



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**STIMA DELLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA DI UN
ACCIAIO INOSSIDABILE AISI 304L MEDIANTE
TECNICHE TERMOGRAFICHE**

Relatore: Prof. Giovanni Meneghetti

Correlatore: Prof. Mauro Ricotta

Laureando: Marco Veronese 1233430

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Capitolo 1	13
INTRODUZIONE ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA SECONDO METODI TERMICI ED ENERGETICI	13
1.1 Introduzione	13
1.1.1 Fenomeno della fatica nei materiali.....	13
1.1.2 Fatica e rilevazione di temperatura	14
1.2 Approccio termografico.....	14
1.2.1 Descrizione del fenomeno fisico.....	14
1.2.2 Determinazione del limite di fatica.....	15
1.2.3 Limiti dei metodi termografici	16
1.3 Metodi energetici	17
1.3.1 Principi generali	17
1.4 Energia meccanica.....	18
1.4.1 Introduzione all'approccio basato su W	18
1.4.2 Tipologie di deformazioni	18
1.4.3 Energia totale plastica	20
1.4.4 Discussione e considerazioni.....	21
1.5 Variazione di energia interna.....	22
1.5.1 Introduzione all'approccio basato su ΔU	22
1.5.2 Discussione e considerazioni.....	23
1.6 Energia termica dissipata.....	23
1.6.1 Introduzione all'approccio basato su Q	23
1.6.2 Bilancio energetico su un volume di controllo	24
1.6.3 Stima di Q nel caso monodimensionale	26
1.6.4 Stima di Q nel caso generale	28
1.6.5 Cenni sull'effetto termoelastico	29
1.3.2 Risultati sperimentali con Q come parametro di danneggiamento	30
1.6.7 Effetto della tensione media: modello Meneghetti-Ricotta.....	34
1.6.8 Conventional lock-in e phase lock-in infrared method.....	39
1.7 Confronto dei metodi termici sperimentali per la valutazione del limite di fatica	44
1.8 Stima della dissipazione intrinseca mediante l'uso della seconda armonica: parametro Beta	49
1.8.1 Introduzione al modello e richiami teorici.....	49
1.8.2 Second Harmonic Approach: trazione-compressione.....	51

1.8.3	Materiale elastico-perfettamente plastico: trazione-compressione	52
1.8.4	Materiale elasto-plastico: trazione-compressione	54
1.8.6	Materiale elasto-plastico: trazione-trazione	61
1.8	Obbiettivi del presente lavoro di tesi	64
	Capitolo 2	67
	PROCEDURA E APPARATO SPERIMENTALE PER PROVE DI RESISTENZA A FATICA CON MONITORAGGIO DELLA DEFORMAZIONE E TEMPERATURA DEL PROVINO	67
2.1	Introduzione	67
2.2	Proprietà del materiale	68
2.3	Geometria dei provini	68
2.4	Apparato sperimentale	70
2.4.1	Macchina di prova	70
2.4.2	Termocoppia e incollaggio sulla superficie del provino	71
2.4.3	Estensometro MTS	74
2.4.4	Termocamera a raggi infrarossi	76
2.5	Procedura di esecuzione di una prova a fatica su macchina Schenck	77
2.5.1	Preparazione, inserimento del provino e impostazione dei parametri su macchina Schenck per eseguire prove di fatica	78
2.5.2	Utilizzo del software Agilent per l'acquisizione della temperatura mediante termocoppia	85
2.5.3	Preparazione della termocamera e procedura di acquisizione di un filmato termografico	89
2.5.4	Procedura di esecuzione del gradiente e di acquisizione della temperatura e dei cicli di isteresi	94
	Capitolo 3	97
	RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO TRADIZIONALE: CURVE DI WOEHLER E CONFRONTO TRA AISI 304L LAMINATO A CALDO E TRAFILATO A FREDDO	97
3.1	Introduzione	97
3.2	Risultati sperimentali con approccio in ampiezza di tensione: curve di Woehler	98
3.2.1	Risultati delle prove di fatica a R=-1	98
3.2.2	Risultati delle prove di fatica a R=0.1	100
3.2.3	Confronto dei risultati delle prove di fatica per R=-1 e R=0.1	101
3.2.4	Confronto dei risultati delle prove di fatica per R=-1 tra barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo di AISI 304L	103
3.2.5	Confronto dei risultati delle prove di fatica per R=0.1 tra barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo di AISI 304L	105

3.2.6	Confronto curve statiche di trazione e caratteristiche meccanica barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo.....	107
3.2.7	Confronto AISI 304L laminato a caldo e trafilato a freddo: microstruttura, durezza e analisi mediante XRD.....	111
3.2.8	Conclusioni.....	127
Capitolo 4		129
RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO ENERGETICO: STIMA DELLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA CON GRADIENTE DI RAFFREDDAMENTO		129
4.1	Introduzione.....	129
4.2	Energia dissipata Q: gradiente di raffreddamento	130
4.2.1	Analisi di un gradiente di temperatura tramite termocoppia.....	130
4.2.2	Analisi di un gradiente di temperatura tramite termocamera	131
4.2.3	Risultati prove di fatica a R=-1 ad ampiezza costante in termini energetici tramite Q	132
4.2.4	Risultati prove di fatica a R=0.1 ad ampiezza costante in termini energetici tramite Q	139
4.2.5	Confronto prove a R=-1 ad ampiezza costante tramite Q per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo.....	152
4.2.6	Confronto prove a R=0.1 ad ampiezza costante tramite Q per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo.....	153
4.2.7	Prove di fatica a gradini per R=-1 elaborati in termini di Q.....	155
4.2.8	Prove di fatica a gradini per R=0.1 elaborati in termini di Q.....	157
4.3	Confronto di risultati mediante Q: sintesi energetica per diversi rapporti ciclo	159
4.3.1	Richiamo teorico dell'equazione Meneghetti-Ricotta.....	159
4.3.2	Costante termoelastica Km: calcolo dai dati delle prove di fatica.....	160
4.3.3	Costante termoelastica Km: calcolo con rampe in controllo in forza.....	161
4.3.4	Costante h: calcolo da dati di prove a fatica	164
4.3.5	Curva Q: sintesi per diversi R.....	165
4.4	Conclusioni.....	167
Capitolo 5		169
RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO ENERGETICO: CONFRONTO MODELLO Q-GRADIENTE E MODELLO Q-SECONDA ARMONICA		169
5.1	Introduzione.....	169
5.2	Analisi di un filmato termografico	170
5.2.1	Compensazione del movimento ed esportazione di un filmato termografico in formato .asc	170
5.3	Calcolo del parametro β per un materiale elasto-plastico	175

5.3.1 Best fit dei punti di un ciclo di isteresi: uso dell'applicazione CURVE-FITTING su MATLAB.....	175
5.4 Q con Metodo Seconda Armonica per prove a R=-1.....	178
5.4.1 Energia dissipata Q: prove di fatica ad ampiezza costante R=-1	178
5.4.2 Energia dissipata Q: prove di fatica a gradini per R=-1	188
5.5 Q con Metodo Seconda Armonica per prove a R=0.1.....	191
5.5.1 Energia dissipata Q: prove di fatica ad ampiezza costante R=0.1	191
5.5.2 Energia dissipata Q: prove di fatica a gradini per R=0.1	201
5.6 Conclusioni.....	203
Capitolo 6	207
CONCLUSIONI DEL LAVORO DI TESI.....	207
6.1 Conclusioni.....	207
BIBLIOGRAFIA.....	211
APPENDICE 1	215
RIASSUNTO DELLE PROVE A FATICA TRAMITE Q-GRADIENTE	215
A.1.1 Prove di fatica a R=0.1	215
A.1.1 Prove di fatica a R=-1	221
APPENDICE 2	225
CODICI MATLAB IMPIEGATI PER IL CALCOLO DELLA FFT SU FILMATI TERMOGRAFICI.....	225
A.2.1 Importazione della matrice del primo frame.....	225
A.2.2 Importazione della matrice completa.....	227
A.2.3 Calcolo della FFT e grafici di prima e seconda armonica per i filmati termografici.....	228
APPENDICE A.3	229
SCHEDE PROVINI.....	229

Capitolo 1

INTRODUZIONE ALL'ANALISI DELLA RESISTENZA A FATICA SECONDO METODI TERMICI ED ENERGETICI

1.1 Introduzione

1.1.1 Fenomeno della fatica nei materiali

Il fenomeno di danneggiamento per fatica di un materiale metallico viene definito come un progressivo danno a causa di sollecitazioni ripetute nel tempo. La sua pericolosità consiste nel fatto che essa si manifesti anche per tensioni inferiori a quella di snervamento del materiale, per tanto un componente verificato staticamente non è detto che lo sia anche a fatica e dunque esso potrebbe cedere in esercizio; inoltre la rottura tipica è fragile anche se il materiale di cui è fatto il manufatto risulta essere classificato come uno di tipo duttile, riducendo quindi la presenza di segni premonitori che avvertano dell'imminente cedimento; infine è un fenomeno che avviene nel tempo, dunque si deve monitorare adeguatamente una struttura in esercizio per prevenire cedimenti inaspettati.

La natura fisica del fenomeno viene discretizzata in tre fasi distinte: la prima è rappresentata dall'innesco di una cricca, tipicamente dalla superficie e se il componente, com'è solito essere, risulta intagliato, è proprio in corrispondenza dell'intaglio che si manifesterà tale fessura; la seconda fase è quella di propagazione della cricca per effetto dell'azione ciclica dei carichi che agisce sulla struttura meccanica, provocando una diminuzione della sezione resistente; l'ultima fase è quella della rottura per schianto in cui la cricca ha ridotto notevolmente la sezione di resistenza e quest'ultima non sopregge più le sollecitazioni, provocando la rottura del pezzo.

Storicamente si attribuisce la scoperta della rottura per fatica al tedesco A. Woehler attorno alla metà dell'800, poiché si accorse che gli assili ferroviari si rompevano dopo un certo numero di ore di esercizio, nonostante fossero soggetti a carichi ben al di sotto di quelli previsti per il cedimento. Dai propri studi effettuati con ampiezza di tensione costante, egli ricavò un diagramma che prende il suo nome e che riporta in ascisse il numero di cicli e in ordinata l'ampiezza di tensione e notò che i due parametri erano collegati tra di loro. Inoltre, notò anche che per molti materiali, sotto un certo valore di tensione il pezzo risultava essere ancora intatto, nonostante fossero stati raggiunti un numero di cicli avente come ordine di grandezza il milione; questo valore di tensione fu definito come limite di fatica, il quale ancora oggi è calcolato solitamente a due o a dieci milioni di cicli, dipendentemente dalla normativa di riferimento.

Per concludere l'introduzione alla fatica, fenomeno che causa almeno il 90% delle rotture di componenti meccanici, si vanno a citare alcuni esempi recenti in cui il cedimento è stato causa non solo di danni economici ingenti, ma ha provocato anche molte vittime, per sottolineare come la fatica sia un argomento di fondamentale importanza nella progettazione. Tra questi eventi si ricordano il crollo del ponte Morandi o la strage di Viareggio, dovuta al deragliamento di un treno. In ambito sportivo si ricorda la rottura del piantone dello sterzo, che ha causato la morte del celebre pilota di Formula 1 Ayrton Senna. Prendendo a riferimento l'ambiente aeronautico sono molti gli incidenti dovuti alla fatica, in particolare uno recente è quello del febbraio 2021 che ha visto coinvolta la rottura di una paletta della turbina durante il volo, fortunatamente senza danni alla salute dei passeggeri.

Negli ultimi decenni i ricercatori e gli ingegneri si sono concentrati nel cercare approcci alternativi a quelli proposti da Woehler, permettendo numerosi passi avanti nella progettazione e nell'affidabilità di un componente o di una struttura.

1.1.2 Fatica e rilevazione di temperatura

L'approccio iniziale basato sulla correlazione tra ampiezza di tensione σ_a e numero di cicli è stato ampiamente discusso nella letteratura, mostrando tra i suoi limiti, quello di avere un'elevata dispersione statistica, richiedendo quindi molti provini, tempo e denaro per la caratterizzazione a fatica di un materiale. Un ulteriore limite è che l'ampiezza di tensione o il range di tensione $\Delta\sigma$ sono valori nominali e non locali, mentre la fatica è un fenomeno ben localizzato. Sono stati quindi proposti numerosi approcci alternativi a partire dalla metà del XX secolo, tra cui ad esempio quello basato sulla fatica in controllo di deformazione con l'equazione di Manson-Coffin [25,26], utilizzata non solo nel campo della *Low Cycle Fatigue* (LCF) ma anche nella *High Cycle Fatigue* (HCF), oppure approcci basati sulla Meccanica della frattura e sulle sue estensioni non convenzionali, adattabili a componenti criccati o con intagli acuti.

Ulteriori interessanti approcci sono stati sviluppati a partire dagli anni '80 del secolo scorso, sull'evidenza che un materiale caricato ciclicamente manifesta un incremento di temperatura superficiale, proporzionale alla tensione applicata. Da questa osservazione sono nati dei criteri basati dapprima sull'utilizzo della temperatura come indice di danneggiamento, quale il Metodo di Risitano [1,2,27] o sul criterio ideato da Luong [2,28], i quali però hanno evidenziato alcuni limiti di applicabilità. Sono stati dunque ideati e sperimentati metodi energetici basati sulle tre forme di energia presenti nell'equazione di Primo Principio della Termodinamica: energia meccanica fornita dalla macchina di prova, variazione dell'energia interna e infine energia termica dissipata dal materiale. Si procede ora con l'analisi dei metodi e criteri sopra elencati.

1.2 Approccio termografico

1.2.1 Descrizione del fenomeno fisico

L'approccio termografico è nato nella scuola Catanese a metà anni '80, ad opera di A. Risitano e colleghi [27]. Tale metodologia si basa sull'uso della temperatura superficiale, rilevata durante una prova, come parametro di danneggiamento per fatica. I provini utilizzati, ovvero materiale, geometria e caratteristiche meccaniche sono riassunte in [1]; sono state inoltre utilizzate due termocamere per l'analisi della temperatura del provino.

Sperimentalmente si sono osservati diversi aspetti: innanzitutto si è registrato un forte aumento della temperatura al di sopra del limite di fatica e l'area in cui ciò si è manifestato, è apparsa evidente già dai primi cicli; al contrario, applicando una σ_a inferiore al limite di fatica, l'aumento di temperatura ΔT è risultato trascurabile. Inoltre, l'uso della termocamera permette di mappare sulla superficie l'intera distribuzione di temperatura, e non quindi limitata a pochi punti. Se come sopra detto, se si carica il materiale al sopra del limite di fatica si registra un andamento della temperatura riportato nella seguente Figura 1.1.

Sono per tanto distinguibili tre fasi con tre andamenti distinti:

- nella *prima fase* il provino manifesta un incremento della temperatura monotono, per un certo numero di cicli. In particolare, la durata di tale periodo è inversamente proporzionale alla tensione applicata;
- nella *seconda fase* il provino si stabilizza ad una certa temperatura detta stabilizzata ΔT_{stat} ; si osserva come tale temperatura aumenti all'aumentare della tensione applicata, viceversa la durata di tale zona decresce all'aumentare del carico;
- infine, nella *terza fase* la temperatura torna a salire finché non si raggiunge il cedimento del pezzo.

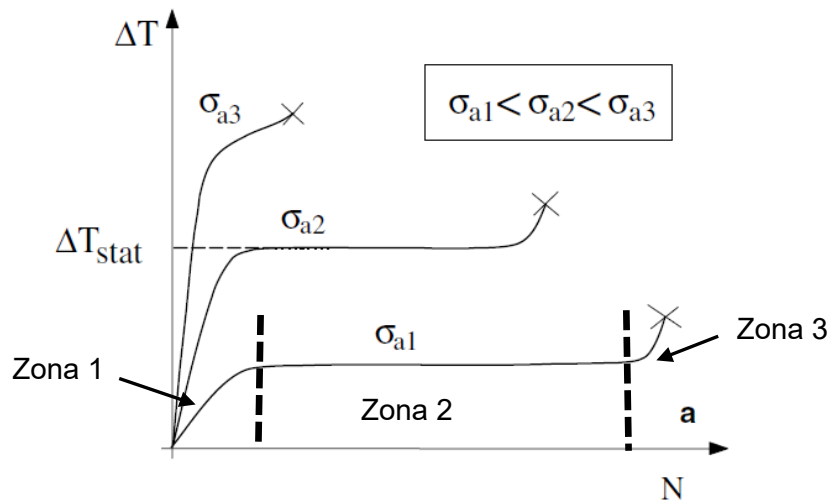


Figura 1.1 – Andamento della temperatura superficiale al variare del numero di cicli e dell'ampiezza in una prova a tensione costante. [3]

Si nota poi come per elevate ampiezze e dunque per un numero ridotto di cicli (zona di fatica oligociclica), la fase due tende a scomparire. Inoltre, si deve tener presente che la temperatura rappresentata in Figura 1.1 è una temperatura media, poiché infatti la temperatura reale oscilla attorno a tale valore a causa dell'effetto termoelastico che successivamente verrà trattato più nel dettaglio, nel paragrafo 1.6.5.

1.2.2 Determinazione del limite di fatica

Dalle osservazioni fatte sulla correlazione tra temperatura e comportamento a fatica, sono stati sviluppati dei criteri per stimare il limite di fatica $\sigma_{0,th}$:

- Metodo Risitano [1]: si fa uso delle curve ΔT_{stat} vs σ_a o $\Delta T/\Delta N$ vs σ_a per la determinazione del limite di fatica. L'idea è che $\sigma_{0,th}$ sia quel valore di ampiezza di tensione derivante dall'intersezione della retta interpolante la curva con l'asse delle ascisse; come precedentemente detto, infatti, gli incrementi di temperatura al di sotto del limite di fatica sono trascurabili. In Figura 1.2 si riporta lo schema concettuale del metodo.
- Metodo Luong [28]: l'idea proposta dal seguente autore, è quella di sfruttare sempre i diagrammi ΔT_{stat} vs σ_a , ma in questo caso il limite di fatica viene determinato come quel

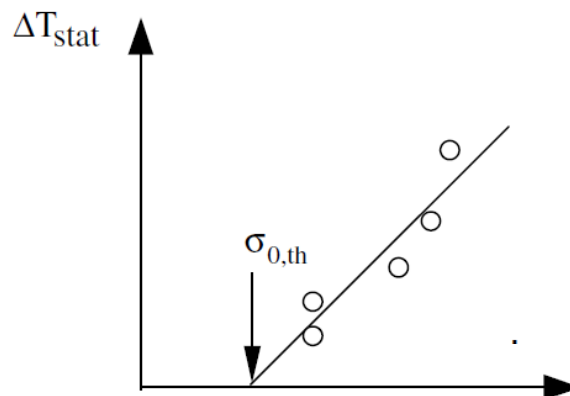


Figura 1.2 – Stima del limite di fatica secondo il Metodo Risitano [3].

valore di ampiezza in cui il diagramma subisce un brusco cambio di pendenza. Si vanno quindi in questo caso a considerare anche i ΔT al di sotto di $\sigma_{0,th}$; intersecando le due rette che interpolano i dati sopra e sotto il limite di fatica, si riesce a determinare quest'ultimo.

Le conclusioni ai quali questi metodi portano, possono essere così elencate: innanzitutto si osserva un buon accordo tra i due metodi e i dati derivanti dallo stair-case di riferimento, ottenuto con le curve di Woehler; si può effettuare inoltre una determinazione rapida del limite di fatica, senza necessariamente portare a rottura i provini; la strumentazione utilizzata risulta poi semplice, in quanto si può far uso sia di termocoppie sia di termocamere a raggi infrarossi; oltretutto poi sono sufficienti tre provini per stimare $\sigma_{0,th}$ in quanto la dispersione dei dati risulta molto ridotta, rientrando in una banda inferiore al 10%; grazie a questi vantaggi, si possono ridurre notevolmente i tempi e i costi per eseguire le prove.

1.2.3 Limiti dei metodi termografici

I metodi sopra esposti, basati quindi sulla correlazione tra comportamento a fatica e temperatura, nonostante i numerosi vantaggi che offrono rispetto alla prova tradizionale che correla ampiezze di tensione con numero di cicli a rottura, presentano diversi limiti [3]:

- in primo luogo, il metodo termografico non è applicabile a provini con geometrie diverse da quelle testate in laboratorio. La Figura 1.3 riporta, infatti, il tipico andamento del campo di temperatura registrato durante una prova di fatica tramite una termocamera; si osserva come nel caso del provino liscio di sinistra, la massima temperatura si presenta nel tratto centrale, poiché, in prima approssimazione, il manufatto si comporta come una barra soggetta a una potenza termica uniforme in direzione trasversale, mentre dissipa calore per conduzione alle estremità, in corrispondenza degli afferraggi. Considerando il provino intagliato a destra, i punti con tensioni maggiori e con temperature più elevate coincidono; d'altro canto, però, anche se la vita a fatica fosse la stessa per entrambe le geometrie, le temperature nei punti critici sarebbero in generale diverse;
- se la temperatura fosse un indice di danneggiamento, la frattura del provino liscio avverrebbe in corrispondenza della sezione media, tuttavia questa condizione non è vera in generale;
- la temperatura è fortemente influenzata dalle condizioni al contorno quali ampiezza di tensione applicata, frequenza di carico alla quale si esegue la prova, geometria del provino, temperatura del laboratorio o quella del macchinario che afferra le estremità del pezzo da testare.

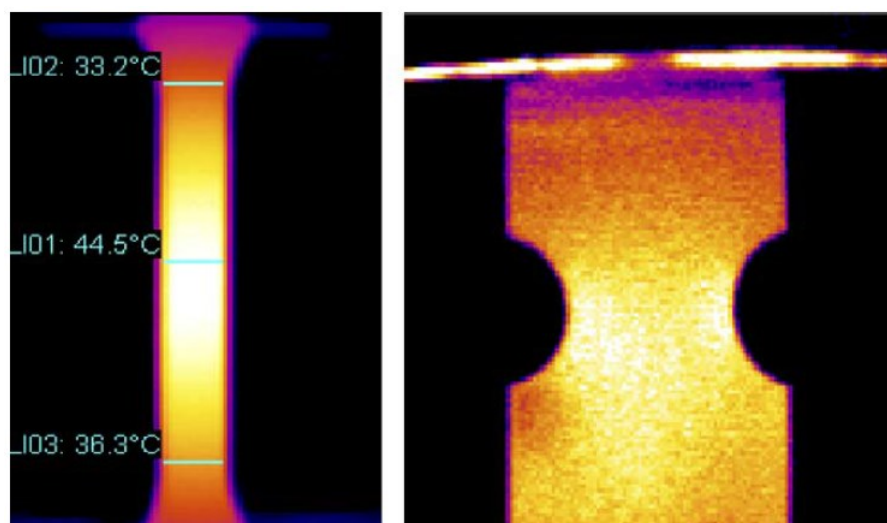


Figura 1.3 – Provino liscio a sinistra e intagliato a destra dello stesso materiale: anche se la vita a fatica fosse la stessa, la distribuzione di temperatura sarebbe diversa [3].

1.3 Metodi energetici

1.3.1 Principi generali

Il metodo termografico esposto precedentemente, nonostante rappresenti una svolta nella metodologia e nell'approccio alla fatica rispetto alla scuola classica, presenta dei limiti di applicabilità e di ripetibilità dei risultati, come esposto nel Paragrafo 1.2.3.

Sono stati per tanto proposti dei metodi basati sull'uso dell'energia per la caratterizzazione della resistenza a fatica di un materiale, e tali approcci sono stati studiati e validati negli ultimi anni. In particolare, in letteratura si trovano diverse scuole di pensiero legate alle diverse forme di energia utilizzate come parametro di danneggiamento. Inoltre, queste diverse metodologie energetiche sono basate sull'analisi e lo studio del bilancio energetico derivante dal Primo Principio della termodinamica come segue, in forma differenziale:

$$dQ = dU + dW \quad (1.1)$$

in cui i membri dell'equazione rappresentano:

- dQ = calore infinitesimo, con le convenzioni che esso sia positivo se entrante nel sistema;
- dW = energia meccanica infinitesima, positiva se esce dal sistema;
- dU = di energia interna infinitesima.

Considerando un volume finito, e integrando nel tempo tale relazione si perviene alla seguente:

$$W = Q + \Delta U \quad (1.2)$$

in cui i membri assumono i seguenti significati:

- W = energia meccanica spesa;
- Q = energia termica dissipata;
- ΔU = variazione di energia interna.

Si evince dunque come i ricercatori si siano differenziati nello studio del fenomeno sulle tre forme di energia derivanti dal Primo Principio, ovvero energia meccanica, interna e termica.

Nel Paragrafo 1.4 si tratterà l'approccio basato sull'energia meccanica W , mostrandone i principali sviluppi; successivamente, nel Paragrafo 1.5 si analizzerà il metodo basato sulla variazione di energia interna ΔU e, nonostante sia esso il vero parametro di danneggiamento, si discuteranno i limiti di applicabilità; verrà poi trattato nel Paragrafo 1.6 il metodo basato sull'energia termica dissipata, con tutti i suoi principali risvolti; si discuteranno poi i principali parametri che influenzano Q e come esso sia una proprietà del materiale. Dopodiché, si procederà con l'esposizione di un metodo sviluppato negli ultimi anni in grado di condensare i risultati in Q su una unica banda di dispersione, in modo da inglobare l'effetto della tensione media. Si analizzerà poi un metodo che permette di stimare Q a partire dal range della seconda armonica del segnale di temperatura, con l'obiettivo di tale tesi di estendere questo metodo a $R > 0$.

1.4 Energia meccanica

1.4.1 Introduzione all'approccio basato su W

La prima forma di energia che verrà analizzata, è quella meccanica spesa durante una prova di fatica. In particolare, intorno agli anni '60 del secolo scorso, Feltner e Morrow [22] proposero questo tipo di approccio in cui secondo loro, il parametro di danneggiamento era rappresentato dall'energia meccanica W immessa dalla macchina durante la prova. Tale approccio fu poi seguito successivamente da Halford [29] che confermò tale ipotesi mediante oltre 1400 prove sperimentali.

Gli autori di [22] si accorsero di una forte dipendenza tra ampiezza di tensione applicata σ_a e energia totale di frattura W_f , visibile nella Figura 1.4, evidenziando come l'energia necessaria per rompere un provino staticamente rappresenti la parte minore, mentre viceversa sia necessario avere grandi quantità di energia meccanica per portare a rottura per fatica.

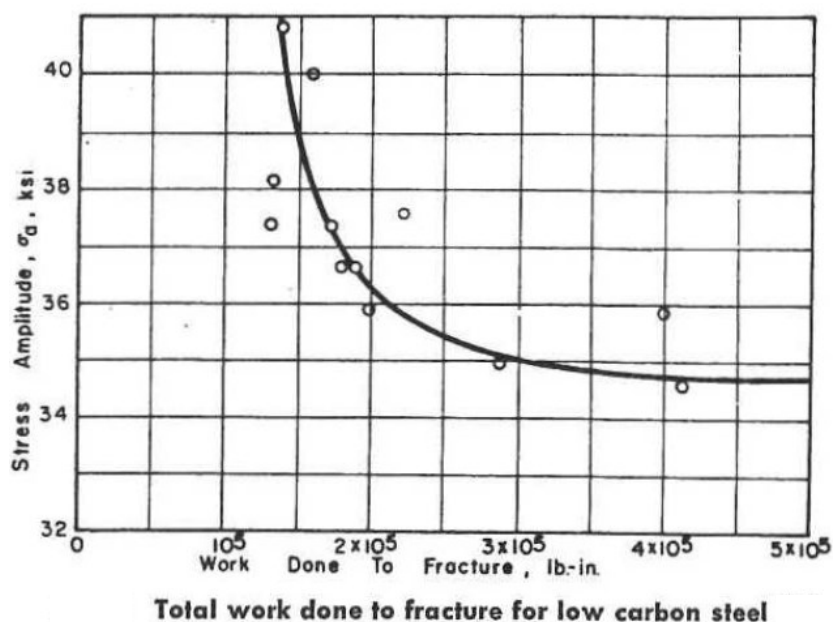


Figura 1.4 – Andamento dell'ampiezza di tensione al variare dell'energia meccanica totale per un acciaio a basso tenore di carbonio [22].

I ricercatori Feltner e Morrow assunsero come parametro di danneggiamento, però, non l'energia meccanica totale, bensì la sola componente plastica, data dall'area dei cicli di isteresi stabilizzati del materiale. Per giustificare tale assunzione, si vanno ad analizzare di seguito le varie forme di deformazione.

1.4.2 Tipologie di deformazioni

Le deformazioni che si manifestano in un provino, possono distinguersi anzitutto tra *elastiche*, ovvero quelle che vengono completamente recuperate dal materiale una volta rilasciati i carichi, suddivise a sua volta in lineari e non lineari, e *inelastiche* le quali non possono essere recuperate al rilascio dei carichi. In particolare, quest'ultima forma porta alla formazione di un ciclo di isteresi (Figura 1.5) quando il materiale viene ciclato in una prova di fatica.

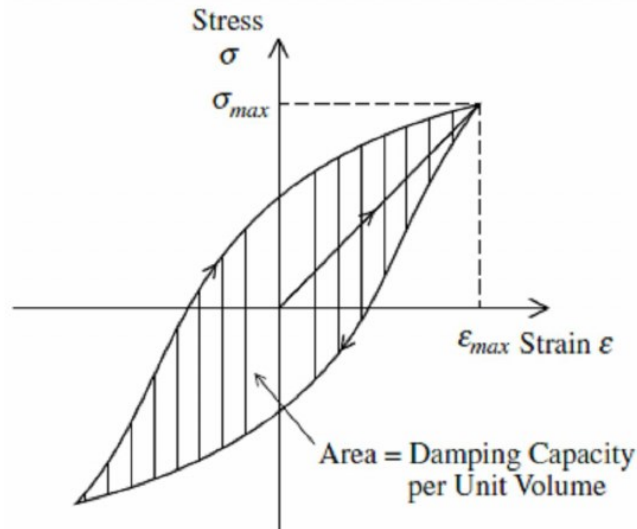
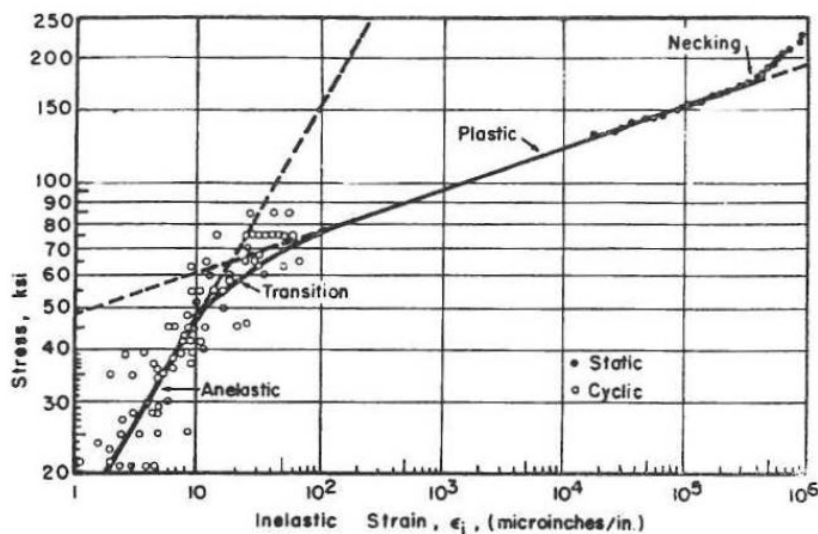


Figura 1.5 – Ciclo di isteresi che si forma per l'uscita dal campo delle deformazioni elastiche.

Conseguentemente, le deformazioni *inelastiche* si suddividono a loro volta in *plastiche* e *anelastiche*. Le prime sono caratterizzate da un rapido aumento per piccoli incrementi di tensione, mentre viceversa le seconde presentano un rapido incremento di tensione per lievi aumenti di deformazione. Ciò che gli autori del metodo sono giunti a concludere viene rappresentato chiaramente in Figura 1.6, in cui sono diagrammate le tensioni al variare delle deformazioni inelastiche. Ciò che si osserva è che per tensioni basse le deformazioni prevalenti sono quelle *anelastiche*, mentre viceversa quelle *plastiche* sono praticamente pari a zero. D'altro canto, però nella zona in cui le tensioni raggiungono elevati valori, le deformazioni *plastiche* risultano essere di due o tre ordini di grandezza maggiori rispetto a quelle *anelastiche* e dunque queste ultime possono essere trascurate. Tra le due zone, sussiste una zona transitoria, in cui le due forme di deformazioni coesistono con un ordine di grandezza simile, ed è questa l'area corrispondente al limite di fatica.

Mentre la zona in cui le deformazioni *anelastiche* risultano essere prevalenti (basse tensioni), si trova al di sotto del limite di fatica. Se ne conclude quindi, che nella zona a predominanza della componente *anelastica*, essendo al di sotto di $\sigma_{0,th}$, non si possa manifestare una rottura per fatica; per tanto l'unica componente che esercita un'azione di danno, legata ai cicli di isteresi, è la sola componente *plastica* e si dovrà quindi prendere come parametro di danneggiamento la frazione di energia meccanica plastica.



1.4.3 Energia totale plastica

Feltner e Morrow ritennero che il cedimento per fatica avvenisse al raggiungimento di una quantità limite di energia di isteresi plastica, costante dato un certo materiale. Tale energia è ottenuta sommando le aree dei cicli di isteresi, come evidenziato nella Figura 1.7.

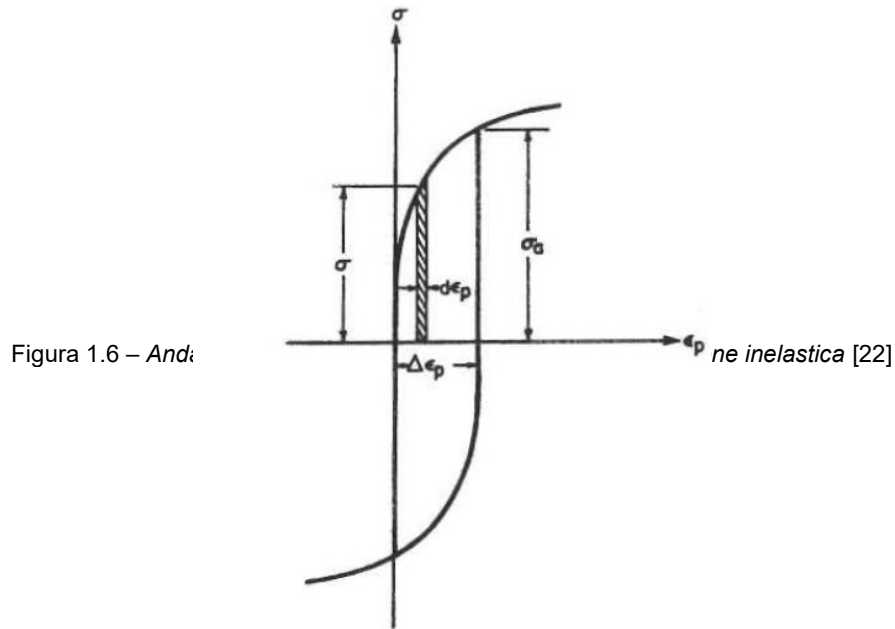


Figura 1.6 – Andamento della curva

Figura 1.7 – Esempio di ciclo di isteresi di un materiale soggetto a carichi ciclici nel tempo [22]

Inoltre, grazie alla stabilizzazione del materiale, dopo un numero di cicli superiore a circa 50 000, le aree dei cicli di isteresi sono state osservate di eguale misura. Per tanto si è calcolata l'area del ciclo di isteresi plastica, per una vita di N cicli come segue:

$$W_p = 2N \int_0^{\Delta \epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (1.3)$$

Avendo assunto che l'energia totale plastica a frattura sia costante e sia uguale all'energia impiegata durante una prova statica e non di fatica, è stata ricavata da Feltner e Morrow una curva tensione-numero di cicli a rottura con parametri facenti parte di tale curva, facilmente ricavabili da una prova statica eseguibile in laboratorio. L'andamento di tale curva è espresso nella Figura 1.8 di seguito diagrammata.

L'espressione numerica che esprime tale andamento è espressa dalla seguente:

$$\log \sigma_a = A - \left(\frac{n}{n+1} \right) \log N_f \quad (1.4)$$

in cui:

- $A = \log \left[\frac{U(1+n)}{2k} \right]$;
- U=energia totale a frattura da prova statica di trazione. Corrisponde all'area sottesa dalla curva tensione-deformazione riferita a grandezze vere;
- n,k=coefficienti di best fit ricavati dalla curva tensione-deformazione in campo plastico.

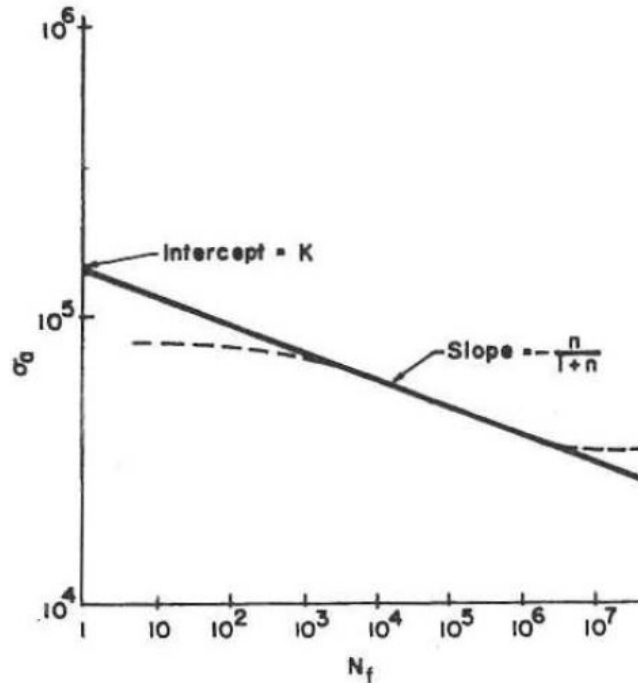


Figura 1.8 – Andamento reale (tratteggiato) e secondo l'ipotesi di Feltner e Morrow (tratto continuo) della curva σ_a-N_f [22]

1.4.4 Discussione e considerazioni

Il metodo proposto è stato testato su un acciaio SAE 4340 dai due autori e successivamente ripreso da Halford [29] eseguendo prove su oltre mille provini. Tale metodo risulta essere in ottimo accordo con i dati sperimentali per ampiezze di tensioni vicine al limite di fatica, poiché per tensioni ben superiori a tale valore si instaurano fenomeni di addolcimento e incrudimento del materiale che modificano l'area dei cicli di isteresi. Inoltre, il calcolo delle tensioni richiede talvolta l'utilizzo di un software FEM, il quale in taluni casi richiede tempi di calcolo elevati e risultati non subito immediati, dipendenti dalla fittezza della mesh.

1.5 Variazione di energia interna

1.5.1 Introduzione all'approccio basato su ΔU

Un approccio diverso, ma sempre basato sul Primo Principio e quindi ancora di carattere energetico, è quello basato sull'utilizzo dell'energia interna accumulata durante una sollecitazione ripetuta nel tempo come parametro di danneggiamento per fatica. Tale metodo, fu proposto tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90 da tre autori ovvero Kaleta, Blotny e Harig [16,30], i quali calcolarono la variazione di energia interna ΔU mediante differenza tra W e Q . Infatti, esplicitando ΔU dalla 1.2 si ottiene:

$$\Delta U = W - Q \quad (1.5)$$

Per quanto concerne il calcolo di W e Q si procede nel seguente modo:

- Calcolo di **W**: l'energia meccanica spesa per la prova è ricavabile come area del ciclo di isteresi; sono necessari per tanto degli estensometri che misurino lo spostamento poi tradotto in deformazione del provino. È stato inoltre utilizzata una variante particolare del metodo di misura per ridurre la complessità nel ricavare, minimizzando gli errori, i cicli di isteresi e le rispettive aree;
- Calcolo di **Q**: per ciò che riguarda la determinazione sperimentale dell'energia termica dissipata, l'idea è stata quella di utilizzare una procedura basata sul confronto di due profili di temperatura. Si è fatto uso di una strategia particolare, che prevedeva la modellazione delle sorgenti di calore, assumendo come ipotesi che la distribuzione di temperatura di tale sorgente fosse indipendente dalla natura della sorgente stessa.

All'atto pratico sono stati riscaldati, tramite corrente, dei provini, variando l'intensità di tale corrente; per effetto Joule, la potenza elettrica è stata dissipata in calore, potendo quindi ottenere una mappa di temperatura lungo l'asse del provino. Tale temperatura, inoltre, aumenta all'aumentare della potenza elettrica immessa, come evidenziato in Figura 1.9.

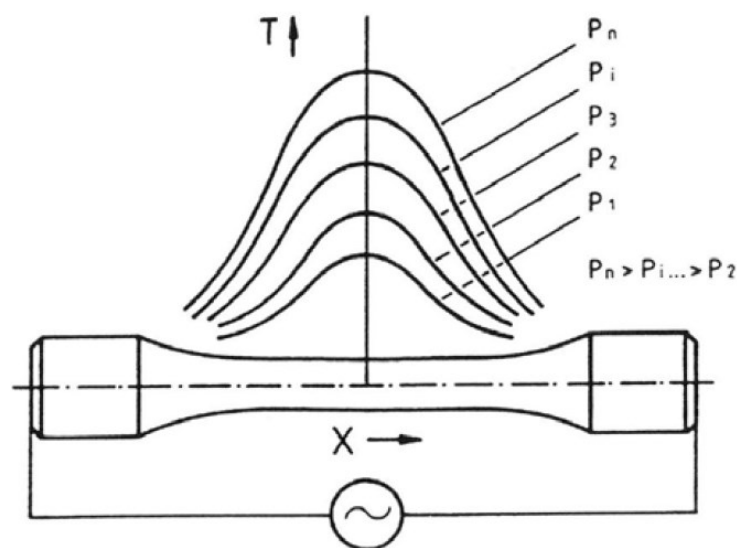


Figura 1.9 – Profili di temperatura ottenuti sui provini di riferimento al variare della potenza elettrica

Durante un test di fatica, monitorando la temperatura superficiale tramite ad esempio una termocamera, si possono confrontare i valori ottenuti con quelli di riferimento, ricavati come nella procedura sopra indicata; una volta ricavato il profilo di temperatura corrispondente, a questo sarà associata un certo valore di potenza elettrica e dunque un valore di potenza termica dissipata.

1.5.2 Discussione e considerazioni

Analizzando il metodo basato sulla variazione di energia interna, nonostante possa apparire come un metodo complesso soprattutto nella determinazione di Q , in realtà rappresenta l'approccio più corretto, in quanto l'ammontare di energia interna è il vero responsabile della rottura per fatica. Tale approccio risulta quindi essere quello più corretto, in quanto si lega il parametro reale di danneggiamento alla vita a fatica; d'altro canto, però, ΔU non risulta di facile determinazione.

Tale metodo presenta alcuni limiti, legati alla difficoltà di applicazione: innanzitutto ΔU viene calcolato come differenza tra W e Q , per tanto è affetta anche essa dalle incertezze con cui l'energia meccanica e il calore dissipato sono ricavati; è opportuno quindi sviluppare dei metodi e utilizzare delle apparecchiature che permettano la determinazione estremamente accurata di W e Q ; un altro aspetto importante riguarda il fatto che ad alto numero di cicli, W e Q hanno all'incirca lo stesso ordine di grandezza, in quanto la dissipazione in calore risulta essere estremamente superiore rispetto all'accumulo di energia interna, il che significa che la loro differenza risulterà essere minore dell'incertezza dei due parametri. Resta per tanto un limite importante la possibilità di utilizzare questo metodo solo per un numero basso di cicli, laddove ΔU assume valori significativi e più facilmente calcolabili con le strumentazioni attuali.

1.6 Energia termica dissipata

1.6.1 Introduzione all'approccio basato su Q

L'idea di stimare la vita a fatica tramite la determinazione sperimentale di Q , è stata proposta nei primi anni del secolo scorso, ma subito abbandonata per la difficoltà nella stima di Q con le tecnologie dell'epoca; solo nel primo decennio del XXI secolo è stata riportata in ambito accademico questa idea, grazie alle ricerche fatte da Meneghetti [3], seguite poi per più di un decennio da altri lavori sviluppati da lui e dal gruppo di ricerca di Costruzione di Macchine dell'Università di Padova [4,5,6,7]. L'approccio basato sulla stima di Q è stato reso possibile grazie al metodo proposto da Meneghetti che viene definito come *Metodo del gradiente di raffreddamento*: l'idea nasce dall'osservazione che un materiale soggetto a una prova di fatica mostra un aumento di temperatura nella prima fase del processo di carico, dopodiché una volta raggiunto l'equilibrio con l'ambiente circostante, tale temperatura si livella su un valore costante (in realtà c'è un leggero effetto termoelastico ma risulta essere trascurabile). Se si interrompe la prova quando questa condizione di equilibrio viene raggiunta, si riesce a stimare Q dalla pendenza della retta di raffreddamento calcolata nel momento di stop della prova.

Seguiranno ora dapprima la trattazione analitica del modello, esplicitando i termini del bilancio di Primo Principio, dopodiché si analizzerà il procedimento analitico per la stima di Q nel caso monodimensionale e si estenderà il procedimento al caso generale grazie al metodo di Meneghetti; si esporranno i risultati sperimentali ottenuti nel corso degli anni dal gruppo di ricerca di Padova e infine si analizzerà il modello proposto da Meneghetti e Ricotta per estendere i risultati a rapporti ciclo diversi tra di loro.

1.6.2 Bilancio energetico su un volume di controllo

Si consideri un generico materiale, sottoposto a una prova di fatica e se ne individui un volume di controllo V, come nella Figura 1.10.

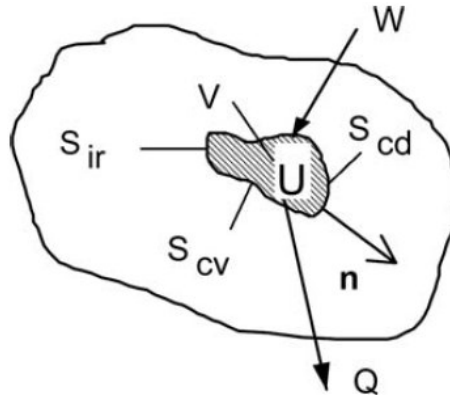


Figura 1.10 – Volume di controllo V e bilancio energetico di un materiale soggetto a carichi di fatica [3]

Si identifichi con \vec{n} la normale uscente da tale volume V (tratteggiato in grigio); la superficie esterna S del volume V può essere suddivisa in tre parti: S_{cd} , S_{cv} e S_{ir} , attraverso le quali si sviluppa uno scambio di calore per conduzione, convezione e irraggiamento rispettivamente. Alla luce di ciò, è possibile scrivere il bilancio di energia mediante il Primo Principio della termodinamica. Siano:

- W= energia meccanica spesa nella prova;
- U=energia interna del materiale con ΔU la sua variazione;
- Q= energia termica dissipata in calore.

