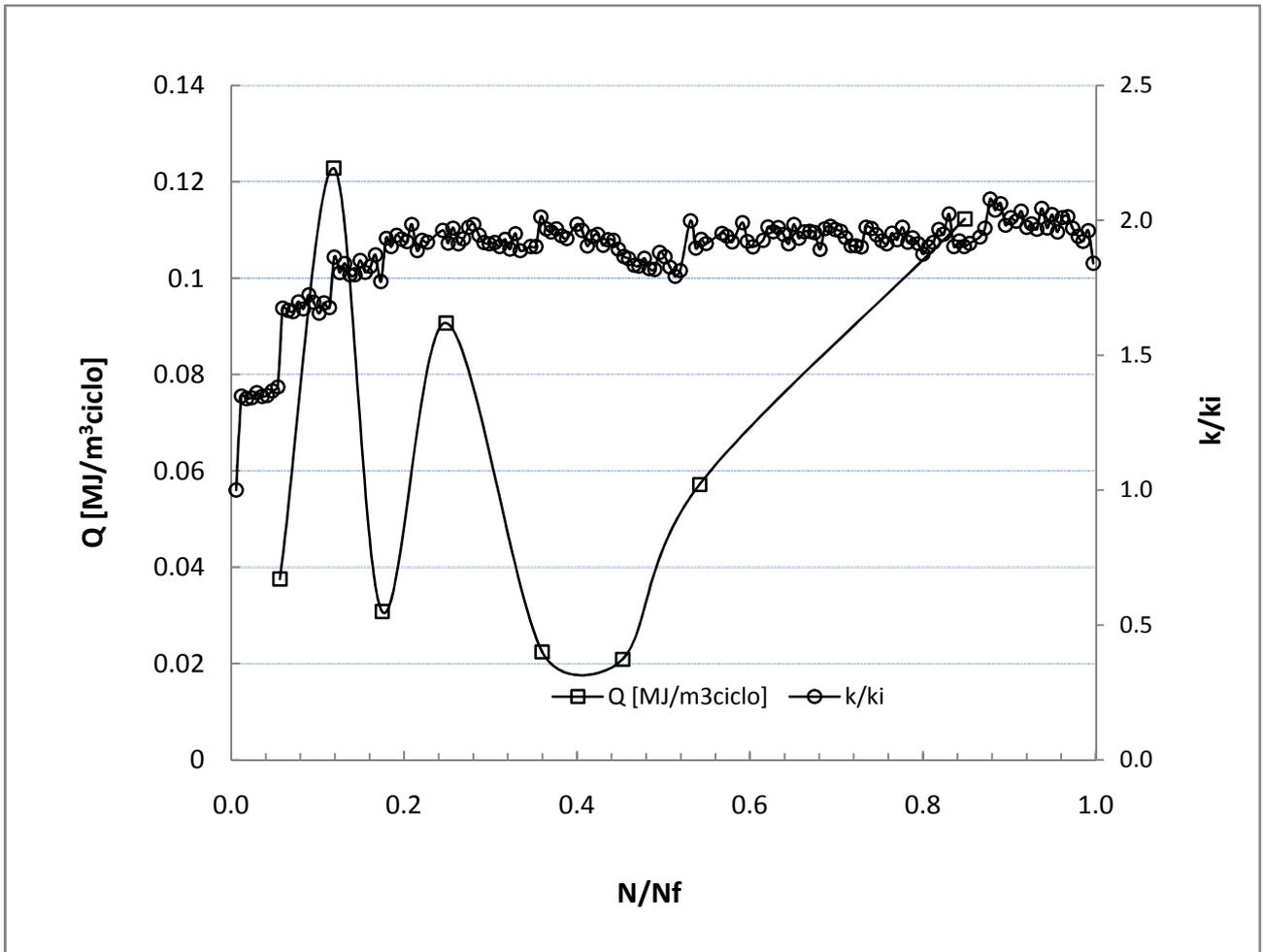


Figura F.3.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_03



Figura F.3.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_03

PROVA : Traz_r3mm_R-1_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =20.42 kN	F _{MIN} = -20.42 kN	F _{MED} =0 kN	F _a = 20.42 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 260 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -260 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 260 \text{ MPa}$

ROTTO: a 241450 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 42.3 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	11544	4.8%	24.0	15	0.0938	370.51	24.70
2	29102	12.1%	23.9	20	0.3861	1525.10	76.25
3	41017	17.0%	23.9	22	0.1138	449.51	20.43
4	70365	29.1%	23.9	22	0.1246	492.17	22.37
5	98778	40.9%	23.9	24	0.1302	514.29	21.43
6	120510	49.9%	23.9	24	0.1376	543.52	22.65
7	173890	72.0%	23.9	24	0.3229	1275.46	53.14
8	202582	83.9%	23.6	24	0.5878	2321.81	96.74
9	235995	97.7%	23.6	24	0.1923	759.59	31.65

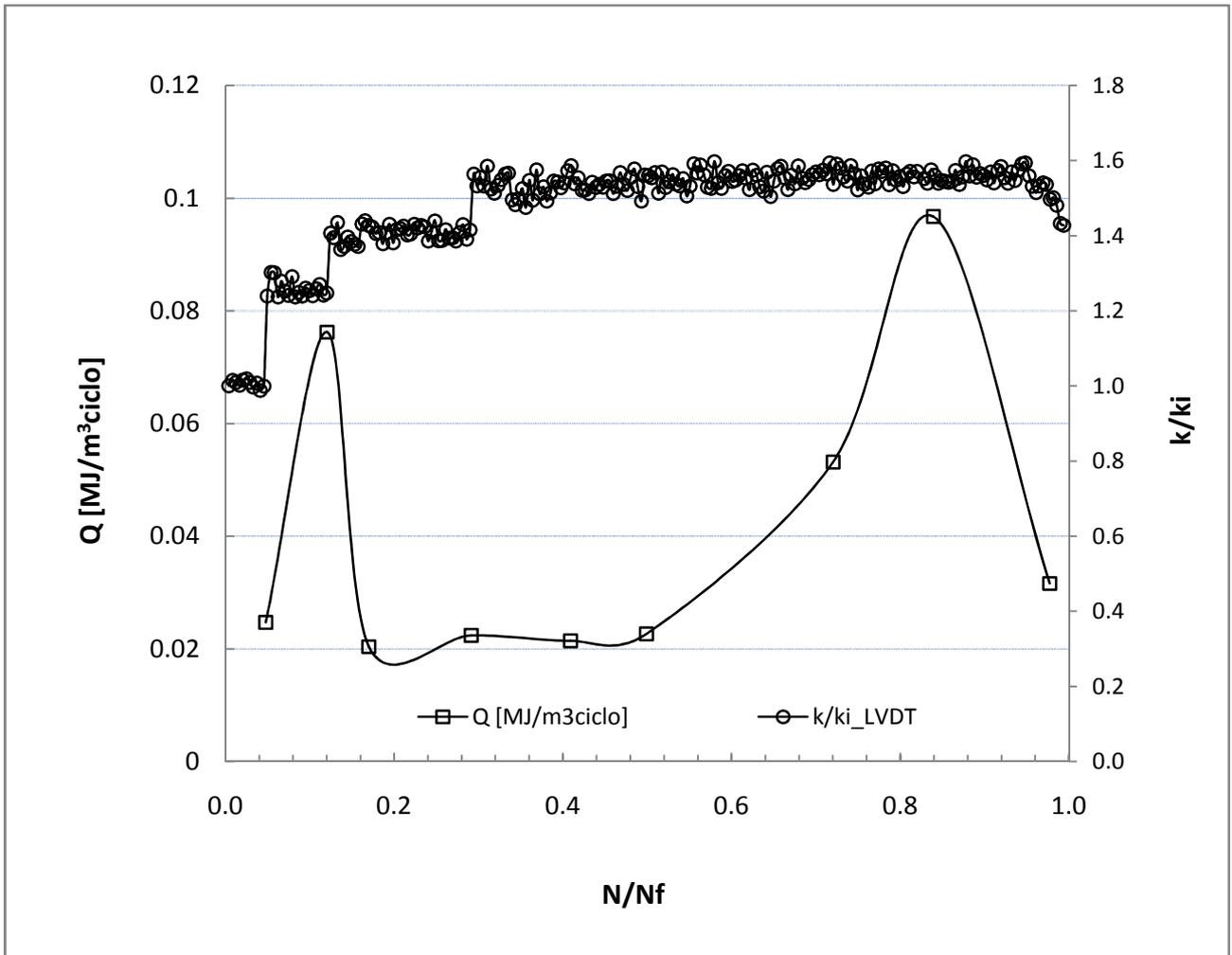


Figura F.4.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_04

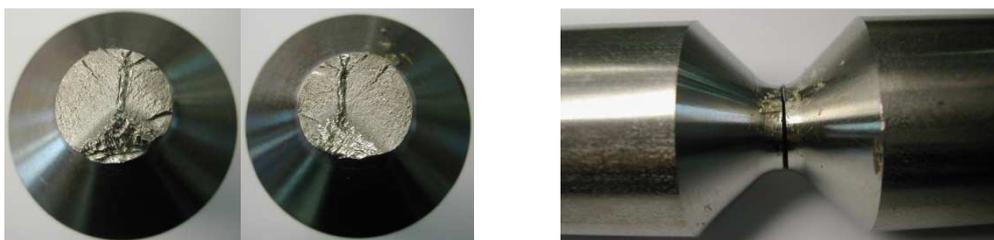


Figura F.4.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_04

PROVA : Traz_r3mm_R-1_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	$A = 78.539\text{mm}^2$
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=18.85 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -18.85 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a=18.85 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 240 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -240 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 240 \text{ MPa}$

ROTTA: a 399853 cicli

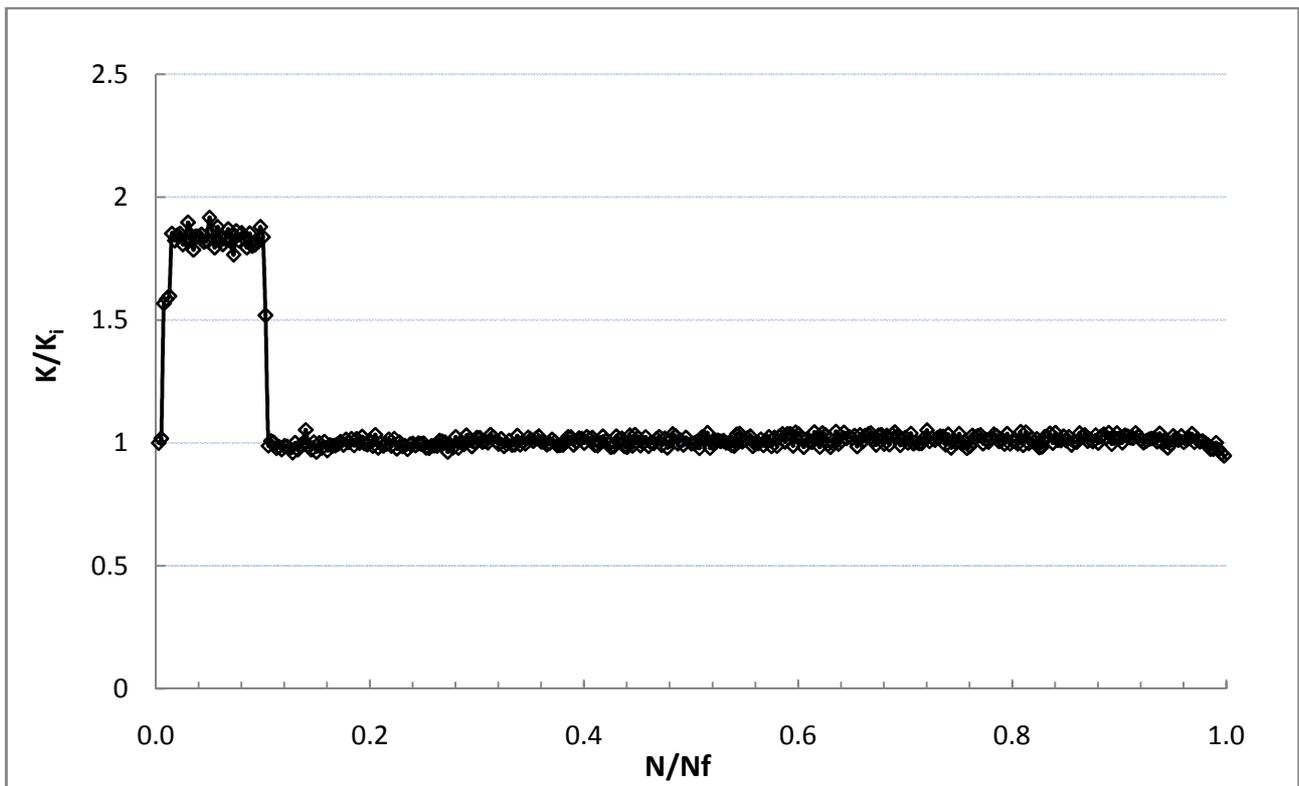


Figura F.5.1 Andamento della rigidezza in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_05



Figura F.5.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_05

PROVA : Traz_r3mm_R-1_06				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$C_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=26.704 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -26.704 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a=26.704 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 340 \text{ MPa}$

ROTTO: a 32607 cicli
 Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 189.4 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	9991	30.6%	24.7	10	0.2424	957.48	95.75
2	13998	42.9%	25.0	12	0.9	3555.00	296.25
3	22711	69.7%	24.7	14	0.311	1228.45	87.75
4	30456	93.4%	24.8	14	1.328	5245.60	374.69

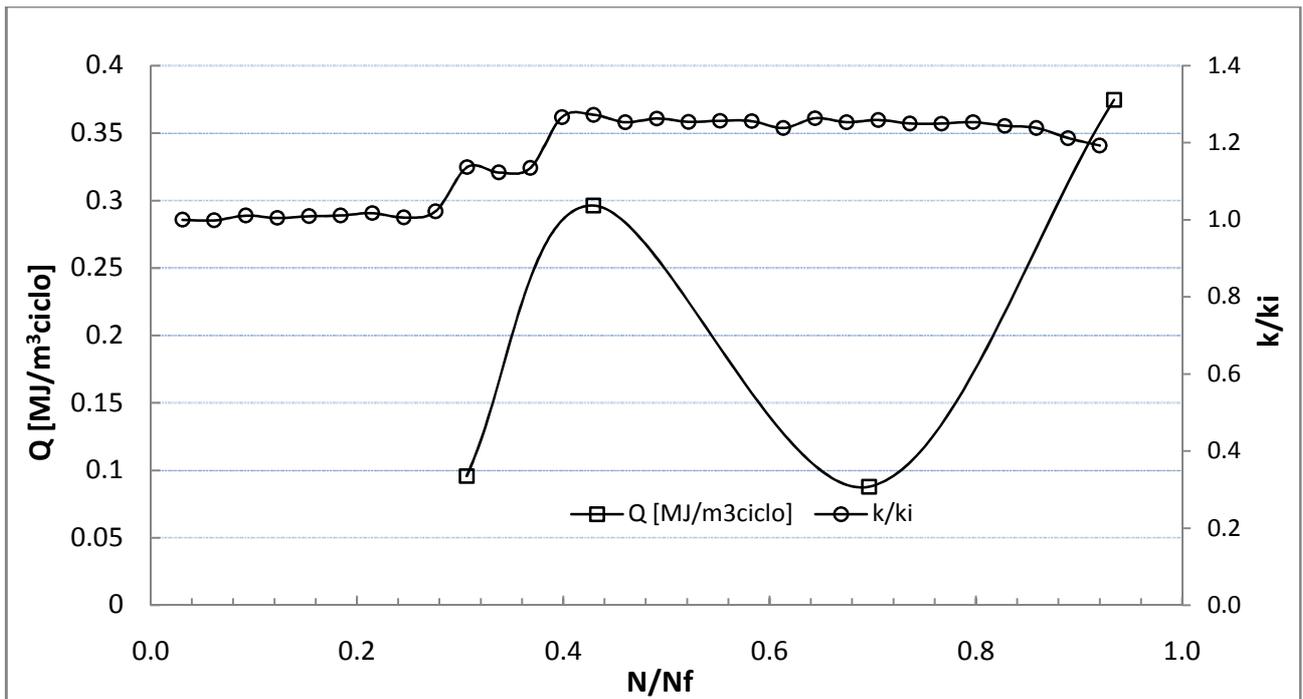


Figura F.6.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_06

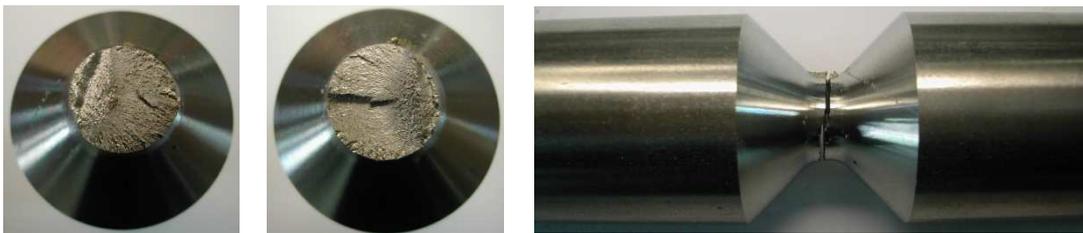


Figura F.6.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_06

PROVA : Traz_r3mm_R-1_07				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=25.133 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -25.133 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a= 25.133 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 320 \text{ MPa}$

ROTTO: a 42858 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 70.33 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5250	12.2%	24.2	6	0.1177	464.92	77.49
2	10450	24.4%	24.2	6	0.1109	438.06	73.01
3	16200	37.8%	23.6	8	0.1425	562.88	70.36
4	19300	45.0%	22.4	10	0.1782	703.89	70.39
6	28500	66.5%	22.2	14	0.2494	985.13	70.37
7	32300	75.4%	22.1	14	0.2335	922.33	65.88

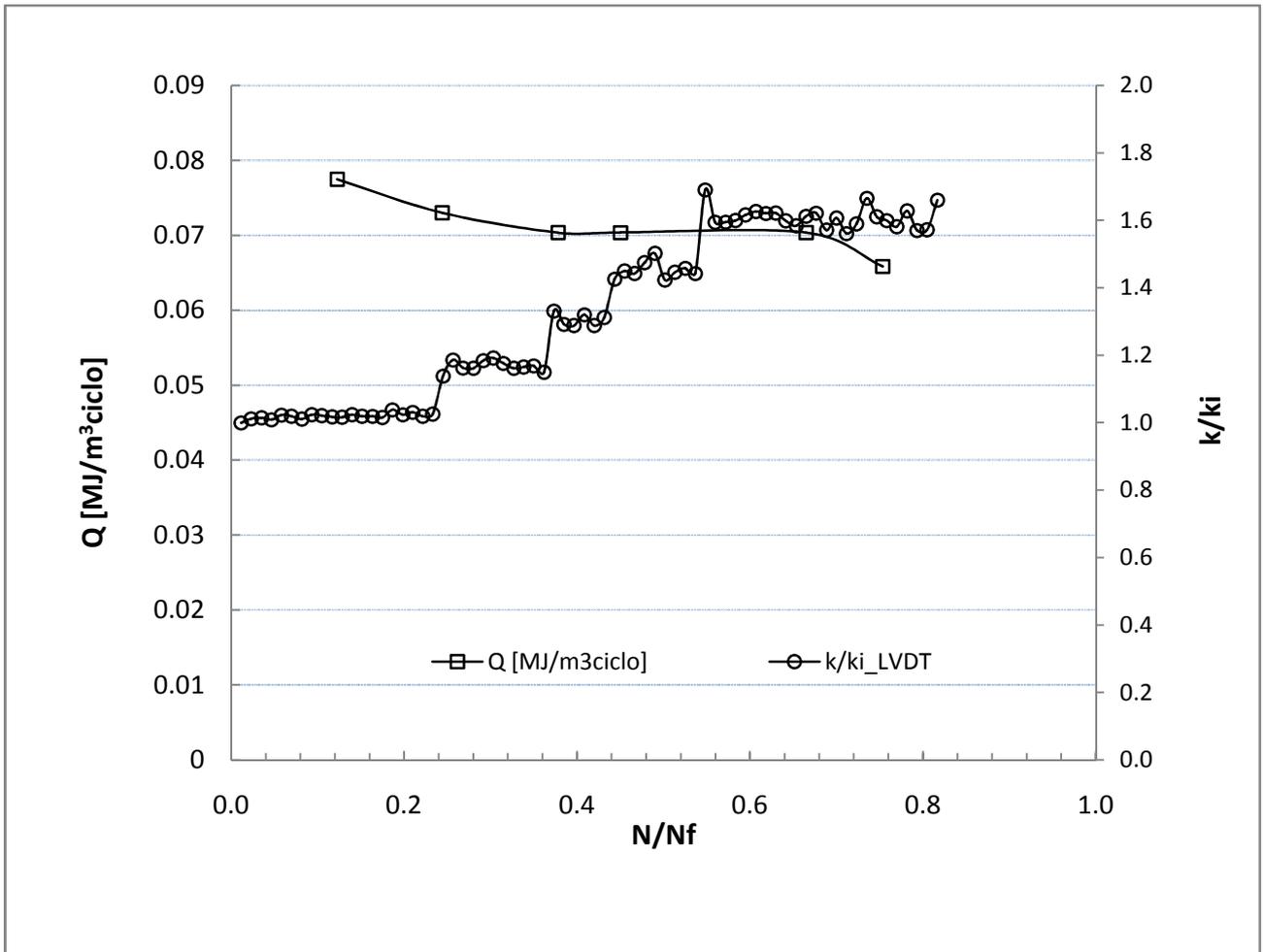


Figura F.7.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_07

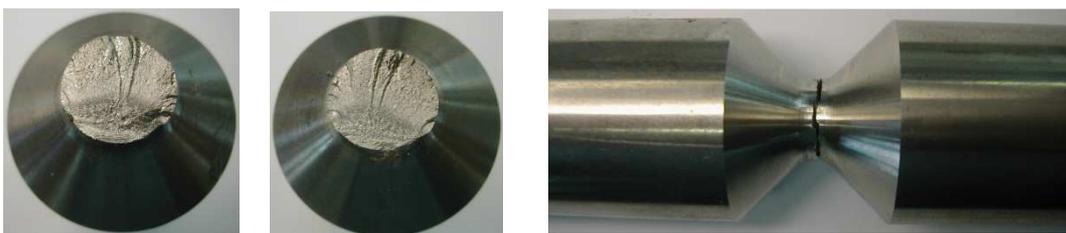


Figura F.7.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_07

PROVA : Traz_r3mm_R-1_08				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=21.991 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -21.991 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a= 21.991 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 280 \text{ MPa}$

ROTTA: a 83424 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 37.67 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	9453	11.3%	24.4	15	0.171	675.45	45.03
2	19867	23.8%	24.4	20	0.2168	856.36	42.82
3	29213	35.0%	23.8	22	0.2019	797.51	36.25
4	41656	49.9%	24.1	24	0.2187	863.87	35.99
5	60254	72.2%	24.1	24	0.2024	799.48	33.31
6	75831	90.9%	25.2	24	0.2119	837.01	34.88

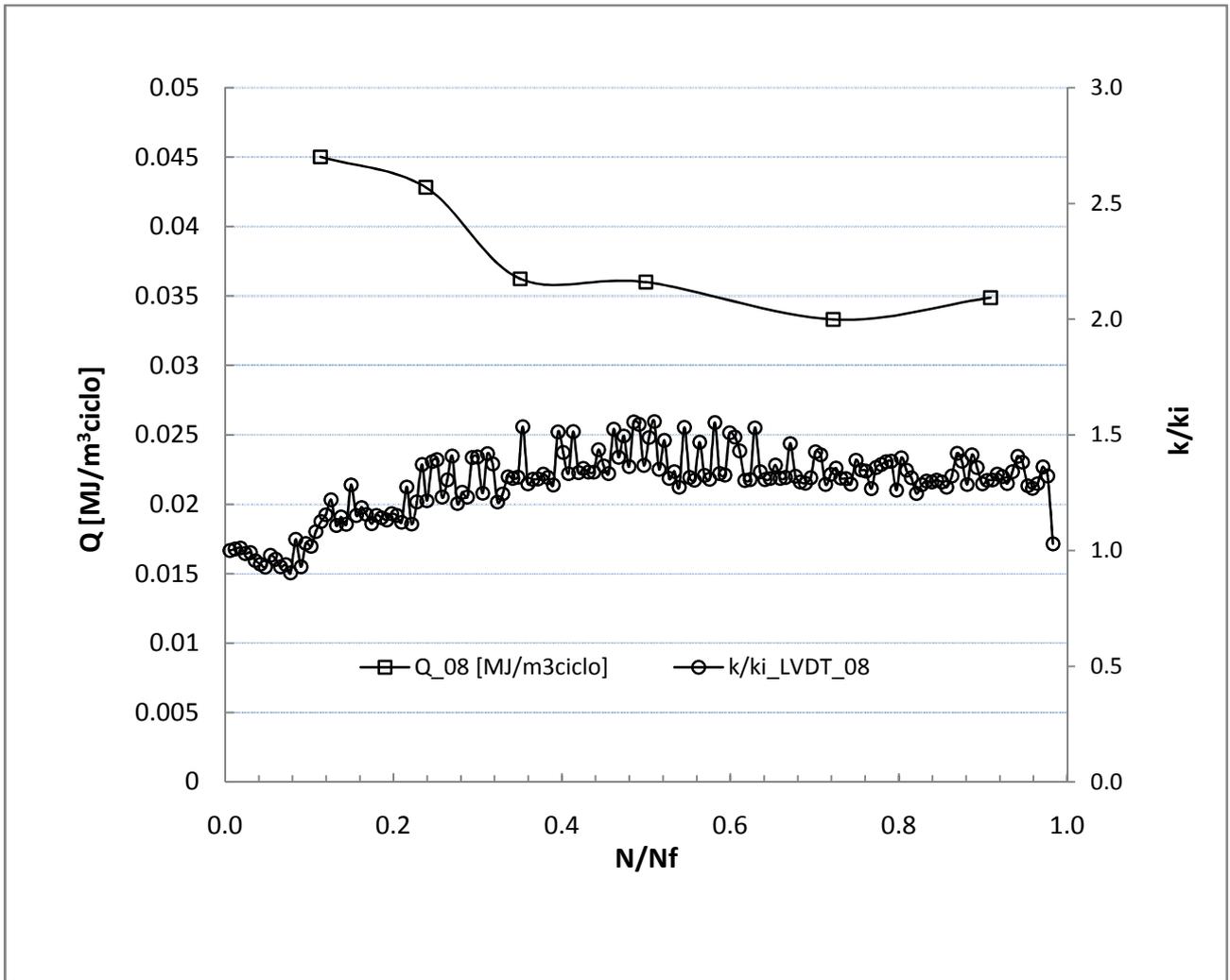


Figura F.8.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_08

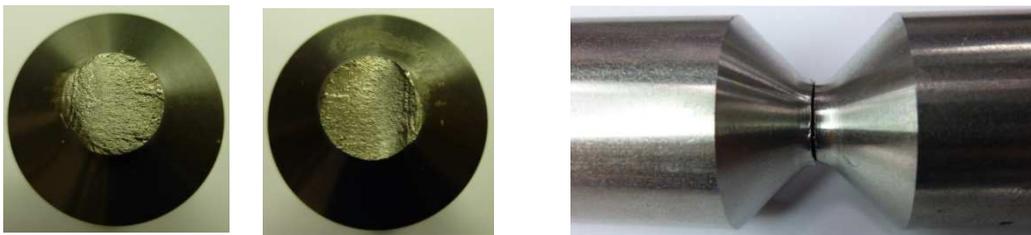


Figura F.8.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_08

PROVA : Traz_r3mm_R-1_09				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=28.274 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}=-28.274 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a=28.274 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 360 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -360 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 360 \text{ MPa}$

