



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA

**Stima del limite di fatica di un acciaio C45 basato  
sull'applicazione di metodi energetici.**

Relatore: Prof. Mauro Ricotta

Laureando: Giancarlo

Monti

Matricola: 1179820

Anno Accademico 2019/2020



# SOMMARIO

Capitolo 1 - INTRODUZIONE.....	4
Capitolo 2 - APPROCCIO ENERGETICO PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL LIMITE DI FATICA .....	6
Capitolo 3 - ANALISI SPERIMENTALI BASATA SUI METODI ENERGETICI.....	28
Capitolo 4 - PROVE A FATICA SECONDO NORMATIVA .....	85
Capitolo 5 – DISCUSSIONE E CONFRONTI.....	114
Bibliografia.....	118

## Capitolo 1 - INTRODUZIONE

La fatica è un fenomeno irreversibile dovuto alla presenza di un carico variabile nel tempo che può portare alla rottura di un organo meccanico. A definire il comportamento a fatica di un materiale in assenza di difetti è la curva di Wöhler, il cui parametro caratteristico è il limite di fatica, definito come il valore di ampiezza di tensione sotto il quale è possibile lavorare per un numero infinito di cicli senza raggiungere la rottura. Per quanto sia possibile definire teoricamente il limite di fatica nella pratica ci sia limitata ad una stima di tale valore. La normativa UNI 3964 suggerisce lo stair-case (prova a gradini) come metodo per la stima del limite di fatica, tuttavia esso prevede un numero elevato di provini, tempi di prova lunghi e porta ad un'elevata dispersione dei

risultati. Dispersione causata da differenti fattori quali la presenza di inclusioni o difetti nei provini, differenti modalità di preparazione e svolgimento delle prove. Per questo motivo negli ultimi anni si è cercato di esplorare metodi alternativi che permettessero di ridurre questi fattori.

Un' alternativa al metodo a gradini proposto dalla normativa sono i metodi definiti energetici. Quando un provino è soggetto a fatica si possono osservare una serie di fenomeni caratteristici tra cui cambiamenti nella microstruttura, dissipazione di energia termica, aumento della temperatura e deformazioni plastiche localizzate. I metodi energetici sfruttano tali fenomeni per caratterizzare il comportamento a fatica di un materiale, ossia per stimare il suo limite di fatica. Infatti, scelto un parametro misurabile indirettamente o direttamente come la temperatura, si può osservare che all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata il parametro di riferimento rimane pressoché nullo finché non si raggiunge un valore di ampiezza di tensione che ne causa un repentino aumento.

A partire dall'inizio degli anni 90 sono stati proposti diversi metodi energetici considerando diversi parametri di riferimento. M. P. Luong per primo ha proposto questo metodo utilizzando come parametro di riferimento l'energia termica dissipata dal materiale e misurata attraverso termografia ad infrarossi. Risitano ha proposto di utilizzare direttamente l'aumento di temperatura come riferimento, andando a ideare l'omonimo metodo. Successivamente esplorando il comportamento delle armoniche superiori della temperatura si è osservato che anche queste possono essere utilizzate come riferimento, sia per quanto riguarda la loro ampiezza sia per lo sfasamento. Meneghetti infine ha proposto un metodo basato sul calcolo del calore emesso da un provino sfruttando il gradiente termico in fase di raffreddamento.

Il seguente elaborato di tesi si è concentrato sulla stima del limite di fatica di un acciaio C45 su prove a gradini con rapporto di ciclo costante  $R = -1$  e  $R = 0,1$ . I parametri considerati come riferimento per la stima del limite di fatica sono la densità di energia meccanica immagazzinata nel materiale ad ogni ciclo, la densità di calore emesso dal provino e la seconda armonica della temperatura. I risultati ottenuti sono stati confrontati con il valore ricavato dal metodo a gradini proposto da normativa.

## Capitolo 2 - APPROCCIO ENERGETICO PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL LIMITE DI FATICA

### 2.1 - Introduzione

I metodi energetici hanno iniziato ad essere sviluppati a partire dagli anni '60, quando, viste le criticità nel calcolo della stima a fatica di un materiale, sono state prese in considerazione le diverse forme di energia in gioco durante una prova a fatica. Dal punto di vista termodinamico durante una prova a fatica nel sistema provino entra un lavoro meccanico dalla macchina di prova che dipende dalle caratteristiche di prova impostate. Di questo lavoro meccanico solo una parte viene immagazzinata nel materiale come energia di deformazione, la restante viene trasformata e dissipata in calore ed in danneggiamento del provino stesso (bande di scorrimento, plasticizzazione, nascita di cricche). Monitorando tali grandezze durante una prova a fatica si può osservare come, per ampiezze di tensione inferiori al limite di fatica, queste mantengano valori limitati; mentre per ampiezze di tensione superiori al limite di fatica, queste subiscono un repentino e significativo aumento; un

comportamento simile può essere osservato anche se si prende in considerazione la temperatura [1-7]. Un provino soggetto ad una prova a fatica subisce un innalzamento della temperatura tanto maggiore quanto maggiore è l'ampiezza di tensione della prova. Anche in questo caso si osserva come, per ampiezze di tensione inferiori al limite di fatica, la temperatura mantenga valori limitati; mentre per ampiezze di tensione superiori al limite di fatica, essa subisca tenda ad aumentare.

Possono in definitiva essere individuate due tipologie di metodi per la stima del limite a fatica alternativi al metodo a gradini (stair case) previsto da normativa: i metodi energetici, basati cioè sull'analisi di tutti quei contributi energetici in gioco durante una prova; ed i metodi di temperatura, basati cioè sul monitoraggio ed analisi della temperatura del provino e delle sue componenti.

Dal punto di vista pratico i metodi termici sono più semplici e diretti poiché permettono di misurare direttamente la grandezza di interesse, ossia la temperatura. Tuttavia, i metodi energetici risultano migliori poiché l'energia dissipata dal volume unitario di materiale è indipendente dalla frequenza di prova, geometria del provino e condizioni ambientali [8-11].

Questi metodi energetici e termici sono stati testati e validati con un considerevole numero di prove e risultati sperimentali. In [12] sono state eseguite delle prove a gradino a tensione crescente in successione monitorando la morfologia del provino ed il suo comportamento termico ed in particolare l'aumento della temperatura in fase di stabilizzazione  $\Delta T_{st}$ . In un grafico avente il valore di  $\Delta T_{st}$  rispetto all'ampiezza di tensione applicata è stato osservato che l'inizio del significativo aumento di pendenza della curva corrisponde alla nascita della prima banda di scorrimento persistente (ossia plasticizzazione localizzata) [13-15]. È inoltre noto che il limite di fatica negli acciai corrisponde al livello di tensione per il quale nascono delle micro-cricche la cui propagazione viene bloccata dalla prima barriera microstrutturale incontrata.

Sembra esserci una stretta relazione tra questi fenomeni, tuttavia, è bene sottolineare l'effettiva differenza tra il fenomeno della fatica e quello termico [3]. La fatica meccanica consiste nella nascita e nella propagazione di cricche, mentre in fenomeno termico non ha nulla a che fare con questo. Infatti, esso può essere osservato, seppur in misura modesta, anche per valori di ampiezza di tensione molto inferiore rispetto al limite di fatica a causa di comportamenti anelastici dissipativi [11,16]. Malgrado la diversa natura dei due fenomeni l'evidenza sperimentale permette di sfruttare il comportamento termico degli acciai sottoposti a fatica per stimarne il limite.

## 2.2 - Metodi energetici

È noto che l'andamento del diagramma sforzo-deformazione di un acciaio può essere suddiviso in più aree in base al comportamento del materiale (lineare elastico, elastico non lineare, plastico, ecc.). Applicando una tensione nel tratto lineare elastico le deformazioni che ne derivano saranno totalmente recuperabili senza alcuna dissipazione di energia. Se si esce dalla linearità tuttavia il recupero delle deformazioni sarà totale nel tratto elastico non lineare e parziale nel tratto plastico, in

entrambi i casi però ci sarà una certa quota di energia immagazzinata e dissipata nel materiale (identificabile con l'area del ciclo di isteresi che si crea in un ciclo di carico-scarico).

L'energia meccanica di deformazione plastica è stata assunta come parametro di riferimento per la caratterizzazione del limite a fatica da Feltner e Morrow [10] che hanno considerato l'area del ciclo di isteresi come un indice dell'accumulo di danneggiamento per fatica. In particolare, Feltner prende in considerazione la semi area del ciclo di isteresi secondo la seguente formulazione :

$$U_F = \frac{k'}{2^{n'}} \int_0^{2\varepsilon_{a,p}} \varepsilon_p^{n'} d\varepsilon_p = \frac{k'}{2^{n'}} \frac{(2\varepsilon_{a,p})^{n'+1}}{n'+1} = \frac{2}{n'+1} \sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{k'}\right)^{\frac{1}{n'}} \\ = \frac{2}{n'+1} \sigma_a \varepsilon_{a,p} \quad (2.1)$$

Morrow invece considera l'intero ciclo di isteresi ed un fattore moltiplicativo  $(1-n')$  rispetto all'indice proposto da Feltner.

$$U_M = 2U_F(1 - n') \quad (2.2)$$

Gli studi di Feltner e Morrow sono stati successivamente inglobati nei risultati ottenuti da Halford [11] su una grande varietà di provini di acciaio ed alluminio. Tali risultati sono stati sintetizzati in un grafico logaritmico rispetto al numero di alternanze a rottura. Il limite fondamentale di questo modello è l'impossibilità di misurare direttamente e puntualmente la tensione in particolari provini, come quelli intagliati. L'energia meccanica dissipata nel ciclo di isteresi è stata utilizzata anche da Charkaluk [17] per la progettazione di strutture soggette a carichi dinamici termico-meccanici.

Kaletka et al. [18] considerano l'energia interna immagazzinata nel materiale come la causa principe del cedimento per fatica. Sulla base del bilancio energetico tale energia interna viene ricavata sperimentalmente come differenza tra la quota di energia meccanica convertita in calore e quella dissipata in un ciclo di isteresi. Quest'ultima componente di energia risulta particolarmente complessa da calcolare per prove ad alto numero di cicli e questo è il limite principale di tale metodologia.

Un ulteriore possibilità dal punto di vista energetico riguarda la terza componente di energia meccanica totale dissipata non ancora considerata, ossia quella che viene dissipata in calore. Tale quantità risulta particolarmente semplice da misurare rispetto all'energia interna immagazzinata ed all'energia meccanica dissipata poiché la maggior parte dell'energia meccanica totale viene dissipata proprio sotto forma di calore.

Shiozawa et al. in [19,20] hanno proposto di stimare l'energia termica dissipata  $q$  sfruttando la componente della temperatura avente frequenza doppia rispetto a quella di carico; infatti, analizzando

il segnale di temperatura si può osservare come questo sia caratterizzato da più componenti. Quella avente frequenza doppia rispetto alla frequenza di carico è legata alla dissipazione irreversibile di energia dovuta alle deformazioni plastiche.

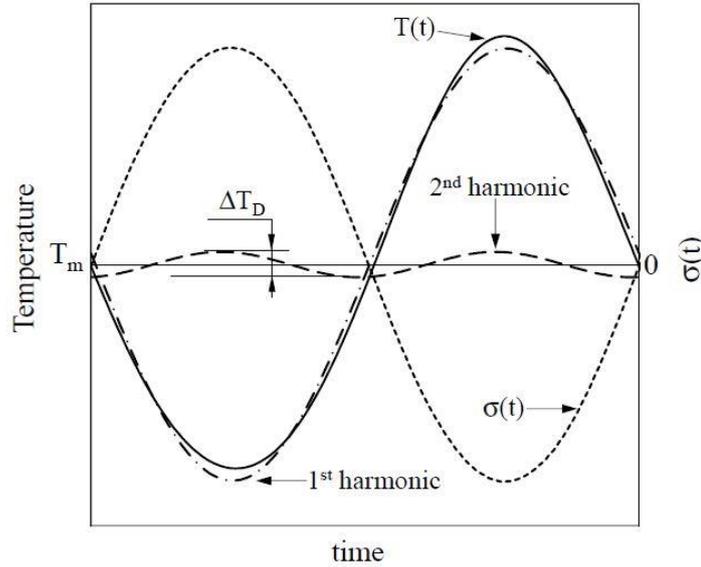


Figura 2.1 Confronto tra andamento dei segnali di tensione, temperatura, prima componente di temperatura, seconda componente di temperatura.

$\Delta T_D$  è il range di temperatura correlato alla dissipazione di energia citata in precedenza e come si vede dalla figura 1 è sfasato rispetto alla temperatura [19].

$$\Delta T_D = 2 \sqrt{T_{D,sin}^2 + T_{D,cos}^2} \quad (2.3)$$

dove, essendo  $n$  il numero di frame di campionamento,  $t_i$  l'istante al frame  $i$ -esimo,  $T_{D,sin}$  la componente in fase con il carico e  $T_{D,cos}$  la componente avente fase opposta rispetto al carico [19]:

$$T_{D,sin} = \frac{2}{n} \sum_{t_i=1}^n T(t_i) \cdot \sin(2t_i) \quad (2.4)$$

$$T_{D,cos} = \frac{2}{n} \sum_{t_i=1}^n T(t_i) \cdot \cos(2t_i) \quad (2.5)$$

Seguendo il cosiddetto metodo 'lock-in convenzionale' [23] si può calcolare l'energia dissipata sotto forma di calore a causa della plasticità in un ciclo (considerando che essa avviene due volte) [19]:

$$q = \rho c \cdot 2\Delta T_D \quad (2.6)$$

Come già sottolineato la seconda armonica della temperatura è sfasata rispetto al segnale della cella di carico a causa della diffusione termica. Tale sfasamento si può esprimere come [19]:

$$\theta_D = \tan^{-1} \left( -\frac{T_{D,cos}}{T_{D,sin}} \right) \quad (2.7)$$

Analogamente può essere definita la componente termoelastica, ossia la prima armonica della temperatura, avente frequenza uguale a quella di carico, con le sue componenti, una con fase uguale a quella di carico ed una con fase opposta rispetto a quella di carico [19]:

$$\Delta T_E = 2 \sqrt{T_{E,sin}^2 + T_{E,cos}^2} \quad (2.8)$$

$$T_{E,sin} = \frac{2}{n} \sum_{t_i=1}^n T(t_i) \cdot \sin(t_i) \quad (2.9)$$

$$T_{E,cos} = \frac{2}{n} \sum_{t_i=1}^n T(t_i) \cdot \cos(t_i) \quad (2.10)$$

Anche in questo caso a causa della diffusione termica il segnale della seconda armonica ha uno sfasamento rispetto a quello del carico [19]:

$$\theta_E = \tan^{-1} \left( -\frac{T_{E,cos}}{T_{E,sin}} \right) \quad (2.11)$$

Per evitare l'influenza della diffusione termica sulla fase relativa alla dissipazione di energia si definisce la differenza di fase  $\Delta\theta$  come [19]:

$$\Delta\theta = \theta_D - \theta_E \quad (2.12)$$

Prove a fatica hanno dimostrato che la differenza di fase della componente di temperatura dovuta alla dissipazione di energia ha un particolare valore. In particolare, si osserva che per valori di ampiezza di tensione inferiore al limite di fatica la differenza di fase mostra due picchi uno caratteristico dell'effetto termoelastico e l'altro invece caratteristico della dissipazione di energia. Per valori superiori al limite di fatica la dissipazione di energia aumenta e l'effetto della termoelasticità si fa sentire meno portando la differenza di fase a perdere il picco dovuto alla

termoelasticità. Il picco rimanente è quindi caratteristico della sola dissipazione di energia e viene indicato con  $\Delta\hat{\theta}$ .

Infine, è stato definito il valore che mette in relazione il segnale di temperatura  $T(t)$  ed il segnale di riferimento scalato della differenza di fase  $\Delta\hat{\theta}$  e dello sfasamento  $\theta_E$  [19]:

$$\Delta\hat{T}_D = \frac{2}{n} \sum_{t_i=1}^n T(t_i) \cdot \sin \left\{ 2 \left[ 2\pi \cdot t \cdot \frac{f_L}{f_{acq}} - (\theta_E + \Delta\hat{\theta}) \right] \right\} \quad (2.13)$$

essendo  $f_{acq}$  la frequenza di acquisizione dell'immagine termica.

L'energia dissipata sotto forma di calore a causa della plasticità in un ciclo si calcola ora come segue [19]:

$$\hat{q} = \rho c \cdot 2\Delta\hat{T}_D \quad (2.14)$$

Il nuovo approccio viene chiamato metodo lock-in di fase, prevedendo appunto di eseguire le appena esposte considerazioni sulle fasi delle componenti della temperatura. Shiozawa et al. suggeriscono di stimare il limite di fatica del materiale sfruttando il grafico del gradiente di  $\hat{q}$  rispetto all'ampiezza di tensione applicata [19].

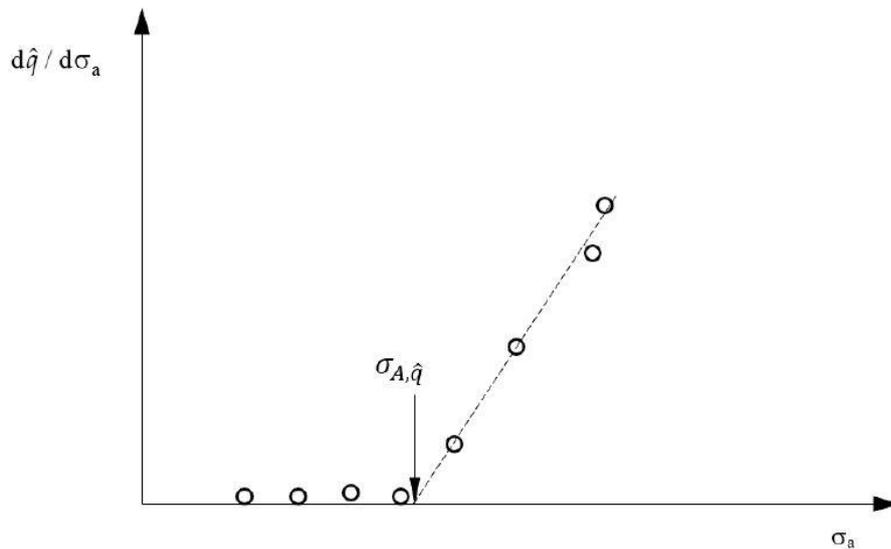


Figura 2.2. Stima del limite di fatica secondo il metodo lock-in di fase

Meneghetti [21] ha elaborato un metodo teorico e sperimentale per il calcolo del calore emesso dal provino durante una prova a fatica.

### 2.3 – Metodo energetico di Meneghetti

### 2.3.1 – Modello teorico

Di un materiale soggetto ad una prova a fatica si consideri un volume di controllo  $V$  con vettore normale uscente  $\vec{n}$ . Di tale volume di controllo si possano inoltre definire tre diverse superfici  $S_{cd}$ ,  $S_{cv}$ ,  $S_{ir}$  identificative delle superfici di scambio termico rispettivamente di conduzione, convezione ed irraggiamento. Siano inoltre  $\lambda$  la conducibilità termica del materiale,  $\rho$  la densità,  $c$  il calore specifico. Applicando il bilancio energetico secondo il primo principio della termodinamica al volume di controllo  $V$  [21]:

$$\bar{W} \text{ (energia meccanica in ingresso)} = \bar{Q} \text{ (energia termica dissipata)} + \bar{\Delta U} \text{ (energia interna)}$$

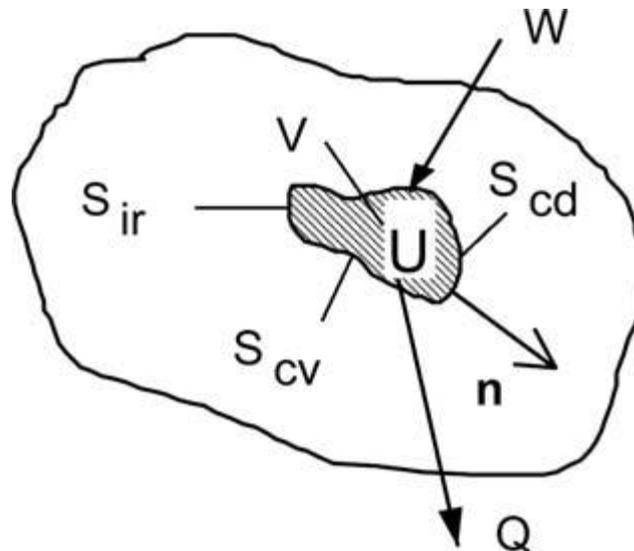


Figura 2.3. Bilancio energetico di un materiale soggetto ad una prova a fatica [21]

Tale equazione può essere riscritta in termini di potenza media scambiata in un ciclo di carico, ossia come l'energia trasferita nell'unità di tempo:

$$\dot{\bar{W}} = \dot{\bar{Q}} + \dot{\bar{\Delta U}} \quad (2.15)$$

$W$  rappresenta il lavoro meccanico fornito in ingresso al volume di controllo dalla macchina di prova. Il lavoro su di un volume unitario  $l_0$  si può esprimere come segue:

$$W_u = \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2.16)$$

Essendo  $\sigma_{ij}$  e  $d\varepsilon_{ij}$  rispettivamente il tensore delle tensioni ed il tensore delle deformazioni infinitesime. Considerando ora il volume di controllo V si può calcolare il lavoro compiuto sulla totalità del volume:

$$\bar{W} = \int_V \left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot dV \quad (2.17)$$

Infine, considerando il lavoro meccanico in termini di potenza e sapendo che f è la frequenza di carico della prova si ottiene:

$$\dot{\bar{W}} = \int_V \left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot dV \quad (2.18)$$

Il termine relativo al calore scambiato può essere suddiviso delle tre componenti di conduzione, convezione ed irraggiamento secondo la Legge di Fourier, la Legge di Newton e la Legge di Stephan-Boltzmann. Considerando che  $\text{grad}\vec{T}$  è il gradiente del campo di temperatura,  $T_\infty$  la temperatura ambiente,  $\sigma_n = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  la costante di Stephan-Boltzmann; si ottiene la seguente formulazione in termini di potenza:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Q}} &= \dot{\bar{Q}}_{cd} + \dot{\bar{Q}}_{cv} + \dot{\bar{Q}}_{ir} = \\ &= \int_{S_{cd}} -\lambda \cdot \text{grad}\vec{T} \cdot \vec{n} \cdot dS_{cd} + \int_{S_{cn}} \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot dS_{cv} \\ &\quad + \int_{S_{ir}} k \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dS_{ir} \end{aligned} \quad (2.19)$$

L'ultimo termine del primo principio della termodinamica è la variazione di energia interna che espressa in termini di potenza e su tutto il volume di controllo V risulta:

$$\dot{\bar{\Delta U}} = \int_V \left( \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV \quad (2.20)$$

La variazione di energia interna prende in considerazione due termini, il primo è legato alla variazione di temperatura all'interno del volume V, il secondo è invece comprende quella quota parte di energia meccanica in ingresso responsabile dei cambiamenti microstrutturali nel materiale e quindi creazione di difetti e di micro-cricche, formazione di bande di scorrimento.

Componendo i tre contributi di potenza si può esprimere il primo principio della termodinamica

$$\begin{aligned}
\int_V \left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot dV &= \\
&= \int_{S_{cd}} -\lambda \cdot \text{grad}\vec{T} \cdot \vec{n} \cdot dS_{cd} + \int_{S_{cn}} \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot dS_{cn} \\
&+ \int_{S_{ir}} k \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dS_{ir} + \int_V \left( \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Attraverso il teorema di Gauss-Green è possibile passare dall'integrale di superficie del termine relativo alla potenza di conduzione del calore ad un integrale sul volume di controllo V:

$$\int_{S_{cd}} -\lambda \cdot \text{grad}\vec{T} \cdot \vec{n} \cdot dS_{cd} = \int_V -\lambda \cdot \text{div}(\text{grad}\vec{T}) \cdot dV \tag{2.22}$$

Essendo:

$$\text{div}(\text{grad}\vec{T}) = \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{2.23}$$

Supponendo infine l'omogeneità del materiale all'interno del volume di controllo è possibile considerare costanti le caratteristiche fisiche e termiche all'interno del volume e nel tempo. Tale ipotesi è accettabile fino a quando viene assicurata la continuità del materiale (assenza di cricche macroscopiche) e non ci sono aumenti eccessivi della temperatura. Durante le prove a fatica del seguente elaborato di tesi le misurazioni sperimentali sono state eseguite in assenza di cricche macroscopiche e mantenendo limitato l'aumento di temperatura.

Si arriva alla seguente formulazione del primo principio della termodinamica:

$$\begin{aligned}
\int_V \left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot dV &= \\
&= -\lambda \cdot \int_V \text{div}(\text{grad}\vec{T}) dV + \int_{S_{cn}} \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot dS_{cn} \\
&+ \int_{S_{ir}} k \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dS_{ir} + \int_V \left( \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV
\end{aligned} \tag{2.24}$$

### 2.3.2 – Stima sperimentale di Q

La quota parte di energia dissipata sotto forma di calore può essere sperimentalmente misurata attraverso il gradiente di raffreddamento della temperatura successivo ad una improvvisa interruzione dell'applicazione del carico e quindi della prova a fatica [21]. Per arrivare alla formulazione che permette il calcolo del calore dissipato è necessario riprendere in mano la formulazione del primo

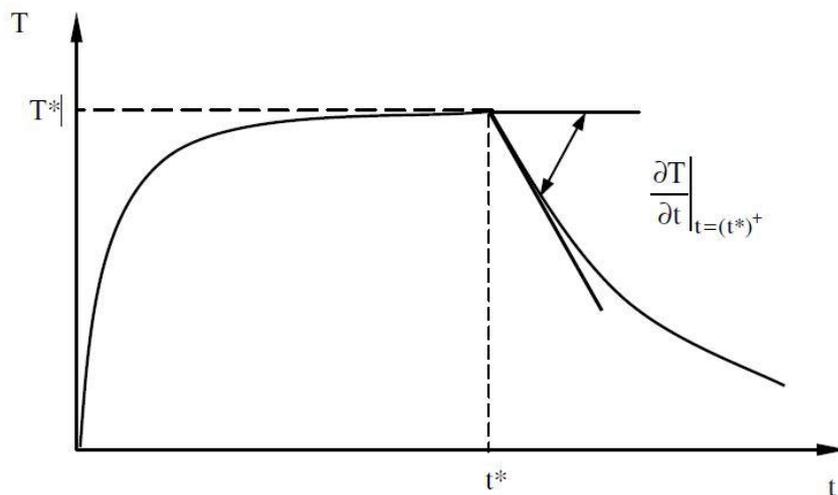
principio della termodinamica () definito in precedenza. Si supponga però di non applicarlo all'interno volume di controllo ma solamente ad un volume infinitesimo  $dV$  che fisicamente potrebbe essere rappresentato da un punto materiale di una termocoppia o da un pixel di una termocamera ed inserendo però i tre termini di scambio termico nel termine globale  $\dot{Q}$ .

$$\left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = \dot{Q} + \left( \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \quad (2.25)$$

Un provino a cui è applicato un carico dinamico è soggetto alla termoelasticità. Tuttavia, tale fenomeno non genera uno scambio netto di energia in un ciclo poiché legato ad uno scambio reversibile tra energia meccanica e calore [22-24] e l'entità delle variazioni di temperatura che ne derivano è di ordini di grandezza inferiore [24] rispetto alla variazione di temperatura del provino causata dalla prova a fatica in sé. Per questo supponendo di considerare un istante in cui la temperatura media del provino si è stabilizzata è possibile eliminare il primo termine relativo alla variazione di energia interna.

$$\left( \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = \dot{Q} + \dot{E}_p \quad (2.26)$$

Interrompendo improvvisamente la prova a fatica ad un certo istante  $t^*$  in questa fase di stazionarietà della temperatura, si osserverà una diminuzione graduale ed asintotica della temperatura come si può osservare nella figura N



*Figura 2.4. Andamento della temperatura durante la fase di riscaldamento e raffreddamento improvviso e definizione del gradiente di temperatura.*

Fermando l'applicazione del carico il termine del bilancio legato alla potenza meccanica in ingresso diventa nullo così come il termine  $\dot{E}_p$ , infatti non essendo applicato alcun carico non c'è

nemmeno danneggiamento microstrutturale. Come si osserva in figura N la pendenza temperatura cambia improvvisamente pendenza, perdendo così la stazionarietà. Il termine dell'energia interna legato alla variazione di temperatura è quindi diverso da zero. Considerando la potenza di scambio termico relativa all'unità di volume, un istante infinitesimo prima ed un istante infinitesimo dopo  $t^*$ , essa rimane invariata poiché legata alla distribuzione di temperatura sul provino e dell'ambiente.

Riscrivendo il primo principio della termodinamica:

$$0 = \dot{Q} + \rho \cdot c \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=t^*}$$

$$\dot{Q} = -\rho \cdot c \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=t^*} \quad (2.27)$$

Volendo infine calcolare la potenza termica scambiata nell'unità di volume all'interno di un ciclo è necessario dividere per la frequenza di carico  $f$ .

$$Q = \frac{\dot{Q}}{f} = -\frac{1}{f} \cdot \rho \cdot c \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=t^*} \quad (2.28)$$

Il valore della potenza termica  $Q$  ottenuto dalla formula () è stato utilizzato nel seguente elaborato di tesi per la stima del limite a fatica dell'acciaio C45 studiato. Analogamente a come già sottolineato in precedenza,  $Q$  mantiene valori relativamente bassi per ampiezze di tensione inferiori al limite di fatica e non appena queste lo superano,  $Q$  aumenta rapidamente.

## 2.4 – Metodi basati sulla temperatura

### 2.4.1 – Comportamento a fatica e temperatura

È noto che, applicando un carico variabile ad un provino, la sua temperatura superficiale tenderà ad aumentare. A partire dagli anni '70 del secolo scorso si è iniziato a condurre prove sperimentali per comprendere la relazione tra temperatura e comportamento a fatica.

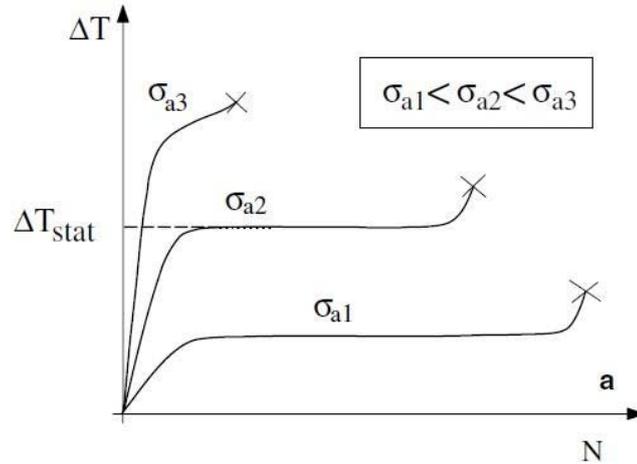


Figura 2.5. Andamento della temperatura rispetto al numero di cicli per diverse ampiezze di tensione.

Come si può osservare in figura N all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata, aumenta anche la temperatura e tale aumento di temperatura è caratterizzato da al più tre fasi. Se l'ampiezza di tensione è limitata si ha una breve fase di aumento di temperatura, seguita da una fase in cui la temperatura si stabilizza, si parla infatti di temperatura stabilizzata  $\Delta T_{stat}$ , ed infine un'ultima fase in cui la temperatura aumenta prima della rottura. Se invece l'ampiezza di tensione è elevata la temperatura non riesce a stabilizzarsi e si ha un aumento della temperatura fino alla rottura.

L'aumento di temperatura di cui fin qui si è fatto riferimento è la temperatura media superficiale del pezzo, dell'ordine delle decine di gradi Celsius. In realtà un provino soggetto ad una prova a fatica subisce l'effetto della termoelasticità. Per termoelasticità si intende in generale l'insieme di fenomeni che studiano i legami tra la trasmissione del calore e la legge costitutiva del solido elastico [25]. Sperimentalmente si osserva che se un provino soggetto ad un carico variabile varia la propria temperatura. In particolare, durante la fase di compressione avviene aumento della temperatura e durante la fase di trazione avviene una diminuzione della temperatura. La legge che regola l'effetto termoelastico in condizione adiabatiche per un materiale isotropo soggetto ad uno stato monoassiale di tensione è la seguente:

$$\frac{\Delta T}{T} = -K_m \cdot \Delta \sigma \quad (2.29)$$

Dove T è la temperatura media del pezzo,  $\Delta T$  è il range di temperatura,  $\Delta \sigma$  il range di tensione e  $K_m$  la costante termoelastica del materiale, definita come:

$$K_m = \frac{\alpha}{\rho \cdot c} \quad (2.30)$$

L'entità della variazione di temperatura causata dall'effetto termoelastico è di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto alla temperatura media raggiunta dal provino e per questo trascurabile.

#### 2.4.2 – Metodi termici

I metodi basati sul monitoraggio della temperatura permettono una stima del limite di fatica di un materiale secondo un ragionamento analogo a quello già esposto per i metodi energetici. Misurando la temperatura superficiale di un provino sottoposto ad una prova di fatica durante la sua fase di stabilizzazione si possono notare due diversi comportamenti. Inizialmente i valori di temperatura rimangono relativamente limitati e all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata non si riscontrano innalzamenti importanti. Successivamente a partire da una certa ampiezza di tensione la temperatura misurata aumenta velocemente ed in maniera significativa all'aumentare dell'ampiezza di tensione. Notando questo comportamento Luong [3,4] propone di stimare il limite di fatica del materiale come l'intersezione tra le due rette ricavate interpolando separatamente i dati sperimentali ricavati da basse ampiezze di tensione e da alte ampiezze di tensione. La prima retta è praticamente orizzontale, la seconda invece è caratterizzata da un'inclinazione importante e questo rende la determinazione dell'intersezione immediata. Una procedura molto simile (vista anche l'inclinazione delle rette) è stata proposta da La Rosa [5].

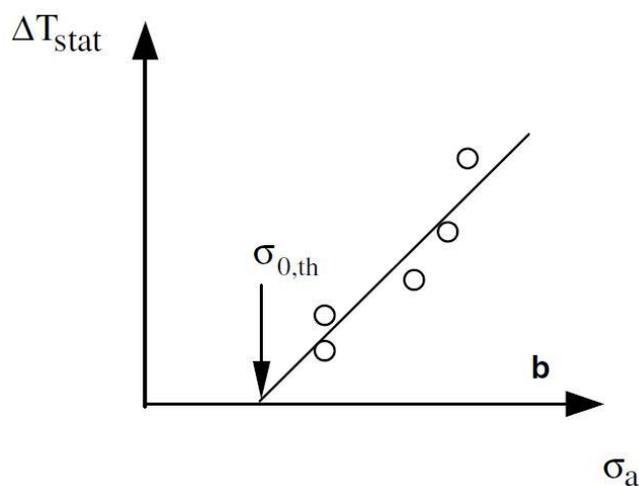


Figura 2.6. Andamento della temperatura stabilizzata al variare dell'ampiezza di tensione, con interpolazione dei dati sperimentali proposta da La Rosa. []

La Rosa propone di interpolare i soli dati sperimentali ricavati per ampiezze di tensione elevate ed intersecare la retta risultante con l'asse orizzontale passante per l'origine come mostrato in figura.

I due metodi appena presentati si limitano ad analizzare la temperatura stabilizzata della superficie del provino, più precisamente l'aumento di temperatura  $\Delta T_{st}$ . Tuttavia, analizzando il segnale di temperatura si può osservare come questo sia caratterizzato da più componenti e che la temperatura stabilizzata non sia altro che la media attorno alla quale la temperatura del provino oscilla. Si può quindi pensare di descrivere il segnale di temperatura utilizzando la serie di Fourier:

$$T(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.30)$$

Supponendo che il segnale di tensione sia:

$$\sigma(t) = \sigma_a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2.31)$$

dove  $\sigma_a$  è l'ampiezza di tensione ed  $f$  la frequenza di carico della prova, è possibile descrivere la temperatura secondo la seguente formulazione ferdandosi alla componente del secondo ordine []:

$$T(t) = (T_o + \Delta T \cdot f \cdot t) + T_1 \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi \cdot 2f \cdot t + \varphi_2) \quad (2.32)$$

Krapez et al. [26] hanno analizzato l'andamento delle componenti della temperatura secondo la suddivisione fatta nella formula N, sottolineando il significato delle singole componenti:

- $T_o$  la temperatura ad inizio acquisizione
- $\Delta T$  l'incremento medio della temperatura ( $\Delta T_{st}$ )
- $T_1$  e  $\varphi_1$  l'ampiezza e la fase della prima componente della serie rappresentativa dell'effetto termoelastico
- $T_2$  e  $\varphi_2$  l'ampiezza e la fase della seconda componente della serie rappresentativa dell'effetto di plasticizzazione a cui è soggetto il provino

Estrapolando le componenti  $\Delta T$ ,  $T_1$  e  $T_2$  dal segnale della temperatura ed analizzandole singolarmente rispetto all'ampiezza di tensione applicata è stato possibile stimare il limite di fatica. Per  $\Delta T$  e  $T_2$  il limite di fatica è stato individuato come la tensione lungo l'asse orizzontale intercettata dalla retta interpolante i dati ricavati per tensioni elevate. Invece per  $T_1$  il limite di fatica è stato individuato come la tensione a partire dalla quale la termoelasticità perde validità.

## 2.5 – Stato dell'arte

### 2.5.1 – Metodi energetici

Meneghetti nel 2007 ha presentato i risultati sull'analisi dell'energia dissipata sotto forma di calore attraverso analisi termica con termocoppie [21], secondo il modello da lui proposto utilizzando la formula N per la stima di Q. È stato preso in considerazione un acciaio AISI 304 L per provini lisci ed intagliati (provino piano con foro centrale) studiati a rapporto di ciclo  $R=-0.5$  e  $R=0.1$ . Le prove sono state condotte in controllo di forza ad una frequenza di carico compresa tra 10 e 16 Hz. Da queste è stato stimato il calore dissipato ed i risultati sono stati riassunti in un diagramma della vita a fatica avente come parametro di riferimento proprio il calore specifico dissipato.

In [27] Ricotta ha messo a confronto diversi metodi energetici e termici per la stima del limite di fatica. In particolare, tra gli altri, ha preso in considerazione il calore specifico dissipato in un ciclo e l'energia meccanica spesa in un ciclo che chiama rispettivamente  $\bar{W}$  e  $\bar{Q}$ .