Ciascuna grandezza è specifica, ovvero riferita al singolo ciclo. È possibile ora scrivere il Bilancio Energetico come segue:

$$W = Q + \Delta U \quad (1.6)$$

I termini dell'equazione 1.6 possono essere esplicitati come segue. Anzitutto l'energia meccanica per unità di volume e ciclo \bar{W} si esprime come:

$$\bar{W} = \oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.7)$$

In cui σ_{ij} e $d\varepsilon_{ij}$ sono le componenti del tensore delle tensioni e delle deformazioni rispettivamente. Estendendo l'integrale a un volume generico V si ottiene W, come segue:

$$W = \int_V \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot dV \quad (1.8)$$

Esprimendo la 1.8 in termini di potenza meccanica si ottiene:

$$P_W = W \cdot f = \int_V \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot dV \quad (1.9)$$

Per quanto concerne la potenza termica dissipata, essa è data dai tre contributi di potenza per conduzione, convezione e irraggiamento:

$$\begin{aligned} P_Q &= P_{cd} + P_{cv} + P_{ir} = \\ &= \int_{S_{cd}} -\lambda \cdot \nabla \vec{T} \cdot \vec{n} \cdot dS_{cd} + \int_{S_{cv}} \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot dS_{cv} + \\ &+ \int_{S_{ir}} k \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dS_{ir} \end{aligned} \quad (1.10)$$

nella quale σ_n è la costante di Stefan-Boltzman che vale $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$, f è la frequenza di applicazione del carico affaticante, $\nabla \vec{T}$ è il gradiente del campo di temperatura, funzione del tempo e della posizione sulla superficie del volume di controllo, T_∞ è la temperatura ambientale costante. Per quanto riguarda la potenza associata alla variazione di energia interna essa viene scritta come:

$$P_{\Delta U} = \int_V \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV \quad (1.11)$$

Tale potenza è costituita da due componenti: la prima dipende dalle variazioni di temperatura nel volume di controllo V , mentre la seconda è la velocità di variazione della cosiddetta "energia immagazzinata di lavoro a freddo" e in altre parole rappresenta la velocità di accumulo di energia fonte del danneggiamento, la quale cioè è responsabile dei cambiamenti della microstruttura del materiale e della formazione delle cricche di dimensione microscopica [16].

Applicando il noto teorema di Green, è possibile trasformare l'integrale di superficie del termine legato alla conduzione in un integrale di volume:

$$-\lambda \cdot \int_{S_{cd}} \text{grad} \vec{T} \cdot \vec{n} \cdot dS_{cd} = -\lambda \cdot \int_V \text{div}(\text{grad} \vec{T}) \cdot dV \quad (1.12)$$

In cui:

$$\text{div}(\text{grad} \vec{T}) = \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.13)$$

L'equazione di bilancio in forma integrale può dunque essere così riscritta:

$$\begin{aligned}
 & \int_V \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot dV = \\
 & = \int_V -\lambda \cdot \nabla^2 T \cdot dV + \int_{S_{cv}} \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot dS_{cv} + \\
 & + \int_{S_{ir}} k \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dS_{ir} + \int_V \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot dV
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

In questa trattazione analitica si è assunto un materiale dal comportamento omogeneo, ovvero avente proprietà che non variano al variare della direzione all'interno del suo volume. In realtà, volendo essere rigorosi, tale ipotesi perde di validità alla manifestazione di una cricca; d'altro canto però, questo approccio presenta una procedura sperimentale per stimare l'energia dissipata in corrispondenza di un numero di cicli compreso tra circa un terzo e metà della vita a fatica del pezzo, all'interno del cui intervallo non sono ancora presenti cricche di dimensioni macroscopiche; infine, gli incrementi di temperatura durante le prove di fatica sono limitati; tutte queste motivazioni rendono l'assunzione di materiale omogeneo accettabile dal punto di vista operativo e ingegneristico.

1.6.3 Stima di Q nel caso monodimensionale

È possibile, stabilite le ipotesi sul materiale, ricavare l'energia termica dissipata per unità di volume e per ciclo nel caso di un problema monodimensionale: in questo caso allora si trascura la variazione della temperatura in una generica sezione trasversale del provino come mostrato in Figura 1.11. Tale assunzione è giustificata dal fatto che nei materiali metallici comunemente utilizzati, lo scambio termico convettivo risulta essere di alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto allo scambio termico per conduzione.

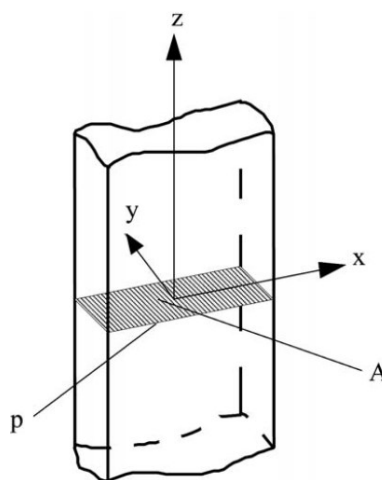


Figura 1.11 – Provino liscio con sezione trasversale rettangolare di area A e perimetro p [3]

Il volume dell'elemento infinitesimo vale:

$$dV = A \cdot dz \quad (1.15)$$

mentre l'area della superficie laterale vale:

$$dS = dS_{cv} = dS_{ir} = p \cdot dz = \sum_i l_i \cdot dz \quad (1.16)$$

in cui l_i corrisponde alla lunghezza dell' i -esimo lato del volume. L'equazione 1.14 particolarizzata a questo caso monodimensionale può essere riscritta seguentemente:

$$\begin{aligned} & \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f \cdot A \cdot dz = \\ & = -\lambda \cdot \nabla^2 T \cdot A \cdot dz + \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot p \cdot dz \\ & + \sum_i (k_i \cdot l_i) \cdot \sigma_n \cdot (T^4 - T_\infty^4) \cdot dz + \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \cdot A \cdot dz \end{aligned} \quad (1.17)$$

Semplificando la 1.17, eliminando la lunghezza elementare dz e dividendo i due membri dell'equazione per l'area A , si ottiene:

$$\begin{aligned} & \left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = \\ & = -\lambda \cdot \nabla^2 T + \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot \frac{p}{A} + \sum_i (k_i \cdot l_i) \cdot \frac{\sigma_n}{A} \cdot (T^4 - T_\infty^4) \\ & + \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) \end{aligned} \quad (1.18)$$

Arrivati a questo punto, si deve tenere in considerazione che l'andamento stazionario della temperatura, una volta raggiunto l'equilibrio con l'ambiente circostante, è in realtà caratterizzato da una oscillazione della temperatura attorno a tale valore stazionario, dovute all'effetto termoelastico; nonostante ciò, sperimentalmente si è visto che per frequenze di carico sufficientemente alte le oscillazioni di temperatura legate alla termoelasticità sono trascurabili essendo di due ordini di grandezza inferiori rispetto alla temperatura stazionaria.

Sotto queste condizioni, la derivata temporale della temperatura T è nulla in questo stato stazionario.

Per tanto l'equazione 1.18 può essere riscritta come:

$$\left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = H + \dot{E}_p \quad (1.19)$$

In cui il parametro H è dato dalla somma di:

$$\begin{aligned}
 H &= H_{cd} + H_{cv} + H_{ir} = \\
 &= -\lambda \cdot \nabla^2 T + \alpha \cdot (T - T_\infty) \cdot \frac{p}{A} \\
 &+ \sum_i (k_i \cdot l_i) \cdot \frac{\sigma_n}{A} \cdot (T^4 - T_\infty^4)
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

Fatta tale precisazione, si procede all'integrazione della 1.19 nel tempo da inizio prova fino a cedimento del provino. Secondo quindi l'ipotesi di temperatura stazionaria, sperimentalmente validata in [1], si ottiene:

$$W_f = Q \cdot H + E_{p,f} \tag{1.21}$$

Laddove W_f rappresenta l'energia meccanica per unità di volume spesa per portare a cedimento il provino; $E_{p,f}$ è l'energia critica per unità di volume che è stata ipotizzata essere costante dato un certo materiale secondo Feltner e Morrow [22], e risulta essere pari all'energia spesa in un volume unitario durante una prova statica; $Q = H/f$ è il calore dissipato in un volume unitario ad ogni ciclo, scelto come parametro di danneggiamento a fatica.

Si deve osservare inoltre che per determinare Q, obiettivo della seguente analisi, si debbono conoscere la distribuzione di temperatura lungo il tratto utile del provino, avendo ipotizzato che T sia costante lungo la sezione trasversale, la temperatura dell'ambiente all'interno del quale viene eseguita la prova di fatica, i parametri geometrici del provino, la conducibilità termica, il coefficiente di scambio termico convettivo e le emissività superficiali.

Siccome gli ultimi due parametri sono di difficile determinazione e inoltre i componenti reali non sono assimilabili a una geometria monodimensionale, soprattutto in presenza di intagli, si andrà ad analizzare di seguito l'estensione al caso tridimensionale generico la trattazione, mediante l'uso della procedura sperimentale proposta da Meneghetti.

1.6.4 Stima di Q nel caso generale

L'energia dissipata in calore può essere ricavata misurando sperimentalmente il gradiente di raffreddamento dopo una improvvisa interruzione della prova di fatica. Richiamando l'equazione 1.19 ed esplicitando i termini in H, si ottiene:

$$\left(\oint \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \right) \cdot f = (H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}) + \dot{E}_p \tag{1.22}$$

valida per condizioni stazionarie, in cui i termini in H rappresentano la potenza termica dissipata per unità di volume rispettivamente per conduzione, convezione e irraggiamento.

Se si suppone di interrompere la prova al tempo $t = t^*$ in cui la temperatura della superficie nel punto considerato ha raggiunto il valore stazionario $T^* = T_{stat}$, come evidenziato in Figura 1.12, la potenza meccanica introdotta dalla macchina di prova e la velocità di accumulazione del danno \dot{E}_p crollano a zero.

Nell'istante successivo a $t = t^*$ allora, l'equazione può essere riscritta come segue, ricordando che non si è più in una condizione stazionaria:

$$\rho \cdot c \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=(t^*)^+} = -(H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}) \quad (1.23)$$

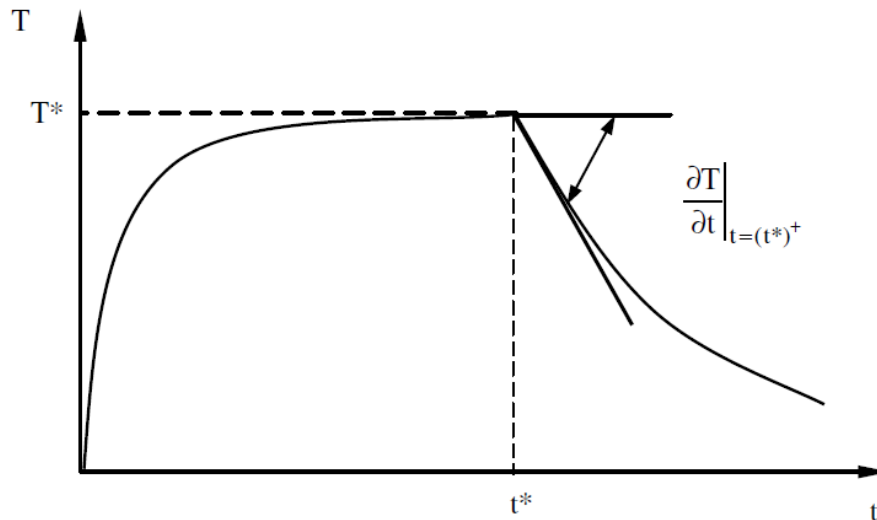


Figura 1.12 – Determinazione di Q mediante la misura del gradiente di raffreddamento al tempo $t = (t^*)^+$

Si può osservare che il valore dei termini in H non cambia tra l'istante immediatamente prima di $t = t^*$ e quello immediatamente dopo, poiché esso dipende dalle proprietà del materiale e dalle temperature sulla superficie del pezzo e nell'ambiente circostante, ritenute costanti per variazioni di tempo tendenti all'infinitesimo. Allora, la potenza termica dissipata nell'unità di volume in un dato punto del provino (ovvero il termine dato dall'equazione 1.20) può essere stimato dalla misura sperimentale del gradiente di temperatura in quel punto immediatamente dopo l'interruzione della prova di fatica, in accordo con l'equazione 1.23. Fatto ciò, l'energia termica dissipata per unità di volume e per ciclo Q si va a determinare nota la frequenza di applicazione del carico:

$$Q = \frac{H}{f} \quad (1.24)$$

1.6.5 Cenni sull'effetto termoelastico

L'effetto termoelastico è stato precedentemente accennato nel paragrafo 1.2.1, ma esso merita alcune precisazioni, in quanto risulta fondamentale per condensare i risultati sperimentali in merito all'effetto della tensione media. Tale effetto consiste in una oscillazione della temperatura del materiale quando questo è soggetto a cicli di trazione-compressione, infatti la temperatura del materiale aumenta se soggetto a compressione, mentre diminuisce se soggetto a trazione, considerando un materiale dal comportamento isotropo, senza variazioni sostanziali delle proprietà al variare di piccole oscillazioni di temperatura, in un sistema adiabatico e con deformazioni in campo elastico. Tali oscillazioni di temperatura, sono di alcuni ordini di grandezza inferiori agli aumenti di temperatura dovuti alla prova di fatica, come verrà poi confermato dalle evidenze sperimentali.

Per quanto concerne le ipotesi di adiabaticità, la prova sperimentale si avvicina a tale condizione ideale tanto più aumenta la frequenza di carico e dunque tanto più il carico viene applicato con un periodo minore.

La prima osservazione del fenomeno è attinente ai primi anni dell'800, ma una trattazione teorica più approfondita è da attribuirsi a Lord Kelvin nel 1851; tuttavia la relazione [31] che lega la variazione di temperatura e la variazione del campo di deformazione in un punto del materiale è stata derivata da Potter e Graves [32]. Tralasciando la trattazione analitica, ricavabile nei due articoli [31,32], si perviene alla seguente relazione finale:

$$\Delta T = - \frac{\alpha \cdot T \cdot \Delta I_{1\sigma}}{\rho \cdot c_{\sigma}} = -K_m \cdot \Delta I_{1\sigma} \quad (1.25)$$

valida sotto le ipotesi di solido linearmente elastico, omogeneo e isotropo, trascurando la variazione della proprietà fisiche con il variare della temperatura.

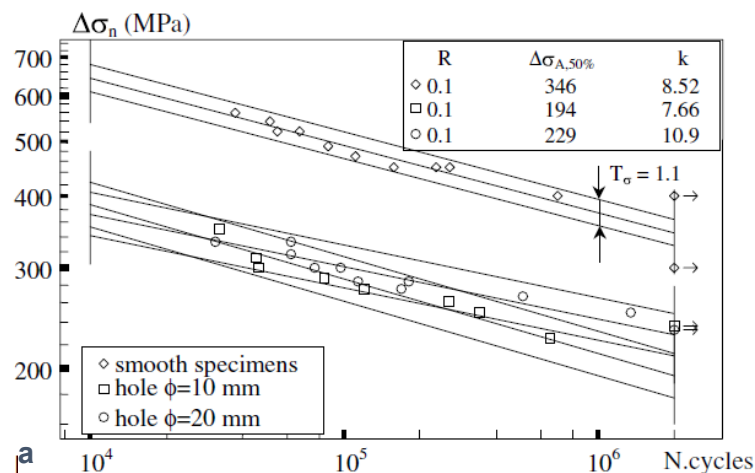
La costante K_m prende il nome di *costante termoelastica del materiale*, di fondamentale importanza come verrà mostrato nel paragrafo 1.6.7.

Questa trattazione motiva il fatto che le condizioni stazionarie quando $T^* = T_{stat}$ sono effettivamente soddisfatte, soprattutto per frequenze elevate alle quali vengono eseguite le prove, in modo da avvicinarsi alle condizioni adiabatiche.

Seguono ora i risultati sperimentali riportati in [3], concernenti la determinazione di Q mediante la tecnica del gradiente di raffreddamento.

1.3.2 Risultati sperimentali con Q come parametro di danneggiamento

Si riportano ora i risultati sperimentali eseguiti in [3], che hanno confermato la bontà della metodologia sviluppata da Meneghetti. Sono stati utilizzati provini in acciaio inossidabile AISI 304L con grande capacità di dissipazione di calore, in modo da rendere più evidente e più facile la rilevazione di tale calore dissipato; sono stati impiegati sia provini lisci con tipica forma ad osso di cane sia provini intagliati con foro centrale di diametri 20 mm per prove a R=-0.5 e R=0.1 e diametro di 10 mm per altre prove a R=0.1. I provini sono stati dipinti di vernice nera per motivazioni legate all'emissività superficiale; inoltre, le prove di fatica ad ampiezza costante sono state eseguite a medio-alto e alto numero di cicli acquisendo la mappa di temperatura sulla superficie del provino mediante una termocamera AGEMA THV 900 LW/ST. Per determinare il gradiente di raffreddamento, le prove sono state interrotte almeno cinque volte per provino. Infine, sono stati sintetizzati i risultati in dei diagrammi Q vs N cicli a rottura confrontando tali grafici con le curve di Woehler.



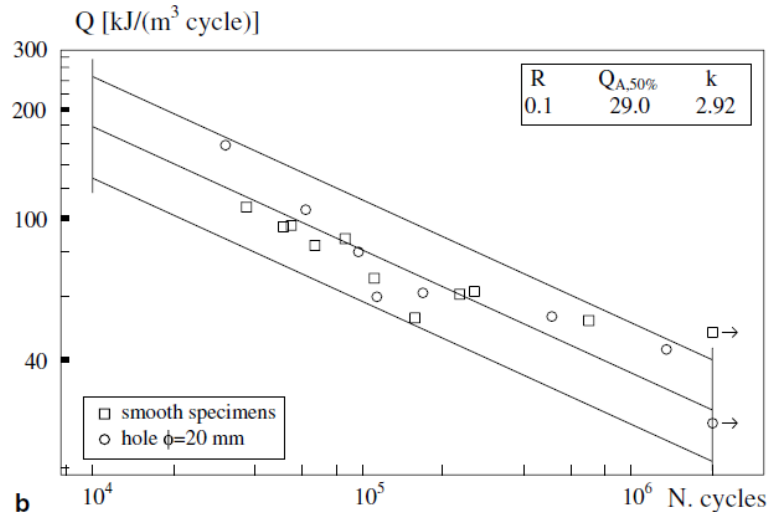


Figura 1.13 – Risultati sperimentali dei test di fatica per provini lisci e intagliati con $R=-0.5$ (a) e $R=0.1$ (b). Le scatter bands identificano le probabilità di sopravvivenza al 10% e al 90%. [3]

Dall'analisi dei risultati sperimentali ottenuti si possono trarre alcune conclusioni: anzitutto l'oscillazione termoelastica risulta essere effettivamente trascurabile rispetto all'ordine di grandezza della temperatura stabilizzata; inoltre appare evidente come i provini liscio e intagliato con $d=20$ mm collassano in un'unica banda di dispersione in termini di Q , mentre i risultati trovati su provini intagliati con $d=10$ mm non rientrano nella stessa banda di dispersione; ciò è legato principalmente ai limiti di risoluzione legati alla termocoppia e non a una imprecisione nel modello identificato in [3]. Altro aspetto non trascurabile è che si ottengono bande diverse a seconda della tensione media, ovvero del rapporto ciclo considerato. Si nota poi che la dispersione dei dati in Q è notevolmente inferiore rispetto all'approccio classico in σ ; infine si osserva che la tecnica sperimentale sviluppata da Meneghetti permette di calcolare Q senza limitazione di monodimensionalità e senza controllo rigido delle condizioni al contorno.

Un aspetto estremamente importante legato al parametro Q , è che esso sia una proprietà intrinseca del materiale. Questa idea, poi confermata nei lavori successivi come in [4,5,17], deriva da un'osservazione di Meneghetti secondo cui il materiale come tale, abbia delle caratteristiche proprie indipendenti, ad esempio, dal raggio di raccordo di un intaglio, piuttosto che dalla velocità con cui il carico è applicato al provino. In [4] è stato dimostrato che Q è indipendente da:

- **Temperatura dell'ambiente:** sono stati condotti dei test alterando la temperatura superficiale del provino mediante convezione forzata. Sono state posizionate delle termocoppie al variare della posizione longitudinale sull'asse del provino, che hanno misurato la temperatura locale della superficie. Dalla Figura 1.14 si vede come la temperatura nel tratto centrale quando è stato acceso il ventilatore sia calata molto rispetto ai valori ottenuti avvicinandosi via via agli afferraggi; questo è dovuto al fatto che la macchina per il raffreddamento e il riscaldamento è stata posizionata centralmente.
- **Frequenza di carico:** oltre che variare la temperatura tramite convezione forzata, è stata variata anche la frequenza con cui le sollecitazioni di fatica sono state applicate. I test sono stati fatti variando la frequenza in un'ampia banda da 1 Hz a 25 Hz. Si è osservato come, in termini di temperatura questa aveva una oscillazione da circa 10 °C a 65 °C come mostrato in Figura 1.14, molto ampia, mentre in termini di Q la banda entro cui i valori cadevano variava di un $\pm 15\%$ rispetto al valore medio, vedi Figura 1.15. Ciò ha confermato la bontà di tale metodo rispetto ai metodi basati sull'analisi della temperatura superficiale.

- **Temperatura degli afferraggi:** per motivazioni analoghe a quelle della temperatura della stanza.
- **Geometria dei provini:** si è visto che sottoponendo ai test di fatica sia provini lisci che intagliati, a meno di problematiche legate alla risoluzione degli strumenti di misura come le termocoppie, quando i raggi di intaglio diventano piccoli, Q sia in grado di sintetizzare il comportamento a fatica all'interno di un'unica banda di dispersione, diversamente da altri metodi quali quello classico in σ e quello di Risitano.

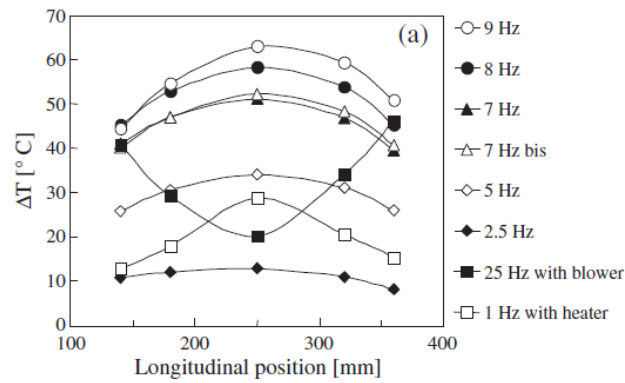


Figura 1.14 – Profili di temperatura stabilizzata misurata rispetto alla temperatura ambiente lungo l'asse longitudinale, al variare delle condizioni al contorno. [5]

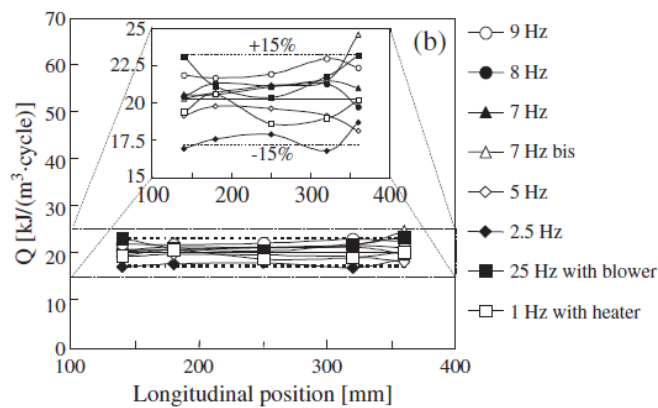


Figura 1.15 – Valori di Q corrispondenti ai valori di temperatura al variare delle condizioni al contorno. [5]

Per evidenziare il vantaggio del poter caratterizzare un materiale a fatica mediante il parametro Q, sono state eseguite numerose prove a $R=-1$ [6], non solo di trazione-compressione, ma anche di torsione alterna, variando la geometria dei provini. Sono stati utilizzati infatti sia provini lisci, sia provini intagliati variandone la tipologia, ovvero geometrie con foro centrale, intagli a U e a V. È stata inoltre variata la tipologia di prova, usando sia prove in controllo di tensione sia in controllo di deformazione.

Come evidenzia la Figura 1.16, rappresentando tutti i risultati sperimentali in termini di tensione ci sono molteplici bande di dispersione, dipendenti sia dalla geometria, sia dal tipo di prova eseguita, evidenziando come un approccio basato sulle tensioni nominali non sia quello più corretto, poiché il fenomeno di fatica è un fenomeno locale e non legato a una sezione netta o lorda.

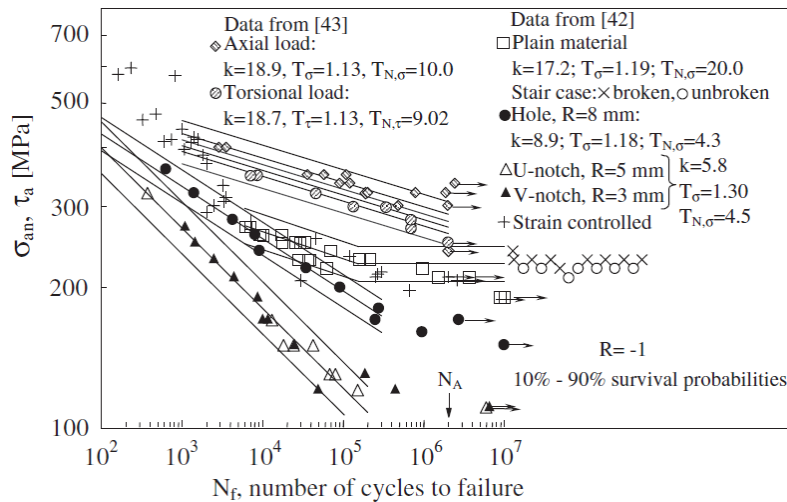


Figura 1.16 – Risultati delle prove di fatica assiale e torsionale in termini di tensione netta. [6]

Viceversa, rielaborando gli stessi risultati sperimentali in termini del parametro Q , i dati collassano in un'unica banda di dispersione, come appare evidente in Figura 1.17. Si nota inoltre come il parametro $T_{N,Q}$ relativo alla dispersione in termini di vita a fatica, si riduca notevolmente rispetto a $T_{N,\sigma}$ riferito all'approccio alle tensioni nominali. Se ne conclude per tanto che Q rappresenta un più corretto indice di danneggiamento del materiale a fatica rispetto all'approccio in σ .

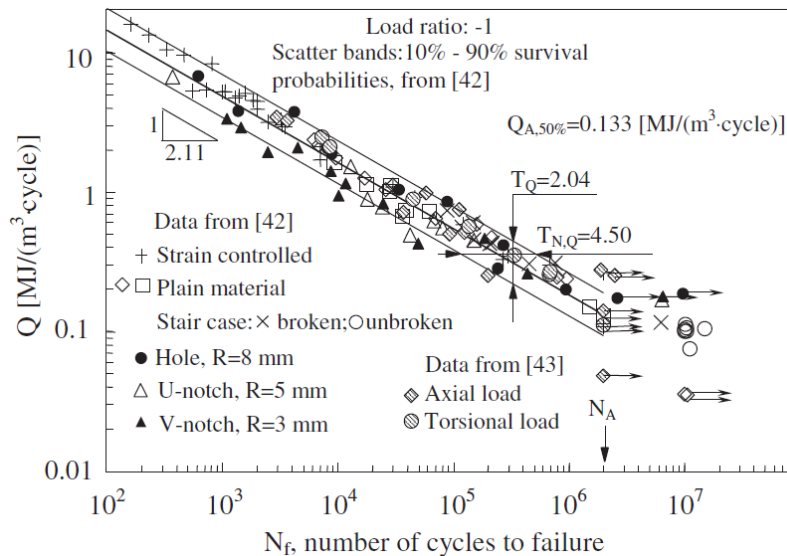


Figura 1.17 – Risultati rielaborati in termini di Q . Le scatter bands sono riferite al 10% e al 90%. [6]

Per completezza vengono esposti ulteriori risultati sperimentali tratti da [6] in cui sono state eseguite delle prove di fatica a due livelli di carico, indicati rispettivamente come HL (High-Low) cioè prima ad ampiezza elevata per un certo numero di cicli e poi ad ampiezza più bassa, e LH (Low-High), con significato opposto. Sono stati eseguiti quattro cicli di carico HL e LH. Il secondo livello di carico è stato portato fino a rottura, o se il provino non si è rotto, fino a dieci milioni di cicli. È stato infine valutato il danno sia in termini di tensione che di Q secondo l'ipotesi di Miner [33]:

$$D = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_L}{N_{f,L}} + \frac{n_H}{N_{f,H}} \quad (1.26)$$

Di seguito sono riportati due grafici, Figura 1.18, di confronto tra l'approccio in σ (a) e l'approccio in Q (b). L'ipotesi di Miner o del *danno unitario* viene riportata in entrambe le figure mediante una retta.

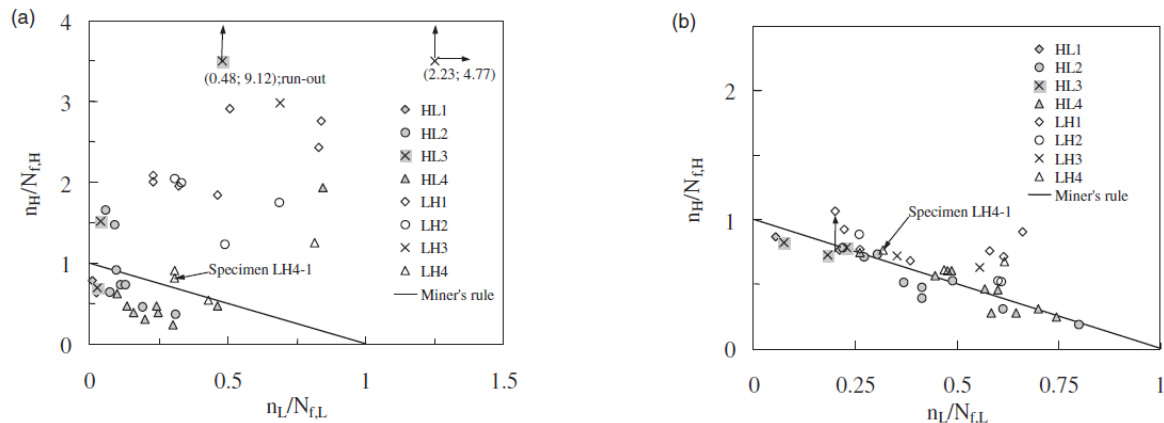


Figura 1.18 – Risultati in termini di tensione (a) ed energia dissipata (b). [6]

Appare subito evidente come nell'approccio in tensione i risultati in termini di HL approssimano meglio l'ipotesi di Miner, nonostante diano valori che non siano in perfetto accordo con essa; viceversa, i dati in termini di LH si discostano molto dall'ipotesi di danno unitario. D'altro canto, invece, analizzando gli stessi risultati in termini di energia dissipata dal materiale, per unità di volume e per ciclo, si ottiene che sia HL che LH si accordano in modo promettente con Miner, poiché Q misura indirettamente la risposta del materiale ovvero il danno accumulato durante l'evoluzione ciclica. Inoltre, si deve ricordare che l'ipotesi di Miner è stata ricavata con un approccio basato sull'energia, e non sulle tensioni, motivo per il quale c'è un quasi perfetto accordo con i risultati sperimentali in Q .

Resta però da analizzare un ulteriore aspetto, ovvero quello legato all'effetto della tensione media. Infatti, se R è diverso da -1 , i risultati in termini di curva Q vs N danno luogo a diverse bande di dispersione. Per riuscire a condensare i risultati in una unica banda, si è seguito il procedimento esposto nel successivo paragrafo.

1.6.7 Effetto della tensione media: modello Meneghetti-Ricotta

È stato evidenziato nei lavori fin qui analizzati, come l'approccio energetico risulti essere molto promettente per la caratterizzazione a fatica di un materiale, poiché supera i limiti dell'approccio in tensione. D'altro canto, però, utilizzando il solo parametro Q non si riesce a sintetizzare l'effetto legato ad un diverso rapporto ciclo cioè a una diversa tensione media.

L'effetto della tensione media è stato analizzato svariate volte per gli approcci in tensione e deformazione, come ad esempio con la soluzione SWT proposta da Smith, Watson e Topper [34] per un approccio strain-life su intagli:

$$SWT = \sqrt{\sigma_{max} \cdot E \cdot \epsilon_a} \quad (1.27)$$

in cui E è il modulo elastico, ε_a è l'ampiezza di deformazione elasto-plastica e σ_{max} è la tensione massima. Anche in ambito meccanica della frattura il problema è stato affrontato da diversi autori, tra i quali Walker [35] che ha proposto un ΔK_{equiv} per tener conto di un R diverso da -1.

Questo aspetto legato però al parametro Q , è stato analizzato dal gruppo di ricerca di Padova, ed in particolare da Meneghetti e Ricotta, i quali hanno sviluppato un modello [8] che prende il nome di *Approccio energetico a due parametri*. L'idea che sta alla base di questo metodo è quella per cui la resistenza a fatica di un materiale sollecitato da carichi variabili nel tempo dipende da due fattori:

1. **Variabile di scambio termodinamica:** corrispondente all'ampiezza della forza applicata, identificata dal parametro Q ;
2. **Variabile di stato:** corrispondente al livello di dell'ampiezza di forza, identificata nella *temperatura termoelastica*.

La temperatura termoelastica è per definizione, nell'ipotesi di processo adiabatico, la temperatura raggiunta dal materiale quando è sollecitato a una tensione pari a quella massima del ciclo di fatica. Riprendendo l'equazione 1.25 si arriva da ottenere la seguente formulazione:

$$\frac{T_{the}}{T_0} = -\left(\frac{\alpha}{\rho \cdot c}\right) \cdot \sigma_{max} = -K_m \cdot \sigma_{max} \quad (1.28)$$

in cui T_0 è la temperatura del materiale all'inizio del processo di carico adiabatico (per ipotesi) e α è il coefficiente di dilatazione termica del materiale. Combinando le due variabili sopra citate, si perviene a un'equazione che si propone di razionalizzare l'effetto della tensione media in una prova di fatica assiale:

$$\left(Q \cdot \left(\frac{|T_{the}|}{T_0}\right)^h\right)^m \cdot N_f = \bar{Q}^m \cdot N_f = cost \quad (1.29)$$

In cui h , m sono due parametri costanti del materiale ricavate tramite best-fit dei risultati sperimentali.

Per quanto concerne la determinazione dei termini dell'Equazione (1.28) si può procedere in due modi diversi, seguendo un approccio analitico o uno sperimentale.

Per quanto concerne la prima possibilità, basta utilizzare le costanti tabulate nei manuali di scienza dei materiali, ricavando quindi il parametro K_m . Il secondo approccio, di cui poi dettagliatamente si spiega il procedimento e si mostrano i risultati sperimentali, consiste, sinteticamente, nell'eseguire delle rampe di carico con una velocità tale da assicurare l'adiabaticità, misurare l'andamento della temperatura ed infine calcolare la temperatura termoelastica mediante la sua definizione. Noti dunque, T_0 e $\Delta\sigma$ si può ricavare il parametro K_m .

Si riportano ora i risultati sperimentali [8] eseguiti su due differenti materiali, il primo costituito da barre di diametro nominale di 25 mm trafilate a freddo in acciaio AISI 340L, mentre come secondo materiale è stato impiegato un acciaio C45 laminato a caldo e temprato. Le prove di fatica sono state condotte a quattro diversi livelli di carico ($R=-1.5$, $R=-1$, $R=0.1$; $R=0.5$ e $R=-2$ solo per C45), cercando di interrompere la prova almeno 5 volte per ogni *fatigue test* in modo da poter misurare il gradiente di temperatura e determinare l'evoluzione del parametro di danneggiamento Q . Per valutare la costante termoelastica del materiale, come precedentemente detto, si vanno a fare delle rampe di carico in controllo di forza, utilizzando poi l'equazione 12.8 per ricavare K_m .

Sperimentalmente si osserva che entrambi i materiali testati sono sensibili al rapporto di ciclo R e dunque alla tensione media. Di seguito, a titolo di esempio, si riportano le evoluzioni di temperatura per l'acciaio C45 a $R=-2$ (a) e per l'AISI 304L a $R=0.1$ (c). Sono visibili le interruzioni della prova legate al calcolo di Q .

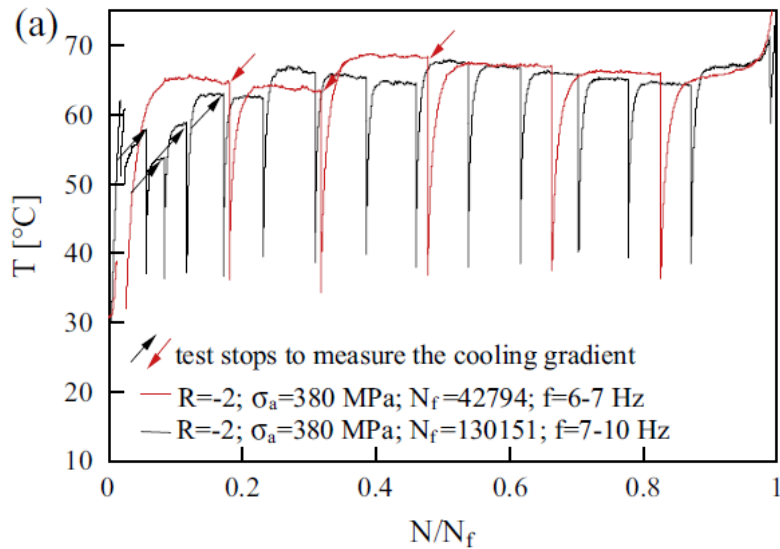


Figura 1.19 – Evoluzione della temperatura superficiale ricavata mediante termocoppia durante la prova a $R=-2$ per l'acciaio C45. [8]

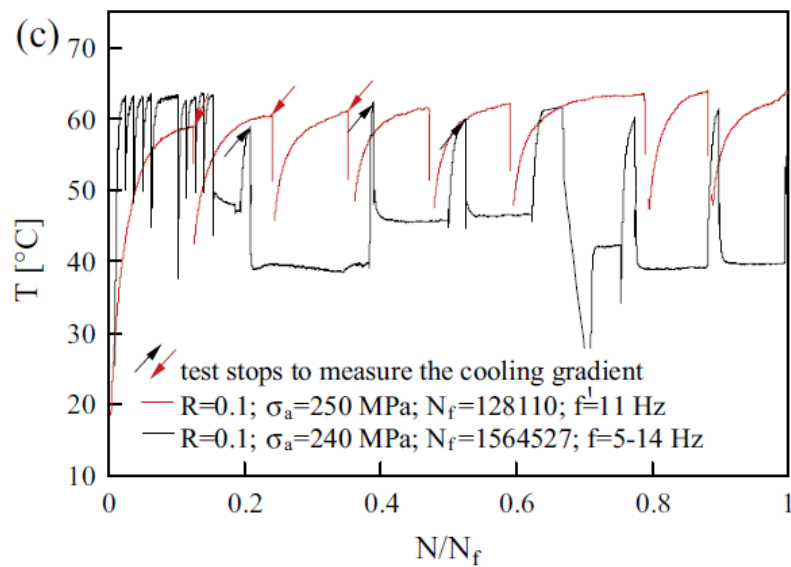


Figura 1.20 – Evoluzione della temperatura superficiale ricavata mediante termocoppia durante la prova a $R=0.1$ per l'acciaio AISI 304L. [8]

In tutti i casi analizzati si osserva che all'inizio della prova la temperatura aumenta e raggiunge la stabilizzazione; dopodiché la prova viene interrotta, si misura il gradiente e poi la si riprende. Un aspetto che si osserva dal monitoraggio della temperatura è che il *self-heating* è più pronunciato a $R=-1.5$, $R=-2$ (C45) e $R=-1$ rispetto invece al caso di $R=0.1$ e $R=0.5$.

Di seguito in Figura 1.21 si osserva come sia impossibile far cadere i dati in Q all'interno di un'unica banda di dispersione, in quanto esso è sì una proprietà del materiale, ma è influenzato dal diverso rapporto ciclo e quindi risente della tensione media applicata al provino.

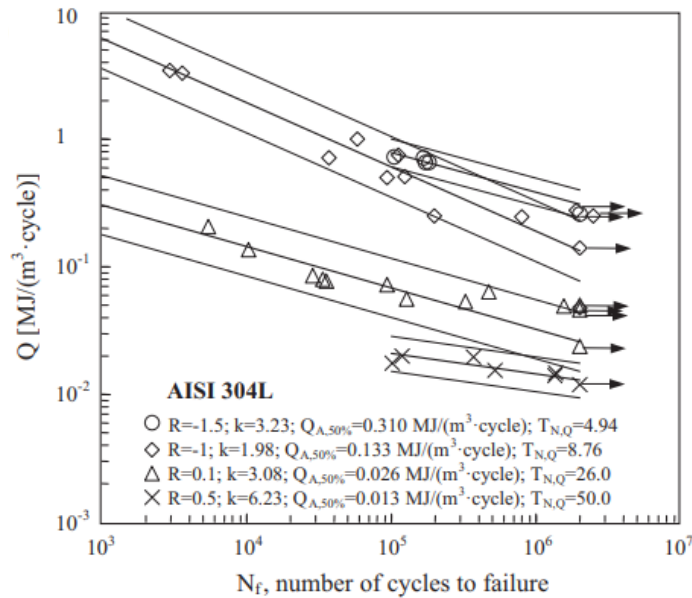


Figura 1.21 – Curve di fatica in termini di Q vs numero di cicli a rottura al variare del rapporto ciclo per l'acciaio AISI 304L. [8]

Una volta note tali curve di fatica, si procede ad eseguire rampe di carico in controllo di forza (v. Figura 1.22), al variare della velocità di tensione applicata, procedendo per tentativi finché non si individua quel valore minimo di velocità tale per cui vengono soddisfatte le ipotesi di adiabaticità.

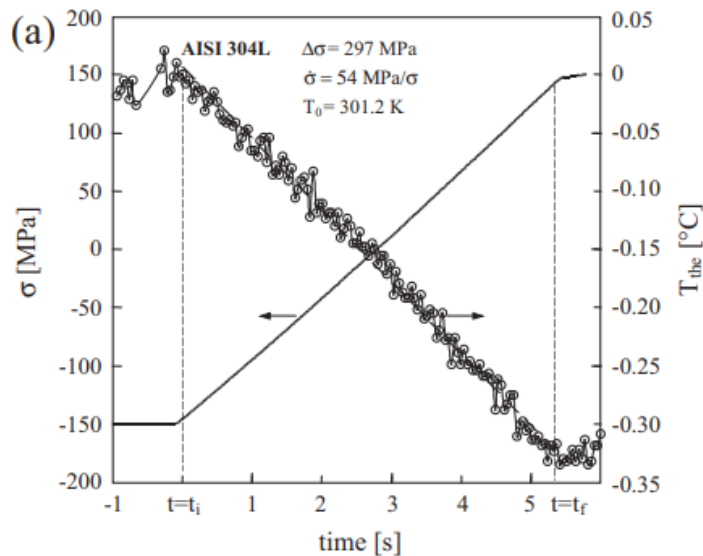


Figura 1.22 – Rampa di carico in controllo di forza e andamento della temperatura per l'acciaio AISI 304L. [8]

Una volta raggiunto tale valore, la costante termoelastica K_m risulta essere costante come in Figura 1.23. Nota tale costante, è possibile risalire alla temperatura termoelastica per ciascuna prova.

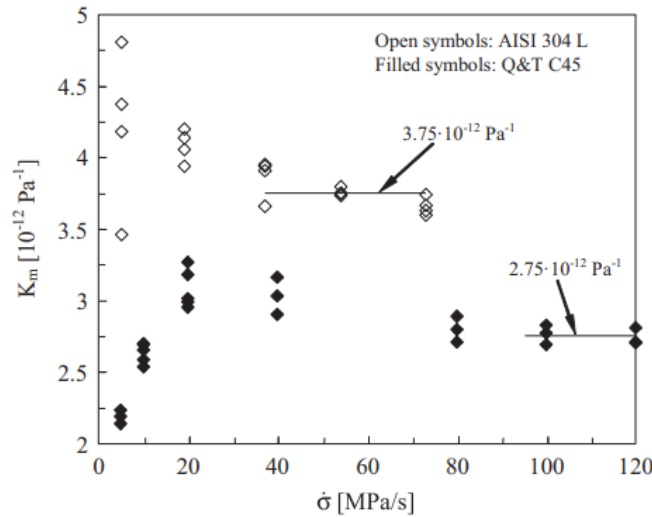


Figura 1.23 –Andamento della costante termoelastica al variare della velocità di tensione applicata. Sopra un certo valore, vengono raggiunte ingegneristicamente le condizioni di adiabaticità. [8]

Si determina poi l'esponente h tramite il seguente grafico $Q - T_{the}/T_0$ (v. Figura 1.24).

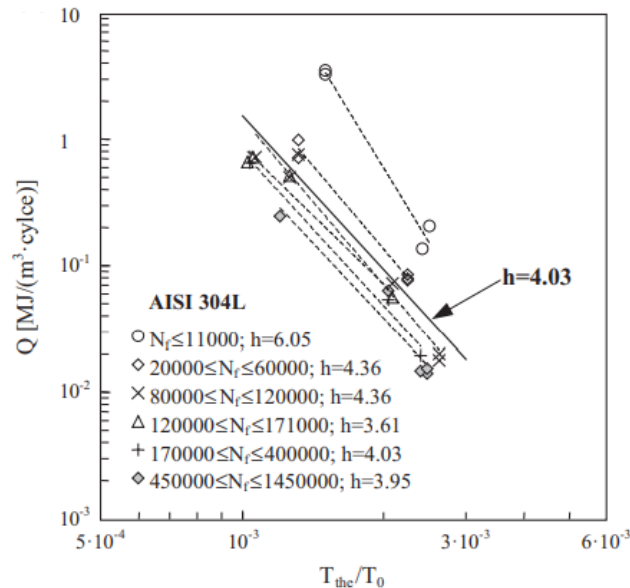


Figura 1.24 –Determinazione dell'esponente h per l'acciaio AISI 304L. [8]

Infine, noti tali parametri si può applicare l'equazione 1.29 per ricavare la curva \bar{Q} vs N_f . La pendenza della retta, in scala doppio-logaritmica, fornisce il valore dell'ultima costante m (v. Figura 1.25)

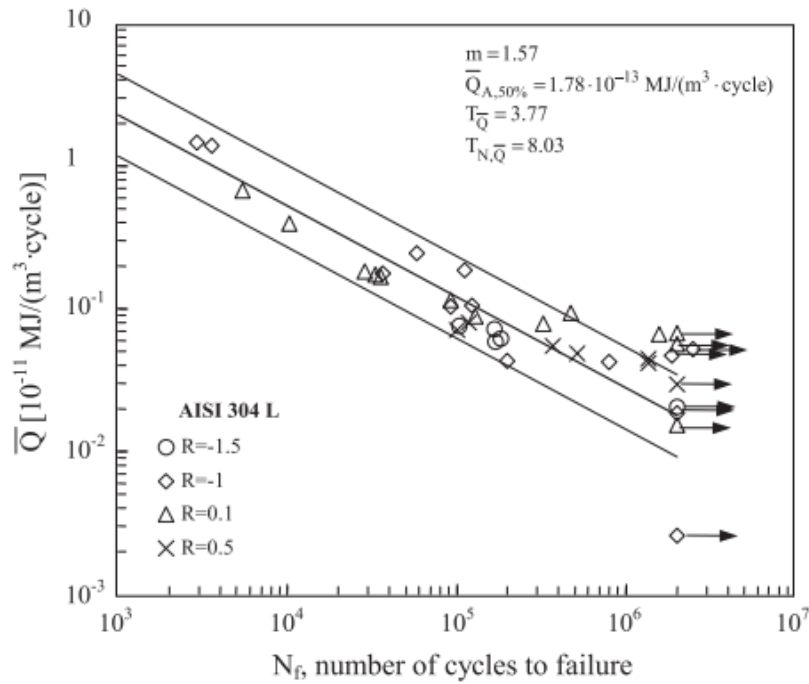


Figura 1.25 – Curva $\bar{Q} - N_f$ l'acciaio AISI 304L. [8]

In conclusione, si osservano diversi aspetti: tramite l'utilizzo della temperatura termoelastica, si riescono a sintetizzare i risultati in termini di Q a diversi rapporti ciclo, a diversa geometria, a diversa temperatura e a diversa frequenza di carico in un'unica banda di dispersione; ciò dimostra nuovamente come Q sia un ottimo parametro di danneggiamento e se, opportunamente modificato, possa inglobare anche l'effetto tensione media grazie alla conoscenza della costante termoelastica. Tale parametro, inoltre, è facilmente calcolabile a patto di considerare delle condizioni di lavoro adiabatiche, le quali possono essere facilmente raggiunte in un laboratorio standard che disponga di macchine di prova adeguate.