ROTTO: a 19884 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 66.7 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	4000	20.1%	24.2	15	0.23	908.50	60.57
3	8000	40.2%	24.3	20	0.3281	1296.00	64.80
4	12000	60.4%	24.4	20	0.3453	1363.94	68.20
5	16000	80.5%	24.3	20	0.3721	1469.80	73.49

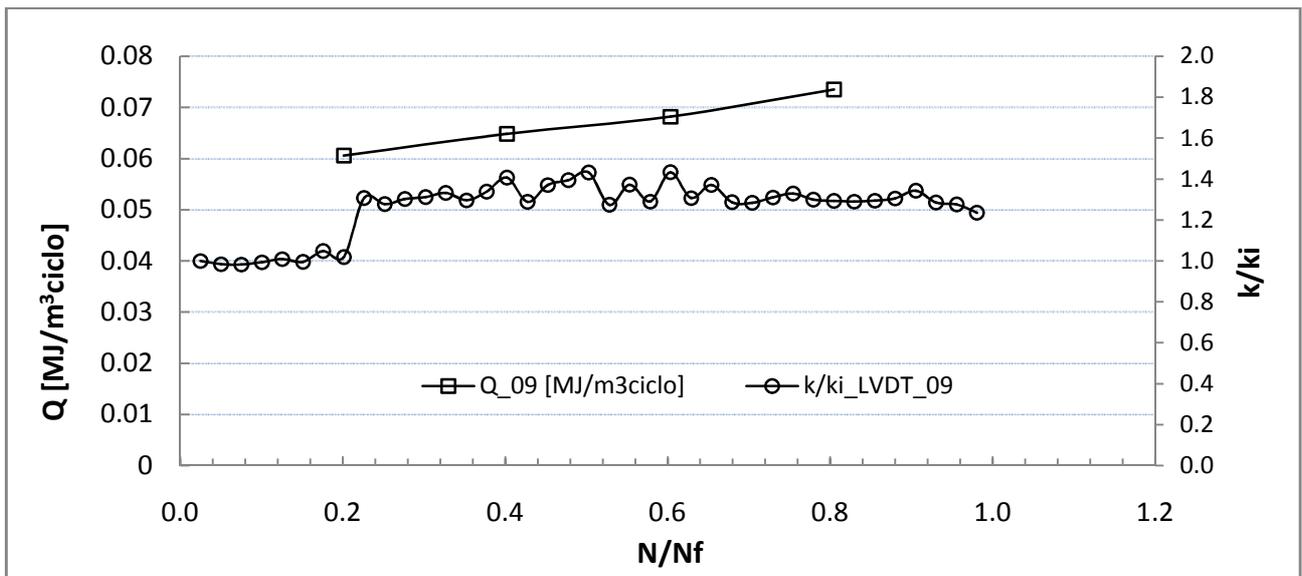


Figura F.9.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_09

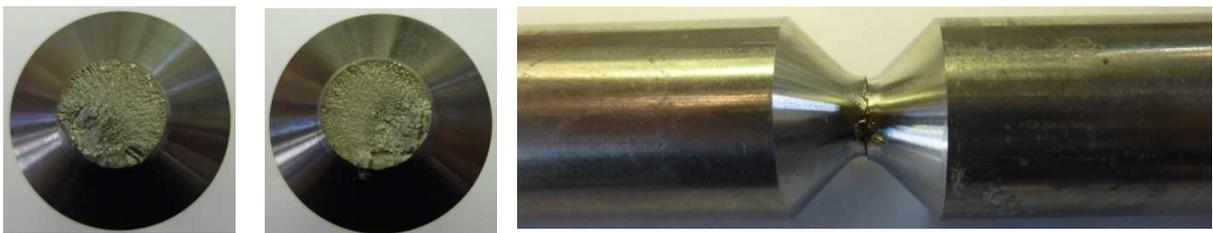


Figura F.9.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_09

PROVA : Traz_r3mm_R-1_10				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$C_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	$A = 78.539\text{mm}^2$
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=26.704 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -26.704 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a=26.704 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 340 \text{ MPa}$

ROTTO: a 27962 cicli (a cui si devono aggiungere 7527 cicli a $\sigma_a=240\text{MPa}$)
 Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = [\text{kJ/m}^3\text{ciclo}]$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5000	17.9%	24.7	15	0.23	908.50	60.57
3	15000	53.6%	24.6	25	0.4075	1609.63	64.39
4	20000	71.5%	24.7	25	0.4497	1776.32	71.05
5	25000	89.4%	24.8	25	0.3989	1575.66	63.03

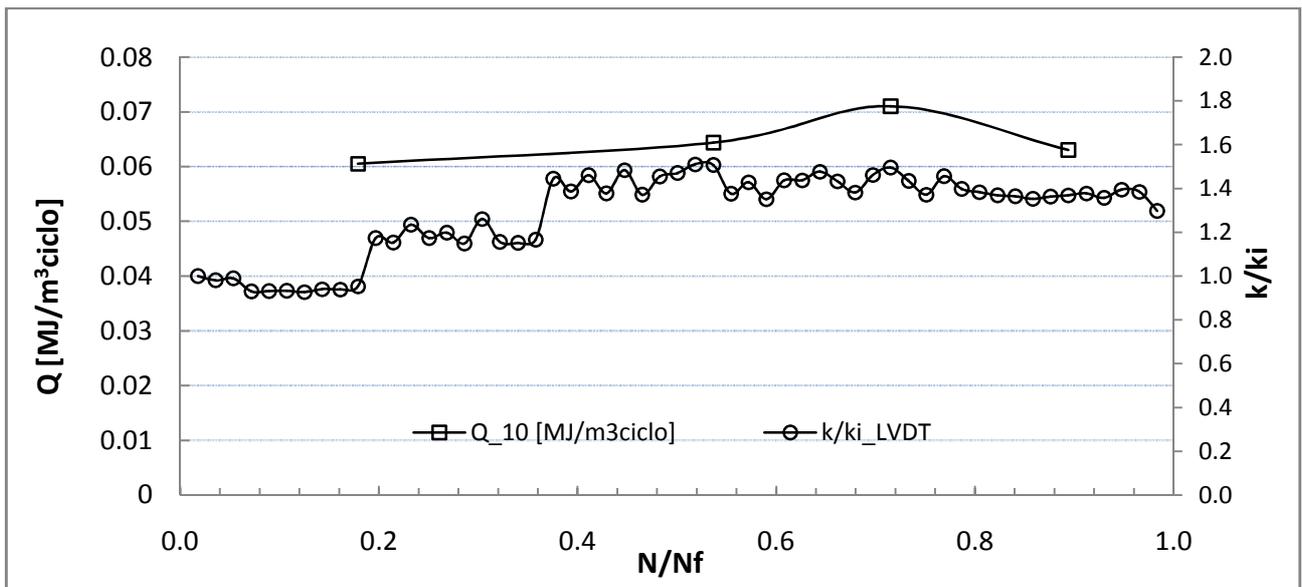


Figura F.10.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_10

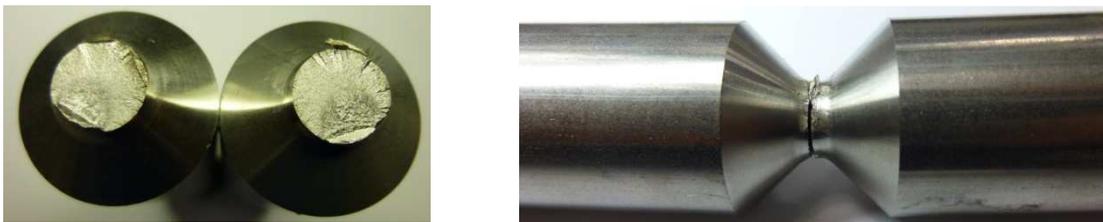


Figura F.10.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_10

PROVA : Traz_r3mm_R-1_11				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 3\text{mm}$	$\phi_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 78.539mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}}=23.562 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}}= -23.562 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}}=0 \text{ kN}$	$F_a= 23.562 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 300 \text{ MPa}$

ROTTO: a 57489 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 36.64 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5000	8.7%	24.2	20	0.1751	691.65	34.58
2	10000	17.4%	24.2	25	0.2118	836.61	33.46
3	15000	26.1%	24.3	25	0.2289	904.16	36.17
4	20000	34.8%	24.3	25	0.2302	909.29	36.37
5	25000	43.5%	24.4	25	0.2286	902.97	36.12
6	30000	52.2%	24.5	25	0.2265	894.68	35.79
7	35000	60.9%	24.6	25	0.2222	877.69	35.11
8	40000	69.6%	24.6	25	0.2294	906.13	36.25
9	45000	78.3%	24.7	25	0.2554	1008.83	40.35
10	50000	87.0%	24.8	25	0.258	1019.10	40.76
11	55000	95.7%	24.8	25	0.71	2804.50	112.18

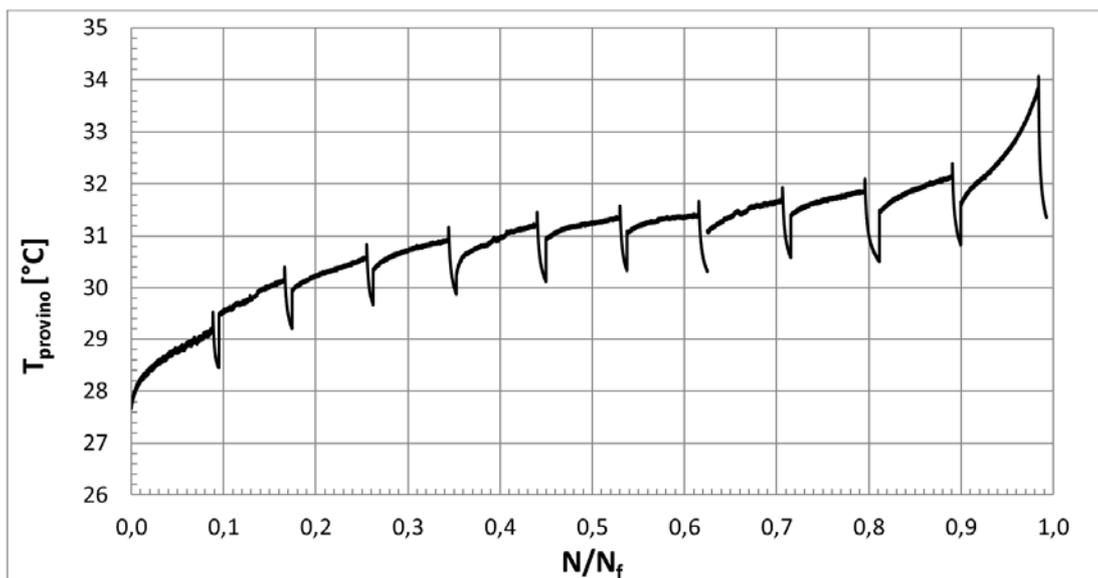


Figura F.11.1 Andamento della temperatura del provino Traz_r3mm_R-1_11 durante l'intera prova con variazione della temperatura ambiente tra i 24.4°C e 24.8°C

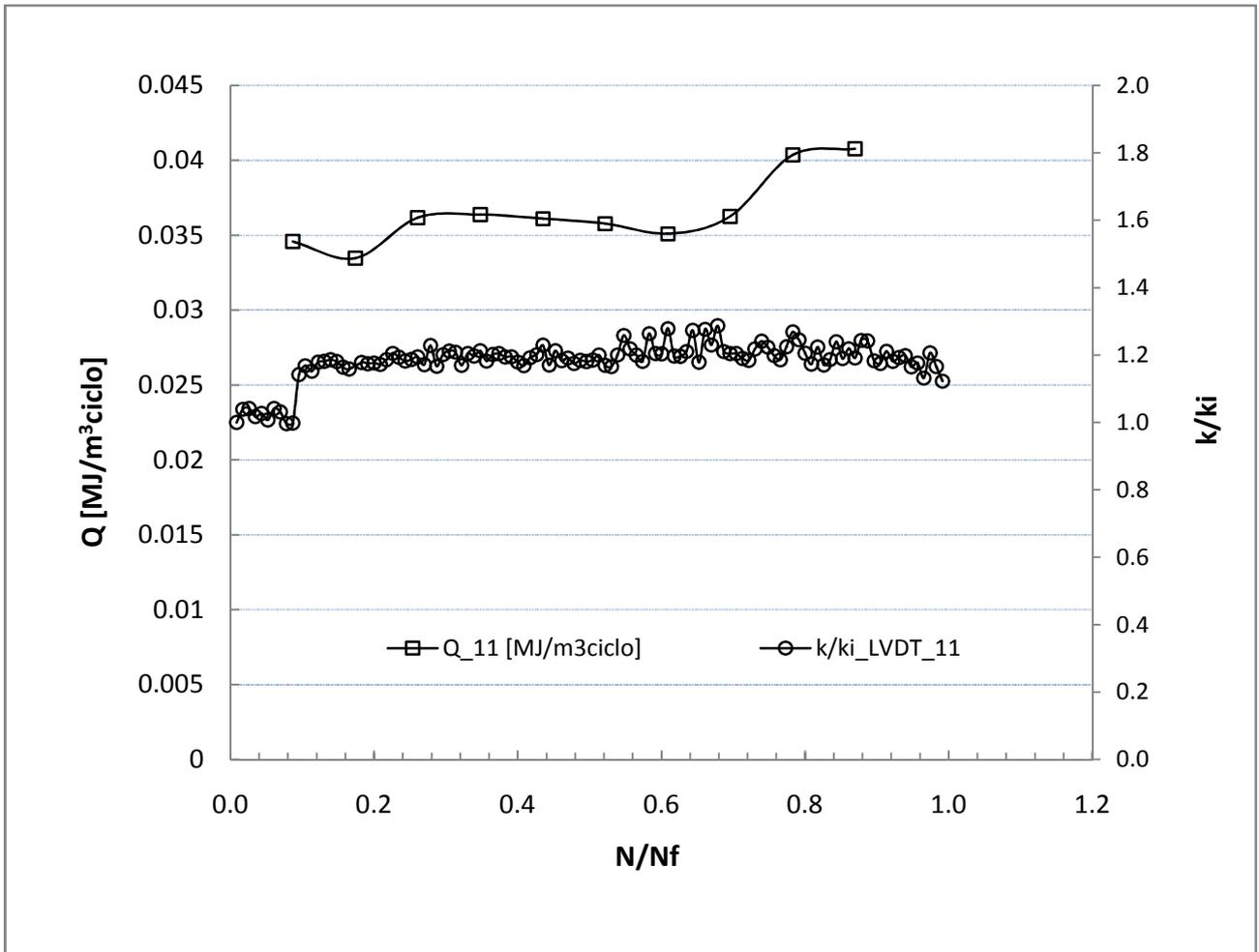
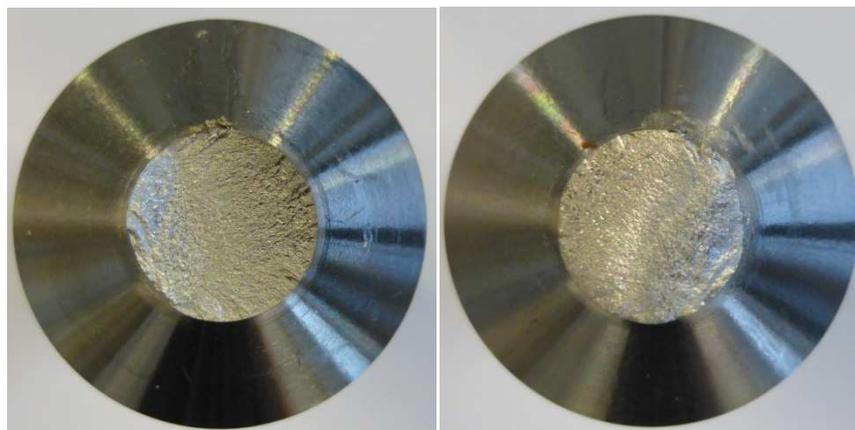


Figura F.11.2 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r3mm_R-1_11



Figura F.11.3 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r3mm_R-1_11



Appendice G: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R=-1 ED INTAGLIO NON ASSIALSIMMETRICO

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo $R=-1$ con intaglio non assialsimmetrico e raggio di fondo intaglio $r=10.5\text{mm}$.

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 adimensionalizzato N/N_f e l'andamento della rigidità adimensionalizzata K/K_i sempre in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N/N_f .

Per questo rapporto di ciclo e per questa geometria si sono testati 5 provini. La geometria dei provini utilizzati nelle diverse campagne di prova è riportata in Figura G.1.

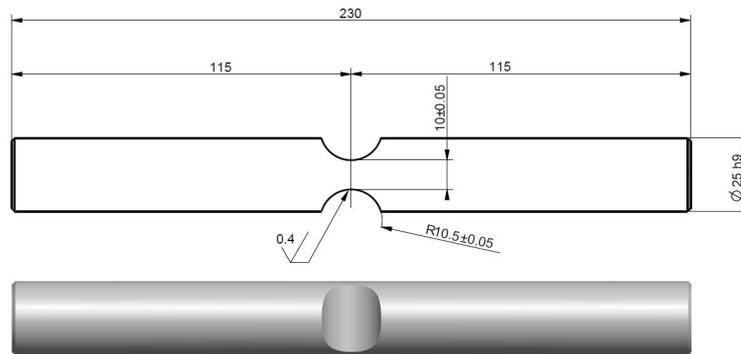


Figura G.1 Geometria dei provini denominati U10.5NAXSY utilizzata in questa campagna di prove

PROVA : Traz_r10,5mm_R-1_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 10,5\text{mm}$	$L_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 300,4456mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 114,17 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -114,17 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 114,17 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 380 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -380 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 380 \text{ MPa}$

ROTTO: a 6299 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 4403,58 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	833	13.2%	23.0	0.5	0.195	770.25	1540.50
2	1124	17.8%	23.1	0.5	0.2003	791.19	1582.37
3	1463	23.2%	22.9	0.5	0.184	726.80	1453.60
4	1859	29.5%	23.0	0.5	0.394	1556.30	3112.60
5	3918	62.2%	23.0	0.8	0.403	1591.85	1989.81
6	5326	84.6%	23.0	1	1.0617	4193.72	4193.72

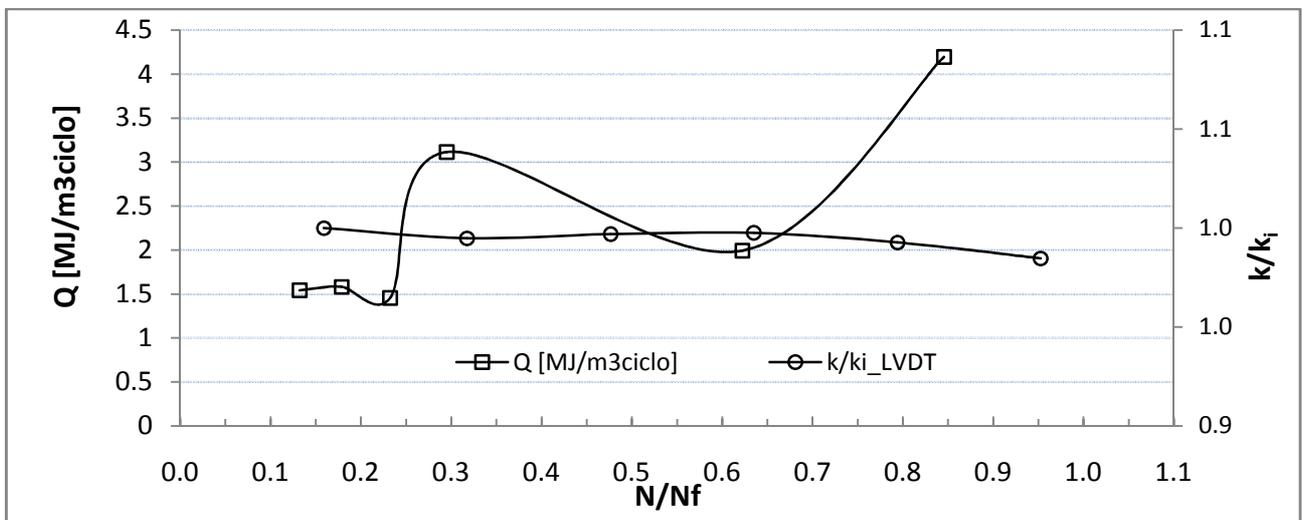


Figura G.1.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r10.5mm_R-1_01

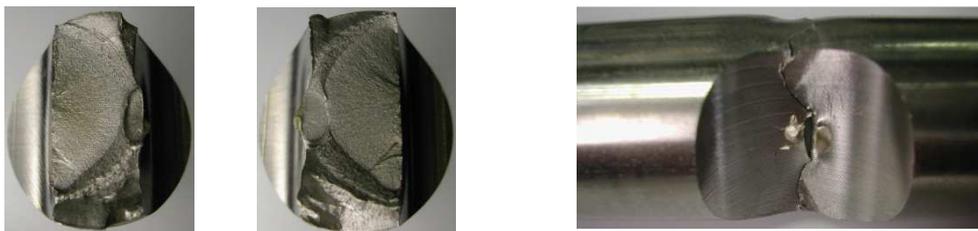


Figura G.1.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r10.5mm_R-1_01

PROVA : Traz_r10,5mm_R-1_02				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 10,5\text{mm}$	$L_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 300,4456mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 108,16 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -108,16 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 108,16 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 360 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -360 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 360 \text{ MPa}$

ROTTO: a 8612 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 2796.05 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1525	17.7%	22.6	1	1.1169	4411.76	4411.76
2	3801	44.1%	22.6	1.1	1.0296	4066.92	3697.20
3	6089	70.7%	22.6	1.1	0.3857	1523.52	1385.01
4	6426	74.6%	22.6	1.1	0.3104	1226.08	1114.62
5	6773	78.6%	22.6	1.1	0.2492	984.34	894.85
6	7271	84.4%	22.7	1.1	0.329	1299.55	1181.41
7	7757	90.0%	22.7	1.1	0.161	635.95	578.14
8	8421	97.7%	22.6	1.1	0.1	395	359.09

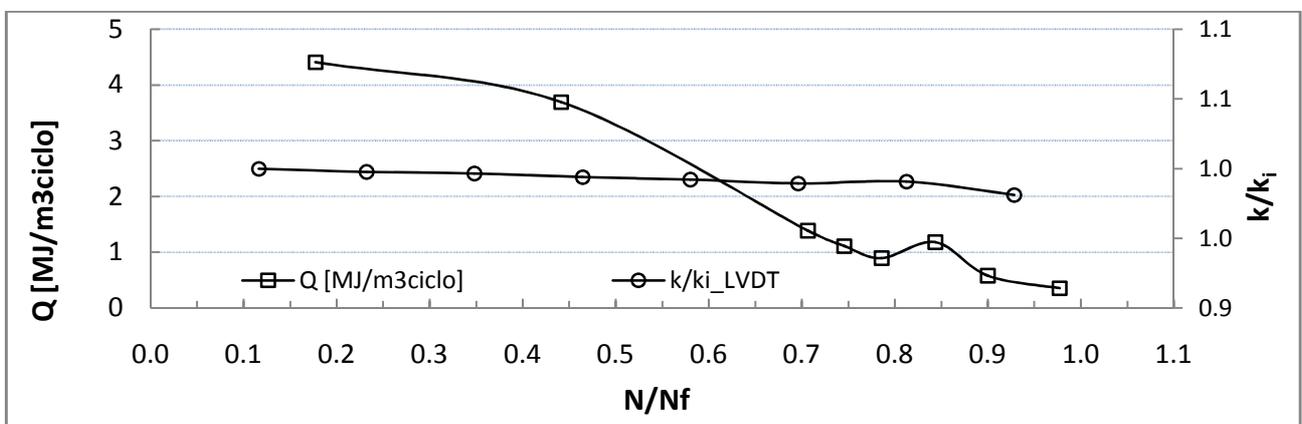


Figura G.2.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r10.5mm_R-1_02

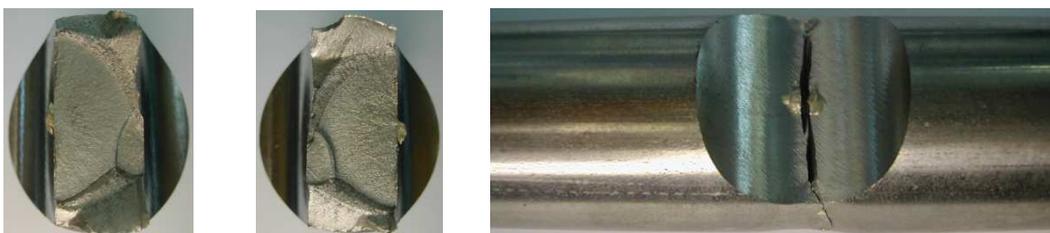


Figura G.2.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r10.5mm_R-1_02

PROVA : Traz_r10,5mm_R-1_03				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 10,5\text{mm}$	$L_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	A = 300,4456mm ²
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 102.152 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -102.152 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 102.152 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -340 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 340 \text{ MPa}$