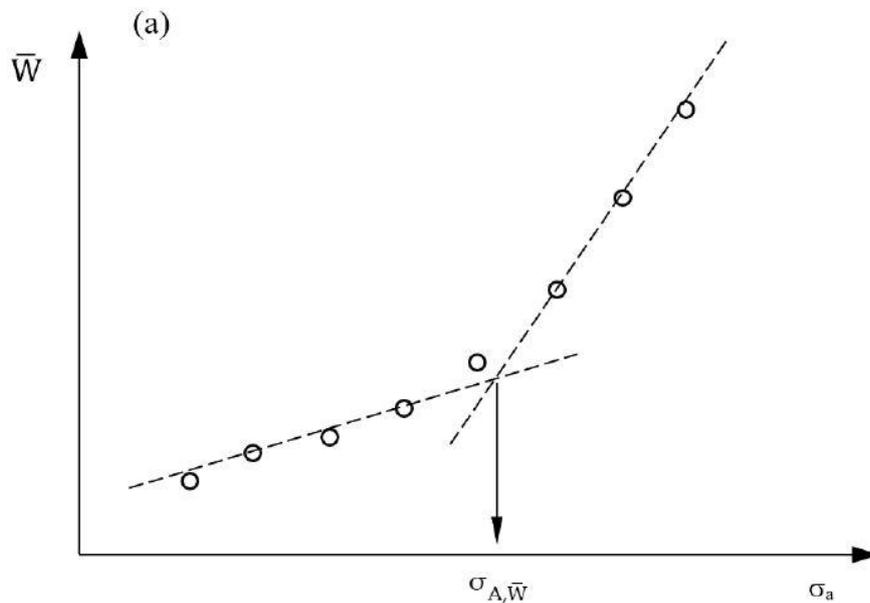


Figura 2.7. Schema dell'andamento dei punti sperimentali e del metodo di stima della tensione limite per  $W$ .

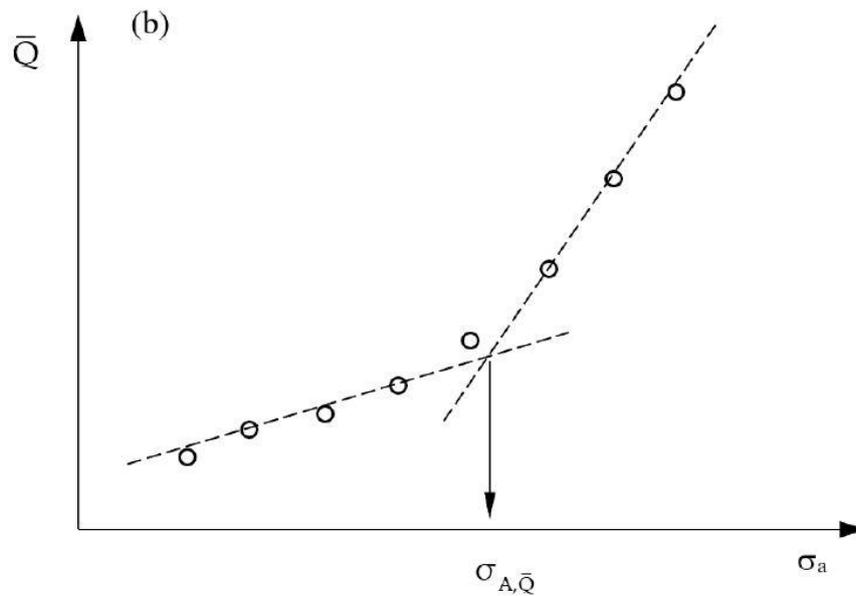


Figura 2.8. Schema dell'andamento dei punti sperimentali e del metodo di stima della tensione limite per  $Q$ .

Nelle figure 6 e 7 si osserva l'andamento tipico dei punti sperimentali. Per valori di tensione inferiore alla stima del limite di fatica la pendenza è limitata mentre per valori superiori la pendenza aumenta fino alla rottura del provino. In entrambi i metodi la stima del limite di fatica viene individuata come l'intersezione delle due rette interpolanti i punti sperimentali.

Sono state svolte prove a fatica monoassiale a trazione-compressione con un rapporto di ciclo  $R=-1$  su un acciaio AISI 304 L trafilato a freddo con due tipologie di provini a sezione circolare (la prima tipologia per il metodo stair-case, la seconda per i metodi energetici). Tutte le prove previste sono state. È stata condotta inizialmente la procedura stair-case prevista da normativa per avere un valore di confronto con cui lavorare. Successivamente sono state condotte le prove per i metodi energetici in cui l'acquisizione della deformazione nell'area utile è stata eseguita con un estensometro e l'acquisizione di temperatura è stata eseguita utilizzando delle termocoppie (rame e costantana). Quest'ultima in particolare durava 10s ad una frequenza di acquisizione di 204.8 Hz.

La procedura stair-case ha portato ad una stima del limite a fatica di  $\sigma_{A,-1,50\%} = 330 \text{ MPa}$ .

L'energia meccanica in ingresso è stata misurata come l'area del ciclo di isteresi ricavata dai dati forniti dalla cella di carico della macchina di prova e dall'estensometro.

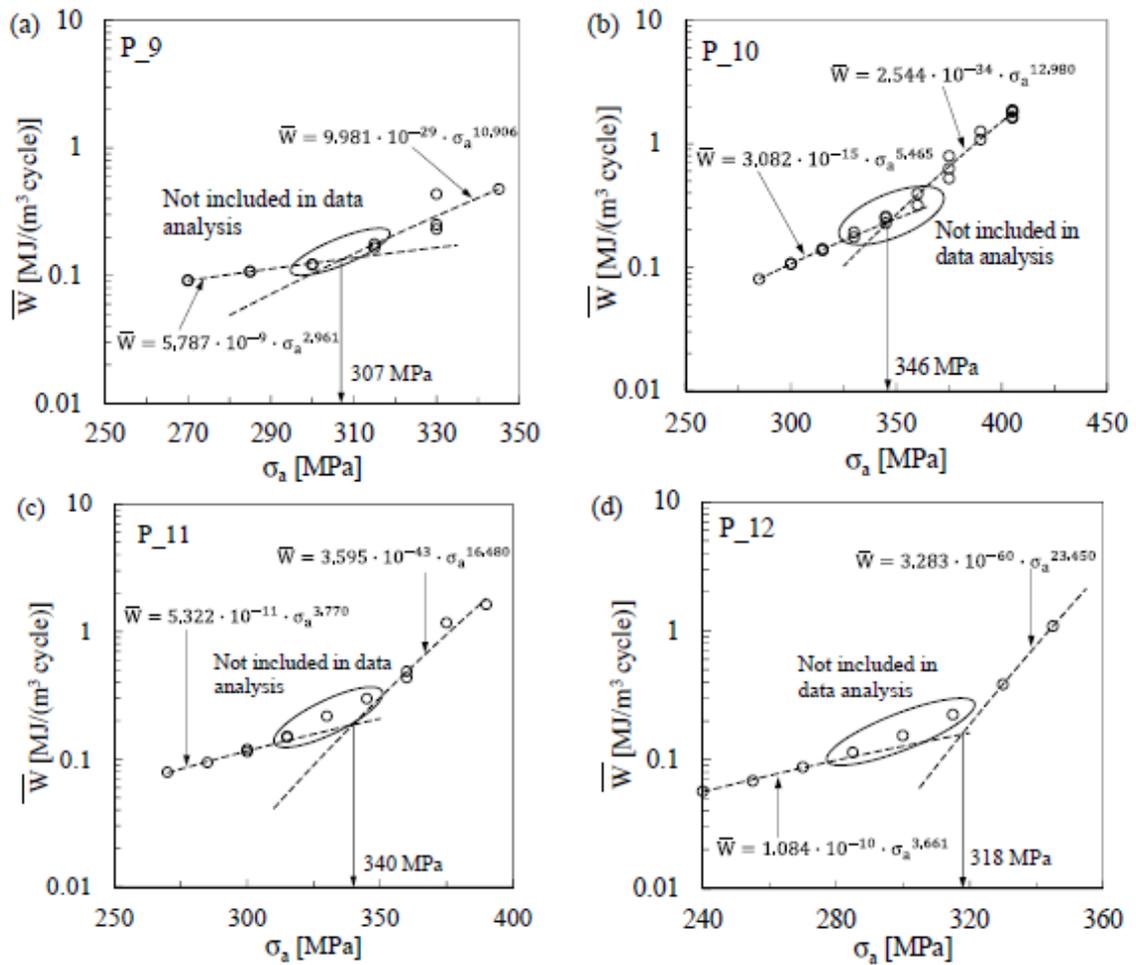


Figura 2.9. Risultati dell'analisi dell'energia meccanica in ingresso in un ciclo misurata come area del ciclo di isteresi. [27]

Per il calore dissipato durante un ciclo sono state eseguite delle misure di gradiente termico secondo quanto previsto dal metodo Meneghetti [21].

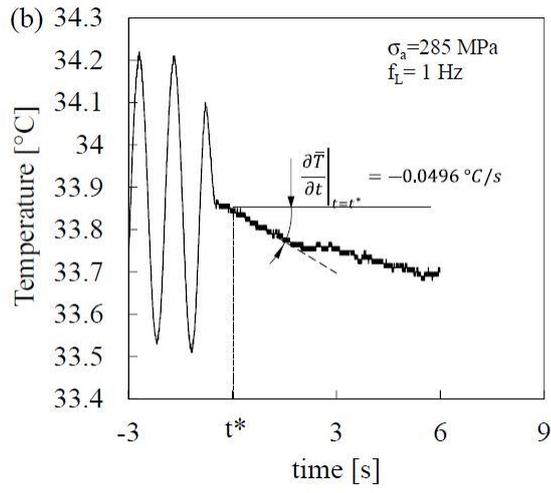


Figura 2.10. Esempio di gradiente di temperatura superficiale di un provino in seguito all'azzeramento del carico [21].

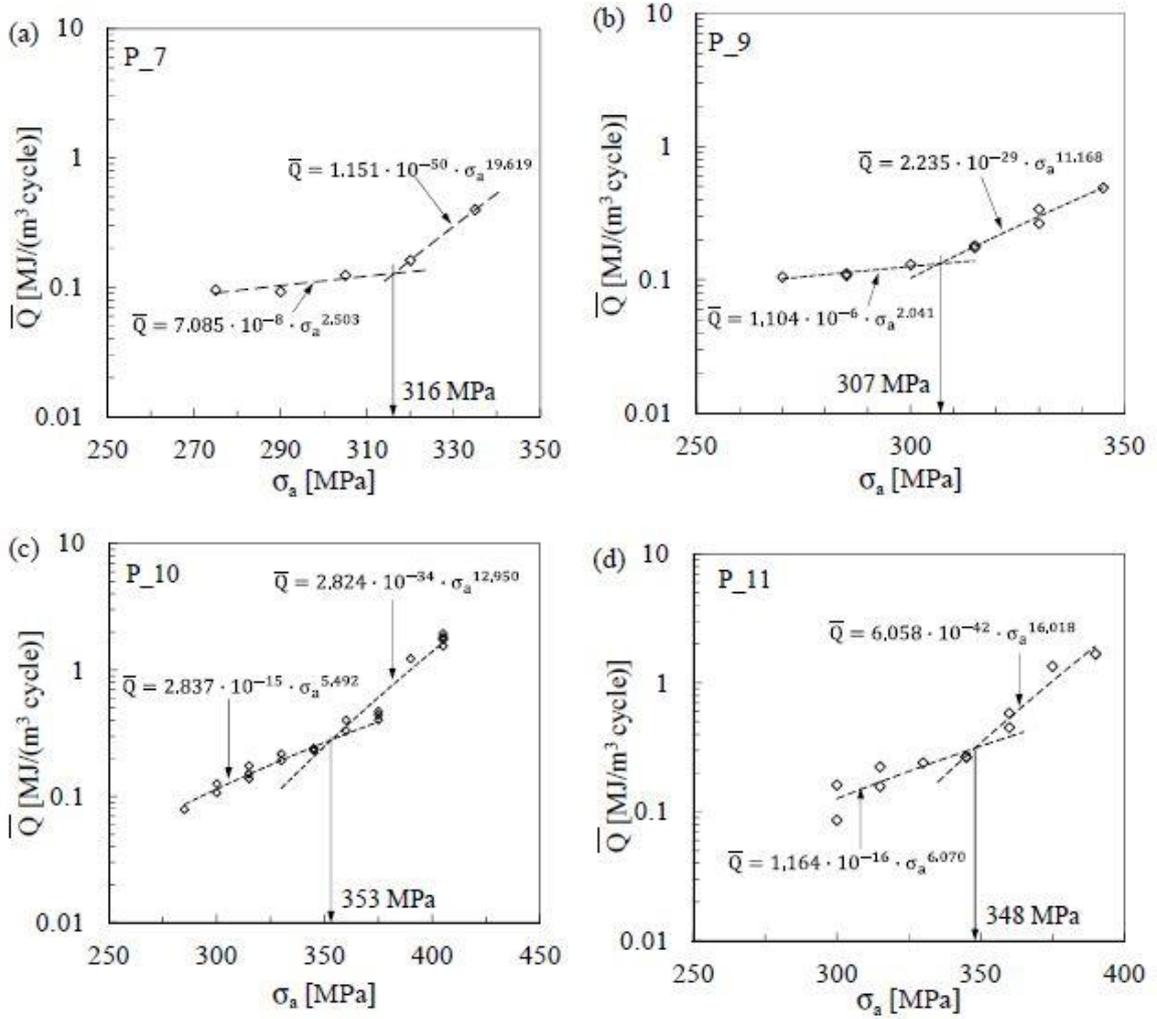


Figura 2.11. Risultati dell'analisi dell'energia dissipata in calore. [27]

Il valore medio del limite a fatica nei due casi è rispettivamente 328 MPa e 331 Mpa. La differenza percentuale risulta pari rispettivamente a 0.6% e 0.3% e quindi in ottimo accordo con il metodo stair case.

In [19] Shiozawa et al. hanno eseguito delle prove a fatica monoassiale su di un acciaio AISI 316 L vergine e precedentemente soggetto ad una deformazione del 6% rispetto al totale per  $R=-1$  [19]. La temperatura superficiale dei provini è stata monitorata con una termocamera e la stima del limite di fatica è stata eseguita sia con il metodo lock-in tradizionale che con quello modificato considerando la fase (considerando una differenza di fase  $\Delta\hat{\theta} = 57^\circ$ ).

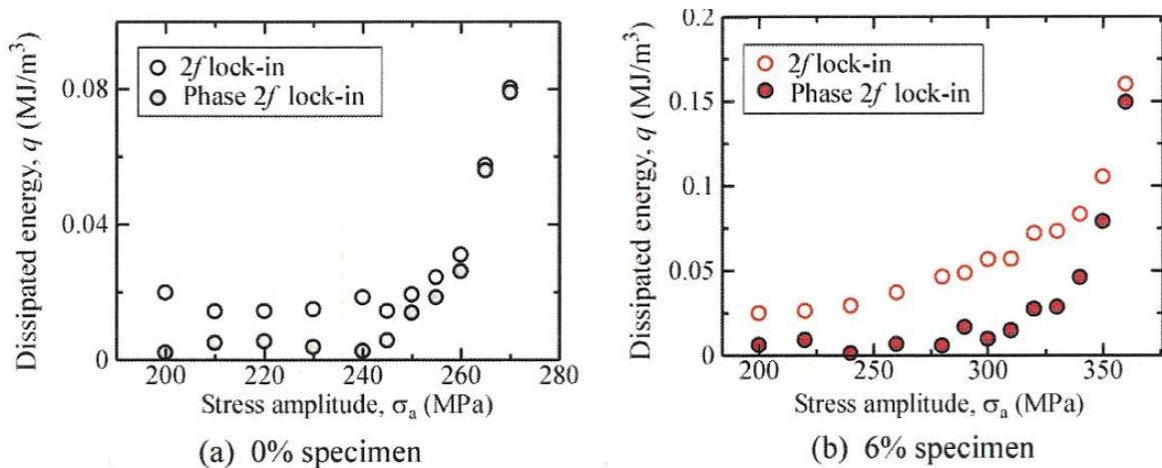


Figura 2.12. Energia dissipata  $q$  secondo i due differenti metodi proposti al variare dell'ampiezza di tensione nel caso di deformazione iniziale nulla (a) e deformazione iniziale del 6% (b). [19]

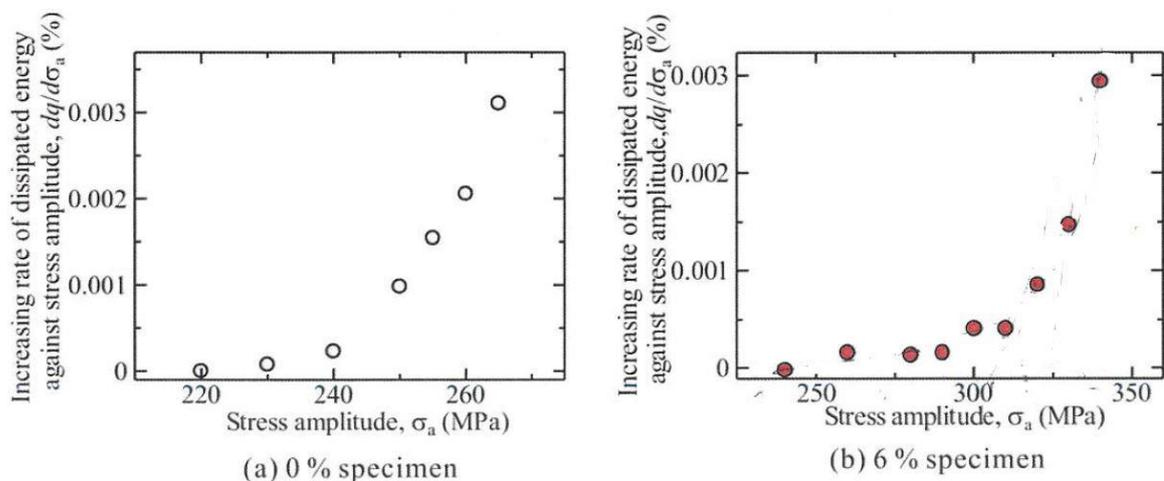


Figura 2.13. Gradiente dell'energia dissipata  $dq/d\sigma_a$ , calcolato secondo il metodo lock-in che considera la fase, al variare dell'ampiezza di tensione nel caso di deformazione iniziale nulla (a) e deformazione iniziale del 6% (b). [19]

Dai grafici sopra riportati a livello esemplificativo è stato stimato il valore del limite di fatica come l'intersezione delle rette interpolanti i punti a basso livello di tensione e quelli ad alto livello di tensione.

La stima del limite di fatica di riferimento, precedentemente calcolata secondo normativa, è di 250 MPa per i provini a 0% e 315 per i provini al 6%. Secondo il metodo convenzionale limiti di fatica sono pari a 257 MPa per 0% e 344 MPa per 6%. Invece utilizzando il metodo basato sulla fase i limiti stimati sono di 248 Mpa e di 310 MPa rispettivamente [19]. Si osserva quindi come il secondo metodo offra risultati estremamente più promettenti rispetto al primo.

### 2.5.2 – Metodi basati sulla temperatura

Krapez et al. [26], come precedentemente sottolineato, hanno esaminato l'utilizzo delle diverse componenti della temperatura col fine di trovare una relazione tra il loro andamento ed il limite a fatica del materiale. In particolare, sono state svolte delle prove a fatica monoassiali di trazione/compressione e contemporaneamente la superficie del provino è stata monitorata da una termocamera [26]. Successivamente utilizzando la tecnologia lock-in di analisi dati i segnali di carico ed il segnale della termocamera vengono correlati ed elaborati, ottenendo così l'andamento della temperatura della superficie del provino durante la prova di fatica. I materiali considerati sono un acciaio inossidabile AISI 316L e la lega di alluminio 7010, in entrambi i casi le superfici dei provini sono state coperte con della vernice opaca nera per aumentare l'emissività del provino ed evitare riflessi. Le prove a fatica sono state eseguite a  $R_{\sigma}=-1$  ed  $R_{\sigma}=0$  applicando una ampiezza di tensione alla frequenza di carico di 2 Hz mantenuta per alcune decine di cicli, in maniera tale da non causare danneggiamento, per passare poi ad un carico maggiore e ripetere l'acquisizione. Procedendo in questo modo è possibile esaminare le componenti della temperatura per un ampio range di tensioni.

Di seguito si riportano i risultati sperimentali ottenuti per l'acciaio AISI 316L

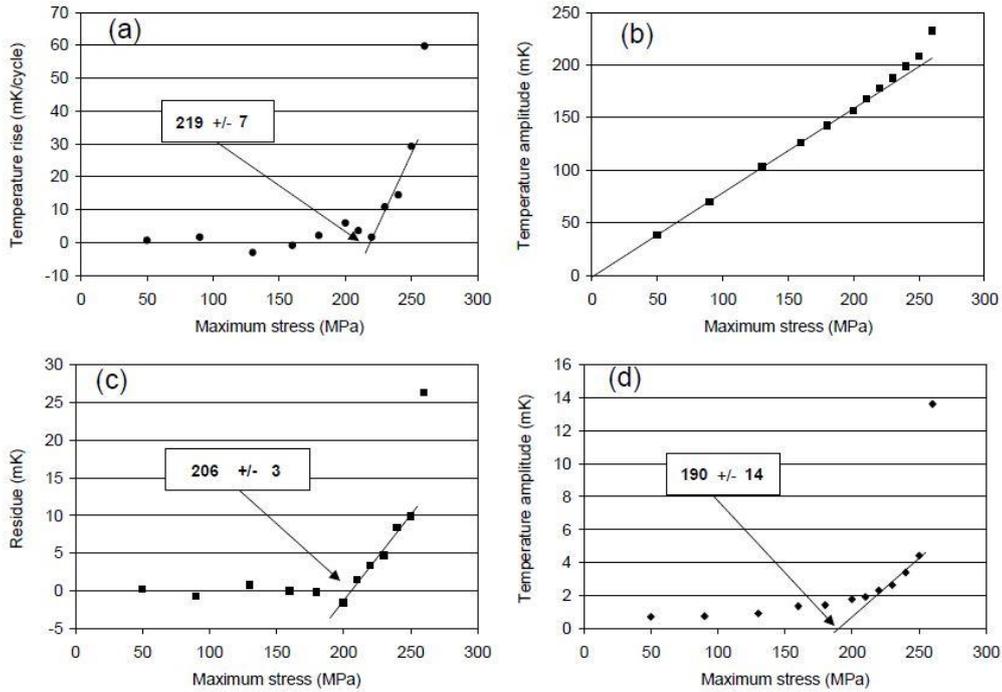


Figura 2.14. Risultati delle prove a fatica per  $R\sigma=-1$ ; (a) Andamento dell'aumento di temperatura  $\Delta T(\sigma)$ ; (b) Andamento della prima componente di Fourier  $T1(\sigma)$  rispetto alla retta descrivente la termoelasticità; (c) Differenza tra  $T1(\sigma)$  e punti della retta; (d) Andamento della seconda componente di Fourier  $T2(\sigma)$ .

Dai grafici a,c,d della figura N si può notare come il limite di fatica stimato non sia altro che il valore di tensione intersecato dalla retta interpolatrice dei punti sperimentali a partire dei quali inizia l'innalzamento della componente della temperatura. Senza considerare l'ultimo punto precedente la rottura.

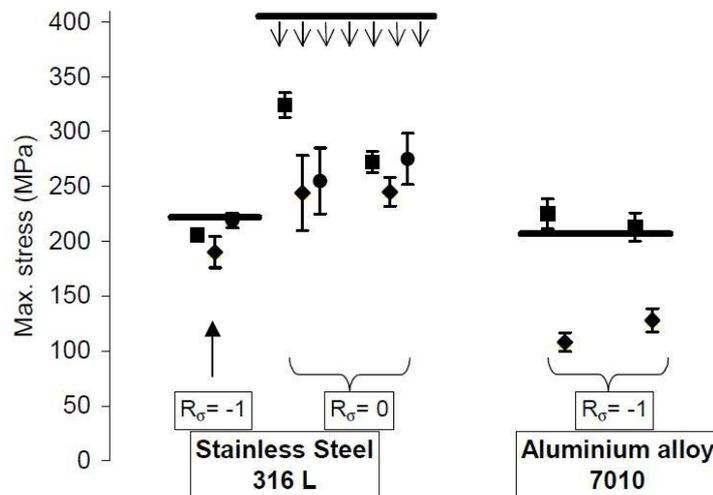


Figura 2.15. Riassunto risultati prove sperimentali per acciaio 3136L ed alluminio 7010.

Il limite a fatica per un rapporto di ciclo pari a -1 nel caso di AISI 316L è 222MPa, i risultati ricavati dalle tre componenti della temperatura sono compresi tra 190 MPa e 219 MPa e quindi c'è una buona corrispondenza tra i dati sperimentali. Per un rapporto di ciclo pari a 0 invece i risultati sono maggiormente dispersi ed in generale sottostimano il limite di fatica stimato secondo normativa di 405 MPa.

Per quanto riguarda l'alluminio, sono state condotte prove solamente per  $R=-1$  ma non hanno portato a risultati soddisfacenti e piuttosto diversi l'uno dall'altro. Non è stato osservato un aumento significativo della temperatura se non appena prima la rottura, ma quindi lontano dal limite di fatica. Non è stato possibile quindi usare la curva  $\Delta T(\sigma)$ . L'andamento di  $T_2(\sigma)$  invece presentava un aumento molto lento e progressivo, non permettendo di definire un vero e proprio inizio di danneggiamento.

## 2.6 – Obiettivi della tesi

Lo scopo principale del seguente elaborato di tesi è quello di analizzare il comportamento della seconda armonica della temperatura  $\Delta T_D$  durante una prova a fatica lungo la totalità della superficie del provino ed in particolare verificare quanto proposto in [26] ed in [27] nel caso però di un acciaio laminato C45.

Evidenti prove sperimentali hanno dimostrato l'efficacia dei metodi energetici o termici nella stima del limite di fatica. Il seguente elaborato di tesi si inserisce all'interno degli studi descritti in precedenza, avendo i seguenti macro-obiettivi:

- Analisi della seconda armonica della temperatura, quella cioè legata alla dissipazione di energia per plasticizzazione, durante delle prove di fatica eseguite a  $R=-1$  e  $R=0.1$  e considerando un materiale differente rispetto all'acciaio inossidabile AISI 316L. Si considera infatti un acciaio strutturale C45, comunemente utilizzato nelle strutture meccaniche.
- Stima del limite di fatica considerando come parametri di riferimento l'energia meccanica in ingresso (area del ciclo di isteresi), il calore dissipato nell'ambiente (metodo Meneghetti) e la seconda armonica della temperatura (secondo quanto proposto da Krapez), confrontando infine tali risultati con la stima ricavata dal metodo classico, previsto da normativa, *stai case*.

## Capitolo 3 - ANALISI SPERIMENTALI BASATA SUI METODI ENERGETICI

### 3.1 – Introduzione

Lo scopo di questo lavoro è quello di valutare la possibilità di stimare il limite di fatica di un materiale sfruttando metodi alternativi che considerano parametri energetici e di temperatura durante

delle prove a fatica di un acciaio strutturale C45. Vengono condotte due tipologie di prove sperimentali. Inizialmente vengono eseguite le prove a fatica finalizzate all'acquisizione dei dati necessari ai metodi energetici e termici e successivamente le prove a fatica per il metodo stair-case, previsto da normativa come confronto.

La procedura per i metodi energetici ha la finalità di determinare l'andamento superficiale della temperatura del provino lungo l'area utile e le sue deformazioni.

### 3.2 – Proprietà del materiale

Il materiale in esame è un acciaio C45 laminato, un materiale quindi con diversi utilizzi strutturali. In questo caso di maggiore interesse sono le proprietà fisiche, essendo tale studio finalizzato all'analisi dei risultati ottenuti dai metodi energetici.

Si riporta la seguente tabella contenente la composizione chimica del materiale in percentuale:

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu
0.46	0.24	0.63	0.15	0.02	0.08	0.10

*Tabella 3.1. Composizione chimica percentuale dell'acciaio C45.*

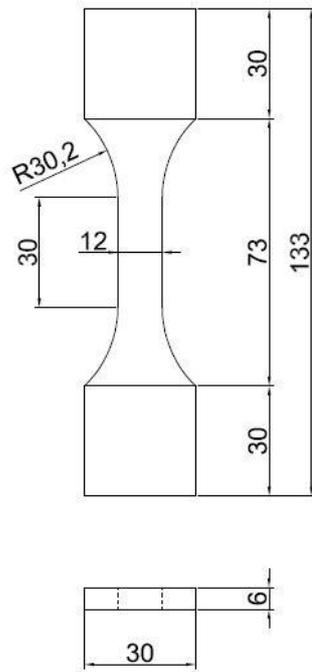
Le proprietà fisiche del materiale sono state determinate in [28] e risultano essenziali per l'applicazione del metodo energetico basato sul calore dissipato. In particolare, la densità ed il calore specifico:

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 486 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

### 3.3 – Geometria dei provini

I provini utilizzati per le prove termografiche sono provini lisci a sezione rettangolare caratterizzati da una sezione netta di larghezza ( $12 \pm 0.05$ ) mm e spessore ( $6 \pm 0.05$ ) mm. Di seguito si riporta la vista frontale e dall'alto del provino utilizzato.



*Figure 1. Vista laterale e dall'alto della geometria del provino utilizzato con le quote principali.*

### 3.4 – Apparato sperimentale

#### 3.4.1 – Macchina di prova

Le prove a fatica vengono svolte con una Schenck Hydropuls PSA100, una macchina servo-idraulica equipaggiata con una cella di carico da 100 kN in grado di eseguire prove monoassiali, le deformazioni dell'area utile del provino vengono monitorate con un estensometro MTS.



*Figura 3.1. Macchina di prova usata per le prove sperimentali.*

### 3.4.2 – Termocamera

Il monitoraggio della temperatura superficiale del provino viene eseguita con la termocamera differenziale FLIR 7000.

Caratteristiche termocamera.

- Obiettivo di 50 mm con lente in germanio
- Funzionamento nell'infrarosso alle lunghezze d'onda  $3\div 5\mu\text{m}$  e  $8\div 12\mu\text{m}$
- Risoluzione: 320x256 pixel
- Sensore a raggi infrarossi a fotoni in grado di scansionare l'intera superficie in esame
- NETD < 20 mK
- Frequenza di campionamento massima = 350 Hz
- Incertezza della misurazione:  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  or  $\pm 1\%$



Figura 3.2. Termocamera FLRI SC7000

La termocamera differenziale utilizzata per le misure termografiche contiene al suo interno l'amplificazione 'lock-in'; a differenza invece delle prime termocamere sviluppate in cui era presente un dispositivo esterno per l'amplificazione 'lock-in'. Questo strumento consiste sostanzialmente in due componenti: un mixer ed un filtro passa-basso.

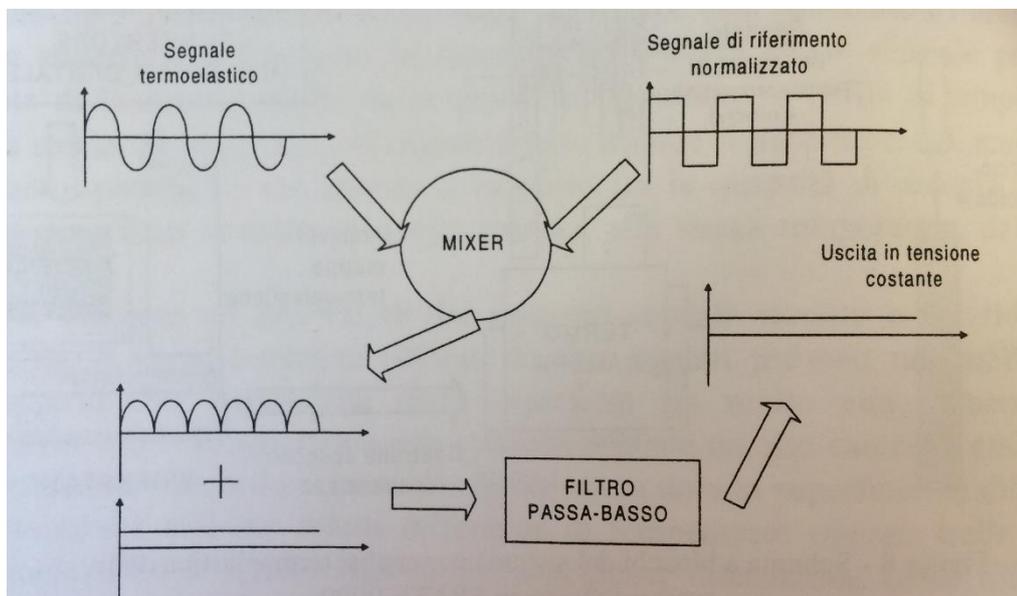


Figura 3.3. Schema dell'amplificatore lock-in [25].

Come si osserva dall'immagine della figura 2 il mixer elabora il segnale termografico della termocamera ed il segnale di riferimento della cella di carico moltiplicandoli. Il segnale in uscita

contiene le frequenze somma e differenza di quelle presenti nei segnali in ingresso. La componente del segnale relativa alla termoelasticità ha la stessa frequenza del segnale della cella di carico ma ampiezza di segno opposto. Di conseguenza la componente differenza, nel segnale in uscita del mixer, è un valore costante (frequenza nulla) proporzionale al solo segnale che arriva dal sensore della termocamera e tra tutte le componenti contenenti caratteristiche del rumore è l'unica che in uscita dal mixer da un valore a frequenza nulla. Il filtro passa-basso poi elimina le componenti relative al rumore [25].

### 3.5 – Procedura di esecuzione delle prove sperimentali termografiche

Tutti i provini da testare sono inizialmente stati passati con della carta vetrata per pulire la superficie dallo strato dovuto alla lavorazione e per smussare gli spigoli, evitando così concentrazioni di tensione. Le prove termografiche prevedono l'utilizzo di una termocamera che misura l'energia irradiata dalla superficie del provino nel campo dei raggi infrarossi [25], ed un parametro fondamentale di tale misura è l'emissività del materiale. Per evitare problemi di riflessi sulla superficie e per assicurare un accettabile rapporto segnale rumore, l'emissività del materiale dovrebbe essere almeno pari a 0.9. È inoltre fondamentale che tale valore sia costante ed omogeneo lungo tutta la superficie in esame. In generale la superficie lucida di un acciaio ha un'emissività relativamente bassa (dell'ordine di 0.1) e per questo viene uniformemente ricoperta con una vernice spray nero opaco. In questo caso come vernice spray viene utilizzata la vernice Banko che assicura un'emissività di 0.92. È fondamentale che la vernice venga stesa nel modo più omogeneo possibile, in maniera da evitare macchie o difetti superficiali.



*Figura 3.4. Esempio di provini con superficie lucida non verniciata (sinistra) e con superficie ricoperta di vernice opaca nera (destra).*

Come già sottolineato in precedenza l'apparato sperimentale è costituito dalla macchina di prova per eseguire le prove a fatica monoassiale, da un controllore PID, da una termocamera differenziale e da un estensometro. Attraverso due computer si impostano e monitorano le prove.

Si riporta ora la procedura utilizzata per l'esecuzione delle prove sperimentali, partendo dalle impostazioni relative alla Schenck:

- Avviamento del programma Controller RT3 (controllore della macchina di prova) dal computer collegato al controllore RT3.

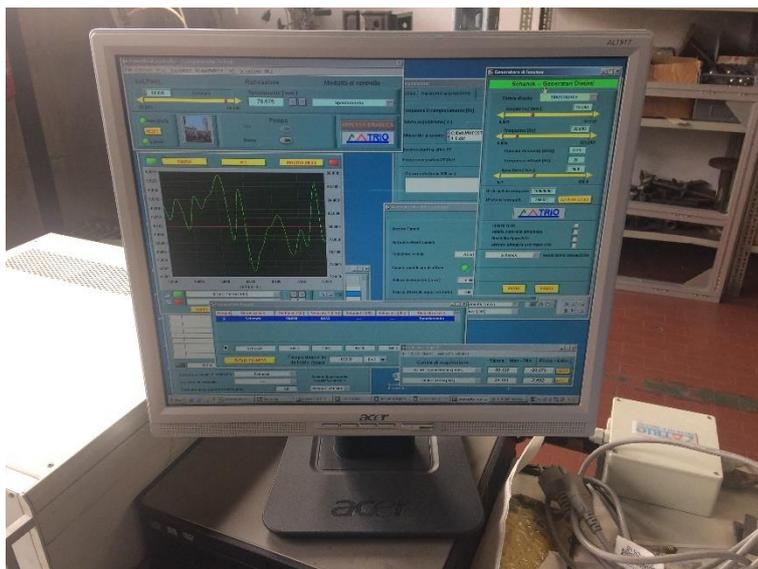


Figura 3.5. Schermata del programma di controllo RT3 utilizzato per impostare e monitorare le prove.

- Dal pannello di controllo del programma si imposta come modalità di controllo lo spostamento e dopo aver premuto il pulsante reset si avvia il sistema oleodinamico dando pressione alla macchina (prima bassa e poi alta pressione).
- Avendo la macchina in controllo di spostamento si effettua l'afferraggio del provino, avvicinando opportunamente le morse utilizzare la squadra per assicurare l'allineamento verticale del provino con l'asse delle morse. La morsa superiore della macchina è fissa e quella inferiore è mobile con spostamento positivo verso il basso.
- Le prove vengono eseguite in controllo di forza, quindi si seleziona come modalità di controllo la forza e si imposta il set point, ossia il valore attorno al quale la forza varia. Nel caso di prove condotte a  $R=-1$  il set point imposto è  $F_m=0$  kN, invece nel caso di  $R=0.1$  il set point imposto è il valore della forza media  $F_m$  da applicare. Modificando il set point della forza è anche cambiato lo spostamento e quindi sull'opzione trasduttori è necessario selezionare l'azzeramento del canale spostamento. In questo modo si ha come punto di partenza lo spostamento nullo e la forza media della prova
- Si collega l'estensometro al provino in maniera tale che vengano misurati gli spostamenti della zona centrale, ossia l'area utile, della superficie del provino. Le lame dell'estensometro vengono posizionate posteriormente al provino (sulla superficie senza vernice) mentre le linguette di fissaggio sono fissate sulla superficie verniciata. L'estensometro deve essere posizionato in maniera tale da evitare giochi e vibrazioni diverse da quelle verticali in fase di lavoro. Inoltre, quando si posizionano le linguette di

fissaggio, è necessario evitare di rovinare la vernice per evitare poi una disomogeneità nella distribuzione della temperatura.