1.6.8 Conventional lock-in e phase lock-in infrared method

È stato recentemente proposto da Shiozawa et al in [9,10,36] un metodo basato sull'utilizzo del range della seconda armonica per valutare la dissipazione intrinseca e poter calcolare il limite di fatica con il metodo *2f lock-in* convenzionale e con il metodo *phase 2f lock-in*. Tale metodo sfrutta l'utilizzo della seconda armonica del segnale di temperatura, facendola coincidere con la temperatura realmente responsabile del danneggiamento per fatica, ovvero quella legata agli effetti di plasticizzazione del materiale. Secondo gli autori, è possibile stimare il limite di fatica rilevando l'andamento del range della seconda armonica, che secondo Shiozawa [14,36] coincide con il range di temperatura legato alla plasticizzazione, ΔT_D . L'utilizzo delle armoniche del segnale di temperatura era stato anche preso in considerazione dalla scuola barese grazie ai lavori di Palumbo e Galiotti [20,21], i quali hanno studiato l'effetto e l'influenza della fase della temperatura termoelastica sulla plasticizzazione locale; tale metodo proposto in [21] è definito *TPA method*.

Secondo Shiozawa et al, l'energia termica dissipata, che loro battezzano col simbolo q , può essere calcolata quindi tramite la componente di temperatura avente frequenza doppia rispetto a quella imposta dalla prova di fatica, ovvero quella con cui varia l'onda sinusoidale di carico. Si può poi utilizzare la Trasformata Discreta di Fourier (DFT) per calcolare la seconda armonica di T . Infatti, durante un singolo ciclo di carico di fatica, la temperatura del materiale oscilla a causa della

sovrapposizione di due differenti fenomeni [11]: l'effetto termoelastico, il quale è un fenomeno reversibile, e la dissipazione irreversibile di energia causata dalla deformazione plastica, v. Figura 1.25.

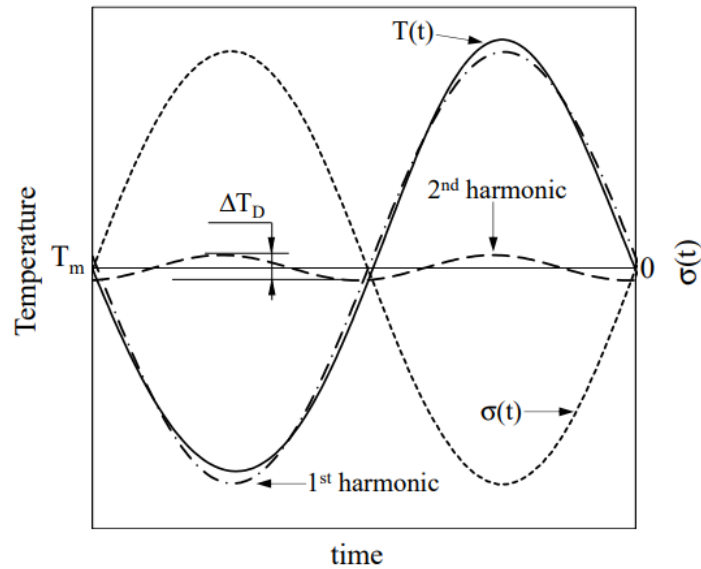


Figura 1.26 – Prima e seconda armonica del segnale di temperatura misurata durante una prova di fatica. [11]

Per quanto concerne il range di temperatura termoelastica, esso è definito come:

$$\Delta T_E = \sqrt{\Delta T_{E,sin}^2 + \Delta T_{E,cos}^2} \quad (1.30)$$

Laddove:

$$\Delta T_{E,sin} = \frac{2}{N} \sum_{t_i=1}^N T(t_i) \cdot \sin(t_i) \quad (1.31a)$$

$$\Delta T_{E,cos} = \frac{2}{N} \sum_{t_i=1}^N T(t_i) \cdot \cos(t_i) \quad (1.31b)$$

In cui N è il numero di campionamenti e $T(t_i)$ è la temperatura misurate all'istante t_i .

Per ciò che riguarda invece l'armonica successiva, una volta che la temperatura raggiunge la stabilizzazione, l'energia dissipata durante un ciclo di fatica si può determinare a partire dal calcolo del range della seconda armonica del segnale della temperatura analizzato mediante la DFT, cioè ΔT_D :

$$\Delta T_D = 2 \sqrt{\Delta T_{D,sin}^2 + \Delta T_{D,cos}^2} \quad (1.32)$$

Laddove

$$\Delta T_{D,sin} = \frac{2}{N} \sum_{t_i=1}^N T(t_i) \cdot \sin(2t_i) \quad (1.33a)$$

$$\Delta T_{D,cos} = \frac{2}{N} \sum_{t_i=1}^N T(t_i) \cdot \cos(2t_i) \quad (1.33b)$$

In cui nuovamente N è il numero di campionamenti e $T(t_i)$ è la temperatura misurate all'istante t_i . Considerando che durante un ciclo di fatica a tensione media nulla (ma ciò è estendibile anche a casi con tensione media diversa da zero), l'effetto della plasticizzazione si verifica due volte, pertanto l'energia termica dissipata la si può calcolare in accordo con quanto scritto in [9] come segue:

$$q = \rho c \cdot 2\Delta T_D \quad (1.34)$$

Il ritardo di fase, inoltre, tra la variazione di temperatura dovuta all'energia dissipata e il segnale di carico sinusoidale si può calcolare come segue:

$$\theta_D = \tan^{-1}\left(-\frac{T_{D,cos}}{T_{D,sin}}\right) \quad (1.35)$$

Poiché θ_D è influenzato dalla diffusione termica, la differenza di fase è definita per eliminare questa influenza, come segue:

$$\Delta\theta = \theta_D - \theta_E \quad (1.36)$$

Laddove θ_E è il ritardo di fase tra il carico di fatica e la temperatura termoelastica dovuto alla diffusività termica del materiale, che viene calcolato come:

$$\theta_E = \tan^{-1}\left(-\frac{T_{E,cos}}{T_{E,sin}}\right) \quad (1.37)$$

in cui $T_{E,cos}$ e $T_{E,sin}$ sono le componenti della variazione di temperatura termoelastica definite nelle Equazioni (1.31a) e (1.31b).

Per ciò che concerne l'apparato sperimentale, Shiozawa et al [9] hanno eseguito delle prove di fatica *push-pull* su un acciaio inossidabile AISI 316L, con un rapporto di ciclo $R=-1$. Analizzando le mappe termografiche, gli autori hanno notato che la fase della seconda armonica era caratterizzata dalla presenza di due picchi di diversa ampiezza, quando il carico e dunque la tensione applicata era minore del limite di fatica.

In particolare, il picco di ampiezza maggiore corrispondeva a una differenza di fase di 140° rispetto al segnale imposto dal carico applicato, mentre dall'altra parte il picco di entità minore era caratterizzato da una differenza di fase di 60° .

Contrariamente, Shiozawa e gli altri autori hanno inoltre osservato la presenza di un unico picco corrispondente a una differenza di fase di 60° , per carichi applicati maggiori rispetto alla tensione relativa al limite di fatica del materiale. Tale fenomeno è rappresentato in Figura 1.27, nella quale vengono identificate in blu le zone a basso carico (in questo caso tra 200 e 250 MPa), mentre in rosso le zone ad alto carico (da 255 a 275 MPa).

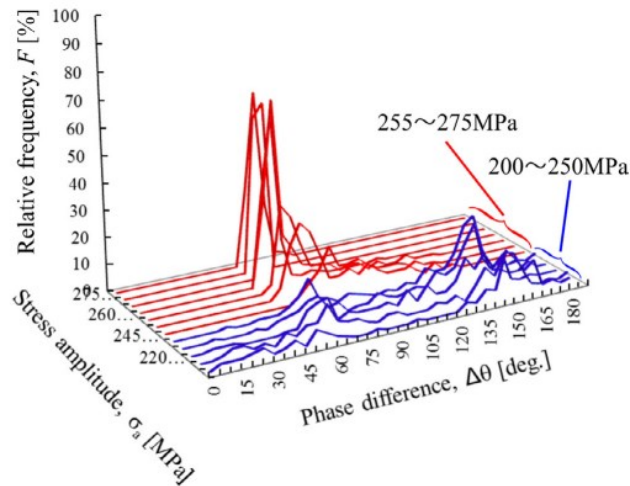


Figura 1.27 – Istogramma della differenza di fase. In blu le zone a carichi inferiori al limite di fatica, mentre in rosso le zone a tensione maggiore del limite di fatica. [9]

Si possono fare dunque alcune osservazioni in merito a tali risultati, fatte proprio dagli autori di [9]: innanzitutto, considerando che una differenza di fase uguale a 140° è tipica dell'effetto termoelastico, Shiozawa et al hanno dichiarato che fosse dovuta alle vibrazioni della macchina di prova e che non era dunque correlata direttamente alla dissipazione di energia; inoltre, la differenza di fase pari a 60° diventa dominante sopra il limite di fatica, ed è dunque strettamente legata alla dissipazione di energia dovuta al danneggiamento per fatica.

D'altro canto, però, si sono accorti che il cambiamento di temperatura legato alla dissipazione energetica aveva una specifica differenza di fase $\Delta\hat{\theta}$. Infatti, quando la variazione di $\Delta\theta$ restituisce un valore costante e q aumenta rispetto all'ampiezza di tensione applicata, questa differenza di fase viene considerata come quella specifica differenza di fase correlata alla dissipazione di energia.

Gli autori si sono chiesti dunque come tener conto della sola componente legata alla dissipazione di energia. Pertanto, con questo obbiettivo, è stato definito "il valore che serve come correlazione tra la variazione di temperatura misurata e il segnale di riferimento modificato, il quale è stato shiftato di un valore pari alla somma di una specifica $\Delta\hat{\theta}$ e del ritardo di fase legato alla temperatura termoelastica θ_E ". Tale valore, $\Delta\hat{T}_D$, è pari a:

$$\Delta\hat{T}_D = \frac{2}{N} \sum_{t_i=1}^N T(t_i) \cdot \sin \left\{ 2 \left[2\pi t \cdot \frac{f_L}{f_{acq}} - (\theta_E + \Delta\hat{\theta}) \right] \right\} \quad (1.38)$$

Laddove f_{acq} è la frequenza di acquisizione della termocamera, mentre f_L è la frequenza di carico applicata. Quando si riscontra un $\Delta\hat{T}_D$ negativo, va imposto uguale a zero. Allora alla luce di tali osservazioni, Shiozawa e i suoi collaboratori, hanno ridefinito l'energia dissipata \hat{q} come pari a:

$$\hat{q} = \rho c \cdot 2\Delta\hat{T}_D \quad (1.39)$$

Questo approccio, che va a modificare il precedente metodo *conventional lock-in method*, viene battezzato dagli autori come *phase lock-in method*.

Dal punto di vista dei risultati sperimentali ottenuti in [9], si osserva dalla Figura 1.28, che $\Delta\hat{\theta}$ risultava pari a 57° e costante dopo un aumento del carico applicato oltre al limite di fatica.

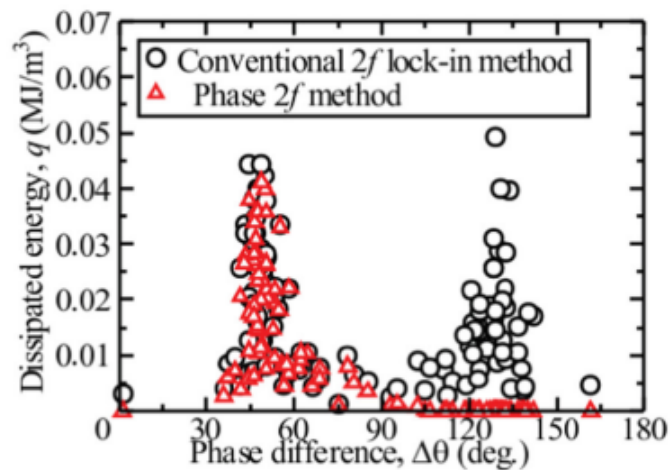


Figura 1.28 – Relazione tra l'energia dissipata e la differenza di fase con i due metodi lock-in. È visibile un netto aumento di q per una differenza di fase pari a 57° . [9]

Infine, è stato proposto quindi un metodo per stimare il limite di fatica, dapprima facendo riferimento alla correlazione tra energia dissipata e ampiezza di tensione (v. Figura 1.29), e poi tra la derivata $dq/d\sigma_a$ rispetto all'ampiezza di tensione (v. Figura 1.30). Infatti, si possono evidenziare due andamenti: al di sotto del limite di fatica

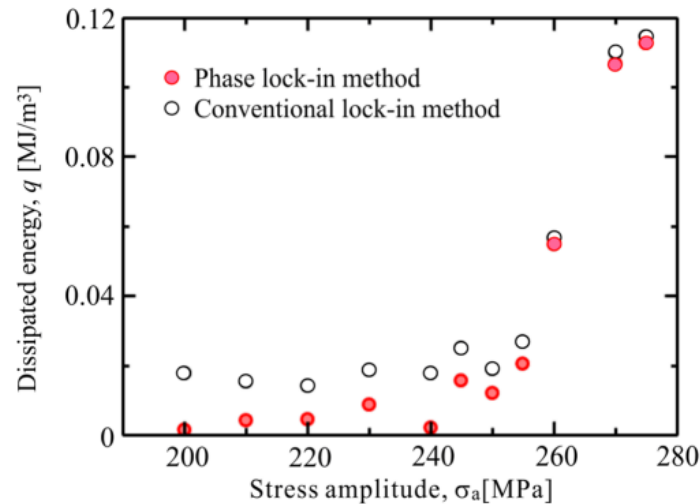


Figura 1.29 – Risultati

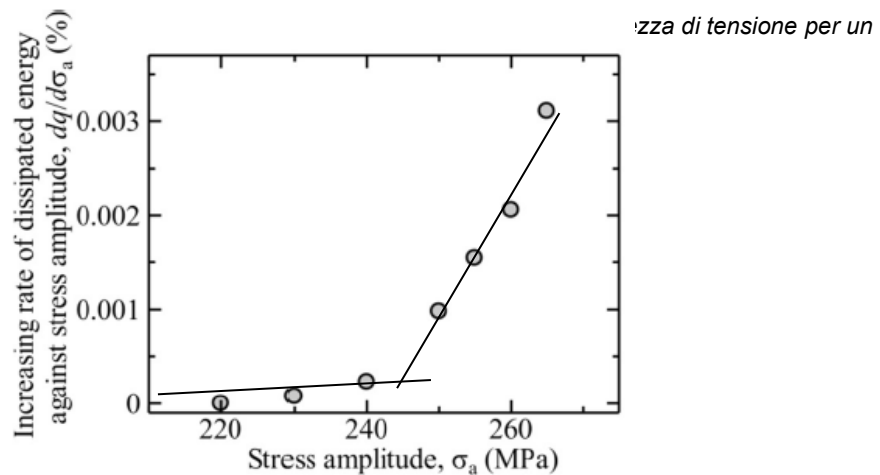


Figura 1.30 – Risultati sperimentali in termini di variazione di energia dissipata rispetto all'ampiezza di tensione per un acciaio AISI 316L. [10]

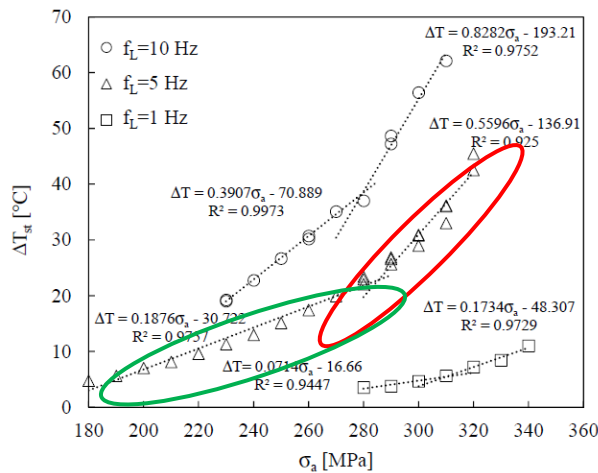
L'osservazione sperimentale mostra che, al di sotto del limite di fatica, l'energia dissipata o la sua variazione sono praticamente costanti al variare del carico, mentre al di sopra del limite di fatica c'è un rapido aumento e soprattutto una forte dipendenza dal valore della tensione applicata.

Si è osservato che, sperimentalmente, si ottengono risultati più fedeli al limite di fatica ricavato tramite procedura *Stair case* se si va ad utilizzare come parametro $dq/d\sigma_a$, in quanto il fenomeno dissipativo è legato alla formazione e moto delle *slip band* o bande di scorrimento. Allora secondo Shiozawa e i suoi collaboratori è più corretto utilizzare la variazione di q come indice di innesco di una cricca.

1.7 Confronto dei metodi termici sperimentali per la valutazione del limite di fatica

Sono stati condotti da Ricotta, Meneghetti e altri collaboratori in [11] diverse prove sperimentali con i diversi approcci analizzati sin ora per stimare il limite di fatica di un acciaio inox. In particolare, i risultati ottenuti sono stati confrontati con il limite di fatica derivante da una prova classica mediante curva di Woehler. Il materiale utilizzato era costituito da barre in acciaio AISI 304L, testato con rapporto di ciclo $R=-1$ e avente limite di fatica ricavato dalla curva di Woehler pari a 330 MPa.

In Figura 1.31 vengono presentati i risultati ottenuti applicando il Metodo di Risitano.



Si deve osservare però, in base a quanto detto in [4], le curve variano al variare della frequenza di

Figura 1.31 – Risultati sperimentali applicando il Metodo di Risitano. [11]

carico, in quanto la temperatura non può essere utilizzata come parametro di danneggiamento, essendo infatti fortemente dipendente dalle condizioni al contorno.

In figura 1.32 si riportano invece i risultati, per un provino preso a titolo esemplificativo, utilizzando come parametro relativo al danneggiamento l'energia meccanica, data dall'area del ciclo di isteresi.

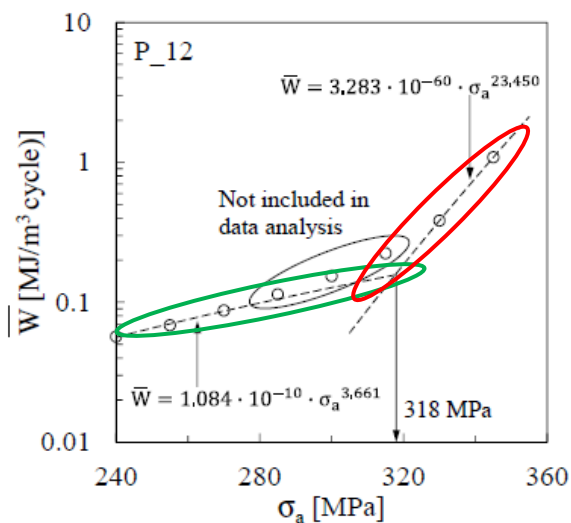


Figura 1.32 – Risultati sperimentali utilizzando l'energia meccanica come parametro per stimare il limite di fatica. [11]

Anche in questo caso si osserva come al di sopra del limite di fatica ci sia un rapido aumento dell'energia meccanica. Il punto di intersezione delle rette interpolanti i due rami della curva sperimentale fornisce la stima del limite di fatica, in termini di ampiezza di tensione.

Si è poi andato ad eseguire lo stesso ragionamento anche sul parametro Q, che come precedentemente descritto, è un ottimo parametro per quantificare il danneggiamento a fatica di un acciaio. È pertanto stato calcolato tale parametro rilevando la temperatura mediante termocamera a raggi infrarossi e applicando la tecnica del gradiente di temperatura, descritta tramite le Equazioni 1.23 e 1.24. Sono state utilizzate delle prove a gradini come negli altri casi, in cui si parte da un livello basso di carico, si testa il provino per un certo numero di cicli, e poi si aumenta il carico. Si procede così fino al raggiungimento della rottura del provino.

Si riporta ora in Figura 1.33 un esempio di un provino identificato come P_11.

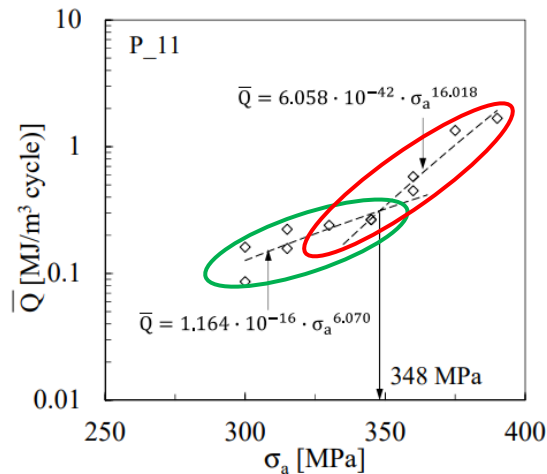


Figura 1.33 – Risultati sperimentali utilizzando l'energia termica dissipata, ricavata tramite il gradiente di temperatura, come parametro per stimare il limite di fatica. [11]

Si è infine proceduto ad eseguire l'analisi mediante il metodo sia il *Conventional lock-in* sia il *Phase lock-in* di Shiozawa, calcolando sia q sia $dq/d\sigma_a$ mediante i due metodi. È stato inoltre calcolata la differenza di fase $\Delta\theta$ attraverso l'Equazione 1.36, per poter valutare $\Delta\hat{\theta}$. Si riportano ora i risultati per un provino di esempio P_10, in termini di q in Figura 1.34.

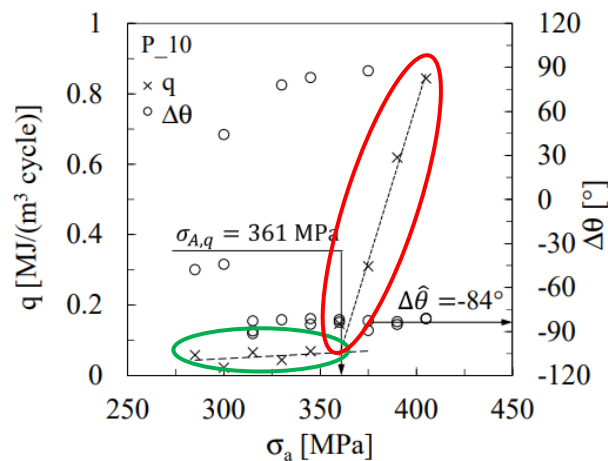


Figura 1.34 – Risultati sperimentali utilizzando l'energia termica dissipata, ricavata tramite il metodo Lock-in convenzionale, come parametro per stimare il limite di fatica. [11]

In Figura 1.35 si riportano i risultati della stima del limite di fatica utilizzando il parametro $dq/d\sigma_a$ con i due metodi di Shiozawa, anche qui per un provino di riferimento, il P_8. In azzurro, sono cerchiati i valori sopra il limite di fatica utilizzando il metodo *Phase lock-in* mentre in rosso sono cerchiati i punti sperimentali utilizzando il metodo *Conventional lock-in*, sempre sopra il limite di fatica.

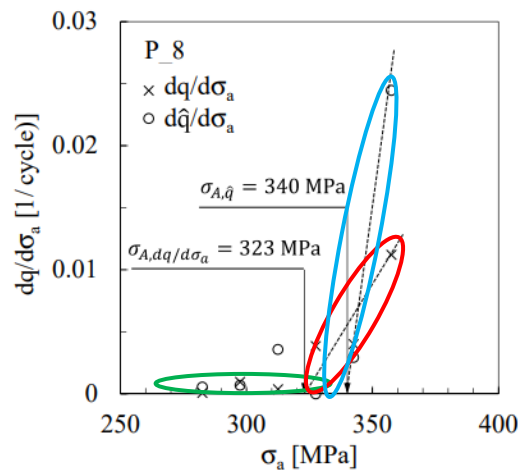


Figura 1.35 – Risultati sperimentali utilizzando la variazione di energia termica dissipata, ricavata tramite il metodo Lock-in convenzionale e Phase Lock-in, come parametro per stimare il limite di fatica. [11]

È stato poi utilizzato un metodo di trazione statico, basato sempre sulla temperatura, per stimare il limite di fatica. Infine, si è proceduto a fare il confronto tra i diversi metodi termici ed energetici utilizzati per stimare il limite di fatica, con la procedura staircase descritta da normativa, qui identificata dalla linea orizzontale (v. Figura 1.36).

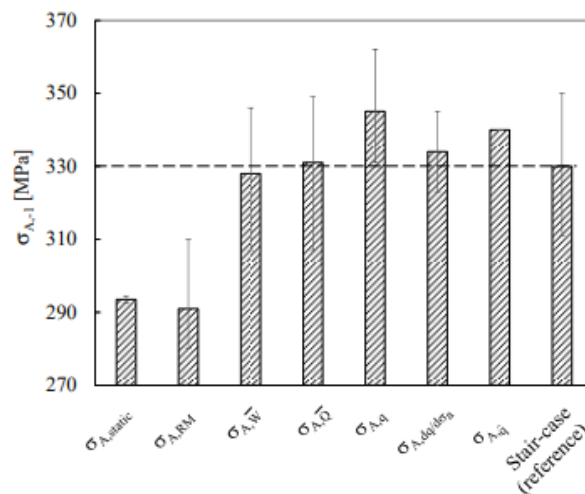


Figura 1.36 – Confronto tra il limite di fatica $\sigma_{A,-1}$ calcolato con i diversi approcci, rispetto a quello calcolato con la procedura staircase. [11]

Si può cogliere come i metodi energetici siano molto vicini al $\sigma_{A,-1}$ ricavato tramite staircase, mentre il metodo di Risitano e quello basato sul test di trazione statico, mostrino una maggiore differenza, rispettivamente del 11.8% e dell'11%; ciò a testimonianza di come, nonostante siano metodi approssimati per una stima del limite di fatica, i metodi energetici mostrino una forte coerenza tra di loro in termini di risultati sperimentali; d'altra parte, invece, i metodi basati sull'utilizzo della temperatura, sono fortemente influenzati dalle condizioni al contorno sia termiche (temperatura della stanza e degli afferraggi del macchinario di prova) sia meccaniche (frequenza di carico e geometria dei provini), come precedentemente descritto al paragrafo 1.2.3.

In conclusione, si può riassumere che diversi approcci termici (basati sulla temperatura e sull'energia) sono stati utilizzati per stimare rapidamente la resistenza a fatica di un materiale a rapporto di ciclo $R=-1$. Si è osservato che innanzitutto sono necessari almeno tre provini per avere una stima che sia sufficientemente attendibile; inoltre, i metodi energetici sono più aderenti ai risultati ottenuti secondo la procedura prevista da normativa, mostrando uno scostamento del 4%.

D'altro canto, per stimare l'energia meccanica racchiusa in un ciclo di isteresi è necessario solo un estensometro o un estensimetro, i quali sono strumenti che solitamente si trovano all'interno di un laboratorio e dunque è la più facile tra le grandezze energetiche da misurare.

Per quanto riguarda la stima dell'energia termica dissipata, se si utilizza la tecnica del gradiente di temperatura non è necessario utilizzare una termocamera, indispensabile invece per l'uso del metodo *Lock-in*, bensì si può utilizzare un sensore di temperatura come una termocoppia.

1.8 Stima della dissipazione intrinseca mediante l'uso della seconda armonica: parametro Beta

1.8.1 Introduzione al modello e richiami teorici

È stato recentemente proposto da Meneghetti e Ricotta in [23] un approccio analitico per correlare la dissipazione intrinseca alla seconda armonica del segnale di temperatura, valutata tramite la trasformata di Fourier. Il modello teorico assume, senza perdita di generalità, la conversione totale di energia meccanica in calore. Sono stati considerati due classi di materiali avente caratteristiche reologiche differenti, ovvero materiali dal comportamento elastico-perfettamente plastico e materiali che seguono la legge di Ramberg-Osgood. Si è ricavato che, a differenza di quanto sostengono Shiozawa e i suoi collaboratori, la dissipazione intrinseca è correlata alla seconda armonica della temperatura tramite un parametro qui definito come *beta*, il quale si dimostrerà essere dipendente dal tipo di materiale considerato.

Procedendo con la trattazione, si può constatare che il fenomeno di fatica è un processo irreversibile, accompagnato da cambiamenti microstrutturali, deformazioni plastiche localizzate e dissipazioni energetiche. Generalmente durante un ciclo di fatica, la temperatura oscilla, come già accennato al paragrafo 1.6.8, a causa della sovrapposizione di due fenomeni: l'effetto termoelastico, ΔT_{the} , il quale è un fenomeno irreversibile, e la variazione di temperatura ΔT_p legata all'energia dissipata a causa della plasticizzazione sottoforma di calore, che avviene due volte durante un ciclo di fatica.

Più nel dettaglio, quando la temperatura è tale da non alterare le proprietà del materiale, ΔT_{the} è legata al range di tensione applicata tramite l'Equazione 1.40, precedentemente espressa al paragrafo 1.6.7 sottoforma di ampiezza:

$$\Delta T_{the} = -T_0 \left(\frac{\alpha}{\rho \cdot c} \right) \cdot \Delta \sigma_{ii} \quad (1.40)$$

Sempre espressa nelle ipotesi di materiale isotropo e sottoposto a una trasformazione adiabatica. Pertanto, se viene applicato un ciclo di carico sinusoidale, la variazione di temperatura per effetto termoelastico avviene alla stessa frequenza del carico applicato. ΔT_{the} può dunque essere determinato ricavando la prima armonica della Trasformata Discreta di Fourier (DFT) del segnale di temperatura.

D'altro canto, ΔT_p , nel caso di un ciclo di fatica trazione-compressione, è costituita da diverse armoniche, di cui però quella relativa a una frequenza doppia rispetto a quella del carico, è ritenuta la componente più significativa. Partendo dunque dall'osservazione intuitiva che durante un ciclo di fatica, si manifestano due picchi di temperatura, Meneghetti e Ricotta hanno studiato la correlazione tra dissipazione intrinseca e la seconda armonica della temperatura, introducendo la seguente espressione:

$$\bar{W} = \bar{Q}_p \rightarrow \rho \cdot c \cdot 2 \cdot \Delta T_2 \cdot \beta \quad (1.41)$$

Laddove β è un coefficiente da determinare, \bar{Q}_p rappresenta la dissipazione intrinseca per unità di volume per ogni ciclo $[J/(m^3 \cdot ciclo)]$, mentre \bar{W} è l'energia plastica di deformazione per ciclo $[J/(m^3 \cdot ciclo)]$, che è diversa dall'area del ciclo di isteresi qui denominata con W_{hyst} . Il fattore 2 tiene conto del fatto che la dissipazione associata alla plasticizzazione si manifesta due volte per ciclo.

Si vogliono richiamare ora alcuni concetti base, in modo da supportare la trattazione analitica, che qui verrà brevemente accennata e che può essere vista molto più nel dettaglio in [23].

In accordo con la meccanica classica del continuo, il bilancio energetico può essere scritto in termini di potenza per unità di volume, introducendo l'energia libera di Helmholtz come potenziale termodinamico, come segue (il punto indica la derivata temporale):

$$\rho c \dot{T} - \lambda \nabla^2 T = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p - \dot{E}_s - \alpha \cdot T \cdot \text{Tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}) + \dot{v}_e \quad (1.42)$$

Dove T è la temperatura del materiale, $\dot{W} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p$ è la densità di potenza di deformazione plastica e \dot{E}_s è la potenza immagazzinata, che include anche la quota parte responsabile del danneggiamento per fatica; $\dot{Q}_{the} = \alpha \cdot T \cdot \text{Tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}})$ è la potenza termica legata alla termoelasticità e \dot{v}_e è la potenza termica per unità di volume fornita o estratta dal materiale mediante sorgenti esterne. I primi due termini a destra del segno di uguale sono identificati come la "dissipazione intrinseca", quali ponendoli uguali a \dot{Q}_p , e imponendo che $\lambda \nabla^2 T = \dot{Q}$, si ottiene dall'Equazione 1.42, la seguente:

$$\rho c \dot{T} - \dot{Q} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_{the} + \dot{v}_e \quad (1.43)$$

Assumendo che il materiale sia omogeneo e che la distribuzione di temperatura non sia affetta dalla natura della sorgente termica interna, \dot{Q}_p e \dot{Q}_{the} possono essere pensate come potenze equivalenti plastiche e termoelastiche, all'interno di un problema puramente termico.

Se le quantità presenti nell'Equazione 1.43 vengono mediate su un ciclo di carico, allora il contributo termoelastico sparisce perché esso consiste in uno scambio *reversibile* tra energia meccanica e termica, il quale non produce una dissipazione netta di energia in un ciclo. Inoltre, in assenza di sorgenti esterne termiche $\dot{v}_e = 0$; pertanto l'Equazione 1.43 si può scrivere come:

$$\rho c \dot{T} - \dot{Q} = \dot{Q}_p \quad (1.44)$$

Quando la temperatura stabilizza, durante una prova di fatica, poiché si raggiunge l'equilibrio tra la produzione di calore nel materiale e il suo trasferimento all'ambiente circostante, allora \dot{T} diventa nullo, e dunque l'Equazione precedente diventa:

$$\dot{Q} = -\dot{Q}_p \quad (1.45)$$

Se la prova viene fermata bruscamente a un istante $t = t^*$, allora subito dopo ovvero per $t = t^{*+}$, \dot{Q}_p diventa nulla. Riscrivendo allora il bilancio di energia, otteniamo:

$$\dot{Q} = \rho \cdot c \cdot \dot{T} \Big|_{t=(t^*)^+} \quad (1.46)$$

Bisogna notare che \dot{Q} dissipato verso l'ambiente, appena prima e appena dopo t^* , è lo stesso sia nell'Equazione 1.45 che nell'Equazione 1.46, in quanto il campo di temperatura non varia attraverso t^* . Infine, in accordo con [3], ovvero con quanto precedentemente riportato nel Paragrafo 1.6.4, si ottiene l'energia termica dissipata per unità di volume e ciclo:

$$\bar{Q}_p = \frac{\rho \cdot c \cdot \dot{T}|_{t=(t^*)+}}{f_L} \quad (1.47)$$

In cui f_L rappresenta la frequenza con il quale viene applicato il carico di fatica.

Fatte tali precisazione nell'introduzione del modello, bisogna ora suddividere la trattazione analitica a seconda del tipo di ciclo a cui è soggetto il materiale, in quanto le ipotesi, le equazioni e infine il valore del parametro Beta, saranno dipendenti dal fatto di avere trazione-compressione ($R=-1$) oppure trazione-trazione (cioè $R>0$).

1.8.2 Second Harmonic Approach: trazione-compressione

Quando viene raggiunto l'equilibrio tra il calore prodotto nel provino e quello trasferito all'ambiente, la temperatura stabilizzata del materiale può essere assunta come una funzione periodica, esprimibile mediante la Serie di Fourier, come segue:

$$T(t) = \bar{T}_s + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cdot \cos(k\omega_L t) + B_k \cdot \sin(k\omega_L t)] \quad (1.48)$$

In cui:

$$\bar{T}_s = \frac{1}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} T(t) dt \quad (1.49a)$$

$$A_k = \frac{2}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} T(t) \cdot \cos(k \cdot \omega_L \cdot t) dt \quad (1.49b)$$

$$B_k = \frac{2}{\hat{T}} \int_0^{\hat{T}} T(t) \cdot \sin(k \cdot \omega_L \cdot t) dt \quad (1.49c)$$

Laddove $\omega_L = 2\pi f_L$ e $\hat{T} = 2\pi/\omega_L = 1/f_L$. La seconda armonica e il suo *range* sono definiti in accordo con le Equazioni 1.50a e 1.50b

$$T_2(t) = A_2 \cdot \cos(2\omega_L t) + B_2 \cdot \sin(2\omega_L t) \quad (1.50a)$$

$$\Delta T_2 = 2 \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \quad (1.50b)$$

Per valutare il parametro Beta β , sono state considerate tre ipotesi di lavoro:

1. La potenza specifica associata alla deformazione plastica \dot{W} viene completamente convertita in potenza termica sottoforma di calore \dot{Q}_p (cioè $\dot{E}_s = 0$); questa ipotesi, sebbene ideale, è supportata da diversi esperimenti [4]; ad ogni modo assumendo anche che \dot{Q}_p sia una frazione di \dot{W} , il risultato in termini di β non cambia, in quanto viene già conteggiato il problema termico nell'Equazione 1.41;
2. Nel materiale sussista un campo di tensione e di temperatura uniforme (ovvero esistano condizioni adiabatiche internamente, $\nabla^2 T = 0$, allora $\dot{Q} = 0$ nell'Equazione 1.43 ed inoltre la temperatura diventa funzione solo della variabile tempo);
3. Per raggiungere le condizioni di stabilizzazione, l'estrazione di calore dal volume di materiale è simulata da un dissipatore (*heat sink*) v_e in modo tale che $\dot{v}_e = -\bar{W} \cdot f_L$; in altre parole, la dissipazione di calore per ciclo che racchiude gli effetti di plasticizzazione è esattamente rimossa dal dissipatore.

Sotto queste tre ipotesi di lavoro, l'Equazione 1.43 può essere riscritta come:

$$\rho \cdot c \cdot \dot{T} + \rho \cdot c \cdot \dot{T}_{the} + \rho \cdot c \cdot \dot{T}_{sink} = \dot{W} + \dot{Q}_{the} - \bar{W} \cdot f_L \quad (1.51)$$

In cui T_p e T_{the} rappresentano rispettivamente la temperatura legata agli effetti plastici e alla termoelasticità; T_{sink} è la temperatura associata all'*heat sink* v_e .

Come precedentemente accennato, il parametro Beta è dipendente dal tipo di materiale che si sta considerando; in [23] vengono trattati due casi: il primo legato a un materiale avente comportamento elastico-perfettamente plastico, mentre il secondo appartiene alla classe dei materiali che obbediscono alla legge di Ramberg-Osgood.

Ritenendo per gli scopi di questa Tesi, più importante la trattazione relativa al secondo caso, si accennerà brevemente nel prossimo paragrafo ai risultati su un materiale elastico-perfettamente plastico, mentre si approfondirà di più la seconda classe di materiali. Si rimanda, ad ogni modo, il lettore a [23] per una trattazione analitica completa dei due casi, di cui, come detto, qui si presenteranno le informazioni più importanti.

1.8.3 Materiale elastico-perfettamente plastico: trazione-compressione

Se consideriamo un materiale, in controllo di deformazione, dal comportamento elastico-perfettamente plastico, questo presenta un comportamento elastico lineare fintanto che esso raggiunge la tensione di snervamento, qui indicata con σ_y . In Figura 1.37, si riporta il ciclo di isteresi di un materiale con tale comportamento, in cui per la trattazione analitica è stato fissato un sistema di riferimento ausiliario nel vertice inferiore sinistro.

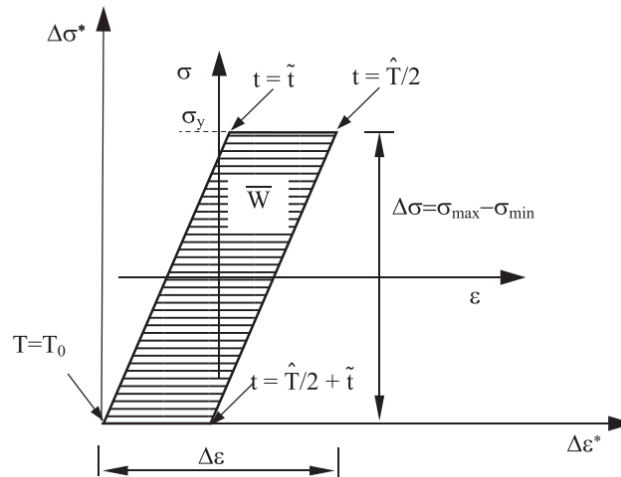


Figura 1.37 –Ciclo di isteresi per un materiale elastico-perfettamente plastico. [23]

Si può notare come il ciclo di isteresi assuma una forma di parallelepipedo, legata alle caratteristiche reologiche del materiale. Applicando un carico mediante un'onda rettangolare per semplicità, ma senza perdere di generalità nella trattazione, ed eseguendo notevoli passaggi analitici, molto bene descritti in [23], si è potuto risalire a una determinazione analitica dei coefficienti $\bar{T}_s, A_1, B_1, A_2, B_2$. Per valutare la dissipazione intrinseca su un ciclo di fatica, \bar{Q}_p , usando il range della seconda armonica del segnale di temperatura, il parametro β è stato valutato mediante l'Equazione 1.41. Si è ottenuto che β dipende dal rapporto $\frac{\epsilon_a}{\sigma_y/E}$, il quale rappresenta il rapporto tra l'ampiezza di deformazione applicata e la deformazione a snervamento del materiale elastico-perfettamente plastico. Diversamente, β è indipendente da ρ, c, f_L . L'andamento di β al variare del rapporto precedentemente descritto, è riportato in Figura 1.38.

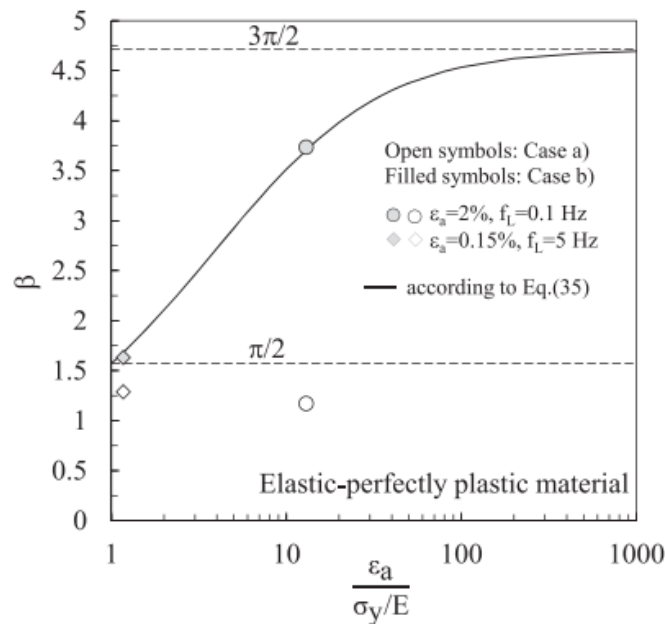


Figura 1.38 – Parametro beta, funzione del rapporto dell'ampiezza di deformazione, per un materiale elastico-perfettamente plastico. [23]

Si può notare che β varia tra $\pi/2$ e $3\pi/2$ quando $\frac{\varepsilon_a}{\sigma_y/E} > 1$. Si deve tenere conto che β è stato valutato nelle ipotesi ideali che l'equilibrio termico sia imposto da un dissipatore (*heat sink*), il quale linearmente rimuove il calore generato in un ciclo dal materiale tramite dissipazione intrinseca. Nell'Appendice A di [23] sono state utilizzate delle ipotesi più realistiche sul trasferimento di calore, ma si è osservato che β varia di pochi punti percentuali rispetto ai valori riportati in Figura 1.38.

1.8.4 Materiale elasto-plastico: trazione-compressione

Consideriamo ora un materiale elasto-plastico che segue la legge di Ramberg-Osgood, in una prova di fatica trazione-compressione in controllo di forza, caricato mediante un'onda sinusoidale. Valutando la tensione macroscopicamente come $\sigma(t) = \sigma_a \sin(\omega_L t)$, in cui σ_a è l'ampiezza di tensione, la deformazione elastica e plastica può essere scritta rispettivamente come:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{E} = \frac{\sigma_a \sin(\omega_L t)}{E} \quad (1.52a)$$

$$\varepsilon_p(t) = \left(\frac{\sigma(t)}{K'} \right)^{1/n'} = \left[\frac{\sigma_a \sin(\omega_L t)}{K'} \right]^{1/n'} \quad (1.52b)$$

In cui K' e n' sono, rispettivamente, il coefficiente di resistenza ciclico e il coefficiente di incrudimento ciclico del materiale. Per valutare analiticamente la densità di potenza spesa per la plasticizzazione su un ciclo di fatica, nuovamente è stato definito un sistema di riferimento ausiliario posizionato nel vertice inferiore sinistro (v. Figura 1.39).

Di conseguenza, il range di tensione può essere descritto dall'Equazione 1.53.

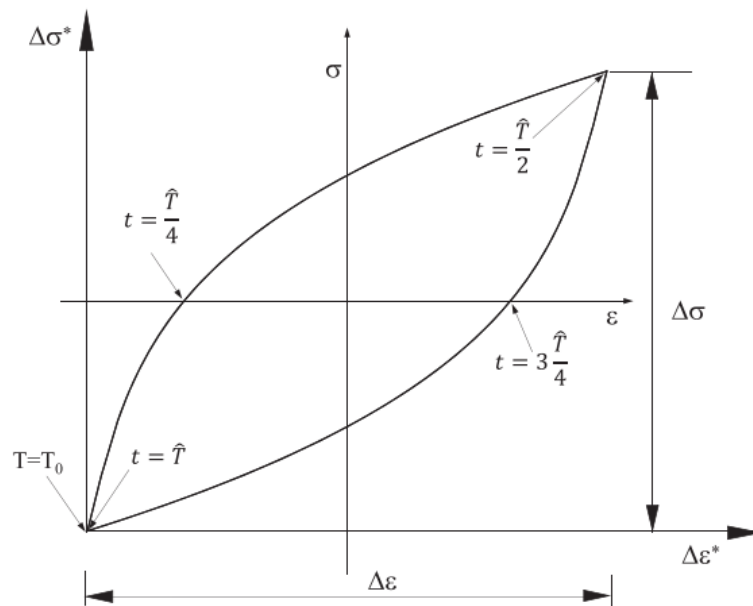


Figura 1.39 –Ciclo di isteresi per un materiale elasto-plastico che segue la legge di Ramberg-Osgood. [23]

$$\Delta\sigma^*(t) = \sigma_a[1 - \cos(\omega_L t)] \quad (1.53)$$

E dunque, in termini di range di deformazioni:

$$\Delta\varepsilon_e^*(t) = \frac{\Delta\sigma^*(t)}{E} = \frac{\sigma_a[1 - \cos(\omega_L t)]}{E} \quad (1.54a)$$

$$\Delta\varepsilon_p^*(t) = 2 \left(\frac{\sigma(t)}{2 \cdot K'} \right)^{1/n'} = 2 \left[\frac{\sigma_a(1 - \cos(\omega_L t))}{2 \cdot K'} \right]^{1/n'} \quad (1.54b)$$

per $0 \leq t \leq \hat{T}/2$

$$\Delta\varepsilon_p^*(t) = \Delta\varepsilon_p^* \left(\frac{\hat{T}}{2} \right) - 2 \left[\frac{\sigma_a(1 - \cos(\omega_L t))}{2 \cdot K'} \right]^{1/n'} \quad (1.54c)$$

per $\hat{T}/2 \leq t \leq \hat{T}$

In Figura 1.40 si possono osservare i diversi contributi in termini di energia plastica di deformazione dissipata in un ciclo di carico.