ROTTO: a 17495 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 1625.39 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2806	16.0%	21.3	1.5	0.8544	3374.88	2249.92
2	3479	19.9%	21.2	1.5	0.8328	3289.56	2193.04
3	6547	37.4%	21.8	1.8	0.5573	2201.34	1222.96
4	8751	50.0%	21.9	1.8	0.83	3278.50	1821.39
5	9832	56.2%	22.2	1.8	0.9237	3648.62	2027.01
6	10846	62.0%	22.1	1.8	0.7667	3028.47	1682.48
7	11833	67.6%	22.2	1.8	0.4557	1800.02	1000.01
8	13438	76.8%	22.1	1.8	0.4227	1670	927.59
9	14264	81.5%	22.0	1.8	0.4116	1626	903.23
10	15170	86.7%	22.1	1.8	0.5909	2334	1296.70
11	16180	92.5%	22.2	1.8	0.4633	1830	1016.69

*Il provino ha presentato un parziale distacco della termocoppia

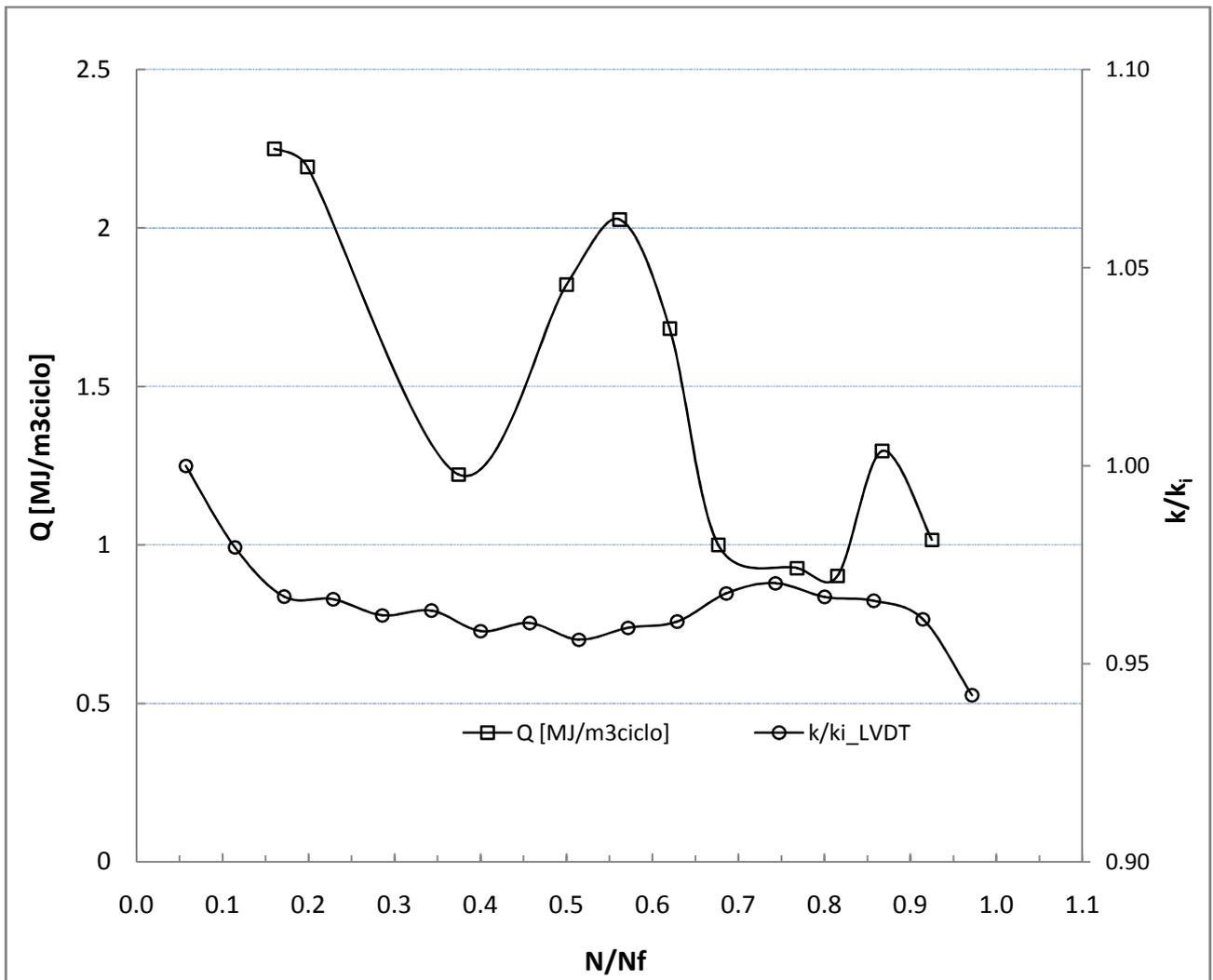


Figura G.3.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r10.5mm_R-1_03



Figura G.3.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r10.5mm_R-1_03

PROVA : Traz_r10,5mm_R-1_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 10,5\text{mm}$	$L_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	$A = 300,4456\text{mm}^2$
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 96.143 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -96.143 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 96.143 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -320 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

ROTTA: a 30056 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 444.35 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1136	3.8%	22.1	0.8	0.069	272.55	340.69
2	3445	11.5%	22.4	1	0.069	272.55	272.55
3	4749	15.8%	22.4	1.2	0.079	312.05	260.04
4	5918	19.7%	22.5	1.4	0.314	1240.30	885.93
5	7181	23.9%	22.7	1.6	0.1201	474.40	296.50
6	8104	27.0%	22.6	1.8	0.1281	506.00	281.11
7	10775	35.8%	22.6	2	0.39	1540.50	770.25
8	12446	41.4%	22.5	2.2	0.1935	764	347.42
9	15202	50.6%	22.6	2.4	0.2093	827	344.47
10	17538	58.4%	22.5	2.6	0.2601	1027	395.15
11	20879	69.5%	22.4	2.8	0.547	2161	771.66
12	24256	80.7%	22.6	3	0.3562	1407	469.00
13	28999	96.5%	22.5	3.2	0.531	2097	655.45

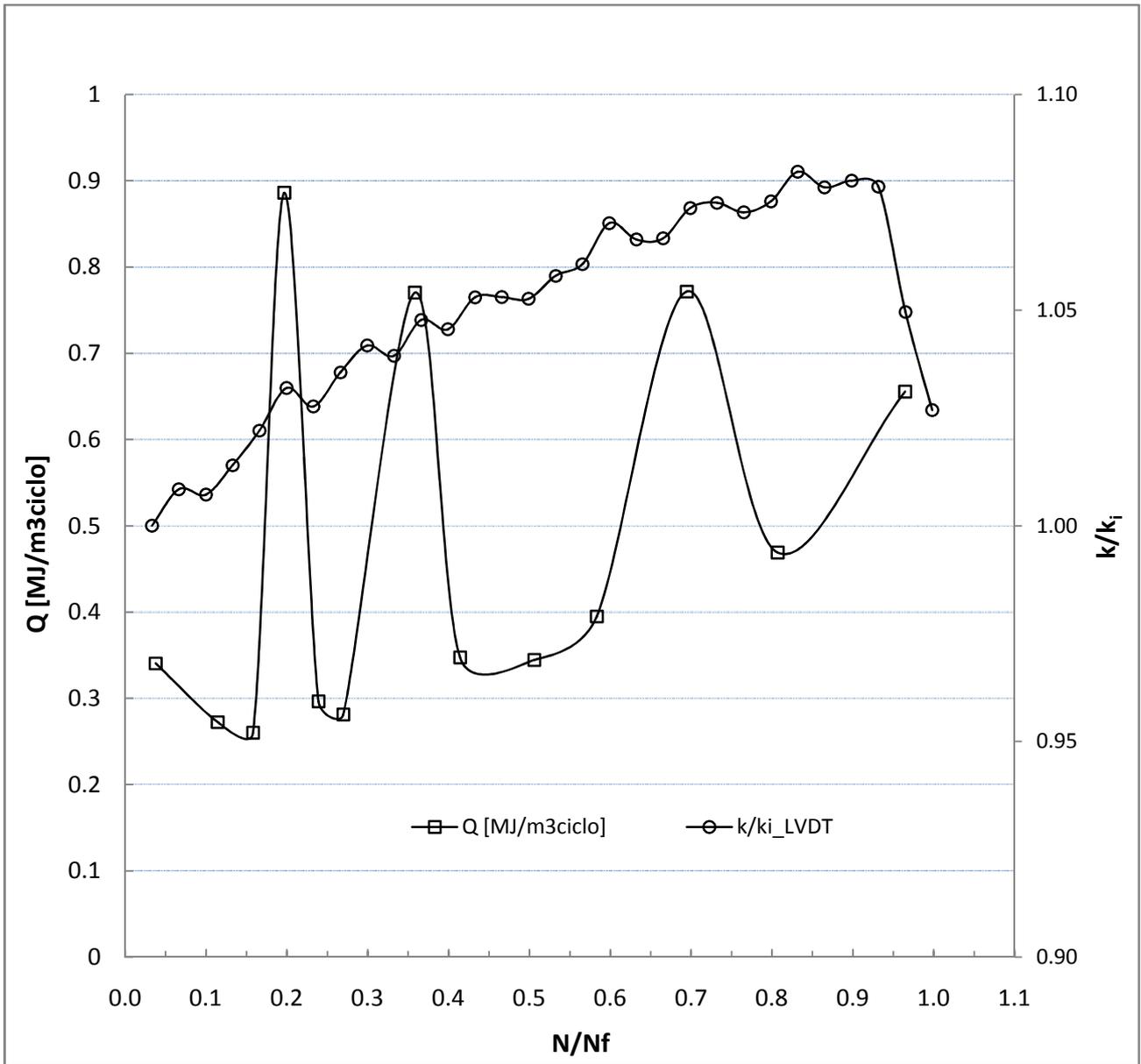


Figura G.4.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r10.5mm_R-1_04



Figura G.4.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r10.5mm_R-1_04

PROVA : Traz_r10,5mm_R-1_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	$r_{\text{intaglio}} = 10,5\text{mm}$	$L_{\text{nett}} = 10\text{mm}$	$A = 300,4456\text{mm}^2$
CARICHI APPLICATI	$F_{\text{MAX}} = 90.134 \text{ kN}$	$F_{\text{MIN}} = -90.134 \text{ kN}$	$F_{\text{MED}} = 0 \text{ kN}$	$F_a = 90.134 \text{ kN}$
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = 0 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$

ROTTA: a 51958 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 752.62 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1197	2.3%	21.1	1	0.0608	240.16	240.16
2	2592	5.0%	20.7	1.3	0.159	628.05	483.12
3	4380	8.4%	20.9	1.6	0.116	458.20	286.38
4	6902	13.3%	21.1	1.9	0.155	612.25	322.24
5	10122	19.5%	21.2	2.5	0.695	2745.25	1098.10
6	12326	23.7%	21.4	3	0.622	2456.90	818.97
7	18373	35.4%	21.4	3	0.302	1192.90	397.63
8	20421	39.3%	21.8	3.2	0.641	2532	791.23
9	24172	46.5%	22.2	1	0.27	1067	1066.50
10	33139	63.8%	22.0	3	0.463	1829	609.62
11	41655	80.2%	21.9	3	0.659	2603	867.68

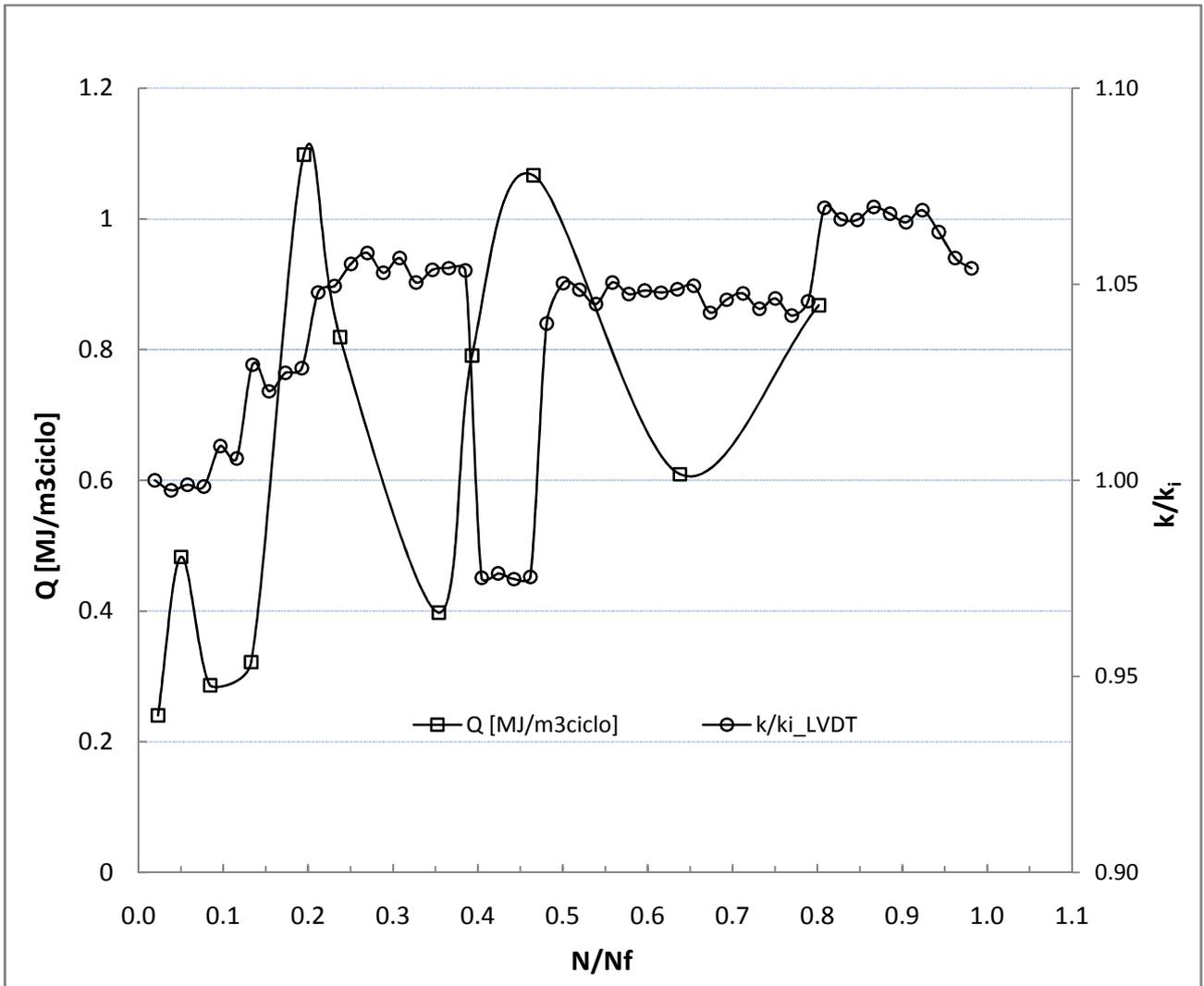


Figura G.5.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità adimensionalizzata del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_r10.5mm_R-1_05

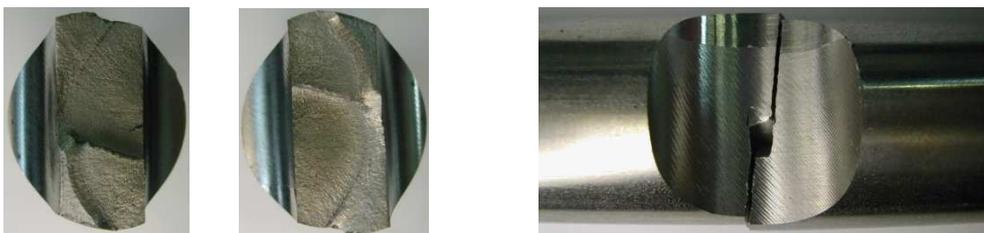


Figura G.5.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_r10.5mm_R-1_05

Appendice H: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R=-

2

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini lisci sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-2.

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 adimensionalizzato N/N_f e l'andamento della rigidezza adimensionalizzata K/K_i sempre in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N/N_f .

Per questo rapporto di ciclo e per questa geometria si sono testati 4 provini. La geometria dei primi tre provini è riportata in Figura H.1.A, mentre per il quarto, e ultimo, provino si è utilizzato la geometria di Figura H.1.B. Per quest'ultima geometria si è ridotta la luce di inflessione libera (portandola da 130mm a 82.5mm) ottenuta riducendo il diametro del provino in prossimità degli afferraggi (passando da $\varnothing 25\text{mm}$ a $\varnothing 16\text{mm}$).

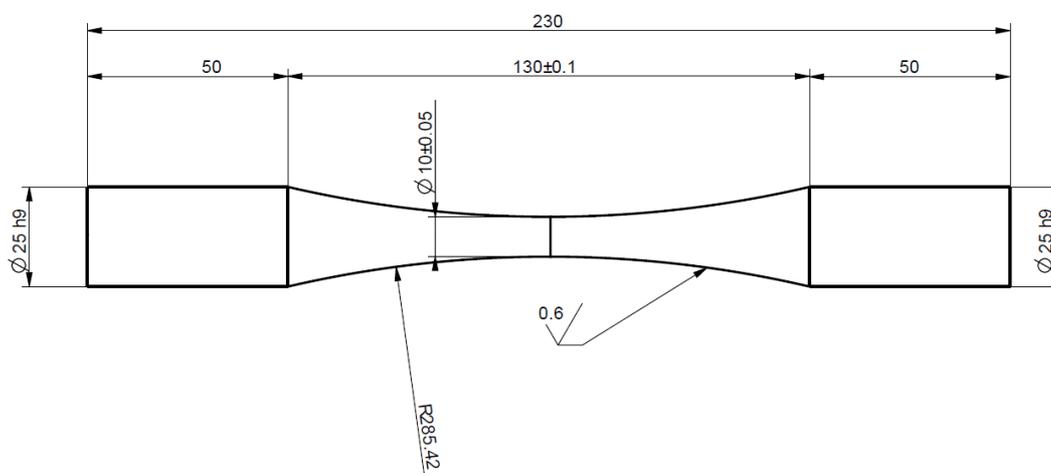


Figura H.1.A Geometria dei provini utilizzata per i primi tre test a rapporto di ciclo R-2 realizzati in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

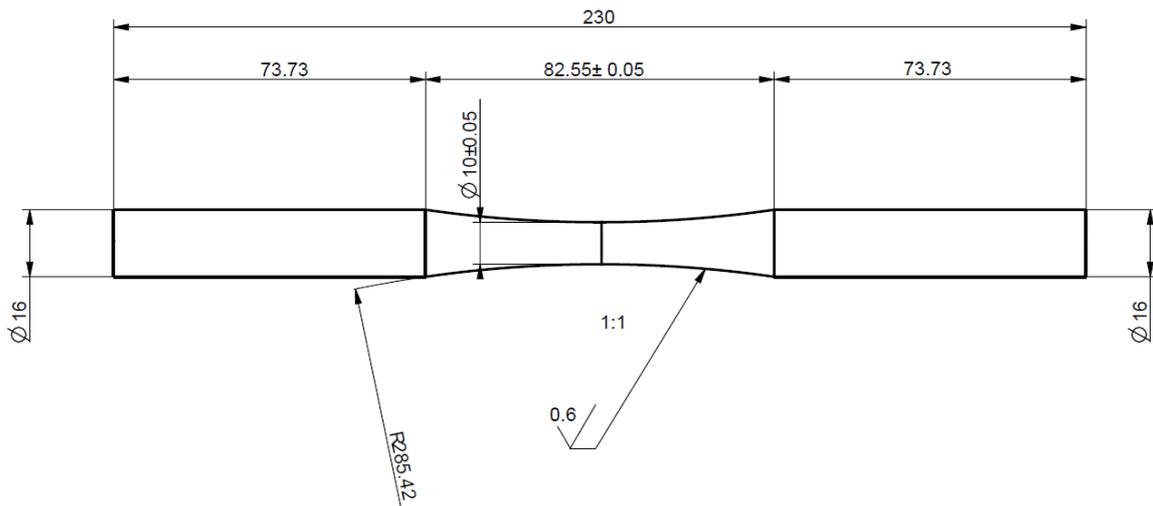


Figura H.1.B Geometria dei provini utilizzata nell'ultimo test a rapporto di ciclo R-1.5 realizzati in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Traz_liscio_R-2_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = -2			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =16.5394 kN	F _{MIN} = -33.078 kN	F _{MED} =0 kN	F _a =24.81 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 233.3 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -466.66 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -116.68 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

Il provino si è in stabilizzato dopo 3303 cicli di carico eseguiti tra 1 e 2Hz. La prova è stata interrotta quando si è superato il limite di spostamento inferiore posto a -1.2mm senza la possibilità di eseguire alcun raffreddamento.



Figura H.1.1 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-2_01

PROVA : Traz_liscio_R-2_02				
RAPPORTO DI CICLO	R = -2			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =15.122 kN	F _{MIN} = -30.24 kN	F _{MED} =-7.559 kN	F _a =22.681 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 213.33 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -426.66 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -106.665 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCHINA A: 93218 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 409.8 \text{ [kJ/m}^3\text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	834	0.9%	21.8	1	0.049	193.55	193.55
2	1295	1.4%	21.7	1.1	0.0548	216.46	196.78
3	2300	2.5%	21.8	1.2	0.0702	277.29	231.08
4	3640	3.9%	22.1	1.5	0.0872	344.44	229.63
5	4498	4.8%	22.0	2	0.1284	507.18	253.59
6	5573	6.0%	21.8	2.1	0.1249	493.36	234.93
7	6748	7.2%	21.8	2.5	0.1575	622.13	248.85
8	7939	8.5%	21.9	2.8	0.1826	721.27	257.60
9	8985	9.6%	22.0	3	0.211	833.45	277.82
10	10426	11.2%	21.9	3.2	0.2203	870.19	271.93
11	12070	12.9%	21.7	3.5	0.2638	1042.01	297.72
12	14687	15.8%	21.9	3.8	0.3027	1195.67	314.65
13	16467	17.7%	21.8	4.1	0.3437	1357.62	331.13
14	20546	22.0%	21.6	4.5	0.4586	1811.47	402.55
15	24339	26.1%	21.9	4.1	0.4984	1968.68	480.17
16	26998	29.0%	21.6	3.8	0.4636	1831.22	481.90
17	34457	37.0%	21.9	3.5	0.4744	1873.88	535.39
18	91364	98.0%	24.2	1.12	0.1171	462.55	412.99

Il provino non è arrivato a rottura ma la prova è stata interrotta in quanto è stato superato il limite di spostamento inferiore posto a -1.1mm.