Figura 3.6. Posizionamento dell'estensometro

- Nell'opzione Controllo ed Assegnazione trasduttori si associa il canale In4 con l'estensometro 'EST esterno 10%' in maniera tale da collegare il segnale dell'estensometro al canale In4 del programma.
- L'estensometro si collega quindi con il controllore attraverso un apposito collegamento di forma. Per evitare disturbi del segnale e quindi rumore esterno è opportuno tenere il cavo il più possibile distante dalle fonti elettromagnetiche.
- Nell'opzione Definizione limiti si impostano i limiti di spostamento e di forza in interlock in maniera tale che quando viene misurato un valore che supera limiti imposti la prova si interrompe automaticamente e si blocca il circuito oleodinamico. Per le prove a  $R=-1$  si pone lo spostamento compreso tra +2 e -1 mm e la forza compresa tra  $(F_a+2 \text{ kN})$  e  $(F_a-2 \text{ kN})$ . Per le prove a  $R=0.1$  si pone lo spostamento compreso tra +5 e -1 mm e la forza compresa tra  $(F_a+6 \text{ kN})$  e -1 kN. All'estensometro invece non devono essere imposti limiti.
- Si imposta la prova a fatica. Dal Pannello di controllo nell'opzione Generatore si seleziona Generatore di funzioni e si impostano le variabili della prova a fatica:

Forma d'onda	sinusoidale
Ampiezza	$F_a$ [kN]

Frequenza	$f_i$ [Hz]
Velocità di sweep	0.25 [Hz/s]
Span rate	20 [%]
N° cicli obiettivo	10000000

L'ampiezza è in questo caso l'ampiezza di forza essendo la prova in controllo di forza mentre la frequenza è la frequenza di carico che si vuole applicare. La definizione della frequenza corretta è fondamentale poiché essa influisce la temperatura che il provino raggiunge. Inizialmente si pone uguale ad 1 Hz e successivamente nel corso della prova si aumenta come verrà chiarito successivamente.

- Definizione parametri di salvataggio del test. Dal Pannello di controllo si seleziona Test fatica. Come intervallo di acquisizione si impone un intervallo logaritmico in maniera tale che nei primi 10 cicli venga salvato ogni ciclo, per i successivi 100 cicli si salva un ciclo ogni 10 e così via. Come parametri di acquisizione si imposta 200 punti per ciclo, 2 cicli da acquisire e si impostano le cartelle di salvataggio dati.
- Dalla finestra Test fatica si seleziona Avvia acquisizione.
- Dal Pannello di Controllo si seleziona Oscilloscopio per osservare l'andamento del segnale nel tempo.

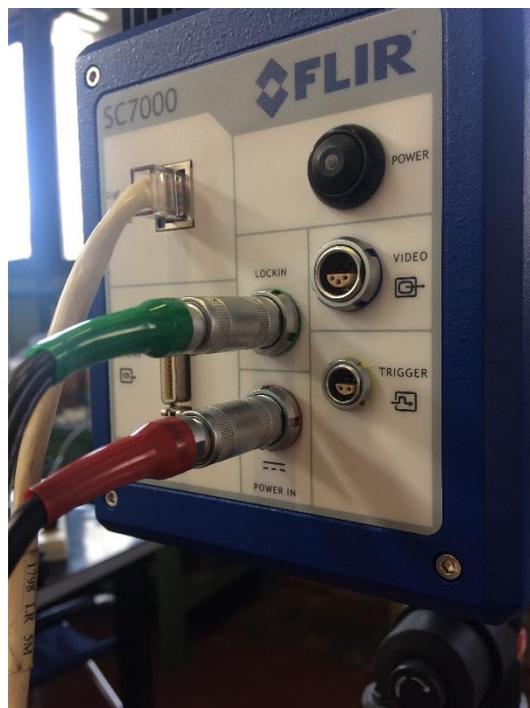
La macchina di prova è pronta ad applicare quindi un carico sinusoidale al provino e l'estensometro è posizionato correttamente per la misura degli spostamenti necessari alla misura dei cicli di isteresi. Si riportano ora i passaggi per l'utilizzo della termocamera.

- La termocamera viene collegata con un accoppiamento di forma ad un treppiede e puntata verso la direzione del provino.

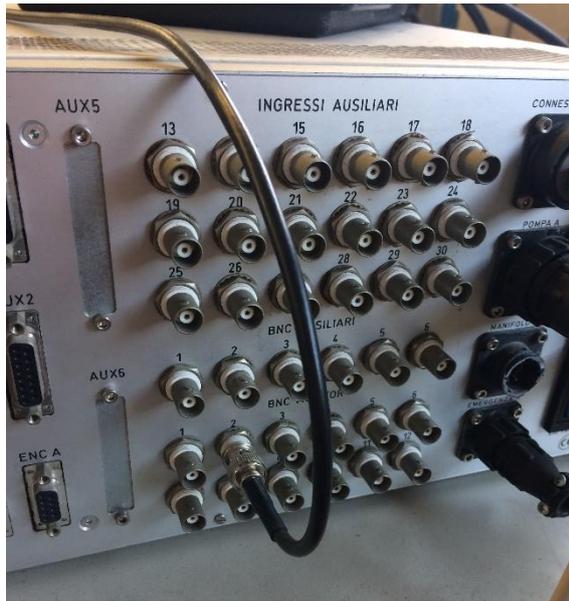


*Figura 3.7. Termocamera incastrata sul treppiede e puntata in direzione del provino*

- La termocamera viene innanzitutto collegata alla presa di corrente (cavo rosso) ed accesa. Successivamente si collega la termocamera al controllore (cavo verde) collegando il cavo all'ingresso BNC monitor 2 del controllore RT3 in maniera da connettere i segnali di temperatura e della cella di carico. Infine si collega la termocamera al computer in cui è installato il programma Altair.

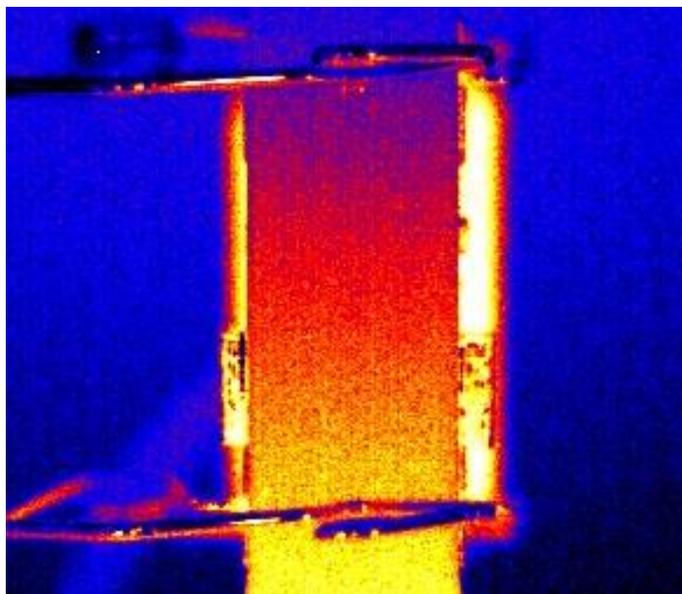


*Figura 3.8. Lato posteriore della termocamera*



*Figura 3.9. Collegamento della termocamera all'ingresso ausiliario BNC Monitor 2*

- Si avvia il programma Altair e, dopo aver selezionato il pulsante Open Live Camera, è possibile osservare a monitor l'immagine termografica. Osservando l'immagine termografica si aggiusta la posizione della termocamera (altezza e inclinazione treppiede) in maniera tale che essa sia in bolla e che filmi l'area del provino compresa tra le linguette dell'estensometro. Infine, ruotando il fuoco, è possibile mettere a fuoco l'immagine termografica.



*Figura 3.10. Esempio di immagine termica osservabile con la termocamera*

- Si seleziona Camera si imposta la frequenza di acquisizione (frame rate) di 204.8 Hz e si seleziona windowing 1\2 frame (in maniera da dimezzare il numero di frame a video).

- Si seleziona Temperature range e si seleziona la lente da 50 mm ed il range di temperatura compreso tra 20 e 69 °C modificandolo però con il comando wizard range configuration ed impostando il range di temperatura tra 20 e 60 °C. In questo modo la curva che definisce il comportamento del materiale è unica.
- Si seleziona Recorder e si imposta un tempo di acquisizione (time) di 40s. In questo modo il numero totale di frame è di 8192, pari a  $2^{13}$ . Il numero di frame deve essere una potenza del 2 poiché successivamente il segnale verrà analizzato con la Trasformata di Fourier.
- Si definiscono ora le condizioni al contorno selezionando Measure e Radiometry.

Emissivity	0.92
Background	temperatura parete retrostante
Trasmission	100 %
Distance	distanza lente-provino [mm]
Atmosphere	temperatura ambiente

L'emissività è stata calcolata in [] e dipende dalla vernice nera opaca sulla superficie del provino. La temperatura della parete retrostante il provino e la temperatura ambiente sono misurate con un termometro e supposte uguali.

Sia la macchina di prova che la termocamera sono pronte all'utilizzo.

Dalla finestra Generatore di funzioni, selezionando il pulsante Avvio, si inizia la prova a fatica. Come sottolineato in precedenza il collegamento tra estensometro e controllore potrebbe risentire dei campi elettromagnetici della strumentazione presente attorno al perimetro della macchina ed il segnale risultante sarebbe disturbato. Per prima cosa quindi, all'avvio della prova a fatica, è necessario selezionare l'uscita In4 nella finestra dell'oscilloscopio per osservare l'andamento dello spostamento e, per tentativi, spostare il cavo dell'estensometro per diminuire il disturbo nel segnale. Una volta scelta la posizione ottimale del cavo si seleziona la finestra dell'oscilloscopio per osservare l'andamento della forza F e del Comando Schenck. La forza F è l'effettiva forza applicata al provino, mentre il Comando Schenck è il comando fornito in input alla macchina (in questo caso la forza, essendo una prova in controllo di forza).

La frequenza di carico inizialmente imposta è 1 Hz. Per avere un aumento apprezzabile di temperatura e per fare in modo che la temperatura raggiunga abbastanza velocemente la stabilizzazione si aumenta la frequenza. Il valore della frequenza di carico deve essere il più alto

possibile senza però causare un eccessivo riscaldamento del provino (superiore ai 60 °C) che porterebbe portare la temperatura a divergere senza che essa raggiunga la stabilizzazione.

Una volta raggiunta la temperatura di stabilizzazione  $T_{st}$  si può passare al salvataggio del segnale. Ogni prova consiste nel salvataggio di due segnali

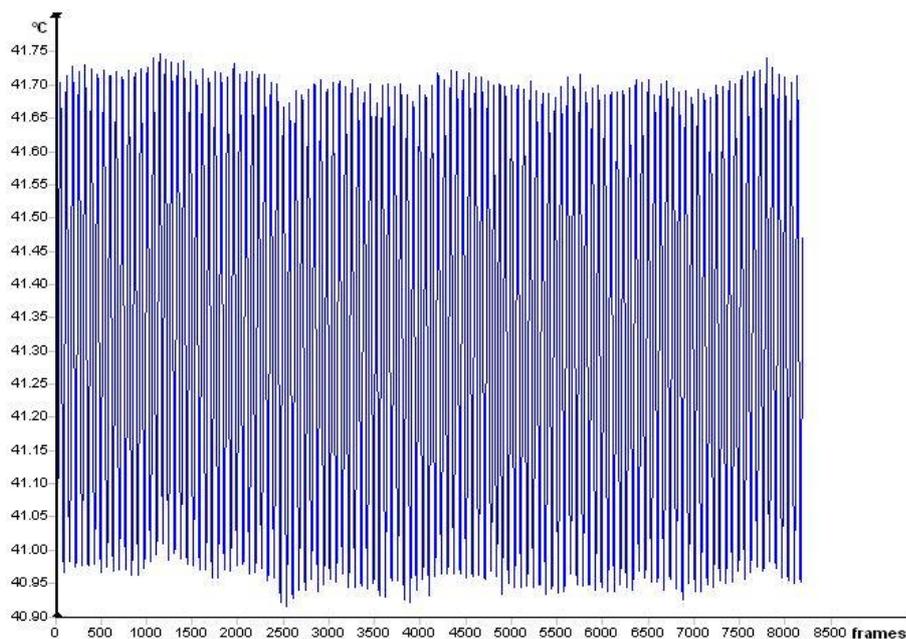
Primo salvataggio:

- Altair - Recorder -Prepare – Tasto rosso di registrazione.

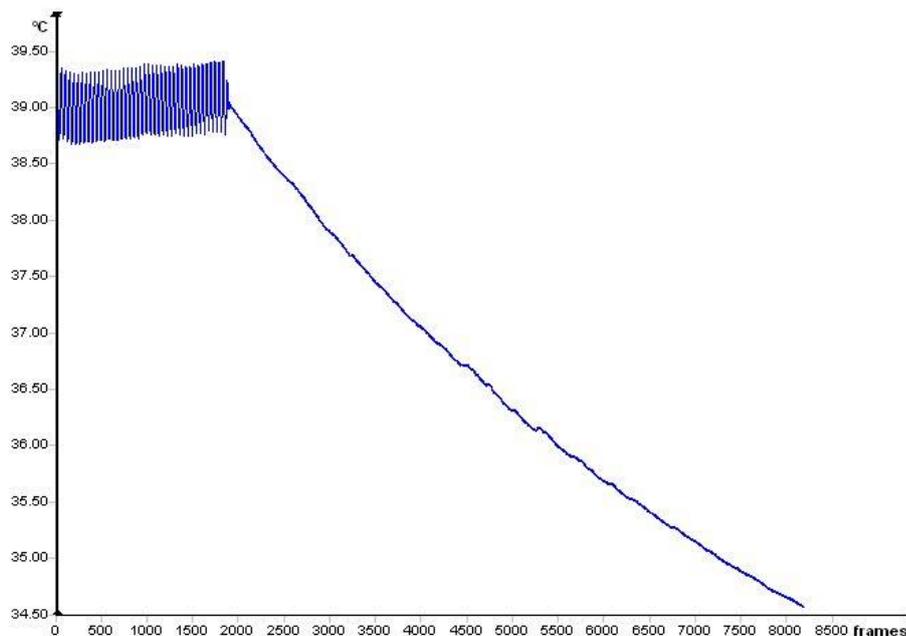
Secondo salvataggio:

- Controller RT3 – Generatore di funzioni – span rate=100%
- Recorder – Prepare – Tasto rosso di registrazione
- Controller RT3 – Generatore di funzioni – STOP.

Nel primo vengono salvati 40 s di temperatura nella fase di stabilizzazione, mentre nel secondo vengono salvati 40 s di temperatura inizialmente stabilizzata e che successivamente cala asintoticamente a causa dell'interruzione improvvisa della prova.



*Figura 3.11. Andamento della temperatura stabilizzata salvato nella prima registrazione durante una prova a  $R=-1$ , con ampiezza di tensione di 340 Mpa ed una frequenza di prova di 3 Hz.*



*Figura 3.12. Calo di temperatura dovuto all'interruzione di una prova a  $R=-1$ , con ampiezza di tensione di 270 Mpa ed una frequenza di prova di 6 Hz.*

Come si osserva nelle figure 7 e 8 vengono registrati 40 s ad una frequenza di campionamento di 204.8 Hz per un totale di 8192 frame.

Affinché il segnale misurato dalla termocamera sia il più possibile preciso è bene inserire il provino in un ambiente controllato in maniera tale da mantenere costanti le condizioni al contorno. In questo caso non è stato possibile disporre di un ambiente così descritto e di conseguenza sono state prese alcune precauzioni. Durante la fase di misurazione i movimenti attorno al provino vengono ridotti al minimo in maniera tale da diminuire il più possibile lo spostamento d'aria.

Un altro problema riguarda l'interruzione della macchina di prova per la determinazione del gradiente di raffreddamento della temperatura. Infatti, a causa dell'andamento sinusoidale dovuto alla termoelasticità può essere complesso in fase di elaborazione identificare l'istante nel grafico di T-t in cui si ha l'interruzione. Se l'interruzione avviene in fase di carico la temperatura sarà in fase calante e di conseguenza l'interruzione risulterebbe anticipata ed analogamente in fase di scarico. Il modo migliore per condurre la prova è quello di interromperla quando viene raggiunta la forza minima (ossia la temperatura massima) in modo da individuare l'istante di interruzione più facilmente [21].

### 3.6 – Prove sperimentali

Nelle prove eseguite con il rapporto di ciclo  $R=-1$  i provini sono stati fatti ciclare con ampiezze di tensione comprese tra 260 MPa e 360 MPa con un passo costante di 20 MPa ed una frequenza di carico compresa tra 10 Hz e 1 Hz. Si riporta ora a livello esemplificativo un riassunto delle prove eseguite per il provino P\_4. Il provino in questione è stato inizialmente testato ad un valore di tensione di 260 MPa a 10 Hz fino ai 2000 cicli (momento in cui è stata interrotta la prova per il calcolo del gradiente termico di raffreddamento). In seguito, il provino è stato nuovamente fatto lavorare ma ad una tensione di 280 MPa ed una frequenza di 10 Hz fino al ciclo 13730. Il procedimento prosegue fino a quando il provino non raggiunge la rottura (in questo caso 61106 cicli a 380 MPa). I provini, soprattutto i primi, non hanno lavorato tutti allo stesso modo. Infatti, per esplorare e comprendere il comportamento del materiale sono state fatte diverse prove variando il campo di lavoro dell'ampiezza di tensione. Alla fine, si è giunti alla conclusione che partire da 260 MPa con un passo di 20 MPa è la soluzione migliore per apprezzare significativo aumento del parametro di riferimento all'aumentare della tensione applicata. L'applicabilità di questo metodo deriva da [], secondo il quale l'applicazione di un carico per un numero di cicli limitato non influisce sulle misurazioni successive. Nel caso in esame ogni ampiezza di tensione viene applicata per qualche migliaio di cicli; una quantità relativamente bassa considerando che si sta studiando la vita a medio-lungo termine del materiale.

	N	$\sigma_a$ [MPa]	f [Hz]
1	2000	260	10
3	13730	280	10
5	18003	280	10
7	26312	300	9
9	29787	300	9
11	34694	320	6
13	37202	320	5
15	39529	320	5
17	43170	340	2.5
19	46107	340	2.5
21	48196	340	2.5
23	52118	360	1.5
25	54207	360	1.5
27	56176	360	1.5
29	58221	360	1.5
31	60393	360	1.5

Tabella 3.2. Riassunto delle prove a gradino eseguite per il provino P\_4 a  $R=-1$

	N	$\sigma_a$ [MPa]	f [Hz]
--	---	------------------	--------

1	37602	150	15
3	51136	150	12
5	55614	170	12
7	62718	170	12
9	72959	190	11
11	84634	190	10
13	92227	210	9
15	97361	210	9
17	102749	230	8
19	114157	230	8
21	120148	250	7
23	125096	250	8
25	130761	270	7
27	134599	270	7
29	141275	290	6
31	145652	290	7
33	148387	290	7
35	150666	310	6
37	152456	310	6

*Tabella 3.3. Riassunto delle prove a gradino eseguite per il provino P\_12 a R=0.1*

Si nota inoltre che per uno stesso valore di ampiezza di tensione sono state eseguite più prove. Questo consente di verificare la ripetibilità della misurazione e dell'analisi eseguita e di scartare risultati palesemente errati. Questo risulta particolarmente importante per l'analisi della seconda armonica della temperatura che è soggetta ad elevata incertezza, soprattutto per l'ordine di grandezza decisamente inferiore rispetto a quello della temperatura media del provino.

### 3.7 – Metodo basato sull'energia immagazzinata nel materiale

Le misurazioni effettuate dall'estensometro durante una prova sono inviate al controllore RT3 e salvate in un file contenente i dati ricavati dalla macchina di prova (comando Schenck, servovalvola ed errore) e dalla cella di carico (forza e spostamento). Ogni file contiene i dati relativi a due cicli consecutivi e per ogni ciclo sono considerati 200 punti sperimentali.

#### 3.7.1 – Analisi dati sperimentali

L'approccio qui considerato prevede di misurare l'energia immagazzinata nel materiale durante un singolo ciclo di carico, ossia l'area del ciclo di isteresi stabilizzato. L'area del ciclo di isteresi si calcola come il seguente integrale del percorso chiuso:

$$W = \oint \sigma d\varepsilon \quad (3.1)$$

essendo  $\sigma$  e  $d\varepsilon$  la tensione e la deformazione infinitesima.

Avendo a disposizione una serie discreta di punti sperimentali si sfrutta il metodo approssimato di integrazione dei trapezi che in questo caso tuttavia fornisce valori assolutamente accettabili.

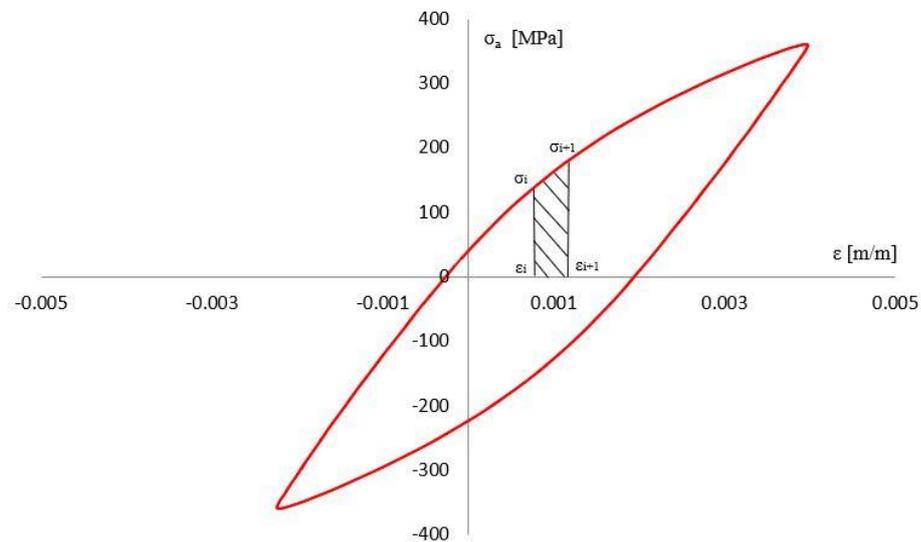


Figura 3.13. Andamento tipico di un ciclo di carico e scarico a  $R=-1$  in cui evidenzia la presenza di un ciclo di isteresi e l' $i$ -esima area del trapezio tratteggiato.

Il metodo dei trapezi prevede di dividere l'area di una certa curva in una serie di punti discreti, calcolare l'area compresa tra l'asse orizzontale e la curva tra due punti consecutivi (area di un trapezio) ed infine sommare le aree calcolate.

$$A_i = \frac{(\sigma_i + \sigma_{i+1}) \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{2} \quad (3.2)$$

$$W = \sum A_i \quad (3.3)$$

essendo  $W$  l'energia immagazzinata in un ciclo. Supponendo che la tensione sia espressa in MPa, allora  $W$  è espressa in  $\frac{MJ}{m^3 \text{ ciclo}}$ .

Esaminando l'andamento dell'energia immagazzinata nel materiale  $W$  rispetto all'ampiezza di tensione applicata si nota che: per valori inferiori a quello che viene considerato il limite di fatica il ciclo di isteresi è praticamente assente e quindi  $W$  praticamente nullo, mentre per valori superiori l'area del ciclo di isteresi aumenta considerevolmente.

### 3.7.2 – Risultati per rapporto di ciclo $R=-1$

Si riportano i grafici dei cicli di isteresi per i provini studiati a  $R=-1$ .

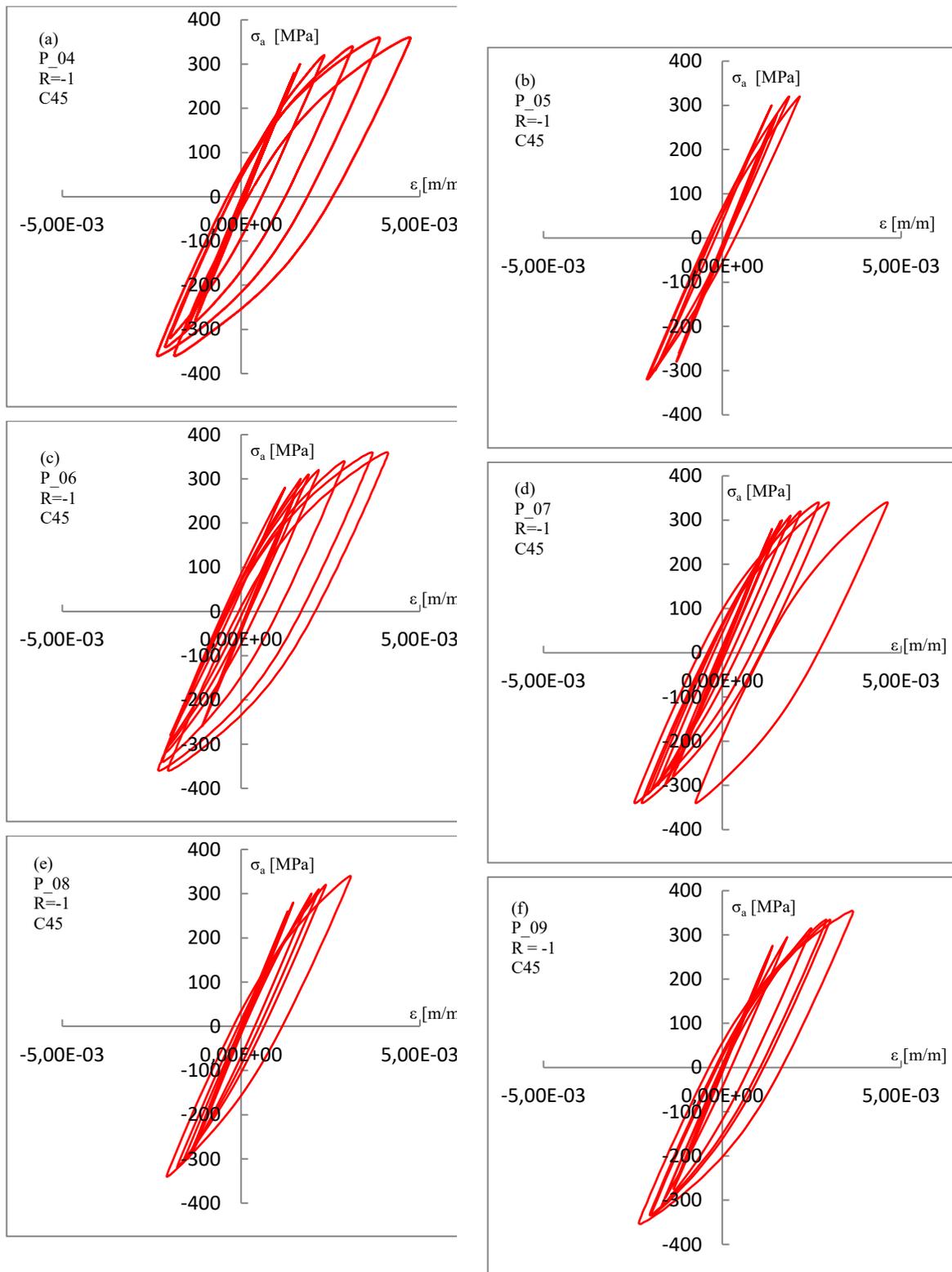


Figura 3.14. Aumento dell'area del ciclo di isteresi per  $R=-1$  all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata per i provini P\_04(a), P\_05(b), P\_06(c), P\_07(d), P\_08(e), P\_09(f)

Dalla figura precedente si può osservare un generale aumento dell'area del ciclo di isteresi all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata, ossia un aumento dell'energia immagazzinata dal materiale durante un singolo ciclo.

Si riportano i risultati delle prove a gradino considerando l'energia interna immagazzinata nell'unità di volume in un ciclo.

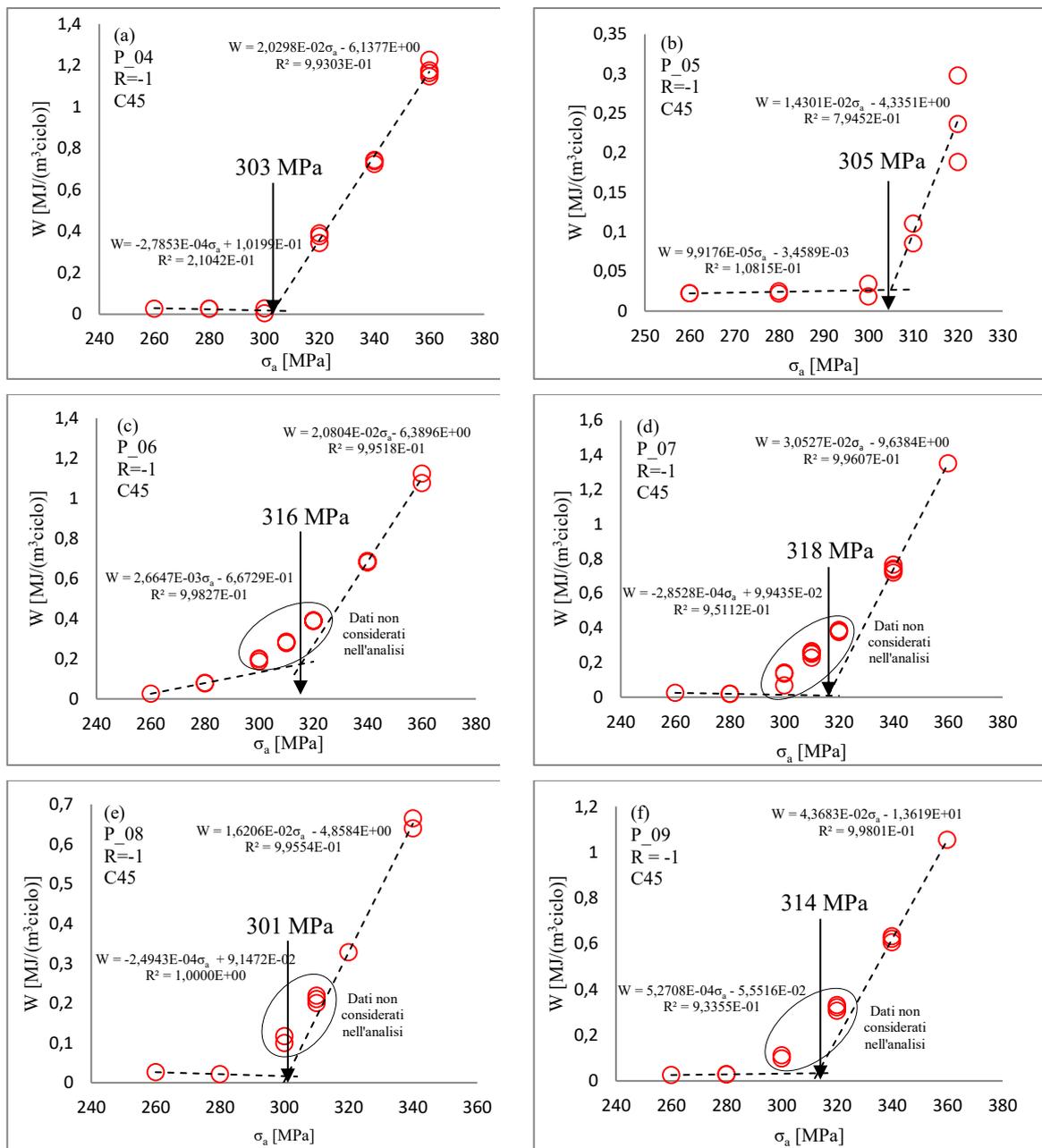


Figura 3.15. Prove a gradini rispetto all'energia  $W$  per i provini P\_04(a), P\_05(b), P\_06(c), P\_07(d), P\_08(e), P\_09(f) a  $R=-1$

Osservando i grafici si può notare che  $W$  non aumenta in maniera repentina ed improvvisa ma lo fa in maniera graduale. Secondo quanto proposto in [] non si considera la tensione in cui l'ordinata inizia ad aumentare ma si considera l'intersezione degli asintoti iniziale e finale della curva. In questo modo si evitano i punti di transizione e si considerano unicamente i punti chiaramente prima e dopo il limite di fatica. Per ogni provino i dati della prova a gradini sono divisi in due gruppi (ognuno

caratterizzato generalmente da due livelli di tensione). Nel primo gruppo sono presenti i valori di  $W$  determinati per bassi livelli di tensione e nell'ultimo gruppo invece i valori di  $W$  per alti livelli di tensione (appena precedenti alla rottura). Per ognuno dei due gruppi si calcola la retta di regressione lineare secondo il metodo dei minimi quadrati e si stima il limite di fatica come il valore di ampiezza di tensione in corrispondenza dell'intersezione delle due rette.

	P_04	P_05	P_06	P_07	P_08	P_09
$\sigma_{a,W}$ [MPa]	303	305	316	318	301	314

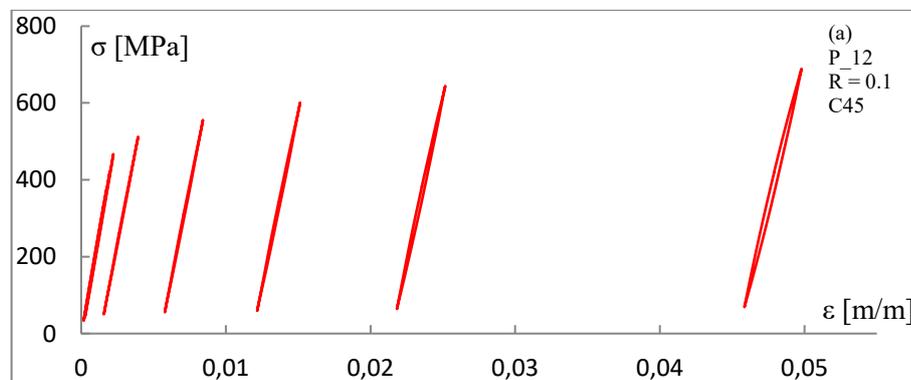
Tabella 3.4. Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo energetico basato su  $W$  per  $R=-1$ .

Considerando le stime dei sei provini è possibile stimare il limite di fatica secondo il metodo energetico basato sull'energia immagazzinata dal materiale durante un ciclo di carico-scarico semplicemente considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,W} = 310 \text{ MPa}$$

### 3.7.3 – Risultati per $R=0.1$

Il procedimento di calcolo è esattamente analogo a quello esposto nel paragrafo precedente. Si riportano quindi i cicli di isteresi per ogni provino durante la prova a gradini degli stessi ma nel caso di rapporto di ciclo 0.1.



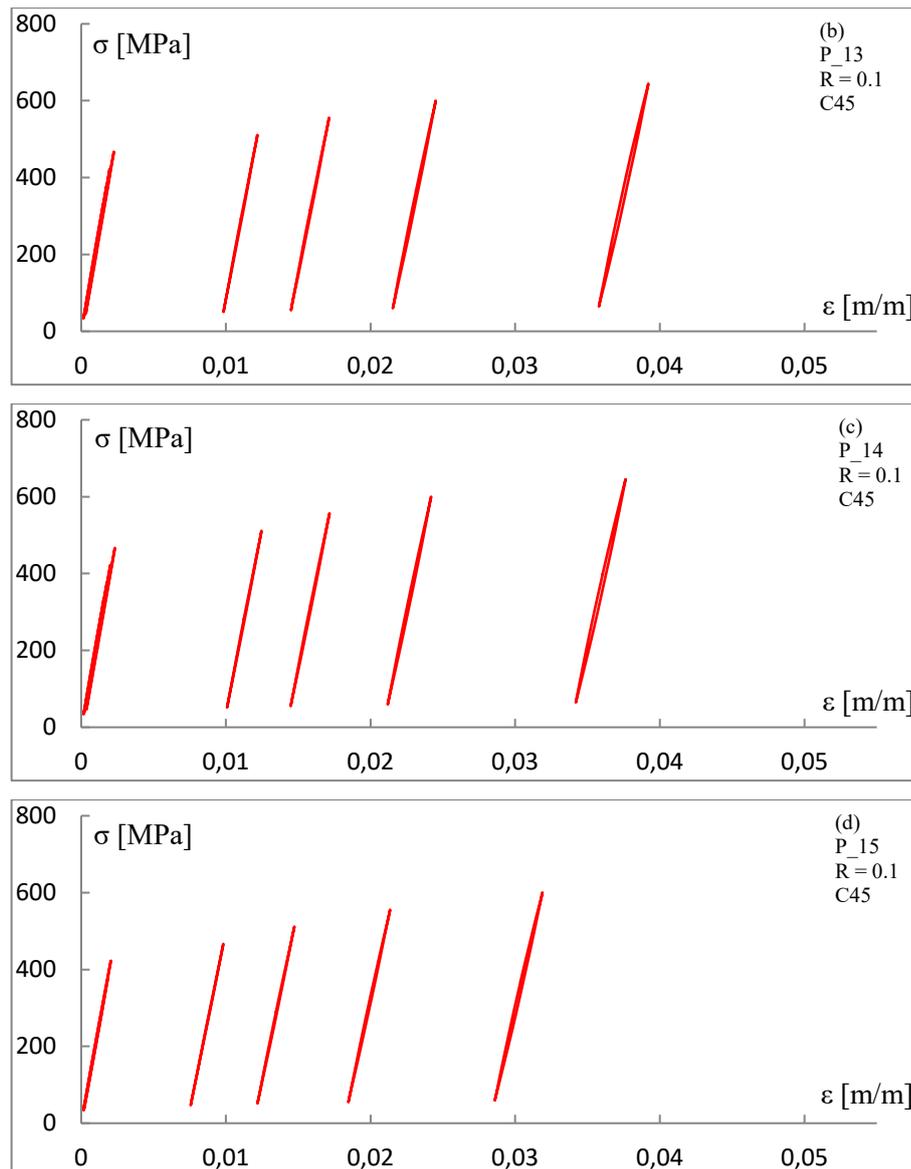


Figura 3.16. Aumento dell'area del ciclo di isteresi per  $R=0.1$  all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata per i provini P\_12(a), P\_13(b), P\_14(c), P\_15(d).