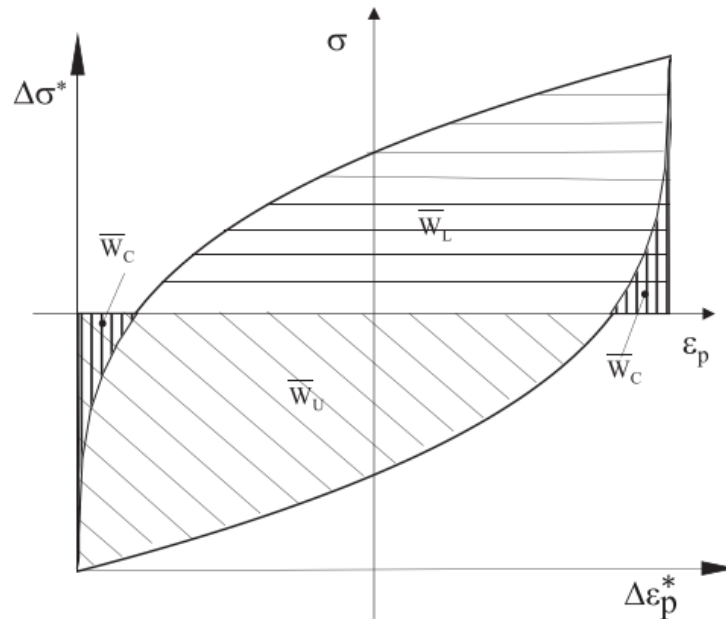


Figura 1.40 – Densità delle diverse energie plastiche dissipate durante un ciclo di fatica. [23]

I cui termini sono $\dot{W}_c(t)$ per $0 \leq t \leq \hat{T}/4$:

$$\begin{aligned}\dot{W}_c(t) &= [\sigma_a - \Delta\sigma^*(t)] \cdot \frac{d}{dt} \Delta\varepsilon_p^*(t) \\ &= \frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t) \cdot \cos(\omega_L t) \\ &\quad \cdot [(1 - \cos(\omega_L t))^{\frac{1}{n'}-1}]\end{aligned}\tag{1.55a}$$

Dopodiché, $\dot{W}_c\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right)$ per $\hat{T}/2 \leq t \leq 3 \cdot \hat{T}/4$:

$$\begin{aligned}\dot{W}_c\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) &= \frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t + \pi) \cdot \cos(\omega_L t + \pi) \\ &\quad \cdot [(1 - \cos(\omega_L t + \pi))^{\frac{1}{n'}-1}]\end{aligned}\tag{1.55b}$$

E invece per $\hat{T}/4 \leq t \leq \hat{T}/2$, $\dot{W}_L(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{W}_L(t) &= [\Delta\sigma^*(t) - \sigma_a] \cdot \frac{d}{dt} \Delta\varepsilon_p^*(t) \\ &= -\frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t) \cdot \cos(\omega_L t) \\ &\quad \cdot [(1 - \cos(\omega_L t))^{\frac{1}{n'}-1}]\end{aligned}\tag{1.56a}$$

E infine per $3 \cdot \hat{T}/4 \leq t \leq \hat{T}$, $\dot{W}_U(t) = \dot{W}_L\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right)$:

$$\begin{aligned}\dot{W}_U(t) &= \left[\Delta\sigma^*\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) - \sigma_a \right] \cdot \frac{d}{dt} \Delta\varepsilon_p^*\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) \\ &= -\frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t + \pi) \\ &\quad \cdot \cos(\omega_L t + \pi) \cdot [(1 - \cos(\omega_L t + \pi))^{\frac{1}{n'}-1}]\end{aligned}\tag{1.56b}$$

Per maneggiare una singola equazione che definisca l'evoluzione della potenza specifica legata agli effetti plastici su un ciclo, sono state definite delle onde rettangolari come nel caso del materiale elastico-perfettamente plastico. Tali onde sono state identificate come $R_C(t)$, definita uguale a uno nella finestra temporale $0 \leq t \leq \hat{T}/4$ e uguale a zero nella restante parte del ciclo di fatica, e $R_L(t)$, uguale a uno quando $\hat{T}/4 \leq t \leq \hat{T}/2$ e uguale a zero nella restante parte del ciclo (per le espressioni si rimanda a [23]).

Allora, la potenza specifica legata agli effetti plastici è definibile come:

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) = & \dot{W}_C(t) \cdot R_C(t) + \dot{W}_L(t) \cdot R_L(t) + \dot{W}_C\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) \\ & \cdot R_C\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) + \dot{W}_L\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) \cdot R_L\left(t + \frac{\hat{T}}{2}\right) \end{aligned} \quad (1.57)$$

Riguardo alla componente di temperatura legata alla dissipazione plastica, $\Delta T_p(t)$, può essere calcolata mediante l'Equazione:

$$\rho \cdot c \cdot \dot{T}_p = \dot{W} \quad (1.58)$$

E tramite l'Equazione 1.57. Se si va a plottare $\Delta T_p(t)$ rispetto al tempo, si può osservare che in un ciclo di fatica, la temperatura legata alla plasticizzazione aumenta, fino a raggiungere un massimo quando $t = \hat{T}$, il cui valore è pari a:

$$\Delta T_p(\hat{T}) = \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot \sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{(n' + 1) \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \left[4n' - 2 \cdot 2^{\frac{1}{n'}}(n' - 1) \right] \quad (1.58)$$

In Figura 1.41 è rappresentato $\Delta T_p(t)$, $\Delta T_p(\hat{T})$ e le Equazioni 1.54b e 1.54c.

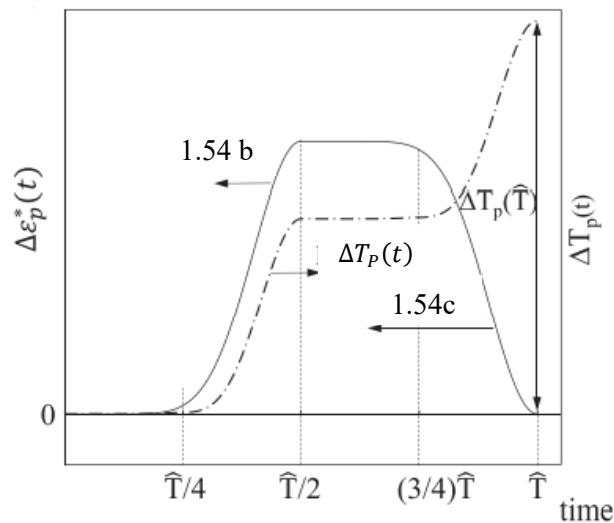


Figura 1.41 – Deformazioni plastiche e temperatura di plasticizzazione. [23]

Differentemente per il materiale dal comportamento elastico-perfettamente plastico, una soluzione in forma chiusa per A_k e B_k non è stato possibile trovarla, per tanto sono stati calcolati numericamente. In Figura 1.42 si riportano gli andamenti delle temperature. Si può osservare che, come nel caso del materiale elastico-perfettamente plastico, l'evoluzione della temperatura correlata alla plasticità non è un'onda sinusoidale; pertanto, tale figura sottolinea come il range della seconda armonica ΔT_2 non è uguale al range di temperatura per effetti plastici ΔT_p .

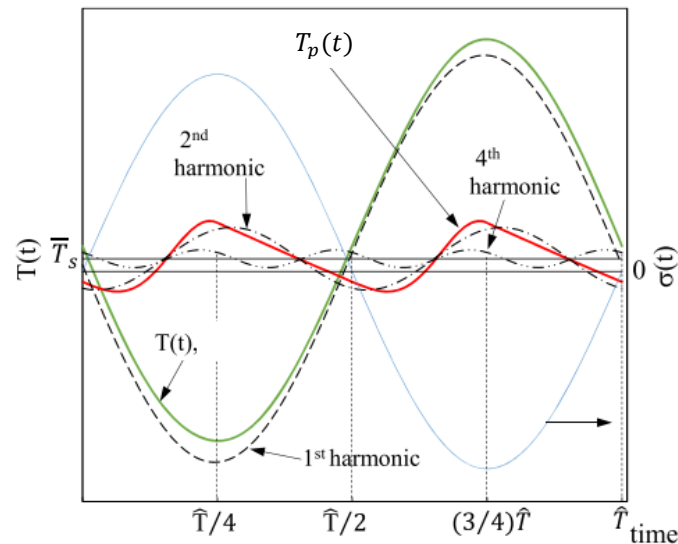


Figura 1.42 – Evoluzione della temperatura e delle sue componenti. [23]

Dopo aver determinato gli andamenti delle varie armoniche del segnale di temperatura, il parametro β è stato calcolato tramite l'Equazione 1.41, e si è osservato come esso dipenda solo dal coefficiente di incrudimento ciclico n' . L'andamento di β al variare di n' è espresso in Figura 1.43.

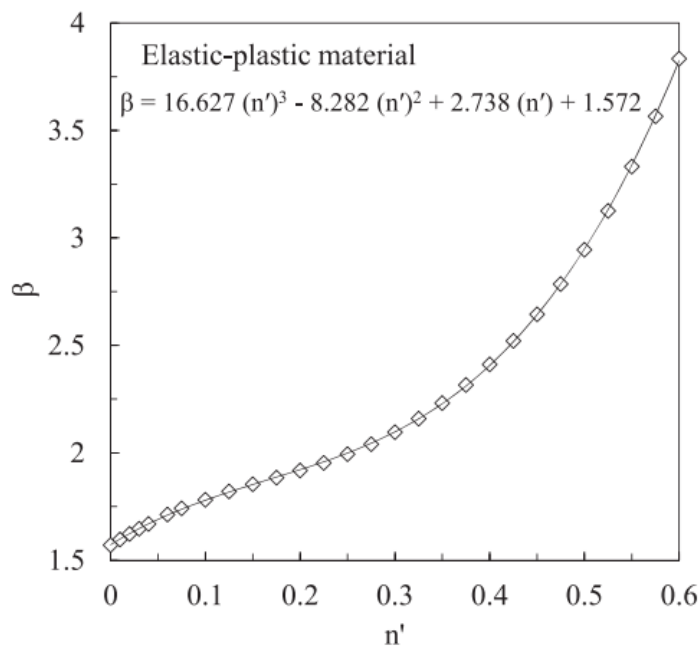


Figura 1.43 – Parametro beta per una prova trazione-compressione, dipendente solo da n' . [23]

1.8.5 Prove sperimentali trazione-compressione: parametro beta

Per verificare sperimentalmente la teoria scritta nel precedente paragrafo, sono state eseguite delle prove a gradino, su un acciaio AISI 304L [24] per adottare la procedura che stima il limite di fatica, potendola poi confrontare con la procedura stair case breve, descritta da normativa.

Le prove sono state eseguite in modo da spendere circa 10000 cicli a ciascun livello di carico, in modo che il materiale possa stabilizzarsi. L'area del ciclo di isteresi è stata calcolata mediante l'utilizzo di un estensometro MTS e ricavando i dati di forza tramite la cella di carico della macchina di prova. Per quanto concerne il monitoraggio della temperatura, è stata impiegata una termocamera FLIR SC7600, che verrà utilizzata anche nella parte sperimentale della tesi e che verrà pertanto descritta dettagliatamente in seguito. La frequenza di acquisizione è stata inoltre tarata a 204.8 Hz, acquisendo una finestra temporale di 10 s, ovvero 2048 frames, per l'applicazione del metodo della seconda armonica, e altrettanti frames per il calcolo del gradiente di temperatura.

I due metodi sono descritti in modo sintetico dalla Figura 1.44.

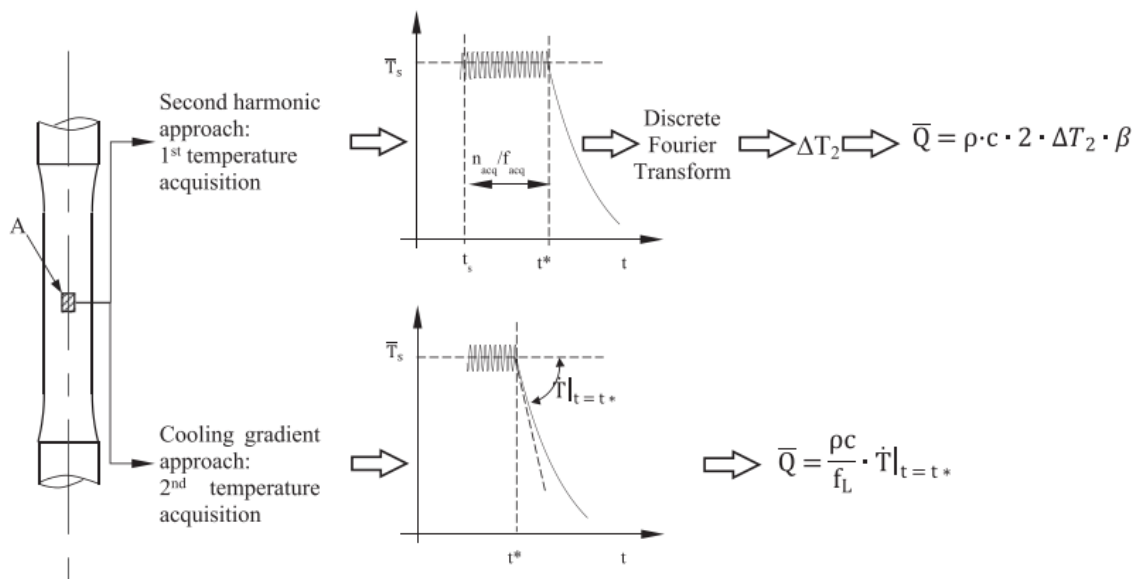


Figura 1.44 – Descrizione sintetica dei due approcci utilizzati nelle prove sperimentali per valutare l'energia dissipata sottoforma di calore. [24]

Le Equazioni descritte in [23] sono state adattate al caso discreto, com'è quello reale di misurazione, in modo da far comparire all'interno i parametri di acquisizione come, ad esempio, la frequenza di campionamento, qui scelta pari a 204.8 Hz. La DFT è stata applicata con il software MATLAB 2016. Per entrambe le tecniche è stata utilizzata la stessa area di riferimento A (v. Figura 1.44).

È stata ricavata l'area del ciclo di isteresi per ciascun livello di carico, in modo da avere un grafico W_{hyst} vs σ_a , per stimare il limite di fatica del materiale. I valori sono stati fittati tramite l'equazione 1.59, assumendo un modello Masing per il materiale:

$$\bar{W}_{hyst} = \bar{W}_L + \bar{W}_U - 2\bar{W}_C = \frac{1 - n'}{1 + n'} \cdot 4\sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1.59)$$

Laddove \bar{W}_L , \bar{W}_U , \bar{W}_C sono stati definiti nel Paragrafo 1.8.4. Il fitting dei dati è stato eseguito separatamente per i dati sopra e sotto al ginocchio della curva. Si riporta un esempio per il provino P_10, in Figura 1.45.

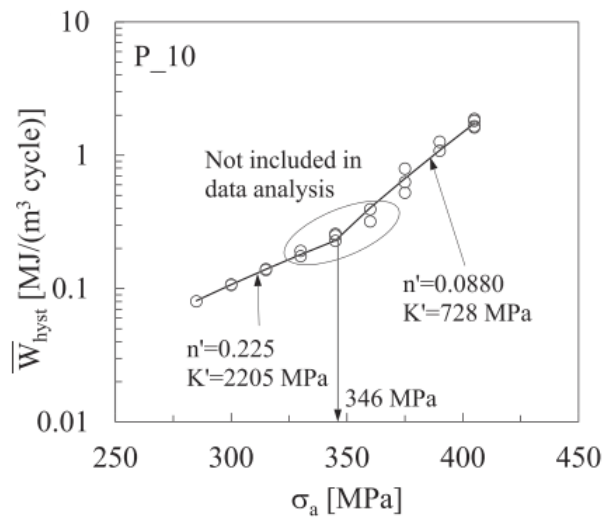


Figura 1.45 – Prove a gradino analizzate in termini di area dei cicli di isteresi. [24]

Dalla determinazione dell'esponente di incrudimento n' , si può andare a calcolare il parametro β , in accordo con l'Equazione 1.60 [23] ricavata dal modello Meneghetti-Ricotta:

$$\beta = 16.627 \cdot (n')^3 - 8.282 \cdot (n')^2 + 2.738 \cdot n' + 1.572 \quad (1.59)$$

Preso il provino P_10 a titolo di esempio, si ottengono i seguenti valori di beta: $\beta = 1.953$ al di sotto del ginocchio della curva in Figura 1.45, mentre $\beta = 1.765$ al di sopra del limite di fatica stimato.

Si deve tener conto che il materiale in esame, ovvero l'AISI 304L, anche alle basse temperature, a causa degli elevati valori di deformazione, subisce una trasformazione parziale di austenite in martensite, generando un forte incrudimento del materiale. Questo fatto, si vedrà nel seguito della tesi, influenzerà le prove condotte a R=0.1.

Infine, sono stati confrontati i valori di \bar{Q} secondo i due approcci descritti nella Figura 1.44. Si riporta di seguito i risultati per il provino P_10.

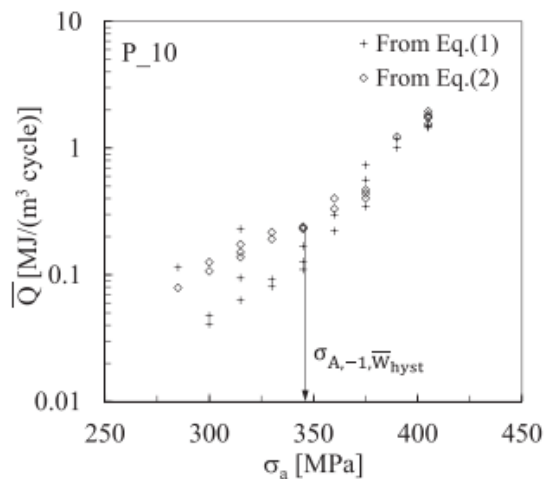


Figura 1.46 – Confronto tra l'energia dissipata in calore e l'ampiezza di tensione mediante i due approcci. [24]

Si può notare un disaccordo tra i due approcci, soprattutto per carichi al di sotto del limite di fatica. L'ipotesi, poi verificata con un modello agli Elementi Finiti, è che la diversità dei valori ottenuti con la tecnica del gradiente e con quella della seconda armonica, è legata alla presenza del rumore, in quanto la seconda armonica ha ordine di grandezza dei centesimi o addirittura millesimi di grado.

Per verificare tale considerazione, è stato quindi predisposto un modello FEM in modo da simulare il comportamento del materiale in assenza di rumore, in condizioni cioè ideali.

I risultati sono stati confrontati con i valori sperimentali sul provino P_11. Ciò che si è osservato con i risultati FEM è che sopra il ginocchio della curva (cioè sopra il limite di fatica) si otteneva un $\bar{Q} = 0.489 \frac{MJ}{m^3 ciclo}$ e $\bar{Q} = 0.488 \frac{MJ}{m^3 ciclo}$ rispettivamente con la tecnica della seconda armonica e con il gradiente, mentre al di sotto si otteneva $\bar{Q} = 0.134 \frac{MJ}{m^3 ciclo}$ e $\bar{Q} = 0.134 \frac{MJ}{m^3 ciclo}$ sempre con il *Second Harmonic approach* e il gradiente di temperatura.

Per tanto, la conclusione a cui si è arrivati in [24] è che la discrepanza tra i due metodi è strettamente legata alla presenza del rumore di fondo, che influenza pesantemente il risultato sperimentale, soprattutto ai bassi carichi laddove la plasticità è estremamente ridotta. A carichi più alti, la differenza tra i risultati secondo i due approcci diventa via via minore.

1.8.6 Materiale elasto-plastico: trazione-trazione

In [36] si è proceduto ad estendere analiticamente l'approccio al caso di rapporto di ciclo $R > 0$, cioè nel caso in cui il materiale sia sottoposto a pura trazione, senza andare in compressione. Riprendendo ciò che è stato in precedenza detto, durante una prova di fatica in campo elasto-plastico a rapporto di ciclo $R = -1$, la temperatura oscilla a causa di due principali effetti: la termoelasticità, il quale è un fenomeno reversibile, e la temperatura legata alla plasticità. Riguardo a questa componente, essa può essere suddivisa in varie armoniche di cui però la seconda è la più importante. L'obiettivo di è di legare sempre l'energia dissipata sottoforma di calore al range della seconda armonica, mediante il parametro β , il quale si dimostrerà essere nuovamente dipendente dal solo esponente di incrudimento n' (sempre nel caso di un materiale elasto-plastico).

Per la trattazione analitica iniziale, si rimanda al paragrafo 1.8.1, dall' Equazione 1.42 alla 1.47.

Si deve precisare che per il caso trazione-compressione, sono state definite tre ipotesi (v. Paragrafo 1.8.2). Nel caso invece di $R > 0$, in base alla conoscenza degli autori di [36], non c'è nessuna evidenza sperimentale che \bar{W} viene totalmente convertito in \bar{Q} , pertanto la precedente ipotesi 1) viene rimossa, mentre le restanti due vengono mantenute. Di seguito le si riportano per sottolineare la loro importanza:

- Nel materiale sussista un campo di tensione e di temperatura uniforme (ovvero esistano condizioni adiabatiche internamente, $\nabla^2 T = 0$, allora $\dot{Q} = 0$ nell'Equazione 1.43 ed inoltre la temperatura diventa funzione solo della variabile tempo);
- Per raggiungere le condizioni di stabilizzazione, l'estrazione di calore dal volume di materiale è simulata da un dissipatore (*heat sink*) v_e in modo tale che $\dot{v}_e = -\bar{W} \cdot f_L$; in altre parole, la dissipazione di calore per ciclo che racchiude gli effetti di plasticizzazione è esattamente rimossa dal dissipatore.

Allora, l'Equazione 1.51 viene modificata in forma generale, introducendo un coefficiente $\Psi \leq 1$ per tener conto che \dot{Q}_p possa essere una frazione di \dot{W} , cioè $\dot{Q}_p = \Psi \dot{W}$. Inoltre, il coefficiente 2 nell'Equazione 1.41 viene mantenuto perché anche nel caso $R > 0$ la dissipazione intrinseca, legata alla plasticità, viene a manifestarsi due volte in un ciclo di carico, la prima durante la fase di carico e la seconda durante la fase di scarico.

Alla luce di ciò, il bilancio di energia espresso in potenza può essere scritto come:

$$\rho \cdot c \cdot \dot{T}_p + \rho \cdot c \cdot \dot{T}_{the} + \rho \cdot c \cdot \dot{T}_{sink} = \Psi \dot{W} + \dot{Q}_{the} - \Psi \bar{W} \cdot f_L \quad (1.60)$$

Nell'Equazione 1.60, T_p e T_{the} sono la temperatura di plasticizzazione e termoelastica, rispettivamente. T_{sink} assume lo stesso significato descritto precedentemente al paragrafo 1.8.2. La soluzione dell'Eq. 1.60 fornisce la temperatura stabilizzata del materiale. Nuovamente, la temperatura stabilizzata può essere assunta come una funzione periodica. Si possono pertanto applicare le Eq. 1.48, 1.49, 1.49b, 1.49c (v. Paragrafo 1.8.2) per ricavare le seguenti:

$$\Delta T_1 = 2 \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (1.61a)$$

$$\Delta T_2 = 2 \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \quad (1.61b)$$

Rispettivamente per la prima e seconda armonica.

Nuovamente si procede con le medesime considerazioni ed Equazioni definite nel Paragrafo 1.8.4, per un materiale che segue la legge di Ramberg-Osgood, adattandole al caso di pura trazione. Considerate infatti le Eq. 1.53, 1.54a, 1.54b, 1.54c e considerando che le Eq. 1.49b e 1.49c sono definite per $0 \leq t \leq \hat{T}/2$ e $\hat{T}/2 \leq t \leq \hat{T}$ rispettivamente, si ottiene che la potenza spesa per la plasticizzazione $\dot{W}_L(t)$, per $0 \leq t \leq \hat{T}/2$, è uguale a:

$$\begin{aligned} \dot{W}_L(t) &= [\Delta\sigma^*(t) + \sigma_{min}] \cdot \frac{d}{dt} \Delta\varepsilon_p^*(t) \\ &= \frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t) \\ &\quad \cdot \left[\frac{2R}{1-R} + 1 - \cos(\omega_L t) \right] \cdot [(1 - \cos(\omega_L t))^{\frac{1}{n'}-1}] \end{aligned} \quad (1.62a)$$

In cui R è il rapporto di ciclo, rapporto tra la tensione minima e quella massima. Mentre per quanto concerne $\dot{W}_U(t)$, per $\hat{T}/2 \leq t \leq \hat{T}$, esso coincide con:

$$\begin{aligned} \dot{W}_U(t) &= [\Delta\sigma^*(t) + \sigma_{min}] \cdot \frac{d}{dt} \Delta\varepsilon_p^*(t) \\ &= -\frac{\omega_L}{n'} \cdot \frac{\sigma_a^{\frac{1}{n'}+1}}{2^{\frac{1}{n'}-1} \cdot K'^{\frac{1}{n'}}} \cdot \sin(\omega_L t) \\ &\quad \cdot \left[\frac{2R}{1-R} + 1 - \cos(\omega_L t) \right] \cdot [(1 - \cos(\omega_L t))^{\frac{1}{n'}-1}] \end{aligned} \quad (1.62b)$$

Nuovamente, per maneggiare una singola equazione, sono state definite delle onde rettangolari, come già descritto al Paragrafo 1.8.4, ovvero $R_L(t)$ uguale a uno nella finestra temporale $0 \leq t \leq \hat{T}/2$ e zero nella restante parte del ciclo di fatica, e $R_U(t)$ uguale a uno in $\hat{T}/2 \leq t \leq \hat{T}$ e zero nel resto del ciclo.

Allora, la potenza specifica legata agli effetti plastici è definibile come:

$$\dot{W}(t) = \dot{W}_L(t) \cdot R_L(t) + \dot{W}_U(t) \cdot R_U(t) \quad (1.63)$$

Riguardo alla componente di temperatura legata alla dissipazione plastica, $\Delta T_p(t)$, può essere calcolata mediante l'Equazione 1.58 e tramite l'Equazione 1.63. Se si va a plottare $\Delta T_p(t)$ rispetto al tempo, si può osservare che in un ciclo di fatica, la temperatura legata alla plasticizzazione aumenta, fino a raggiungere un massimo quando $t = \hat{T}$.

La soluzione dell'Eq. 1.60 risulta pertanto pari a:

$$\Delta T(t) = \Delta T_p(t) + \Delta T_{the}(t) + \Delta T_{sink}(t) \quad (1.64)$$

I cui pedici sono stati in precedenza descritti.

Avendo come obiettivo il calcolo di \dot{Q} , l'input termoelastico è stato trascurato, e l'Eq. 1.64 diventa:

$$\Delta T_{p,st}(t) = \Delta T_p(t) + \Delta T_{sink}(t) \quad (1.65)$$

Infine, per il calcolo dell'energia termica dissipata sottoforma di calore a fatica mediante l'uso della seconda armonica, è stato calcolato numericamente il parametro β . Si è ottenuto come esso sia dipendente esclusivamente da una proprietà del materiale, ovvero l'esponente di incrudimento ciclico n' . La sua Equazione per $R > 0$ è riportata di seguito:

$$\beta = 0.566 \cdot (n')^2 + 2.671 \cdot n' + 1.572 \quad (1.66)$$

Per quanto concerne i risultati sperimentali, questi verranno descritti nei paragrafi successivi, in quanto alcuni dei risultati riportati in [36], sono stati elaborati in parte come obiettivo della presente Tesi.

1.8 Obbiettivi del presente lavoro di tesi

Dopo aver dedicato l'intero Capitolo 1 alla presentazione degli approcci energetici, si vuole indicare ora i principali obbiettivi e motivazioni del presente lavoro di Tesi. In primis si andrà ad approfondire l'approccio in Q basato sul gradiente di temperatura, forte di già più di dieci anni di risultati sperimentali. Si affronteranno prove di fatica ad ampiezza costante e a gradini in modo da costruire le curve di Woehler e le curve di fatica in Q , analizzando i vantaggi dell'uso dell'energia come parametro danneggiante. Le prove sono a rapporti di ciclo -1 e 0.1 in modo da studiare l'effetto tensione media, per poter costruire la curva in \bar{Q} . L'obbiettivo è quello di riuscire a condensare in un'unica banda di dispersione i risultati sperimentali ottenuti a R diversi.

L'obbiettivo principale però della Tesi è quello di studiare il metodo Second Harmonic proposto da Meneghetti e Ricotta, già testato in prove a $R=-1$ ed estenderlo anche al caso di $R>0$, verificando la compatibilità con Q ricavato da gradiente.

La possibilità di utilizzare il metodo basato sulla seconda armonica renderebbe più rapido il calcolo dell'energia dissipata Q , non dovendo procedere all'interruzione della prova. D'altro canto, però, Q gradiente risulta essere tutt'oggi il punto di riferimenti stabile per il calcolo di Q .

Capitolo 2

PROCEDURA E APPARATO SPERIMENTALE PER PROVE DI RESISTENZA A FATICA CON MONITORAGGIO DELLA DEFORMAZIONE E TEMPERATURA DEL PROVINO

2.1 Introduzione

In questo capitolo vengono raccolti i risultati sperimentali condotti su provini lisci in acciaio inossidabile austenitico AISI 304 L. I provini sono ottenuti da piastre laminate a caldo aventi spessore nominale di 4 mm. Le prove di fatica sono state eseguite utilizzando la macchina Schenck presente nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova; tali prove, sono state fatte utilizzando due diversi rapporti di ciclo, ovvero $R=-1$ e $R=0.1$, in modo da studiare il comportamento in assenza e in presenza di una tensione media maggiore di zero. In particolare, durante le prove è stata sempre monitorata la temperatura superficiale del provino, dapprima tramite l'utilizzo di una termocoppia, e successivamente mediante l'uso di una termocamera a raggi infrarossi. Allo stesso tempo, è stata misurata anche la deformazione sul tratto utile del provino, tramite un estensometro MTS e mediante i dati ricavati dalla cella di carico della macchina, si è risaliti ai cicli di isteresi del materiale. I provini sono stati sottoposti a carichi sinusoidali di ampiezza fissata, con frequenze variabili sia al variare del carico, sia durante la prova stessa; tale frequenza è stata fissata di volta in volta, in modo tale da avere temperature che non superassero i 60°C circa per i carichi più alti, mentre ai carichi più bassi si è aumentata la frequenza in modo da avere temperature di almeno $35-40^{\circ}\text{C}$. Queste accortezze sono state fatte in modo tale da avere temperature sufficientemente alte per poter applicare i metodi energetici basati su Q (v. Capitolo 1, Paragrafo 1.6.4). Per quanto concerne la determinazione di Q (descritto in modo completo nel Capitolo successivo) mediante la tecnica del gradiente, una volta impostata la frequenza di carico, si è atteso che la temperatura si stabilizzasse, dopodiché veniva interrotta bruscamente la prova, in modo che il materiale si raffreddasse inizialmente seguendo un andamento lineare, per poi tendere asintoticamente verso la temperatura ambiente. Pochi istanti prima dell'interruzione, si andavano ad acquisire due cicli di isteresi consecutivi. Per avere dei dati sufficientemente attendibili, sono stati eseguiti almeno cinque gradienti per ogni prova, in modo da valutare la costanza o meno di Q , per un certo livello di carico.

Per ciò che riguarda le ultime prove ad ampiezza costante, è stata utilizzata una termocamera per acquisire il segnale di temperatura. Per queste prove però sono state fatte due acquisizioni in sequenza, la prima per poter applicare il metodo Second Harmonic descritto nel Capitolo 1 ai Paragrafi 1.8.4 e 1.8.6, e la seconda per utilizzare il metodo del gradiente. Per l'approccio Second Harmonic, si rimanda al capitolo successivo.

L'obiettivo di questo capitolo è quello di analizzare il materiale e le sue proprietà, confrontandolo con lo stesso AISI 304L ma ottenuto tramite trafilatura a freddo e analizzare l'attrezzatura sperimentale e le procedure per l'uso della macchina, della termocoppia, dell'estensometro e della termocamera.

2.2 Proprietà del materiale

Il materiale utilizzato per le prove di fatica è un acciaio inossidabile AISI 304 L, ottenuto mediante laminazione a caldo di piastre, aventi spessore nominale pari a 4 mm. La lettera L a fine nomenclatura, indica "Low carbon" in quanto esso presenta un contenuto minore di carbonio rispetto all' AISI 304. La minore quantità di carbonio permette di minimizzare la precipitazione di carburi di cromo, prodotti durante un'operazione di saldatura; ciò riduce la sensibilità alla corrosione intergranulare, pertanto l'AISI 304 L è particolarmente adatto ad essere saldato in condizioni ad alto grado di corrosività. Tale materiale infine trova impiego in scambiatori di calore, serbatoi in pressioni, tubazioni, valvole e tutte quelle applicazioni che richiedono una buona resistenza agli agenti atmosferici.

Nella tabella seguente viene riportata la composizione chimica in percentuale:

C (wt %)	Si (wt %)	Mn (wt %)	Cr (wt %)	Mo (wt %)	Ni (wt %)	Cu (wt %)
0.013	0.58	1.81	18.00	0.44	8	0.55

Tabella 2.1 – Composizione chimica percentuale dell'acciaio AISI 304 L. [8]

Le proprietà fisiche e meccaniche sono state determinate in [6] e confrontate con i dati presenti in letteratura. In particolare, si ha:

- Densità del materiale: $\rho = 7940 \text{ kg/m}^3$
- Calore specifico: $c = 507 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
- Coefficiente isotropico di dilatazione termica: $\alpha = 15.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Modulo elastico: $E = 192000 \text{ MPa}$
- Deformazione percentuale a frattura: $A = 66 \%$
- Tensione di rottura: $\sigma_R = 700 \text{ MPa}$
- Tensione di snervamento: $\sigma_S = 315 \text{ MPa}$

2.3 Geometria dei provini

I provini utilizzati per questa Tesi, sono di due diverse geometrie: per quanto concerne i provini impiegati nelle prove a rapporto di ciclo $R=0.1$, questi possono avere una sezione di area ridotta, in quanto sono soggetti sempre a carichi di trazione. Diversamente, i provini utilizzati per le prove di fatica con $R=-1$, necessitano di un aumento di sezione per prevenire fenomeni di instabilità dell'equilibrio (*buckling*). In quest'ultimo caso, infatti, si avrebbe una prova non più di trazione-compressione, bensì ci sarebbe anche un carico di flessione che soprattutto ad alto carico, porterebbe a un cedimento prematuro del provino rispetto alla vita attesa.

Riguardo dunque ai provini, quelli usati nelle prove a $R=0.1$ hanno una geometria descritta in Figura 2.1, in cui le dimensioni della sezione del tratto utile sono larghezza (12 ± 0.05) e spessore (4 ± 0.05) mm. La geometria dei provini impiegati nei test di fatica a $R=-1$ è rappresentata in Figura 2.2, le cui dimensioni sono larghezza (20 ± 0.05) mm e spessore nuovamente (4 ± 0.05) mm

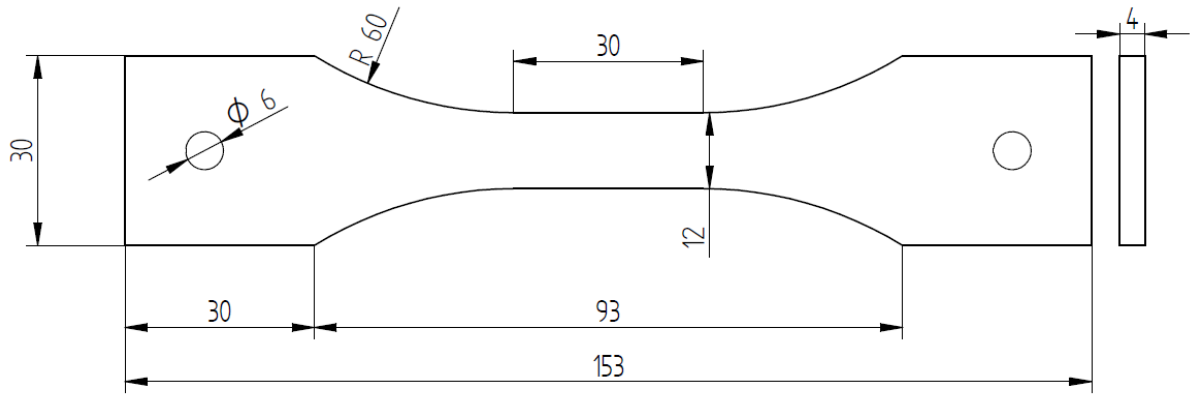


Figura 2.1 – Geometria provini utilizzati per prove di fatica a $R=0.1$.

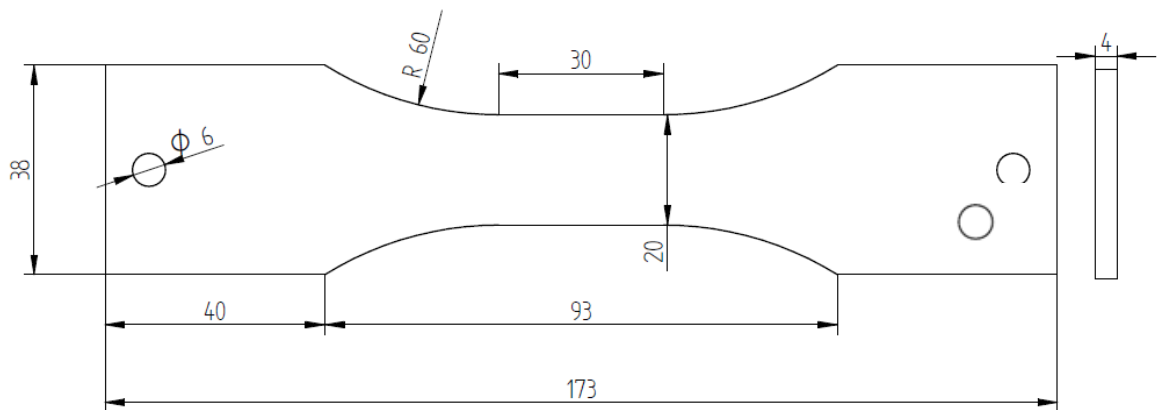


Figura 2.2 – Geometria provini utilizzati per prove di fatica a $R=-1$.

I provini sono stati ottenuti andando a fresare la lamiera avente spessore 4 mm. In alcuni casi che verranno descritti nel seguito, è stato opportuno ridurre la dimensione degli afferraggi in modo tale da evitare buckling ad alto carico. Avendo a disposizione lamiere di 4 mm, è stato quindi necessario ridurre la lunghezza complessiva del provino, in quanto oltre al momento di inerzia, essa è il parametro più influente sul fenomeno di instabilità dell'equilibrio. Alla luce di ciò, in alcune prove si è andato a fresare il provino in Figura 2.2, in corrispondenza dei due fori, in modo da aumentare la rigidità del provino stesso una volta inserito all'interno della macchina.

2.4 Apparato sperimentale

2.4.1 Macchina di prova

Le prove di fatica, sia in questo caso ad ampiezza costante, sia quelle condotte a gradini e descritte nel Capitolo 3, sono state eseguite con un macchinario servoidraulico Schenck Hydroplus PSA100, equipaggiato con una cella di carico da 100 kN per eseguire prove monoassiali. Di seguito si riporta in Figura 2.3 la macchina sopra descritta, in cui è montato un provino termocoppiato e monitorato anche tramite estensometro.

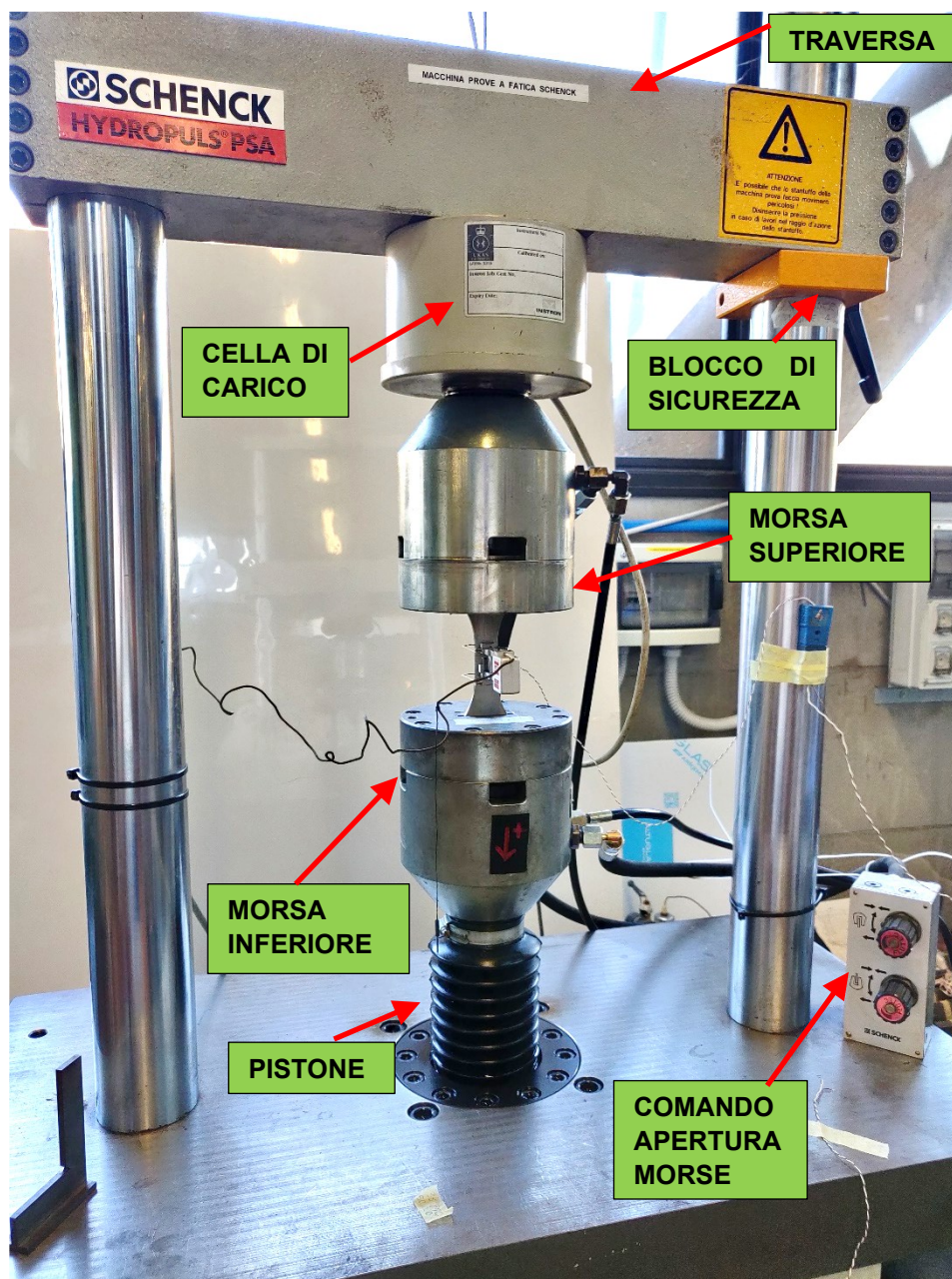


Figura 2.3 – Macchina Schenck usata per le prove sperimentali.

Alla traversa mobile superiore è vincolata solidamente la ganaschia (o morsa) superiore, alla quale è collegata la cella di carico. Quest'ultima ha il compito di leggere la forza applicata al provino e fornire al sistema di controllo, il feedback di retroazione. La traversa è fissata a due cilindri in acciaio sui quali può essere movimentata verso l'alto o il basso. Essa è fissata e mantenuta in posizione mediante 10 collegamenti filettati M18, cinque da un lato e cinque dall'altro. Per spostare la traversa a seconda delle dimensioni dei provini, si procede a svitare le viti con un andamento a croce, in modo da distribuire nel modo più uniforme possibile il carico sui filetti che sono ancora in presa. Una volta che è stata liberata, si utilizza una chiave a cricchetto per ruotare una vite che avvolge o svolge il filo di acciaio che fa salire o scendere la traversa. Se dovesse tranciarsi il cavo di acciaio che sorregge la traversa durante il suo sollevamento o la sua discesa, interverrebbe il blocco di sicurezza ad arrestarne la corsa. Il macchinario lavora ad alta pressione e una volta acceso, si possono andare ad aprire o chiudere le ganasce mediante due manopole: se ruotate in senso orario chiudono la ganaschia, mentre in senso antiorario vanno ad aprirla. Inoltre, a seconda della geometria dei provini, le morse possono essere cambiate usando dei cunei diversi a seconda se il provino sia costituito da un afferraggio a parallelepipedo oppure circolare. Il funzionamento della macchina è garantito mediante l'utilizzo di un software e di una centralina di controllo, che verranno descritte nel dettaglio nel seguito, assieme alla procedura di esecuzione di una prova.

2.4.2 Termocoppia e incollaggio sulla superficie del provino

Il primo dispositivo impiegato per misurare la temperatura è stata una termocoppia. Le termocoppie sono uno degli strumenti di misura della temperatura di maggiore diffusione, in quanto sono semplici da applicare, sono molto precise e relativamente economiche.

Si procede ora con un breve cenno teorico sul loro principio di funzionamento. Quest'ultimo, infatti, è basato sull'effetto Seebeck, ovvero quel fenomeno per cui, preso un circuito elettrico e costituito da due o un numero maggiore di conduttori e sottoposto a un gradiente termico, si genera all'interno di tale circuito una differenza di potenziale che porta al passaggio di corrente. Si può inoltre affermare che la differenza di potenziale è una funzione non lineare della *differenza* di temperatura tra le due giunzioni della termocoppia. Analogamente si può dimostrare che, nonostante venga misurata una differenza di temperatura tra due giunzioni e non un valore assoluto, si ottiene una misurazione analoga a quella che si avrebbe se una delle giunzioni fosse disposta a 0°C.

Per quanto concerne l'incollaggio della termocoppia al provino, sono necessari alcuni materiali:

- Provino/i;
- Fili elettrici di rame-costantana necessari per creare il circuito elettrico;
- Pinza per tagliare i cavi e spellarli dalla protezione;
- Scotch di carta;
- Alcol e carta assorbente;
- Carte vetrata di diverse grane;
- Colla epossidica bicomponente caricata con argento.

Una volta reperiti tali materiali, ci si posiziona su un banco da lavoro stabile, in modo da poter procedere con le successive operazioni di incollaggio, così descritte brevemente:

1. Per prima cosa si vanno a smussare i bordi del provino, che appena uscito dall'operazione di fresatura può presentare molteplici frammenti di bava, che necessariamente andranno rimossi; si cerca di utilizzare una carta vetrata all'incirca di grana pari a 100, in modo da andare ad arrotondare leggermente gli spigoli. Come è ben noto, infatti, gli spigoli fungono

- da punti preferenziali di innesco di cricche, a causa di fenomeni di concentrazione delle tensioni;
2. Una volta ripuliti gli spigoli, si procede a passare un foglio di carta vetrata, con grana avente valori nell'intorno di 320, sulla superficie che sarà oggetto di incollaggio della termocoppia: questa operazione viene fatta per ripulire la superficie da eventuale strato di ossido o grasso rilasciato dagli agenti atmosferici o dalle mani di chi può aver toccato il provino;
 3. Si pulisce la superficie con alcol e carta assorbente, in modo da rimuovere tutti i residui di polvere metallica;
 4. Si va a tagliare una certa lunghezza di cavi elettrici ed entrambe le estremità vengono spellate. Dopodiché si procede al posizionamento di tali cavi in mezzeri del provino, in modo tale che i fili scoperti si vadano a toccare alle estremità libere stando a contatto con la superficie del materiale; per mantenere in posizione i fili viene usato del nastro adesivo, che successivamente andrà rimosso (v. Figure 2.5, 2.6);
 5. Si prepara la colla bicomponente, costituita da una resina conduttrice e un indurente (v. Figura 2.4): si prendono in parti uguali e li si vanno a mescolare all'interno di un contenitore, in modo da andare a formare un composto il più omogeneo possibile;



Figura 2.4 – Colla bi-componente; l'elemento in grigio rappresenta la resina conduttrice mentre l'elemento in beige è l'indurente.