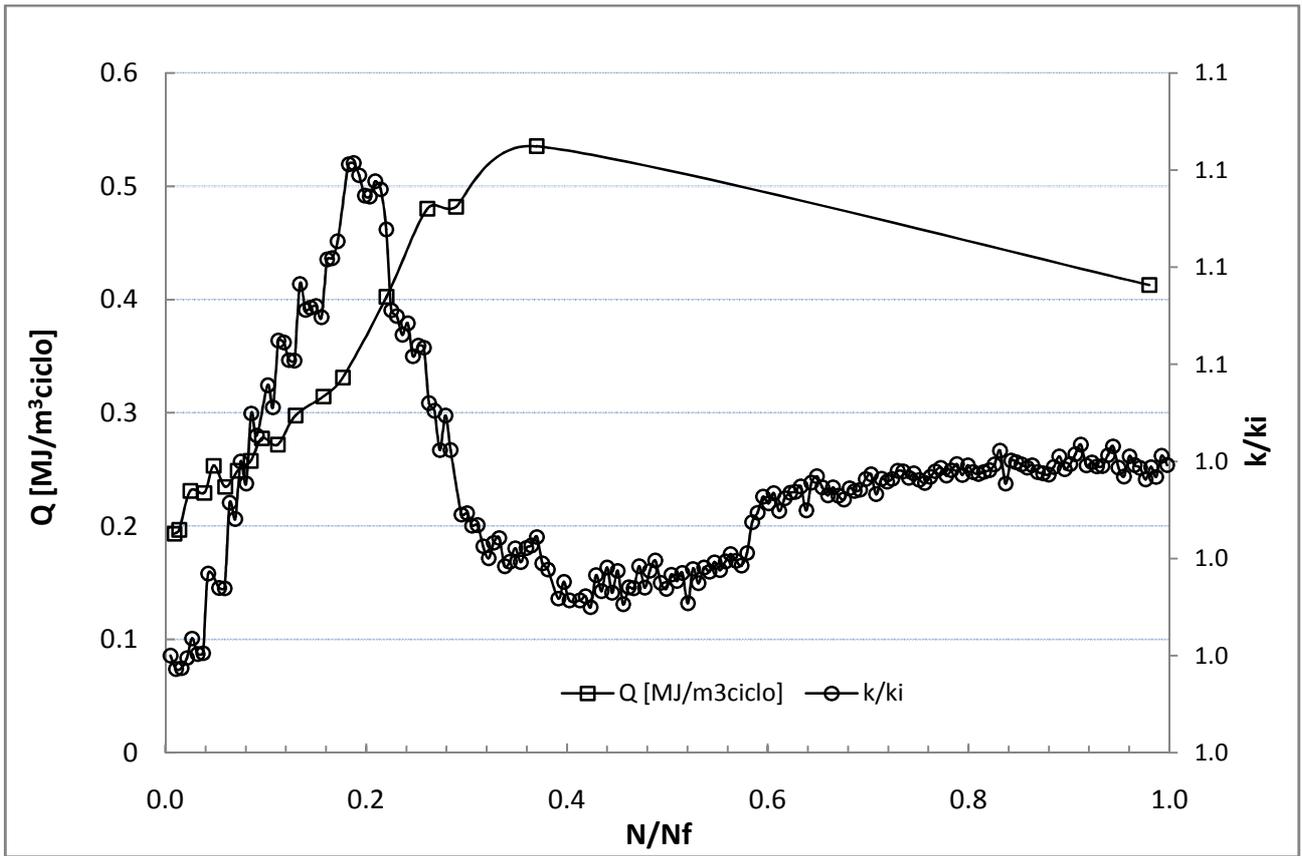


Figura H.2.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidezza del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-2_02

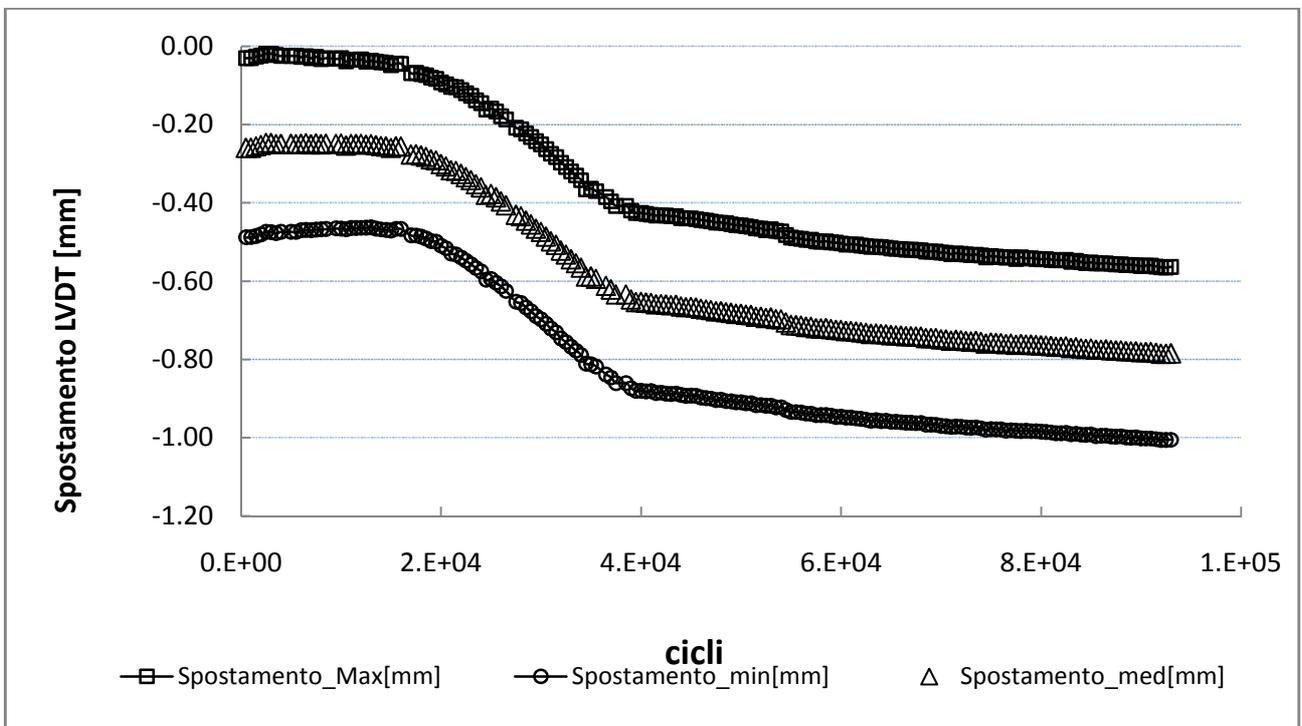


Figura H.2.2 Andamento dello spostamento massimo, minimo e medio in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-2_02

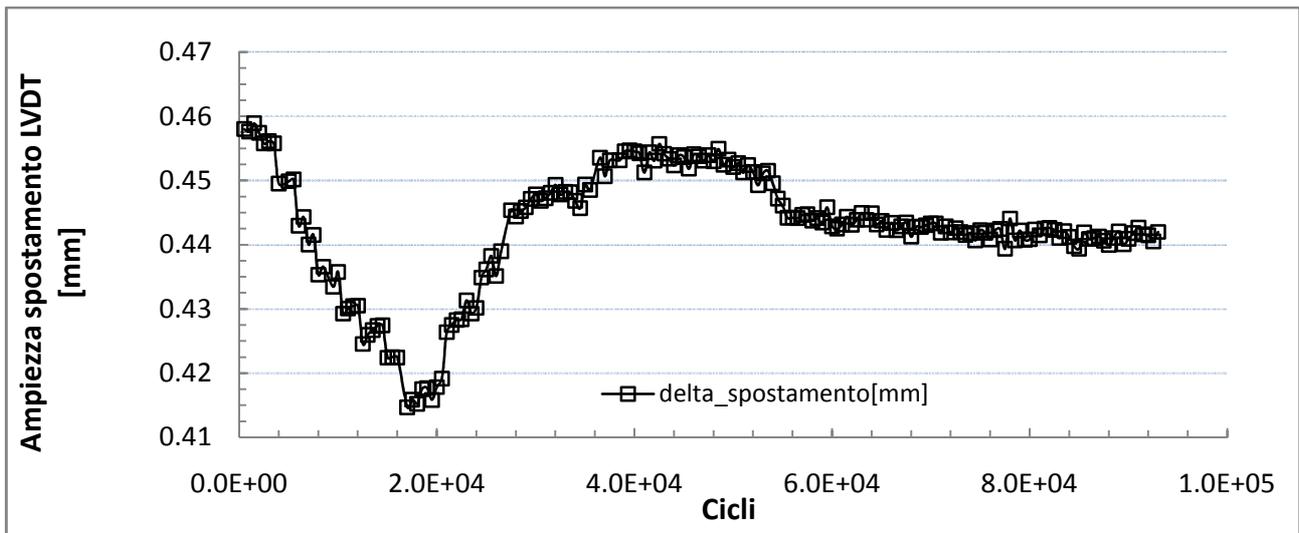


Figura H.2.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisita con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-2_02

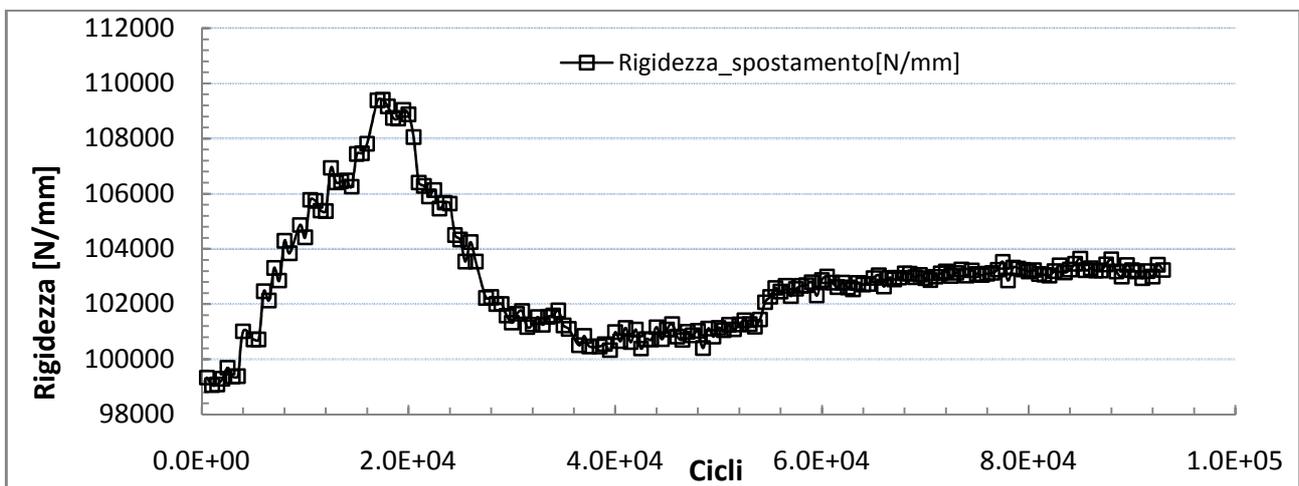


Figura H.2.4 Andamento della rigidezza del provino calcolata a partire dall'ampiezza di spostamento misurata con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-2_02



Figura H.2.5 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-2_02

PROVA : Traz_liscio_R-2_03				
RAPPORTO DI CICLO	R = -2			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 130mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =14.176 kN	F _{MIN} = -28.353 kN	F _{MED} =-7.088 kN	F _a =21.2645 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 200 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -400 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -100 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 300 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCHINA A: 563068 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 181.58 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1089	0.2%	24.4	1	0.04	158.00	158.00
2	2762	0.5%	23.8	2	0.073	288.35	144.18
3	4664	0.8%	23.7	3	0.1105	436.48	145.49
4	9557	1.7%	23.9	4	0.143	564.85	141.21
5	15110	2.7%	24.2	5	0.195	770.25	154.05
6	25226	4.5%	22.7	5	0.214	845.30	169.06
7	54437	9.7%	22.8	5	0.218	861.10	172.22
8	71798	12.8%	23.0	5	0.1995	788.03	157.61
9	89292	15.9%	23.6	5	0.2148	848.46	169.69
10	104360	18.5%	23.8	5	0.2246	887.17	177.43
11	119793	21.3%	23.9	5	0.2254	890.33	178.07
12	145012	25.8%	24.0	5	0.228	900.60	180.12
13	166034	29.5%	24.2	5	0.2353	929.44	185.89
14	187836	33.4%	25.0	5	0.2392	944.84	188.97
15	208486	37.0%	24.3	5	0.2479	979.21	195.84
16	228933	40.7%	24.6	5	0.238	940.10	188.02
17	250557	44.5%	24.5	5	0.2558	1010.41	202.08
18	296425	52.6%	24.5	5	0.2533	1000.54	200.11
19	355722	63.2%	22.9	5	0.256	1011.20	202.24
20	414273	73.6%	24.0	4	0.1764	696.78	174.20
21	470352	83.5%	23.5	5	0.2357	931.02	186.20
22	529753	94.1%	25.0	5	0.213	841.35	168.27

Il provino non è arrivato a rottura ma la prova è stata interrotta in quanto è stato superato il limite di spostamento inferiore posto a -1.3mm a seguito di una repentina mancanza di alimentazione elettrica al quadro elettrico che governa il gruppo pompe.

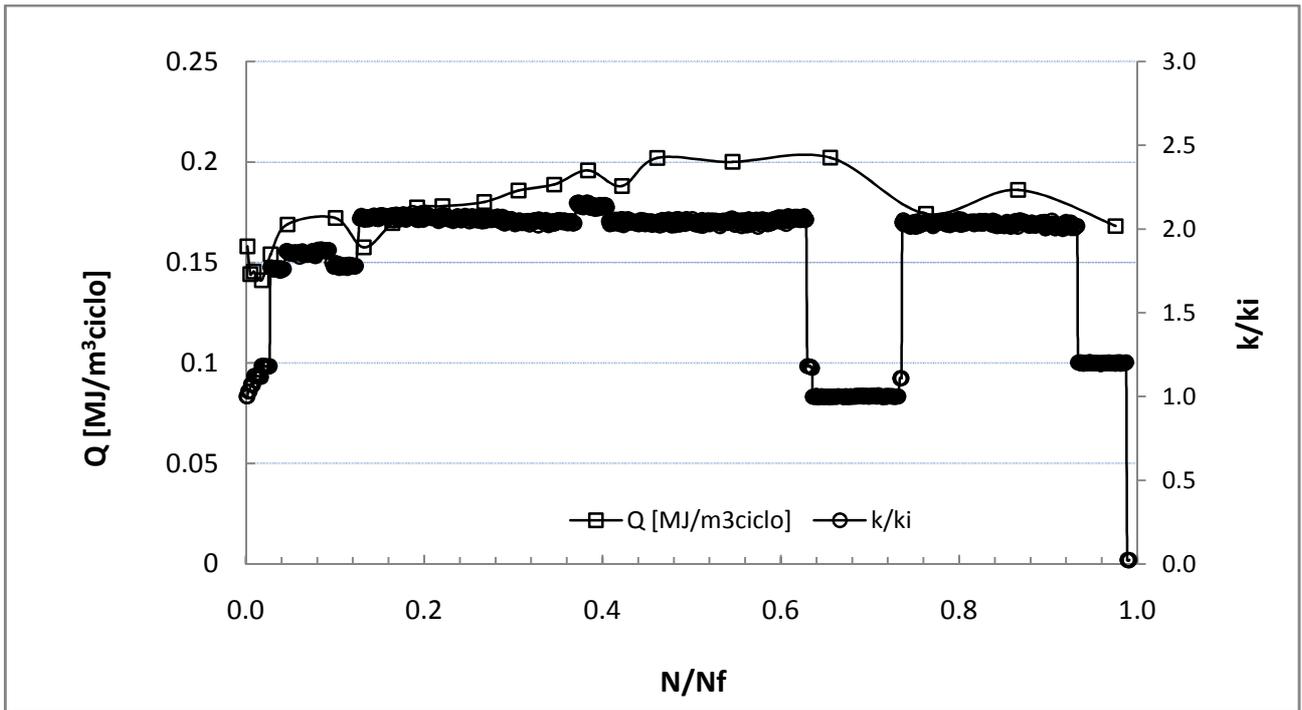


Figura H.3.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidezza del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-2_03

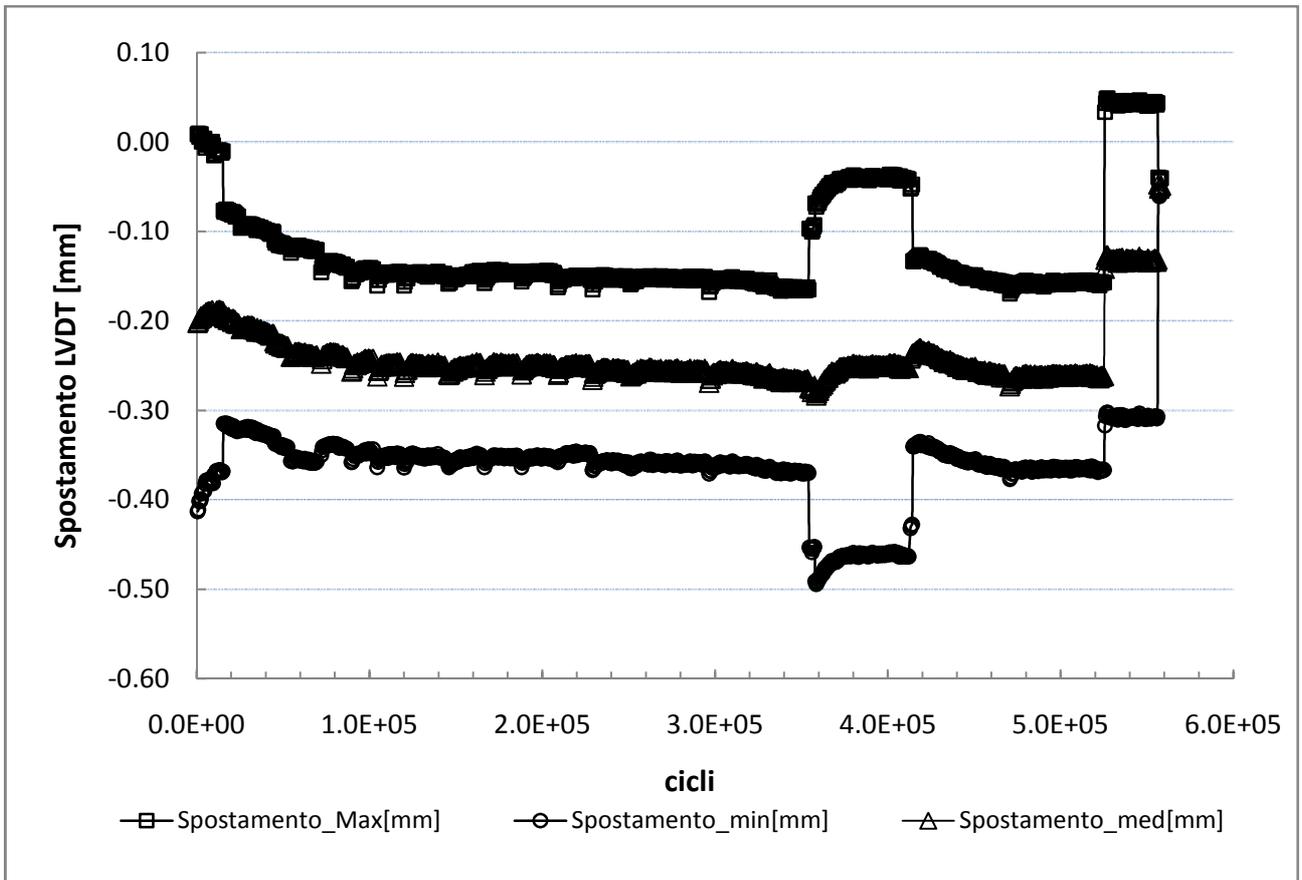


Figura H.3.2 Andamento dello spostamento massimo, minimo e medio in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-2_03

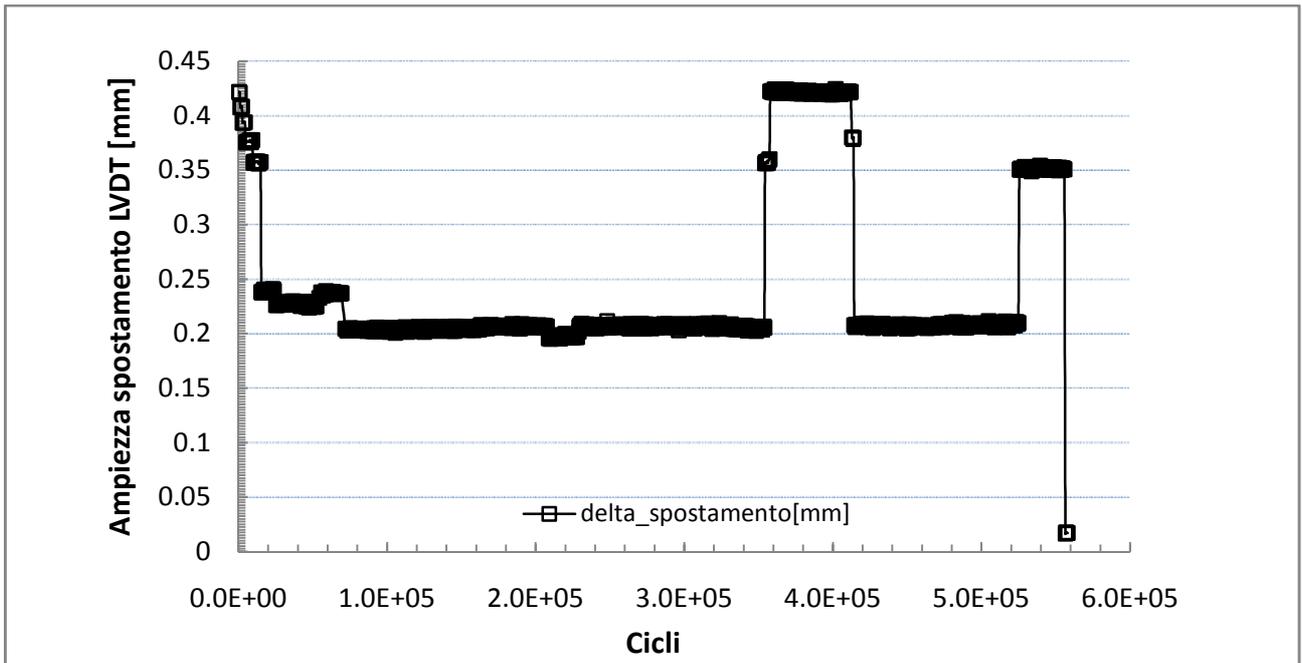


Figura H.3.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisita con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-2_03

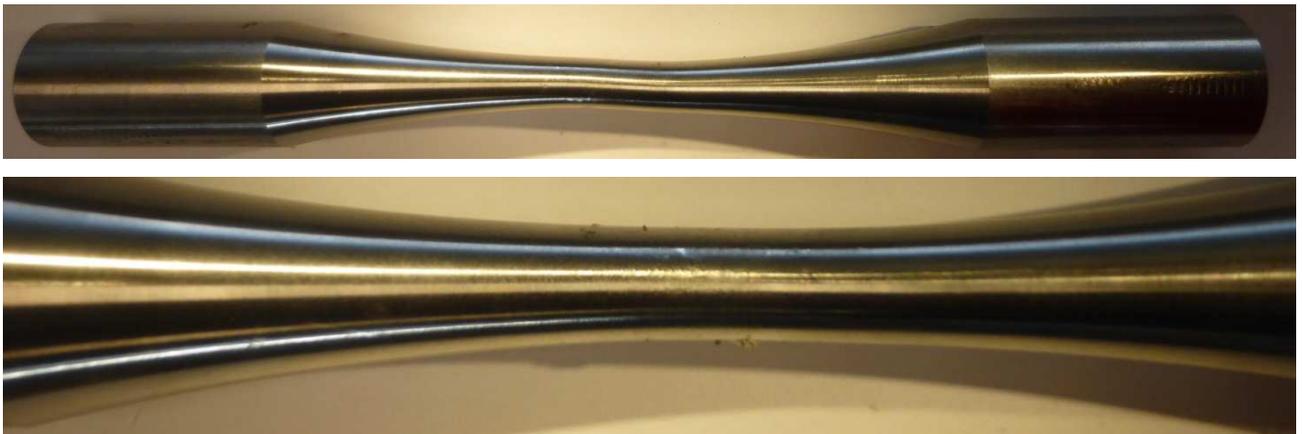


Figura H.3.4 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-2_03

PROVA : Traz_liscio_R-2_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = -2			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =15.122 kN	F _{MIN} = -30.24 kN	F _{MED} =-7.559 kN	F _a =22.681 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 213.33 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -426.66 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -106.665 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 320 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCHINA A: 2000000 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 184.78 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3371	0.2%	24.5	3	0.1473	581.84	193.95
2	10873	0.5%	24.7	3.5	0.2007	792.77	226.50
3	22797	1.1%	24.8	3.5	0.2632	1039.64	297.04
4	40913	2.0%	24.9	3.5	0.293	1157.35	330.67
5	66543	3.3%	26.0	3.5	0.309	1220.55	348.73
6	88125	4.4%	26.9	3.5	0.3376	1333.52	381.01
7	111425	5.6%	26.4	3.5	0.3318	1310.61	374.46
8	136129	6.8%	26.2	3.5	0.308	1216.60	347.60
9	169550	8.5%	26.4	3.5	0.304	1200.80	343.09
10	172028	8.6%	22.8	3	0.2672	1055.44	351.81
11	192859	9.6%	22.8	3.5	0.286	1129.70	322.77
12	212548	10.6%	23.4	3	0.2493	984.74	328.25
13	264531	13.2%	24.1	3.5	0.2811	1110.35	317.24
14	307161	15.4%	24.7	4	0.3247	1282.57	320.64
15	344312	17.2%	24.6	4	0.3012	1189.74	297.44
16	377084	18.9%	25.1	4	0.2664	1052.28	263.07
17	417844	20.9%	25.3	4	0.2684	1060.18	265.05
18	453759	22.7%	25.4	4	0.282	1113.90	278.48
19	507440	25.4%	25.9	4	0.2783	1099.29	274.82
20	544540	27.2%	25.7	4	0.2565	1013.18	253.29
21	580987	29.0%	25.5	4	0.253	999.35	249.84
22	621550	31.1%	24.2	4	0.2382	940.89	235.22
23	670512	33.5%	24.7	4	0.2429	959.46	239.86
24	693834	34.7%	24.9	4	0.2294	906.13	226.53
25	726215	36.3%	25.1	4	0.2298	907.71	226.93
26	776347	38.8%	26.5	4	0.2294	906.13	226.53
27	825454	41.3%	26.2	4.5	0.2483	980.79	217.95
28	875764	43.8%	25.7	4	0.2125	839.38	209.84

29	1048608	52.4%	24.8	4	0.108	426.60	106.65
30	1264177	63.2%	26.1	4	0.0914	361.03	90.26
31	1660077	83.0%	25.6	4	0.0941	371.70	92.92
32	1821112	91.1%	24.9	4	0.0925	365.38	91.34

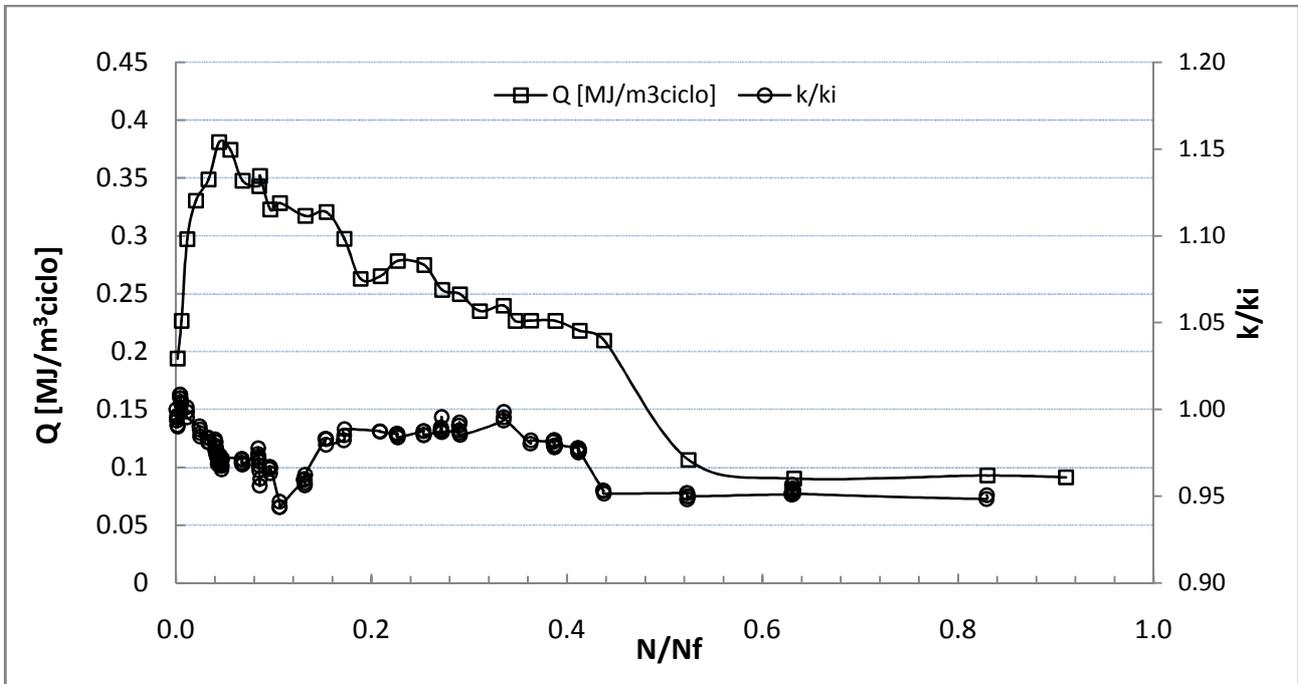


Figura H.4.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidezza del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-2_04



Figura H.4.2 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-2_04

Appendice I: RISULTATI DELLE PROVE ASSIALI A RAPPORTO DI CICLO R=-1.5

In questa appendice sono riportati i risultati dei provini lisci sottoposti a prove di fatica assiale a rapporto di ciclo R=-1.5.