Rispetto ai cicli di isteresi osservati nel paragrafo precedente la deformazione tende a variare attorno ad un valore medio che cresce ad ogni gradino. Poiché il passo di ampiezza di tensione è costante ma l'aumento della deformazione media non lo è si capisce che sono presenti delle importanti deformazioni plastiche che rimangono nel materiale. Inoltre, all'aumentare della tensione applicata l'area del ciclo di isteresi aumenta ma in maniera molto più limitata (come si osserva anche nei grafici successivi). Con lo stesso metodo definito in precedenza si costruiscono i seguenti grafici.

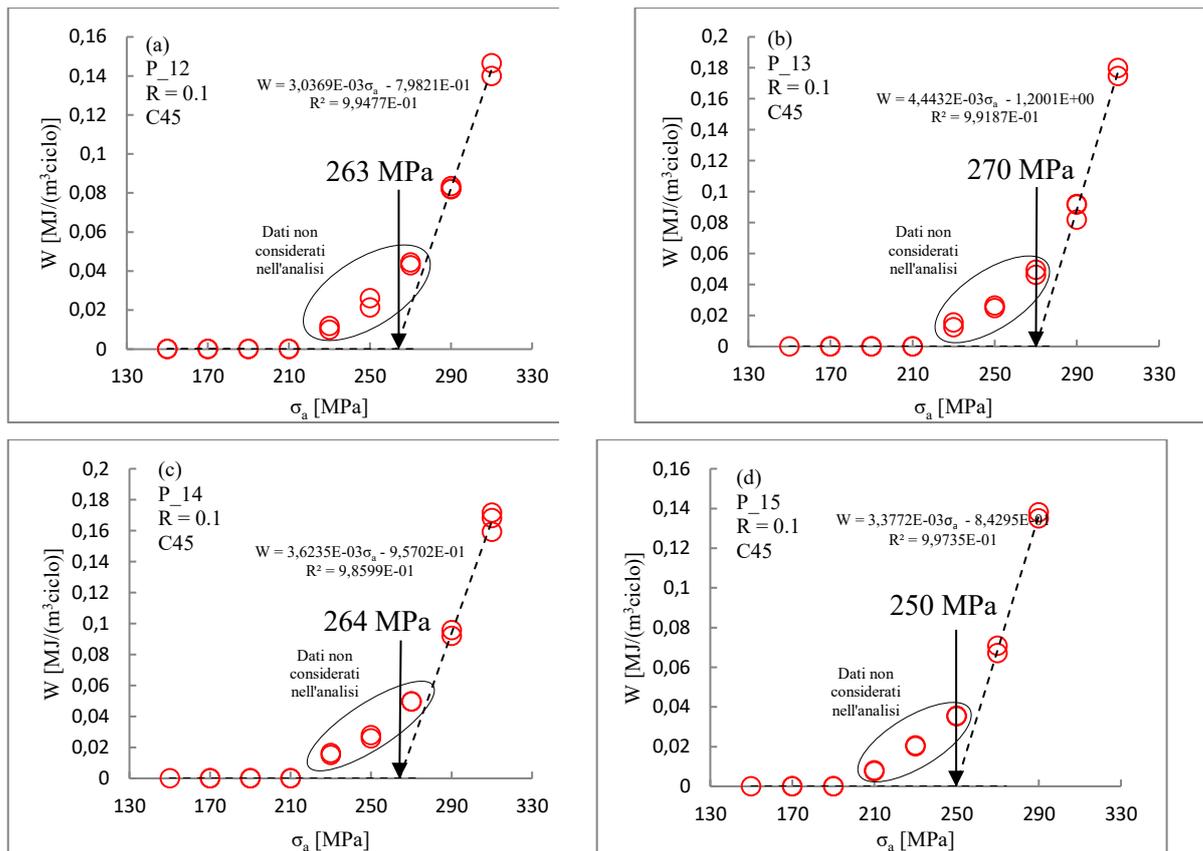


Figura 3.17. Prove a gradini rispetto all'energia  $W$  per i provini P\_12(a), P\_13(b), P\_14(c), P\_15(d) a  $R=0.1$

Si osserva dai grafici sopra riportati che l'energia immagazzinata  $W$  raggiunge valori massimi di un ordine di grandezza inferiori rispetto a quelli raggiunti nel caso di  $R=-1$ . Questo è sostanzialmente dovuto al fatto che la rottura avviene ad ampiezze di tensione inferiori rispetto, essendoci già una tensione media maggiore di zero attorno alla quale variano.

	P_12	P_13	P_14	P_15
$\sigma_{a,W}$ [MPa]	263	270	264	250

Tabella 3.5 Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo energetico basato su  $W$  per  $R=0.1$ . Considerando le stime dei quattro provini è possibile stimare il limite di fatica per  $R=0.1$  secondo il metodo energetico basato sull'energia immagazzinata dal materiale durante un ciclo di carico-scarico semplicemente considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,W} = 262 \text{ MPa}$$

### 3.8 – Metodo basato sul calore dissipato dal provino (metodo Meneghetti)

Per ogni gradino di ampiezza di tensione, come già sottolineato in precedenza, vengono eseguite due misurazioni con la termocamera. La seconda comprende una prima fase in cui si osserva la variazione della temperatura (per la termoelasticità) attorno alla temperatura di stabilizzazione ed una seconda fase in cui si osserva il raffreddamento del provino a causa dell'interruzione dell'applicazione del carico. Secondo la formula N misurando il gradiente di temperatura all'istante dell'interruzione del carico è possibile stimare il calore scambiato dal provino con l'ambiente [21].

### 3.8 .1– Analisi delle mappe termografiche

Osservando i filmati termici si nota che la mappa termica, oggetto di analisi, è caratterizzata da un rumore costante e lungo tutta l'immagine che rende la temperatura disomogenea lungo tutta la superficie in esame.

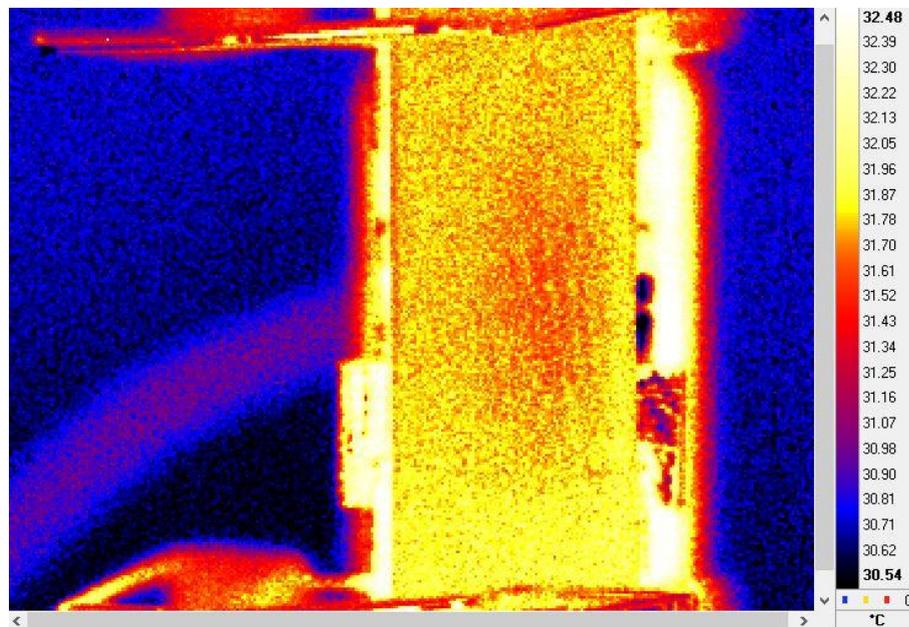


Figura 3.18. Frame di un filmato termografico del provino P\_6 testato a 280 MPa (carico basso) per  $R=-1$

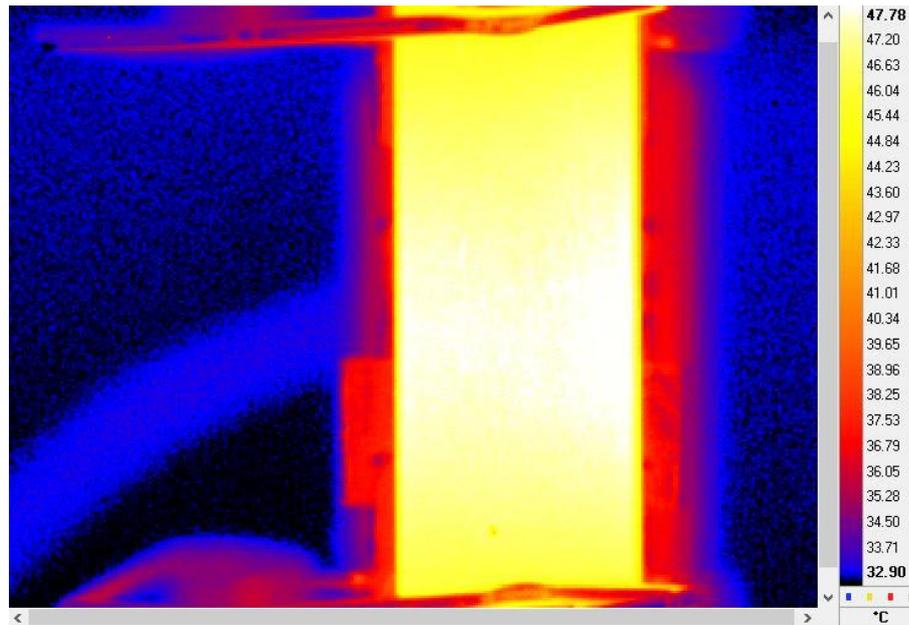


Figura 3.19. Frame di un filmato termografico del provino P\_6 testato a 360 MPa (carico alto) per  $R=-1$ .

Osservando la figura 16 si osserva un rumore costante su tutta l'immagine termica ed in particolare sul provino, sulle linguette dell'estensometro e sullo sfondo. Tale immagine è un frame di una prova a fatica condotta a  $R=-1$  con  $\sigma_a = 280 \text{ MPa}$  ossia uno dei primi carichi applicati della prova a gradini. Di conseguenza il provino non subisce un salto significativo di temperatura ma passa dai  $\sim 25^\circ\text{C}$  ambientali fino a  $\sim 30^\circ\text{C}$  e la variazione di temperatura per effetto termoelastico è ancora limitata. All'aumentare del carico applicato anche la temperatura aumenta in maniera significativa arrivando anche fino a  $\sim 50^\circ\text{C}$  come si osserva in Fig.17. In quest'immagine la superficie è caratterizzata da un rumore molto più limitato e l'andamento della temperatura è regolare su tutta la superficie. Nella zona centrale del provino inoltre si nota un aumento della temperatura maggiormente visibile cambiando scala:

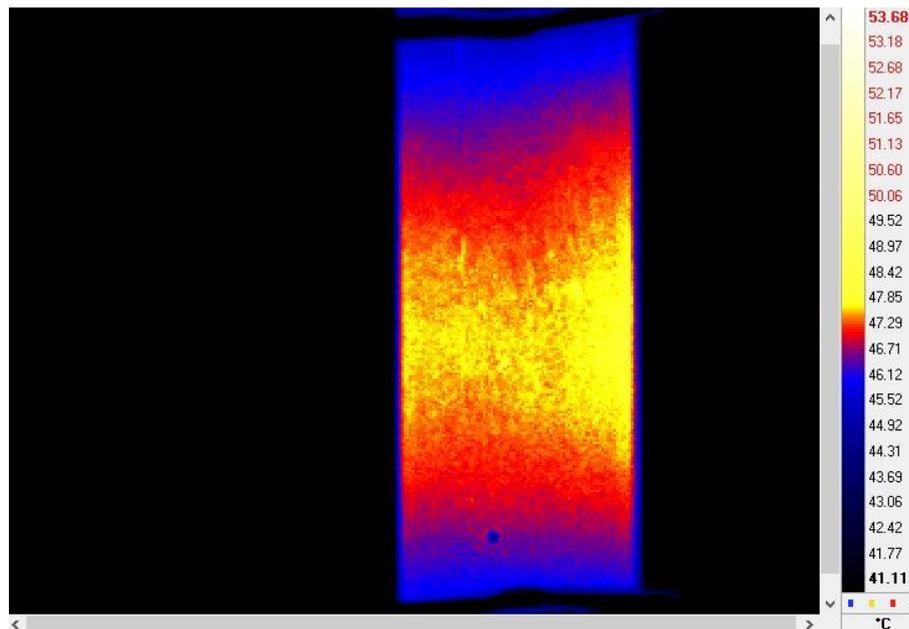


Figura 3.20. Frame di un filmato termografico del provino P\_6 testato a 360 MPa (carico alto) per  $R=-1$  in cui si evidenzia la temperatura del provino.

Si osserva un aumento graduale della temperatura del provino verso il centro ed una diminuzione agli estremi. La temperatura infatti ha un andamento parabolico con il massimo al centro del provino.

Formalmente la quantità di calore emessa da dalla superficie del provino è costante lungo tutta l'area utile poiché, costante, è anche l'energia meccanica in ingresso fornita dalla macchina. È stata quindi selezionata un'area della superficie del provino, mantenuta costante per tutti i filmati termici dello stesso provino, che prendesse la zona centrale del provino.

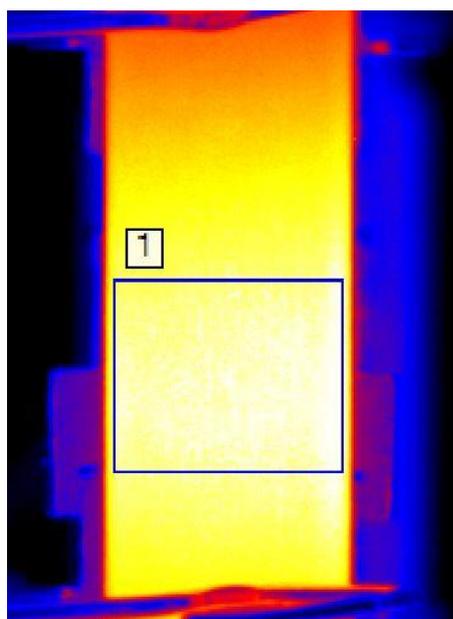


Figura 3.21. Sezione della superficie del provino selezionata per misurare il gradiente termico

Si seleziona un'area nella zona centrale e si considera l'andamento della temperatura all'interno di questa. Il programma Altair automaticamente calcola la media della temperatura e restituisce i due vettori temperatura e numero di frame. Nota la frequenza di acquisizione è possibile trasformare il vettore frame nel vettore tempo in un foglio di calcolo. Ottenuto il grafico temperatura-tempo si calcola il gradiente di temperatura come l'inclinazione della retta interpolante i primi punti sperimentali successivi all'interruzione della prova. Il numero di punti selezionati viene scelto di volta in volta sulla base della curva di raffreddamento, in generale però viene selezionato un insieme di punti contenuto in 1s di acquisizione.

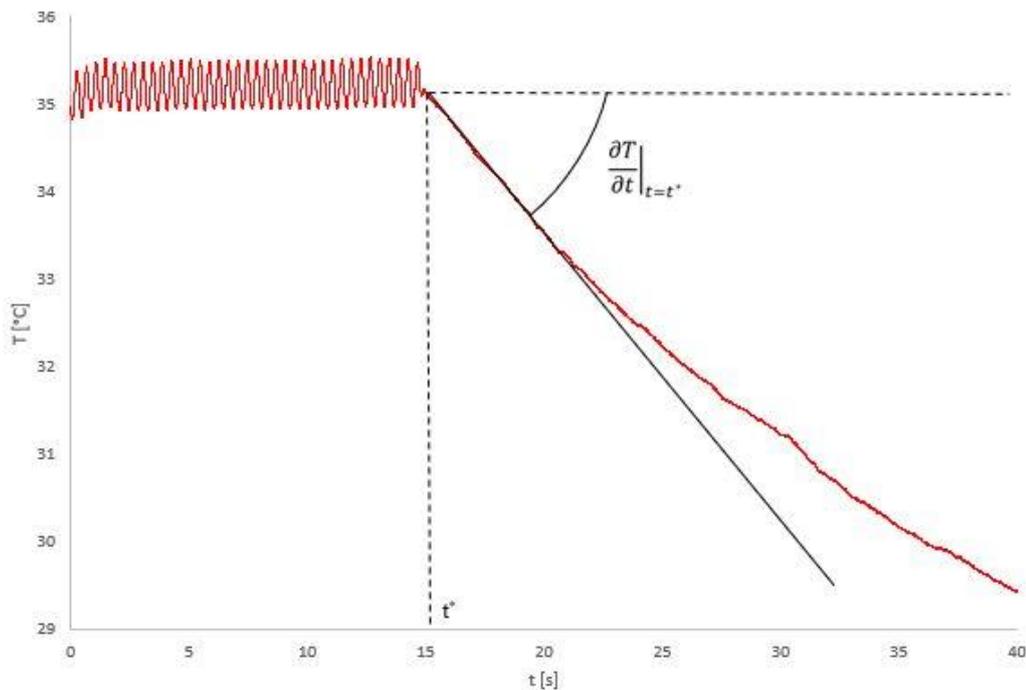
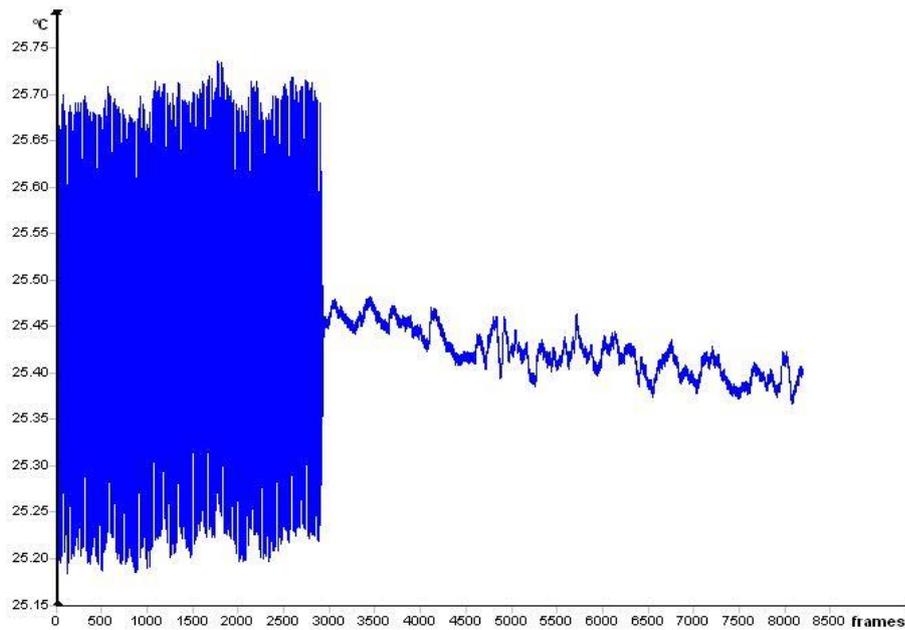


Figura 3.22. Retta interpolante e gradiente di raffreddamento.

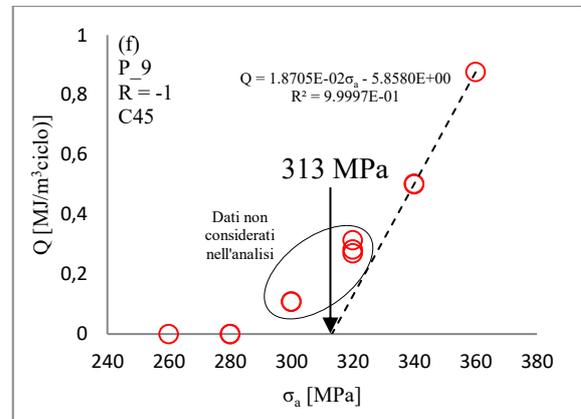
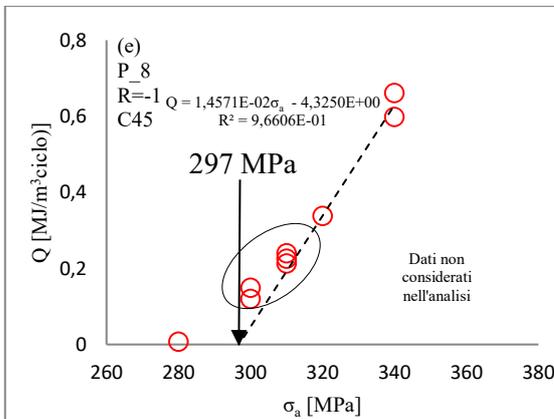
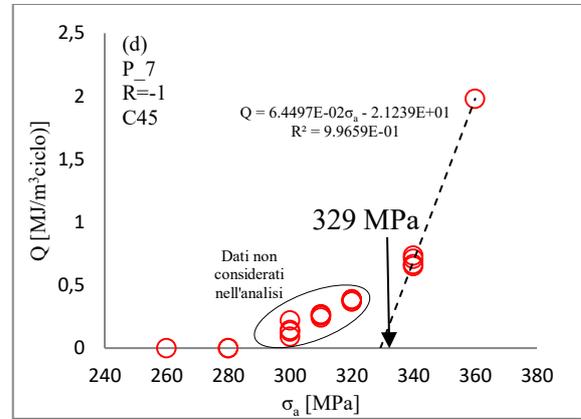
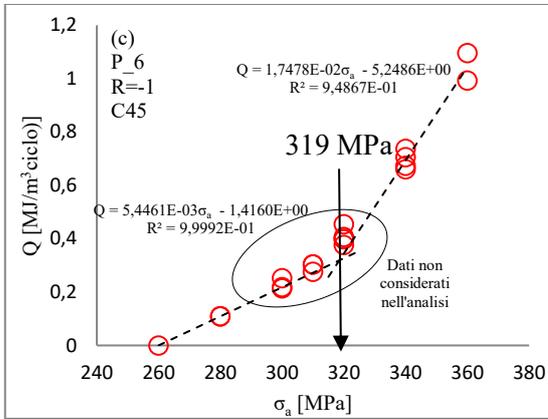
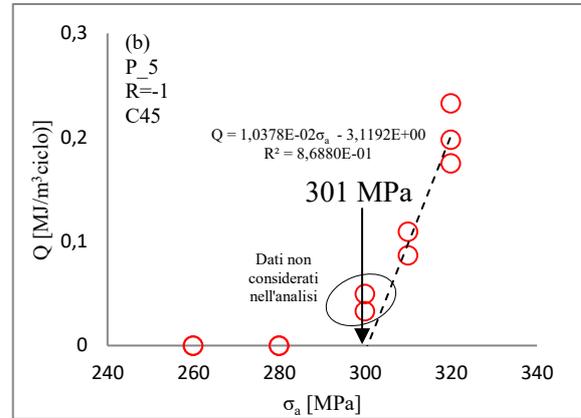
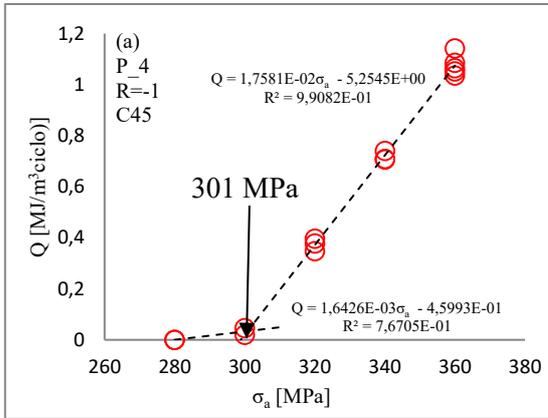
Per valori sufficientemente elevati di ampiezza di tensione applicata il raffreddamento e la tendenza asintotica della temperatura sono ben visibili e di conseguenza il gradiente è facilmente misurabile. Per bassi valori di ampiezza di tensione invece il raffreddamento non è ben visibile poiché l'innalzamento di temperatura dovuto all'applicazione del carico è limitato. Ciò inoltre rende la misurazione molto più sensibile ai disturbi esterni. Per questo motivo quando, nel caso in cui il gradiente non sia misurabile, il calore emesso Q viene posto uguale a zero. Teoricamente questo non è corretto poiché una certa quantità di calore viene sicuramente emessa dal provino. Tuttavia, poiché, come già sottolineato, questo problema per valori bassi di tensione il calore emesso sarebbe comunque molto limitato.



*Figura 3.23. Raffreddamento del provino in seguito all'interruzione di una prova condotta a  $R=-1$  con 260 MPa.*

In fig 21 si osserva un esempio in cui il rumore di fondo presente durante la registrazione non permette di avere un raffreddamento netto e regolare. Si osserva che la temperatura media cala ma in circa 25s si osserva un calo di appena 0.5°C. Di conseguenza, in questo caso, il calore emesso  $Q$  viene posto uguale a zero, sia per la difficoltà nella misurazione sia per il gradiente di per sé molto piccolo.

Si riportano i grafici dei risultati per un rapporto di ciclo R=-1.



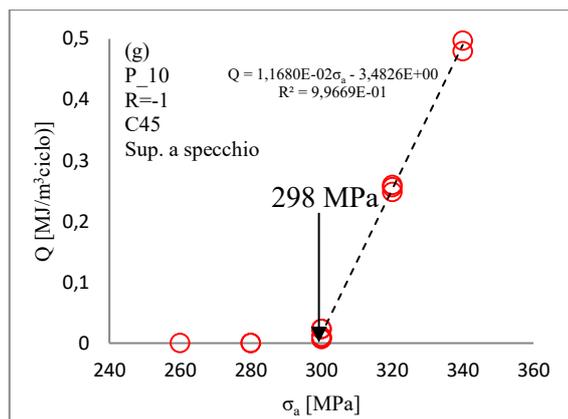


Figura 3.24. Aumento del calore  $Q$  emesso dal provino per  $R=-1$  all'aumentare dell'ampiezza di tensione applicata per i provini P\_04(a), P\_05(b), P\_06(c), P\_07(d), P\_08(e), P\_09(f), P\_10(g)

Dai grafici si osserva che il calore emesso dal provino è nullo o comunque molto piccolo per ampiezze di tensione di 260 e 280 MPa. Solo a partire da 300 MPa si ha un limitato ma effettivo aumento che diventa sempre più importante fino alla rottura, che arriva a 340 o 360 MPa. Iniziando la prova a gradini a partire da 260 MPa, quindi, si ha la possibilità di apprezzare una prima parte in cui il calore è praticamente nullo seguita da una seconda parte in cui il calore aumenta significativamente fino alla rottura del provino.

La stima del limite di fatica viene eseguita esattamente come nel paragrafo precedente per il lavoro immagazzinato nel materiale.

	P_04	P_05	P_06	P_07	P_08	P_09	P_10
$\sigma_{a,Q}$ MPa	301	301	319	329	297	313	298

Tabella 3.6. Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo energetico basato su  $Q$  per  $R=-1$ .

Considerando le stime dei sette provini è possibile stimare il limite di fatica per  $R=-1$  secondo il metodo energetico basato sul calore emesso dal materiale durante un ciclo di carico-scarico semplicemente considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,Q} = 308 \text{ MPa}$$

### 3.8.3 – Risultati per $R=0.1$

Si riportano i grafici dei risultati per un rapporto di ciclo R=0.1.

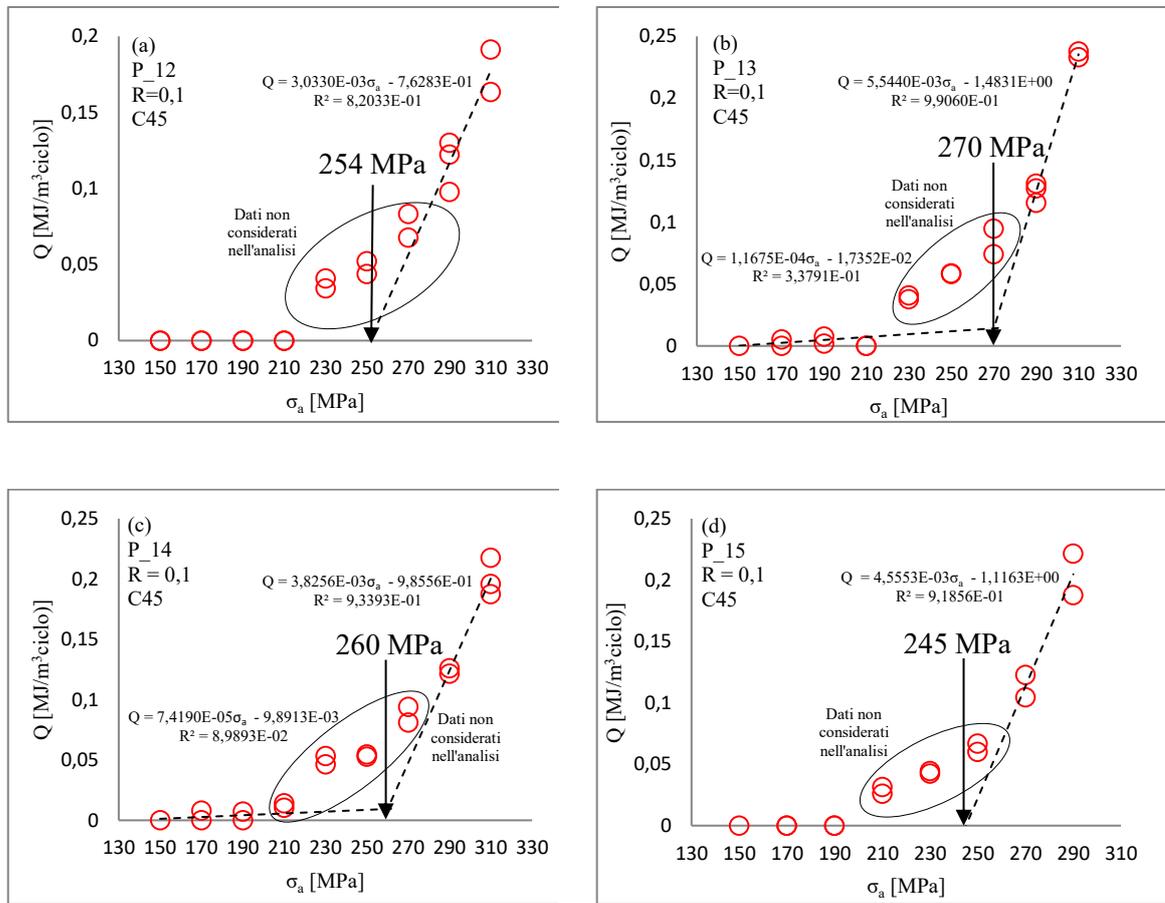


Figura 3.25 Prove a gradini rispetto al calore  $Q$  per i provini P\_12(a), P\_13(b), P\_14(c), P\_15(d) a R=0.1.

Si osserva dai grafici sopra riportati che il calore  $Q$  raggiunge valori massimi inferiori rispetto a quelli raggiunti nel caso di R=-1. Questo è sostanzialmente dovuto al fatto che la rottura avviene ad ampiezze di tensione inferiori essendoci già una tensione media maggiore di zero attorno alla quale variano.

	P_12	P_13	P_14	P_15
$\sigma_{a,Q}$ [MPa]	254	270	260	245

Tabella 3.7. Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo energetico basato su  $Q$  per R=0.1. Considerando le stime dei quattro provini è possibile stimare il limite di fatica per R=0.1 secondo il metodo energetico basato sul calore dissipato dal materiale durante un ciclo di carico-scarico semplicemente considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,W} = 257 \text{ MPa}$$

### 3.8.4 – Confronto della stima del limite di fatica al variare dell'area del provino

Avendo a disposizione un filmato termografico della superficie del provino è stato possibile esaminare il comportamento del calore dissipato  $Q$  al variare dell'area selezionata. Come già sottolineato il calore emesso dovrebbe essere teoricamente costante su tutta la superficie utile del provino poiché costante è anche l'energia meccanica in ingresso.

### 3.9 – Metodo basato sulla temperatura termoplastica

Sviluppando l'andamento della temperatura nel tempo secondo [], si può determinare il range della seconda armonica  $\Delta T_D$ , legata agli effetti di plasticizzazione durante un ciclo di carico-scarico. Il calcolo della temperatura termoplastica avviene grazie all'utilizzo di un codice Matlab, appositamente implementato. Attraverso tale codice è possibile ottenere la mappa completa dell'andamento spaziale della temperatura del provino e delle sue componenti (componenti termoelastica e termoplastica). Un filmato termografico si presenta come un insieme di matrici in cui ad ogni posizione corrisponde un pixel ed ogni matrice corrisponde un frame. In totale si hanno, per ogni filmato termografico, 8192 matrici la cui dimensione dipende dall'area selezionata sulla superficie del provino.

In Matlab la Trasformata discreta di Fourier (DFT) si applica con il comando 'fft'. Tale comando permette il passaggio dal dominio del tempo a quello delle frequenze, quindi va applicato ad ogni singolo pixel lungo gli  $n$  frame del filmato. In questo modo si considera l'andamento temporale del singolo pixel e se ne deriva lo spettro delle ampiezze. Tuttavia, questo ragionamento è valido solo se ad ogni pixel corrisponde un 'punto' materiale del provino (o meglio un'area) e poiché il provino subisce una deformazione longitudinale durante la prova a trazione, il pixel non corrisponde ad un punto materiale ma ad una serie di punti materiali. Si rende necessario l'utilizzo di un apposito programma di compensazione sviluppato da FLIR chiamato Random Motion.

Tale programma consente di compensare il movimento del provino in maniera tale che esso nel filmato termico risulti fermo e non più in movimento.

#### 3.9.1 – Procedura di compensazione

Il principio di funzionamento del programma sfruttare l'elevato contrasto tra due zone del filmato termico posizionando tra le due un vettore riferimento fisso. Non appena il programma percepisce

che il vettore passa da una zona all'altra (ad esempio da bianco a nero) l'immagine si blocca in quella posizione.

Il programma Random Motion si presenta come in fig N. Per l'analisi richiesta al programma le impostazioni di default fornite sono ritenute valide.

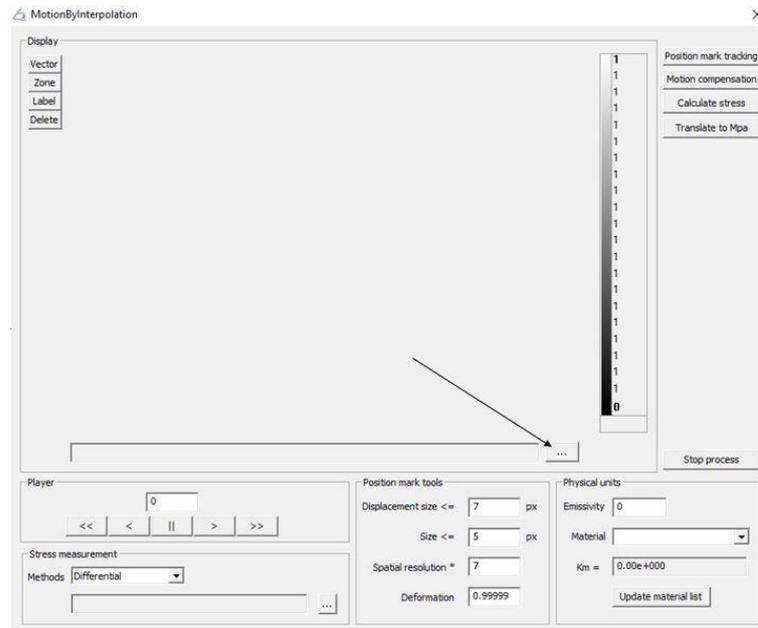


Figura 3.26. Schermata iniziale del programma Random Motion

Si carica il filmato termico che si vuole compensare selezionando il pulsante indicato dalla freccia in figura. Il filmato che ne deriva è in bianco e nero e si osserva che le linguette dell'estensometro tendono ad essere nere, mentre la superficie del provino è prevalentemente bianca.

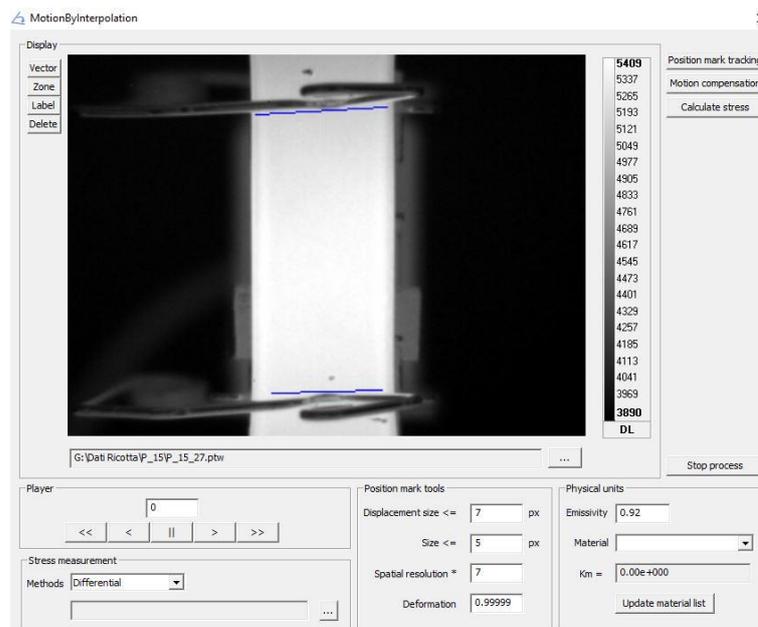


Figura 3.27. Schermata del programma Random Motion con i vettori di riferimento (linee blu) in evidenza.

Selezionando il pulsante ‘Vector’ si creano i vettori di riferimento (in blu nella figura N) utilizzati dal programma per la compensazione, infatti essi rappresentano un riferimento fisso rispetto al provino in movimento. Questi vettori vengono posti sulla superficie del provino in prossimità delle linguette dell’estensometro. Si seleziona il comando ‘Position mark tracking’ il programma traccia la posizione dei vettori creati all’interno dell’immagine termica. Infine, selezionando ‘Motion compensation’, si effettua la compensazione del filmato termico.

Il risultato finale è un filmato termico in cui si osserva la temperatura del provino variare ciclicamente nel tempo ma il provino risulta fermo nello spazio. In questo modo considerare un pixel del filmato corrisponde a considerare un punto materiale del provino.