6. Una volta che il composto è divenuto omogeneo, si procede alla generazione di una pallina di colla, cercando di far sì che essa abbia dimensioni minime (così si minimizza lo scambio termico con l'ambiente esterno per convezione); si va poi a posizionare questa pallina di colla in modo che "saldi" come una brasatura i due fili scoperti tra di loro e con il materiale (v. Figure 2.5, 2.6). La colla necessita di un tempo minimo affinché si solidifichi, che corrisponde a circa 36 ore a temperatura ambiente; per velocizzare tale processo, si è andato ad utilizzare un phon industriale che permette di raggiungere gli 80 °C; in questo modo si ha una completa asciugatura in 20 minuti circa;
- Il passo numero 6, nel caso di prove con $R=0.1$ e ad alto carico, è stato compiuto solo una volta che il materiale è stato sottoposto in modo statico alla massima tensione del ciclo di fatica: in queste prove, infatti, si è rilevata una forte deformazione, superiore al 10%, che pertanto, se si incolla la termocoppia subito, questo ne comporta il distacco e il successivo fallimento dell'incollaggio. Per evitare ciò, la termocoppia come detto viene applicata successivamente;

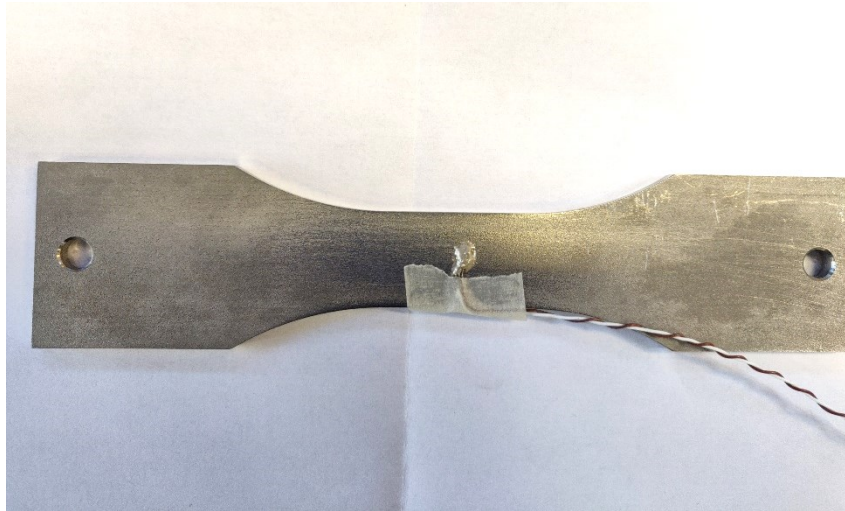


Figura 2.5 – Posizionamento della pallina di colla e incollaggio dei due fili di rame-costantana.

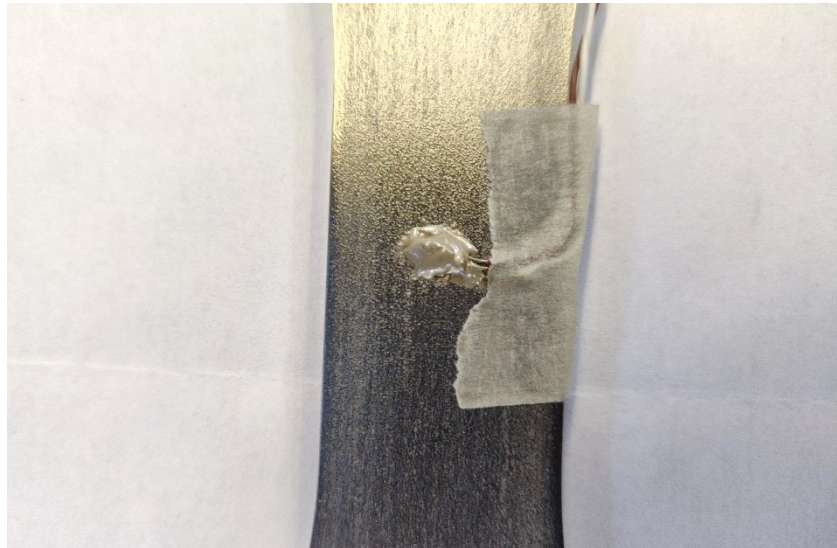


Figura 2.6 – Ingrandimento della zona di incollaggio. Si può osservare come sia fondamentale incollare la termocoppia in mezz'era del provino, in modo da misurare la temperatura nella zona corretta.

7. Le estremità opposte dei fili devono essere collegate ad un connettore (v. Figura 2.7), il quale viene collegato alla centralina di acquisizione del segnale. Il collegamento deve avvenire correttamente, ovvero il filo di guaina marrone va collegato con la vite marrone e il cavo con la guaina bianca con la vite grigia. Il connettore maschio, avente cioè i due spinotti, va collegato con il connettore femmina ed entra all'interno della centralina, che verrà descritta nel seguito.

Tra i dati tecnici della colla bifase, si riportano i più significativi: resistività $R = 10^{-5} \Omega \cdot m$, conducibilità termica $\lambda = 48.97 W/(m \cdot K)$ e campo di temperatura da $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+150 \text{ }^\circ\text{C}$.

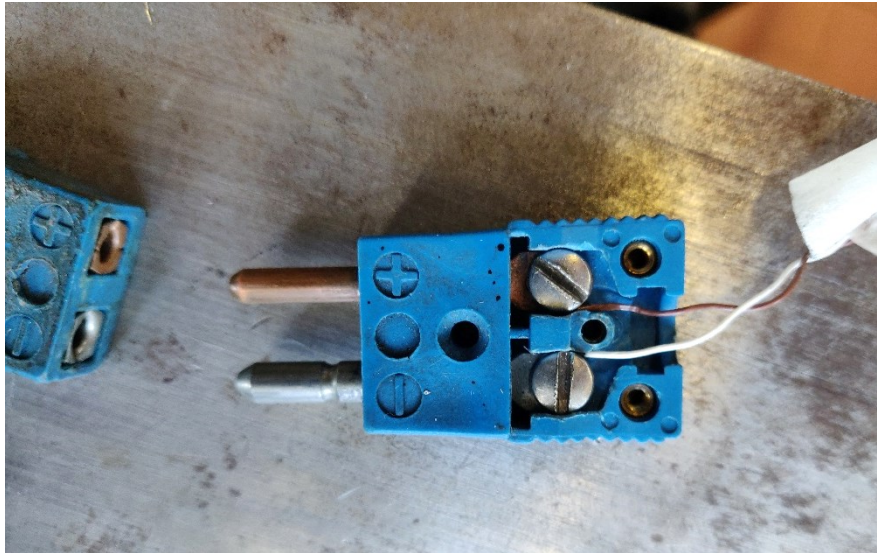


Figura 2.7 – Connettore maschio e femmina di collegamento dei fili elettrici della termocoppia con il controllore.

2.4.3 Estensometro MTS

Lo strumento di misura impiegato per ricavare la deformazione del provino liscio è l'estensometro. Esso è composto da una piccola unità che permette l'elaborazione del segnale e da una struttura che ha lo scopo di ospitare le molle e i coltelli (v. Figura 2.8). Il segnale esce poi da un filo e quest'ultimo termina con un connettore, che viene collegato al cavo che porta alla centralina.

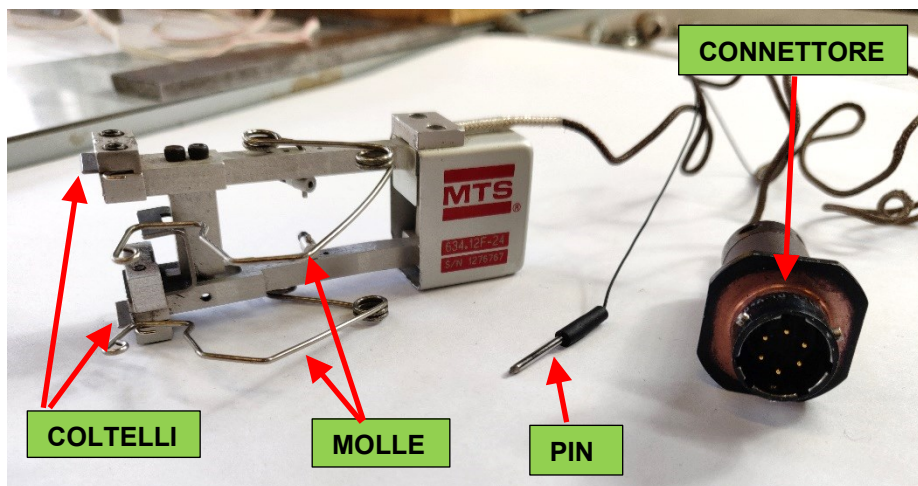


Figura 2.8 – Estensometro MTS impiegato per misurare la deformazione del provino.

Una volta che il provino è stato inserito all'interno del macchinario, si procede a collocare l'estensometro sul tratto utile del provino stesso: il pin viene inserito all'interno di un foro che va a bloccare il coltello mobile; una volta che i coltelli sono a contatto con il materiale da testare, si procede a fissare l'estensometro solidalmente al provino tramite due molle. Queste ultime possono essere spostate nella loro allocazione grazie a dei piccoli fori, in base alle dimensioni del provino, cioè in base al suo spessore o il suo diametro. Una volta che lo strumento è in posizione corretta, si verifica che sia disposto in modo il più allineato possibile con l'asse longitudinale del provino; né si verifica poi la stabilità, perturbandolo leggermente con un dito e verificando che esso torni nella

posizione iniziale. Una volta superato questo piccolo test, si procede a togliere il pin dal foro, in modo tale che il coltello inferiore possa muoversi e assecondare la deformazione del provino durante la prova di fatica.

Per quanto concerne le parti elettroniche funzionali dell'estensometro, si può constatare che al suo interno vi è la presenza di estensimetri ad alta resistenza, i quali sono disposti in modo da formare un ponte di Wheatstone: con il movimento meccanico dei coltelli, viene variata la resistenza degli estensimetri presenti all'interno; in questo modo si genera quindi un segnale elettrico che è strettamente collegato alla variazione di distanza dei due coltelli, e dunque, in ultima istanza, alla variazione di lunghezza del provino rispetto alla sua lunghezza iniziale.

Le caratteristiche tecniche dell'estensometro utilizzato sono le seguenti:

- Modello estensometro: MTS 634.12F-24;
- Numero di serie: 1276767;
- Distanza tra i due coltelli: 25 mm (nominali);
- Resistenza del ponte di Wheatstone: 350 Ω (nominali);
- Deformazione massima che può essere misurata: $5 \cdot 10^5 \mu\epsilon$;
- Range di utilizzo in temperatura: da -80 °C a +120 °C.

In Figura 2.9 si mostra l'estensometro posizionato correttamente sul tratto utile del provino, con il pin rimosso e pronto per essere utilizzato. È bene osservare come il punto di contatto molla-provino debba essere allineato con il rispettivo coltello, in modo da garantire stabilità ed evitare scivolamenti. Nella parte (b) della medesima figura, si osserva come il provino sia stato colorato di una vernice nera: questo è stato fatto per le prove che richiedevano l'utilizzo della termocamera; successivamente si descriveranno le motivazioni di questo fatto.

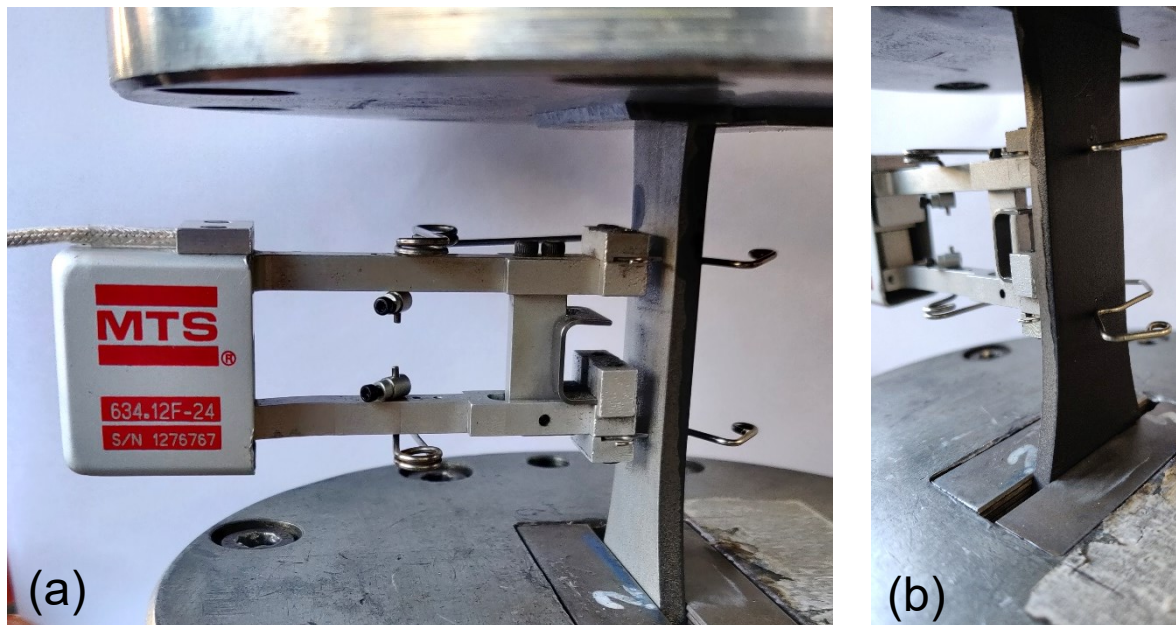


Figura 2.8 – Estensometro MTS montato sul provino (a) e molle posizionate correttamente e allineate con i coltelli (b).

2.4.4 Termocamera a raggi infrarossi

Per poter acquisire il segnale di temperatura a una frequenza di campionamento sufficientemente elevata ed applicare il metodo *Second Harmonic*, è stata impiegata una termocamera a raggi infrarossi ed il suo utilizzo e del software dedicato, verranno descritti in modo dettagliato successivamente. Di seguito si riportano le caratteristiche principali del dispositivo ad infrarosso:

- Modello: FLIR SC7000;
- Risoluzione termica: 0.01 °C;
- Campo di funzionamento in termini di temperatura: da +5°C a 300 °C;
- Risoluzione grafica full frame: 640 x 512 pixel;
- Risoluzione grafica a mezzo frame: 320 x 128 pixel;
- Risoluzione grafica a un quarto di frame: 160 x 128 pixel;
- Dimensione lato pixel: 15 μm ;
- Lenti in dotazione: due lenti FLIR SYSTEMS con distanza focale di 50 mm e 25 mm;
- Massima frequenza di acquisizione full frame: 100 Hz;
- Massima frequenza di acquisizione a mezzo frame: 328 Hz;
- Massima frequenza di acquisizione a un quarto di frame: 667 Hz;

All'interno della valigia con la quale viene trasportata la termocamera, vi è presente un cavo di rete, un cavo multifunzione, il cavo di alimentazione, il cavalletto porta termocamera e un pc con all'interno il software Altair. Di seguito si riporta in Figura 2.9. la termocamera utilizzata.

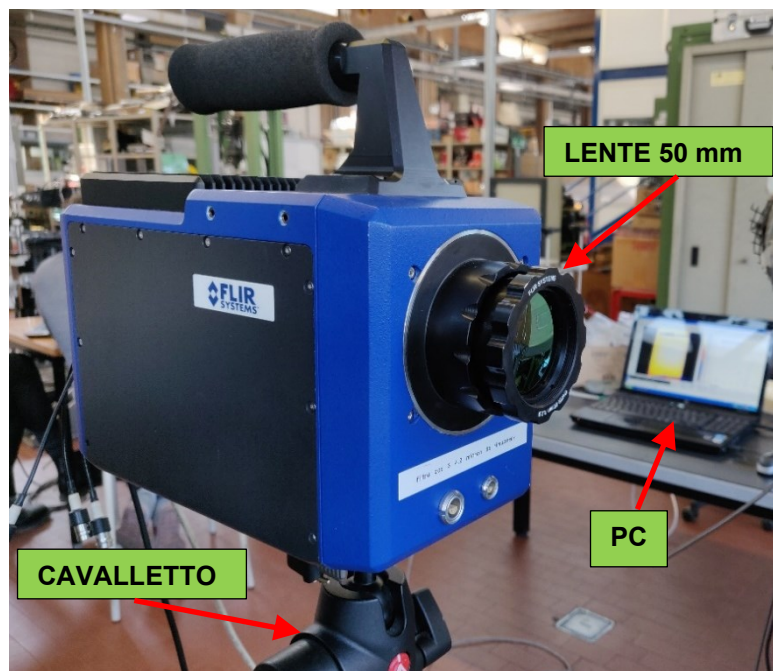


Figura 2.9 – Termocamera montata sul cavalletto e collegata al pc. Si può osservare su quest'ultimo l'immagine termografica del provino.

Il cavalletto è dotato di un particolare sistema di fissaggio ad incastro, con un blocco di sicurezza che impedisce, in caso di un urto con la termocamera, la caduta della stessa. È di fondamentale importanza l'uso della lente corretta: nel caso delle prove eseguite in questa Tesi si è utilizzata la lente con distanza focale di 50 mm.

La termocamera utilizzata per la misura della temperatura superficiale del provino contiene al suo interno l'amplificazione *lock-in*. Tale dispositivo è costituito da due componenti base: un mixer e un filtro passa-basso [37,38] (v. Figura 2.10).

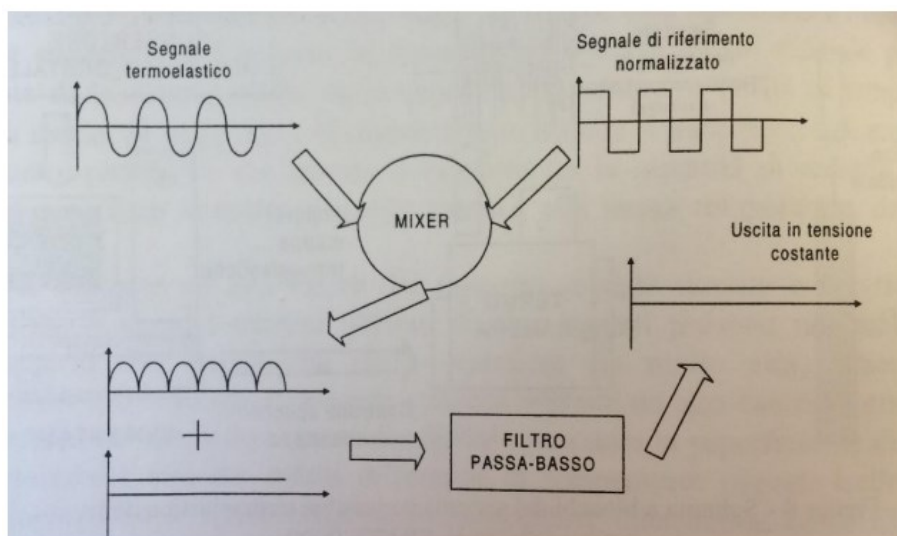


Figura 2.10 – Schema dell'amplificatore lock-in [37].

Come si osserva in Figura 2.10, il mixer riceve in input il segnale termografico acquisito con la termocamera ed il segnale di riferimento della cella di carico. All'interno del mixer avviene la moltiplicazione dei due segnali; il segnale risultante in uscita contiene al suo interno sia le frequenze somma, sia le frequenze differenza di quelle presenti all'interno del segnale in ingresso. In particolare, si osserva che la componente del segnale relativa alla termoelasticità ha la stessa frequenza del segnale di carico, fornito dalla cella di carico posizionata sulla macchina, ma di segno opposto. A conseguenza di ciò, la differenza delle frequenze contenuta nel segnale in uscita dal mixer è un valore costante e proporzionale al segnale che arriva dalla termocamera. Inoltre, è l'unica componente tra tutte quelle che contengono rumore e in uscita dal mixer, ad avere un valore a frequenza nulla. Infine, il filtro passa-basso va ad eliminare le componenti legate al rumore, tagliando i segnali oltre una certa frequenza [37,38].

2.5 Procedura di esecuzione di una prova a fatica su macchina Schenck

In questo paragrafo si va a descrivere in dettaglio la procedura di esecuzione che è stata seguita per fare le prove di fatica sui provini in AISI 304 L, ma che rimane valida per tutti i materiali, sul macchinario Schenck. Si descriveranno la procedura impiegata per montare il provino e per impostare le variabili nel software; inoltre, si descriverà la procedura di acquisizione del segnale di temperatura, dapprima mediante la termocoppia e successivamente mediante la termocamera, con annessa descrizione del software. Per la parte di analisi dei filmati termografici, si rimanda al Capitolo 3, nel quale verranno approfondite le tematiche di elaborazione dei dati.

Si descrive seguentemente la procedura di preparazione del provino e di montaggio sulla macchina.

2.5.1 Preparazione, inserimento del provino e impostazione dei parametri su macchina Schenck per eseguire prove di fatica

In questo paragrafo si va ad esporre il protocollo impiegato per eseguire le prove a fatica sulla macchina Schenck Hydropuls PSA100, con annessa descrizione del software di controllo RT3, necessario per regolare i parametri della prova ed acquisire i dati dalla cella di carico e dall'estensometro. Si procede nel seguente modo per la preparazione del provino:

1. Si prende fisicamente il provino, prestando attenzione agli eventuali residui di bava presenti sugli spigoli, dovuti al processo di fresatura precedente;
2. Dopodiché si va ad utilizzare la procedura descritta al Paragrafo 2.4.2 se si monitora la temperatura mediante una termocoppia; nelle prove di fatica in cui la temperatura viene rilevata invece tramite la termocamera, si procede come di seguito: innanzitutto si utilizza della carta vetrata per smussare gli spigoli (100 grammi) e prevenire innesco di cricche, dopodiché si utilizza una carta vetrata di diversa grammatura (320 grammi) per ripulire la superficie in modo che sia stato rimosso il grasso superficiale residuo;
3. Per le prove che prevedono la termocamera, è di fondamentale importanza tenere sotto controllo l'emissività del materiale da testare: per evitare riflessioni della superficie e per cercare di ridurre il più possibile l'influenza del rumore, l'emissività superficiale deve essere pari ad almeno 0.9 e il più uniforme possibile sul provino. Inoltre, considerando che l'emissività della superficie lucida dell'acciaio ha un valore relativamente ridotto, nell'intorno di 0.1, si va a ricoprire la superficie di uno strato di smalto spray nero e opaco. Dapprima si ricoprono con dello scotch gli afferraggi del provino (v. Figura 2.11), in modo da evitarne la loro colorazione e quindi di sporcare le ganasce della macchina; dopodiché si fanno tre o quattro passate in rapidità con lo spray in modo da dipingere la superficie del materiale, ottenendo un risultato simile a quello di Figura 2.11; una volta che il colore si è asciugato (dopo circa mezz'ora il colore è sufficientemente asciutto) si rimuove il nastro adesivo e si procede all'inserimento del pezzo da testare in macchina. In questo modo si ottiene un'emissività di 0.96.

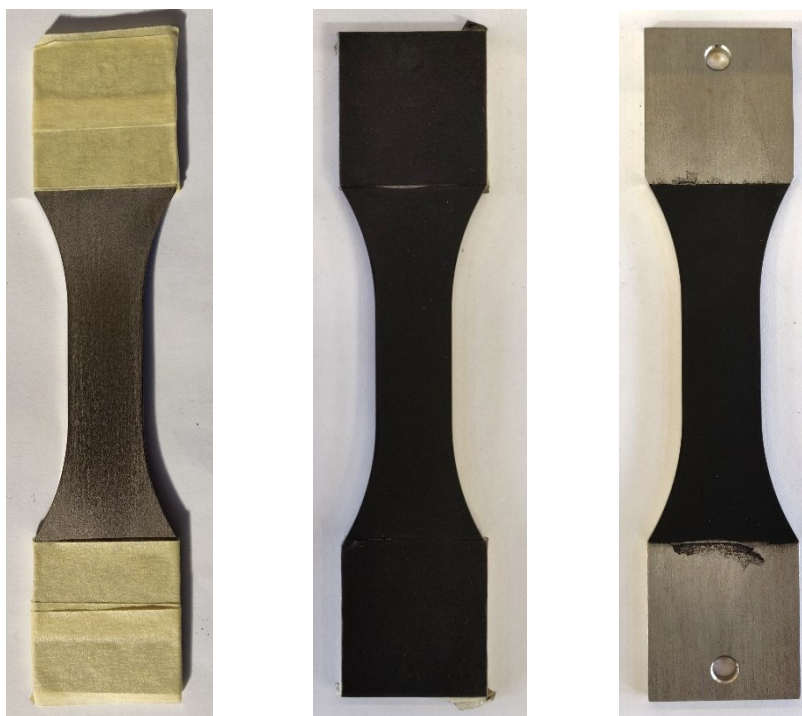


Figura 2.11 – Provini usati per le prove $R=-1$ colorati con lo smalto nero opaco per controllare l'emissività.

Descritta la preparazione del provino, si vuole ora definire la procedura di inserimento del provino e avviamento della prova all'interno della Schenck:

1. Si verifica che il rubinetto che garantisce il corretto utilizzo dell'impianto di raffreddamento sia aperto: questa è una delle operazioni preliminari di vitale importanza, in modo tale che lo scambiatore possa andare a raffreddare l'olio e la macchina possa lavorare. Se così non fosse, dopo poco dall'accensione della macchina la temperatura dell'olio supererebbe i limiti e la Schenck si arresterebbe;
2. Si accende la centralina RT3 (v. Figura 2.12), connettendola al cavo di corrente e accendendo il pulsante on e si aspetta che il led "alimentazione" sia acceso;
3. Si regola la traversa (v. Figura 2.3) in base alle dimensioni del provino: tramite una chiave a brugola si svitano le viti e si alza o abbassa la traversa mediante una chiave a cricchetto; si controlla poi che siano montate le morse per provini piatti (nel caso dei provini usati in questa Tesi); se così non fosse si sostituiscono;



Figura 2.12 – Centralina di controllo RT3.

4. Nel frattempo, si accende il pc a cui è collegato il controllore e si avvia il software *Controller RT3*. Si attende il caricamento dopodiché si richiama la configurazione che abitualmente si utilizza seguendo il percorso:

FILE → RICHIAMA → CONFIGURAZIONE

5. Dal *Pannello di controllo* (v. Figura 2.13) si imposta la modalità di controllo in *SPOSTAMENTO*: tale operazione è di fondamentale importanza, in quanto non bisogna mai usare la macchina in controllo di forza in assenza di un provino afferrato. Si segue il seguente percorso:

*PANNELLO DI CONTROLLO → MODALITA' DI CONTROLLO
→ SPOSTAMENTO*

- Si apre la finestra *Definizione limiti* e si vanno a disabilitare i limiti in spostamento e in forza nel seguente modo:

*AZIONE LIMITE → SPOSTAMENTO (O FORZA)
→ DISABILITATO*

- Se i limiti erano attivi, dopo averli disabilitati come descritto al punto 4, se si prova ad accendere la macchina essa non si avvia. Pertanto bisogna premere sul pulsante *RESET* presente nel *Pannello di controllo*: una volta fatto, i led *Interlock* e *Limiti* da rossi diventeranno verdi, così come il led *STATO* sulla centralina. Ora la macchina può essere accesa;
- Si ridà una rapida occhiata per essere sicuri di essere in *CONTROLLO DI SPOSTAMENTO*, dopodichè nel *Pannello di controllo* si preme sul pulsante *BASSA* pressione, si attendono un paio di secondi e infine si preme su *ALTA* pressione. Ora la macchina è accesa e pronta per essere utilizzata. Di seguito, in Figura 2.113 si riporta la schermata generale con le principali finestre attive e numerate secondo l'ordine descritto in questa procedura.

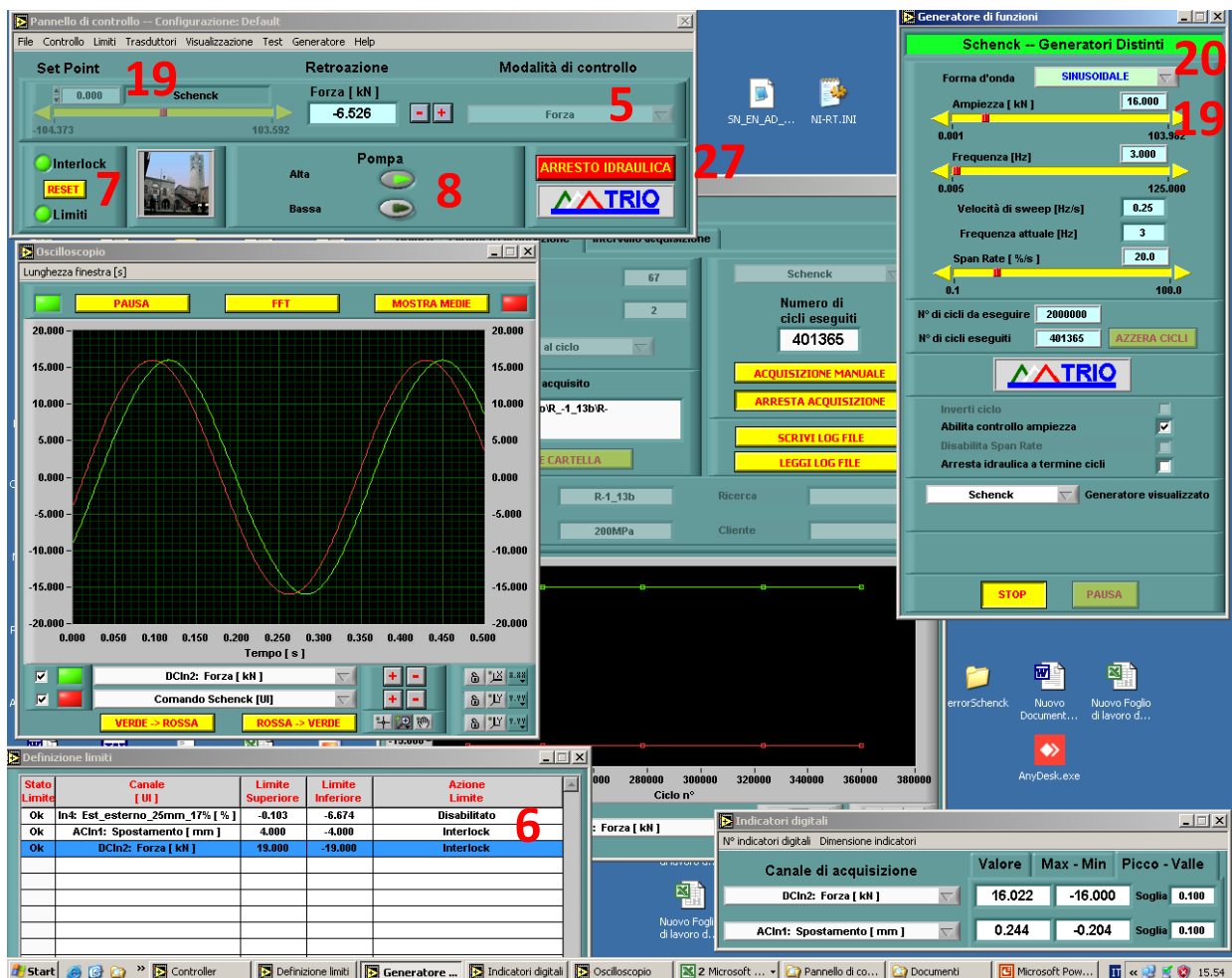


Figura 2.13 – Software Controller RT3 attivo e impostato su una prova di fatica.

9. Prima di inserire il provino, si verifica che è attiva la modalità *FATICA*. Qualora così non fosse, si segue il seguente percorso:

PANNELLO DI CONTROLLO → TEST → FATICA

*PANNELLO DI CONTROLLO → GENERATORE
→ GENERATORE DI FUNZIONI*

10. Fatte queste operazioni, si aprono le ganasce inferiore e superiore mediante le apposite manopole (v. Figura 2.3);
11. Una volta che le morse sono state aperte, si va ad inserire il provino: dapprima si inserisce nella ganascia superiore, utilizzando una squadretta o una livella a bolla per fare in modo che il provino sia il più possibile con asse parallelo al moto del pistone. È bene inoltre far sì che l'intero afferraggio del provino sia inserito e chiuso tra le morse, soprattutto per le prove a $R=-1$, in cui altrimenti il provino rischierebbe il buckling.
12. Una volta che il provino è stato afferrato nel tratto superiore, si procede a muovere il pistone inferiore verso l'altro. Per fare questo si agisce sul *Set Point*, impostando manualmente i mm di cui deve avanzare il pistone, oppure muovendo l'opportuno cursore; bisogna tenere conto che lo spostamento è assoluto, e non incrementale ed inoltre esso è positivo se si va verso il basso;
13. Raggiunta l'altezza necessaria ad afferrare completamente il tratto inferiore del provino, si può procedere a chiudere la manopola che garantisce la chiusura della ganascia; non appena la ganascia si è serrata, si passa subito in CONTROLLO DI FORZA; una volta fatto ciò imposta un *Set Point* di 0 kN, indipendentemente dal tipo di prova; solo successivamente si imposterà il valore corretto;
14. Dopodiché si prepara l'estensometro seguendo la procedura descritta al Paragrafo 2.4.3; è molto importante controllare che i coltelli siano quelli corretti per il tipo di provino utilizzato: per i provini a piastre come in questo caso, si utilizzano coltelli a due punte e a una punta, in modo da avere tre punti di contatto con la superficie; bisogna prestare particolare attenzione nel caso di prove con la termocamera, in quanto non si deve andare a rovinare la vernice nera opaca con le molle dell'estensometro; in Figura 2.14 si vede un esempio di ciclo di isteresi per una prova a $R=0.1$;

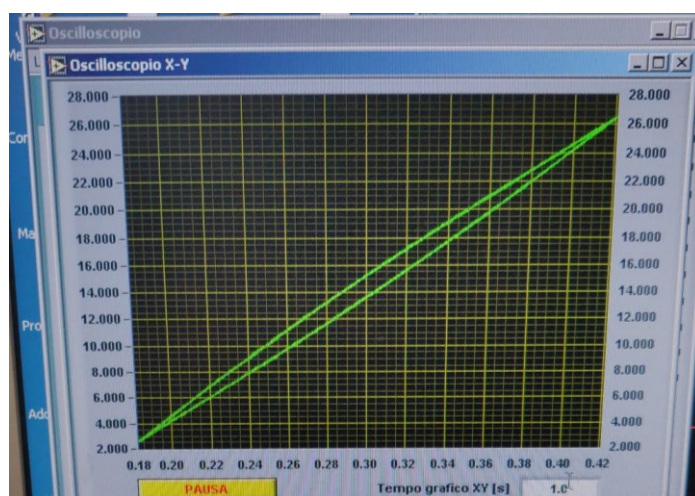


Figura 2.14 – Ciclo di isteresi in Forza vs Deformazione.

15. Una volta inserito il provino e fissato l'estensometro si procede ad assegnare tale strumento al canale corrispondente, seguendo il seguente percorso:

*CONTRROLLO E ASSEGNAZIONE TRASDUTTORI → In4
→ EST_ESTERNO_25mm_17%*

e così facendo si va a collegare l'estensometro al canale In4; è bene inoltre tenere il cavo dell'estensometro il più distante possibile dai cavi di corrente in quanto essi vanno a disturbare il segnale dando origine a cicli di isteresi errati;

16. Successivamente si vanno ad inserire i filtri pasa-basso in modo da tagliare le frequenze superiori a 60 Hz che sono pertanto frutto di rumore (v. Figura 2.15) e seguendo il seguente percorso:

TRASDUTTORI → FILTRI DI INGRESSO ANALOGICI



Figura 2.15 – Definizione dei filtri di ingresso analogici sui 3 canali di forza, spostamento ed estensometro.

17. Si procede poi ad azzerare lo spostamento e l'estensometro, in modo che la posizione sia quella di partenza. Si segue il seguente percorso:

*TRASDUTTORI → AZZERAMENTO
→ ESTENSOMETRO e SPOSTAMENTO
→ AZZERA*

18. Una volta che è stata eseguita la precedente operazione, si vanno ad impostare i limiti in forza e in spostamento. In particolare, le prove eseguite in questa Tesi, vengono fatte in controllo di forza; pertanto, è d'obbligo imporre una forza massima, superata la quale la macchina si arresta, in modo da evitare di danneggiare il provino; è importante imporre anche una forza minima, ad esempio, per evitare che la macchina metta in compressione il provino.

L'altro aspetto fondamentale riguarda i limiti in spostamento, in quanto essendo la prova controllata in forza, la macchina non si arresterebbe se il provino si rompesse: al fine di ciò si vanno ad imporre uno spostamento massimo e minimo e, a rottura, questi limiti verranno superati, facendo interrompere la prova; si segue quindi il seguente schema:

*AZIONE LIMITE → SPOSTAMENTO (O FORZA)
→ INTERLOCK*

ed in questo modo i limiti sono attivati; è fondamentale ricordarsi di aver inserito il comando *Interlock*, in quanto altrimenti i limiti rimangono disabilitati nonostante vengano inseriti i valori numerici corretti;

19. Una volta che si è sicuri di aver impostato dei limiti in forza e in spostamento, si vanno ad inserire il *Set Point* e l'*Ampiezza* in kN: il primo valore rappresenta la forza media che viene applicata al provino e costante nel tempo; nel caso di prove a R=-1 questo sarà sempre posto pari a zero; per quanto concerne il secondo valore, esso rappresenta l'ampiezza massima che viene raggiunta nel ciclo di fatica in termini di forza;
20. Il passo successivo è stabilire la forma d'onda di carico che si vuole seguire: tipicamente si segue la forma sinusoidale, ma questa opzione può essere cambiata se necessario;
21. Si salva la configurazione;
22. Il passo successivo consiste nell'andare a creare una cartella di salvataggio, in cui tutti i dati relativi alla prova, compreso ogni quanto acquisire, vengono settati. Si va nella finestra *TESTA FATICA → PARAMETRI DI ACQUISIZIONE*, di cui una schermata viene riportata in Figura 2.16:

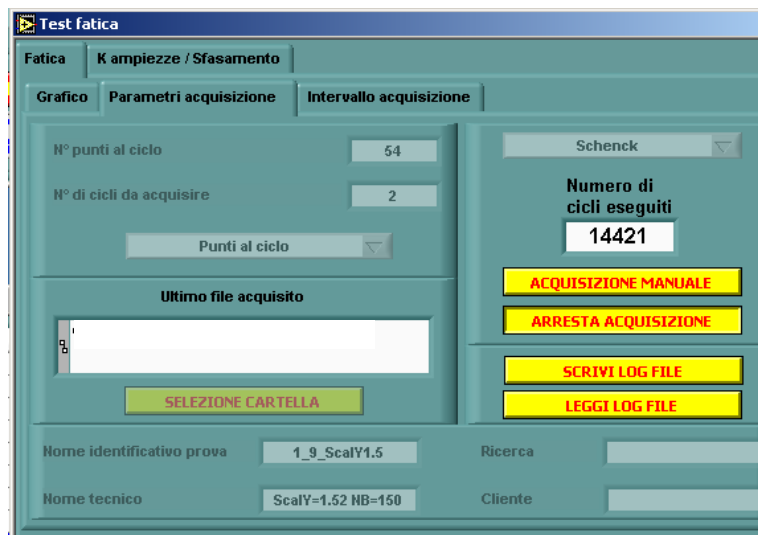


Figura 2.16 – Salvataggio dei dati e impostazione dei parametri di acquisizione.

Dapprima si impostano il *N° di punti al ciclo* cioè quanti punti vengono salvati ad ogni acquisizione; dopodiché si stabilisce il *N° di cicli da acquisire* ovvero quanti cicli vengono salvati in successione. Nel caso delle prove fatte, si è stabilito un numero minimo di punti ciclo pari a 100 (meglio se 200) e una acquisizione di 2 cicli consecutivi, tranne nei primi dieci in cui l'acquisizione è stata fatta di un solo ciclo.

Successivamente si preme su *SELEZIONE CARTELLA* e si definisce una cartella nuova con il nome desiderato ad esempio P_01 e si preme *Select current directory*. Si va a dare poi il *Nome identificativo prova* es R0.1_01, e infine il *Nome tecnico*, es 210MPa.

23. Dopodiché si va nella schermata *Intervallo di acquisizione* (v. Figura 2.17) e si segue il seguente percorso:

*TEST FATICA → INTERVALLO DI ACQUISIZIONE
→ CARICA DA FILE*

e si seleziona il file di acquisizione logaritmica. Ciò viene fatto inizialmente per i primi 10000 o 20000 cicli, in modo da vedere l'evoluzione del materiale prima che esso raggiunga la stabilizzazione, soprattutto poiché si osserverà poi che i primi cicli di isteresi per $R=0.1$ non si chiudono, ma necessitano di un certo tempo. Superati questi primi cicli, si va a modificare l'acquisizione premendo su *AZZERA TABELLA* e inserendo l'intervallo per il quale si vuole che la macchina acquisisca i dati; tipicamente si imposta un valore alto nelle prove fatte in questa Tesi, poiché si è interessati a considerare i cicli di isteresi poco prima del gradiente di temperatura. Per acquisire manualmente il dato, si ritorna della finestra in Figura 2.16 e si va a premere *ACQUISIZIONE MANUALE*.



Figura 2.17 – Impostazione dell'intervallo di acquisizione. In questo esempio si acquisiscono i dati ogni 250 cicli.

24. Una volta completati i precedenti passaggi, si ritorna nella schermata *Parametri di acquisizione* si preme *AVVIO ACQUIZIONE*. Fatto ciò, la prova è pronta per essere avviata. Prima di dare l'avvio però è buona prassi fare un ultimo controllo ai limiti di spostamento e in forza e confermare che sono in condizione di *Interlock*;
25. Si può decidere di fare un grafico tramite l'oscilloscopio, in modo da seguire l'andamento sinusoidale del carico applicato e del comando di retroazione della macchina Schenk, seguendo il percorso:

VISUALIZZAZIONE → OSCILLOSCOPIO

mentre per visualizzare il ciclo di isteresi di Figura 2.14 si segue:

VISUALIZZAZIONE → OSCILLOSCOPIO XY

26. Per avviare la prova si va nella schermata:

GENERATORE DI FUNZIONI → AVVIO

si attende il completamento di qualche ciclo dopodiché si spunta il comando *Abilita controllo di ampiezza*. In questo modo il comando di forza va a seguire l'ampiezza corretta precedentemente inserita, altrimenti la macchina impone un'ampiezza leggermente minore di quella impostata.

Prima di passare all'analisi del software di acquisizione della temperatura con la termocoppia e con la termocamera, si va a descrivere ora la procedura da seguire quando il provino si rompe e quella nel caso in cui esso vada in run out.

Il protocollo che si segue se il provino si rompe è il seguente:

1. Dapprima si vanno a disabilitare gli Interlock, e poi si preme sul tasto *Reset*. I led rossi diventano verdi, come in precedenza descritto al punto 7;
2. Si passa in *CONTROLLO DI SPOSTAMENTO*, in quanto essendo il provino rotto, esso non offre più rigidità e quindi è come se non ci fosse;
3. Si da *Bassa* pressione e poi *Alta*;
4. Si aprono le ganasce inferiore e superiore, facendo attenzione a non toccare la superficie di frattura in quanto essa sarà oggetto di analisi al microscopio.

Se invece il provino supera i limiti di cicli imposti, ad esempio due milioni o dieci milioni, si dice che esso è andato in run out. In questo caso, la procedura da seguire se il provino va in run out è la seguente:

1. La macchina non ha superato nessun limite, pertanto essa è ancora accesa ed in *CONTROLLO DI FORZA*. Il primo passo da fare è togliere l'estensometro e riporlo nel suo contenitore;
2. Si vanno poi a disabilitare i limiti in spostamento e in forza in modo da non far scattare gli Interlock movimentando il pistone;
3. Si passa in *CONTROLLO DI SPOSTAMENTO*;
4. Si apre la ganascia inferiore, si abbassa il pistone in modo da poter estrarre il provino e si apre successivamente la ganascia superiore.

Nel caso in cui si voglia spegnere la macchina, si va a premere sul pulsante *ARRESTO IDRAULICA* presente nella finestra *Pannello di controllo*, sotto la *Modalità di controllo* nel punto 27 (v. Figura 2.13)

2.5.2 Utilizzo del software Agilent per l'acquisizione della temperatura mediante termocoppia

Il software che acquisisce la temperatura mediante la termocoppia (descritta al paragrafo 2.4.2) si chiama *Agilent BenchLink Data Logger*. Il segnale che arriva dai cavi elettrici della termocoppia passa all'interno di una centralina, come in Figura 2.18.



Figura 2.18 – Centralina di acquisizione della temperatura tramite termocoppia.

Una volta che accende il software, ci si ritrova di fronte alla seguente schermata:

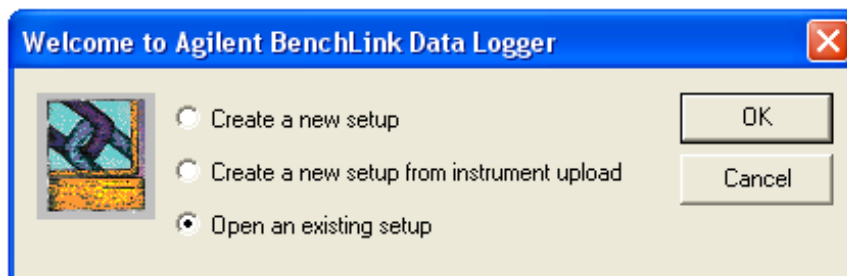


Figura 2.19 – Schermata di avvio del software Agilent.

Si può decidere se creare un nuovo setup oppure aprirne uno già esistente; nel caso di queste prove, si va ad utilizzare un setup già presente nella libreria del software, cliccando su *Open an existing setup*. Si apre una schermata come la seguente, e si va ad utilizzare RigonMultiaxc45 come setup per l'analisi della temperatura dell'AISI 304L.

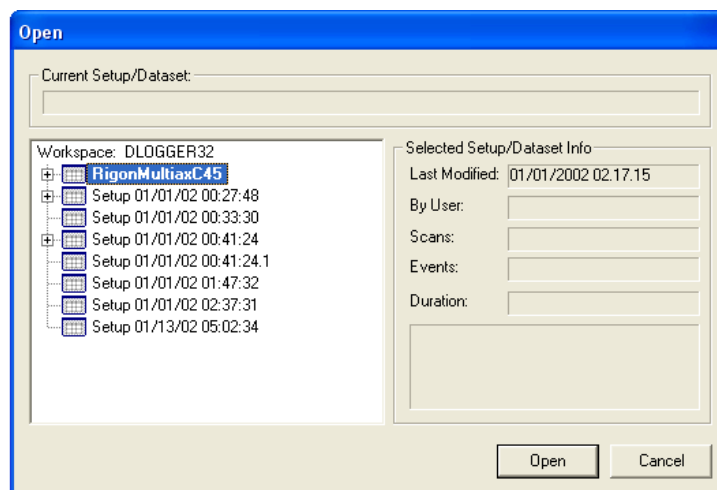


Figura 2.20 – Schermata di scelta del setup salvato che si vuole andare ad utilizzare.