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 adimensionalizzato N/N_f e l'andamento della rigidezza adimensionalizzata K/K_i sempre in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N/N_f .

Per questo rapporto di ciclo e per questa geometria si sono testati 5 provini. La geometria dei provini è riportata in Figura I.1 in cui la luce di inflessione libera è 82.5mm ottenuta riducendo il diametro del provino in prossimità degli afferraggi a $\varnothing 16$ mm.

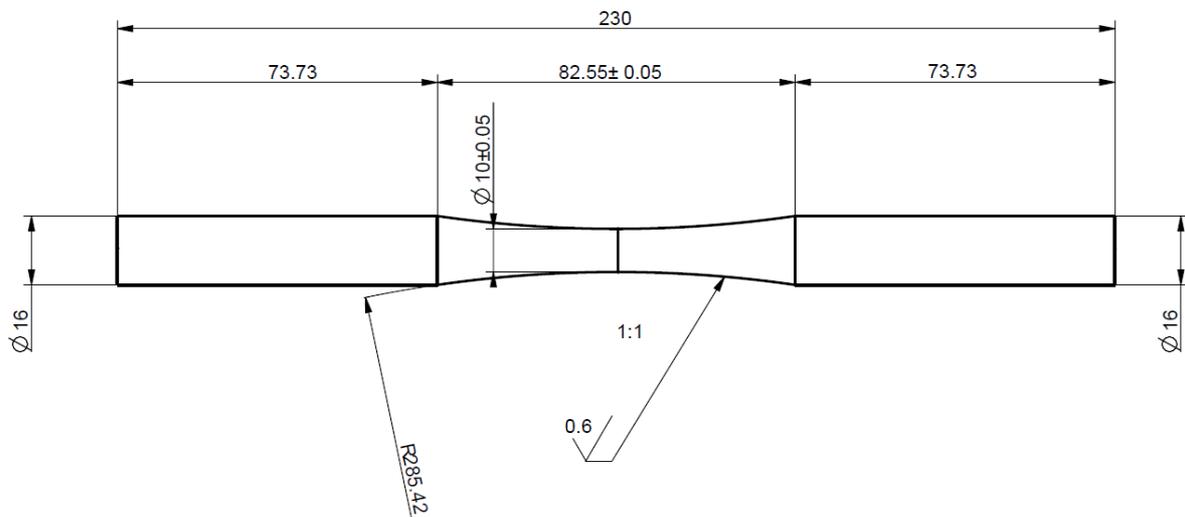


Figura I.1 Geometria dei provini utilizzata in questa campagna di prove a rapporto di ciclo R-1.5 e realizzati in acciaio AISI 304L trafilato a freddo

PROVA : Traz_liscio_R-1.5_01				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1.5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =21.265 kN	F _{MIN} = -31.89 kN	F _{MED} =-5.3 kN	F _a =26.5 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}}= 300 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}}= -450 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}}= -75 \text{ MPa}$	$\sigma_a= 375 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCHINA A: 12010 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 1383.18 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2556	21.3%	25.3	1	0.3564	1407.78	1407.78
2	9312	77.5%	24.7	1	0.3442	1359.59	1359.59

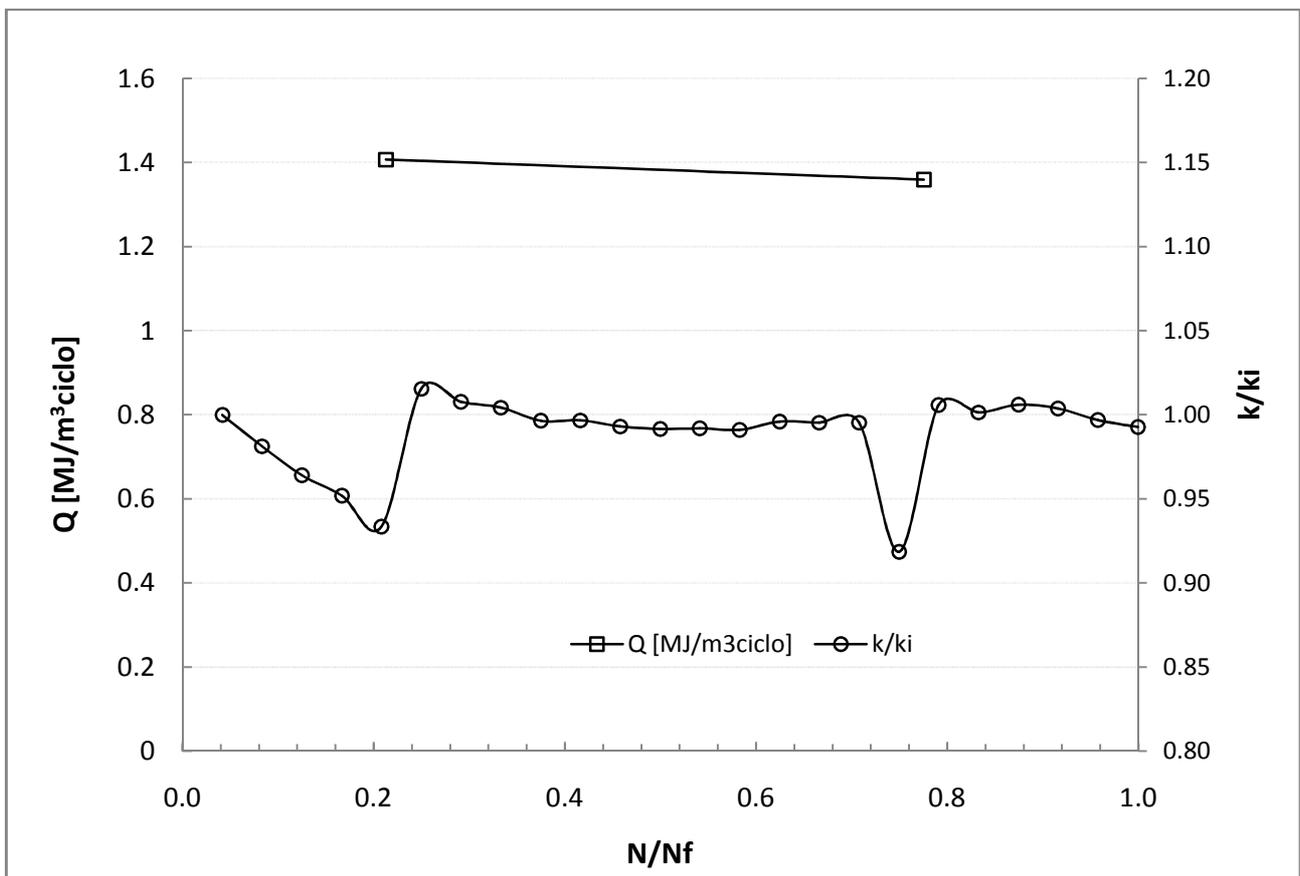


Figura I.1.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-1.5_01

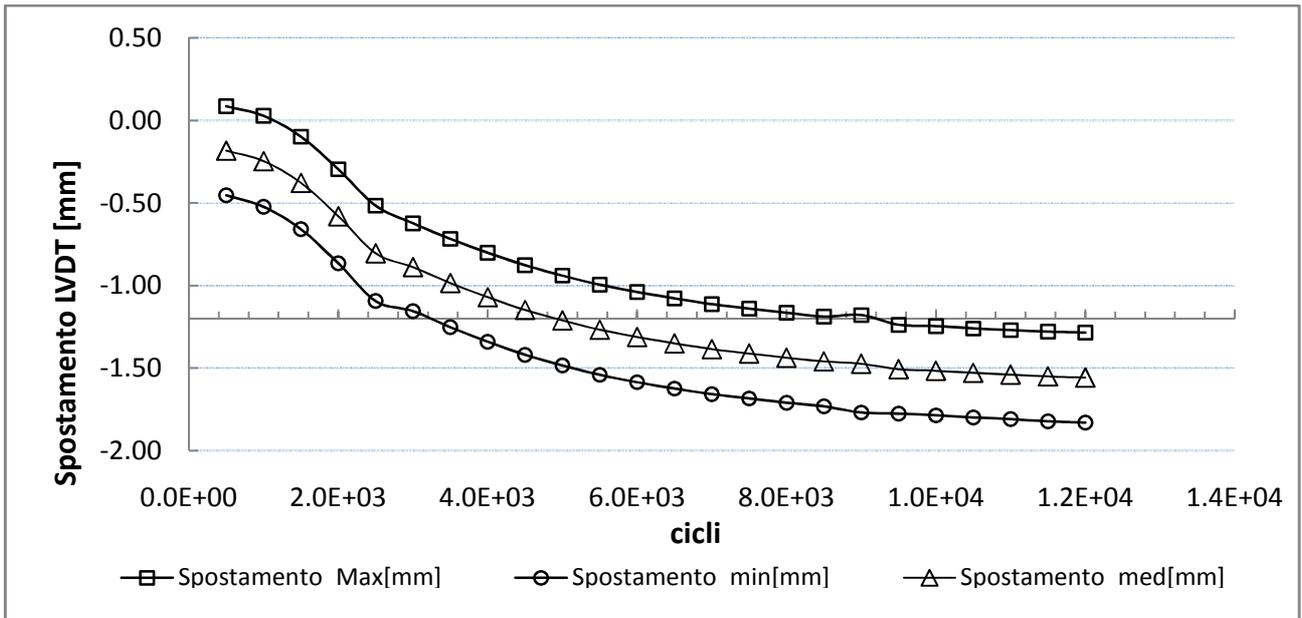


Figura I.1.2 Andamento dello spostamento massimo, minimo e medio in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-1.5_01

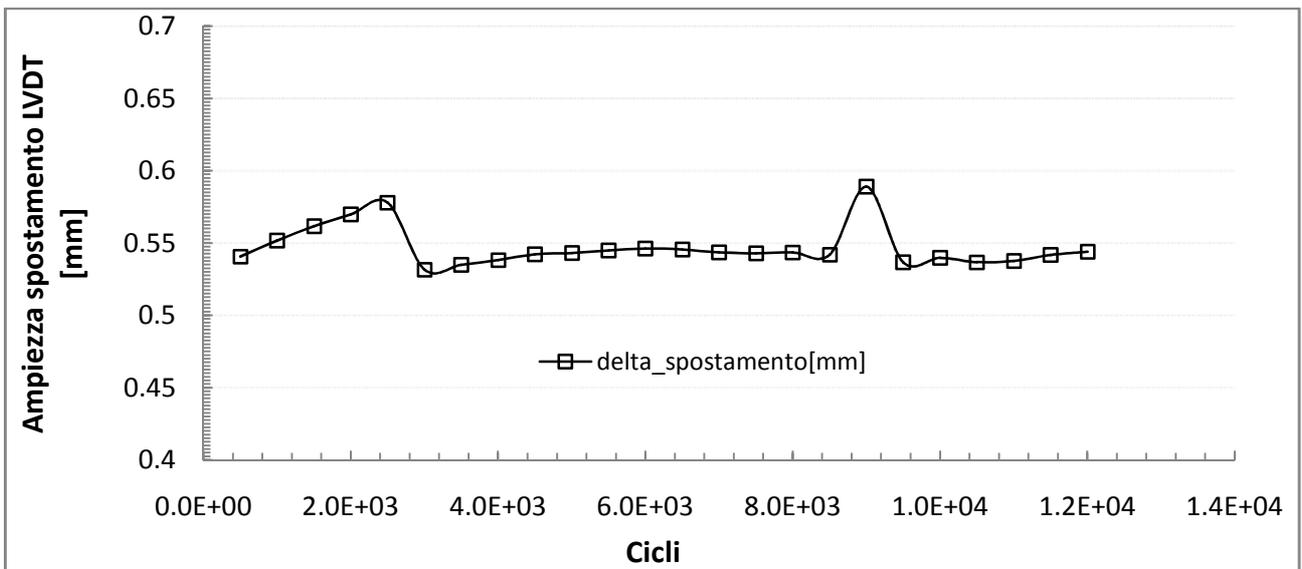


Figura I.1.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisita con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-1.5_01



Figura I.1.4 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-1.5_01

PROVA : Traz_liscio_R-1.5_02				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1.5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =20.131 kN	F _{MIN} = -30.19 kN	F _{MED} =-5.032 kN	F _a =25.16 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 284 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -426 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -71 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 355 \text{ MPa}$

ROTTO A: 104074 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 700 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	934	0.9%	24.9	1	0.1237	488.62	488.62
2	4204	4.0%	25.5	1	0.1644	649.38	649.38
3	12847	12.3%	24.6	1.5	0.3708	1464.66	976.44
4	28491	27.4%	23.1	1.5	0.3696	1459.92	973.28
5	42224	40.6%	23.5	1.5	0.31	1224.50	816.33

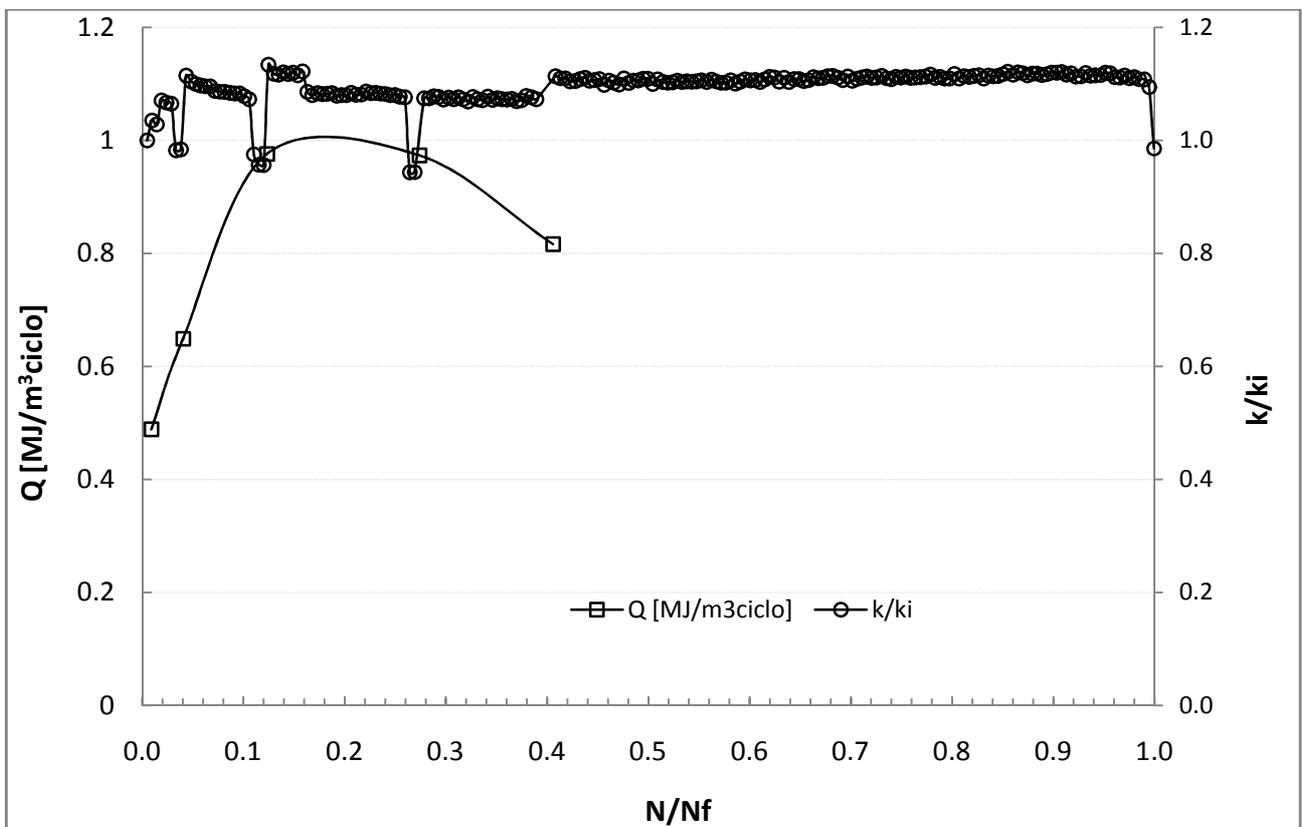


Figura I.2.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-1.5_02

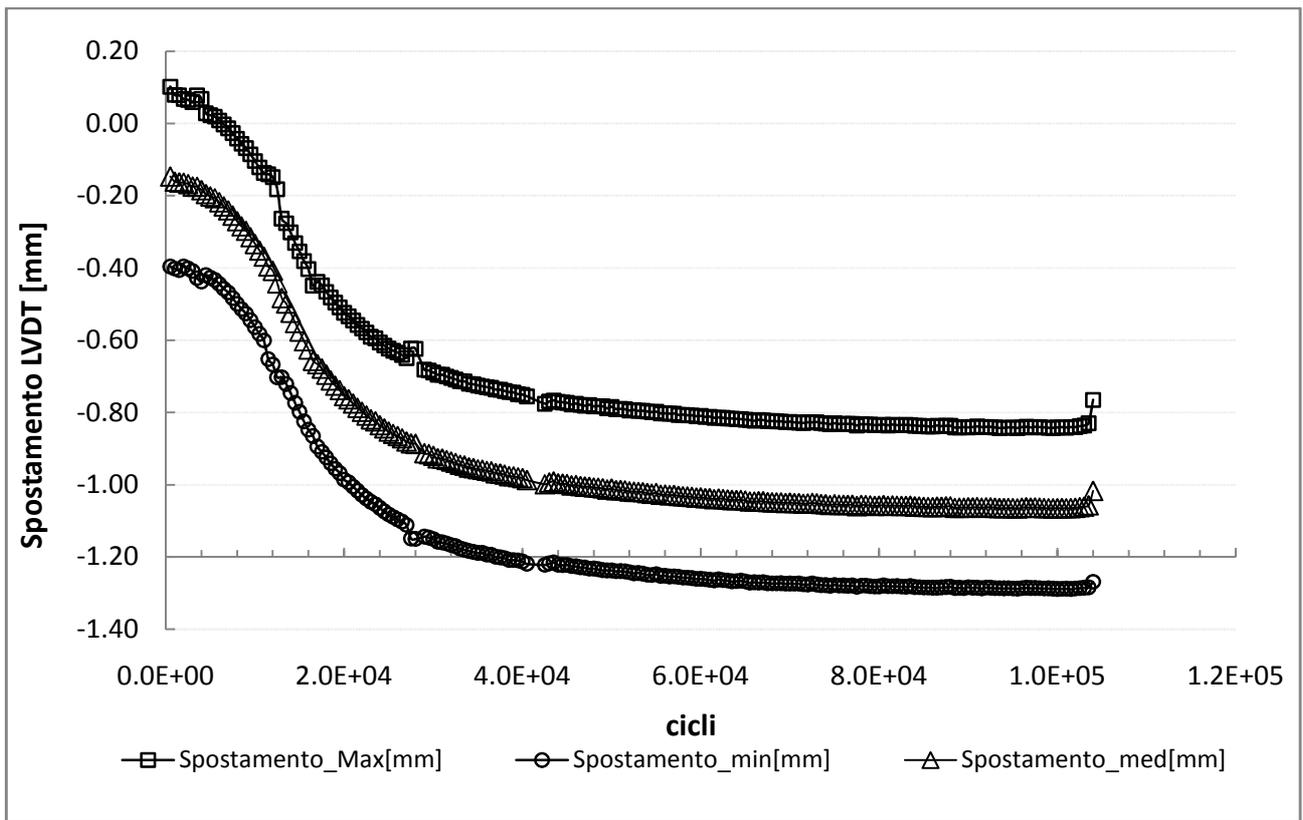


Figura I.2.2 Andamento dello spostamento massimo, minimo e medio in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-1.5_02

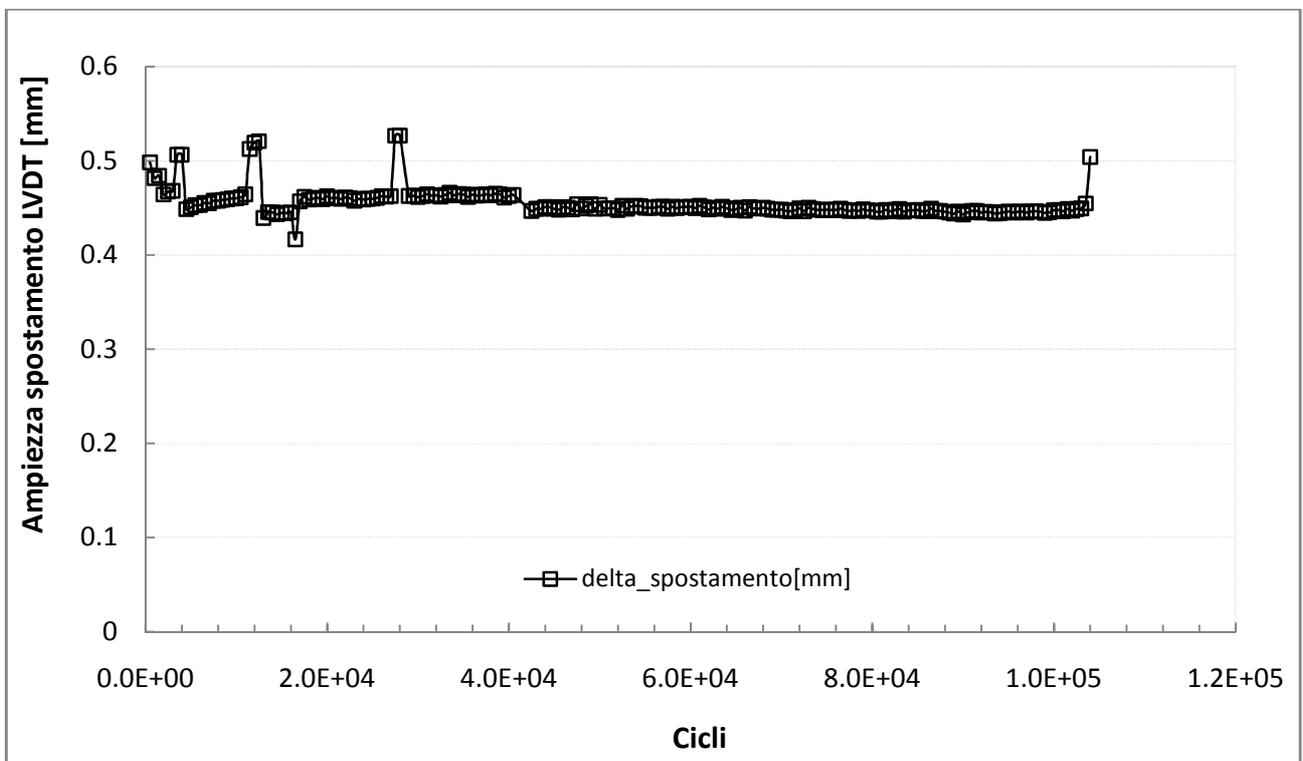


Figura I.2.3 Andamento dell'ampiezza di spostamento acquisita con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-1.5_02

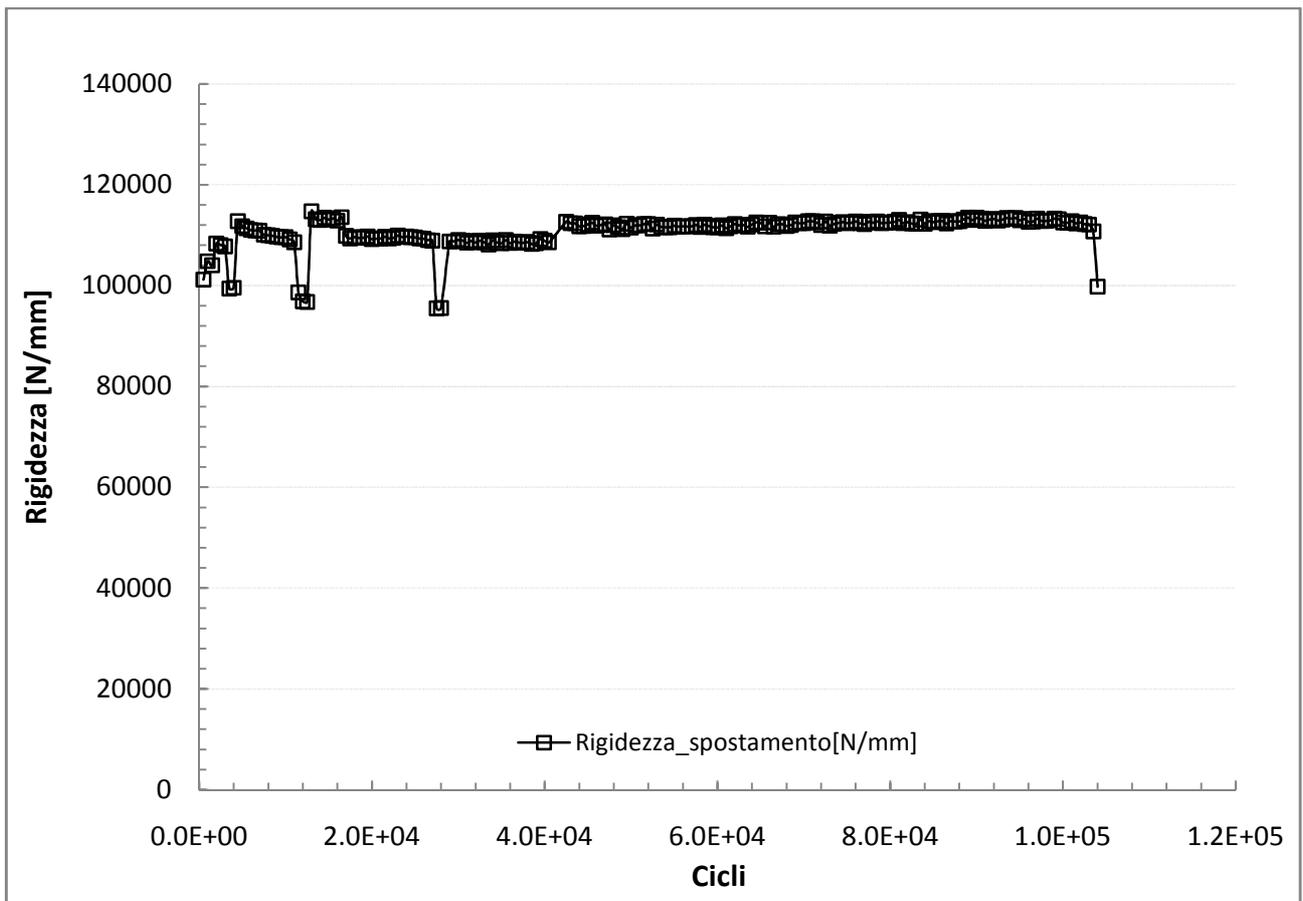


Figura I.2.4 Andamento della rigidezza del provino calcolata a partire dall'ampiezza di spostamento misurata con il sensore LVDT in funzione del numero di alternanze per il provino Traz_liscio_R-1.5_02