L’esecuzione di questa procedura non è complessa ma essa richiede tempi elevati, soprattutto per il tracciamento dei vettori. Nell’immagine riportata il filmato termico è riferito al provino P\_15 prova 27, testato a  $R=0.1$  per una ampiezza di tensione di 290 MPa (il provino si è rotto a 310 MPa), di conseguenza il contrasto tra linguette e provino è elevato e sono sufficienti due vettori (linguetta superiore e linguetta inferiore) per avere una buona compensazione del filmato termico. Nel caso però di tensioni minori sono necessari più vettori non essendoci un contrasto significativo. Questo porta a tempi di elaborazione decisamente più elevati.

I filmati termici compensati sono indicati analogamente a quelli fino ad ora trattati ma con l’aggiunta della sigla finale `_MC`. A causa del limitato contrasto presente nei filmati termici relativi alle prove eseguite a basso carico in alcuni casi non è possibile eseguire la compensazione. In questi casi, tuttavia, il carico applicato è basso e di conseguenza lo sono anche gli spostamenti e di conseguenza l’errore tra pixel e punto fisico reale è limitato e per questo tali filmati vengono comunque presi in considerazione.

### 3.9.3 – Analisi dei filmati termici compensati

Selezionata l'area da analizzare sulla superficie del provino è necessario salvarla in un formato adatto all'utilizzo in matlab. Il formato ASCII (.asc) salva ogni frame del filmato termico come una matrice e pone tutte queste matrici in sequenza una dopo l'altra. Il file ottenuto viene importato sotto forma di matrice 3D in Matlab attraverso un opportuno codice di importazione (Appendice N). La matrice 3D risultante dall'importazione è il punto di partenza per l'analisi del segnale tempo-variante e delle sue componenti.

Ogni punto della matrice è descritto dalla sua posizione (i,j,k), dove (i,j) è la posizione del pixel nell'area selezionata del provino e (k) è il numero di frame del filmato. Fissando di volta in volta (i,j) e considerando la variazione del valore lungo (k) si considera un vettore che esprime l'andamento temporale della temperatura del singolo pixel. Applicando la 'fft' a tale vettore è possibile determinare lo spettro delle ampiezze di quel pixel. Attraverso un ciclo 'for' è stato possibile spaziare lungo tutte le posizioni (i,j) ed ottenere il comportamento di ogni pixel nel dominio delle frequenze.

Si riporta lo spettro delle ampiezze di un singolo pixel della prova P\_6\_39\_MC, in cui la tensione applicata è 360 MPa e la frequenza di prova è 1 Hz. È stata scelta questa prova perché caratterizzata da un'ampiezza di tensione elevata, di conseguenza l'effetto termoplastico è importante e quindi la temperatura termoplastica è ben visibile.

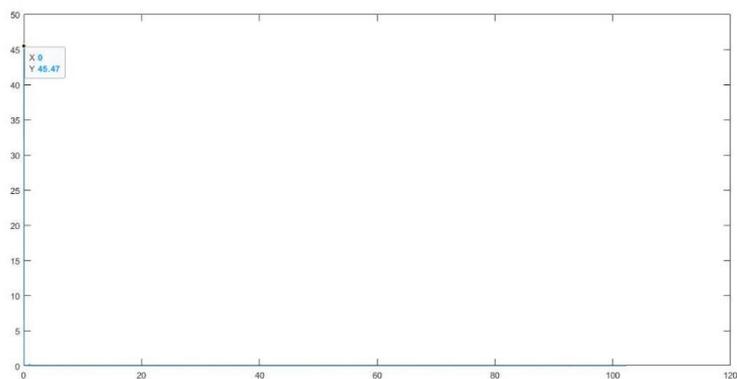


Figura 3.28. Spettro delle ampiezze. In evidenza la componente costante a frequenza nulla

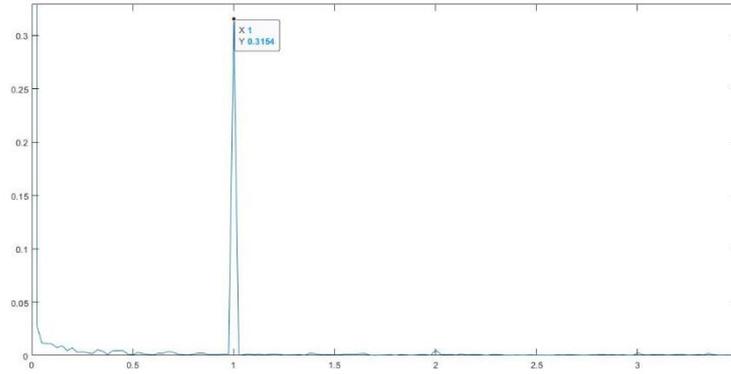


Figura 3.29. Spettro delle ampiezze. In evidenza la componente termoelastica a 1 Hz.

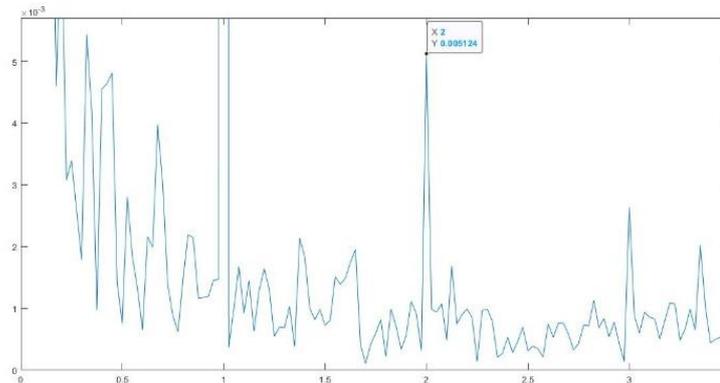


Figura 3.30. Spettro delle ampiezze. In evidenza la componente termoplastica a 2 Hz.

Dai grafici sopra riportati si può osservare come ci siano tre componenti preponderanti, come previsto dalla teoria [26]: la prima, dell'ordine delle decine di gradi centigradi, è la temperatura di stabilizzazione, costante ed a frequenza nulla; la seconda, dell'ordine di  $10^{-1}$  gradi centigradi, è la componente legata alla termoelasticità ed ha frequenza pari alla frequenza di carico (fload); la terza, dell'ordine di  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  centigradi (in base alla tensione applicata), è la componente termoplastica ed ha frequenza pari al doppio della frequenza di carico. Si nota poi la presenza di altre componenti a frequenza multipla di quella di carico che vanno però scemando all'aumentare della frequenza. L'unica componente degna di nota è quella pari a tre volte la frequenza di carico. Questa è dell'ordine di  $10^{-3}$  gradi centigradi e rimane costante al variare delle prove. La sua ampiezza rimane pressoché costante al variare dell'ampiezza di tensione applicata.

Si riporta ora lo spettro delle ampiezze del singolo pixel di tre prove condotte a diversi livelli di tensione e con diverse frequenze di carico, concentrandosi sulla componente termoplastica (ossia quella di interesse per il metodo adottato).

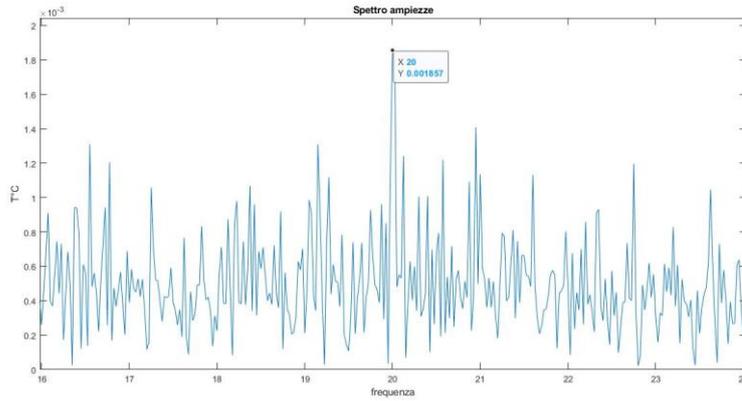


Figura 3.31. Ampiezza della temperatura termoplastica per la prova P\_6\_01\_MC eseguita a 10 Hz per 260 MPa.

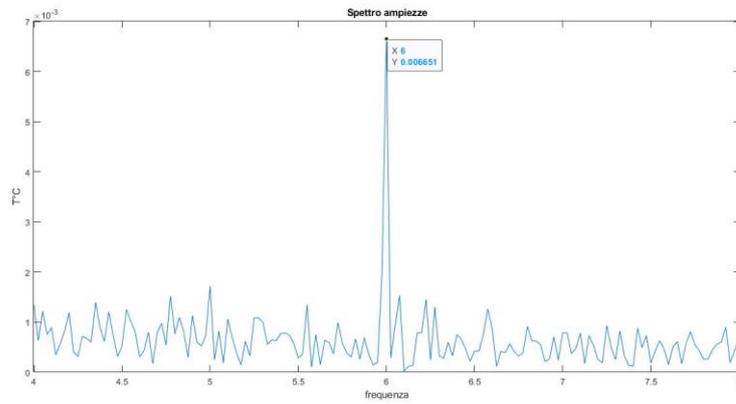


Figura 3.32. Ampiezza della temperatura termoplastica per la prova P\_6\_21\_MC eseguita a 3 Hz per 320 MPa.

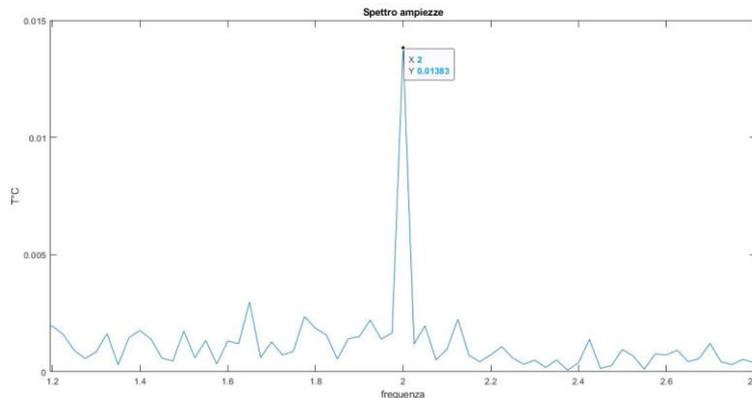


Figura 3.33. 3.34 Ampiezza della temperatura termoplastica per la prova P\_6\_39\_MC eseguita a 1 Hz per 360 MPa.

Le tre figure sopra riportate mostrano il risultato della temperatura termoplastica per i livelli di tensione 260 MPa, 320 Mpa e 360 MPa. Osservando l'immagine per il livello di carico minore il picco non è molto visibile e si confonde con il rumore di fondo presente, al contrario per il livello di carico maggiore il picco è ben visibile e distinguibile. Rispettivamente si osservano i seguenti picchi al doppio della frequenza di carico: 0.00186 °C, 0.00665 °C, 0.0138 °C. Si nota quindi un netto

aumento dell'ampiezza della temperatura termoplastica, dalla prima all'ultima prova infatti aumenta di un ordine di grandezza.

Fino ad ora si è sempre fatto riferimento al singolo pixel e si è potuto confermare che lo spettro delle ampiezze è caratterizzato da una serie di picchi nei multipli della frequenza di carico e che questi tendono ad aumentare all'aumento della tensione applicata.

Se per ogni pixel si seleziona il valore dell'ampiezza ad una specifica frequenza si ottiene una mappa termografica in cui viene evidenziato l'andamento dell'ampiezza scelta lungo la superficie del provino in esame. Il codice Matlab implementato permette di ottenere la mappa termografica dell'ampiezza di temperatura stabilizzata (costante a frequenza nulla), dell'ampiezza di temperatura termoelastica (frequenza di carico) e dell'ampiezza di temperatura termoplastica (frequenza doppia rispetto alla frequenza di carico). Teoricamente l'andamento che ci si aspetta dalla temperatura stabilizzata è caratterizzato da una zona più calda al centro e più fredda ai lati [], soprattutto per i carichi elevati, secondo anche quanto visto nella figura N. Invece, per quanto riguarda la temperatura termoplastica ci si aspetta sia pressoché costante. Infatti, essa è legata al fenomeno di danneggiamento plastico subito dal materiale e, lungo il volume utile del provino, tale danneggiamento è costante ed omogeneo.

Si riportano le mappe termografiche delle tre componenti per la prova P\_6\_39\_MC a livello esemplificativo.

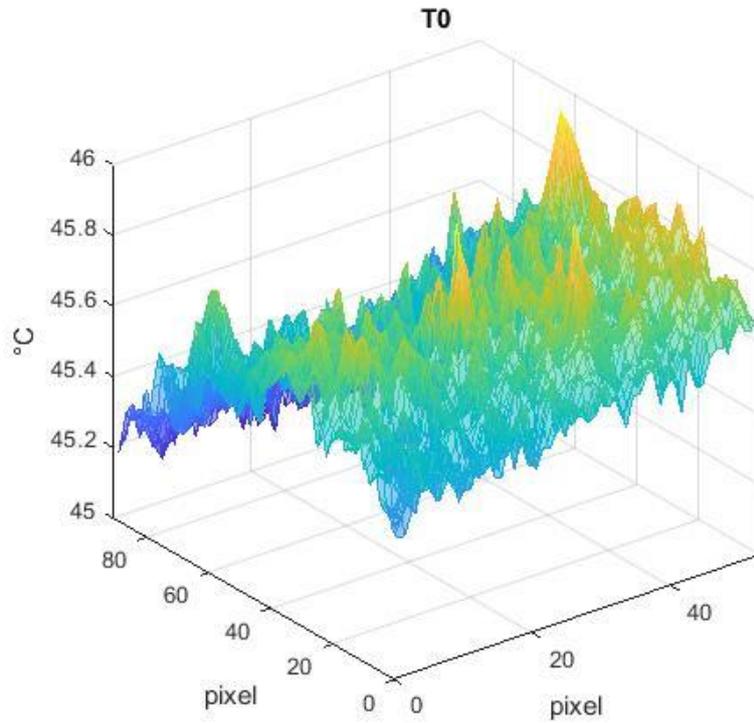


Figura 3.35. Mappa termica della superficie del provino analizzata della componente costante della temperatura

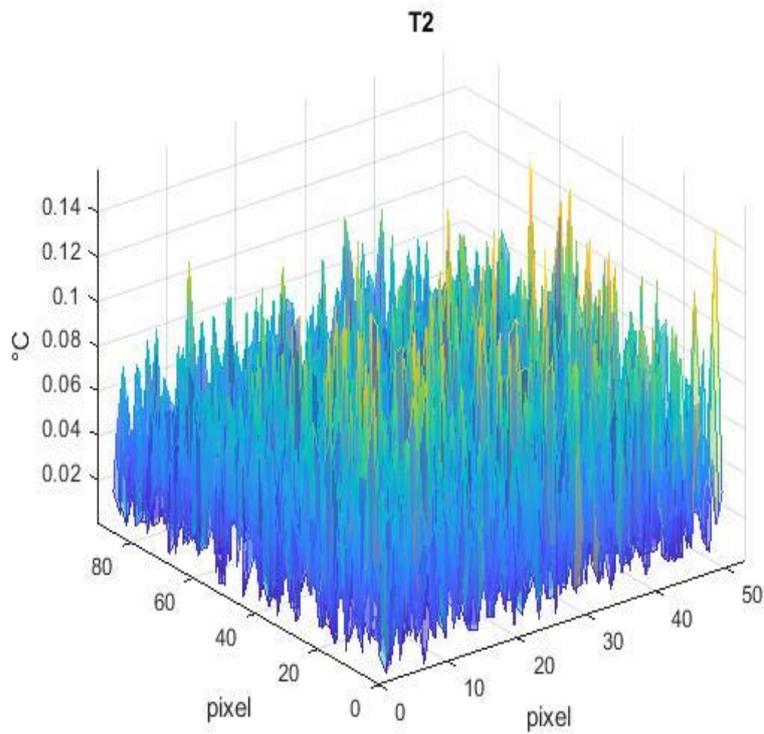


Figura 3.36. Mappa termica della superficie del provino analizzata della componente termoplastica della temperatura

Le componenti del segnale esaminato risultano affette da un elevato rumore. Si intuisce infatti l'andamento della mappa termica ma il rumore è tale da non permetterne un'interpretazione o comunque da trarne informazioni utili. Questo si osserva in particolar modo per la temperatura termoplastica, in cui si osservano anche differenze di ordine di grandezza tra due pixel vicini. Fisicamente questo è impossibile, la temperatura deve avere, lungo la superficie del provino, un andamento continuo e coerente con le condizioni di carico applicate.

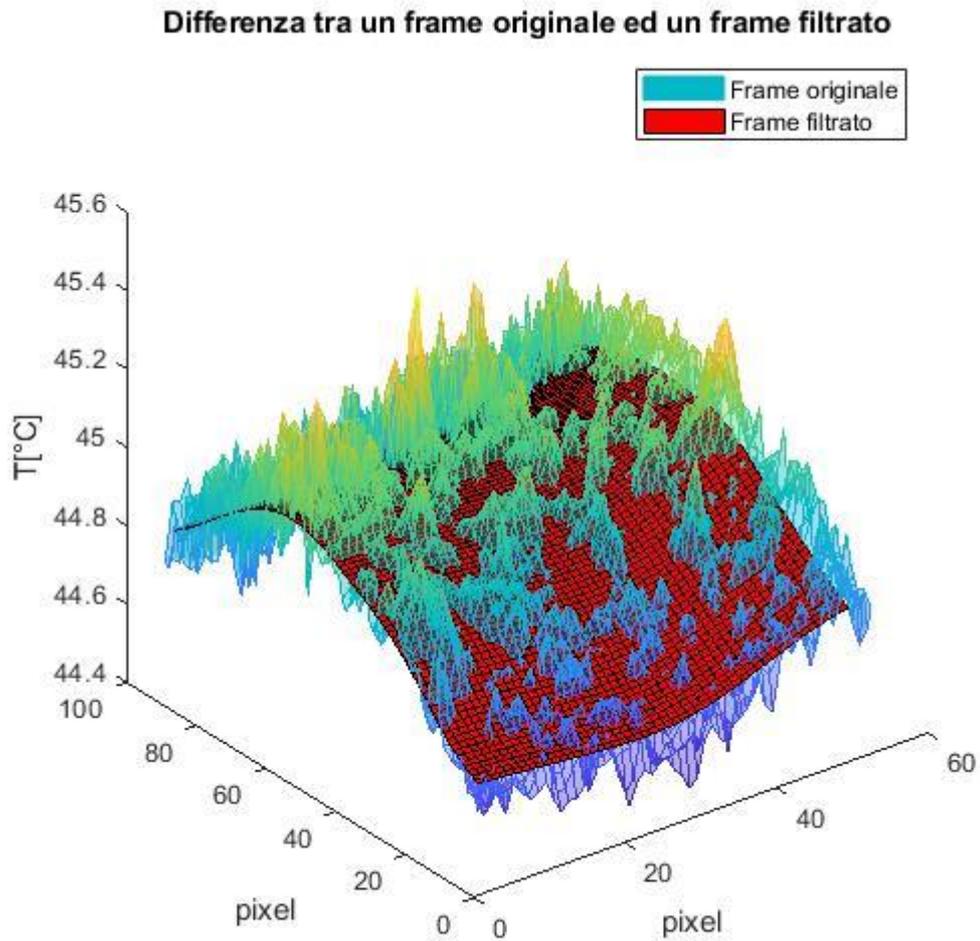
La bassa qualità del segnale acquisito può essere ricondotta alla misura termografica. Ogni frame registrato dalla termocamera è affetto da un certo disturbo e rumore di fondo. Di conseguenza una possibile soluzione è quella di applicare un filtro ad ogni frame.

Si utilizza un comando di Matlab chiamato 'imgaussfilt', un particolare filtro bidimensionale usato appositamente per filtrare le immagini. A questo filtro viene dato in ingresso l'immagine da filtrare e la profondità del filtro in termini di pixel. Il comando 'imgaussfilt' esegue la convoluzione del filtro gaussiano lungo tutta l'immagine, i cui pixel vengono sostituiti dalla media pesata dei pixel intorno. Discretizzando il filtro gaussiano in forma matriciale e supponendo una dimensione di 5x5:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

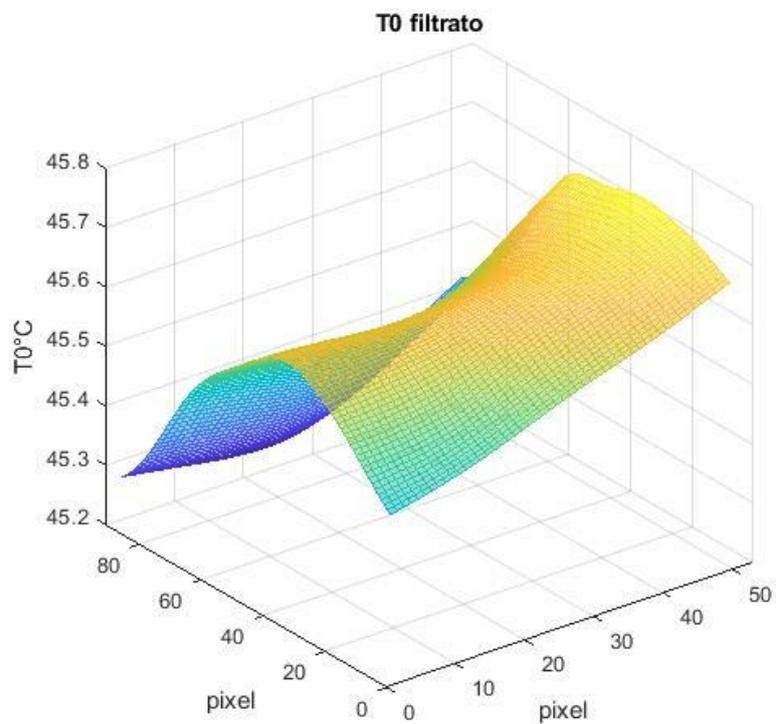
si nota che il filtro pesa maggiormente il pixel centrale e i pixel che lo circondano diminuendone il peso. Questo permette mediare la temperatura di un pixel tenendo conto della temperatura dei pixel che lo circondano, così da evitare picchi e discontinuità di temperatura tra un pixel e l'altro.

La figura successiva mostra un generico frame della matrice tridimensionale. In rosso si può osservare l'andamento della temperatura filtrata lungo la superficie del provino rispetto alla temperatura (blu/verde/gialla) originale acquisita dalla termocamera.

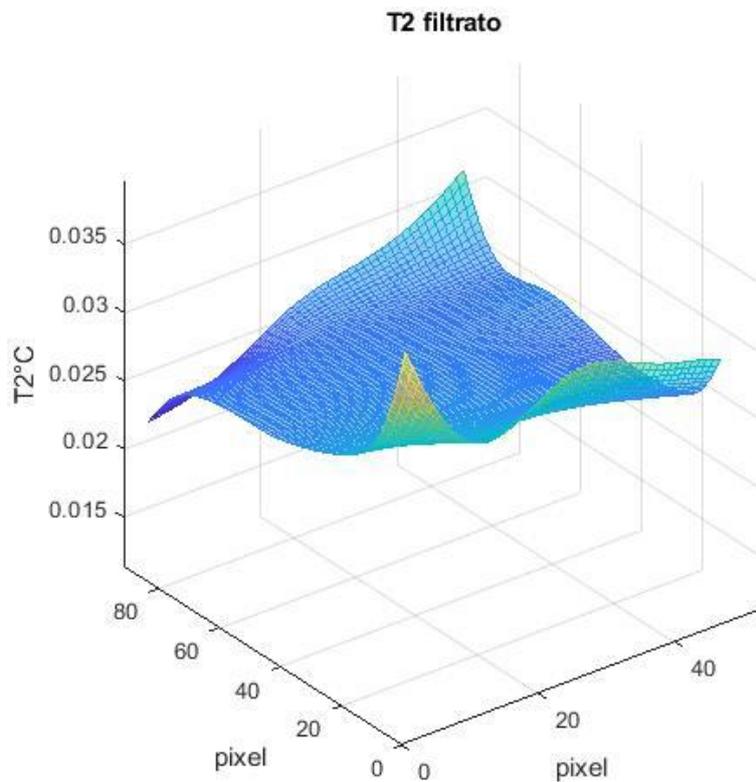


*Figura 3.37. Confronto tra la mappa termica originale e filtrata di un generico frame*

Analizzando nuovamente l'andamento delle componenti della temperatura per la stessa prova definita in precedenza si ottengono le seguenti mappe termografiche:



*Figura 3.38. Mappa termografica della componente costante  $T_0$  della prova P\_6\_39\_MC filtrata con un filtro gaussiano.*



*Figura 3.39. Mappa termografica della componente costante  $T_2$  della prova P\_6\_39\_MC filtrata con un filtro gaussiano.*

Si osserva un andamento decisamente più regolare ed omogeneo come ci si aspetta fisicamente. La temperatura  $T_0$  è caratterizzata da una zona di massima temperatura al centro che si abbassa verso i lati della superficie. Invece, la mappa termografica della temperatura  $T_2$  ha un andamento pressoché costante pari a  $0.027^\circ\text{C}$ . La diminuzione del rumore e l'omogeneità delle mappe termografiche riportate sono evidenti e questo lo si può osservare anche analizzando lo spettro delle ampiezze del singolo pixel concentrandosi sulla ampiezza della componente termoplastica.

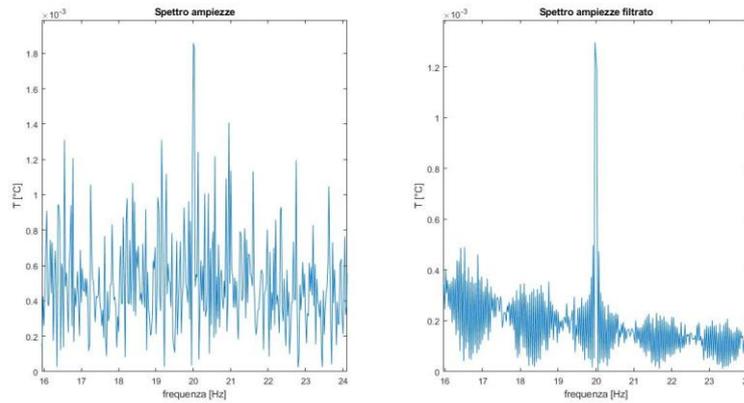


Figura 3.40. Differenza dello spettro delle ampiezze sulla componente termoplastica tra filmato originale e filmato filtrato per la prova P\_6\_01\_MC eseguita a 10 Hz per 260 MPa.

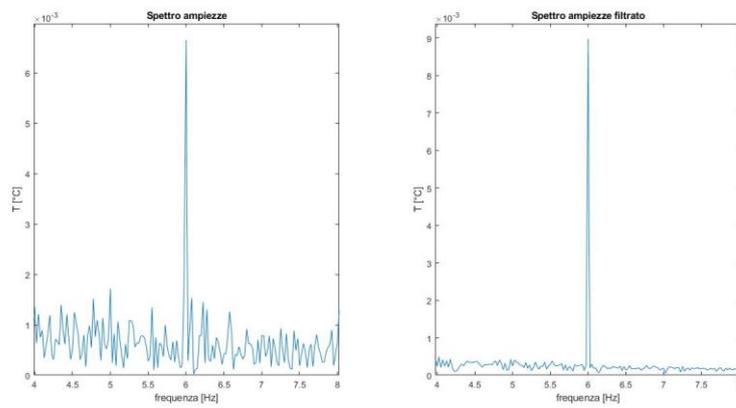


Figura 3.41. Differenza dello spettro delle ampiezze sulla componente termoplastica tra filmato originale e filmato filtrato per la prova P\_6\_21\_MC eseguita a 3 Hz per 320 MPa.

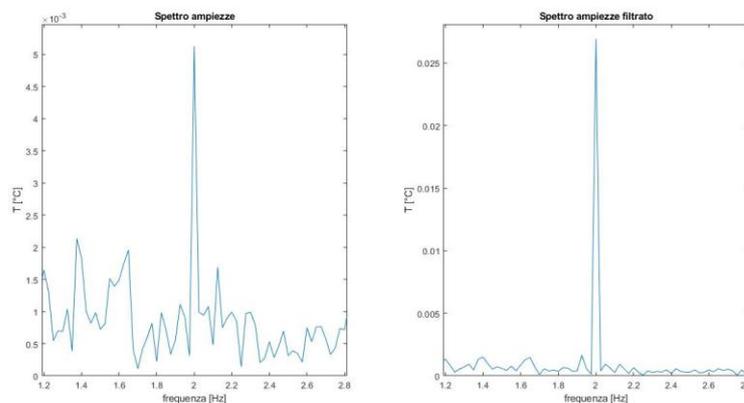
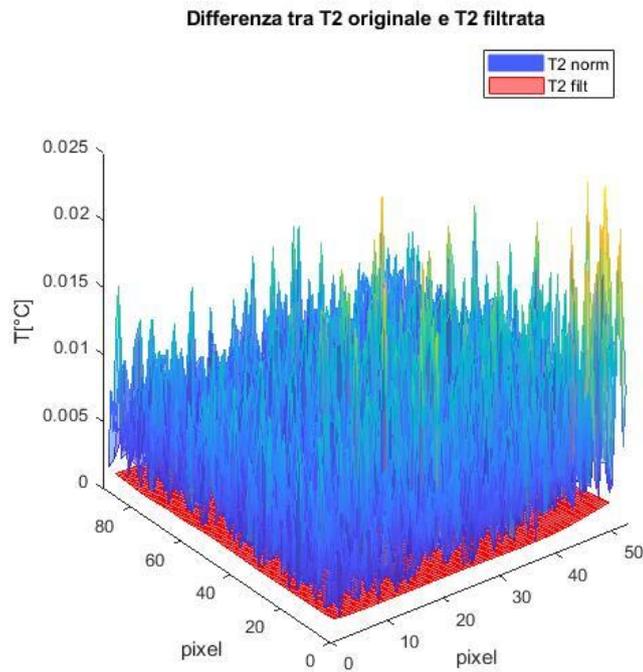


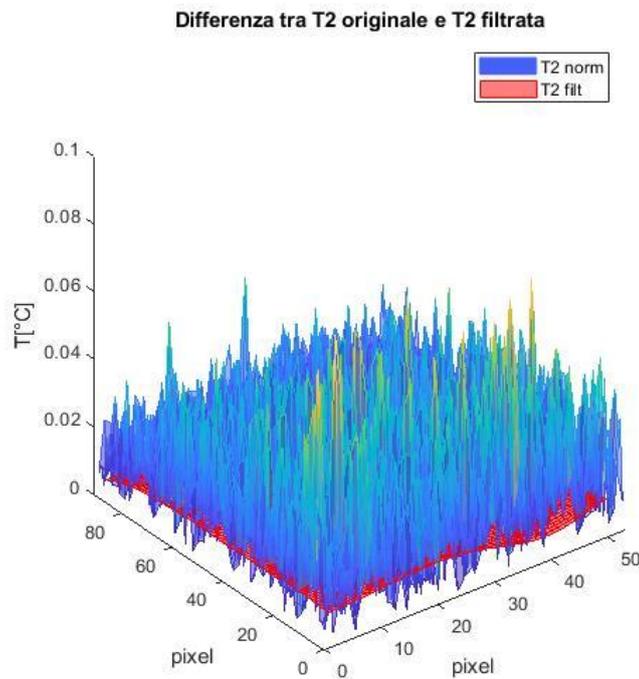
Figura 3.42. Differenza dello spettro delle ampiezze sulla componente termoplastica tra filmato originale e filmato filtrato per la prova P\_6\_39\_MC eseguita a 1 Hz per 360 MPa.

Osservando le figure sopra riportate è evidente la diminuzione del rumore presente nello spettro originale (diagramma a sinistra). Per bassi livelli di ampiezza di tensione, attraverso il filtraggio dell'immagine, si ottiene un picco al doppio della frequenza di carico migliore e più evidente. Oltre che una diminuzione del rumore si osserva anche che il picco termoplastico ha valori differenti nello

spettro originale ed in quello filtrato. Analizzando la mappa termografica si osserva il seguente comportamento in seguito al filtraggio.



*Figura 3.43. Differenza tra mappa termografica della componente termoplastica del segnale originale e filtrato per il provino P\_6\_01.*



*Figura 3.44. Differenza tra mappa termografica della componente termoplastica del segnale originale e filtrato per il provino P\_6\_21.*

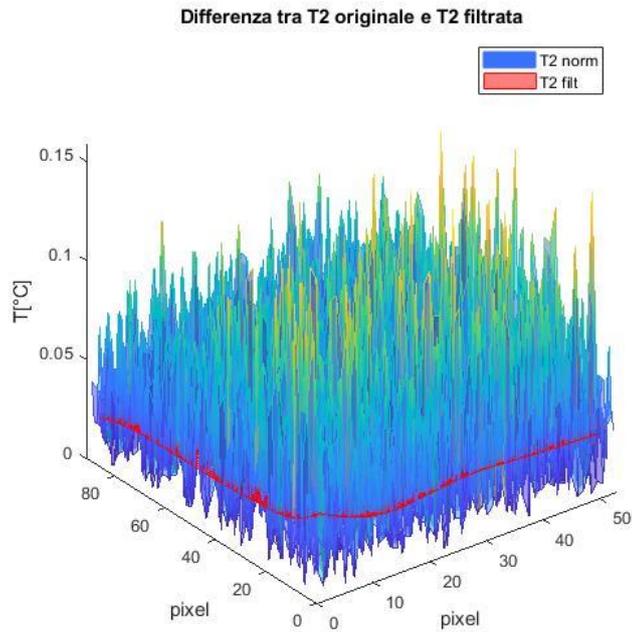


Figura 3.45. Differenza tra mappa termografica della componente termoplastica del segnale originale e filtrato per il provino P\_6\_39.

La mappa termografica mostra come il valore medio della temperatura termoplastica sia inferiore rispetto al valor medio della mappa termografica originale per ampiezze di tensione limitate (260 MPa) mentre, all'aumentare dell'ampiezza di tensione, i due valori medi tendano ad avvicinarsi. Questo è dovuto al fatto che la temperatura termoplastica sia inferiore ai bassi carichi e di conseguenza maggiormente influenzata dal rumore, al contrario ad alti carichi essa è sufficientemente importante da essere meno influenzata dal rumore.

$\sigma_a$ [MPa]	$T_D$ originale [°C]	$T_D$ filtrata [°C]	$\Delta\%$
260	0.00438	0.00130	70.3
320	0.0133	0.00914	31.3
360	0.0331	0.0273	17

Tabella 3.8. Differenza percentuale della temperatura termoplastica tra segnale originale e segnale filtrato all'aumentare della tensione applicata.

Attraverso il filtraggio gaussiano di ogni frame dei filmati termografici si osserva che l'andamento della temperatura termoplastica è costante lungo la superficie del provino. Di conseguenza, volendo utilizzare la temperatura termoplastica come parametro di riferimento per la stima del limite di fatica, è sufficiente considerare la media della mappa termica della seconda armonica della temperatura.

L'area iniziale selezionata dal filmato termografico è un parametro importante di scelta. Volendo analizzare la totalità della superficie del provino compresa tra le linguette dell'estensometro si rischia

di selezionare pixel che subiscono l'effetto di bordo del provino e non assicurano una misura ottimale di temperatura.

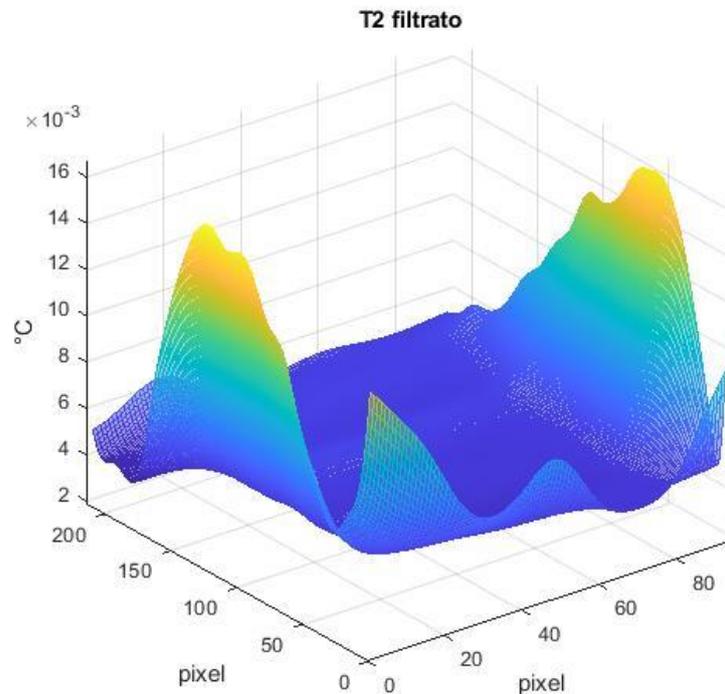
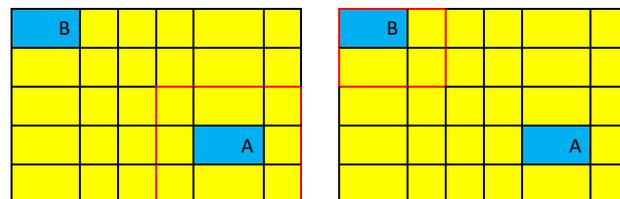


Figura 3.46. Mappa termica della temperatura termoplastica in cui si evidenziano gli effetti del bordo.

Nella figura sopra riportata viene evidenziato l'effetto del bordo dei provini che causa una errata determinazione della mappa termografica. Per questo è fondamentale selezionare un'area della superficie del provino evitando i bordi. Il comportamento limite ai bordi ha un secondo effetto importante. Infatti, supponendo di aver considerato un'area interna alla superficie del provino, il filtro gaussiano risente dell'effetto del bordo dell'immagine.