Scelto il setup che si desidera, si apre la schermata in Figura 2.21, di cui di seguito di descrivono le principali caratteristiche, evidenziate mediante numerazione:

1. SCHERMATA PRINCIPALE: viene rappresentata la temperatura che si sta misurando. I dati sono mostrati tramite dei punti, collegati tra di loro mediante delle linee spezzate;
2. FINESTRA TEMPERATURA: viene evidenziato il valore numerico ad ogni acquisizione fatta in tempo reale; maggiore è la frequenza di acquisizione maggiore è la velocità con cui il dato viene aggiornato;
3. REFERENCE E UNITS/DIV: in questa sotto schermata si può andare a selezionare la temperatura di riferimento, rappresentata nel grafico principale mediante un'etichetta Ref, e la divisione delle linee orizzontali: la distanza tra una linea e l'altra rappresenta un'unità, cioè se si impostano 2 °C come unità, allora lo spazio è esattamente di 2 °C;
4. AUTOSCALE: se si clicca su tale comando, il software grafica un valore di riferimento e una unità in modo che le misurazioni precedenti vengano tutte visualizzate;

Resistenza a fatica tramite approccio tradizionale: curve di Woehler e confronto tra AISI 304L laminato a caldo e trafilato a freddo

5. TIME/DIV: Definisce l'unità di suddivisione delle linee verticali, ovvero l'unità in termini di tempo; minore è, maggiore sarà l'accuratezza dei dati visualizzati a schermata, ma ciò non influisce minimamente sui dati acquisiti;

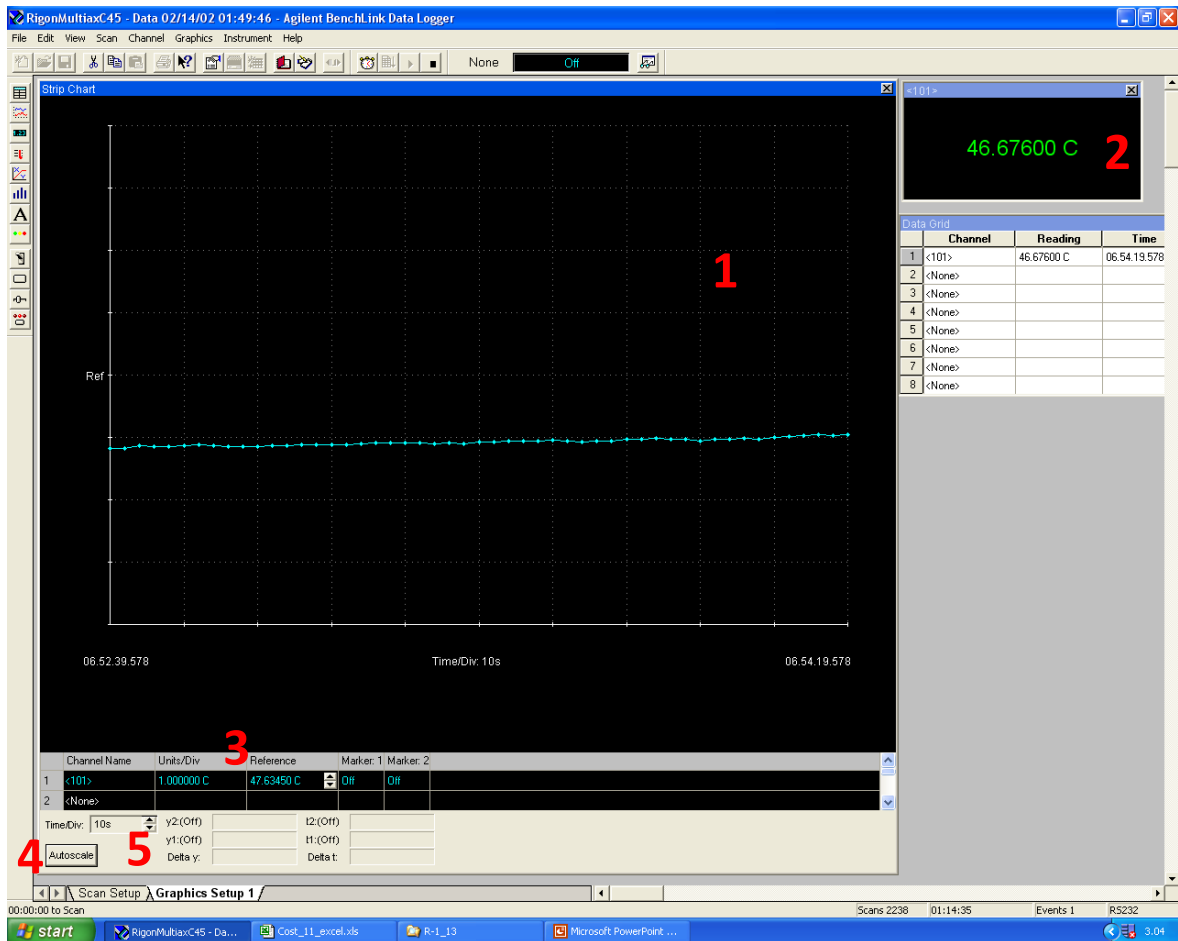


Figura 2.21 – Schermata di scelta principale del software.

In Figura 2.21 si vede la schermata principale di Altair, in cui è ben visibile la temperatura stabilizzata del provino. In particolare, una volta che la finestra si è aperta, l'acquisizione non è ancora partita. Infatti, viene evidenziata a schermo la seguente:

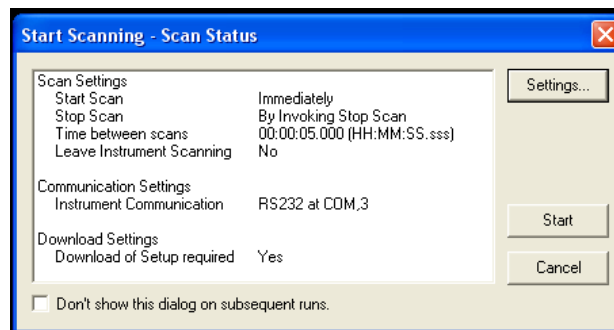


Figura 2.22 – Schermata di riassunto dei parametri.

Premendo su *Settings* si seleziona la frequenza di acquisizione, o meglio l'intervallo temporale tra una acquisizione e l'altra. Dopodiché si preme su *Start*.

Le acquisizioni di temperatura sono state eseguite in due diverse modalità: nella prima si acquisiva la temperatura dall'inizio della prova e tra un raffreddamento e l'altro, mentre nella seconda si andava ad acquisire il raffreddamento del materiale dovuto alla brusca interruzione della prova. Tale procedimento è stato fatto anche utilizzando la termocamera.

Pertanto, ad ogni interruzione di acquisizione sono stati salvati i dati, seguendo il seguente percorso:

TASTO STOP → FILE → EXPORT DATA

La schermata di fronte alla quale ci si trova di fronte è per tanto la seguente:

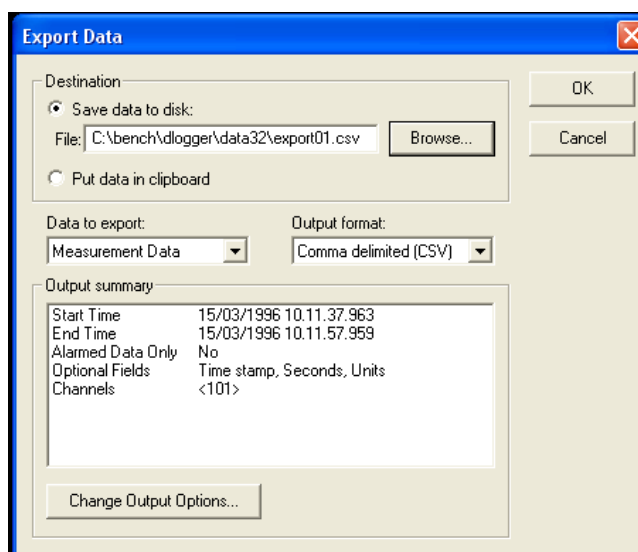


Figura 2.23 – Schermata di salvataggio dati.

Si clicca su *Browser* e si seleziona la cartella desiderata.

Inoltre, è bene precisare che le acquisizioni tra un gradiente e l'altro sono state fatte ad intervalli di due o tre secondi, mentre per acquisire la temperatura durante il raffreddamento è stato impostato l'intervallo più basso possibile, pari a 1 millesimo di secondo. In questo modo la frequenza di acquisizione è stata imposta pari al valore massimo, ovvero 22 Hz. Così facendo, si è potuto ottenere un numero elevato di dati durante il raffreddamento del materiale, in modo da poter fare una regressione lineare in un numero sufficiente di punti.

La procedura che è stata effettuata è la seguente:

1. Si fa partire la prova impostando una frequenza di 1 Hz;
2. Non appena la temperatura si va a stabilizzare si aumenta la frequenza, ad intervalli regolari di 1 o 2 Hz, attendendo la successiva stabilizzazione;
3. Una volta raggiunta una frequenza tale che garantisca una temperatura compresa tra i 45°C e i 60°C, si attende che il materiale stabilizzi la sua temperatura;
4. Una volta fatto ciò, si salva l'acquisizione, salvando l'intervallo di cicli a cui corrispondono quei dati;
5. Si imposta un intervallo temporale di 1 millesimo di secondo e si fa partire l'acquisizione;
6. Si arresta la prova e si aspettano una quindicina di secondi in modo da avere un buon gradiente, e si salvano i dati raccolti.

Di seguito in Figura 2.24 si va a rappresentare un gradiente di raffreddamento nella schermata del software Altair.

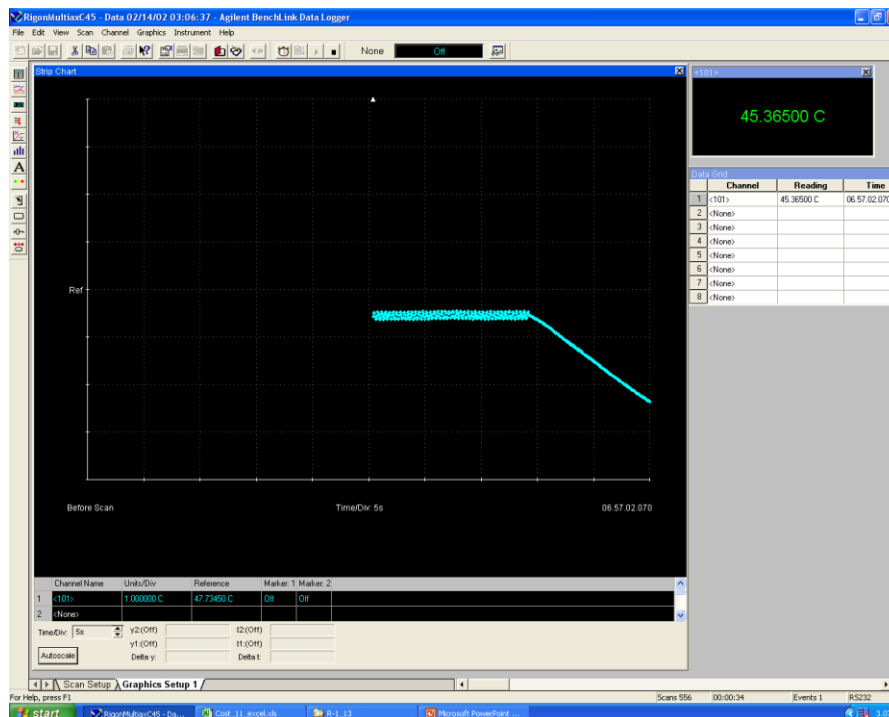


Figura 2.24 – Raffreddamento del materiale in seguito a una brusca interruzione della prova.

2.5.3 Preparazione della termocamera e procedura di acquisizione di un filmato termografico

Lo strumento di misurazione della temperatura superficiale del provino nelle prime prove è stata una termocoppia. Successivamente, soprattutto per poter applicare il *Second Harmonic Approach*, si è reso necessario l'utilizzo di una termocamera FLIR SC7000, descritta nel dettaglio in termini di datasheet al Paragrafo 2.2.4. In questo Paragrafo invece si vuole andare ad analizzare il protocollo di preparazione della termocamera, dalla connessione dei cavi alla sua accensione, fino all'acquisizione di un intero filmato termografico.

Si va ora ad illustrare la procedura di installazione, cablaggio della termocamera e settaggio del software per l'acquisizione delle immagini:

1. Per prima cosa si deve andare a tirare fuori la termocamera dalla valigia di protezione, dopodiché si va ad estrarre il copri lente;
2. Si prende il cavalletto treppiede e si va a collocare la termocamera al di sopra di esso (v. Figura 2.25a): è presente un accoppiamento di forma che garantisce il corretto fissaggio della termocamera con il suo supporto; una volta sbloccato il meccanismo e appoggiato sopra lo strumento di misura, si udirà un "click". Ciò sta a significare che la termocamera è stata fissata correttamente; dopodiché si va a muovere un piccolo pin color oro in modo che il meccanismo di fissaggio sia bloccato e che dunque non ci siano cadute accidentali;
3. Dopo aver dato una controllata alla stabilità della termocamera, si prendono i tre cavi necessari al funzionamento della stessa: cavo di alimentazione (indicato in rosso), cavo lock-in (indicato in verde) e cavo di rete. Si vanno poi a collegare tali cavi nelle sedi POWER IN, LOCKIN e rete, nel retro della termocamera come in Figura 2.25b;

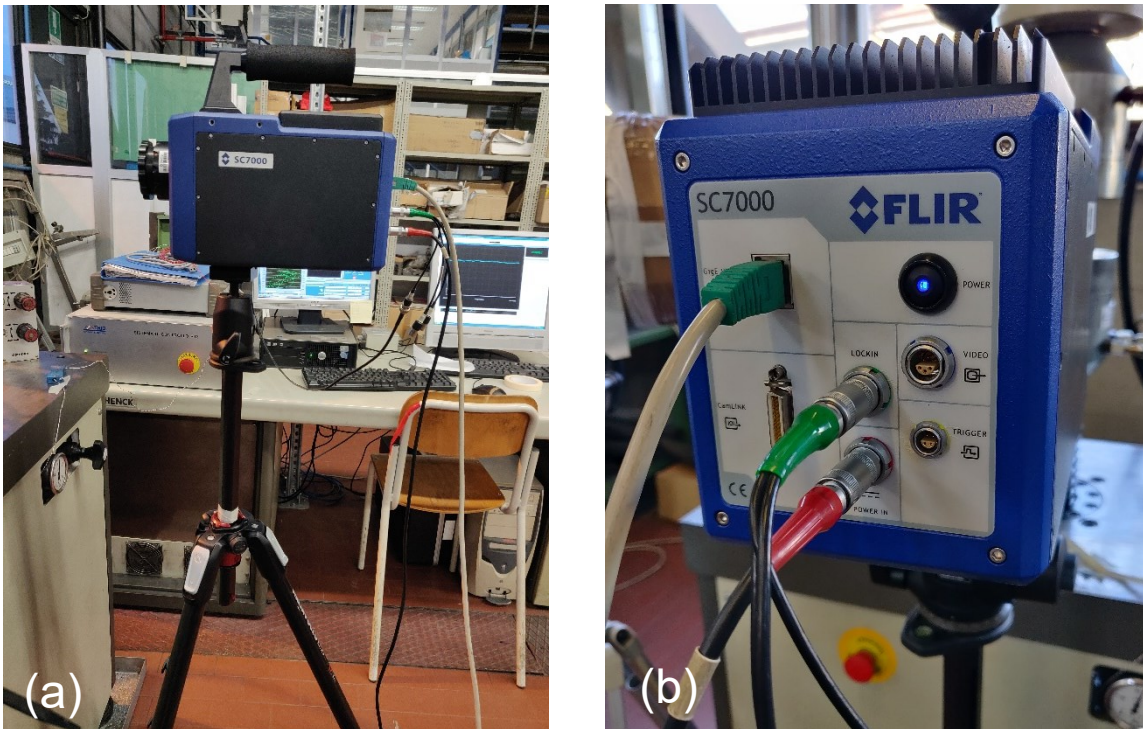


Figura 2.25 – Termocamera fissata sul suo supporto a treppiede (a). Collegamento dei cavi di rete, di alimentazione (rosso) e lock-in (verde).

4. Una volta che i cavi sono stati collegati, si procede a premere il tasto POWER indicato dalla freccia in Figura 2.25; quando lo si va a premere, il led diventa blu e la termocamera inizia ad emettere un ronzio: si devono attendere dai tre ai cinque minuti, durante i quali la termocamera esegue delle operazioni di setting interno;
5. Si accende il pc e si collega il cavo di rete nell'apposita porta: una volta che la termocamera ha smesso di emettere il ronzio, essa è utilizzabile; pertanto, si apre il software *Altair*. Nella barra degli strumenti in alto compaiono alcune icone: quella indicata con la freccia rossa indica *Open live camera*. Una volta premuta, la schermata che si ha di fronte è questa:

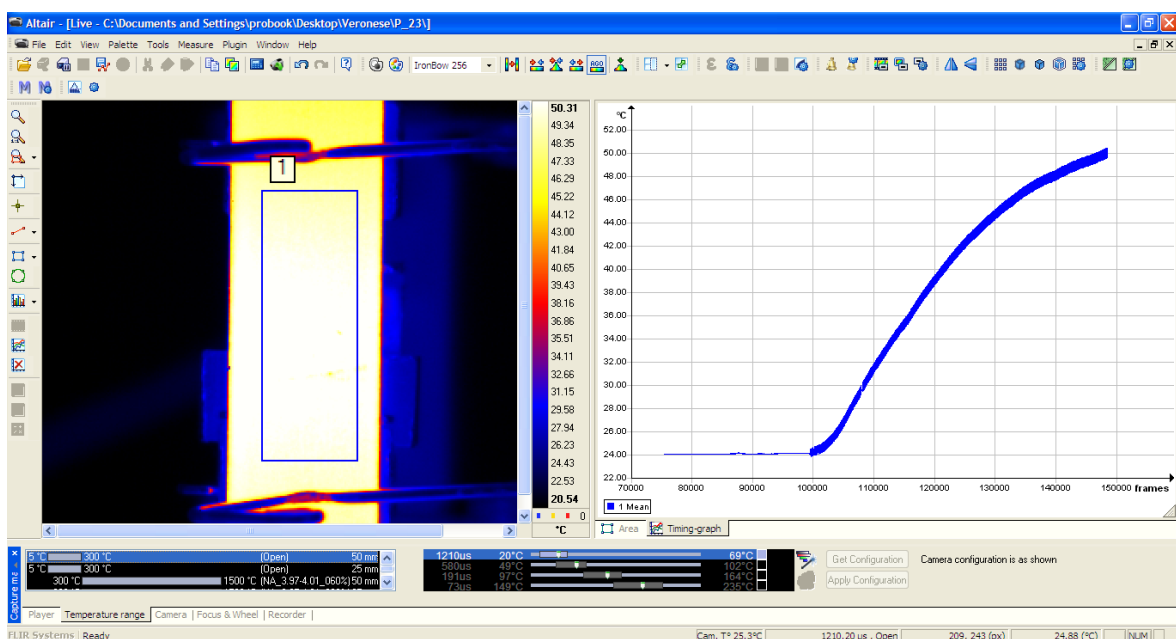


Figura 2.26 – Schermata già impostata di Altair. Sulla destra la temperatura del provino che aumenta.

6. La finestra contenente il provino, viene visualizzata di solito in bianco e nero e in unità *Digital Level*. La prima cosa da fare dunque è cliccare sull'unità DL: si apre una finestra e si va a selezionare *Temperature °C*, come evidenziato in Figura 2.26. Dopodiché se si preme CTRL+J si passa alla modalità a tutto schermo;
7. Un altro aspetto visivo che si può modificare riguarda l'uso di una scala dei colori diversa da quella dei grigi: se si preme sull'icona al punto 7, si può andare a selezionare ad esempio l'impostazione *IRON 256*, che è quella usata per analizzare i filmati di questa Tesi;
8. Il passo successivo consiste nel mettere a fuoco l'obbiettivo, andando a ruotarlo manualmente in modo che il tratto utile del provino sia messo il più a fuoco possibile: è spesso conveniente dapprima eseguire queste operazioni, e solo dopo andare a posizionare l'estensometro, poiché è fondamentale che nell'immagine compaiano i due coltelli; infatti, quando si andranno a compensare i filmati termografici, è importante avere dei riferimenti precisi, altrimenti la compensazione non avviene correttamente (questa procedura verrà descritta successivamente);
9. Si va poi a collegare il cavo che trasmette il segnale della cella di carico all'ingresso BNC monitor 2 del controllore RT3, come in Figura 2.27: questa operazione è fondamentale, in quanto per andare a compensare il filmato si ha la necessità di conoscere il carico in quel preciso frames. Solo così si riesce a ricostruire un'immagine in cui in cui ciascun pixel non è fisicamente in movimento ma la sua temperatura varia;



Figura 2.27 – La porta di collegamento del cavo lock-in con il controller RT3 è la numero 2.

10. Se si vuole visualizzare la temperatura in tempo reale, si clicca sull'icona *Auto adjust*; si può modificare i limiti di temperatura superiore e inferiore cliccando sulla scala e modificando manualmente i valori;
11. Si devono andare ora a calibrare alcuni parametri, che fungono da condizioni al contorno, seguendo il percorso:

MEASURE → RADIOMETRY

si apre dunque una tabella in cui si possono andare ad impostare i valori di alcuni importanti parametri: *Emissivity*, ovvero l'emissività superficiale che dipende dal tipo di smalto utilizzato e che in questo caso è stata posta pari a 0.96; la temperatura di *Background* ovvero quella della parete retrostante, e che differisce da quella ambiente solo se dietro sono presenti sorgenti di calore proprio o riflesso; la *Distance* ovvero la distanza tra il provino e la lente della termocamera ed infine l' *Atmosphere* ovvero la temperatura ambiente. Gli altri parametri non vanno ad essere modificati;

12. Prima di proseguire con le impostazioni di acquisizione, si procede al salvataggio della configurazione su una cartella. Quest'ultima viene salvata sul desktop del pc che si va ad utilizzare, utilizzando una cartella diversa per ogni provino. Si procede come segue:

FILE → NEW PROJECT

e si apre una schermata in cui si va a selezionare la cartella sul desktop, ad esempio, nel caso di questa Tesi "Veronese". Nella sezione *PROJECT NAME* si va ad indicare il nome con cui si battezza il provino, ad esempio "P_15";

13. Dopo aver fatto ciò, si vanno ad impostare altri dettagli sulla nomenclatura dei filmati, nel seguente modo:

FILE → PREFERENCES

e ci si ritrova di fronte ad una schermata come quella in Figura 2.2

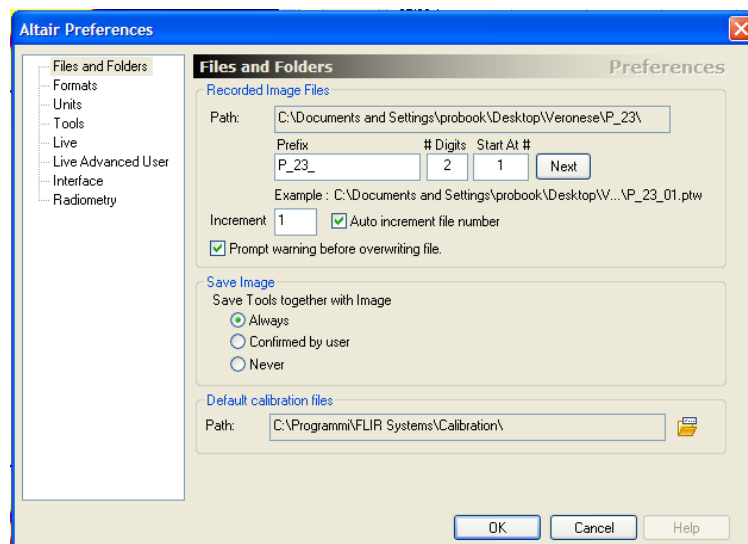


Figura 2.28 – Preferences da indicare ad ogni nuovo provino.

in cui su *Prefix* si indica il codice della prova esempio "P_23_", nelle *Digits* si indica 2, e in *Start at* si indica il numero iniziale che viene dato al primo filmato acquisito: se si imposta 1, allora il primo filmato sarà salvato come "P_23_01". Nella casella sottostante, su *Increment* si va ad impostare 1: in questo modo i filmati saranno salvati con un numero progressivo ad incremento unitario, ovvero il filmato successivo sarà il "P_23_02" e così via. Una volta settate queste impostazioni si preme su OK;

14. Una volta eseguiti i settaggi per il salvataggio, restano alcune impostazioni di fondamentale importanza da definire, le quali si trovano nelle finestre in basso (v. Figura 2.26): *Temperatura range*, *Camera*, *Focus&Wheel* e *Recorder*. Di seguito si illustrano brevemente il loro significato e come impostare i valori corretti:

- Temperature range: la prima operazione da fare consiste nel selezionare dalla finestra a sinistra la lente con la distanza focale che si sta utilizzando, in questo caso 50 mm; dopo ciò, si clicca sull'icona indicata dal cerchio rosso (v. Figura 2.29): questo permette di entrare in una schermata in cui si vanno ad inserire i valori di

temperatura minima e massima, ovvero della finestra di temperatura all'interno della quale si vuole che il provino stia; una volta inseriti i due valori, si clicca su *Next*. Viene dunque visualizzata una finestra contenente una o più curve, che sono i filtri che il software va ad impiegare per elaborare le immagini tra la temperatura massima e minima; l'ideale sarebbe avere una sola curva che copra l'intero intervallo di temperatura, in modo da rendere massima la frequenza di acquisizione e ridurre i tempi di elaborazione; il range di default è compreso tra i 20°C e i 69°C, ma in questo caso si hanno due curve di filtraggio. Si procede dunque a modificare il range da 20°C a 65°C: così facendo si ha un'unica curva. Si seleziona poi *Apply configuration*;

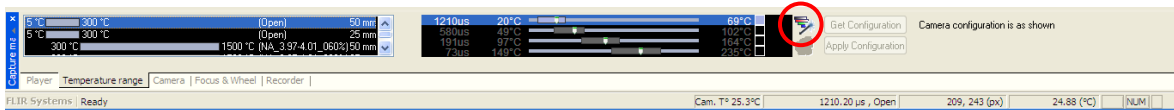


Figura 2.29 – Finestra Temperature range.

- **Camera:** all'interno di tale finestra, si procede ad impostare la frequenza di acquisizione indicata come *Frame rate* [Hz]: nella maggior parte di acquisizioni si è andato ad utilizzare una frequenza di campionamento pari a 204.8 Hz, in modo da avere un numero sufficientemente elevato di valori, ma restando con una frequenza di carico minore o uguale a 10 Hz; nelle prove a basso carico e $R=0.1$, per raggiungere una temperatura di stabilizzazione elevata ed intorno ai 50°C, è stato necessario salire in frequenza anche a 20 Hz. Per avere quindi un buon campionamento di segnale è stato reso necessario aumentare il frame rate, ma in modo tale che la seguente espressione fornisca un valore intero j :

$$\frac{f_{LOAD} \cdot N}{Frame\ rate} = j \quad con\ j = 1,2,3, \dots \quad (1.41)$$

in cui N è il numero di frames acquisito, e che adesso verrà spiegato come andare ad impostarlo. Nella voce poi *Multi-IT Number*, si lascia il valore unitario. Infine, si va a scegliere la finestra di campionamento, con le icone cerchiare in rosso in Figura 2.30: a sinistra si è nella finestra full frame, dopodiché scorrendo verso destra si passa a mezzo frame e a un quarto di frame; minore è l'estensione della finestra, maggiore sarà la frequenza di campionamento massima a cui si può acquisire il segnale, ma d'altro canto si avrà una maggiore difficoltà ad individuare la corretta posizione sulla superficie del provino. Nelle prove fatte in questa Tesi, si è scelta una finestra a mezzo frame per un frame rate di 204.8 Hz, mentre si è utilizzata una finestra a un quarto di frame per frequenze di campionamento più elevate;

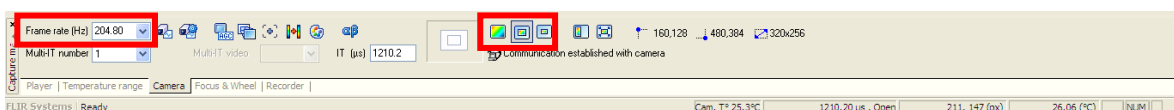


Figura 2.30 – Finestra Camera.

- **Focus&Wheel:** in questa finestra si va a verificare che su *Filter Wheel* sia impostato *Open-Open*.
- **Recorder:** cliccando su questa schermata si entra nella zona di acquisizione della temperatura; prima di acquisire un filmato termografico, bisogna cliccare sulla finestra *Frames* ed impostare il numero di frames che si vogliono acquisire. Nelle prove di questa Tesi sono stati acquisiti 8192 frames che, a 204.8 Hz come frequenza di acquisizione, corrispondono a 40 secondi.

Una volta impostato il numero di immagini da campionare nel filmato si è pronti per acquisire il video, seguendo questi brevi passaggi: si clicca su *Prepare* (cerchiato in rosso) in modo da preparare il software e la relativa cartella di salvataggio del filmato con il peso in GB dello stesso; dopodiché si preme sul tasto rosso a forma circolare e così inizia la registrazione. Nel caso di un filmato legato al gradiente di temperatura, non sono necessari 40 secondi, pertanto si può interrompere il filmato cliccando sull'icona cerchiata in rosso a forma di quadrato. Le icone della schermata sono evidenziate in Figura 2.31.

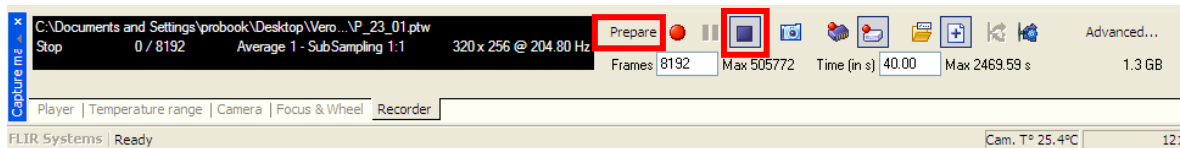


Figura 2.30 – Finestra Recorder. In rosso sono evidenziati i comandi sopra descritti.

2.5.4 Procedura di esecuzione del gradiente e di acquisizione della temperatura e dei cicli di isteresi

Di seguito si vogliono andare a descrivere brevemente i passaggi impiegati per raccogliere i dati utili per il calcolo del gradiente di temperatura, dei cicli di isteresi e di Q con l'approccio Second Harmonic. È fondamentale seguire correttamente anche queste operazioni, altrimenti si rischia di andare ad acquisire valori non corretti. I passaggi sono i seguenti:

1. Si attende la stabilizzazione della temperatura come precedentemente detto. Nel caso dell'utilizzo della termocamera si segue la procedura descritta al Paragrafo precedente, ovvero nella schermata *Record* si preme su *Prepare* e poi sul tasto rosso circolare. Si attende che venga acquisito il filmato: questo servirà per ricavare Q con l'approccio Second Harmonic;
2. Si passa all'uso del pc che controlla la macchina Schenck. Si va ad acquisire il o i cicli di isteresi premendo sul pulsante *ACQUISIZIONE MANUALE* di Figura 2.16: in questo modo vengono salvati i dati di forza dalla cella di carico e deformazione dall'estensometro, in prossimità del numero di cicli al quale si effettua il gradiente;
3. Si va nella schermata di Figura 2.13 e nel *Generatore di funzioni* si va ad aumentare lo *Span Rate [%]* fino al 100%. Questo parametro serve a definire la velocità con il quale si voglia che la macchina si arresti, e per il calcolo del gradiente si vuole un arresto prova il più rapido possibile, al fine di avere il primo tratto di raffreddamento lineare;
4. Si va passa al pc della termocamera e si fa ripartire un'acquisizione. Nel caso dell'uso della termocoppia si passa al pc della termocoppia e si segue la breve procedura descritta alla fine del paragrafo 2.5.2;
5. Si si torna al pc che controlla la macchina Schenck e si preme sul tasto *STOP* presente nel *Generatore di funzioni* (v. Figura 2.13);

6. Si attendono una ventina di secondi circa, dopodiché si salvano le acquisizioni sui rispettivi pc (o della termocamera o della termocoppia);
7. Si riporta lo *Span rate [%]* a 20%: in questo modo per la successiva ripartenza della prova il carico viene riapplicato in modo graduale, al fine di evitare il raggiungimento dei limiti in forza;
8. Si preme su *AVVIO* presente nella schermata *Generatore di funzione* e la prova riparte.

Per avere dei dati stabili in termini di Q, sono state effettuate almeno quattro o cinque interruzioni per ciascuna prova, con intervalli tra un arresto e l'altro di ampiezza in termini di cicli dipendente dalla vita stimata del provino; in altre parole, ad alti carichi sono state effettuate interruzioni ogni circa 5000 o 10000 cicli, mentre a bassi carichi inizialmente ogni 20000 e poi ad intervalli di 50000 o 80000 cicli.

Capitolo 3

RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO TRADIZIONALE: CURVE DI WOEHLER E CONFRONTO TRA AISI 304L LAMINATO A CALDO E TRAFILATO A FREDDO

3.1 Introduzione

L'obiettivo di questo Capitolo è mettere in luce l'analisi svolta sulle prove di fatica ad ampiezza costante (già trattate secondo approccio classico mediante le curve di Woehler nel Capitolo 2) e a gradini mediante l'approccio energetico. In particolare, si vanno ad esaminare i diversi risultati applicando i metodi energetici visti nel Capitolo 1, focalizzando l'attenzione sull'energia meccanica del materiale, W , e sull'energia dissipata Q . A tal proposito, come principale obiettivo di questa tesi, si vuole andare a confrontare i risultati ottenuti in termini di Q sia con la tecnica del gradiente di temperatura di Meneghetti, validata da moltissimi risultati sperimentali, sia con l'approccio proposto da Meneghetti e Ricotta basato sull'uso della seconda armonica della temperatura. Si andranno pertanto a proporre i risultati sperimentali delle prove di fatica elaborate in termini energetici, dapprima ad ampiezza costante e poi a gradini, confrontando i risultati con le curve di Woehler. Si andrà a dimostrare come il parametro Q sia un ottimo parametro di danneggiamento, in quanto, come già annunciato nel Capitolo 1, esso risulta essere una proprietà del materiale. Infine, si valuterà il modello analitico basato sul parametro beta, per calcolare Q , considerando i risultati principali e i limiti sperimentali.

Per fare ciò, come detto già diverse volte nel corso del Capitolo 2, le prove di fatica ad ampiezza costante sono state monitorate in modo continuo: la temperatura è stata monitorata dapprima mediante una termocoppia rame-costantina, poi tramite una termocamera (entrambe descritte nel precedente capitolo). Sono stati eseguiti almeno cinque gradienti di raffreddamento e ogni gradiente è stato preceduto (nelle prove con termocamera) da un'acquisizione del segnale di temperatura una volta raggiunta la stabilizzazione, e da due cicli di isteresi consecutivi.

Verrà descritta inoltre la procedura per il calcolo di Q da gradiente, per il calcolo dell'area di un ciclo di isteresi e per l'analisi, l'elaborazione e l'importazione in MATLAB di un filmato termografico.

3.2 Risultati sperimentali con approccio in ampiezza di tensione: curve di Woehler

All'interno di questo paragrafo vengono raccolti i risultati delle prove di fatica ad ampiezza costante, sia per le prove a $R=0.1$ che per quelle a $R=-1$, eseguite nell'ambito di questa Tesi. Successivamente viene fatto il confronto tra questi risultati ottenuti su piastre laminate a caldo e quelli di studi precedenti su barre trafilate a freddo, sempre nel medesimo materiale AISI 304L. Tale confronto nasce dalla necessità di osservare l'effetto dell'incrudimento di questo materiale, che in presenza di una tensione media maggiore di zero, è molto presente.

3.2.1 Risultati delle prove di fatica a $R=-1$

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove di fatica eseguite a $R=-1$ utilizzando l'approccio classico in ampiezza di tensione, ottenendo le curve di Woehler.

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	N_f
R-1_10	210	0	210	-210	16.7	-16.7	86665
R_-1_11	230	0	230	-230	18.4	-18.4	16857
R_-1_12	210	0	210	-210	16.8	-16.8	105287
R_-1_14	210	0	210	-210	16.8	-16.8	119785
R_-1_17	210	0	210	-210	17.4	-17.4	47217
R_-1_21	210	0	210	-210	17.4	-17.4	122891
R_-1_1bis	230	0	230	-230	18.4	-18.4	18589
R_-1_2bis	220	0	220	-220	17.6	-17.6	42109
R_-1_3bis	200	0	200	-200	16	-16	450903
R_-1_4bis	190	0	190	-190	15.2	-15.2	10145368*
R_-1_5bis	200	0	200	-200	16	-16	10000000*
R_-1_6bis	210	0	210	-210	16.8	-16.8	225197
R_-1_7bis	200	0	200	-200	16	-16	10000000*

Tabella 3.1 – Prove di fatica ad ampiezza costante con $R=-1$.

In particolare, sono state eseguite 6 prove nell'ambito della presente Tesi, ma per la costruzione delle curve sono stati impiegati anche altri risultati sperimentali precedenti ottenuti dalla medesima piastra, laminata a caldo. Le prove nominate come "bis" in Tabella 3.1 sono quelle eseguite precedentemente a questo lavoro di tesi, mentre i valori di N_f con l'asterisco indicano il raggiungimento del runout.

Un aspetto da sottolineare è che durante tali prove si è andati ad utilizzare un ventilatore industriale che ha garantito la possibilità di aumentare la frequenza di carico, altrimenti limitata a 1 o 2 Hz per i carichi più alti a causa del forte riscaldamento del materiale (si ricorda infatti che la temperatura è stata monitorata e mantenuta sotto i 60°C).

Una volta ottenuti i punti sperimentali e note quindi le due informazioni base per costruire una curva di Woehler, si è fatto uso di un foglio di calcolo Excel denominato *FaticaW* (che verrà descritto brevemente in Appendice A2) per determinare tale curva. In particolare, è stata fissata una banda di dispersione compresa tra il 10% e il 90% in termini di PS ovvero di probabilità di sopravvivenza;

infine, indici di dispersione in sigma e in N sono stati determinati assumendo un intervallo di confidenza pari al 95%.

Di seguito si rappresenta in Figura 3.1 la curva di Woehler ottenuta dai dati presenti in Tabella 2.3, riferiti dunque a un materiale laminato a caldo:

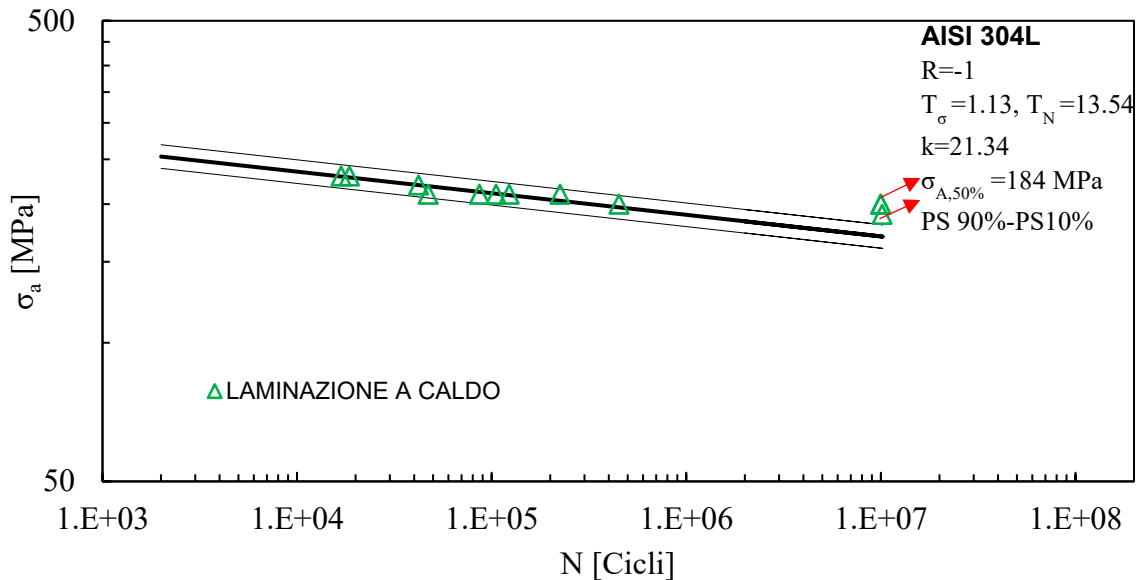


Figura 3.1 – Curva di Woehler per R=-1.

Si osserva come utilizzando i dati provenienti dalla medesima piastra, essi cadano all'interno di un'unica banda di dispersione. In particolare, l'indice di dispersione in sigma assume un ottimo valore di 1.13, così l'indice di dispersione in termini di vita a fatica, esprimibile come $T_N = (T_\sigma)^k$, che ha un valore pari a 13.54. La pendenza k di 21.34 è una pendenza tipica di un provino liscio a R=-1. La tensione corrispondente a $2 \cdot 10^6$ di cicli con una PS del 50%, $\sigma_{A,50\%}$, risulta pari a 184 MPa. Essa non è propriamente il limite di fatica, in quanto per essere determinato esso necessita dell'utilizzo della procedura Staircase. In queste prove sono stati considerati runout i provini che hanno raggiunto i 10^7 cicli, ed in particolare questa condizione si è manifestata in tre casi, rispettivamente a 190 MPa, 200 MPa e nuovamente a 200 MPa.

3.2.2 Risultati delle prove di fatica a R=0.1

Si vogliono riportare ora in Tabella 3.2 i risultati delle prove di fatica ad ampiezza costante, eseguite con un rapporto di ciclo R=0.1.

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	N_f
R01_1	180	220	400	40	19.2	1.9	190512
R01_2	200	244.4	444.4	44.4	23.4	2.3	81411
R01_3	160	195.6	355.6	35.6	17.6	1.8	458992
R01_4	180	220	400	40	19.8	2.0	110774
R01_5	140	171.1	311.1	31.1	15.4	1.5	2000000*
R01_6	200	244.4	444.4	44.4	21.5	2.2	121005
R01_7	240	293.3	533.3	53.3	26.5	2.6	49701
R01_8	170	207.8	377.8	37.8	18.7	1.9	332247
R01_9	260	317.8	577.8	57.8	28.4	2.8	42156
R01_15	160	195.6	355.6	35.6	17.4	1.7	2000000*
R01_16	240	293.3	533.3	53.3	26.0	2.6	87430
R01_22	280	342.2	622.2	62.2	27.9	2.8	50678
R01_23	280	342.2	622.2	62.2	27.2	2.7	76806
R01_24	300	366.7	666.7	66.7	33.1	3.31	75971

Tabella 3.2 – Prove di fatica ad ampiezza costante con R=0.1.

Sono state eseguite 14 prove di fatica ad ampiezza costante e a R=0.1, a diversi livelli di carico, in modo da avere più punti sperimentali nelle zone a media e lunga vita del materiale. Le prove in cui compare un asterisco su N_f , sono quelle andate in runout. A differenza delle prove a R=-1, in questo caso non è stato necessario l'utilizzo di un ventilatore industriale, in quanto a R=0.1 il materiale si scaldava poco e si poteva tranquillamente salire in frequenza per velocizzare la prova. Pertanto, ai carichi più bassi è stata raggiunta una frequenza anche di 40 Hz, tipicamente per i carichi di runout, mentre per le prove in cui le forze in gioco erano elevate ci si è potuti spingere nell'intorno dei 7 o 8 Hz, sempre con l'ottica di limitare la temperatura sotto i 60°C.

Una volta ottenuti i punti sperimentali e note quindi le due informazioni base per costruire una curva di Woehler, si è nuovamente proceduto ad utilizzare il foglio di calcolo denominato *FaticaW* per determinare tale curva. È stata fissata anche in questo caso una banda di dispersione compresa tra il 10% e il 90% in termini di PS probabilità di sopravvivenza; infine, indici di dispersione in sigma e in N sono stati determinati assumendo un intervallo di confidenza pari al 95%.

Di seguito si rappresenta in Figura 3.2 la curva di Woehler ottenuta dai dati presenti in Tabella 3.2, ricordando che si fa sempre riferimento a un materiale laminato a caldo.

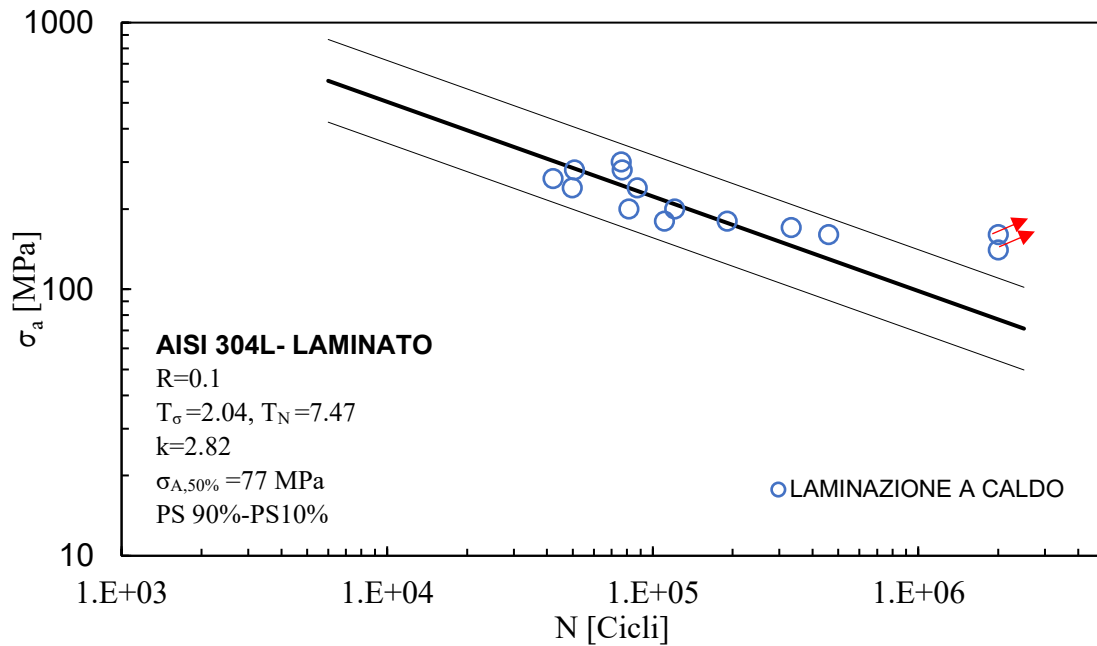


Figura 3.2 – Curva di Woehler per $R=0.1$.

Guardando la Figura 3.2, si può vedere come si venga a creare un'unica banda di dispersione e come tutti i dati cadano all'interno della medesima banda. L'indice di dispersione in tensione assume un buon valore anche questa volta, pari a 2.04; l'indice di dispersione in vita è pari a 7.47, un ottimo valore. L'aspetto significativo riguarda però la pendenza inversa della curva di Woehler: di solito a rapporti di ciclo $R=0.1$ e per provini lisci come in questo caso, si ottengono delle pendenze nell'intorno di 10 fino a 20; in questo caso invece, se la pendenza della curva a $R=-1$ è compatibile con quella classica per un provino liscio, per $R=0.1$ otteniamo un valore pari a 2.82. Tale valore è molto minore rispetto a quelli che solitamente si ritrovano. Questo effetto, per cui la curva è notevolmente più ripida del previsto, è stato ipotizzato essere dovuto a un forte incrudimento del materiale che si viene a manifestare con l'applicazione di tensioni medie maggiori di zero. Tale ipotesi, verrà poi dettagliatamente discussa in seguito.