Figura I.2.5 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R-1.5_02

PROVA : Traz_liscio_R-1.5_04				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1.5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =19.847 kN	F _{MIN} = -29.771 kN	F _{MED} =-4.96 kN	F _a =24.81 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 280 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -420 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -70 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 350 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCHINA A: 166909 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 633.41 \text{ [kJ/m}^3\text{ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1974	1.2%	22.0	2	0.2324	917.98	458.99
2	7504	4.5%	22.3	2	0.2806	1108.37	554.19
3	14123	8.5%	22.7	2.5	0.5453	2153.94	861.57
4	22545	13.5%	23.4	2	0.508	2006.60	1003.30
5	34869	20.9%	23.2	2	0.4462	1762.49	881.25
6	56274	33.7%	23.7	2	0.4143	1636.49	818.24
7	84817	50.8%	24.7	1.5	0.2729	1077.96	718.64
8	103776	62.2%	23.9	1.5	0.2387	942.87	628.58
9	141463	84.8%	23.7	1.5	0.205	809.75	539.83
10	149421	89.5%	23.1	2.5	0.187	738.65	295.46

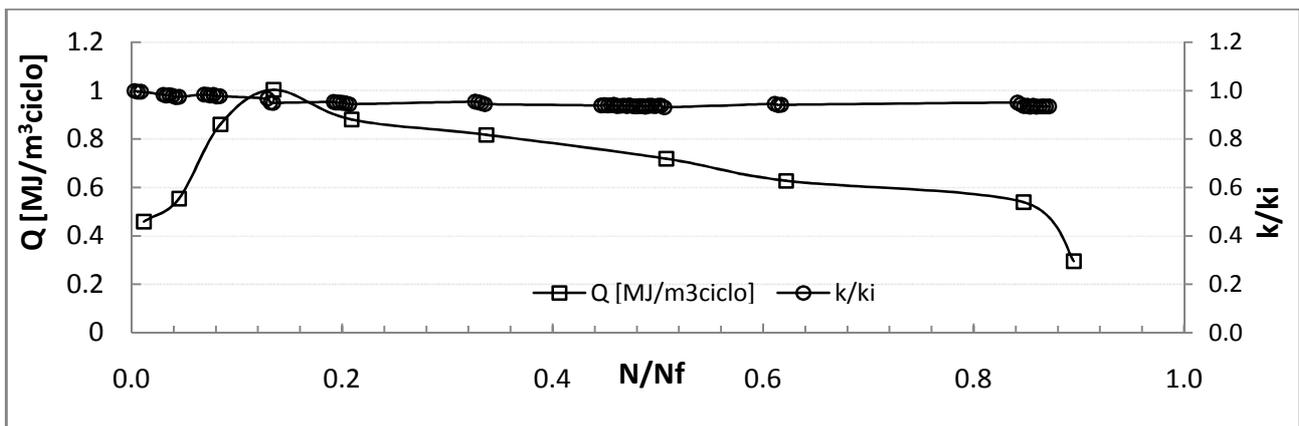


Figura I.4.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidità del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-1.5_04



Figura I.1.4 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-1.5_01

PROVA : Traz_liscio_R-1.5_05				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1.5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =19.563 kN	F _{MIN} = -29.345 kN	F _{MED} =-4.89 kN	F _a =24.45 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 276 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -414 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -69 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 345 \text{ MPa}$

ROTTA A: 182374 cicli
Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 694.3 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5168	2.8%	24.2	2	0.3734	1474.93	737.47
2	22209	12.2%	24.4	1.5	0.398	1572.10	1048.07
3	38272	21.0%	25.2	1.5	0.355	1402.25	934.83
4	58702	32.2%	25.6	1.5	0.3021	1193.30	795.53
5	74689	41.0%	25.3	1.5	0.2672	1055.44	703.63
6	93127	51.1%	24.4	1.5	0.2462	972.49	648.33
7	104717	57.4%	24.2	1.5	0.2305	910.48	606.98
8	146082	80.1%	24.5	1.5	0.2192	865.84	577.23

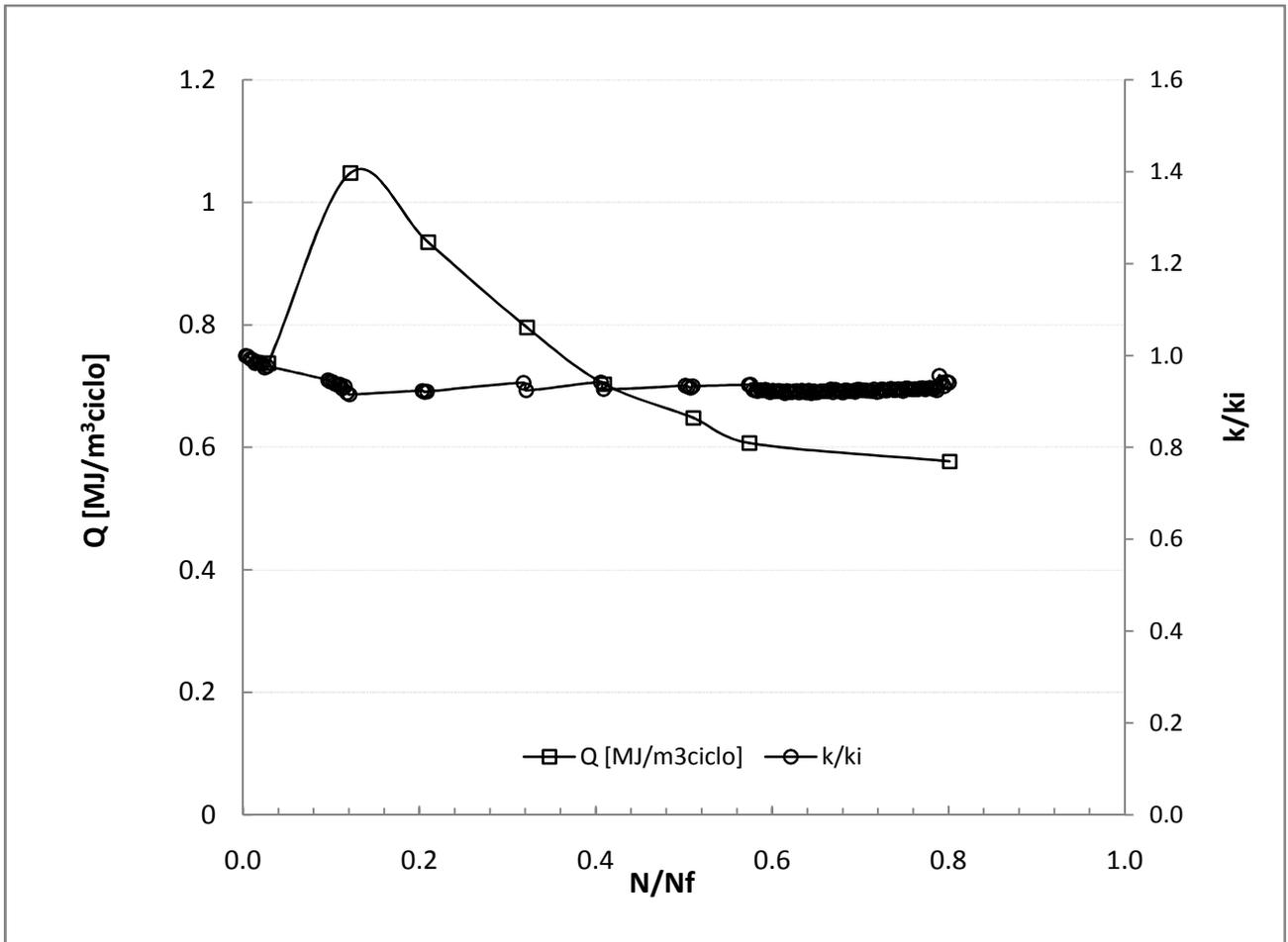


Figura I.5.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidezza del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-1.5_05



Figura I.5.2 Superfici di frattura e vista laterale per il provino Traz_liscio_R-1.5_05

PROVA : Traz_liscio_R-1.5_06				
RAPPORTO DI CICLO	R = -1.5			
MATERIALE	AISI304L	$\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	$c_s = 0,5 \text{ kJ/kgK}$	
GEOMETRIA	L = 230mm	l = 82.55mm	$\phi_{\text{nett}} = 9.5\text{mm}$	A = 70.88mm ²
CARICHI APPLICATI	F _{MAX} =18.713 kN	F _{MIN} = -28.069 kN	F _{MED} =-4.678 kN	F _a =23.391 kN
TENSIONI APPLICATE	$\sigma_{\text{MAX}} = 264 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MIN}} = -396 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{MED}} = -66 \text{ MPa}$	$\sigma_a = 330 \text{ MPa}$

RIMOSSO DALLA MACCINA A: 2000000 cicli

Q valutato al 50% della vita: $Q_{50\%} = 286.5 \text{ [kJ/m}^3 \text{ ciclo]}$

n° raff	cicli	% vita	Temp [°C]	f [Hz]	grad [°C/s]	H [kW/m ³ ciclo]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	5047	0.3%	25.2	2	0.1639	647.41	323.70
2	18387	0.9%	26.4	2	0.1972	778.94	389.47
3	40587	2.0%	26.6	2	0.2501	987.90	493.95
4	70758	3.5%	26.6	1.5	0.2066	816.07	544.05
5	110785	5.5%	26.2	1.5	0.198	782.10	521.40
6	144804	7.2%	26.1	1.5	0.1883	743.79	495.86
7	171407	8.6%	25.8	1.5	0.1784	704.68	469.79
8	195959	9.8%	25.2	1.5	0.1686	665.97	443.98
9	237212	11.9%	23.7	1.5	0.1624	641.48	427.65
10	284951	14.2%	23.4	1.5	0.1493	589.74	393.16
11	334690	16.7%	23.2	1.5	0.1476	583.02	388.68
12	391079	19.6%	23.7	1.5	0.1406	555.37	370.25
13	461460	23.1%	22.9	2	0.1682	664.39	332.20
14	516865	25.8%	24.1	2	0.16815	664.19	332.10
15	564386	28.2%	24.1	2	0.1596	630.42	315.21
16	587807	29.4%	24.1	2	0.1576	622.52	311.26
17	646653	32.3%	23.1	2.5	0.1941	766.70	306.68
18	701680	35.1%	23.8	2.5	0.1764	696.78	278.71
19	800243	40.0%	25.4	2.5	0.1758	694.41	277.76
20	909153	45.5%	26.0	2.5	0.1667	658.47	263.39
21	1998317	99.9%	21.9	4.45	0.2395	946.03	212.59

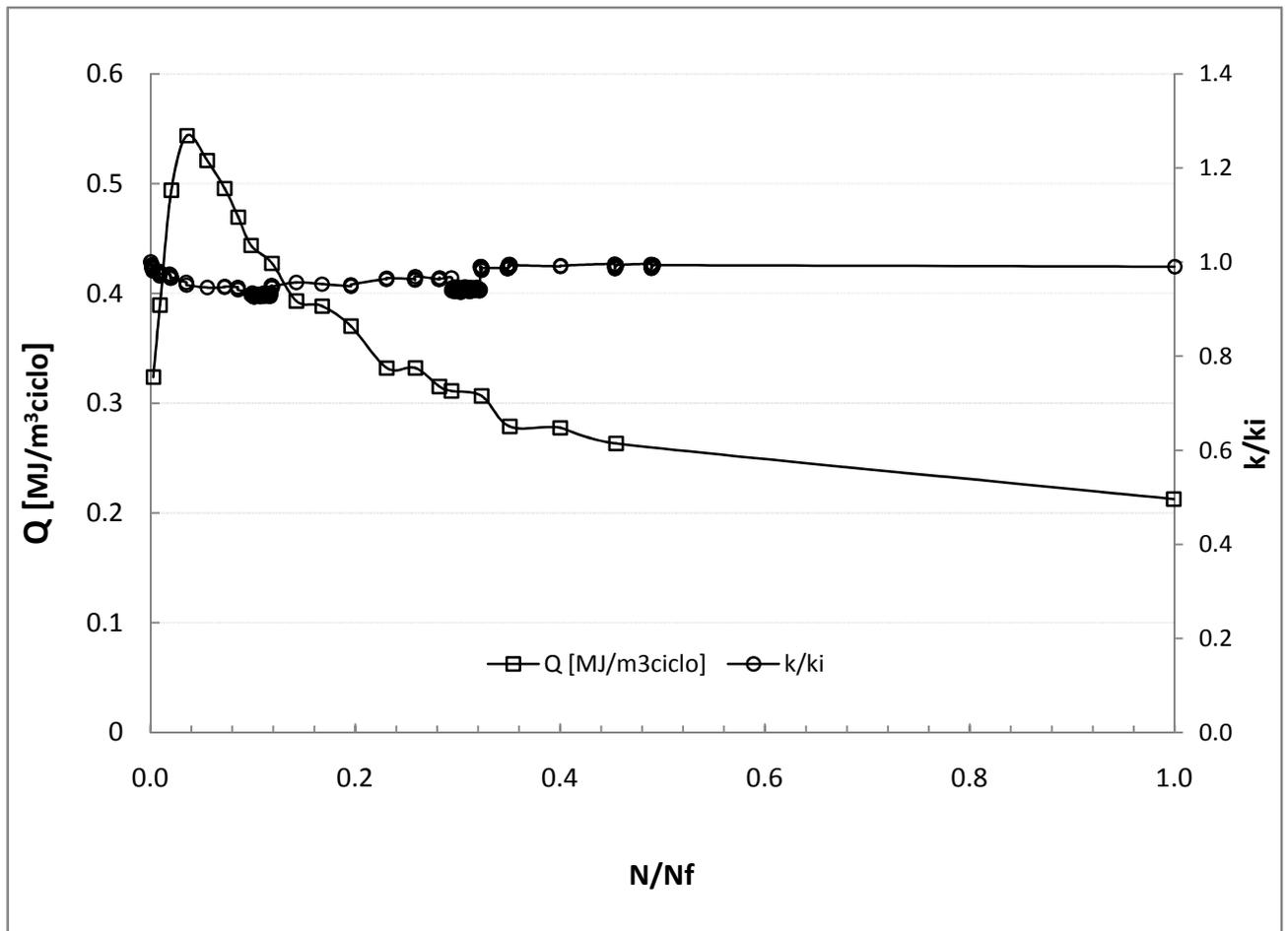


Figura I.6.1 Andamento della densità di energia dissipata e della rigidezza del provino in funzione della frazione di vita per il provino Traz_liscio_R-1.5_06

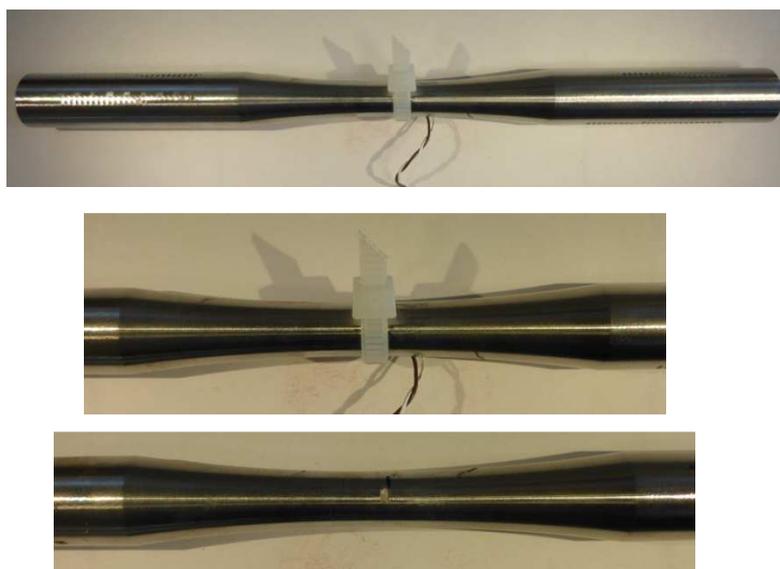


Figura I.6.2 Dettaglio della luce libera ad inflessione per il provino Traz_liscio_R-1.5_06

**Appendice J: PROCEDURE PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE A FATICA
ASSIALE**

MATERIALE

Il materiale utilizzato per le varie prove è l'acciaio inossidabile AISI 304L che è stato fornito da Acciaierie Valbruna S.p.A. in barre cilindriche trafilate a freddo di diametro $\varnothing = 25\text{mm}$ con tolleranza dimensionale h9 e con lunghezza di 6 metri.

Si tratta di un acciaio inossidabile austenitico alto legato la cui composizione chimica prevista, riportata dalla stessa casa fornitrice, è presentata in tabella J.1.

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

Tabella J.1: Elementi di lega per l'acciaio AISI 304 L fornite da Acciaierie Valbruna Spa

Le caratteristiche meccaniche e fisiche fornite dal produttore dopo un test allo stato di fornitura per questo materiale sono riportate in tabella J.2.

TEST ALLO STATO DI FORNITURA									
Temp °C	Snerv. Rp 0,2% N/mm ²	Snerv. Rp 1% N/mm ²	Resist. Rm N/mm ²	Allung. A5 E 4d % %		Strizione Z RA % %		Resilienza KV J	Durezza HB J
20	468	521	691	43	45	52	52	168 174 175	230

Tabella J.2: Proprietà fisiche e meccaniche per l'acciaio AISI 304 L allo stato di fornitura, eseguite da Acciaierie Valbruna Spa

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 5.32 Figura 5.33 Figura 5.34 Figura 5.35 o alla fresa a controllo numerico per ottenere la geometria visibile in Figura 5.36

La particolare forma a clessidra, per i provini lisci, è stata scelta per la possibilità di poter prevedere la sezione di innesco della cricca. Un raggio di raccordo così elevato $R=285.42\text{mm}$ 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 oltre a scongiurare una possibile rottura dovuta dall'effetto d'intaglio generato dalla chiusura delle ganasce sul provino.

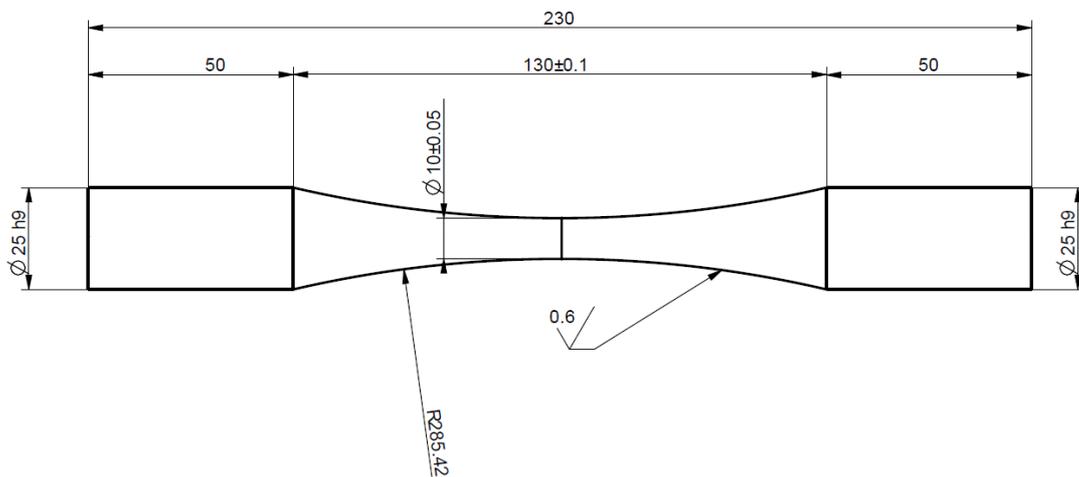


Figura 5.32: Geometria provino liscio per prove a fatica assiale a $R=0.5$, $R=-1$, $R=0.1$

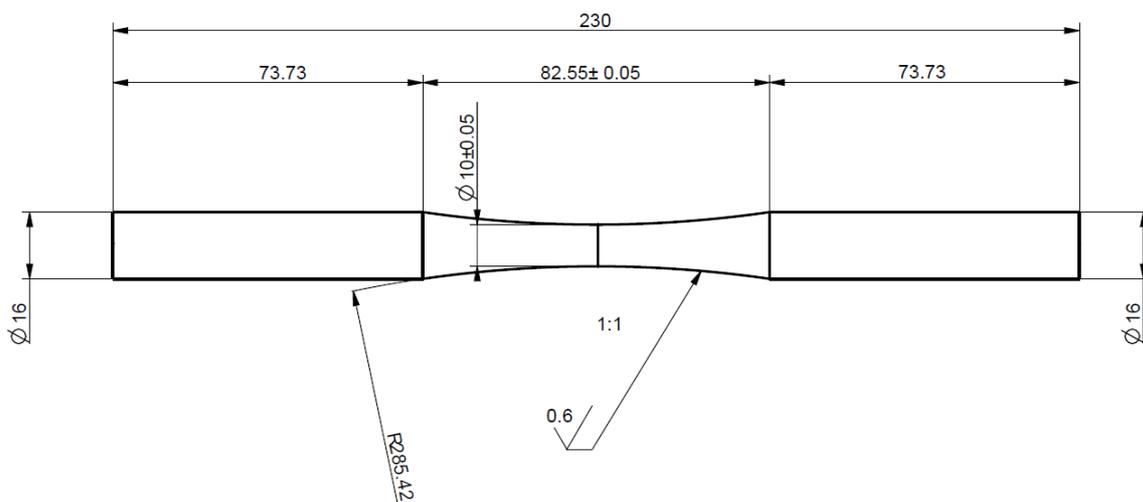


Figura 5.33: Geometria provino liscio per prove a fatica assiale a $R=-2$ e $R=-1.5$

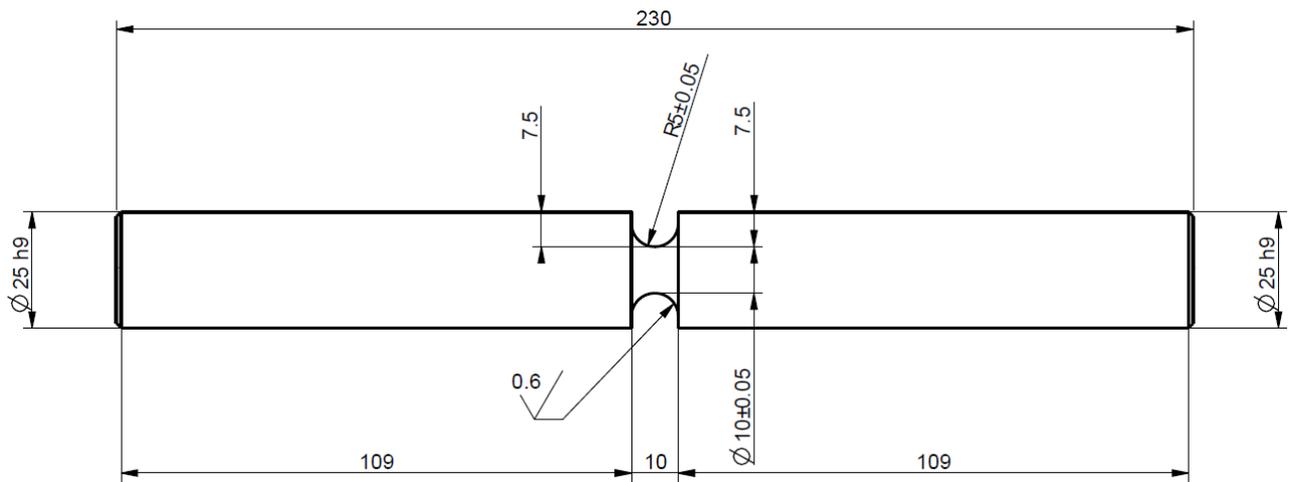


Figura 5.34: Geometria provino intagliato U5AXSY per prove a fatica assiale ad R=-1

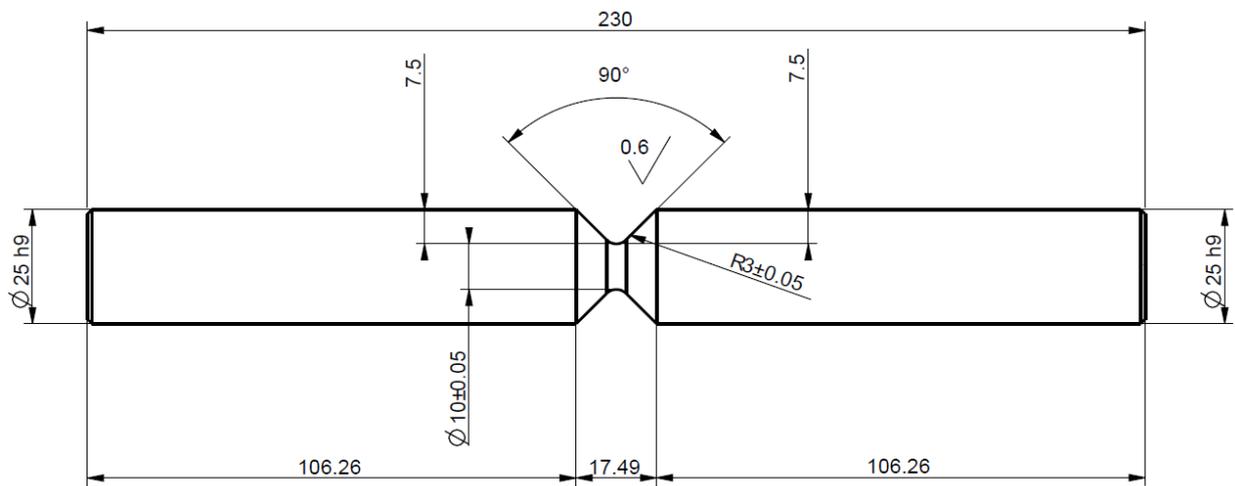


Figura 5.35: Geometria provino intagliato V3AXSY per prove a fatica assiale ad R=-1

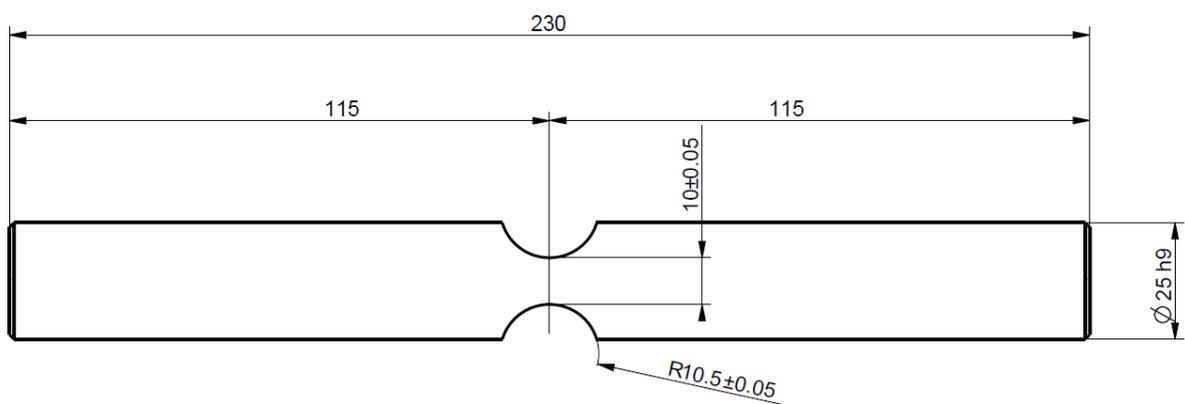


Figura 5.36: Geometria provino intagliato U10.5NAXSY per prove a fatica assiale ad R=-1

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 la massima generazione termica. Per far ciò si utilizzano delle termocoppie tipo T1 rame-costantana (Codice RS 363-0402) che vengono incollate direttamente alla superficie del provino attraverso l'utilizzo di colla epossidica conduttiva (Codice RS 186-3616).