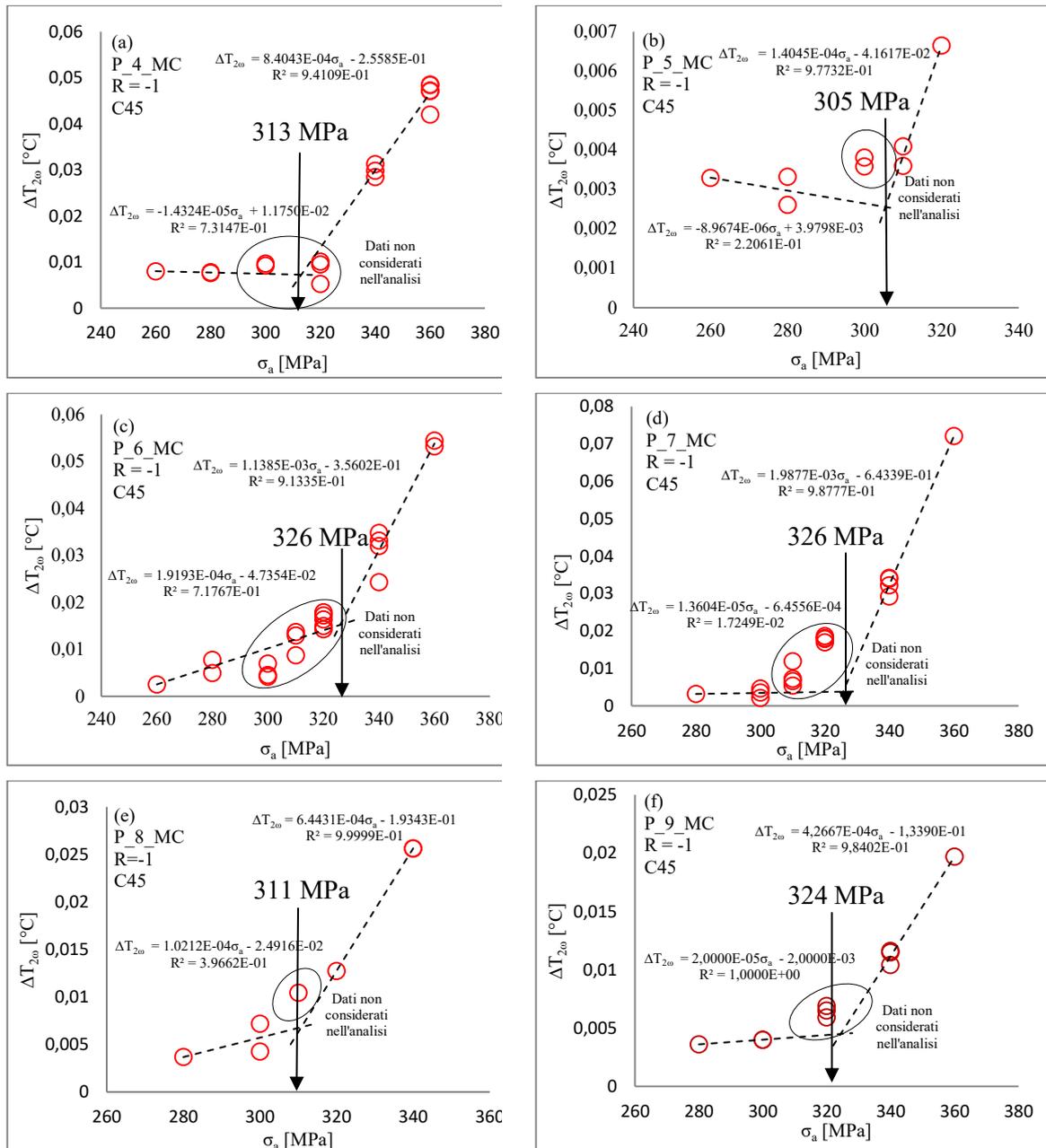


Supponendo di voler applicare un filtro gaussiano all'immagine sovrastante in cui i pixel gialli hanno una temperatura costante mentre quelli blu rappresentano un picco di temperatura. Volendo applicare un filtro gaussiano in corrispondenza del pixel A esso viene mediato con gli otto pixel gialli che lo circondano. Se invece si vuole filtrare l'immagine in corrispondenza del pixel B esso viene mediato solamente con i tre pixel gialli che lo circondano. Questo fa sì che a causa dell'effetto di

bordo il filtro non lavori adeguatamente e si abbiano dei picchi sul bordo. Quindi, quando si determina il valor medio della temperatura termoplastica, non vengono considerati i pixel di bordo per evitare i rispettivi picchi.

### 3.9.3 – Risultati del metodo della temperatura termoplastica per $R=-1$

Si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati ricavati durante le prove a rapporto di ciclo R=-1. Analogamente a quanto già fatto nei metodi precedenti si considera un grafico avente in ascissa l'ampiezza di tensione ed in ordinata un parametro di riferimento, in questo caso il range della temperatura termoplastica  $\Delta T_D$  calcolato come il range della seconda armonica  $\Delta T_{2\omega}$ .



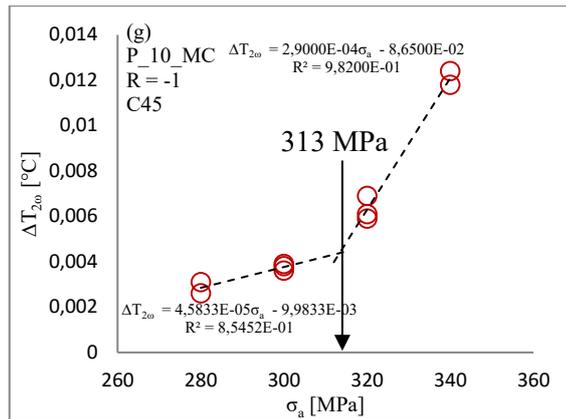


Figura 3.47. Prove a gradini rispetto al range di temperatura termoplastica  $\Delta T_D = \Delta T_{2\omega}$  per i provini P\_04\_MC(a), P\_05\_MC(b), P\_06\_MC(c), P\_07\_MC(d), P\_08\_MC(e), P\_09\_MC(f), P\_10\_MC(g) a  $R=-1$

Si osserva un andamento analogo a quello riscontrato per il calore dissipato  $Q$  e l'energia meccanica dissipata  $W$ . Infatti, la temperatura termoplastica presenta un cambio di pendenza tra i bassi ed i alti livelli di carico in corrispondenza del quale si ha un valore di ampiezza di tensione che viene considerato come la stima del limite di fatica del materiale.

Considerando le varie stime del limite di fatica si ottiene:

	P_04_ MC	P_05_ MC	P_06_ MC	P_07_ MC	P_08_ MC	P_09_ MC	P_10_ MC
$\sigma_{a,TD}$ MPa	313	305	326	326	311	324	313

Tabella 3.9. Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo basato sulla temperatura termoplastica per  $R=-1$ .

Considerando le stime dei sette provini è possibile stimare il limite di fatica per  $R=-1$  secondo il metodo basato sulla temperatura termoplastica assunta durante la fase stabilizzata della temperatura semplicemente considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,TD} = 317 \text{ MPa}$$

#### 3.9.4 – Risultati del metodo della temperatura termoplastica per $R=0.1$

Si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati ricavati durante le prove a rapporto di ciclo  $R=0.1$ .

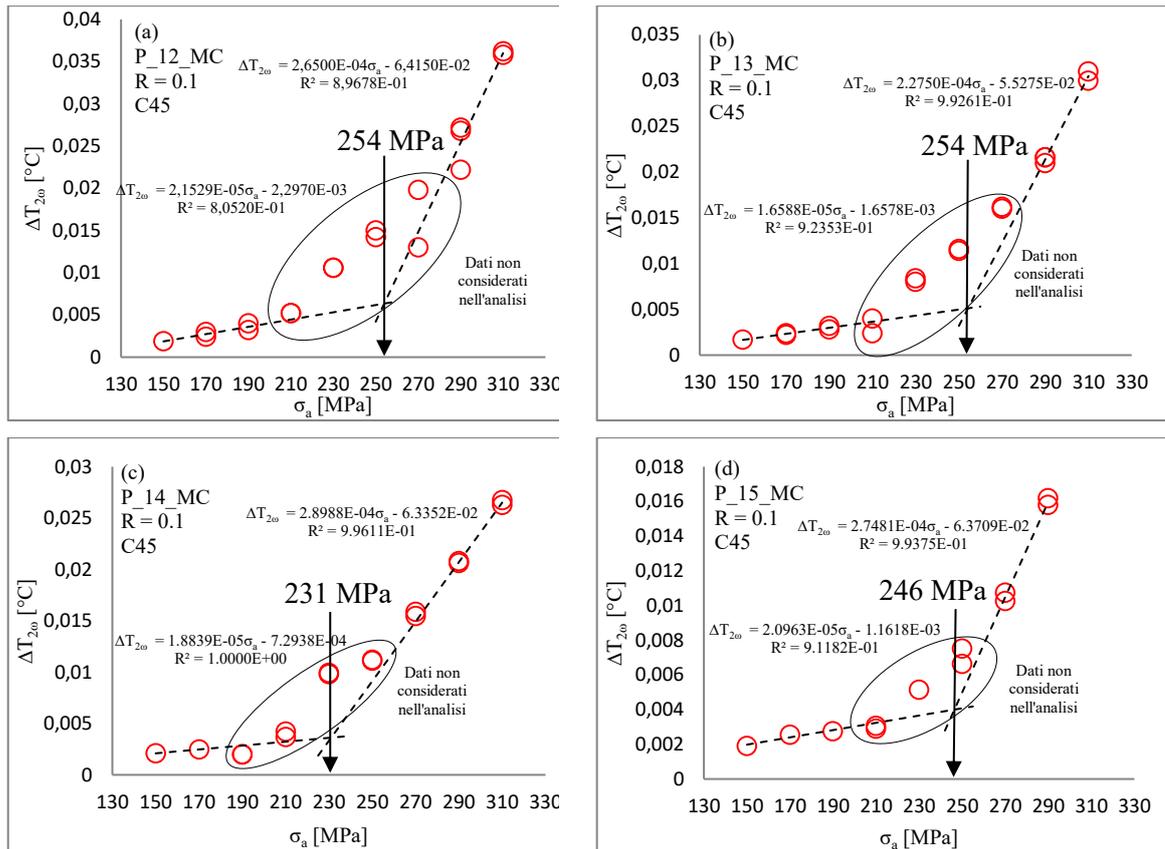


Figura 3.48. Prove a gradini rispetto al range di temperatura termoplastica  $\Delta T_D = \Delta T_{20}$  per i provini P\_12\_MC(a), P\_13\_MC(b), P\_14\_MC(c), P\_15\_MC(d) a  $R=0.1$

Sfruttando anche in questo caso il cambio di pendenza ottenuto dalle rette interpolanti i punti sperimentali a basso carico e quelli ad alto carico si può stimare il limite di fatica per ogni provino.

Considerando le varie stime del limite di fatica si ottiene:

	P_12_MC	P_13_MC	P_14_MC	P_15_MC
$\sigma_{a,TD}$ [MPa]	254	254	231	246

Tabella 3.10. Tabella riassuntiva di risultati secondo il metodo basato sulla temperatura termoplastica per  $R=0.1$ .

Considerando le stime dei quattro provini è possibile stimare il limite di fatica per  $R=0.1$  secondo il metodo basato sulla temperatura termoplastica assunta durante la fase stabilizzata della temperatura considerando il valor medio.

$$\sigma_{a,TD} = 246 \text{ MPa}$$

### 3.9.5 – Confronto risultati al variare dell'area

Nei paragrafi precedenti viene sottolineato dall'osservazione delle mappe termiche della superficie dei provini che la componente termoplastica della temperatura è costante poiché il danneggiamento per plasticizzazione è costante in tutto il volume utile del provino. Per verificare tale affermazione in maniera più rigorosa vengono condotte alcune analisi sulla temperatura del provino P\_4. Si determinano e si confrontano i valori della temperatura termoplastica e si stima il limite di fatica al variare dell'area della superficie del provino. Partendo da un'area di 214x95 pixel viene escluso uno dopo l'altro e simmetricamente un certo numero di righe e di colonne per diminuire di volta in volta l'area considerata.

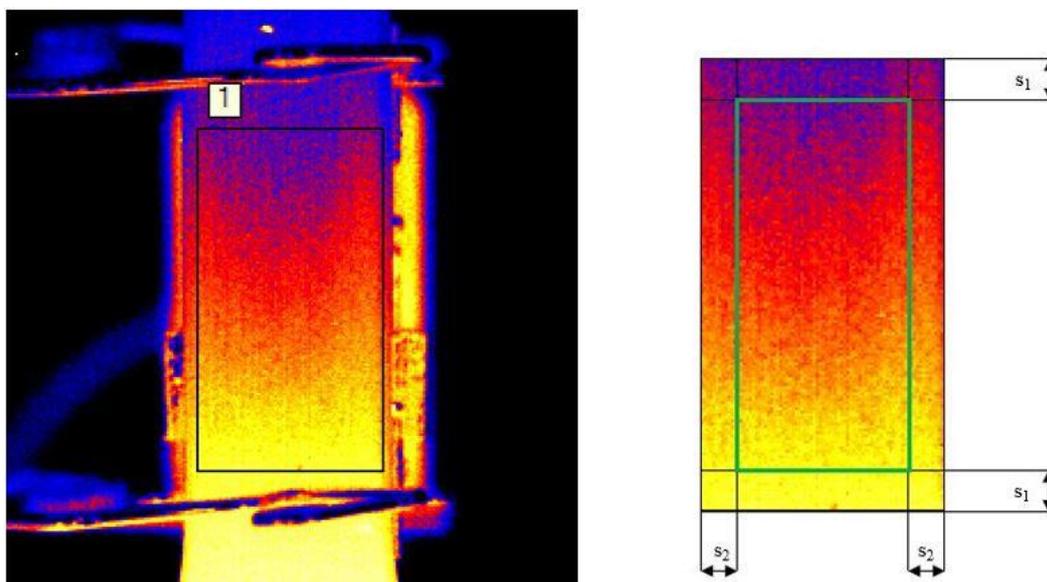


Figura 3.49. A sinistra l'immagine termografica del provino e dell'area iniziale selezionata nera. A destra l'area a cui vengono eliminate righe e colonne per selezionare l'area interna in verde.

Nelle prime righe del codice Matlab, implementato per analizzare la superficie del provino, è possibile impostare i valori delle costanti  $s_s$  e  $s_2$  a seconda della dimensione dell'area voluta. Maggiori sono queste costanti e maggiore sarà il numero di righe e colonne che simmetricamente vengono eliminate.

Si riporta la tabella riassuntiva con i valori di  $s_1$  e  $s_2$ .

N° area	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
0	0	0
1	20	10
2	40	15
3	60	20
4	80	30
5	100	40

Tabella 3.11. Numero di righe e colonne da eliminare per variare la dimensione dell'area da analizzare.

Il comportamento del filtro gaussiano sull'immagine dipende dalla dimensione della matrice che lo compone, ossia dalla deviazione standard (sigma) definita nel codice in termini di numero di pixel. Di conseguenza è stata utilizzata un valore di deviazione standard, in termini di pixel, pari a 8 per le aree maggiori, e pari a 3 per quelle minori. In questo modo è stata mantenuta una dimensione del filtro coerente con la dimensione dell'area. Per ognuna di queste aree viene calcolato il valor medio della componente termoplastica della temperatura:

	$\sigma_a$ [MPa]	$\Delta T_{2\omega\_0}$	$\Delta T_{2\omega\_1}$	$\Delta T_{2\omega\_2}$	$\Delta T_{2\omega\_3}$	$\Delta T_{2\omega\_4}$	$\Delta T_{2\omega\_5}$
1	260	0.00803	0.00804	0.00803	0.00802	0.00800	0.00798
3	280	0.00776	0.00780	0.0078	0.00784	0.00785	0.00785
7	300	0.00936	0.00927	0.00928	0.00929	0.00933	0.00933
9	300	0.00986	0.00967	0.00962	0.00969	0.00981	0.00991
13	320	0.00972	0.00966	0.00985	0.00951	0.00919	0.00912
15	320	0.0103	0.0102	0.0107	0.0101	0.0100	0.00970
17	340	0.0294	0.0295	0.0304	0.0298	0.0297	0.0299
19	340	0.0303	0.0312	0.0301	0.0313	0.0306	0.0305
21	340	0.0287	0.0292	0.0290	0.0285	0.0281	0.0283
23	360	0.0498	0.0492	0.0486	0.0486	0.0486	0.0488
25	360	0.0419	0.0419	0.0420	0.0420	0.0415	0.0418
27	360	0.0471	0.0467	0.0470	0.0472	0.0468	0.0472
29	360	0.0477	0.0473	0.0473	0.0471	0.0475	0.0472
31	360	0.0487	0.0484	0.0484	0.0485	0.0484	0.0484

Tabella 3.12. Valori del range della seconda armonica di temperatura al variare della prova eseguita ed al variare della dimensione dell'area selezionata per il provino P\_04\_MC testato a R=-1.

Osservando i risultati lungo una stessa linea si può osservare come i risultati siano molto simili tra loro e di conseguenza che al variare dell'area la componente  $\Delta T_{2\omega}$  ( $\Delta T_D$ ) rimanda costante. Per maggiore chiarezza si riporta tabella e grafico in cui si può osservare la differenza percentuale rispetto all'area di riferimento '0' ossia l'area con  $s_1=s_2=0$  pixel.

	$\sigma_a$ [MPa]	$\Delta_1\%$	$\Delta_2\%$	$\Delta_3\%$	$\Delta_4\%$	$\Delta_5\%$
1	260	0.17	-0.11	-0.12	-0.41	-0.67
3	280	0.61	0.52	1.03	1.26	1.17
7	300	-0.88	-0.90	-0.71	-0.29	-0.32
9	300	-1.97	-2.47	-1.80	-0.47	0.45
13	320	-0.60	1.33	-2.18	-5.50	-6.27
15	320	-0.73	4.13	-1.41	-2.52	-5.85
17	340	0.56	3.71	1.66	1.25	1.68
19	340	2.72	-0.99	3.05	1.02	0.28
21	340	1.75	1.19	-0.69	-1.87	-1.24
23	360	-1.21	-2.60	-2.54	-2.51	-2.05
25	360	-0.09	0.16	0.11	-1.10	-0.39
27	360	-1.04	-0.44	0.23	-0.68	0.07
29	360	-0.87	-0.94	-1.21	-0.30	-0.95
31	360	-0.73	-0.65	-0.65	-0.67	-0.64

Tabella 3.13. Differenza percentuale dei valori di  $\Delta T_{2\omega}$  al variare delle dimensioni dell'area rispetto al riferimento  $\Delta T_{2\omega_0}$ .

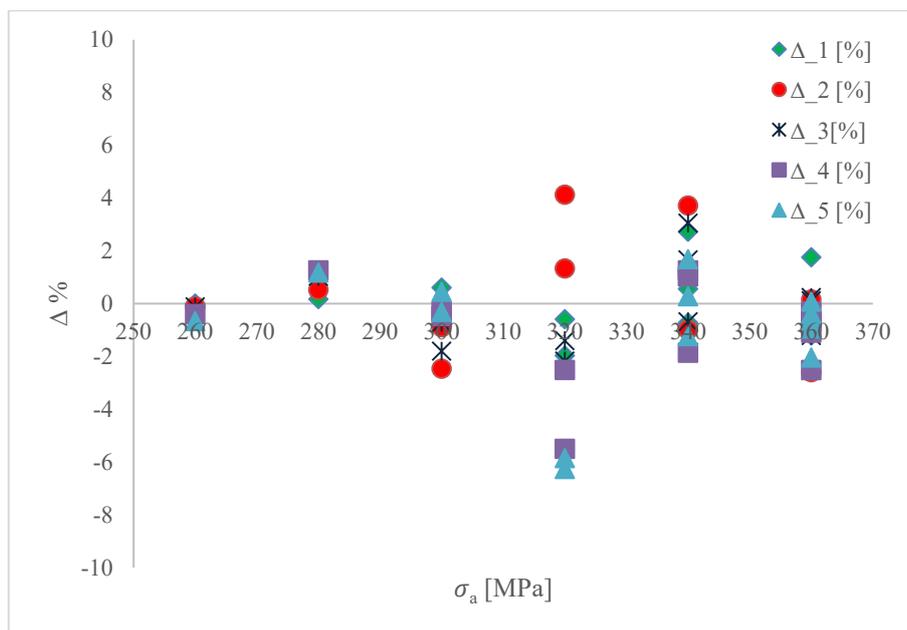


Figura 3.50. Differenza percentuale nel caso di diverse aree al variare dell'ampiezza di tensione.

Dal grafico si osserva come la differenza percentuale massima arrivi al -6.27%. Questa differenza percentuale corrisponde alla differenza tra  $\Delta T_{2\omega_0} = 0,0097$  e  $\Delta T_{2\omega_5} = 0,0091$ . In termini assoluti questa differenza è molto piccola rispetto al valore di temperatura misurato dalla termocamera e potrebbe essere legata anche al valore di deviazione standard scelto per il filtro gaussiano. A dimostrazione di ciò si riportano i valori delle stime del limite di fatica al variare della dimensione dell'area.

	0	1	2	3	4	5
$\sigma_a$ [MPa]	314.8	313.0	313.3	313.4	314.3	314.4
$\Delta$ [%]	- 0.56188	- 0.47664	- 0.44479	- 0.15439	- 0.11179	- 0.56188

*Tabella 3.14. Stima del limite di fatica con le 6 diverse aree e differenza percentuale della stima rispetto all'area di riferimento 0.*

Osservando la tabella si nota che la differenza percentuale della stima del limite di fatica nei vari casi è dell'ordine di  $10^{-1}$  e quindi ingegneristicamente totalmente trascurabile. Inoltre non presenta un particolare andamento, non diminuendo o aumentando al diminuire dell'area.

### 3.10 – Conclusioni

In questo capitolo sono state esposte le prove sperimentali e le successive analisi eseguite per comprendere e verificare l'applicazione di tre metodi alternativi per la stima del limite di fatica durante prove a fatica di un acciaio C45 in provini lisci per rapporto di ciclo  $R=-1$  e  $R=0.1$ . È stato analizzato il comportamento, durante una prova a fatica, di tre parametri di riferimento: l'energia meccanica dissipata dall'unità di volume in un ciclo di carico-scarico, il calore dissipato dall'unità di volume in un ciclo di carico-scarico ed il range di temperatura termoplastica. Sono state eseguite delle prove a gradino ad un passo costante di 20 MPa durante le quali la temperatura superficiale del provino è stata monitorata con una termocamera e le deformazioni del volume utile con un estensometro. L'energia meccanica dissipata è stata calcolata come l'area del di un ciclo di isteresi; il calore dissipato è stato calcolato sfruttando il gradiente termico di un raffreddamento successivo ad un'interruzione del carico; la temperatura termoplastica è stata determinata sviluppando il segnale termico con la Serie di Fourier. Considerando i grafici delle prove a gradino rispetto ai tre parametri sopra elencati è stato possibile stimare il limite di fatica del materiale per i due rapporti di ciclo ai quali sono state eseguite le prove. Il limite di fatica è considerato come quel valore di ampiezza di tensione che viene intersecato dalle due rette interpolanti i punti sperimentali a basso carico e ad alto carico. Nel caso di rapporto di ciclo  $R=-1$  sono state determinate le stime  $\sigma_{a,W} = 310MPa$ ,  $\sigma_{a,Q} = 308MPa$  e  $\sigma_{a,\Delta T_D} = 317MPa$ . Nel caso di rapporto di ciclo  $R=0.1$  sono state determinate le stime  $\sigma_{a,W} = 262MPa$ ,  $\sigma_{a,Q} = 257MPa$  e  $\sigma_{a,\Delta T_D} = 246MPa$ .



## Capitolo 4 - PROVE A FATICA SECONDO NORMATIVA

### 4.1 - Introduzione

La normativa UNI 3964 è la normativa di riferimento per le informazioni relative allo studio del fenomeno della fatica a temperatura ambiente di materiali metallici. Il calcolo del limite a fatica può essere eseguito attraverso diversi metodi che in generale richiedono un cospicuo numero di provini e conseguenti tempi elevati. La normativa suggerisce il metodo della prova a gradini (*stair case*) che richiede l'utilizzo di almeno 15 provini. Esso permette la determinazione del valore medio del limite a fatica di un materiale e il suo scarto tipo  $s$  della distribuzione. Il primo passo è quello di definire una serie di valori di ampiezza di tensione, da applicare durante le prove, distanzianti l'uno dall'altro di un passo costante  $d$  [MPa] che deve essere dell'ordine dello scarto tipo  $s$ , in questo caso si è scelto  $d = 20$  MPa. Tali valori devono essere presi ragionevolmente attorno al valore supposto del limite di fatica. A questo punto, partendo dal valore inferiore, si sottopongono i provini ai vari livelli di ampiezza di tensione per un numero di cicli prefissato, in questo caso  $10^7$  cicli. Tra le varie prove si procede in questo modo: se il provino non ha subito cedimento durante i  $10^7$  cicli il provino successivo verrà testato con il valore di ampiezza di tensione immediatamente superiore; se invece il cedimento è avvenuto il provino successivo verrà testato con il valore di ampiezza di tensione immediatamente inferiore. Ad esempio, nel caso in cui si stia eseguendo una prova a fatica a 200MPa, scelto un passo di 10 MPa, se il provino dovesse rompersi quello successivo andrebbe testato a 190 MPa, mentre se il provino dovesse rimanere integro quello successivo andrebbe testato a 210 MPa. Si procede in questo modo fino ad esaurimento dei provini. La normativa prevede l'utilizzo di almeno 15 provini, tuttavia in questo caso sono stati utilizzati solamente 10 provini, secondo il cosiddetto *stair case* breve. Volendo tuttavia calcolare il limite di fatica con un approccio

statistico più rigoroso si eseguono gli stessi conti previsti da normativa, correggendo le formule a causa del basso numero di provini.

Prima di essere utilizzato ogni provino è stato passato con carta vetrata per eliminare lo strato superficiale dovuto alla lavorazione e smussare gli spigoli per evitare spigoli vivi che causerebbero concentrazioni di tensione. Ogni provino è stato testato attraverso una prova di fatica monoassiale eseguita in controllo di forza  $F$  [kN], per cui, nota l'ampiezza di tensione da applicare, è stata misurata la sezione e quindi ricavata l'ampiezza della forza corrispondente. Sono stati eseguite le prove per stimare il limite di fatica del materiale nel caso di rapporto di ciclo  $R_\sigma=-1$  e  $R_\sigma=0.1$ .

#### 4.2 – Geometria provini

Sono state utilizzate due diverse geometrie per lo studio a fatica del materiale, per le prove a  $R=0.1$  sono state utilizzati provini con la stessa geometria delle prove termografiche. Invece, per le prove a  $R=0.1$ , sono stati utilizzati dei provini di dimensioni minori, in maniera tale da aumentare la frequenza di carico e quindi velocizzare le prove a fatica. Si riportano le geometrie dei provini.

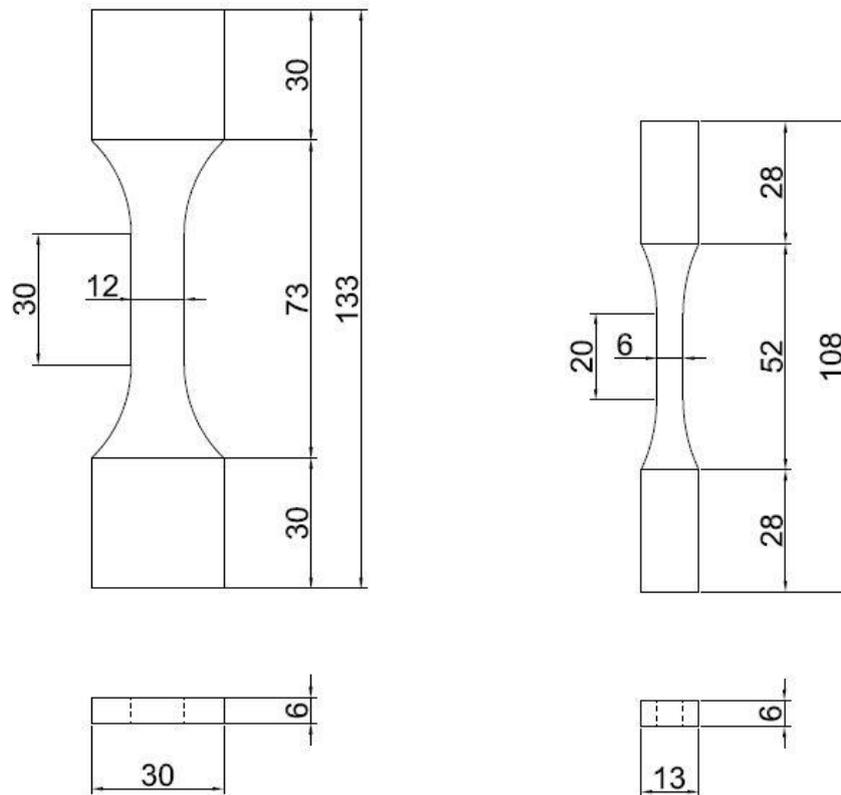


Figura 4.1. Geometria dei provini con quote principali; a sinistra la geometria usata per  $R=0.1$  e a destra la geometria usata per  $R=-1$ .

#### 4.3 – Procedura di esecuzione delle prove sperimentali

L'esecuzione delle prove sperimentali avviene con la stessa macchina di prova utilizzata per le prove termografiche ed il suo settaggio è simile a quello descritto nel paragrafo 3.5. La finalità di queste prove è quella di stimare il limite di fatica e quindi durante una prova interessa sapere solamente se per valore di carico il provino si è rotto o è rimasto integro, questo caso si utilizza unicamente la Schenck Hydropuls PSA100, ne la termocamera ne l'estensometro vengono utilizzati. Per la descrizione dettagliata della procedura si rimanda al paragrafo 3.5, tenendo però conto di queste differenze:

- L'estensometro non viene utilizzato e quindi si può evitare l'impostazione dell'assegnazione dei trasduttori.
- Nella finestra 'Generatore di funzioni' è necessario imporre il 'N° di cicli da eseguire', ossia il numero di cicli obiettivo al quale deve arrivare il provino. In questo caso è stato scelto 10 milioni di cicli. Se il provino raggiunge i 10 milioni di cicli si ferma la prova ed il circuito idraulico viene chiuso.

- Nella finestra 'Test fatica' alla voce 'parametri di acquisizione' si imposta 'n° punti a ciclo'=50 e 'n° cicli da acquisire'=1. In questo modo ad ogni salvataggio si acquisisce un ciclo alla volta e 50 punti sperimentali.
- Per la frequenza di prova è necessario scegliere quella più alta possibile senza causare un eccessivo riscaldamento del provino e sforzo della macchina di prova.

Tenuto conto di questi punti si è in grado di svolgere le prove.

#### 4.4 – Stair-case per R=-1

Si riporta la tabella riassuntiva in cui per ogni prova sono riportati larghezza e spessore del provino, ampiezza di tensione voluta, ampiezza di forza effettivamente da applicare, frequenza di prova e cicli a rottura nel caso in cui il provino abbia subito cedimento.

	l [mm]	s [mm]	$\sigma_a$ [MPa]	F <sub>a</sub> [kN]	f <sub>i</sub> [Hz]	Cicli a rottura
test_12	6	6	260	9.36	30	run-out
test_13	6	6	280	10.08	28	645516
test_14	6	6	260	9.36	30	run-out
test_15	6	6	280	10.08	28	run-out
test_16	5.9	6.1	300	10.797	24	636917
test_17	6	6	280	10.08	26	1403816
test_18	6.1	5.9	260	9.3574	28	run-out
test_19	6	6	280	10.08	26	1473796
test_20	5.9	6	260	9.204	28	run-out
test_21	6.1	5.9	280	10.077	26	1016641

Tabella 4.1. Riassunto prove eseguite per R=-1

Da normativa il calcolo del valore medio del limite di fatica corrispondente ad una probabilità di rottura del 50% viene effettuato considerando i risultati dell'evento meno frequente, tra rottura o non rottura, attraverso la seguente formula:

$$\sigma_{D50\%} = \sigma_0 + d \left( \frac{A}{N} \pm 0.5 \right) \quad (4.1)$$

essendo  $\sigma_0$  il livello di ampiezza di sollecitazione più basso,  $d$  il passo tra i livelli di sollecitazione,  $N = \sum n_i$  la somma degli eventi meno frequenti,  $A = \sum i n_i$  la somma dei prodotti del numero di eventi meno frequenti presenti in ciascun livello per il numero d'ordine del livello stesso. Nella parentesi si adotta il segno meno se l'eventualità meno frequente è la rottura, il segno più in caso contrario.

La stima dello scarto tipo  $s$  viene eseguita attraverso la seguente formula:

$$s = 1.62d \cdot \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad (4.2)$$

dove  $B = \sum i n_i^2$  tale formula è valida solo se  $\frac{NB - A^2}{N^2} > 0.3$ .

Tabella riassuntiva delle 10 prove effettuate, dove X significa cedimento del provino e O non cedimento del provino. Si sottolinea che poichè si riteneva che il limite a fatica fosse superiore ai 260 MPa anche se la prova 1 ha portato al cedimento del provino la successiva è stata eseguita nuovamente a 260 MPa.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300					X					
280		X		O		X		X		X
260	O		O				O		O	

Tabella 4.2. Riassunto andamento delle prove. X provino rotto, O provino non rotto.

Osservando che non si può identificare un avvenimento meno frequente poichè sia il non-cedimento che il cedimento avvengono entrambi cinque volte, si prende come riferimento il cedimento X. Si ottiene così la seguente tabella:

X	O	i	$n_i$	$i n_i$	$i^2 n_i$
1	0	2	1	2	4
4	1	1	4	4	4
0	4	0	0	0	0
$\sum n_i = 5$	$\sum n_i = 5$		$N = 5$	$A = 6$	$B = 8$

Tabella 4.3. Calcolo componenti A, B e N per la stima della media e sua deviazione standard.

Si nota che  $\frac{NB - A^2}{N^2} = 0.16 < 0.3$  di conseguenza tali formule non sono applicabili.

Non potendo applicare le formule sopra riportate si procede con un metodo iterativo suggerito da Dixon e Mood nell' articolo "A method for obtaining and Analyzing Sensitivity Data" [29]. Gli autori introducono una funzione costo da massimizzare calcolando le derivate rispetto al valore medio  $m$  e la deviazione standard  $s$ . Rispettivamente ottenendo le seguenti equazioni:

$$\sum n_i \left( \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{z_i}{p_i} \right) = 0 \quad (4.3)$$

$$\sum n_i \left( x_{i-1} \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - x_i \frac{z_i}{p_i} \right) = 0 \quad (4.4)$$

dove  $z_i$  è l'ascissa di una distribuzione normale,  $p_i$  è l'area sottesa relativa alla probabilità di avere il valore  $i$ -esimo e  $q_i = 1 - p_i$ . La finalità quindi è calcolare due valori di  $m$  e  $s$  che permettano di azzerare tali derivate. Si inizia facendo una stima preliminare di  $m$  e  $s$ .

Il valore medio  $m_0$  si stima come la media dei punti medi degli intervalli pesati di un fattore  $n_i$ :

$$m_0 = \frac{1}{5} (290 \cdot 1 + 270 \cdot 4) = 274 \text{ MPa}$$

La deviazione standard si stima osservando che 4 provini su 5 che non hanno subito cedimento si trovano nell'intervallo 260-280 MPa. Questi corrispondono all' 80% dei provini e di conseguenza considerando una distribuzione normalizzata in cui 80% corrisponde a  $z = 1.282$  si ha:

$$1.282s_0 = \frac{1}{2} (280 - 260) = 10$$

$$s_0 = 7.8 \text{ MPa}$$

Da una prima analisi si ottengono i seguenti risultati:

$i$	$n$	$h$	$x$	$z/q$	$z/p$	$n_i \left( \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{z_i}{p_i} \right)$	$x \cdot \frac{z}{q}$	$x \cdot \frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{x_{i-1} z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{x_i z_i}{p_i} \right)$
2	1	30 0	3.33	3.59 1	0.00 2	1.342	11.96	0.00666 6	1.027138
1	4	28 0	0.76 9	1.34 4	0.38 1	-1.192	1.033	0.2930	-1.76813

0	0	26	-	0.08	2.19	0	-	-3.943	0	
		0	1.79	3	7		0.1489			
							0.15			-0.741

Tabella 4.4. Stima delle derivate  $\sigma_D$  e  $s_D$  con  $m_0=274$  MPa e  $s_0=7.8$  MPa.

Si nota che le sommatorie danno 0.15 e -0.741 e queste possono essere viste come degli errori, infatti più di discostano da 0 e peggiore è il risultato. Dopo una serie di tentativi si è giunti alla seguente tabella ponendo  $m = 275$  MPa e  $s = 7$  MPa:

i	n	h	x	$\frac{z}{q}$	$\frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{z_i}{p_i} \right)$	$x \cdot \frac{z}{q}$	$x \cdot \frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{x_{i-1} z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{x_i z_i}{p_i} \right)$
2	1	30	3.57	3.81	0.00	1.299	13.632	0.0035	0.925
		0		7	1			7	
1	4	28	0.71	1.3	0.40	-1.46	0.9285	0.29	-1.51143
		0	4		6				
0	0	26	-	0.04	2.49	0	-	-5.350	0
		0	2.14	1	7		0.0878		
						-0.161			-0.58643

Tabella 4.5. Stima delle derivate  $\sigma_D$  e  $s_D$  con  $m_0=273$  MPa e  $s_0=6.8$  MPa.

L'errore in questo caso è aumentato per il valore medio, mentre è diminuito di un ordine di grandezza per lo scarto. I valori considerati rappresentano la media e lo scarto in per una probabilità di sopravvivenza del provino del 50 %. Volendo espandere l'intervallo al 10 % e al 90 % è sufficiente moltiplicare per 1,28:

$$\sigma_{D10\%} = 275 + 1.28 \cdot 7 = 284 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D90\%} = 275 - 1.28 \cdot 7 = 266 \text{ MPa}$$

#### 4.5 – Stair-case per R=0.1

Analogamente al caso precedente si riporta la tabella riassuntiva in cui per ogni prova sono riportati larghezza e spessore del provino, ampiezza di tensione voluta, ampiezza di forza effettivamente da applicare, tensione media, forza media da impostare come punto di partenza della prova, frequenza di prova e cicli a rottura nel caso in cui il provino abbia subito cedimento prima di  $10^7$  cicli.

	l [mm]	s [mm]	$\sigma_a$ [MPa]	$F_a$ [kN]	$\sigma_m$ [MPa]	$F_m$ [kN]	f [Hz]	Cicli rottura
test_2 2	11.9	5.9	250	17.55 3	305.560	21.453	20	189667
test_2 3	11.6	5.6	230	14.94 1	281.110	18.261	21	run-out
test_2 4	11.9	5.8	250	17.25 5	305.560	21.090	20	354897
test_2 5	11.6	5.8	230	15.47 4	281.110	18.913	21	406729
test_2 6	11.5	5.8	210	14.00 7	256.670	17.120	26	run-out
test_2 7	11.8	5.8	230	15.74 1	281.110	19.239	20	run-out
test_2 8	11.3	5.9	250	16.66 8	305.560	20.372	20	265321

Tabella 4.6. Riassunto prove eseguite per  $R=0.1$

Si calcolano il valor medio con una probabilità di sopravvivenza del 50% e lo scarto secondo quanto previsto da normativa usando le formule N e N.