La tensione corrispondente a $2 \cdot 10^6$ di cicli con una PS del 50%, $\sigma_{A,50\%}$, risulta pari a 77 MPa. Essa non è propriamente il limite di fatica, in quanto per essere determinato esso necessita dell'utilizzo della procedura staircase, come nel caso di $R=-1$. In queste prove sono stati considerati runout i provini che hanno raggiunto i $2 \cdot 10^6$ cicli. Questa condizione si è manifestata in due casi, rispettivamente a 140 MPa e 160 MPa.

Il passaggio successivo che rimane da fare è il confronto tra i diversi rapporti ciclo $R=0.1$ e $R=-1$, considerando sempre materiale proveniente dalla stessa piastra ovvero ottenuta tramite laminazione a caldo.

3.2.3 Confronto dei risultati delle prove di fatica per $R=-1$ e $R=0.1$

In questo paragrafo, come accennato in precedenza, si va confrontare le curve di fatica per i due rapporti ciclo $R=-1$ e $R=0.1$ che sono stati impiegati nelle prove in esame. Il primo passo da fare consiste nell'andare a diagrammare in un unico grafico le due curve, in modo che possa vista immediatamente la differenza tra il comportamento a tensione media nulla e maggiore di zero. In Figura 3.3 si riportano le due curve in precedenza ottenute:

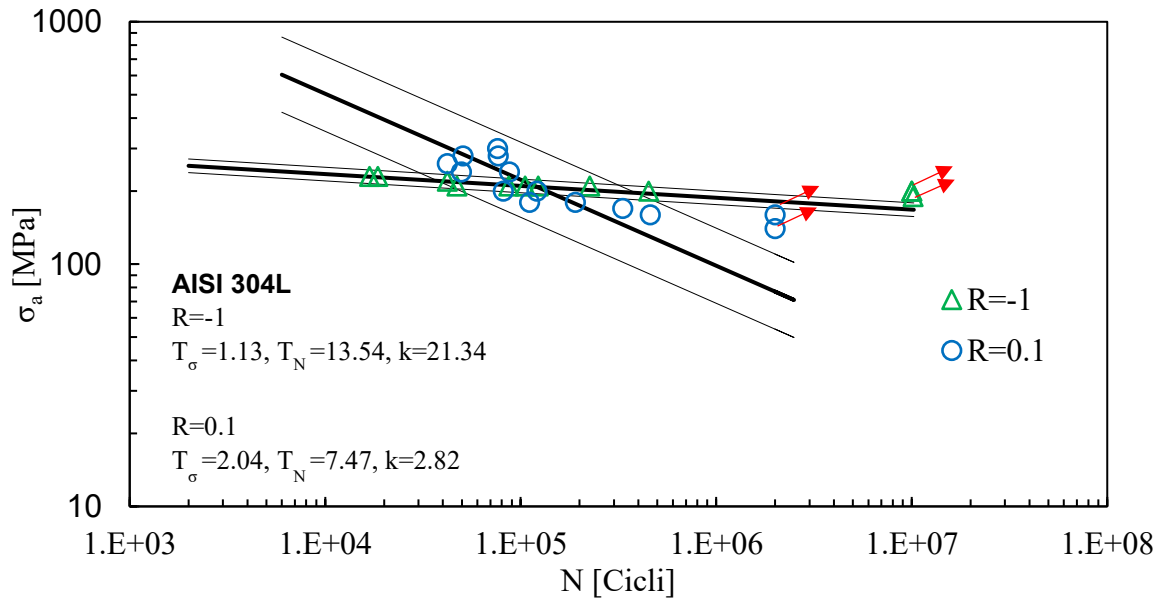


Figura 3.3– Confronto delle curve di Woehler per $R=-1$ e $R=0.1$.

Come si osserva dalla Figura 3.3, i dati a $R=0.1$ sono rappresentati da cerchietti in azzurro mentre i dati a $R=-1$ sono rappresentati da dei triangoli verdi. Guardando il grafico, si capisce in modo immediato che si è di fronte ad un caso particolare. Infatti, nel precedente paragrafo si è sottolineato come la pendenza della curva a $R=0.1$ sia piuttosto anomala rispetto ai casi comuni. Questo fa sì che la curva sia piuttosto ripida, ovvero, in altre parole, per piccole variazioni di tensione applicata c'è una piccola variazione in termini di numero di cicli. Tale fenomeno, come detto, è da imputare alla presenza di un forte incrudimento: il materiale AISI 304L è un acciaio austenitico, il quale però se sottoposto ad alti strain ovvero ad alte deformazioni, manifesta una trasformazione di una frazione anche significativa di austenite in martensite. Tale fenomeno, porta all'aumento della resistenza del materiale e questo comportamento è noto appunto come incrudimento.

Pertanto, proseguendo con il ragionamento, a bassi carichi applicati il materiale mostra una curva di Woehler $R=0.1$ più bassa rispetto a quella a $R=-1$, e ciò è in accordo con il fatto che una tensione media maggiore di zero è più danneggiante rispetto al caso di tensione media nulla. Aumentando i carichi invece, aumentano anche le deformazioni imposte: l'estensometro misurava durante la prova deformazioni dell'ordine del 20% per carichi sopra i 240 MPa. Questo aumento di deformazione comporta una trasformazione di una quota parte di austenite in martensite, causando in ultima istanza un incrudimento elevato, da portare addirittura il materiale a $R=0.1$ ad avere una resistenza maggiore di quello a $R=-1$. Ad alti carichi quindi, l'abbattimento della resistenza per effetto della tensione media è minore di quanto non lo sia l'aumento di resistenza dovuto all'incrudimento.

Per valutare la bontà di queste considerazioni, sono state eseguite delle prove di durezza e delle analisi di microstruttura per valutare l'influenza della trasformazione di fase, che verranno mostrate in seguito.

Dopo aver fatto il confronto a parità di materiale e di processo di produzione per R diversi, si vuole ora andare a confrontare, il comportamento a fatica dello stesso materiale AISI 304L, ma ottenuto tramite due processi differenti, ovvero laminazione a caldo e trafilatura a freddo. Tale confronto viene eseguito a parità di R , in modo da evidenziare le differenze legate all'effetto tensione media maggiore di zero.

3.2.4 Confronto dei risultati delle prove di fatica per R=-1 tra barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo di AISI 304L

Questo paragrafo viene dedicato al confronto di provini in AISI 304L ottenuti da piastre laminate a caldo, e provini in AISI 304L ottenuti da barre trafilate a freddo per un rapporto di ciclo pari a R=-1. Di seguito, in Figura 2.34 viene riportata la geometria dei provini trafilati, impiegati nelle prove di fatica con R=-1:

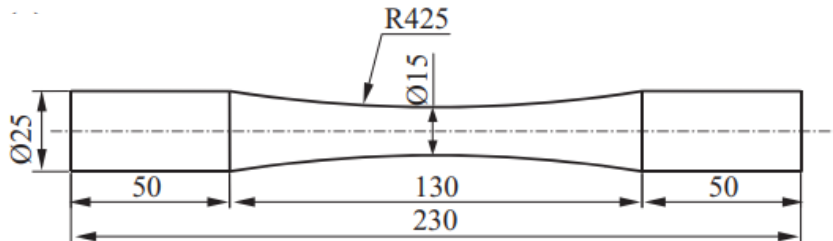


Figura 3.4 – Geometria dei provini in AISI 304L usati per R=-1. [8]

I risultati sperimentali sono stati eseguiti in [8] e di seguito vengono ripresi e confrontati con quelli della presente Tesi. La presenza di questo confronto nasce dalla necessità di indagare il comportamento a fatica con e senza di incrudimento, in quanto nei due precedenti paragrafi si è notato come il materiale risponda in modo significativamente diverso se sottoposto ad alte deformazioni e quindi ad alti carichi. Di seguito si riportano nella Tabella 2.5 i dati delle prove eseguite in [8], in cui la sigla “_TF” sta per trafilato a freddo:

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	N_f
R_-1_02_TF	240	0	240	-240	28.6	-28.6	2000000*
R_-1_03_TF	400	0	400	-400	47.7	-47.7	2931
R_-1_04_TF	350	0	350	-350	41.8	-41.8	58260
R_-1_05_TF	320	0	320	-320	38.2	-38.2	793881
R_-1_06_TF	300	0	300	-300	35.8	-35.8	2000000*
R_-1_07_TF	335	0	335	-335	40.0	-40.0	123424
R_-1_08_TF	350	0	350	-350	41.8	-41.8	111949
R_-1_09_TF	335	0	335	-335	40.0	-40.0	2489072*
R_-1_10_TF	320	0	320	-320	38.2	-38.2	198187
R_-1_11_TF	320	0	320	-320	38.2	-38.2	1882442
R_-1_12_TF	400	0	400	-400	47.7	-47.7	3589
R_-1_13_TF	350	0	350	-350	41.8	-41.8	36728
R_-1_14_TF	335	0	335	-335	40.0	-40.0	92926
R_-1_15_TF	320	0	320	-320	38.2	-38.2	206195
R_-1_16_TF	300	0	300	-300	35.8	-35.8	483510

Tabella 3.3 – Prove di fatica ad ampiezza costante con R=-1 per barre trafilate a freddo. [8]

Nella seguente Figura 3.5 si riporta la curva di fatica riportata nel Paragrafo 2.6.1 per $R=-1$, e i dati sperimentali di Tabella 2.5 [8], per verificarne la possibilità che essi cadano nella stessa banda di dispersione:

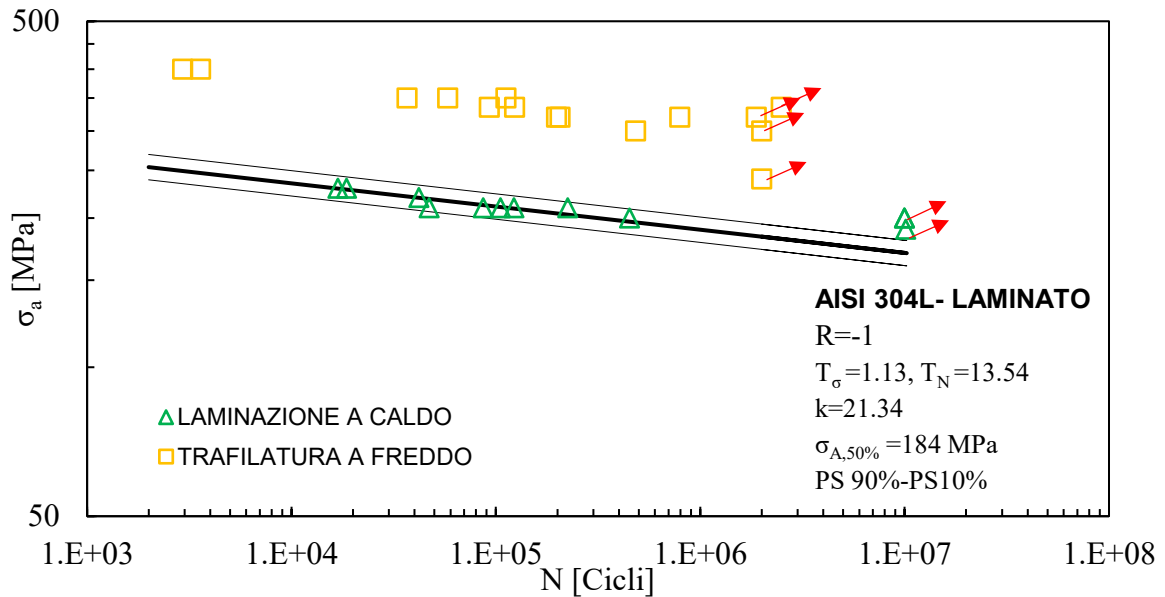


Figura 3.5 – Confronto delle curve di Woehler per $R=-1$ di provini in AISI 304L trafilati a freddo e laminati a caldo

Analizzando la Figura 3.5, si osserva come i punti segnati da quadrati gialli non cadano in alcun modo all'interno della stessa banda di dispersione, rispetto a quelli in azzurro. In particolare, essi hanno due curve completamente diverse l'una dall'altra. Tale curva viene rappresentata in Figura 2.36 in cui se ne riportano le principali caratteristiche, confrontandola con la curva per i laminati:

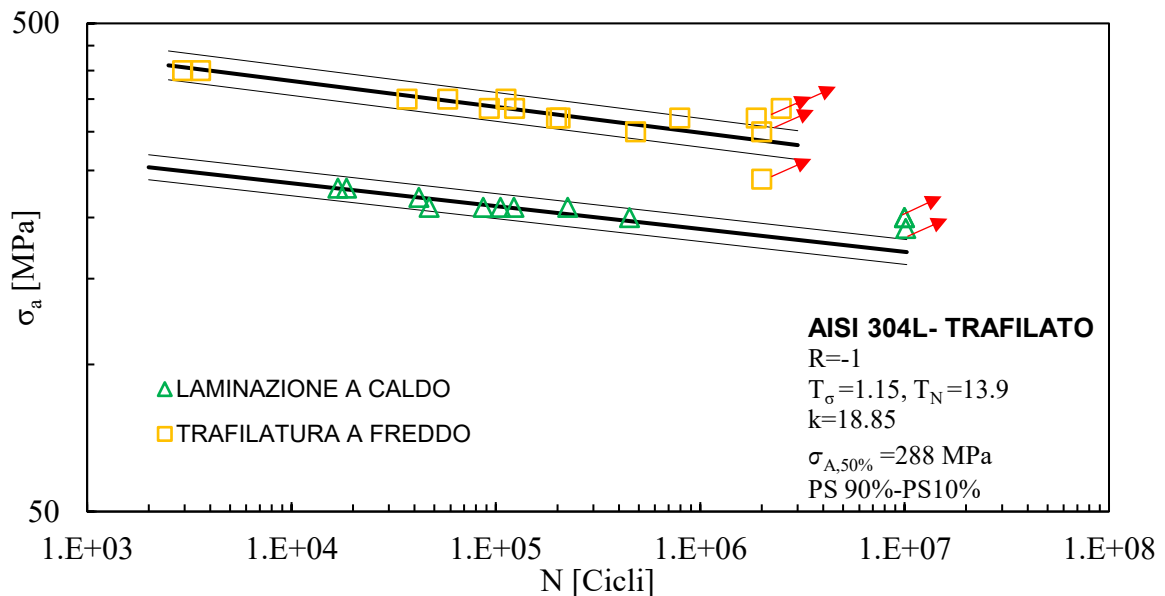


Figura 3.6 – Curva di Woehler per barre trafilate a freddo in acciaio AISI 304L e $R=-1$.

Si possono fare alcune considerazioni in merito al confronto tra i due casi: anzitutto, i provini laminati mostrano una resistenza notevolmente inferiore rispetto ai provini trafilati; ciò è legato al fatto che l'operazione di trafilatura a freddo induce un aumento dell'incrudimento e dunque della resistenza del materiale. Questo aspetto è visibile dal confronto dei carichi applicati tra le Tabelle 2.3 e 2.5 e anche dal valore della $\sigma_{A,50\%}$, che risulta essere pari a 288 MPa contro i 184 MPa per le piastre. D'altro canto, i carichi applicati a R=-1 per le piastre laminate a caldo, non generano alte deformazioni, nell'ordine di qualche punto percentuale ai carichi più alti, pertanto l'incrudimento e l'eventuale trasformazione di austenite in martensite è estremamente ridotta. Ciò motiva il fatto che i dati sperimentali non comunichino tra di loro, come se appartenessero a due materiali differenti. Per confermare questo aspetto, si rimanda ai paragrafi successivi in cui verrà fatta un'analisi microstrutturale più dettagliata.

3.2.5 Confronto dei risultati delle prove di fatica per R=0.1 tra barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo di AISI 304L

In questo paragrafo si va ad eseguire il confronto fatto in precedenza per R=-1, a un rapporto di ciclo R=0.1. Si vuole perciò andare a valutare eventuali differenze nel comportamento dell'AISI 304L laminato a caldo e trafilato a freddo. La geometria dei provini trafilati e testati a R=0.1 è la medesima di quella rappresentata in Figura 3.4. Di seguito si riportano nella Tabella 3.4 i dati delle prove eseguite in [8] per R=0.1, in cui la sigla “_TF” sta per trafilato a freddo:

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	N_f
R_01_01_TF	200	244.4	444.4	44.4	53.0	5.3	2000000*
R_01_02_TF	250	305.6	555.6	55.6	66.3	6.6	92656
R_01_05_TF	270	330.0	600.0	60.0	71.6	7.2	28649
R_01_06_TF	235	287.2	522.2	52.2	62.3	6.2	2000000*
R_01_09_TF	250	305.6	555.6	55.6	66.3	6.6	128110
R_01_10_TF	240	293.3	533.3	53.3	63.6	6.4	1564740
R_01_11_TF	270	330.0	600.0	60.0	71.6	7.2	33273
R_01_12_TF	270	330.0	600.0	60.0	71.6	7.2	35658
R_01_13_TF	300	366.7	666.7	66.7	79.5	8.0	5430
R_01_16_TF	290	354.4	644.4	64.4	76.9	7.7	10275
R_01_17_TF	240	293.3	533.3	53.3	63.6	6.4	2000000*
R_01_18_TF	245	299.4	544.4	54.4	65.0	6.5	324022
R_01_19_TF	245	299.4	544.4	54.4	65.0	6.5	472269

Tabella 3.4 – Prove di fatica ad ampiezza costante con R0.1 per barre trafilate a freddo. [8]

Nuovamente, i dati segnati con l'asterisco si riferiscono alle prove andate in runout, fissato a $2 \cdot 10^6$ di cicli. Nella figura successiva, si vanno a riportare la curva già mostrata in Figura 3.6 e i punti sperimentali derivanti dalle prove fatte in [8] su barre trafilate, con R=0.1.

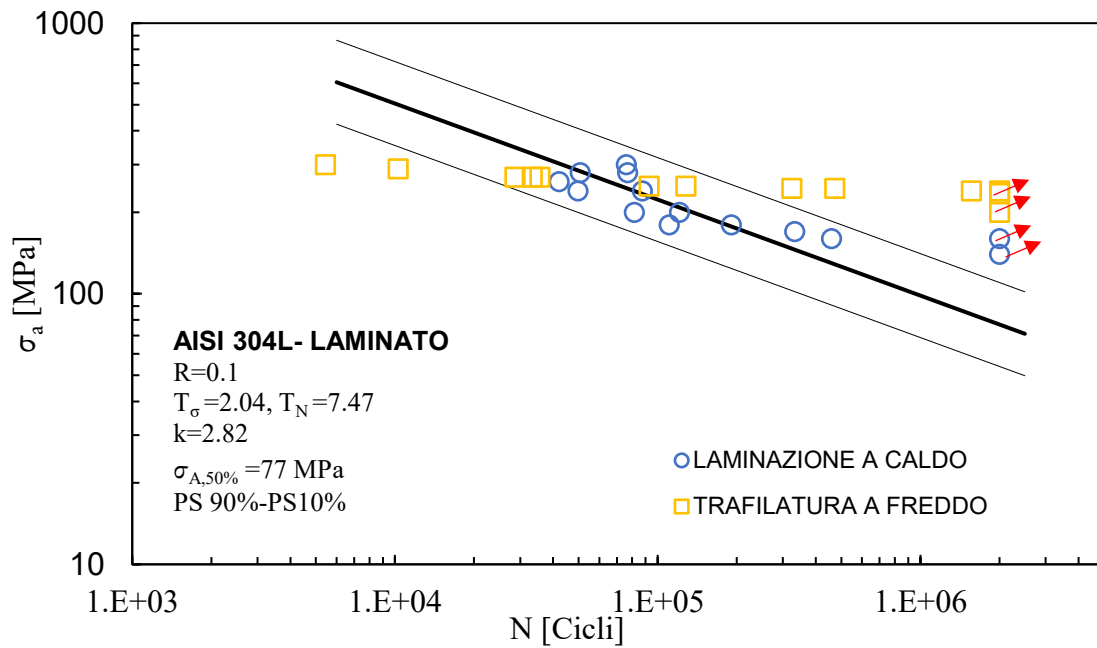


Figura 3.7 – Curva di Woehler per piastre laminate a caldo e punti sperimentali di barre trafilate a freddo in acciaio AISI 304L con $R=0.1$.

Dall'osservazione di Figura 3.7, si evince come questa volta i punti sperimentali non cadano tutti all'esterno della banda di dispersione 10%-90%, bensì parzialmente all'interno di essa. Questo aspetto però viene messo in ombra dal fatto che il materiale ottenuto mediante trafilatura sembra avere una pendenza inversa ben maggiore di quella dell'acciaio laminato. Per confermare ciò, basta diagrammare su unico grafico le due curve, come fatto di seguito in Figura 3.8. Sono riportate inoltre le informazioni relative alla curva di fatica per le barre.

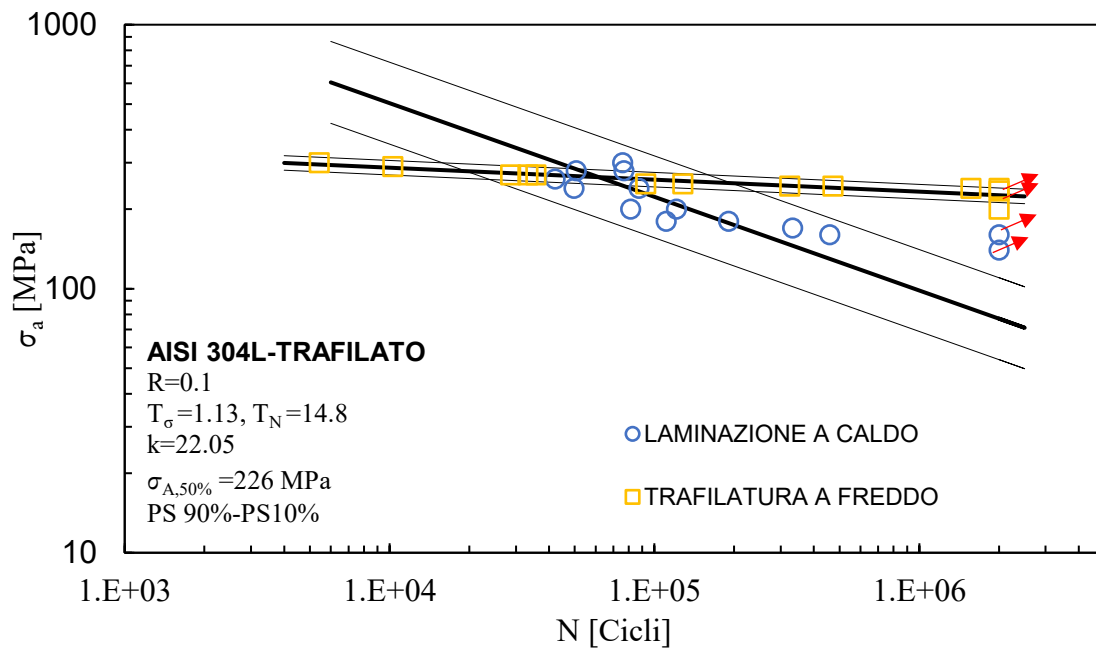


Figura 3.8 – Curva di Woehler per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo in acciaio AISI 304L con $R=0.1$.

Ciò che si può osservare è che le due curve hanno una pendenza nettamente diversa, in particolare $k=3.28$ per i provini laminati e $k=22.05$ per quelli trafilati. Come detto in precedenza, l'anomalia tra le due pendenze è quella relativa al materiale laminato ed è legata alla presenza di un forte incrudimento che si manifesta ad alti strain. Il materiale trafilato invece, risulta già incrudito dal processo stesso, pertanto sia a bassi strain sia ad alti strain esso avrà già ricevuto una deformazione imposta con conseguente aumento della resistenza. Questo fenomeno dell'*hardening* quindi è fortemente dipendente dal carico imposto e dunque dalla deformazione che si genera nel caso di provini laminati. Ciò motiverebbe che ad alto numero di cicli, il materiale trafilato abbia una resistenza maggiore, in quanto le deformazioni per il laminato sono basse. Viceversa, a medio-basso numero di cicli, l'incrudimento del materiale è tale da avvicinare i due casi, fino a farli sovrapporre. Nuovamente, nel prossimo paragrafo si va ad indagare le ipotesi fatte nei vari casi attraverso un'analisi di durezza e di microstruttura.

3.2.6 Confronto curve statiche di trazione e caratteristiche meccanica barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo

In questo paragrafo si vanno a riassumere i risultati delle analisi condotte tra i due materiali laminato a caldo e trafilato a freddo, in modo da giustificare un differente comportamento sia tra lo stesso materiale che tra i due materiali diversi.

In primo luogo, si riportano le curve di trazione statica eseguite nei due casi. Dapprima in Figura 3.9 si riporta la curva di trazione eseguita in [39] e presa come riferimento per una barra trafilata a freddo:

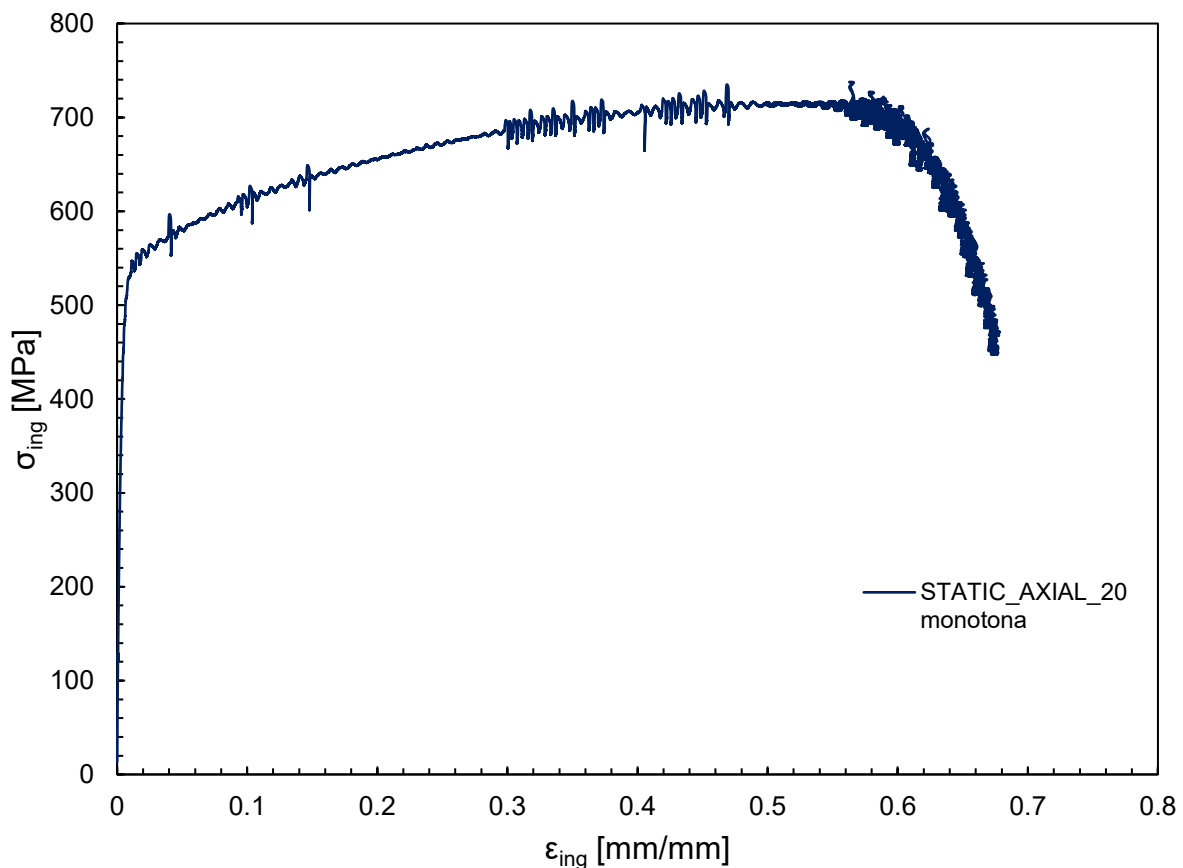


Figura 3.9 – Curva di trazione statica per barre trafilate a freddo in AISI 304L [39]

Per quanto detto in [39], per determinare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio AISI 304L laminato a freddo, a causa della notevole dispersione delle curve di trazione si è scelto di calcolare le caratteristiche meccaniche per ciascuna prova e poi eseguire una media. Nella Figura si riporta per semplicità solo una curva presa a riferimento, mentre i dati presentati in Tabella 3.5 sono riferiti alla media delle diverse prove.

Inoltre, in [39] si fa notare che il tratto elastico dell'acciaio AISI 304 L è molto breve e la caratteristica del materiale perde subito la sua linearità.

Di seguito si riportano il modulo elastico e la tensione di snervamento, mediata tra le diverse prove:

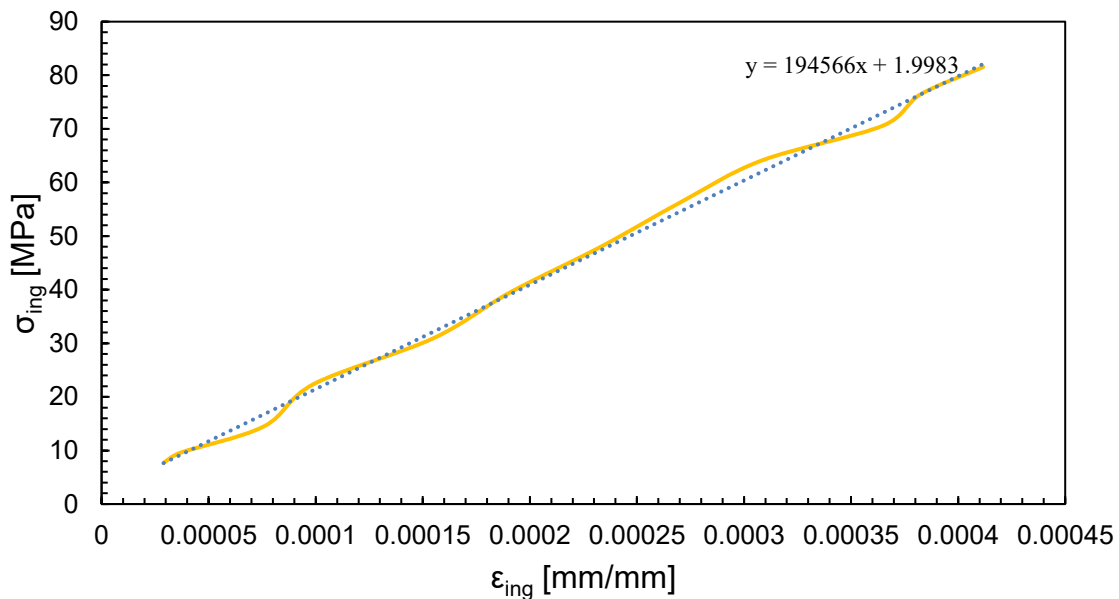


Figura 3.10 – Modulo elastico per barre trafilate a freddo in AISI 304L [39]

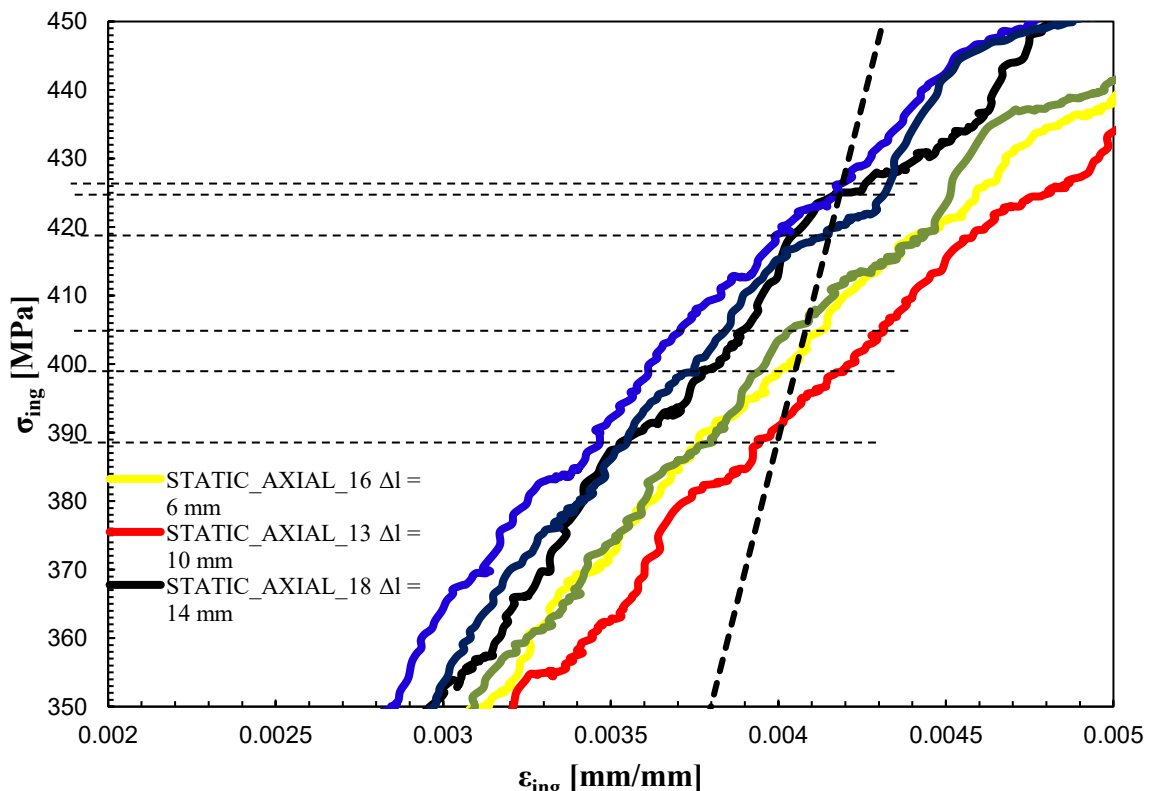


Figura 3.11 – Tensione di snervamento per barre trafilate a freddo in AISI 304L [39]

In Figura 3.12 si riporta invece il calcolo sulla tensione di rottura:

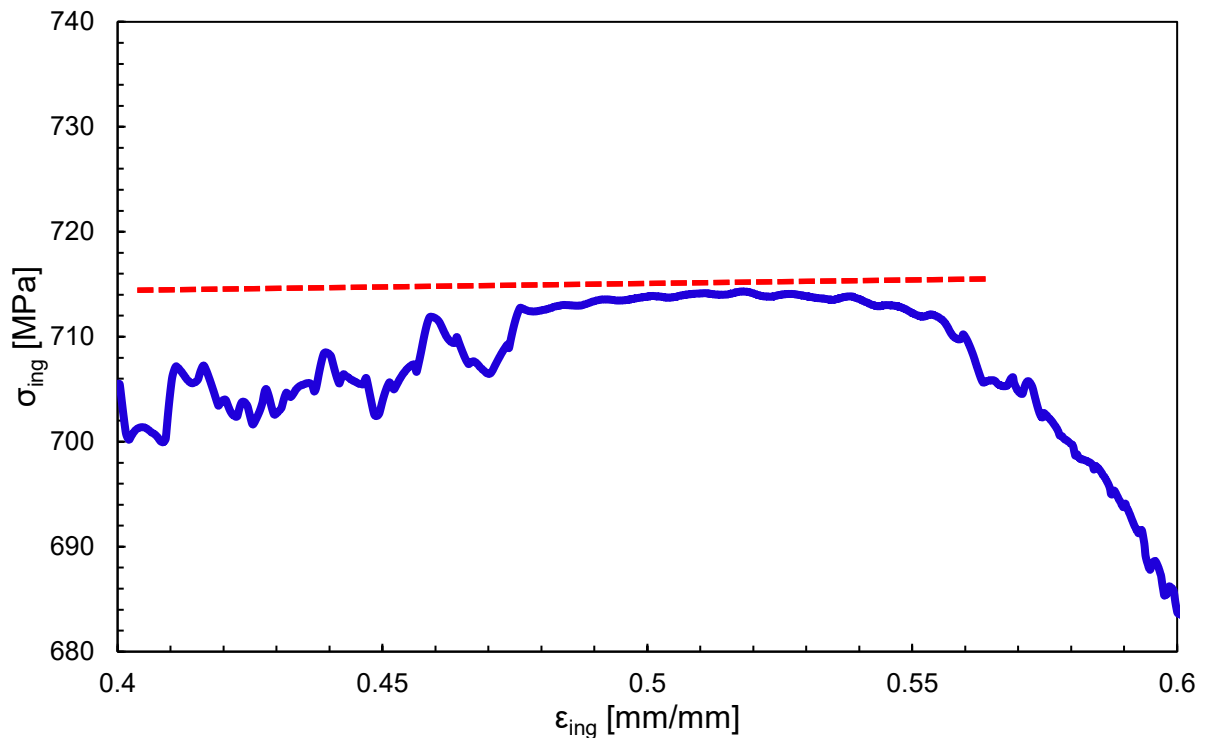


Figura 3.12 – Tensione di rottura per barre trafilate a freddo in AISI 304L [39]

Di seguito si riporta invece la curva statica di trazione ottenuta nel caso di piastre laminate a caldo in AISI 304L. In particolare, si vuole osservare che durante la prova l'estensometro ha perso la sua calibrazione e la deformazione non è stata più conteggiata dallo stesso. La curva riportata in Figura 3.13 pertanto è limitata alla sola deformazione inferiore al 2%, ma per gli scopi di questa Tesi è una

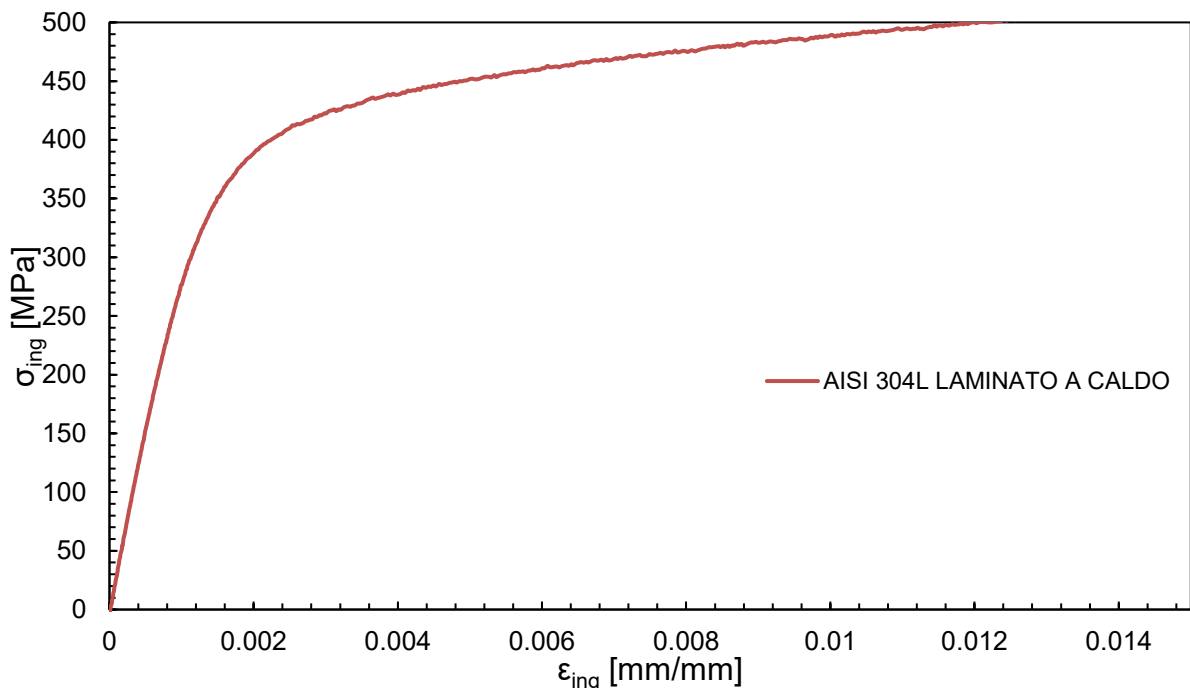


Figura 3.13 – Curva di trazione statica AISI 304L laminato a caldo limitata a deformazioni minori del 2%

curva accettata per le analisi, in quanto per indagare sul comportamento del materiale laminato a caldo si necessita la determinazione della tensione di rottura e di snervamento.

Di seguito in Figura 3.14 si riporta il grafico che mostra il valore del modulo elastico dell'AISI 304L laminato a caldo:

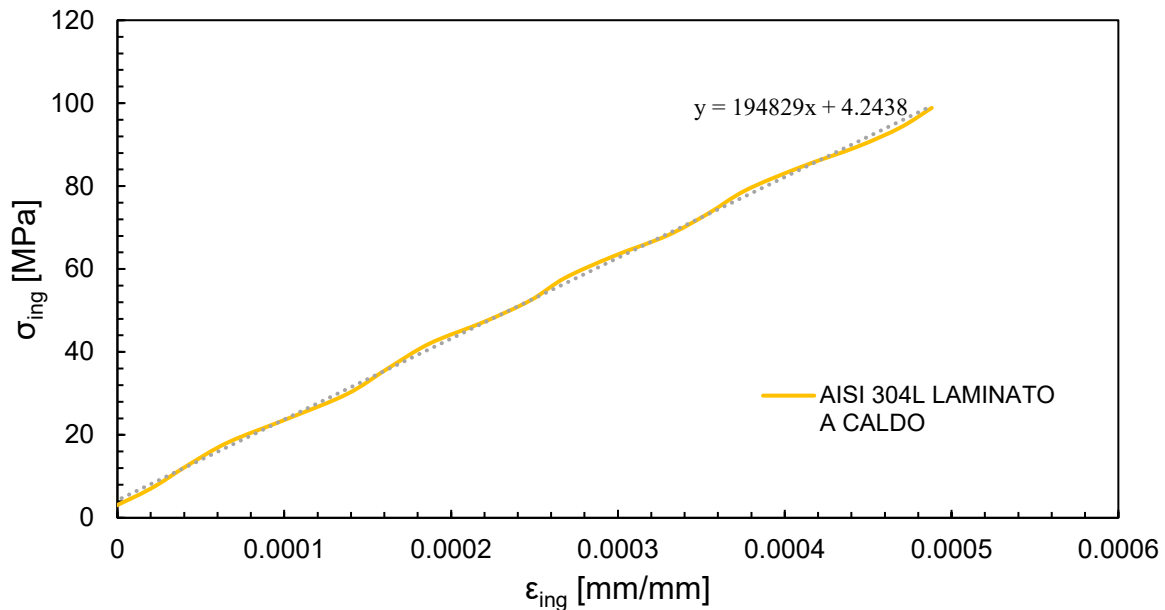


Figura 3.14 – Modulo elastico di AISI 304L laminato a caldo

La tensione di rottura è stata valutata utilizzando il grafico tensione-spostamento, in quanto i valori dell'estensometro risultano essere errati, ma il valore del picco massimo di tensione è indipendente dal fatto di usare o meno la deformazione o lo spostamento della ganascia che serra il provino. In Figura 3.15 si riporta il grafico usato per il calcolo della tensione di rottura:

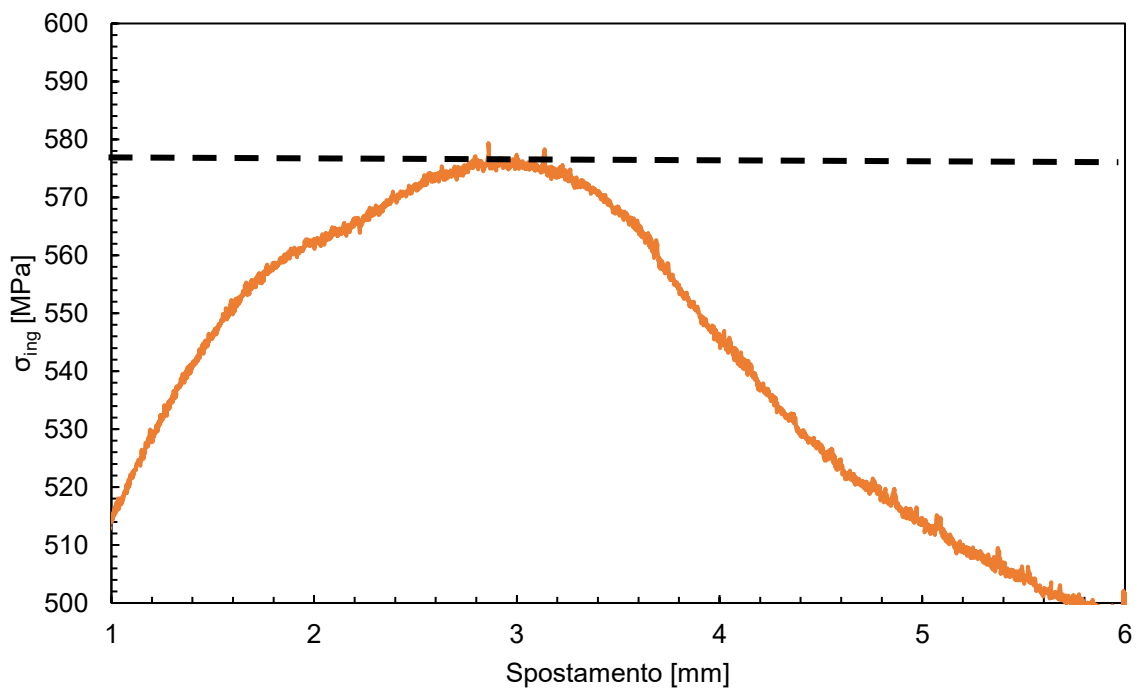


Figura 3.15 – Tensione di rottura di AISI 304L laminato a caldo

	AISI 304L-TRAFILATO A FREDDO	AISI 304L- LAMINATO A CALDO
E [MPa]	194566	194829
Tensione di snervamento [MPa]	412	270
Tensione di rottura [MPa]	714	577

Tabella 3.5 – Caratteristiche meccaniche dell'acciaio AISI 304L laminato a caldo e trafilato a freddo

Si nota come il modulo elastico sia lo stesso, in quanto non viene praticamente influenzato da trattamenti termici o deformazioni a freddo, mentre il valore della tensione di snervamento e di rottura sono diverse: ciò che si osserva è che la tensione di snervamento dell'acciaio AISI 304L trafilato a freddo è maggiore del 40% rispetto alle piastre laminate a caldo, così come la tensione di rottura del trafilato a freddo è maggiore del 20% rispetto a quella del laminato. Questa osservazione sperimentale è il primo punto di partenza per giustificare la differenza di comportamento in termini di curve di fatica: il primo aspetto è che sicuramente il materiale di partenza trafilato ha delle caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quello laminato, e questo se stiamo considerando provini lisci, porta ad un aumento della resistenza a fatica. Per capire però il perché a $R=-1$ le due curve siano non sovrapponibili, mentre a $R=0.1$ ad alti carichi i due materiali si avvicinano in termini di comportamento, si deve procedere con analisi dappima metallografiche.