Figura 5.37: Colla epossidica conduttiva caricata con argento (a destra l'adesivo e a sinistra l'indurente)

Le specifiche tecniche richiedono che la preparazione della colla sia fatta utilizzando in parti uguali adesivo e indurente cioè, una miscela al 50% in volume di una pasta adesiva ed al 50% in volume di pasta indurente. Una volta preparata la miscela, la si deve mescolare per almeno 5 minuti.

Successivamente va preparata la termocoppia tagliandola a misura rispetto le necessità (solitamente 50cm) , allineando i due fili e spelando le estremità per circa 4-3.5mm come mostrato in Figura 5.38.

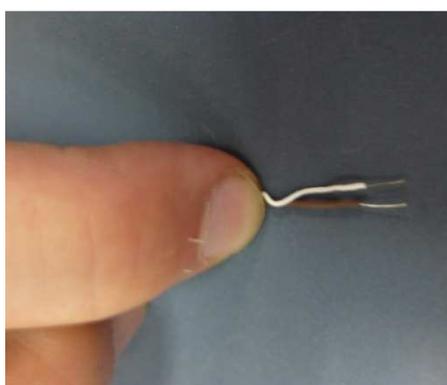


Figura 5.38:Taglio e spelatura dei fili costituenti la termocoppia tipo T rame costantana

Successivamente, recuperare il provino su cui applicare la termocoppia, sgrassare il provino con detergente o alcool, segnare con un pennarello indelebile la mezzeria della cava (se il provino è intagliato) o la semilunghezza del provino (se provino liscio) e appoggiare i due fili costituenti la termocoppia; quindi vincolarli al provino con nastro isolante come mostrato in Figura 5.39.



Figura 5.39: Termocoppia vincolata al provino

Successivamente flettere e curvare le due estremità libere della termocoppia al fine di farle accoppiare bene alla superficie del provino. Inoltre le due estremità libere vanno accorciate in modo tale che la loro lunghezza sia esattamente quella che verrà inglobata della colla.

Con gli strumenti presenti nella confezione della colla, o con qualche utensile molto fine e allungato, creare una piccola pallina di colla precedentemente mescolata e applicarla su provino in modo tale da vincolare le due estremità libere della termocoppia. Costipare e creare pressione sullo spot di colla appena applicata in modo tale che la le due estremità della termocoppia risultino particolarmente adese al provino. Di seguito è riportata la Figura 5.40 a cui è stato tolto il mastro isolante nero per far capire dove finisce la parte isolante dei due fili e dove inizia lo spot di colla.

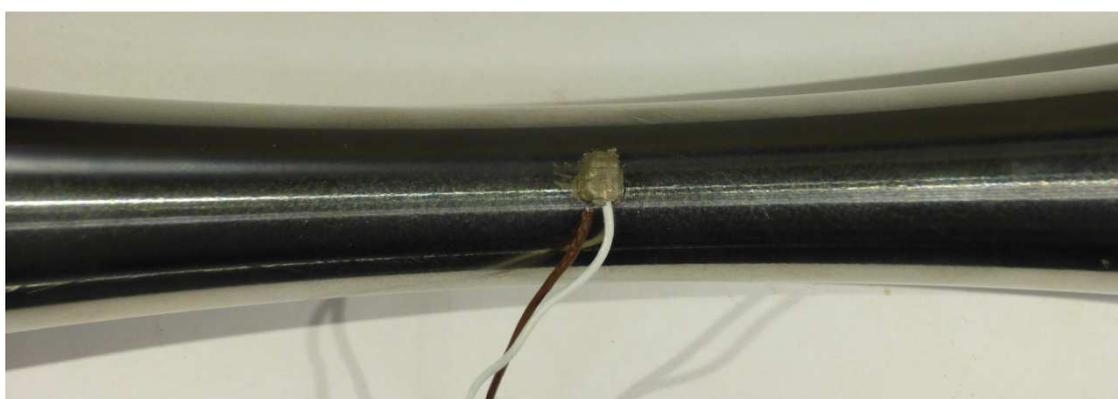


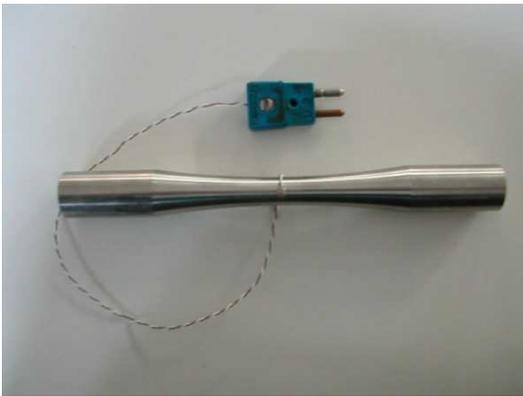
Figura 5.40: termocoppia vincolata al provino tramite spot di colla conduttiva caricata conargento

Successivamente lasciar riposare la colla per 24 ore a temperatura ambiente di 24°C oppure utilizzare un fon industriale e riscaldare la colla a 80-100°C per 15-20minuti. Per far quest'ultima operazione, collegare il provino cablato di connettore all'Agilent HP e monitorare la temperatura al fine di evitare di far superare la temperatura del provino oltre i 100°C.

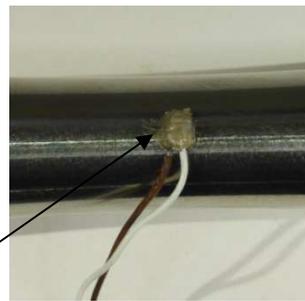
Una volta che lo spot di colla risulta ben reticolato e quindi molto rigido al tatto, spelare l'atra estremità della termocoppia e collegare al connettore/spina che trasferirà i segnali di tensione al dispositivo di acquisizione Agilent Technologies HP 34970A rispettando la polarità:

marrone → pin positivo

bianco → pin negativo



Connettore di collegamento all'acquisitore Agilent



Incollaggio termocoppia

Figura 5.41: Provino munito di termocoppia per il monitoraggio della temperatura

In fine verificare la continuità con il multimetro digitale e applicare una fascetta di plastica per cablaggi elettrici per proteggere lo spot di colla da eventuali urti/collisioni o semplicemente smorzare eventuali disturbi (o folate di vento indesiderate) acquisite durante la fase dei raffreddamenti.

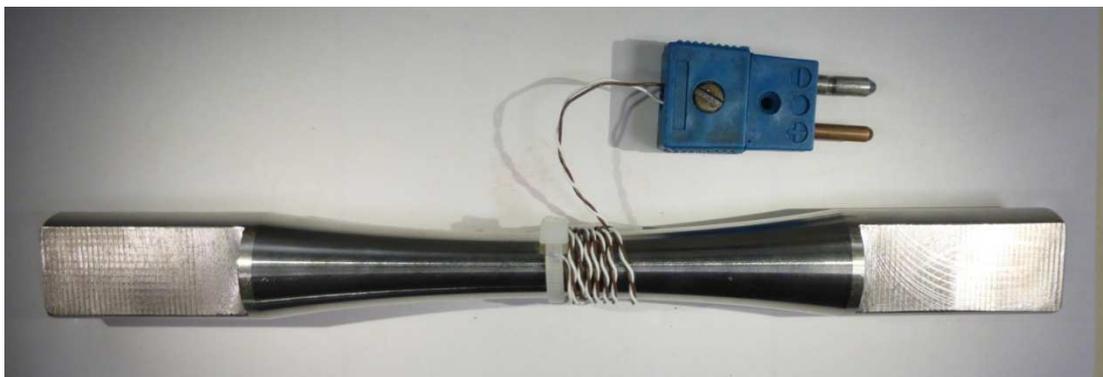


Figura 5.42: provino termocoppiato e pronto all'uso

DESCRIZIONE DELLA MACCHINA MFL ASSIALE

Le prove a fatica vengono condotte su macchina MFL assiale servo idraulica con portata massima di 250kN. Per il lavoro eseguito è stato necessario portare in prossimità della macchina tutte le attrezzature indispensabili per l'esecuzione delle prove e che sono indicate in Figura 5.43 ed elencate di seguito.

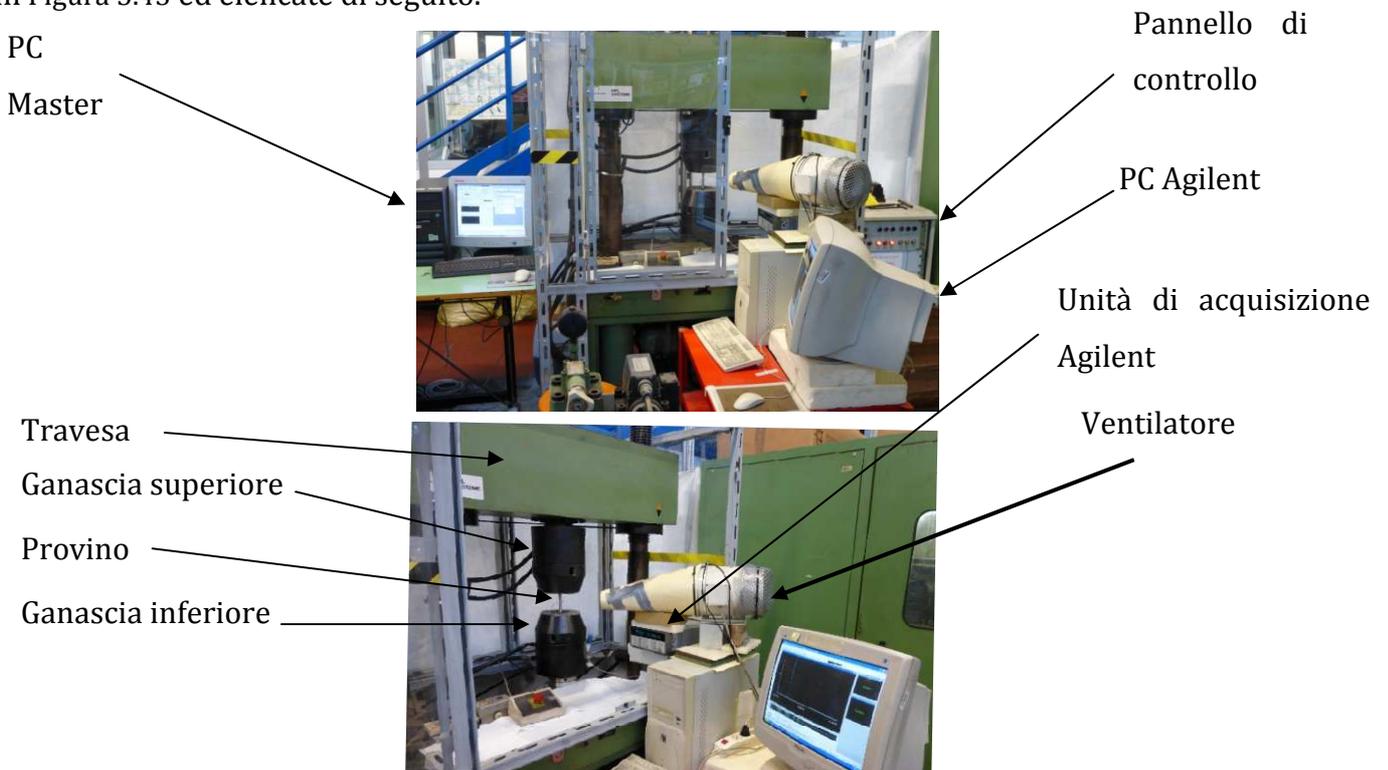


Figura 5.43: Layout della postazione di lavoro per prove a fatica assiale

- PC Master che utilizza il software MTS Station Manager per il controllo della macchina MFL assiale;
- PC e acquirente Agilent che utilizza il software Agilent BenchLink Data Logger per l'acquisizione della temperatura del provino e dell'ambiente tramite termocoppia;
- Pannello di controllo pompe di alimentazione dei circuiti oleodinamici (alimentano sia la macchina MFL assiale, sia la macchina MFL torsionale). Il pannello di controllo è lo stesso per entrambe le macchine e proprio da qui è possibile alimentare uno dei due circuiti attraverso i tasti di commutazione TR1 e TO1 indicati in figura A.1.5.2b. Si può quindi utilizzare una sola macchina alla volta e non entrambe contemporaneamente.
- Ventilatore per il controllo della temperatura del provino qualora il carico sia applicato ad alte frequenze;
- Cavo trasmissione dati dall'estensometro al software MTS Station Manager;
- Luce ad alta intensità per controllare la superficie del provino

La macchina di prova MFL assiale è composta principalmente da due ganasce coassiali ad asse verticale di cui una fissa e l'altra mobile. La ganasca fissa è collegata alla trave superiore che, attraverso due accoppiamenti a chiocciola, permettono la traslazione in direzione

verticale. La ganascia inferiore è invece fissata ad un cilindro idraulico ed è la parte mobile che applica effettivamente i carichi di prova a diverse frequenze alla servovalvola Moog.

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

→ Pannello di controllo pompe di alimentazione del circuito oleodinamico:

Tasti di commutazione MFL trazione- torsione	Pulsante di accensione pompa ausiliari	Pulsante di spegnimento pompe	Pulsante di accensione pompe circuito principale
Spia di superamento livello minimo dell'olio	Spia di superamento temperatura	Spia di accensione pompa ausiliari	Spia di apertura dell'accoppiamento a chiocciola (lampeggiante)
Spia di superamento temperatura minima dell'olio (+40°C)			Spia di accensione pompe circuito principale



Figura 5.44: Pannello di controllo pompe idrauliche

- Commutatore "locale-remoto": è posto accanto al pannello di controllo pompe idrauliche e permette di comandare la macchina manualmente (locale) oppure attraverso il software MTS Station Manager (remoto)



Figura 5.45: Commutatore strategia di controllo MFL

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 5.46, la temperatura dell'olio che circola attraverso i circuiti deve essere raffreddata in quanto non può superare i $+70^{\circ}\text{C}$. 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 ($+40/+70^{\circ}\text{C}$). Inoltre nella sala è presente un ventilatore di aspirazione che ha la funzione di smaltire il calore prodotto dalle pompe in esercizio e le esalazioni d'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

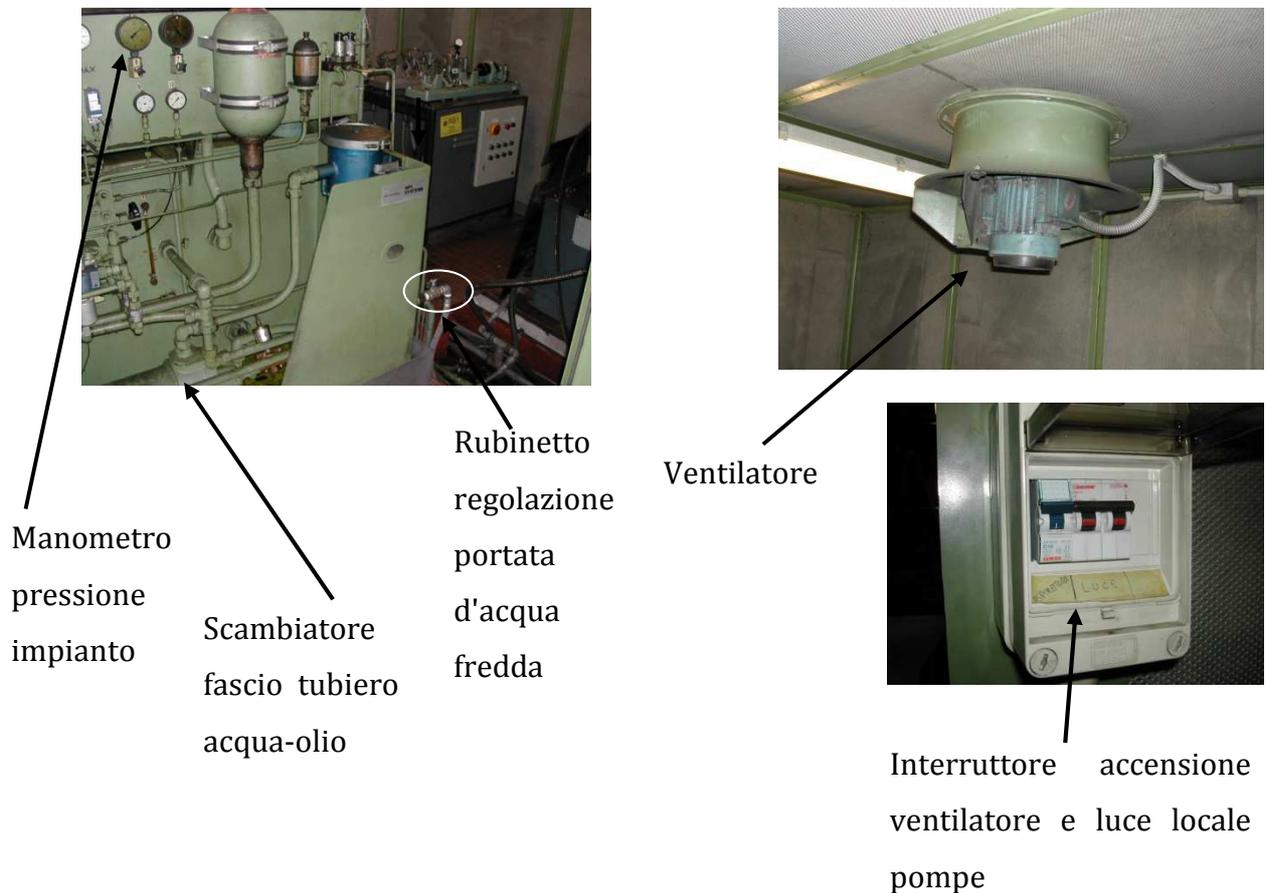


Figura 5.46: Locale pompe

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 5.47.

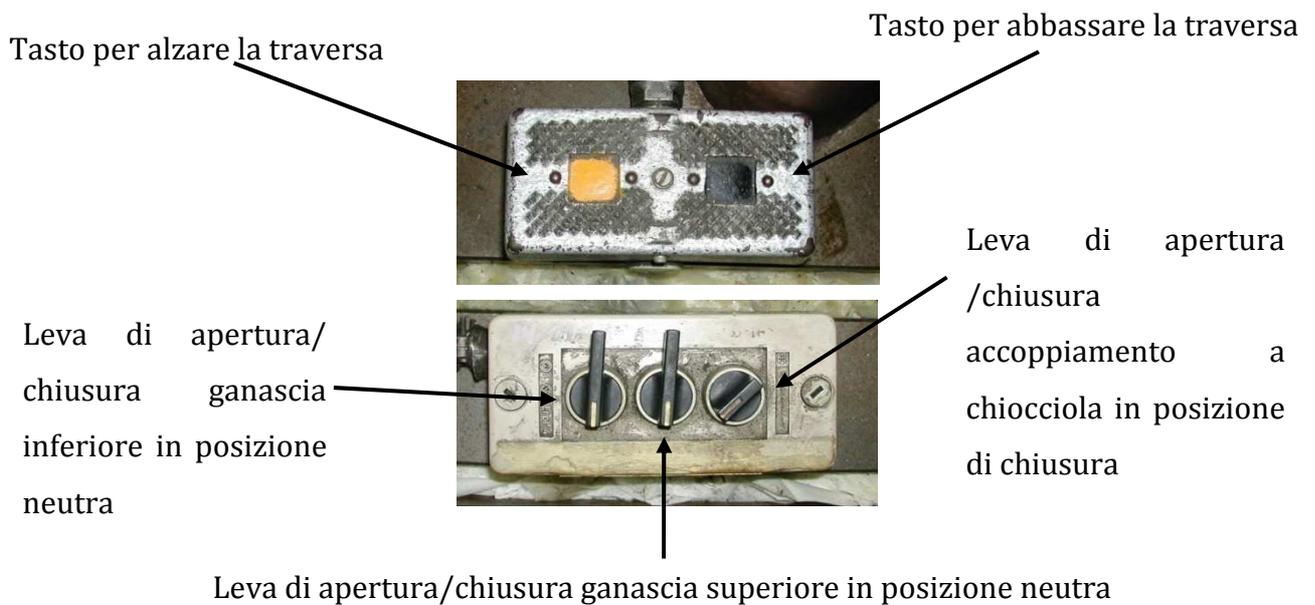


Figura 5.47: Pedaliera comando della traversa e leve per il comando delle ganasce

La leva di apertura dell'accoppiamento a chiocciola e del tipo on/off (la posizione di chiusura è rappresentata in Figura 5.47). 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 5.47) 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.

Al fine di limitare le perdite d'olio dalla macchina è stato inserito un rubinetto per isolare la macchina MFL assiale dal locale pompe quando questa non sia in esercizio o qualora si stia utilizzando la macchina MFL torsionale. Il rubinetto è posto a livello del pavimento ed è illustrato nella Figura 5.48. E' prioritario e fondamentale ricordarsi che, prima di qualsiasi azione posta all'attivazione della macchina MFL assiale, lo si debba aprire! Viceversa , qualora si debba spegnere la macchina MFL assiale, il rubinetto in questione lo si deve chiudere!!



Figura 5.48: Rubinetto per locale pompe e macchina MFL assiale

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 5.43, attraverso il software Station Manager che viene avviato direttamente entrando nella cartella MTS TestStar presente sul desktop. In questa sezione si vogliono 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, controllo di forza e controllo in deformazione tramite l'ausilio dell'estensometro.



Detectors : consente di impostare i limiti di spostamento, di forza e deformazione entro i quali la macchina deve lavorare. Se il segnale di forza, di spostamento o di deformazione (provenienti rispettivamente dalla cella di carico, dal sensore di spostamento(LVDT) della macchina e dall'estensometro), 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.

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



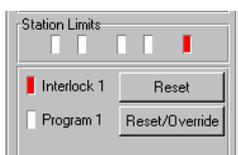
Program run : è il tasto di avvio della prova. La macchina inizia ad applicare progressivamente il carico o lo spostamento imposti alla frequenza voluta.



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/Ovverride : 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/Ovverride 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/Ovverride. 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 il tasto a destra deve essere a luce verde e fissa (non lampeggiante) Figura 5.44.

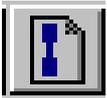
Altri icone importanti vengono riportate di seguito:



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 oppure si può diagrammare l'andamento della forza applicata rispetto la deformazione misurata dall'estensometro.



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 se si tratta di una prova a fatica, oppure i parametri di forma massima e velocità di applicazione del carico qualora si debba eseguire una prova statica.



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.

Appendice K: PROTOCOLLO DI PROVA A FATICA SU MFL ASSIALE

Di seguito sono riportate le note per la definizione del protocollo di prova riviste e integrate rispetto quelle riportate in [9].

Una volta accesa la macchina MFL assiale secondo le dettagliate e minuziose informazioni riportate in [9] di capitolo 2, si possono scegliere fra le due seguenti possibili configurazioni: acquisizioni calorimetriche oppure determinazione innesco di cricca.

Impostazione parametri di prova per l'acquisizione dei gradienti di raffreddamento

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

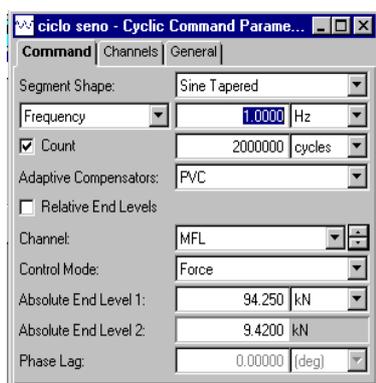


Figura 5.49: Impostazione del tipo di comando affaticante

1. Doppio clic sull'icona "ciclo seno": si apre la finestra di Figura 5.49 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 alle ganasce di avere un'adeguata presa sul provino con relativi e inevitabili assestamenti.

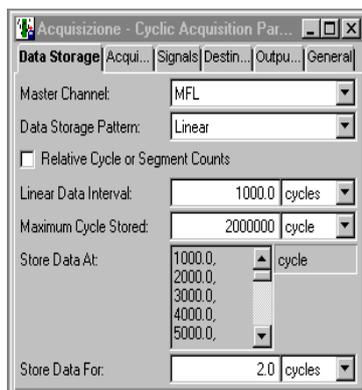


Figura 5.50: Impostazione tipo di acquisizione per carico affaticante

2. Doppio clic sull'icona "acquisizione": si apre la finestra di Figura 5.50 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. Dalla *Station Manager* una volta cliccata l'icona "New Specimens" (Figura 5.51) 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.