	1	2	3	4	5	6	7
250	X		X				X
230		O		X		O	
210					O		

Tabella 4.7. Riassunto andamento delle sette prove eseguite: X provino rotto, O provino non rotto

L'evento meno frequente è la non rottura del provino e quindi si procede secondo normativa calcolando i parametri A, B ed N:

X	O	i	ni	i*ni	i^2*ni
3	0	2	0	0	0
1	2	1	2	2	2
0	1	0	1	0	0
$\sum n_i=4$	$\sum n_i=3$		N=3	A=2	B=2

Tabella 4.8. Calcolo componenti A, B e N per la stima della media e sua deviazione standard

si nota che  $\frac{NB-A^2}{N^2} = 0.22 < 0.3$  di conseguenza tali formule non sono applicabili.

Anche in questo caso si applica il metodo iterativo proposto da Dixon e Mood [29] atto a massimizzare una funzione costo e quindi annullare le due derivate (4.3) (4.4).

Il valore medio  $m_0$  si stima come la media dei punti medi degli intervalli pesati di un fattore  $n_i$ :

$$m_0 = \frac{1}{6} (220 \cdot 2 + 240 \cdot 4) = 233.33 \text{ MPa}$$

Come deviazione standard invece si considera  $s_0 = 10 \text{ MPa}$ .

Da una prima analisi si ottengono i seguenti risultati:

i	$n_i$	$h_i$	$x_i$	$\frac{z}{q}$	$\frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{z_i}{p_i} \right)$	$x \cdot \frac{z}{q}$	$x \cdot \frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{x_{i-1} z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{x_i z_i}{p_i} \right)$
2	2	250	1.667	2.08	0.105	0.99	3.467	0.175	-0.75
1	1	230	0.333	0.6	1.019	-0.992	-0.2	0.339	0.2766
0	0	210	2.333	0.027	2.668		0.063	6.225	
						-0.002			-0.4733

Tabella 4.9. Stima delle derivate  $()$  e  $()$  con  $m_0=233.33 \text{ MPa}$  e  $s_0=10 \text{ MPa}$ .

Come si osserva il valore di -0.002 e -0.4733 sono già vicini allo zero e quindi i valori ipotizzati inizialmente come valore medio e deviazione standard sono accettabili. Da un punto di vista ingegneristico tuttavia il valore 233.33 MPa è poco pratico. Di conseguenza sono stati eseguiti nuovamente i conti considerando il limite di fatica di 235 MPa e la deviazione standard di 9MPa.

i	n <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	x <sub>i</sub>	$\frac{z}{q}$	$\frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{z_i}{p_i} \right)$	$x \cdot \frac{z}{q}$	$x \cdot \frac{z}{p}$	$n_i \left( \frac{x_{i-1}z_{i-1}}{q_{i-1}} - \frac{x_i z_i}{p_i} \right)$
2	2	25 0	1.6666 67		0.10 5	0.748	0	0.175	-0.88222
1	1	23 0	- 0.55556	0.47 9	1.18 5	-1.177	- 0.26611	- 0.65833	0.636111
0	0	21 0	- 2.77778	0.00 8			- 0.02222	0	
						-0.429			-0.24611

Tabella 4.10. Stima delle derivate  $\mu$  e  $\sigma$  con  $m_0=235$  MPa e  $s_0=9$  MPa.

Anche in questo caso i valori sono sufficientemente vicini a zero da poter considerare accettabile questa stima.

I valori considerati rappresentano la media e lo scarto tipo per una probabilità di sopravvivenza del provino del 50 %. Volendo espandere l'intervallo al 10 % e al 90 % è sufficiente moltiplicare per 1,28:

$$\sigma_{D10\%} = 235 + 1.28 \cdot 9 = 246.5 \text{ MPa}$$

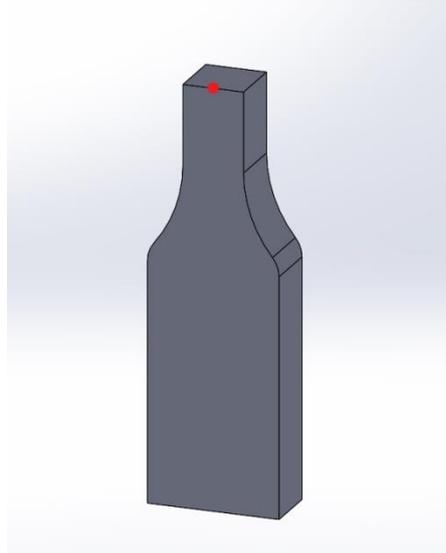
$$\sigma_{D90\%} = 235 - 1.28 \cdot 9 = 223.5 \text{ MPa}$$

#### 4.6 - Analisi superficie di rottura

Sono state analizzate le superfici di rottura dei provini che hanno subito cedimento, per osservare se questo è avvenuto effettivamente per danneggiamento da fatica meccanica o per la presenza di difetti o inclusioni particolari che avrebbero potuto causare un'intensificazione delle tensioni e quindi una rottura anticipata. L'analisi è stata fatta prima con un microscopio ottico ed in seguito con un microscopio elettronico a scansione (SEM) con il quale è stata osservata la morfologia e la composizione superficiale. Si è osservato prima di tutto che l'innesco della rottura di tutti i provini testati a  $R=-1$  è nato nella superficie frontale, quella cioè che ha

subito laminazione a caldo. Invece per i provini testati a  $R=0.1$  la rottura è avvenuta sulla superficie frontale ed in un caso sulla superficie laterale.

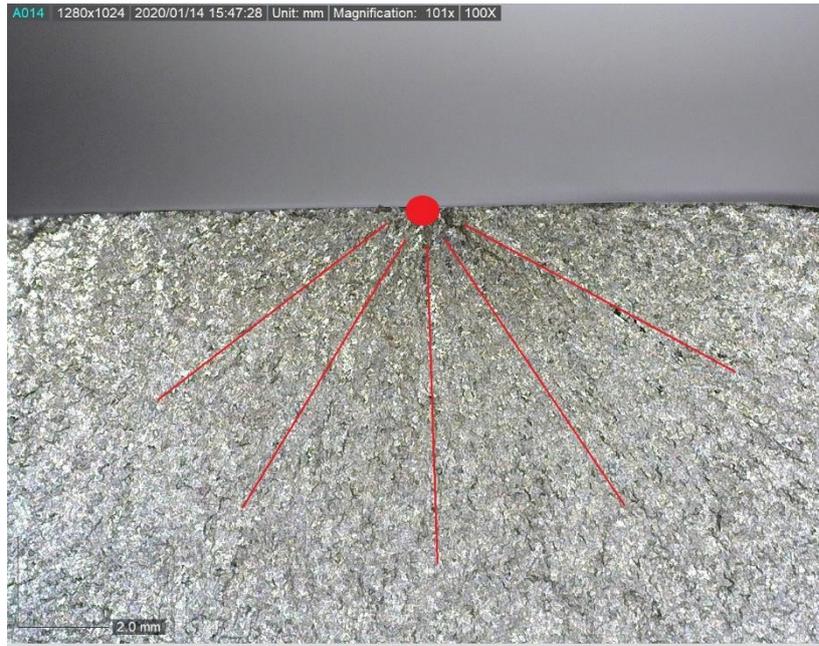
In entrambi i casi comunque la rottura non è iniziata a partire dagli spigoli che sono stati in precedenza opportunamente smussati.



*Figura 4.2. Porzione di provino con indicato in rosso la superficie frontale di rottura.*

Si riportano le immagini delle superfici di frattura dei cinque provini che hanno subito cedimento per  $R=-1$ , ossia i test 13, 17, 19, 21 soggetti ad un'ampiezza di tensione di 280 MPa ed il test 16 soggetto ad un'ampiezza di tensione di 300 MPa. Successivamente i quattro provini che hanno subito cedimento per  $R=0.1$ , ossia i test 22, 24, 28 soggetti ad un'ampiezza di tensione di 250 MPa ed il test 25 soggetto ad un'ampiezza di tensione di 230 MPa.

La zona di innesco della cricca la si riconosce visivamente poiché la propagazione si dirama lungo la sezione del provino in direzione radiale. È quindi possibile vedere le linee di propagazione della frattura che convergono in un unico punto che sarà quindi l'innesco.



*Figura 4.3. Andamento radiale della propagazione a partire dal punto di innesco.*

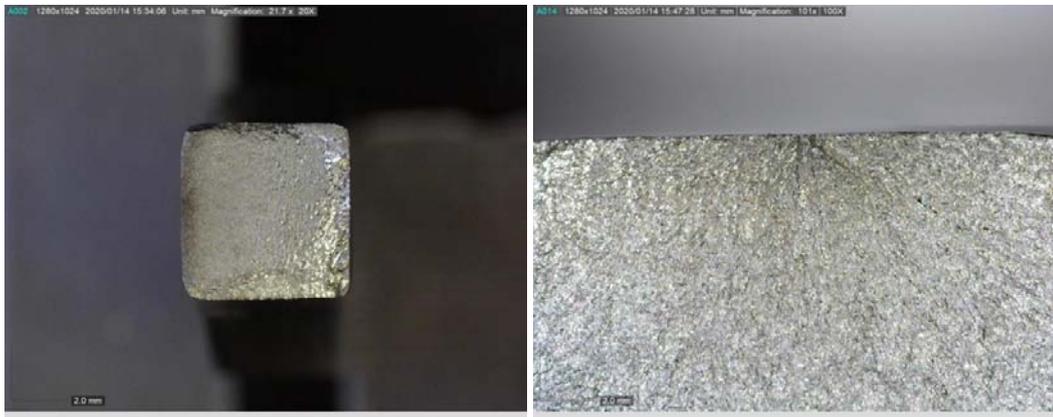
4.5.1 - R=-1



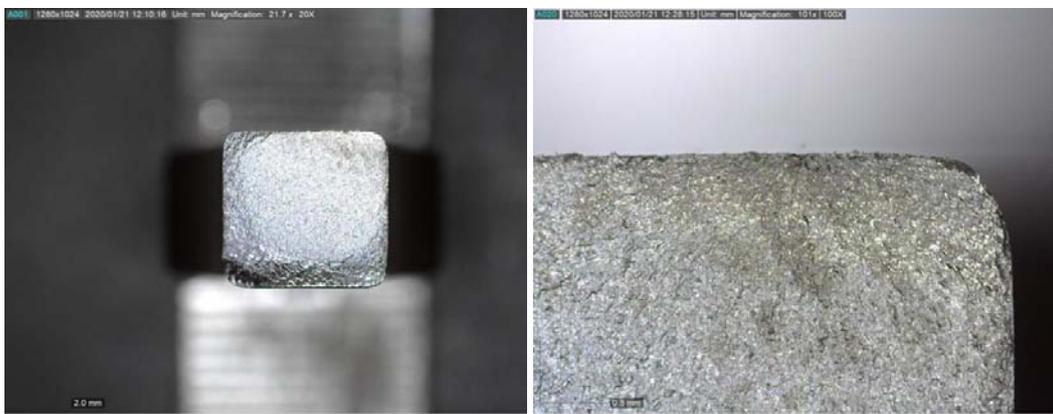
*Figura 4.4. Test\_13, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100).*



*Figura 4.5. Test\_16, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100)*



*Figura 4.6. Test\_17, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100)*



*Figura 4.7. Test\_19, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100)*

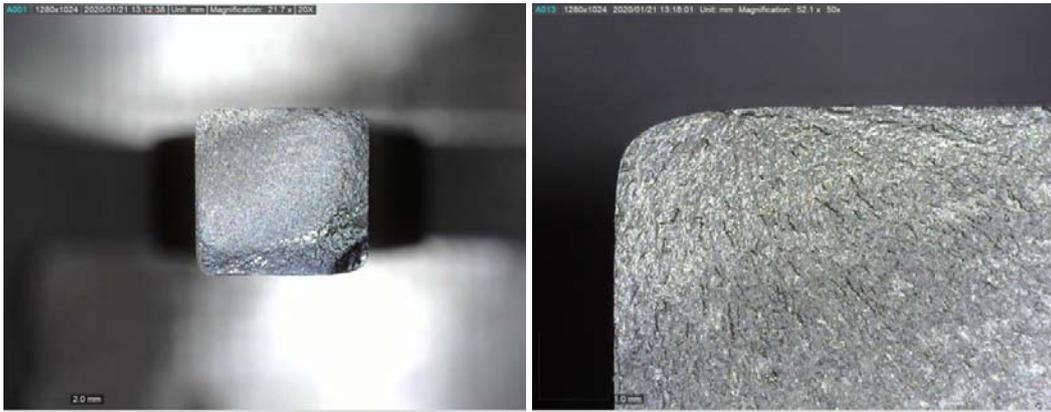
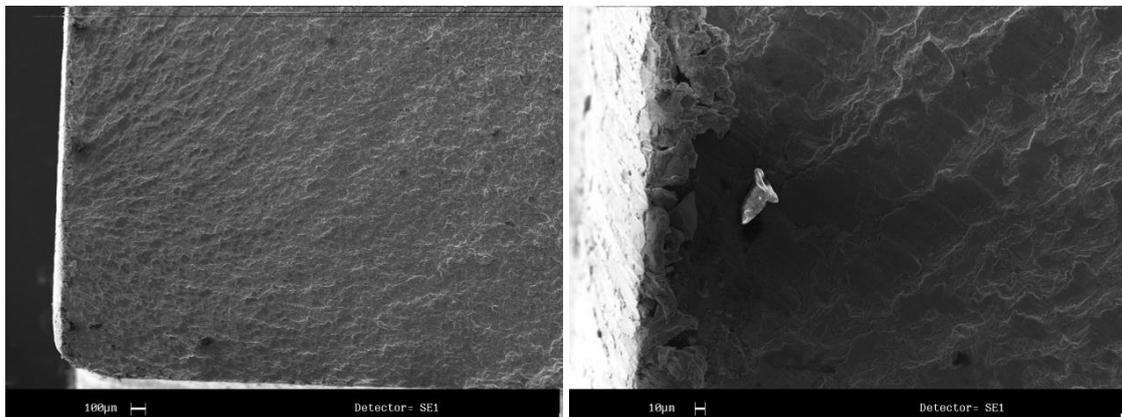


Figura 4.8. Test\_19, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100).

Come si può osservare dalle immagini l'innesco della rottura è sempre avvenuto lungo la superficie del pezzo e non in zone particolari in cui si concentrano le tensioni, quali i raggi di raccordo.

Si riportano ora le immagini ottenute in seguito ad un'analisi eseguita con il SEM. In questo caso si considerano due diverse tipologie di immagini: quelle ottenute con gli elettroni secondari (SE1) con i quali si osserva la morfologia della superficie e quelle ottenute con gli elettroni elettrodifusi (QBSD) con i quali si osserva la diversa composizione.



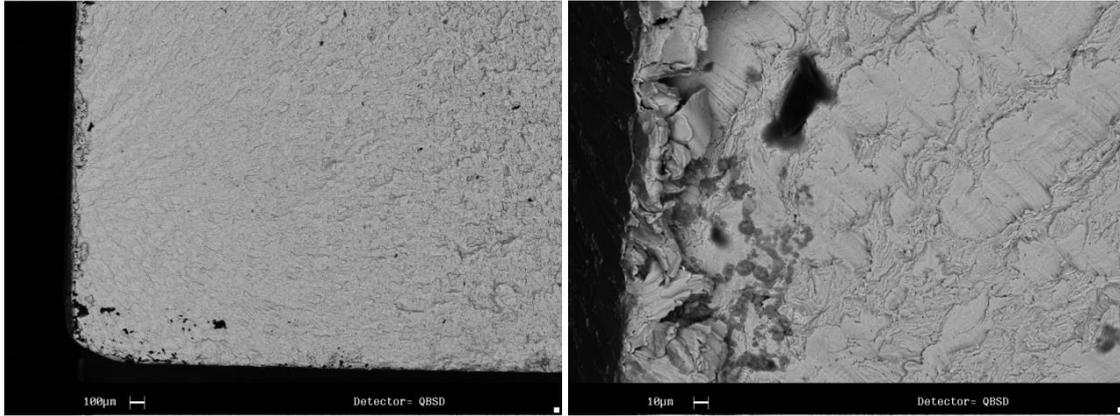


Figura 4.9. Test\_13; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)

Si nota nella foto relativa alla composizione chimica la presenza di diverse tonalità che fa capire la presenza diversi elementi presenti. Osservando la composizione chimica presente si conclude che la macchia nera consiste in detriti con cui la superficie è entrata in contatto dopo la rottura mentre le diffuse macchie grigio scuro sono ossidi e questi potrebbero essere la causa dell'innesco della rottura.

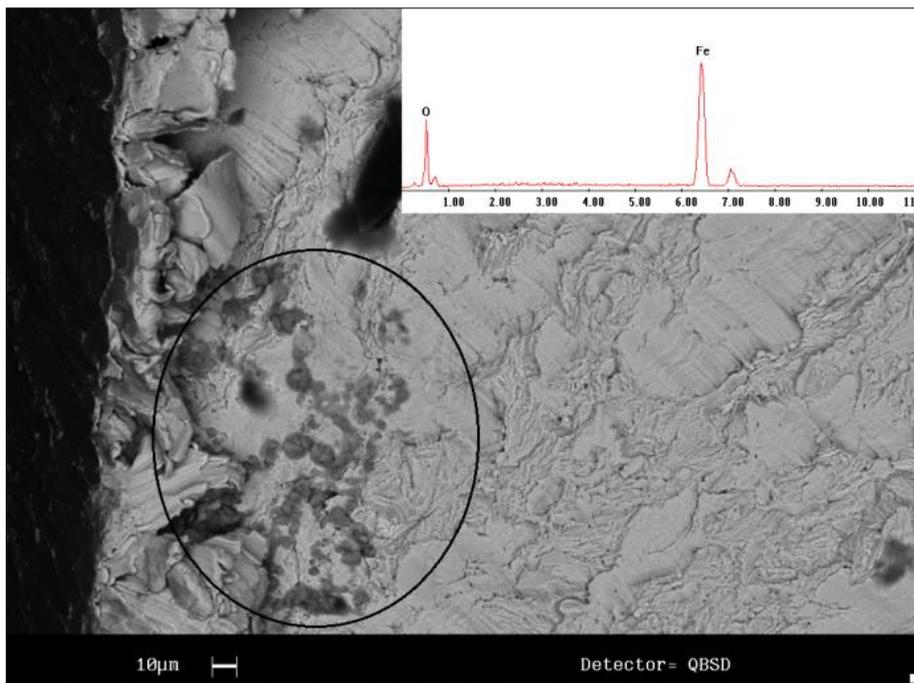
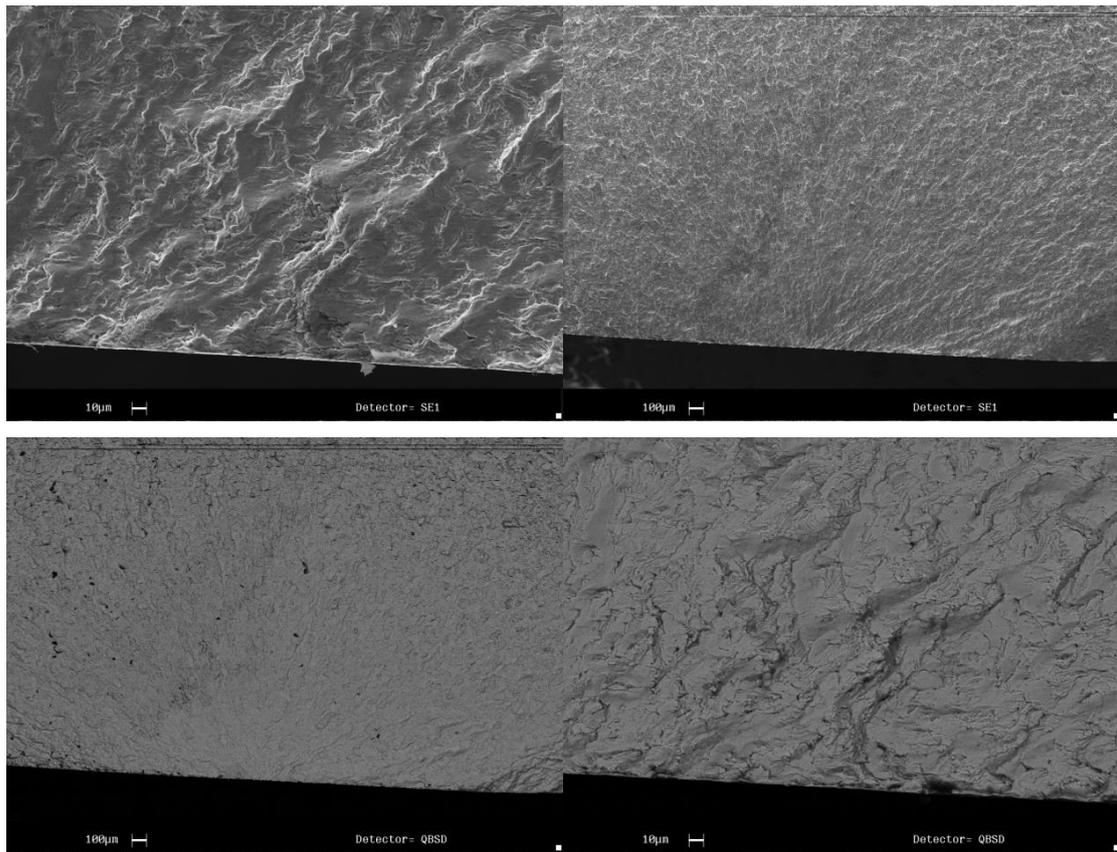
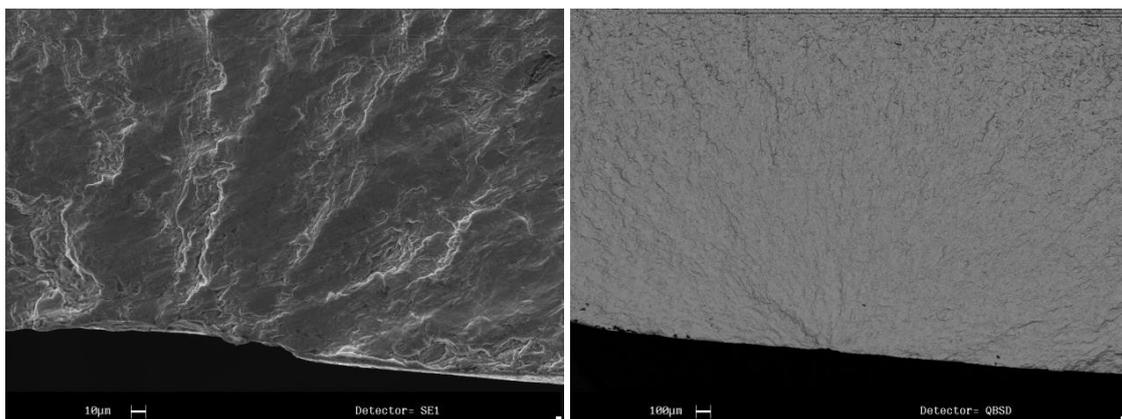


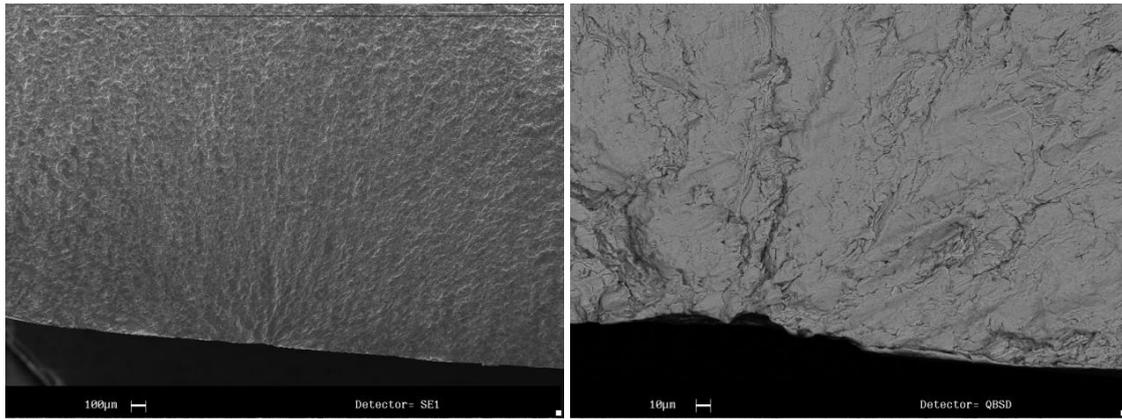
Figura 4.10. Test\_13; Elementi presenti nelle macchie grigio scuro, si evidenzia la presenza di Ossigeno e Ferro

In figura 9 è riportata parte della composizione chimica presente nelle macchie grigio scuro evidenziate nella foto. Si nota la presenza importante di ferro (Fe) ed ossigeno (O) indicatori di una zona di ossidazione.

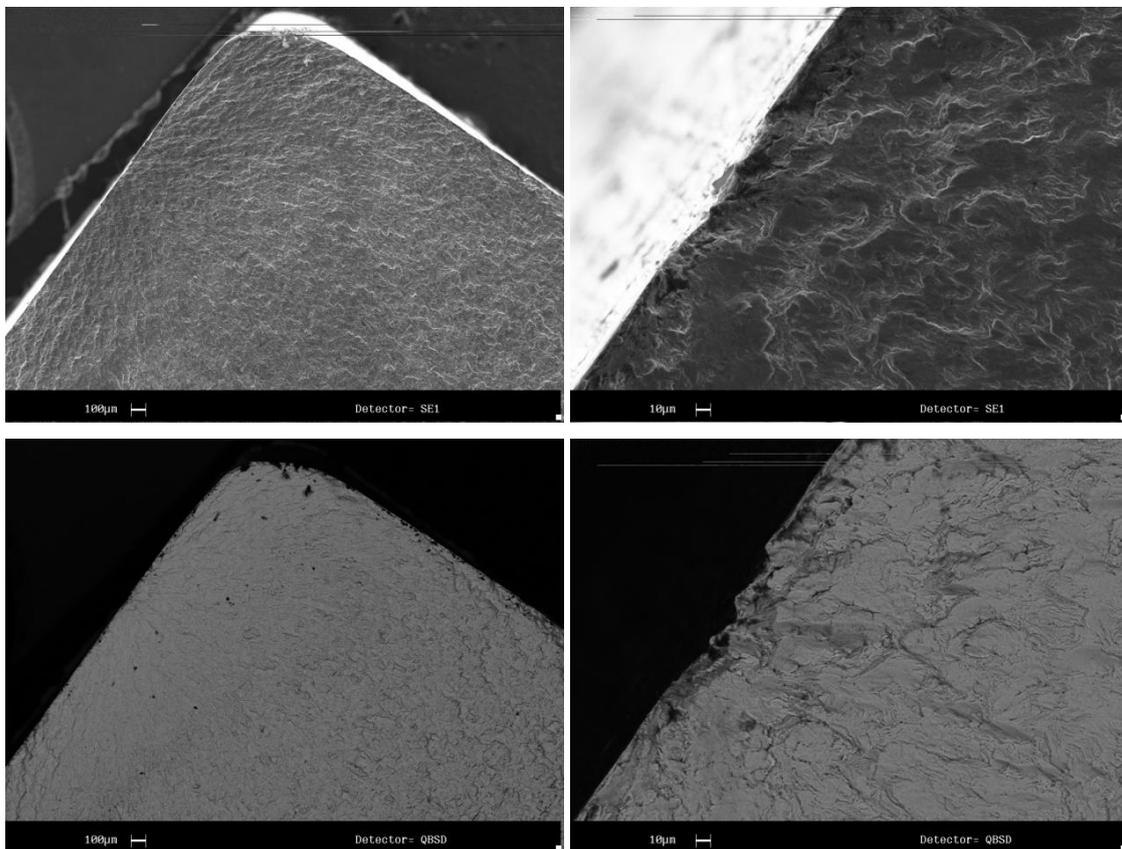


*Figura 4.11. Test\_16; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)*

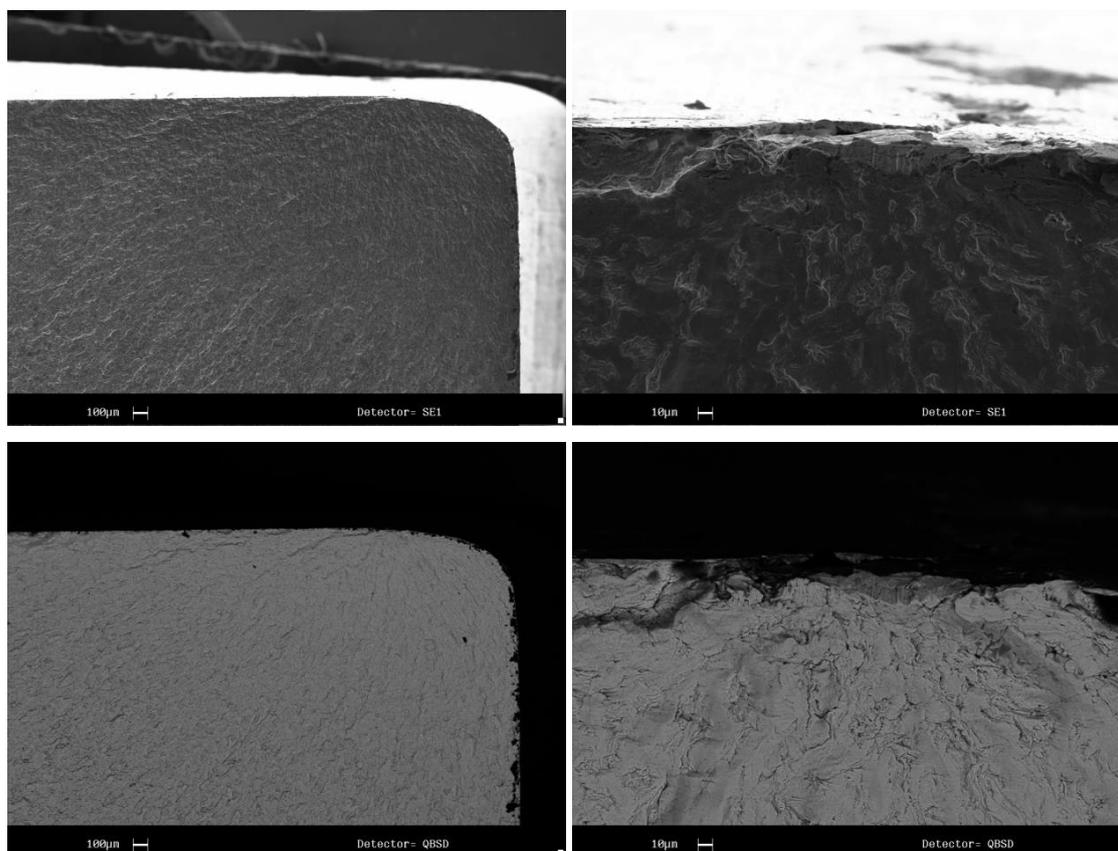




*Figura 4.12. Test\_17; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)*



*Figura 4.13. Test\_19; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)*



*Figura 4.14. Test\_21; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)*

Dalle immagini relative ai provini 17, 19, 21 non si osservano elementi particolari sulla superficie di rottura. Questo significa che il cedimento non è avvenuto per la presenza di inclusioni ma per rottura a fatica propriamente detta. Nel provino 16 invece sono presenti delle tracce di ossidazione in corrispondenza della zona di innesco della cricca, queste potrebbero aver indebolito il materiale e causato la rottura. Lo strato di ossidazione però è anche possibile che sia nato successivamente quando la superficie di rottura è entrata a contatto con l'umidità dell'aria.

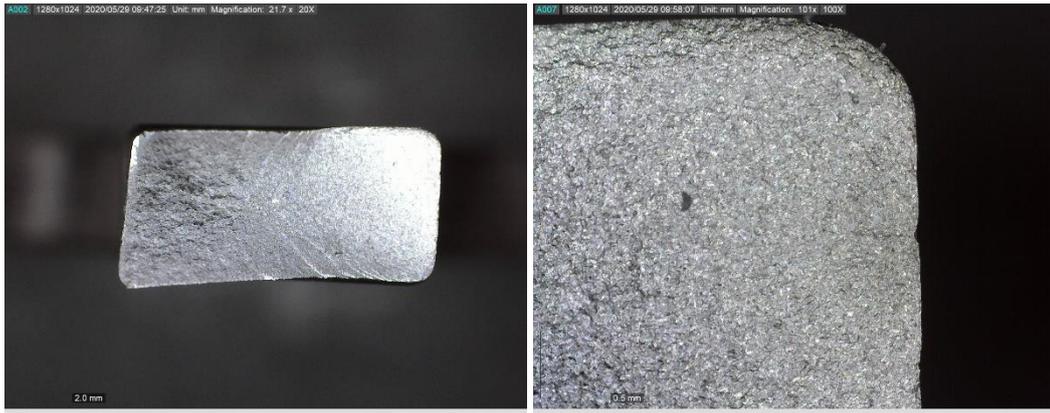
4.6.2 - R = 0.1



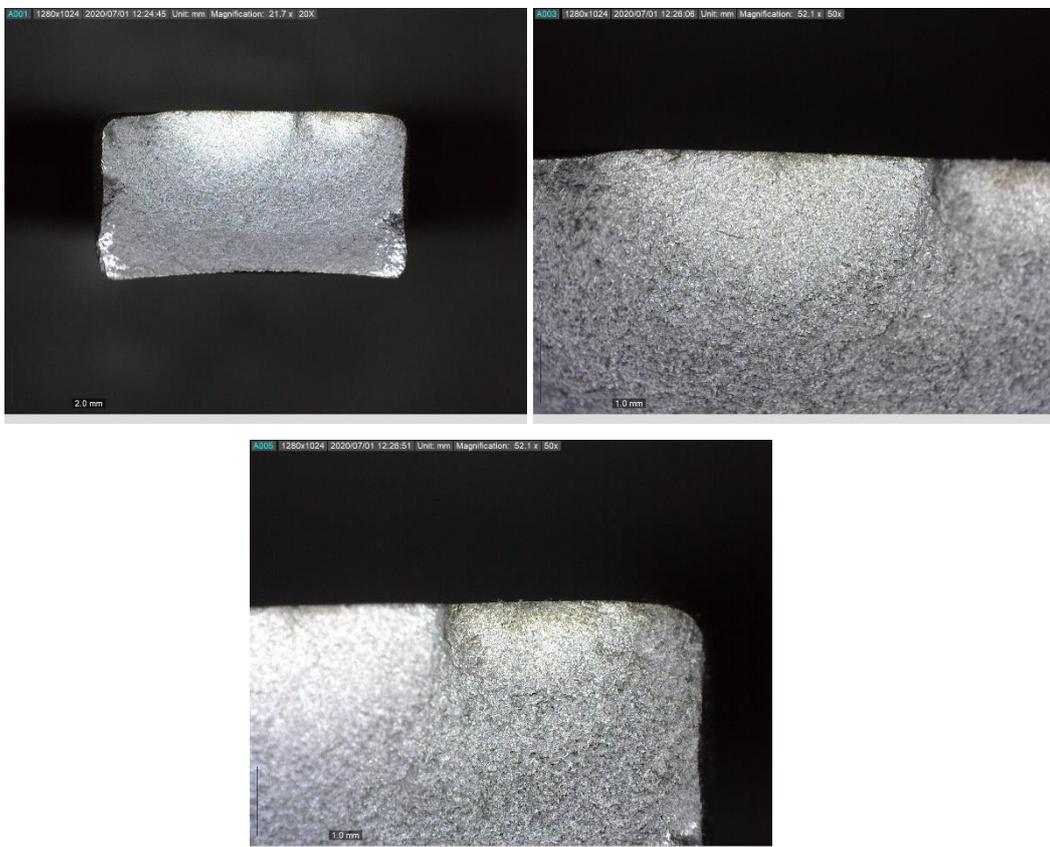
*Figura 4.15. Test\_22, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100).*



*Figura 4.16. Test\_24, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100).*

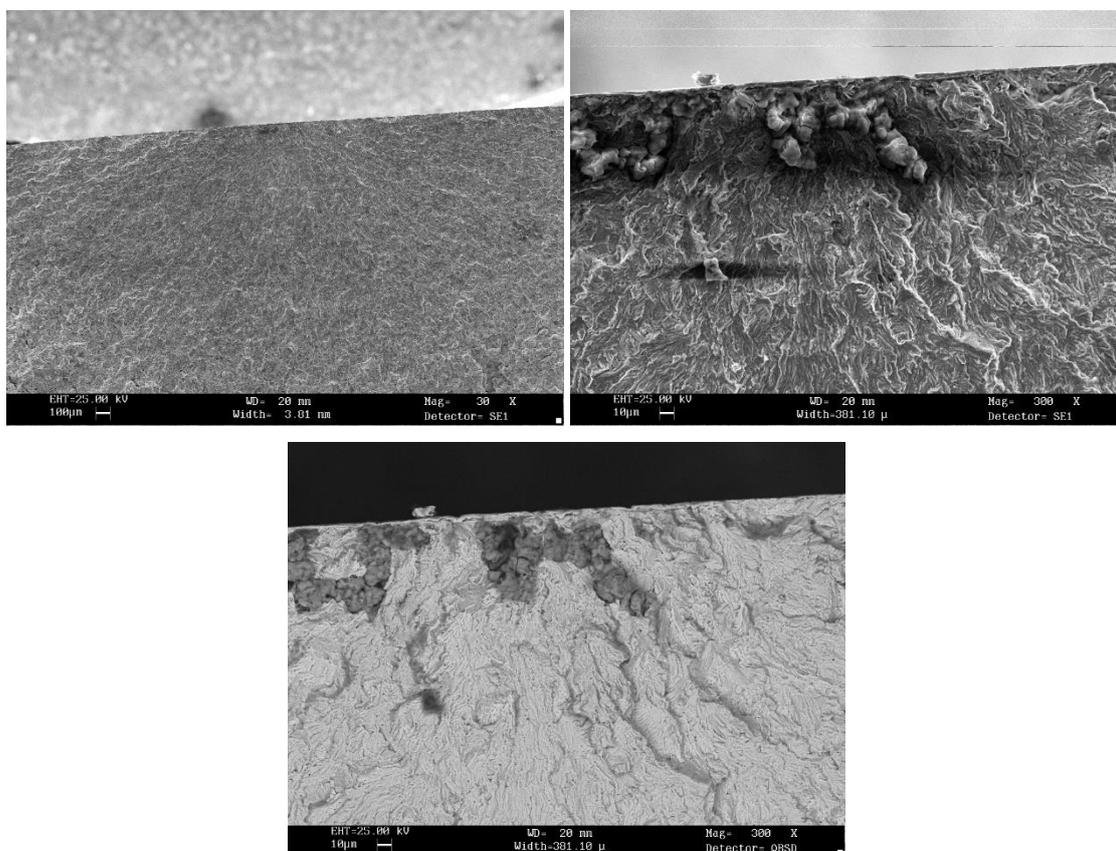


*Figura 4.17. Test\_25, a sinistra superficie di frattura (x20); a destra ingrandimento sulla zona di innesco (x100).*



*Figura 4.18. Test\_28, in alto a sinistra superfici di frattura (x20); in alto a destra ingrandimento sulla zona di innesco sinistra (x100); in basso ingrandimento sulla zona di innesco destra (x100).*

Si riportano ora le immagini ottenute utilizzando il microscopio elettronico a scansione (SEM). Analogamente al caso precedente viene analizzata prima la morfologia della zona di innesco ed in seguito la composizione chimica, concentrandosi nell'individuazione di eventuali inclusioni o difetti.