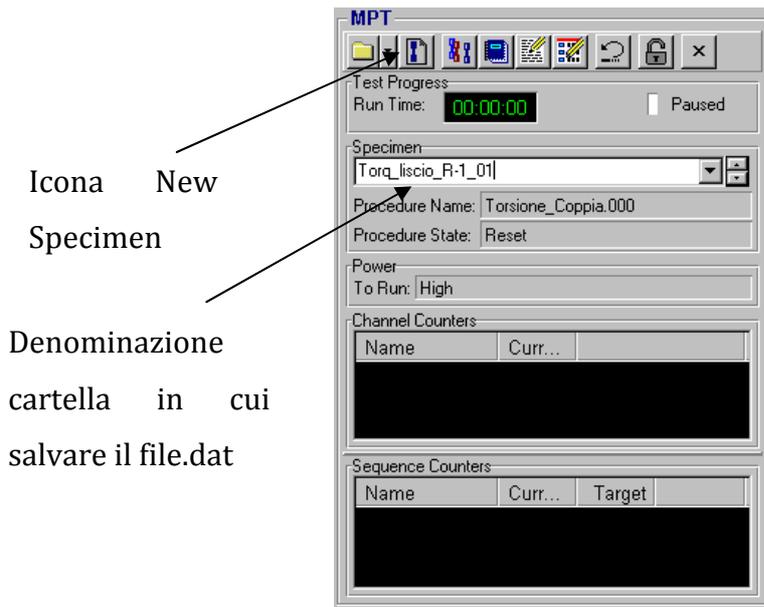


Figura 5.51: Definizione nuova cartella su cui salvare i dati tramite il comando "New Specimen"

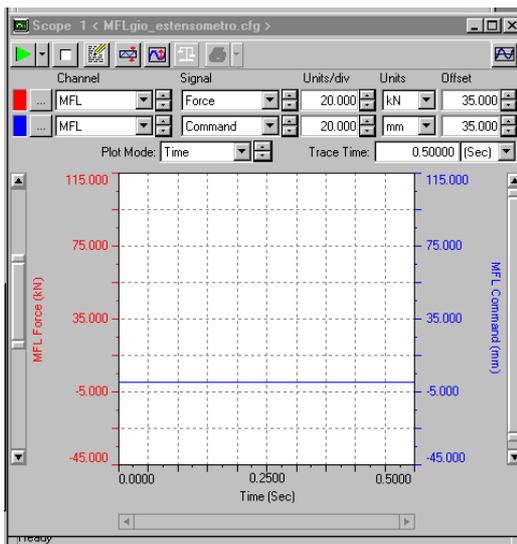


Figura 5.53: Finestra Scope

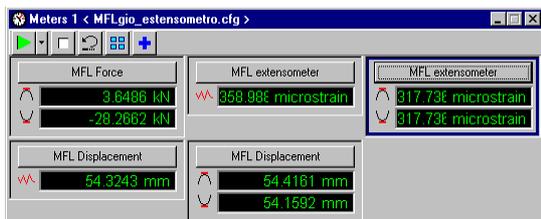


Figura 5.52: Finestra Meters

- Per poter controllare visivamente cosa fa la macchina e se rispetta i valori impostati è bene aprire la finestra di "Scope" (Figura 5.53) 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 diagrammare anche altri parametri a seconda di ciò che si vuole controllare. Altro strumento utile è l'apertura della finestra "Meters" (Figura 5.52) 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.

Impostazione parametri di prova per la determinazione dell'innesco di cricca con l'ausilio dei liquidi penetranti

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

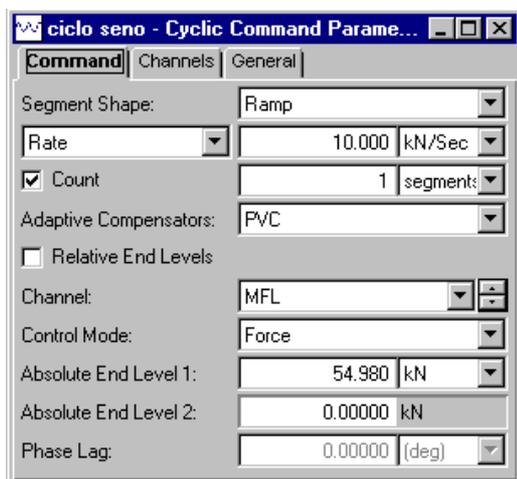


Figura 5.54: impostazione del tipo di carico statico

1. Se si esegue un doppio clic sull'icona "ciclo seno" si apre la finestra di Figura 5.54 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. Nella prova per la determinazione dell'innesco di cricca con l'ausilio dei liquidi penetranti in cui si esegui forti plasticizzazioni del materiale, è auspicabile eseguire una "rampa statica" come modalità di applicazione del carico al primo ciclo di carico. Per far ciò si deve selezionare le seguenti opzioni riportate nella Figura 5.54 rispetto a quelle illustrate nella Figura 5.49 :Segment Shape: Ramp ;Count: Rate(con relativa velocità di applicazione del carico espressa in kN) con la selezione di un unico segmento di carico ; Control Mode: Force; Absolute End Level1: forza massima da applicare al provino espressa in kN; Absolute End Level 2: 0kN in quanto si vuole ottenere solo una componente di trazione come stato tensionale.

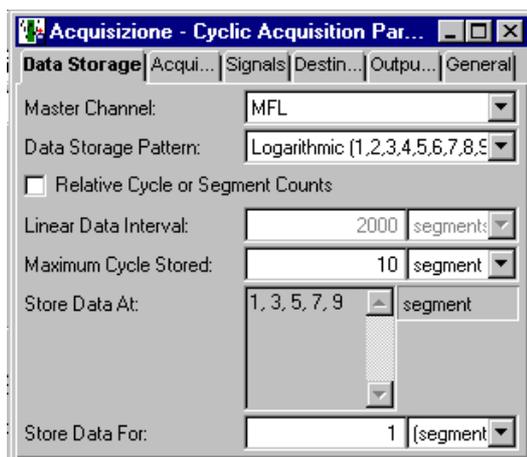


Figura 5.56: impostazione del tipo di acquisizione da privilegiare quando ci sono forti deformazioni del materiale nei primi cicli

2. Doppio clic sull'icona " acquisizione": si apre la finestra di Figura 5.49 dove è possibile impostare i parametri di acquisizione dei dati da parte della macchina. Dal menù *Data Storage* si devono scegliere i parametri riportati nelle Figura 5.49 e si può scegliere il tipo di acquisizione (si consiglia Logarithmic in quanto acquisisce i primi cicli in cui il ciclo di isteresi è ampio e trasla progressivamente verso valori di deformazione crescenti), Maximum Cycle Stored: 1000 segment. Una volta che il ciclo di isteresi si è stabilizzato (e quindi le deformazioni variano in un range definito di valori) è bene ritornare ad un tipo di acquisizione lineare come illustrato

nella Figura 5.50. 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" (Figura 5.51) 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.

Icona New Specimen

Denominazione cartella in cui salvare il file.dat



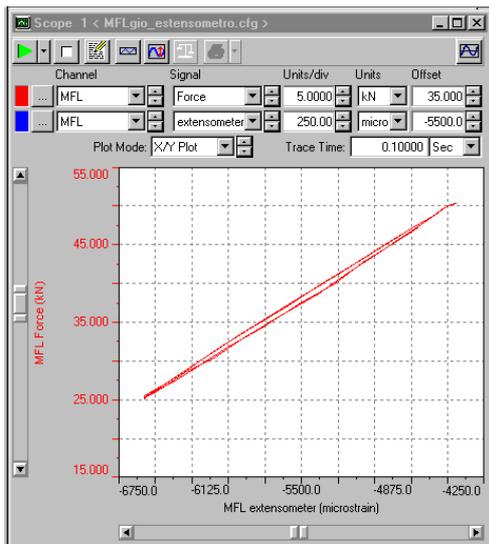


Figura A.1.6.3.h Finestra Scope

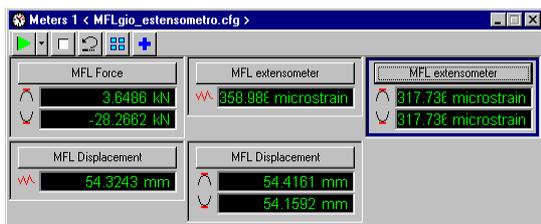
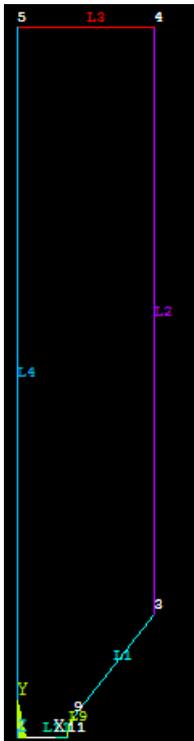


Figura A.1.6.3.i Finestra Meters

3. Come detto in precedenza per poter controllare visivamente e numericamente la macchina è bene aprire la finestra di "Scope"(fig A.1.6.3.d) 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 diagrammare anche altri parametri a seconda di ciò che si vuole controllare. Nel caso di valutazioni sul ciclo di isteresi viene riportata la figura A.1.6.3.h che diagramma la forza misurata dalla cella di carico in funzione della deformazione misurata dall'estensometro. La figura A.1.6.3.h illustra un ciclo di isteresi dopo che il materiale si è stabilizzato. Altro strumento utile è l'apertura della finestra "Meters" (fig.A.1.6.3.i) 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.

Appendice L: APDL PARAMETRICA PER L'ANALISI DELLE TENSIONI SU PROVINI CILINDRICI CON INTAGLIO ASSIALSIMMETRICO



Di seguito è riportata l'APDL utilizzata in ANSYS 12.1 per l'analisi delle tensioni sulla superficie esterna dell'intaglio assialsimmetrico per provini cilindrici.

```
/PREP7
```

```
!-----DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
```

```
!LE DIMENSIONI SONO DA SPECIFICARE IN [mm]
```

```
!SEMILUNGHEZZA DEL PROVINO DECURTATA DELLA PARTE STRETTA  
DALLE GRIFFE
```

```
lp=65
```

```
!DIAMETRO DEL PROVINO DELLA SEZIONE RISTRETTA
```

```
fi=10
```

```
!RAGGIO DI RACCORDO DI FONDO INTAGLIO
```

```
ri=3
```

```
!DIAMETRO PROVINO DELLA PARTE NON RISTRETTA
```

```
dp=25
```

```
!ESPLICITARE L'ANGOLO DI APERTURA DELL'INTAGLIO ESPRESSO IN  
GRADI
```

```
apertura=170
```

```
angologiro=180
```

```
!ANGOLO COMPLEMENTARE RISPETTO ALL'ANGOLO DI APERTURA  
DELL'INTAGLIO ESPRESSO IN GRADI
```

```
alfa=angologiro-apertura
```

```
!TENSIONE LORDA (SIGMA GROSS)
```

```
SGROSS=-0.16
```

```
!PIGRECO
```

```
pi=3.141592654
```

```
!ORDINATA KEYPOINT 5
```

```
ordinata=ri*SIN(alfa/2/180*pi)+TAN((180-alfa)/2/180*pi)*(dp/2-  
(fi/2+ri*(1-COS(alfa/2/180*pi))))
```

```
!NUMERO DI SUDDIVISIONI RAGGIO FONDO INTAGLIO
```

```
!restituzione del valore intero
```

```
SUDD2=NINT(40+(-0.02*(apertura+700)))
```

```
!NUMERO DI SUDDIVISIONI LATO OBLIQUO DELL'INTAGLIO
```

```
!restituzione del valore intero
```

```
SUDD=NINT(50*((apertura+50)/angologiro)+0.4))
```

```
!NUMERO DI SUDDIVISIONI LATO VERTICALE SOPRA ALL'INTAGLIO
```

```
!restituzione del valore intero
```

```
SUDD1=NINT(100+(-0.4*apertura))
```

```
!-----DEFINIZIONE TIPO DI ELEMENTO E RELATIVE OPZIONI
```

```
ET,1,PLANE42
```

```
!OPZIONE DI ASSIALSIMMETRIA
```

```
KEYOPT,1,1,0
```

```
KEYOPT,1,2,0
```

```
KEYOPT,1,3,1
```

```
KEYOPT,1,5,0
```

KEYOPT,1,6,0	L,10,11
	L,11,12
!-----DEFINIZIONE PROPRIETÀ MATERIALE	L,12,13
MPTEMP,,,,,	L,13,1
MPTEMP,1,0	
MPDATA,EX,1,,194700	!-----CREAZIONE AREA
MPDATA,PRXY,1,,0.3	FLST,2,12,4
	FITEM,2,12
!-----DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA	FITEM,2,11
	FITEM,2,10
!-----DEFINIZIONE KEYPOINTS	FITEM,2,1
K,1,0,0,0	FITEM,2,2
K,2,fi/4,0,0	FITEM,2,3
K,3,fi/2,0,0	FITEM,2,4
K,4,fi/2+ri*(1-COS(alfa/2/180*pi)),ri*SIN(alfa/2/180*pi),0	FITEM,2,5
	FITEM,2,6
K,5,fi/2+ri,0,0	FITEM,2,9
	FITEM,2,7
K,6,dp/2,ordinata,0	FITEM,2,8
K,7,dp/2,((lp-ordinata)/2+(ordinata)),0	AL,P51X
K,8,dp/2,lp,0	
K,9,dp/4,lp,0	!-----CREAZIONE LINEE SUDDIVISIONE AREA
K,10,0,lp,0	LSTR, 4, 13
K,11,0,((lp-ordinata)/2+(ordinata)),0	LSTR, 6, 12
K,12,0,ordinata+1,0	LSTR, 7, 11
K,13,0,(ri*SIN(alfa/2/180*pi))+1,0	LANG, 15, 9,90,,
	LANG, 13, 2,90,,
!-----DEFINIZIONE DELLE LINEE	LDIV,14,,2,0
L,1,2	LSTR, 14, 16
L,2,3	LSTR, 16, 15
LARC,3,4,5,ri	
L,4,6	!SUDDIVISIONE DELL'AREA SECONDO LE LINEE
L,6,7	FLST,3,22,4,ORDE,2
L,7,8	FITEM,3,1
L,8,9	FITEM,3,-22
L,9,10	ASBL, 1,P51X

```

!-----MESH MANUALE
!SUDDIVISIONE LINEE
!LINEA 3
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,SUDD2,4,,,1

!LINEA 12 19
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,12
FITEM,5,19
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,SUDD2,1,,,1

!LINEA 4
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,SUDD8,,,1

!LINEA 11 22
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,11
FITEM,5,22
CM,_Y,LINE

LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,SUDD1,1,,,1

!LINEA 10 21
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,10
FITEM,5,21
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,SUDD1,1,,,1

!LINEA 6 9 17
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,6
FITEM,5,9
FITEM,5,17
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE

```

CMSEL,,_Y	!LINEA 1
LESIZE,_Y1,,SUDD1,1,,1	FLST,5,1,4,ORDE,1
	FITEM,5,1
!LINEA 2	CM,_Y,LINE
FLST,2,1,4,ORDE,1	LSEL,, ,P51X
FITEM,2,2	CM,_Y1,LINE
LESIZE,P51X,,-1,,1	CMSEL,,_Y
FLST,5,1,4,ORDE,1	LESIZE,_Y1,,20,10/13,, ,1
FITEM,5,2	
CM,_Y,LINE	!LINEE 8 16 20
LSEL,, ,P51X	FLST,5,4,4,ORDE,4
CM,_Y1,LINE	FITEM,5,8
CMSEL,,_Y	FITEM,5,16
LESIZE,_Y1,,24,1/6,, ,1	FITEM,5,18
	FITEM,5,20
!LINEA 13	CM,_Y,LINE
FLST,5,1,4,ORDE,1	LSEL,, ,P51X
FITEM,5,13	CM,_Y1,LINE
CM,_Y,LINE	CMSEL,,_Y
LSEL,, ,P51X	LESIZE,_Y1,,20,1.3,, ,1
CM,_Y1,LINE	
CMSEL,,_Y	!-----MESH DELL'AREA
LESIZE,_Y1,,24,3,, ,1	FLST,5,8,5,ORDE,2
	FITEM,5,2
!LINEA 7 14 15	FITEM,5,-9
FLST,5,3,4,ORDE,3	CM,_Y,AREA
FITEM,5,7	ASEL,, ,P51X
FITEM,5,14	CM,_Y1,AREA
FITEM,5,-15	CHKMSH,'AREA'
CM,_Y,LINE	CMSEL,S,_Y
LSEL,, ,P51X	MSHKEY,1
CM,_Y1,LINE	AMESH,_Y1
CMSEL,,_Y	MSHKEY,0
LESIZE,_Y1,,24,1.3,, ,1	CMDELE,_Y
	CMDELE,_Y1
	CMDELE,_Y2

```

!-----CONDIZIONI DI SIMMETRIA ALLA BASE

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

DL,P51X,,SYMM

!-----COUPLING EQUATIONS UY SUI NODI LATO ORIZZONTALE
SUPERIORE

/REPLO

!SELEZIONE NODI SU CUI APPLICARE LE CP

!SELEZIONE LINEA L7

LSEL,S,,7

!SELEZIONE AGGIUNTIVA A=ADDITIONALLY DELLA LINEA L8

LSEL,A,,8

NSLL,S,1

CP,23,UY,ALL

ALLSEL,ALL

!-----APPLICAZIONE PRESSIONE

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,7

FITEM,2,-8

SFL,P51X,PRES,SGROSS,

!-----LANCIO SOLUTORE

/SOL

SOLVE

FINISH

!-----SELEZIONE NODI PER L'ESPORTAZIONE DEI DATI SULLA
SUPERFICIE DEL PROVINO

!SELEZIONE LINEA L3

LSEL,S,,3

!SELEZIONE AGGIUNTIVA A=ADDITIONALLY DELLA LINEA L4

LSEL,A,,4

NSLL,S,1

!-----ESPORTAZIONE VALORI DI TENSIONE SUI NODI SELEZIONATI

/TITLE,TENSIONI_ESTERNE__ANGOLO_APERTURA%apertura%[_]_RAGGI
O_di_FONDO_INTAGLIO%ri%[mm]

*VGET,sel,NODE,,NSEL,, !creo un vettore di 0 e 1 a seconda che i nodi
siano o no selezionati

*VGET,posy,NODE,,LOC,Y !memorizzo nel vettore "posy" le coordinate Y
dei nodi

*VGET,sigma_1,NODE,,S,1 !memorizzo nel vettore le tensioni S1
dei nodi

*VGET,sigma_2,NODE,,S,2 !memorizzo nel vettore le tensioni S2
dei nodi

*VGET,sigma_3,NODE,,S,3 !memorizzo nel vettore le tensioni S3
dei nodi

*VGET,sigma_X,NODE,,S,X !memorizzo nel vettore le tensioni SX
dei nodi

*VGET,sigma_Y,NODE,,S,Y !memorizzo nel vettore le tensioni SY
dei nodi

*VGET,sigma_Z,NODE,,S,Z !memorizzo nel vettore le tensioni SZ
dei nodi

*VGET,sigma_XY,NODE,,S,XY !memorizzo nel vettore le tensioni SXY
dei nodi

*VGET,sigma_YZ,NODE,,S,YZ !memorizzo nel vettore le tensioni SYZ
dei nodi

*VGET,sigma_XZ,NODE,,S,XZ !memorizzo nel vettore le tensioni SXZ
dei nodi

*CFOPEN,TENSIONI_ESTERNE__ANGOLO_APERTURA%apertura%[_]_RAG
GIO_di_FONDO_INTAGLIO%ri%[mm],'txt',' ' !i simboli % servono a
forzare l'assegnazione delle variabili al nome al file

*VWRITE,'Y [mm]','S1 [MPa]','S2 [MPa]','S3 [MPa]','SX [MPa]','SY
[MPa]','SZ [MPa]','SXY [MPa]','SYZ [MPa]','SXZ [MPa]'

(A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,'
'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12)

*VMASK,sel!scrive solo i nodi che nel vettore sel hanno valore 1

*VWRITE,posy(1),sigma_1(1),sigma_2(1),sigma_3(1),sigma_X(1),sigma_Y(
1),sigma_Z(1),sigma_XY(1),sigma_YZ(1),sigma_XZ(1)

(F12.6,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,'
'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3)

*CFCLOSE

ALLSEL,ALL

!-----SELEZIONE NODI PER L'ESPORTAZIONE DEI DATI SULLA
SEZIONE RISTRETTA DEL PROVINO

!SELEZIONE LINEA L1

LSEL,S,,1

!SELEZIONE AGGIUNTIVA A=ADDITIONALLY DELLA LINEA L2

LSEL,A,,2

```

```

NSLL,S,1
!-----ESPORTAZIONE VALORI DI TENSIONE SUI NODI SELEZIONATI
/TITLE,TENSIONI_SEZIONE_RISTRETTA__ANGOLO_APERTURA%apertura
%[_RAGGIO_di_FONDO_INTAGLIO%ri%[mm]
*VGET,sel,NODE,,NSEL,, !creo un vettore di 0 e 1 a seconda che i nodi
siano o no selezionati
*VGET,posyX,NODE,,LOC,X !memorizzo nel vettore "posy"le coordinate X
dei nodi
*VGET,sigma_1,NODE,,S,1 !memorizzo nel vettore le tensioni S1
dei nodi
*VGET,sigma_2,NODE,,S,2 !memorizzo nel vettore le tensioni S2
dei nodi
*VGET,sigma_3,NODE,,S,3 !memorizzo nel vettore le tensioni S3
dei nodi
*VGET,sigma_X,NODE,,S,X !memorizzo nel vettore le tensioni SX
dei nodi
*VGET,sigma_Y,NODE,,S,Y !memorizzo nel vettore le tensioni SY
dei nodi
*VGET,sigma_Z,NODE,,S,Z !memorizzo nel vettore le tensioni SZ
dei nodi
*VGET,sigma_XY,NODE,,S,XY !memorizzo nel vettore le tensioni SXY
dei nodi
*VGET,sigma_YZ,NODE,,S,YZ !memorizzo nel vettore le tensioni SYZ
dei nodi
*VGET,sigma_XZ,NODE,,S,XZ !memorizzo nel vettore le tensioni SXZ
dei nodi
*CFOPEN,TENSIONI_SEZIONE_RISTRETTA__ANGOLO_APERTURA%apertu
ra%[_RAGGIO_di_FONDO_INTAGLIO%ri%[mm], 'txt', ' ', ' ' !i simboli %
servono a forzare l'assegnazione delle variabili al nome al file
*VWRITE,'X [mm]','S1 [MPa]','S2 [MPa]','S3 [MPa]','SX [MPa]','SY
[MPa]','SZ [MPa]','SXY [MPa]','SYZ [MPa]','SXZ [MPa]'
(A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,'
'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12,' 'A12')
*VMASK,sel !scrive solo i nodi che nel vettore sel hanno valore 1
*VWRITE,posyX(1),sigma_1(1),sigma_2(1),sigma_3(1),sigma_X(1),sigma_Y
(1),sigma_Z(1),sigma_XY(1),sigma_YZ(1),sigma_XZ(1)
(F12.6,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,'
'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3,' 'F12.3)
*CFCLOS
ALLSEL,ALL
FINISH

```

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] T. Catalbianco, A.Geraci, M.Orlando, "Analisi tramite infrarosso termico di provini sollecitati a fatica", *il Progettista Industriale*, N°2, 1984
- [3] G. La Rosa, A.Risitano, "Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components", *International Journal of Fatigue*, 22, 65-73, 2000
- [4] G. Fargione, A.Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, "Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method", *International Journal of Fatigue*, 24, 11-19, 2002
- [5] B.Atzori, E.Gasparini, G.Meneghetti, "Analisi termografica della resistenza a fatica di materiali metallici", AIAS 2001, Sassari, Italy
- [6] 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*, 81, 2-16, 2012
- [7] G.Meneghetti, M.Ricotta, D.Parolin, B.Atzori, "A synthesis of the fatigue behaviour of plain and notched stainless steel specimens in terms of heat energy loss", MESO 2012, 14th *International Conference on Mesomechanics*, Budapest 25-28 September 2012
- [8] 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
- [9] L. Negrisolo, "Analisi sperimentale della resistenza a fatica di un acciaio inossidabile con approccio energetico", Tesi di laurea, Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, anno accademico 2012-2013

-
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Feltner CE, Morrow JD. "Microplastic strain hysteresis Energy as a criterion for fatigue fracture" Tran ASME, ser D:J Basic Eng 1961
- [14] J.Kaletka, R.Blonty, H.Haring, "Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions" , J Test Eval 1990,19,326-33
- [15] G.Meneghetti, C. Vanzin, "Analisi della resistenza a fatica di provini in acciaio inossidabile mediante misure di temperatura superficiale" AIAS 2002, Parma 18-21 September 2002, Italy
- [16] A.L.Audenino, L.Goglio, M. Rossetto, "Metodi sperimentali per la progettazione" Libreria editrice universitaria Levrotto&Bella (1997)
- [17] UNI EN 10002 , Gennaio 1992, Prova di trazione, Metodo di prova a temperatura ambiente
- [18] G. Meneghetti, M. Ricotta, B. Atzori, "A synthesis of the push-pull fatigue behavior of plain and notched stainless steel specimens by using the specific heat loss" Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 92, 12-24, 2013
- [19] B.Atzori, "Appunti di costruzione di macchine" Edizioni libreria Cortina (2000)

-
- [20] G.Meneghetti, M.Ricotta, L.Negrisola, B.Atzori, "The specific heat loss combined with the thermoelastic effect for an experimental analysis of the mean stress influence on axial fatigue of stainless steel plain specimens", ALII 2013, Roma 1-3 July 2013, Italy
- [21] UNI EN ISO 3059: Esame con liquidi penetranti e controllo magnetoscopico
- [22] UNI EN ISO 3452-2 : Esame con liquidi penetranti. Parte 2: Prove dei materiali utilizzati nell'esame con liquidi penetranti
- [23] Virgilio Bettini, "Quaderni didattici: L'esame con liquidi penetranti" Livello I-II ; associazione italiana prove non distruttive
- [24] Giorgio Gaetani, Giorgio Torrida, "Quaderni didattici: Corso di specializzazione sui controlli non distruttivi con liquidi penetranti". Livello II-III ; associazione italiana prove non distruttive