*Figura 4.19. Test\_22; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)*

Si nota la presenza di macchie grigie in corrispondenza del punto di innesco della cricca. Eseguendo l'analisi chimica (fig. 19) si nota la presenza di ossidi (Fe e O) ed una piccola quantità di Calcio e Potassio. Nessuno di questi però è la causa del cedimento del provino. Questo infatti risultava largamente ossidato e di conseguenza, probabilmente, l'ossidazione è successiva alla prova. Analogamente Calcio e Potassio si sono depositati successivamente.

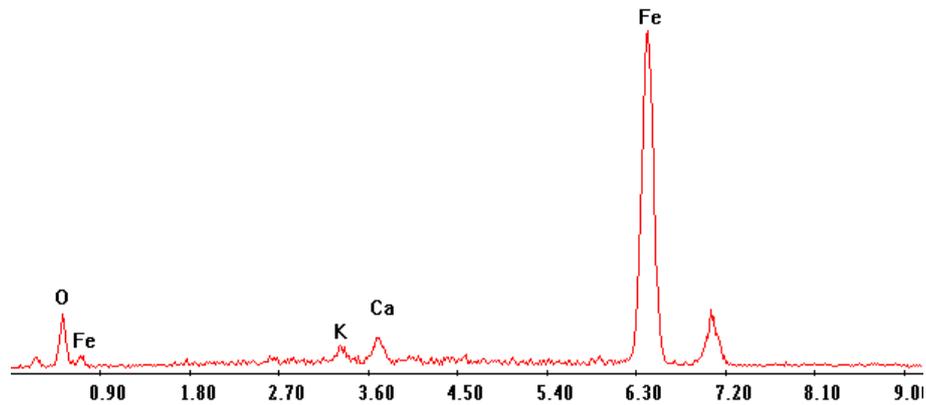


Figura 4.20. Elementi presenti nella zona grigia scuro nell'innesco del provino 22.

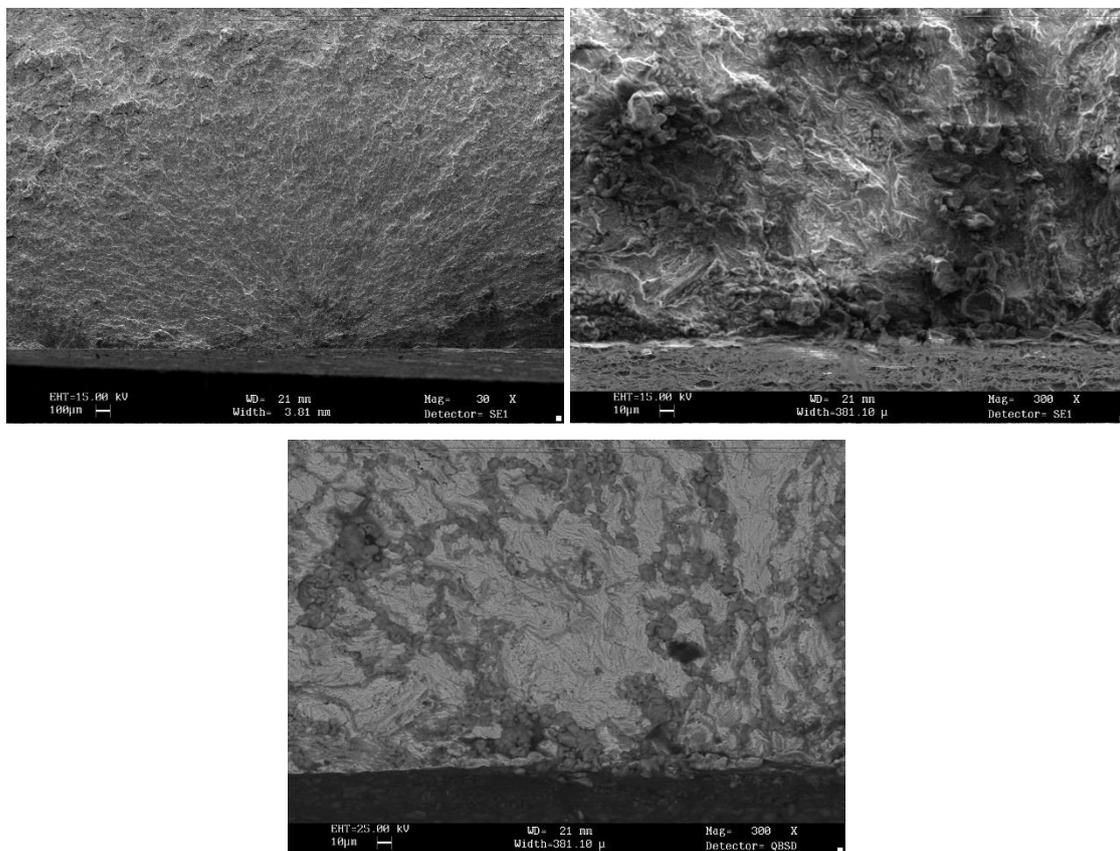


Figura 4.21. Test\_24; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)

Anche in questo caso si nota la presenza di macchie grigie in corrispondenza del punto di innesco della cricca. Eseguendo l'analisi chimica (fig. 21) si nota la presenza di ossidi (Fe e O) ed una piccola quantità di Calcio e Potassio. Il ragionamento è quindi analogo a quello già fatto per il provino 22.

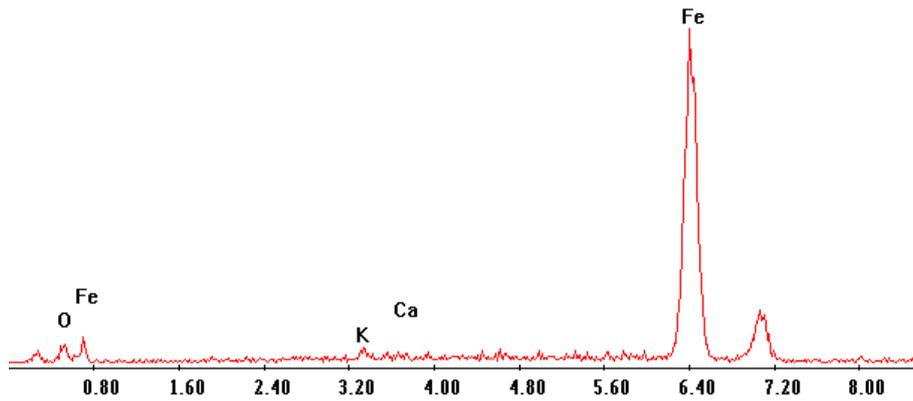


Figura 4.22. Elementi presenti nella zona grigia scuro nell'innesco del provino 22.

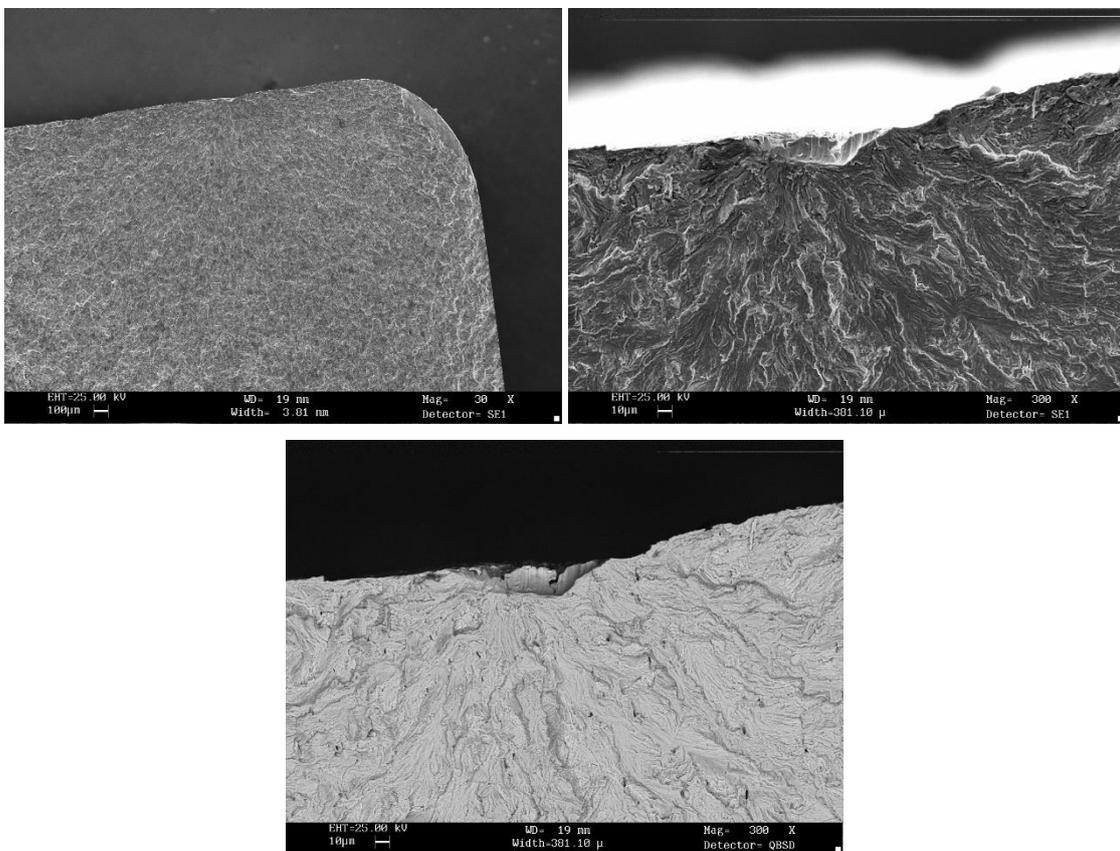
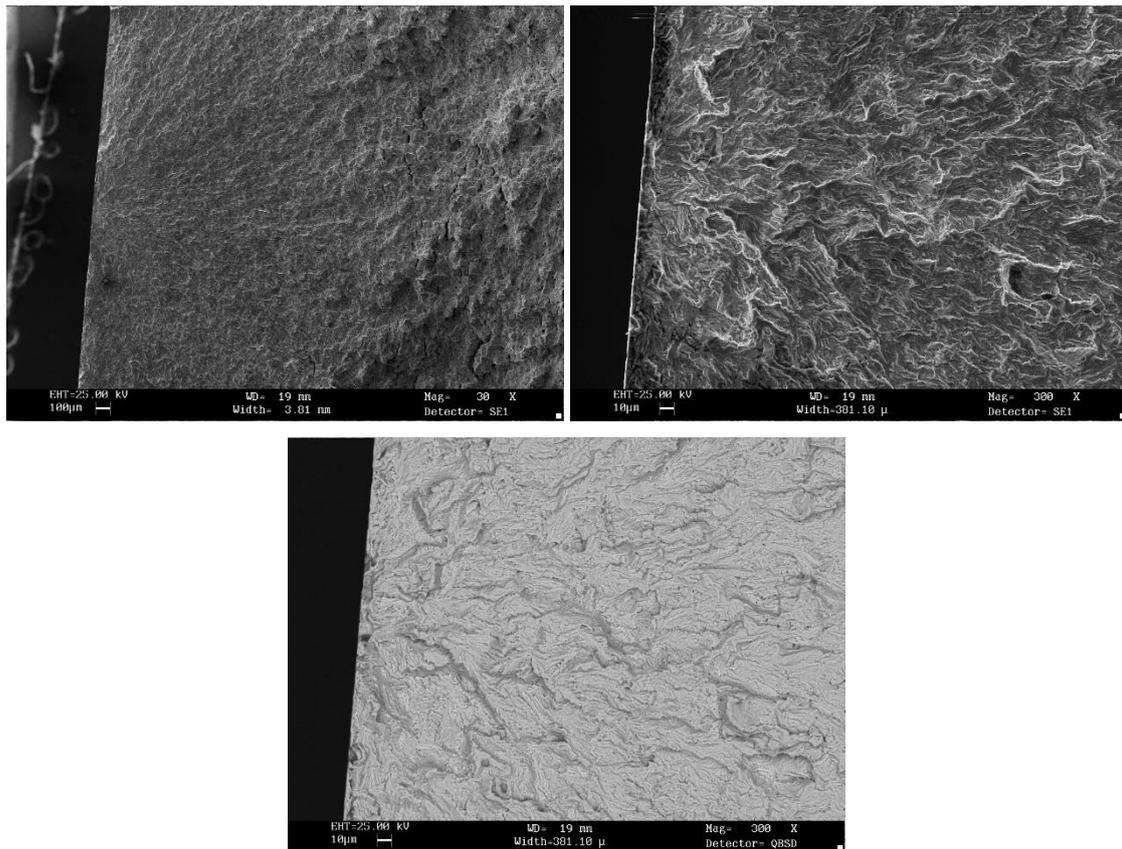


Figura 4.23. Test\_25; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso)

Osservando la morfologia della superficie di rottura si nota che l'innesco è in corrispondenza di un difetto superficiale dovuto alla lavorazione che può aver intensificato le tensioni e portato ad un cedimento del provino. Il test 22 è stato eseguito imponendo un'ampiezza di tensione di 230 MPa ed è giunto a rottura a circa 400 mila cicli. Negli altri casi in cui veniva applicata tale tensione il provino è resistito per i 10 milioni di cicli previsti. Una possibile causa di cedimento del provino 22 quindi potrebbe essere proprio questo difetto superficiale.



*Figura 4.24. Test\_28; morfologia dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in alto), composizione dell'area di frattura a due diversi ingrandimenti (in basso).*

## 4.7 – Misura di durezza

### 4.7.1 – Introduzione

Malgrado non sia previsto come un metodo da normativa, la stima del limite di fatica attraverso misura di durezza è largamente usato che è presente in letteratura da diversi anni. Per questo viene inserito questo paragrafo in questo capitolo. La durezza è definita come la resistenza di un materiale ad una deformazione permanente. Essa viene misurata attraverso prove di durezza in termini di penetrabilità: un elemento penetrante imprime sulla superficie del materiale una forza nota,

si misura l'impronta rilasciata sulla superficie e sulla base dell'area di impronta si determina un indice di durezza. Ci sono diverse scale di durezza, in questo caso è stata utilizzata la scala Vickers, il cui elemento penetrante è un diamante di forma piramidale con un angolo al vertice di  $136^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ .

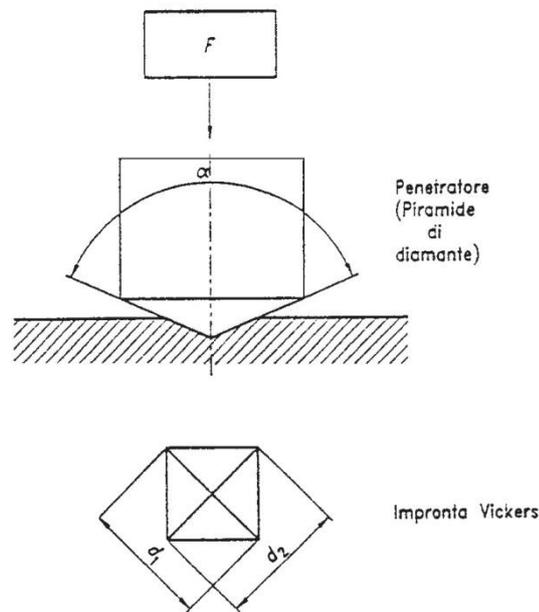


Figura 4.25. Schema della prova di durezza Vickers

Essendo  $P$  il carico applicato [N],  $S$  la superficie dell'impronta [ $\text{mm}^2$ ] e  $d$  il diametro medio dell'impronta [mm] tra  $d_1$  e  $d_2$ , l'indice di durezza in scala Vickers è calcolato nel seguente modo:

$$\text{Durezza Vickers} = HV = \frac{P}{S} = 0.189 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (4.5)$$

Nota la durezza HV è possibile stimare la tensione di rottura del materiale e a partire da quest'ultima anche il limite a fatica del materiale

$$\sigma_R = 3.27 \cdot HV \quad (4.6)$$

$$\sigma_{al} = 0.5 \cdot \sigma_R \quad (4.7)$$

Secondo normativa UNI 6507 il carico normale  $P$  da applicare è pari a 30 kg, ossia 294 N, tale carico deve essere raggiunto in un tempo graduale generalmente di  $5 \div 15$  s e mantenuto per un tempo prefissato di  $5 \div 15$  s. Sono state eseguite 3 prove di durezza per ogni provino lungo la stessa superficie ad un'opportuna distanza l'una dall'altra ed in seguito ne sono stati mediati i risultati. Sono stati testati 4 provini: provino vergine; provino testato a 260 MPa rimasto integro; provino testato a 280 MPa rimasto integro; provino testato a 280 MPa rotto a 645516 cicli.

#### 4.7.2 – Risultati per R=-1

Si riportano le foto delle tre impronte presenti in ogni provino ed una tabella con il carico applicato P, i due diametri con il valore medio, la profondità dell'impronta h, la durezza stimata HV e il limite a fatica calcolato per ogni impronta. Si riporta infine la media del limite di fatica per ogni provino.

Provino vergine



Figura 4.26. Impronta della prova di durezza su provino vergine.

P[kg]	d1	d2	d [mm]	h [mm]	HV	Sal [MPa]
30	0.543	0.561	0.552	0.0730735	182.54667	298.4638
30	0.558	0.544	0.551	0.0729412	183.20987	299.54814
30	0.568	0.558	0.563	0.0745297	175.48309	286.91485

Tabella 4.11. Riassunto prove di durezza su provino vergine.

Calcolando il valor medio delle tre misure eseguite si ottiene:

$$\sigma_{al} = 295 \text{ MPa}$$



Figura 4.27. Impronta della prova di durezza su provino precedentemente testato a 260 MPa integro.

P[kg]	d1	d2	d [mm]	h [mm]	HV	Sal [MPa]
30	0.565	0.562	0.5635	0.0743973	175.17181	286.40591
30	0.563	0.567	0.565	0.0750592	174.24293	284.88719

30	0.578	0.561	0.5695	0.074265	171.50019	280.40281
----	-------	-------	--------	----------	-----------	-----------

Tabella 4.12. Riassunto prove di durezza su provino vergine.

Calcolando il valor medio delle tre misure eseguite si ottiene:

$$\sigma_{al} = 284 \text{ MPa}$$

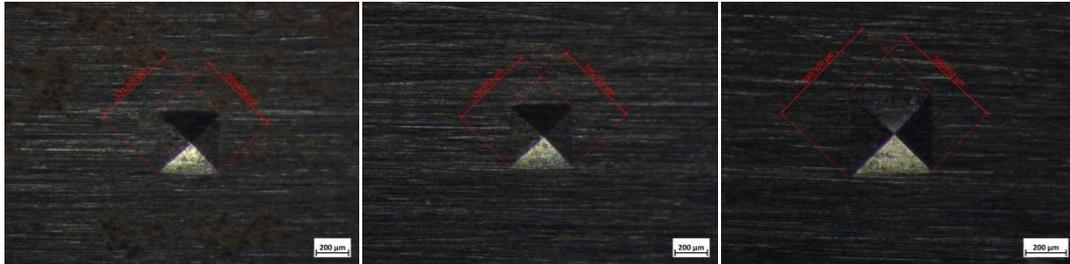


Figura 4.28. Impronta della prova di durezza su provino precedentemente testato a 280 MPa integro.

P[kg]	d1	d2	d [mm]	h [mm]	HV	Sal [MPa]
30	0.545	0.539	0.542	0.0721469	189.34485	309.578827
30	0.586	0.561	0.5735	0.0775745	169.1162	276.504994
30	0.538	0.54	0.539	0.0712202	191.45845	313.034564

Tabella 4.13. Riassunto prove di durezza su provino vergine.

Calcolando il valor medio delle tre misure eseguite si ottiene:

$$\sigma_{al} = 300 \text{ MPa}$$



Figura 4.29. Impronta della prova di durezza su provino precedentemente testato a 280 MPa e che ha subito cedimento a 645516 cicli.

P[kg]	d1	d2	d [mm]	h [mm]	HV	Sal [MPa]
30	0.553	0.584	0.5685	0.0732059	172.10406	281.39015
30	0.546	0.547	0.5465	0.0722793	186.23947	304.50154
30	0.553	0.57	0.5615	0.0732059	176.42192	288.44984

Tabella 4.14. Riassunto prove di durezza su provino vergine.

Calcolando il valor medio delle tre misure eseguite si ottiene:

$$\sigma_{al} = 291.4 \text{ MPa}$$

In conclusione, attraverso il calcolo dell'indice di durezza Vickers è stato possibile stimare il l'ampiezza del limite di fatica dell'acciaio C45 per ogni provino.

	$\sigma_{al}$ [MPa]
vergine	295
260_run_out	284
280_run_out	300
280_rotto	291

Mediando poi tali valori è stata calcolata la stima del limite di fatica del materiale:

$$\sigma_{al} = 292 \text{ MPa.}$$

#### 4.8 – Conclusioni

Lo stair-case è il metodo a cui fa riferimento la normativa per la stima del limite di fatica ed è infatti quello più largamente usato. Per ottenere una stima affidabile, quindi con un buon livello di confidenza, è necessario usare almeno 15 provini. In questo caso però si ha fatto riferimento allo stair case breve che prevede un numero inferiore di provini ma non consente di eseguire un'analisi statistica altrettanto accurata. Per il limite di fatica a R=-1 sono stati utilizzati dieci provini per lo stair-case breve e quattro di questi sono stati utilizzati per misure di durezza, anch'esse finalizzate alla stima del limite di fatica. Le ampiezze di tensione usate sono state 260 MPa, 280 MPa e 300 MPa con una frequenza di prova compresa tra 24 Hz e 30 Hz e dall'analisi della superficie di rottura con il microscopio elettronico a scansione è stato evidenziato che la rottura è avvenuta per fatica meccanica e non per altre cause quali la presenza di inclusioni. Invece, per il limite di fatica a R=0.1, sono stati utilizzati sette provini per lo stair-case breve e non sono state eseguite le prove di durezza. Le ampiezze di tensione usate sono state 210 MPa, 230 MPa e 250 MPa con una frequenza di prova compresa tra 20 Hz e 26 Hz e dall'analisi della superficie di rottura con il microscopio elettronico a scansione è stato evidenziato che la rottura è avvenuta per fatica meccanica escludendo il test\_25. Quest'ultimo è stato testato a 230 MPa e presenta in corrispondenza dell'innesco della cricca un intaglio dovuto alla lavorazione che potrebbe aver causato un cedimento prematuro del provino. Dall'analisi statistica effettuata sui dati sperimentali sono state calcolate le stime del limite di fatica e della deviazione standard per R=-1 e R=0.1. Risulta, per R=-1,  $\sigma_{a,-1,50\%} = 275 \text{ MPa}$  e  $s = 7 \text{ MPa}$  e, per R=0.1,  $\sigma_{a,0.1,50\%} = 235 \text{ MPa}$  e  $s = 9 \text{ MPa}$ .



## Capitolo 5 – DISCUSSIONE E CONFRONTI

### 5.1 – Confronto dei risultati

Il limite di fatica del materiale è stato calcolato utilizzando tre metodi alternativi basati sul monitoraggio di un parametro di riferimento durante delle prove a gradini. Come parametro di riferimento sono state usate l'energia meccanica specifica dissipata in un ciclo di carico-scarico, il calore specifico dissipato durante un ciclo di carico-scarico ed il range di temperatura termoplastica in fase di stabilizzazione. Il primo parametro è stato calcolato attraverso un estensometro e la cella di carico contenuta nella macchina, gli altri due parametri invece hanno richiesto l'utilizzo di una termocamera differenziale. Infine, applicando lo stair-case, è stata determinata la stima del limite di fatica secondo quanto proposto da normativa. e di conseguenza questa stima rappresenta il riferimento rispetto al quale analizzare i risultati dei metodi alternativi.

La stima del limite di fatica avviene considerando l'intersezione delle due rette dei punti sperimentali a basso e ad alto carico del grafico di sintesi delle prove a gradini rispetto al parametro di riferimento considerato. I punti centrali di transizione tra un comportamento e l'altro della curva non vengono considerati.

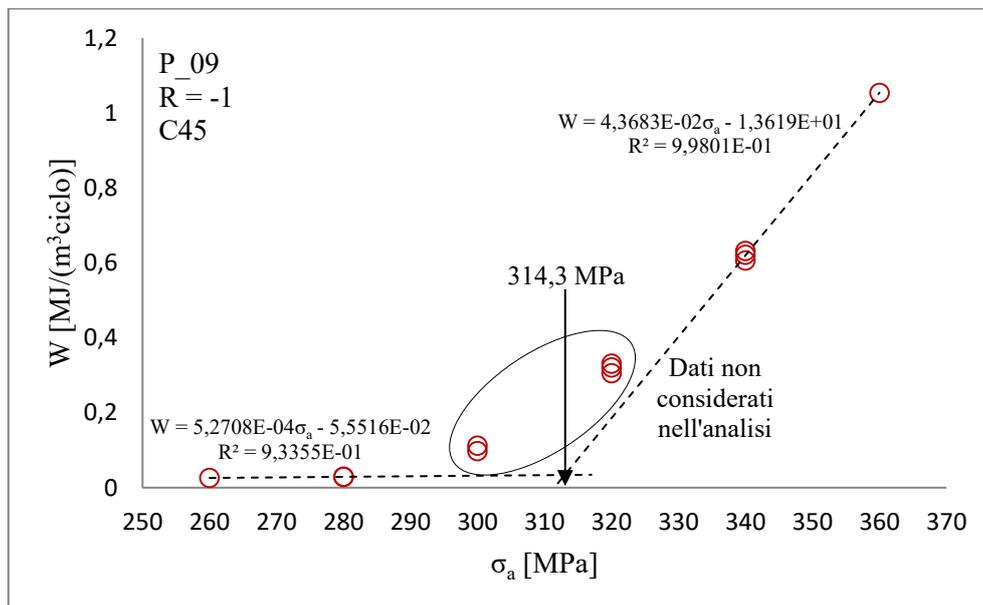


Figura 5.1. Prova a gradini rispetto all'energia meccanica specifica dissipata in un ciclo di carico-scarico.

Come già specificato questi valori non devono essere confusi con la reale stima del limite di fatica. Il limite di fatica è infatti quel valore di ampiezza di tensione a partire dal quale nascono delle micro-cricche interne al materiale che cominciano a propagarsi. I parametri di riferimento dei metodi alternativi non sono legati a questo fenomeno fisico. Tuttavia, l'evidenza sperimentale consente di sfruttare il loro comportamento per stimare il limite di fatica.

Si riporta il confronto delle stime ottenute per  $R=-1$  e  $R=0.1$  secondo i metodi alternativi e secondo il metodo previsto da normativa. Nel caso di  $R=-1$  si aggiunge anche la stima ottenuta attraverso prove di durezza Vickers.

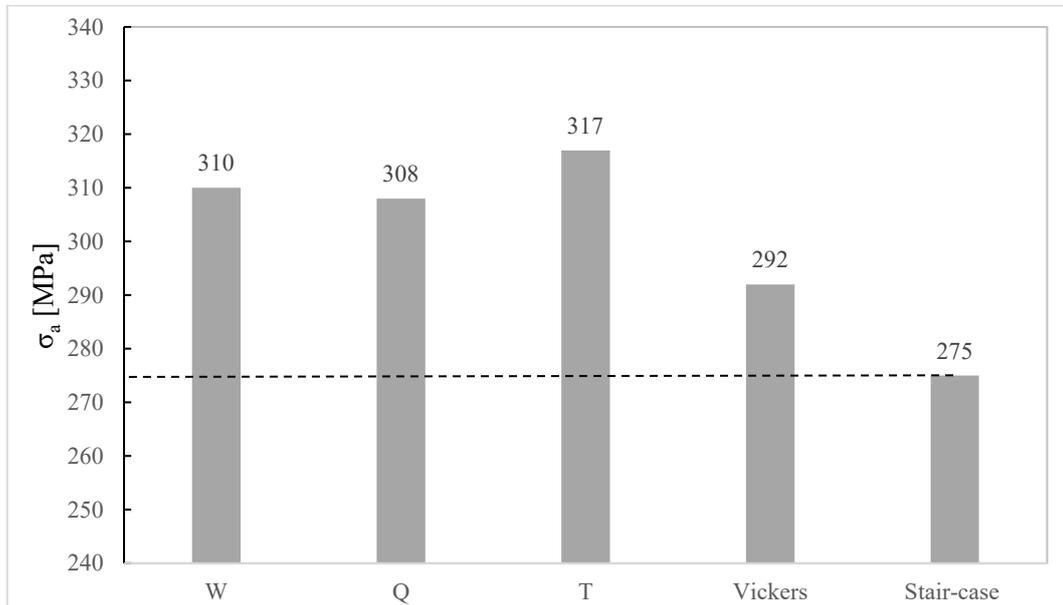


Figura 5.2. Diagramma in cui si osservano i differenti valori di limite di fatica al variare del metodo utilizzato per  $R=-1$ .

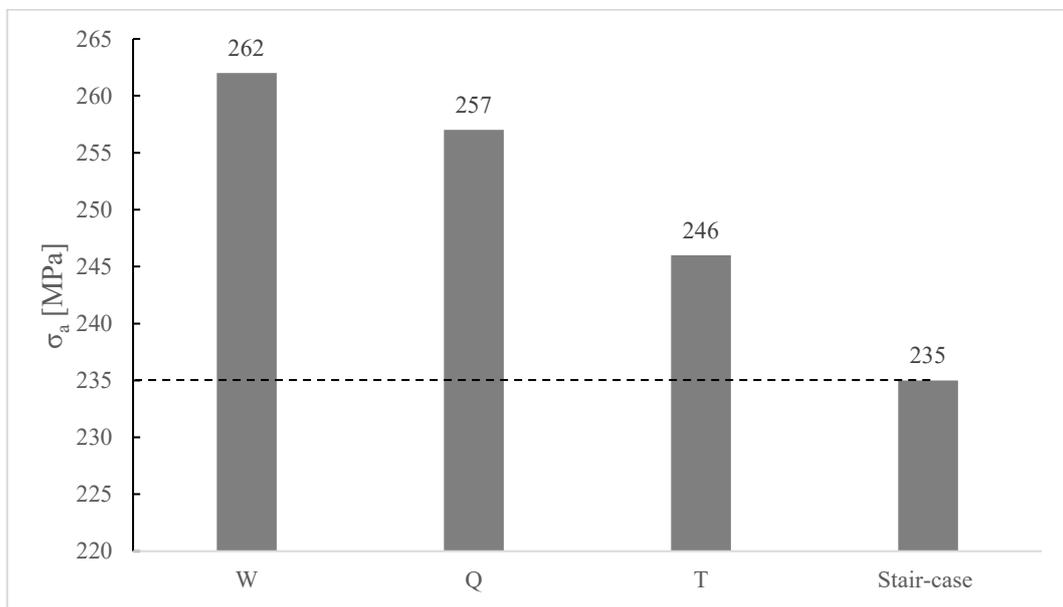


Figura 5.3. Diagramma in cui si osservano i differenti valori di limite di fatica al variare del metodo utilizzato per  $R=0.1$ .

Osservando i diagrammi sopra riportati si può osservare come i metodi energetici portino ad una sovrastima del limite di fatica del materiale e quindi non in vantaggio di sicurezza. Nelle seguenti tabelle viene evidenziata la differenza percentuale rispetto al limite di fatica stimato secondo normativa per ogni metodo.

	W	Q	$\Delta T_D$	Vickers
$\Delta_{-1}$ [%]	12.7	12	15	6

Tabella 5.1. Differenza percentuale del limite di fatica rispetto a quello stimato secondo stair-case per  $R=-1$ .

	W	Q	$\Delta T_D$
$\Delta_{0.1}$ [%]	11.5	9.4	4.7

Tabella 5.2. Differenza percentuale del limite di fatica rispetto a quello stimato secondo stair-case per  $R=0.1$ .



## BIBLIOGRAFIA

- [1]. Dengel, D.; Harig, H. Estimation of the fatigue limit by progressively-increasing load tests. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1980, 3, 113–128.
- [2]. Curti, G.; Geraci, A.; Risitano, A. A new method for rapid determination of the fatigue limit. *Ing. Automotoristica* 1989, 42, 634–636.
- [3]. Luong, M.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Eng. Des.* 1995, 158, 363–376.
- [4]. Luong, M.P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mech. Mater.* 1998, 28, 155–163.
- [5]. La Rosa, G.; Risitano, A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *Int. J. Fatigue* 2000, 22, 65–73
- [6]. Curà, F.; Curti, G.; Sesana, R. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels. *Int. J. Fatigue* 2005, 27, 453–459.
- [7]. De Finis, R.; Palumbo, D.; Ancona, F.; Galietti, U. Fatigue limit evaluation of various martensitic stainless steels with new robust thermographic data analysis. *Int. J. Fatigue* 2015, 74, 88–96.
- [8]. Meneghetti, G.; Ricotta, M.; Atzori, B. A synthesis of the push-pull fatigue behaviour of plain and notched stainless steel specimens by using the specific heat. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 2013, 36, 1306–1322.
- [9]. Germain, P.; Nguyen, Q.S.; Suquet, P. Continuum Thermodynamics. *Trans. ASME J. Appl. Mech.* 1983, 50, 1010–1020.
- [10]. Feltner, C.E.; Morrow, J.D. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Trans. ASME Series D J. Basic Eng.* 1961, 83, 15–22.
- [11]. Halford, G.R. The energy required for fatigue. *J. Mat.* 1966, 1, 3–18.
- [12]. Cugy P, Galtier A. Microplasticity and temperature increase in low carbon steels. Fatigue 2002. In: Blom AF, editors. Proceedings of the 8th international fatigue congress, vol. I, EMAS; 2002. p. 549–56.
- [13]. Miller KJ. The three thresholds for fatigue crack propagation. In: Piascik RS, Newman JC, Dowling NE, editors. ASTM STP 1296
- [14]. Akiniwa Y, Tanaka K, Akimura H. Microstructural effects on crack closure and propagation thresholds of small fatigue cracks. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2001;24:817–29.
- [15]. Murakami Y. Metal fatigue: effects of defects and non metallic inclusions. Elsevier; 2002
- [16]. Blotny R, Kaleta J. A method for determining the heat energy of the fatigue process in metals under uniaxial stress. *Int J Fatigue* 1986;1:29-33.
- [17]. Charkaluk E, Bignonnet A, Costantinescu A, Dang Van K. Fatigue design of structures under thermomechanical loadings. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2002;25:1199–206.
- [18]. Kaleta J, Blotny R, Harig H. Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions. *J Test Eval* 1990;19: 326–33.
- [19]. Shiozawa, D.; Inagawa, T.; Akai, A.; Sakagami, T. Accuracy improvement of dissipated energy measurement and fatigue limit estimation by using phase information. In Proceedings of the AITA workshop, Pisa, Italy, 29 September–2 October 2015.
- [20]. Shiozawa, D.; Inagawa, T.; Washio, T.; Sakagami, T. Fatigue limit estimation of stainless steel with new dissipated energy data analysis. *Procedia Struct. Integr.* 2016, 2, 2091–2096
- [21]. Meneghetti, G. Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation. *Int. J. Fatigue* 2007, 29, 81–94
- [22]. Ellyn, F. (1997) *Fatigue damage, crack growth and life prediction*. Chapman & Hall, London.
- [23]. Meneghetti, G. and Quaresimin, M. (2011) *Fatigue strength assessment of a short fiber composite based on the specific heat dissipation*. *Compos Part B- Eng.* 42, 217-225.
- [24]. Prakash, R. V., Pravin, T., Kathirevel, T., (2011) *Thermo-mechanical measurement of elasto-plastic transitions during cyclic loading*. *Theor. Appl. Fract. Mec.* 56,1-6.

- [25].Audenino A. L., Goglio L., Rossetto M. (1997) *Metodi sperimentali per la progettazione*.
- [26].Krapez, J.C.; Pacou, D.; Gardette, G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals. In Proceedings of the Q.I.R.T, Reims, France, 18–21 July 2000.
- [27].Ricotta M., Meneghetti G., Atzori B., Risitano G., Risitano A., (2019) *Comparison of Experimental thermal methods for the fatigue limit evaluation of a stainless steel*. *Metals*
- [28].Meneghetti, G.; Ricotta, M.; Atzori, B. A two-parameter, heat energy-based approach to analyse the mean stress influence on axial fatigue behaviour of plain steel specimens. (2015) *Int. Journal of Fatigue*
- [29].Dixon, W.J.; Mood, A.M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data. *J. Am. Stat. Assoc.* 1948, 43, 109–126.