3.2.7 Confronto AISI 304L laminato a caldo e trafilato a freddo: microstruttura, durezza e analisi mediante XRD

In questo paragrafo verranno riassunte le prove eseguite nel Laboratorio di Metallurgia presso l'Università di Padova, svolte per indagare il comportamento a fatica dell'acciaio AISI 304L sotto diversi punti di vista. In primo luogo, sono state eseguite le metallografie, e di seguito se ne descrive la procedura impiegata:

1. I provini sono stati tagliati mediante una sega circolare, ricavando le sezioni da utilizzare per le analisi metallografiche e per la diffrazione ai raggi x: per le piastre laminate si è utilizzata una porzione di materiale appena al di sotto della superficie mentre per le barre si è utilizzata la sezione presente a cuore;
2. Una volta tagliati, i provini utilizzati per le prove di durezza e per le micrografie sono stati inglobati in una resina polimerica, la cui macchina è rappresentata in Figura 3.16:



Figura 3.16 – Macchinario sciogli-resina e compattatore per inglobare i provini

3. Quando tutti i provini sono stati preparati si è proceduto in modo diverso per i provini per l'XRD e quelli per le micrografie:
- Provini XRD: questi sono stati sottoposti a diverse passate tramite carte vetrata di grammatura differente, ovvero partendo da 500 per passare poi a 800 e 1200. Infine sono stati sottoposti all'elettro lucidatura per circa 35 s ad una tensione di 28 v, in modo da lappare la superficie ma non meccanicamente, evitando quindi di inserire trasformazioni di fasi aggiuntive;
 - Provini metallografie e durezze: questi ultimi sono stati sottoposti a un ciclo di passate tramite carta vetrata, con le seguenti grammature 500, 800, 1200, 4000; dopodiché si è andati ad utilizzare della sospensione di grani di diamante di 6 μm e successivamente di 1 μm in modo da lappare la superficie riducendo il più possibile lo strato deformato. Infine, prima di eseguire le analisi al microscopio si è proceduto ad eseguire l'attacco chimico al materiale tramite acido ossalico 10%, in modo da poter evidenziare in modo netto i bordi grano.

I provini scelti sono stati i seguenti: piastra base AISI 304L laminata a caldo, R01_P_15 andato in runout, R01_P_24 sollecitato ad una ampiezza di tensione pari a 300 MPa, R-1_P_11 sollecitato a 230 MPa, R01_P_14 300 MPa [8] e R-1_P_12 a 400 MPa [8]. Gli ultimi due provini rappresentano le barre trafilate a freddo, le cui curve sono presenti in [8].

Di seguito si riportano le micrografie dapprima per le piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo, ad ingrandimenti di 32x e 16x:



Figura 3.17 – Micrografia AISI 304L piastra base laminata a caldo, 16x

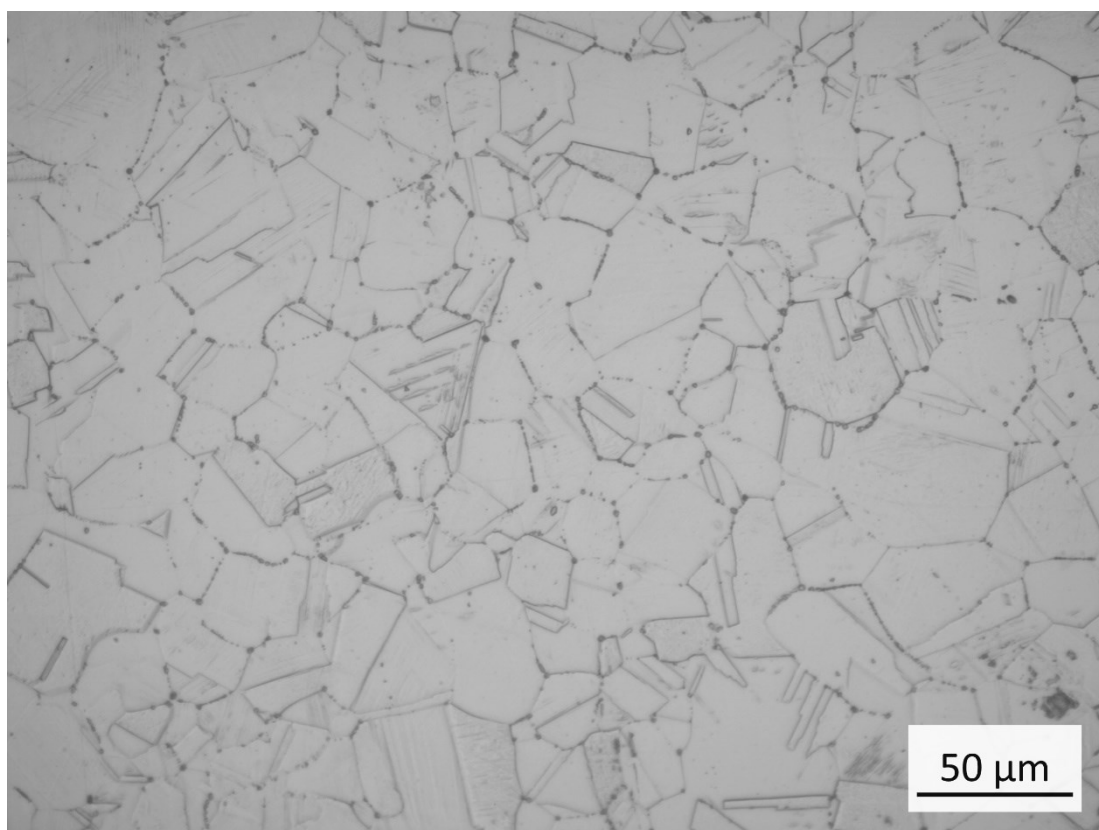


Figura 3.18 – Micrografia AISI 304L piastra base laminata a caldo, 32x

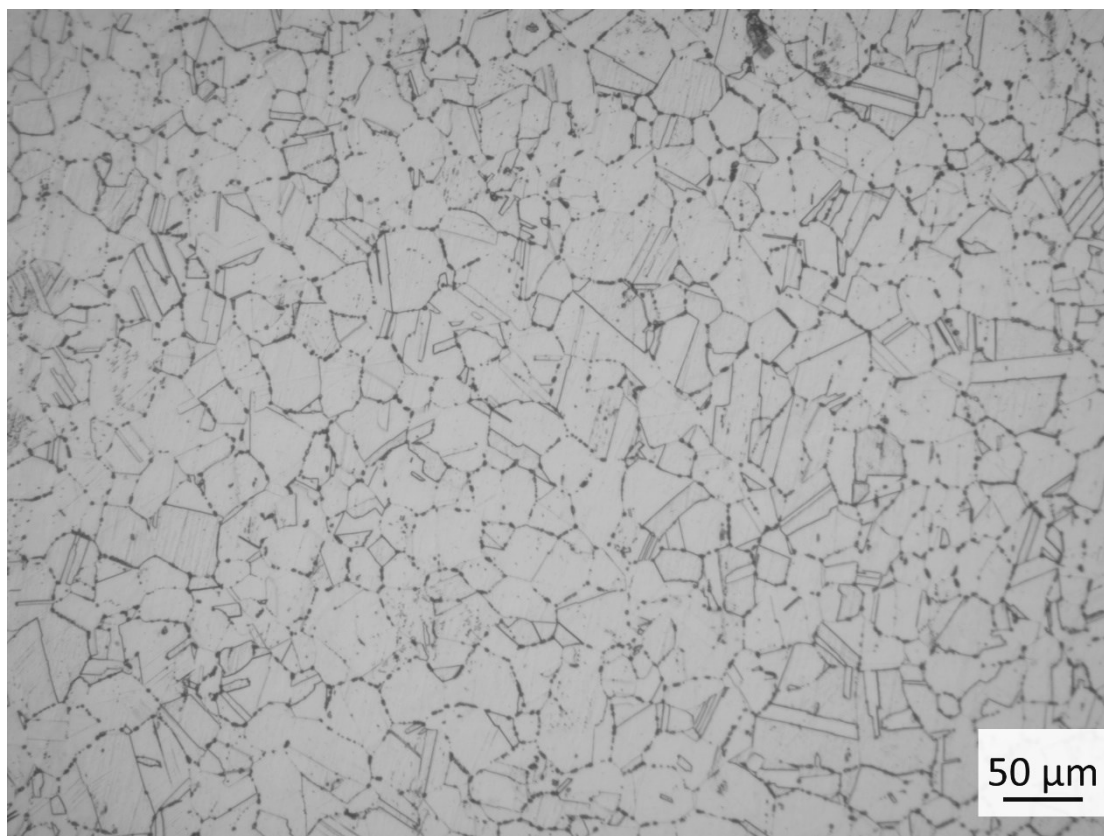


Figura 3.19 – Micrografia AISI 304L R01_P_15, 16x

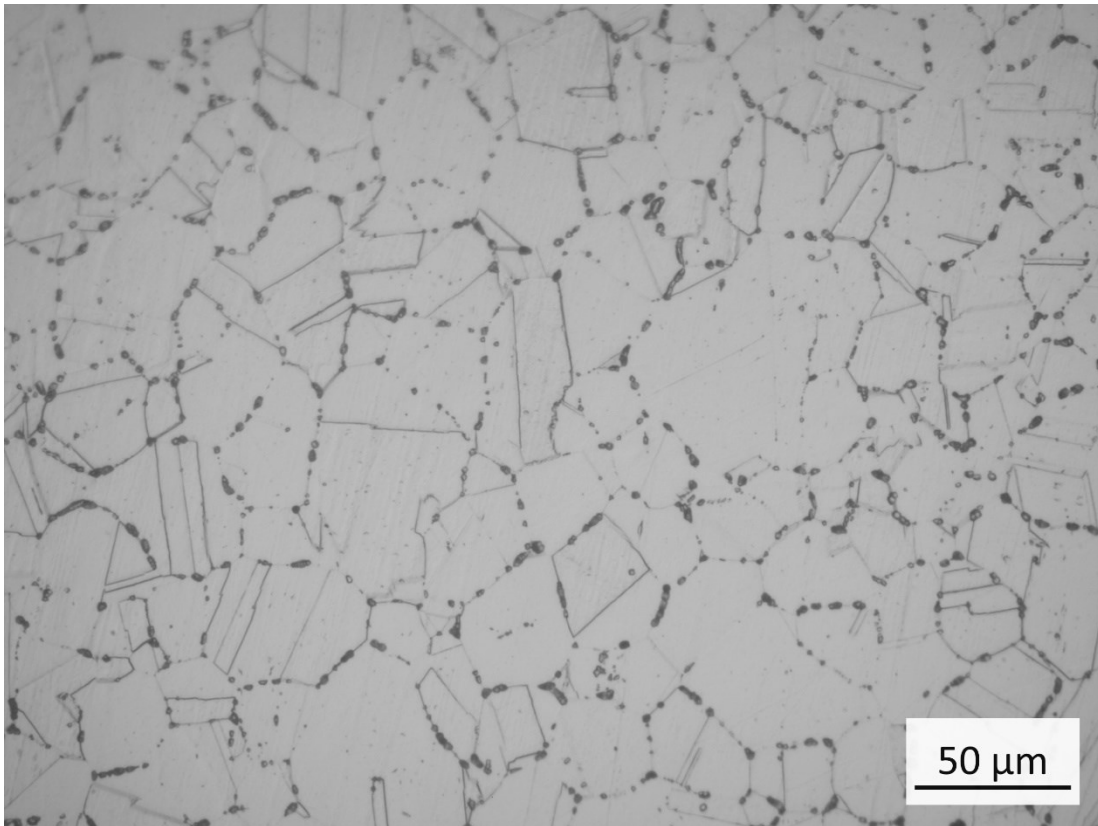


Figura 3.20 – Micrografia AISI 304L R01_P_15, 32x

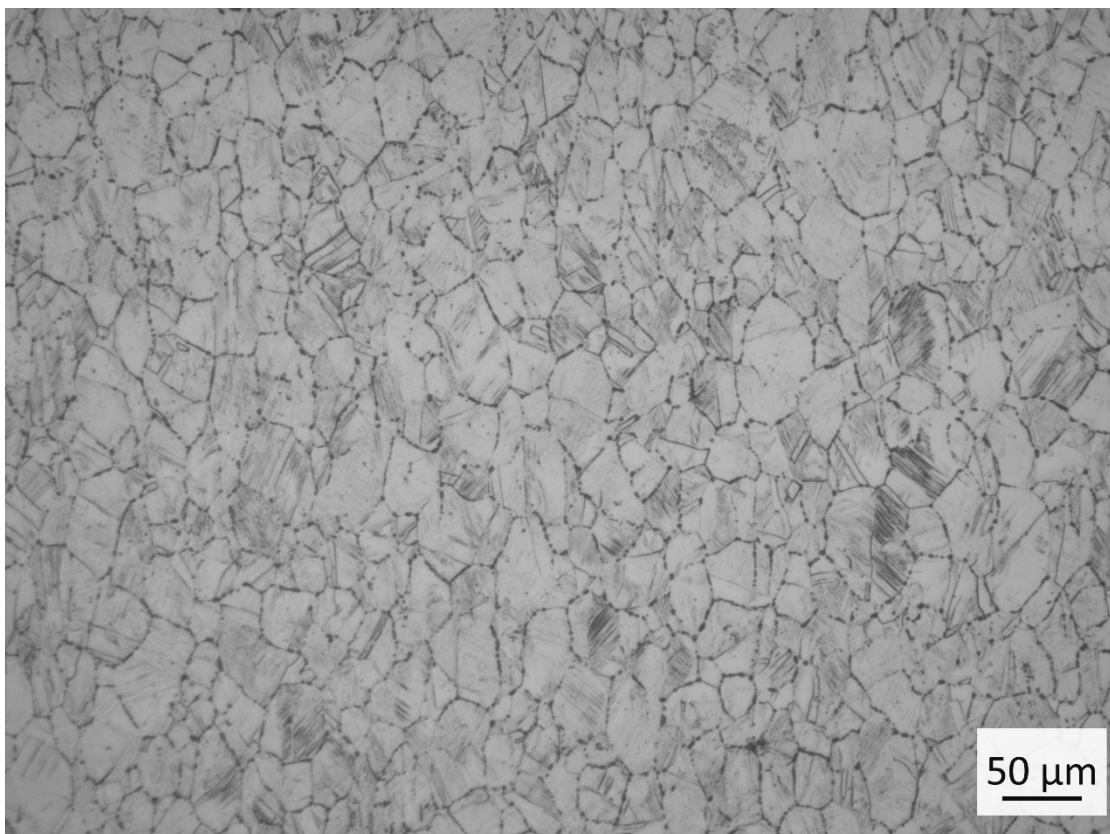


Figura 3.21 – Micrografia AISI 304L R01_P_24, 16x

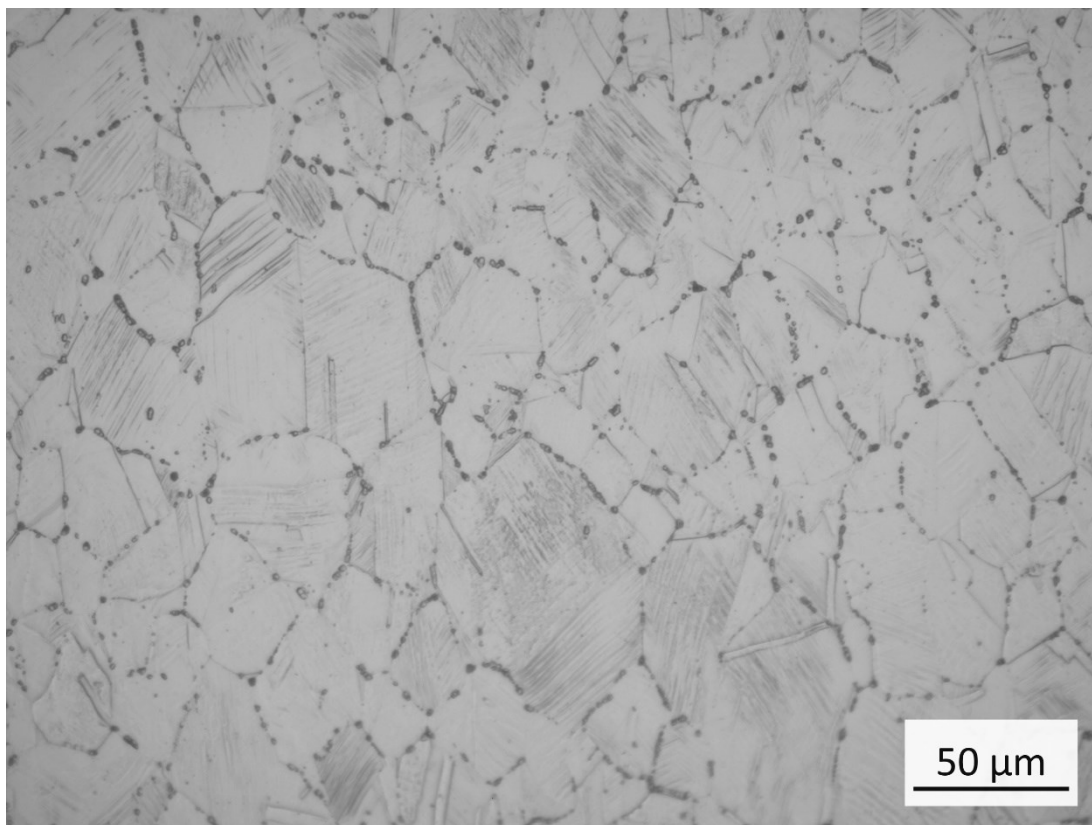


Figura 3.22 – Micrografia AISI 304L R01_P_24, 32x

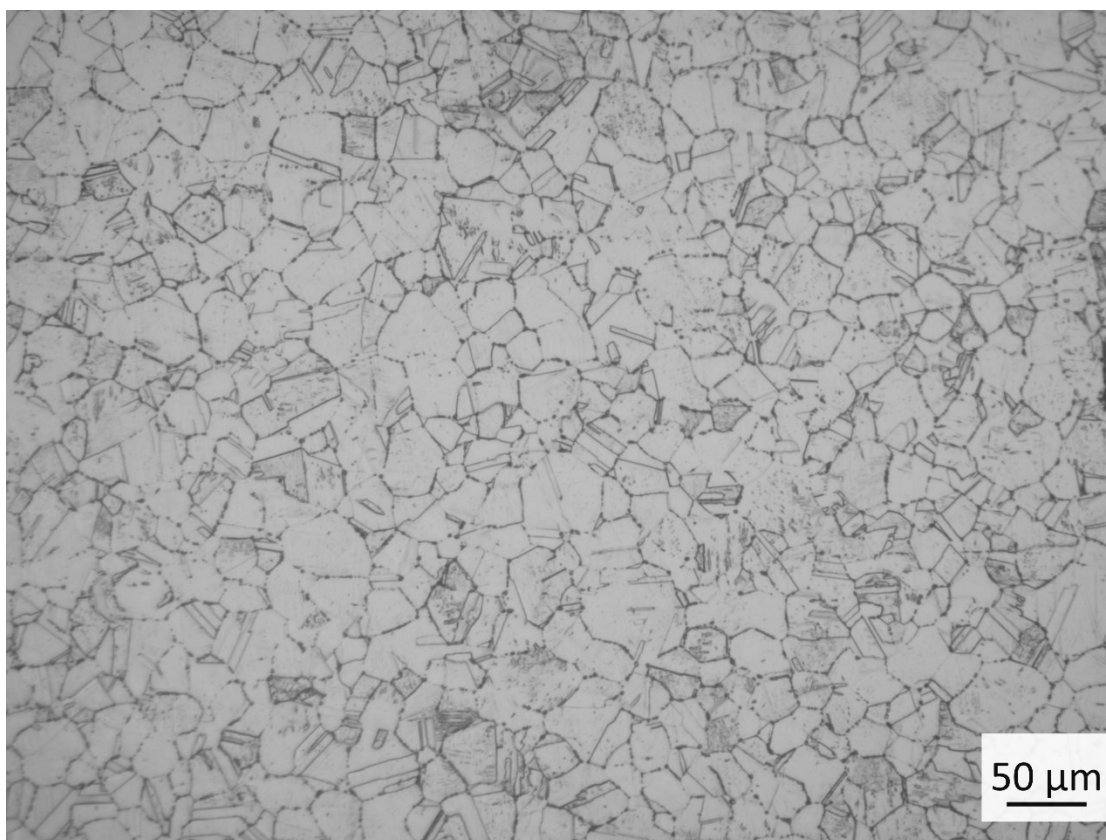


Figura 3.23 – Micrografia AISI 304L R-1_P_11, 16x

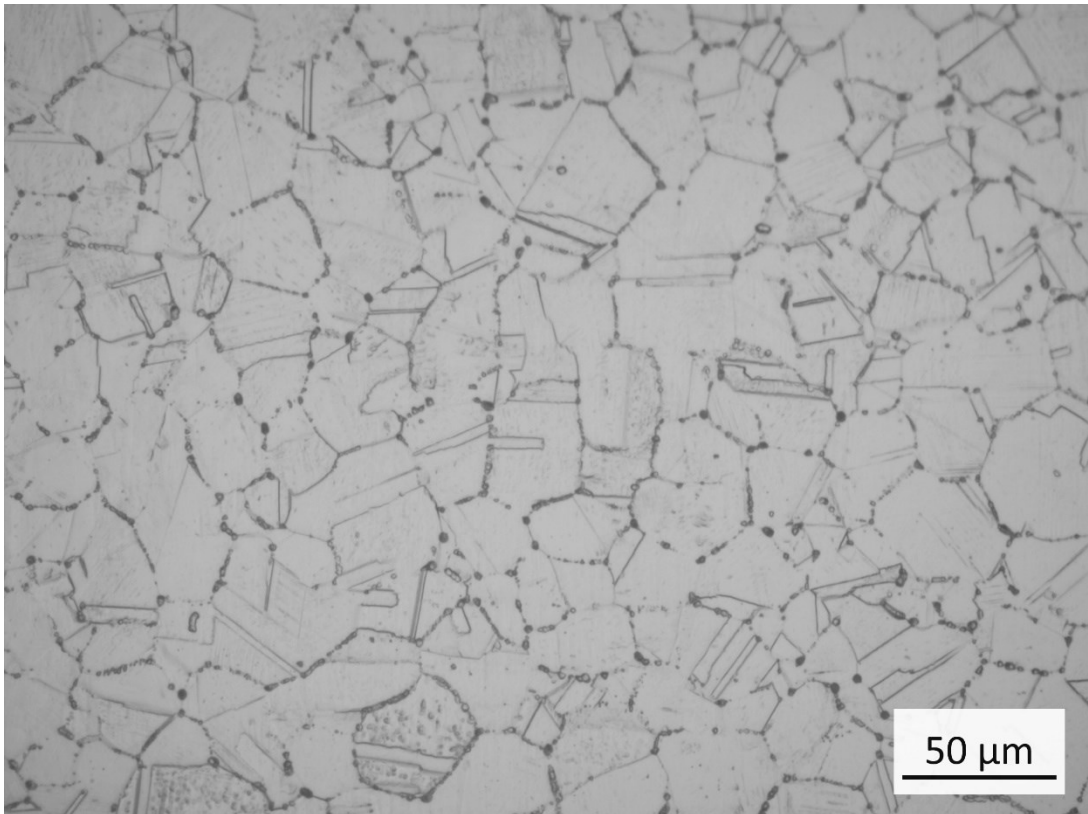


Figura 3.24 – Micrografia AISI 304L R-1_P_11, 32x



Figura 3.25 – Micrografia AISI 304L R01_P_14 trafilato a freddo, 16x

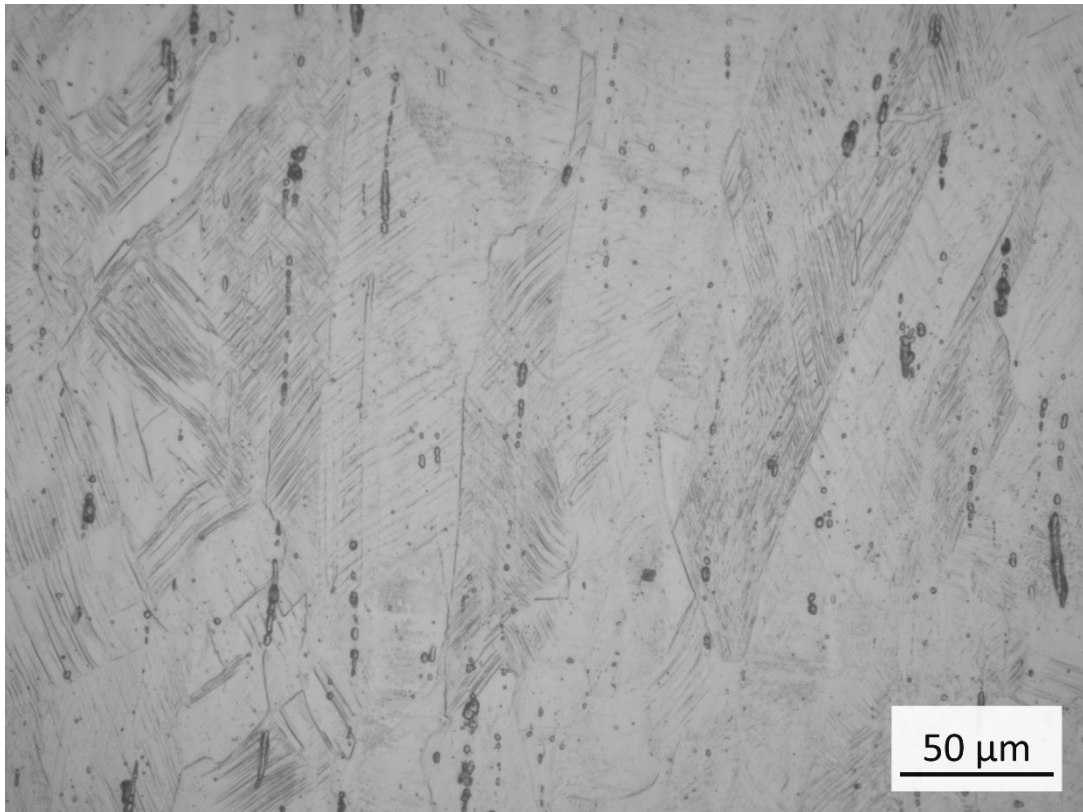


Figura 3.26 – Micrografia AISI 304L R01_P_14 trafilato a freddo, 32x



Figura 3.27 – Micrografia AISI 304L R-1_P_12 trafilato a freddo, 16x

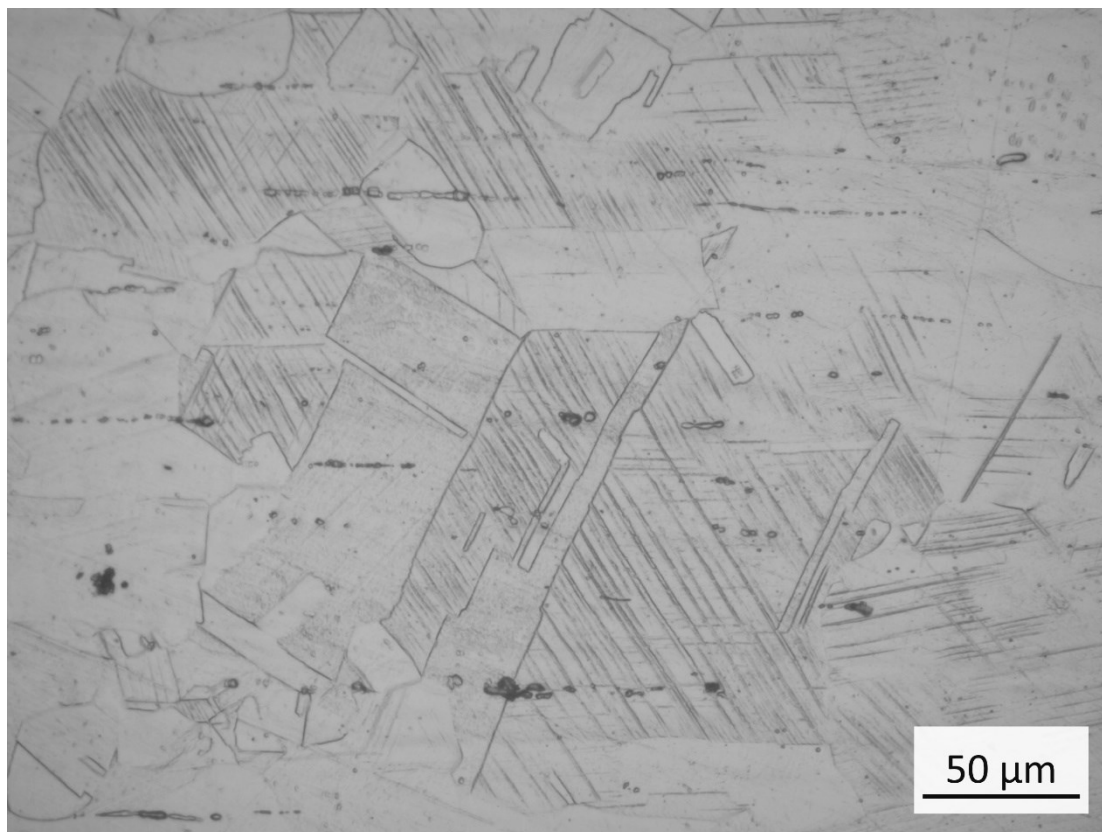


Figura 3.28 – Micrografia AISI 304L R-1_P_12 trafilato a freddo, 32x

Sono state riportate le micrografie per l'acciaio AISI 304L laminato a caldo, per fare un confronto tra la piastra base e i provini testati. Le osservazioni, confermate poi dall'analisi tramite XRD sono le seguenti: innanzitutto si nota che per la piastra base (v. Figura 3.17), visivamente non vi è traccia di martensite, mentre l'aspetto da osservare è che a bordo grano avviene la precipitazione di carburi di cromo, anche se in percentuale ridotta. Analizzando il caso $R=0.1$ a basso carico ovvero 160 MPa (v. Figura 3.19) si osserva che non c'è presenza, almeno visivamente, di martensite, in quanto le deformazioni in gioco sono estremamente ridotte, mentre vi è una maggiore presenza di carburi di cromo. Se si passa all'analisi ad alto carico $R=0.1$ (v. Figura 3.21), si osserva come sia presente una grande quantità di martensite, visibile dalle striature di colore scuro sulla superficie; la veridicità di questa osservazione verrà poi confermata nel seguito dall'XRD. Se si passa all'analisi della Figura 3.23, si vede come ad alti carichi per $R=-1$, la formazione di martensite sia estremamente ridotta, e quasi impossibile da vedere tramite metallografie; d'altro canto, nuovamente ritroviamo in abbondanza carburi di cromo a bordo grano.

Per quanto concerne il confronto tra barre trafilate e piastre laminate, se si analizzano invece le Figure 3.26 e 3.21, si osserva come per le barre abbiano visivamente quantità elevate ma paragonabili a quelle della piastra laminata a caldo ad alto carico sempre per $R=0.1$: ciò motiverebbe il perché ad alti carichi, i due materiali tendano ad avvicinarsi in termini di curve di Woehler.

Confrontando barre e piastre a $R=-1$ (v. Figura 3.27 e 3.23) ad alto carico, si osserva invece come nelle barre ci sia una presenza importante di martensite mentre nelle piastre la quantità sia esigua e difficilmente identificabile: questo motiverebbe il fatto che le due curve di Woehler siano molto diverse tra di loro sia a bassi che ad alti carichi.

Per confermare le osservazioni visive fatte tramite metallografia, si è applicata la tecnica XRD ovvero della diffrazione ai raggi x. Questa tecnica sfrutta la legge di Bragg: colpendo il materiale mediante raggio x, tale fascio viene deviato e acquisito da un altro rilevatore. A seconda dell'inclinazione del fascio, si andranno a colpire diversi reticoli cristallini. L'output di tale tecnica è un grafico che riporta

in ascissa il valore dell'angolo, mentre in ordinata l'intensità in arbitrary unit. Ciascun reticolo cristallino ha degli angoli caratteristici: se si individua un picco, allora quella morfologia cristallina sarà presente nel materiale. Si ricorda inoltre che il reticolo cristallino dell'austenite è CFC ovvero cubico a facce centrate mentre la martensite ha un reticolo CCC ovvero cubico a corpo centrato. Di seguito si riportano i grafici ricavati da analisi XRD:

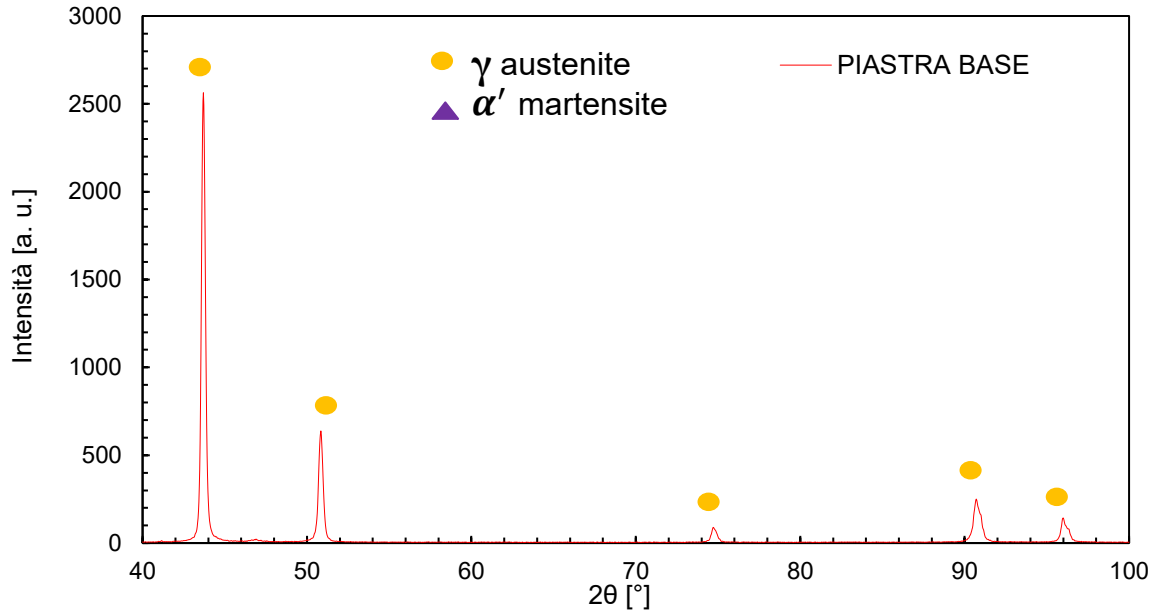


Figura 3.29 – XRD piastra base di AISI 304L laminata a caldo

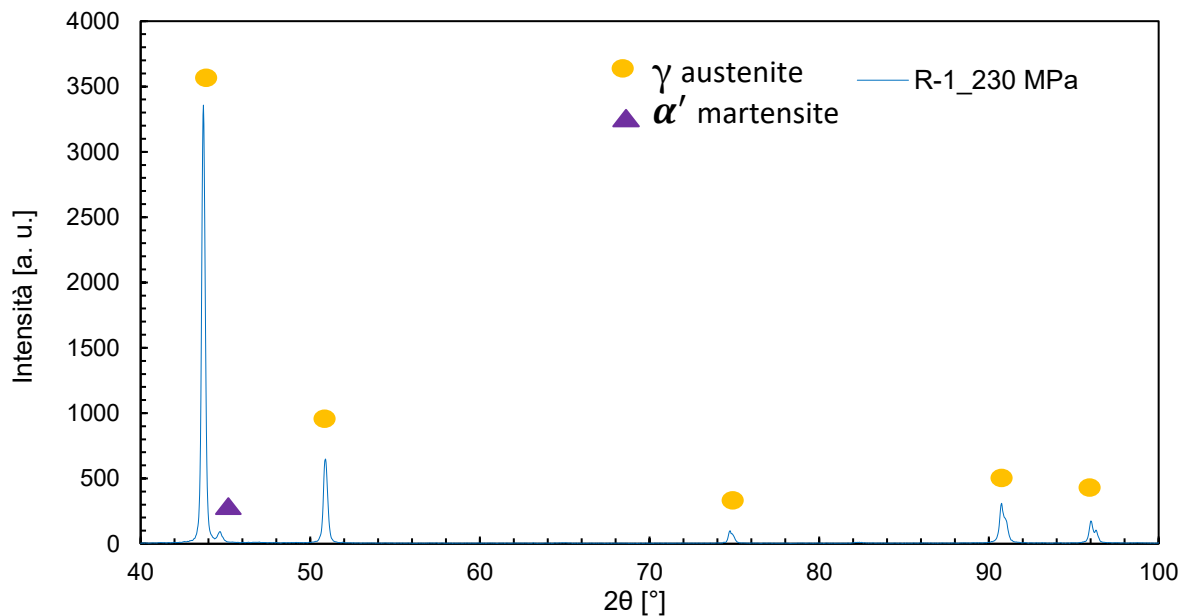


Figura 3.30 – XRD R-1_P_11 laminato a caldo

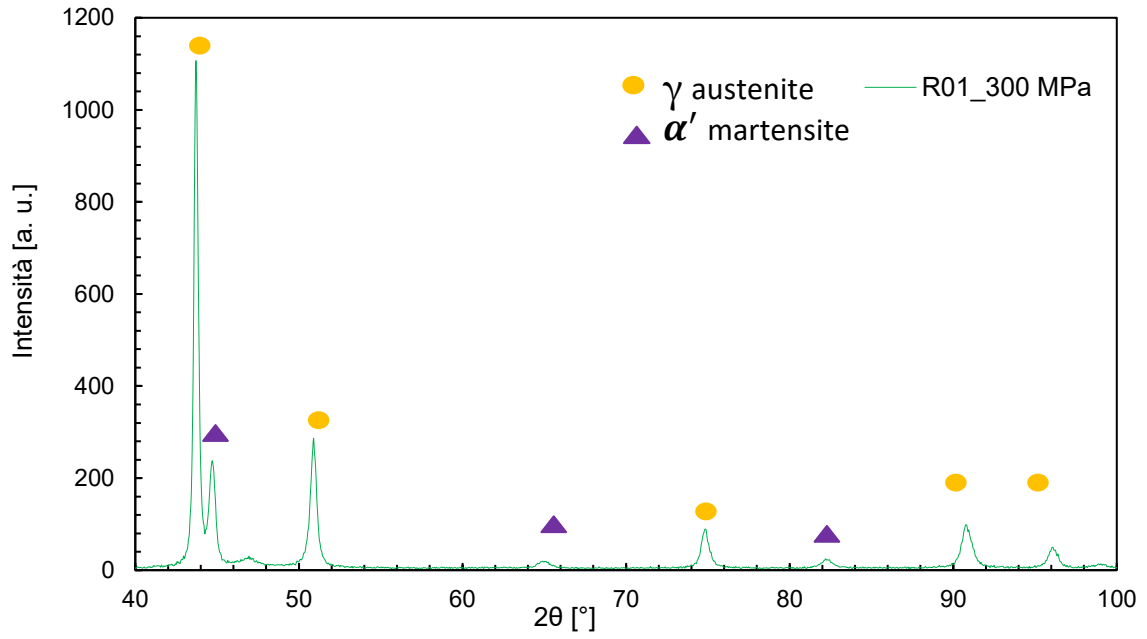


Figura 3.31 – XRD R01_P_24 laminato a caldo

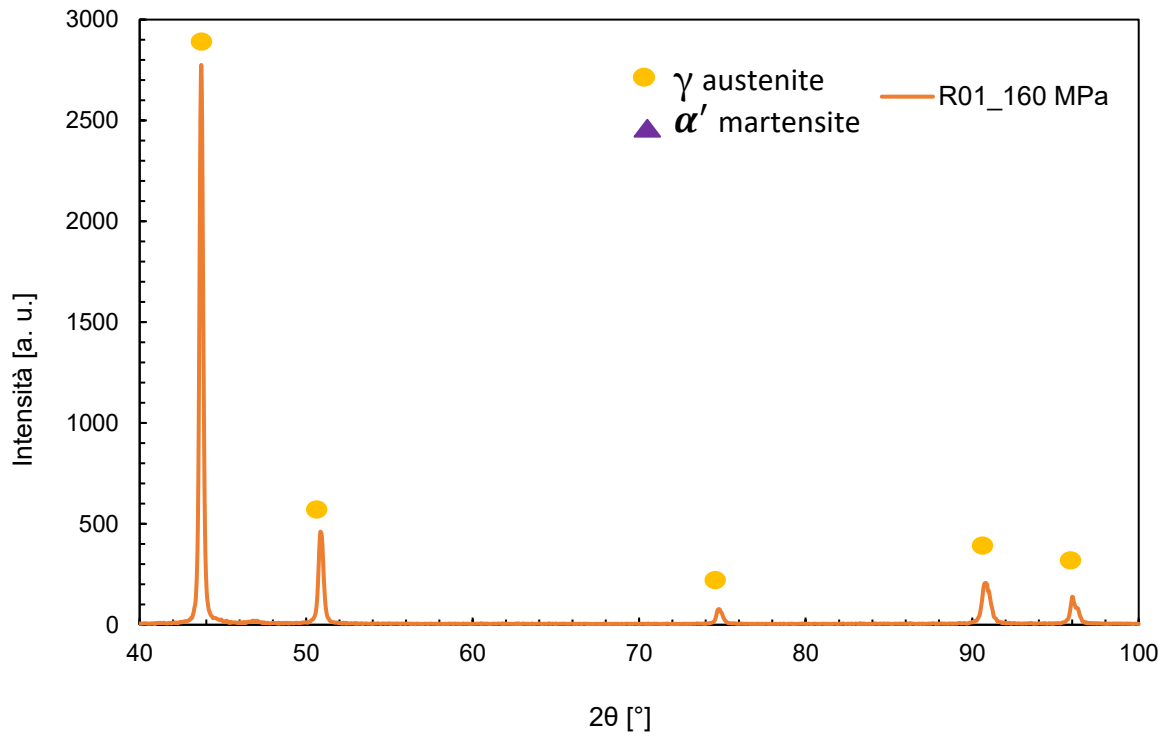


Figura 3.32 – XRD R01_P_15 laminato a caldo

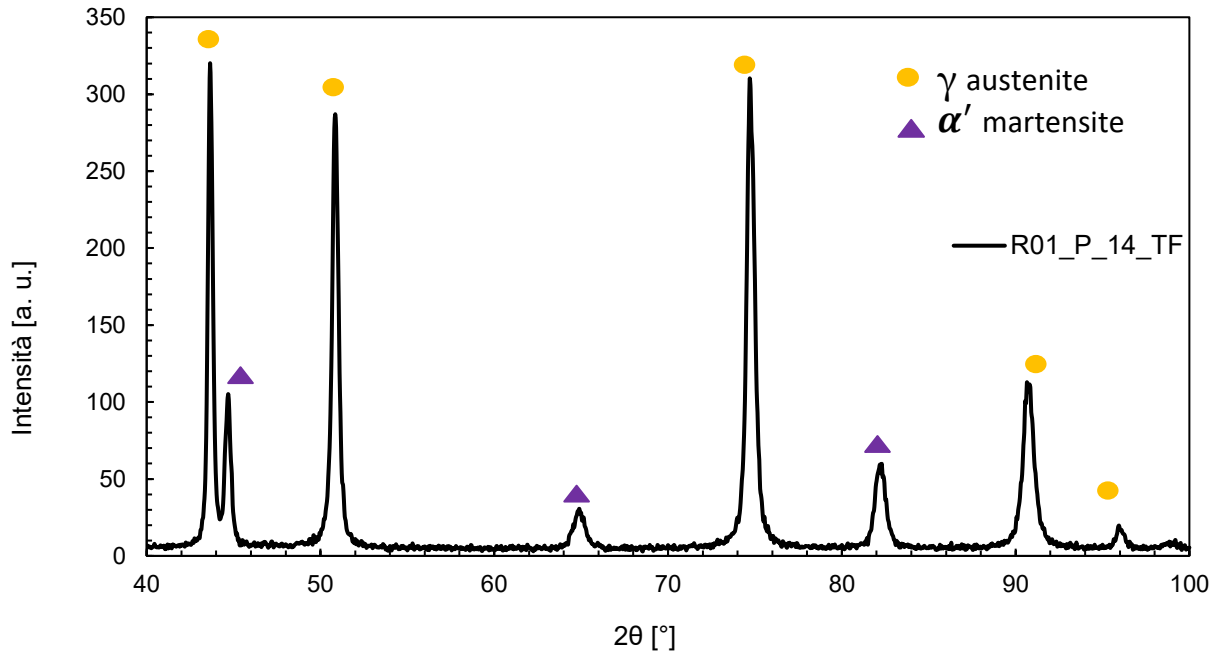


Figura 3.33 – XRD R01_P_14 trafilato a freddo

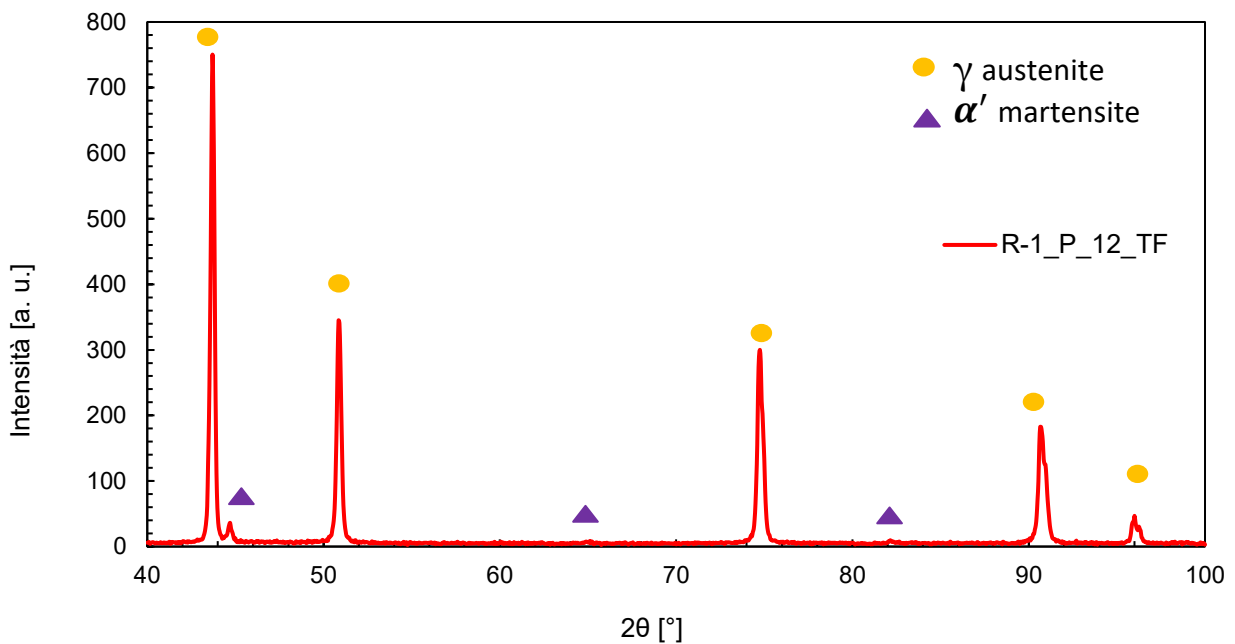


Figura 3.34 – XRD R-1_P_12 trafilato a freddo

Sono state riportate nelle diverse figure, gli andamenti dei risultati ottenuti tramite XRD. Tale tecnica permette di affermare in modo esatto la presenza o meno di martensite nei provini.

I simboli indicano il tipo di struttura che si ha all'interno del materiale, avendo fatto variare l'angolo 2θ da 40° a 100° .

Osservando Figura 3.29, si vede come non vi sia presenza di martensite all'interno della piastra base laminata a caldo, in quanto i picchi sono riferiti alla sola martensite. Se si analizza Figura 3.32, nuovamente si osserva l'assenza di martensite all'interno del materiale, a dimostrazione che per $R=0.1$, a carichi bassi cioè per tensioni massime di 355 MPa, il materiale non mostra trasformazioni

di fase austenite-martensite. La sensibilità della macchina è in grado di rilevare martensite con quantità superiori del 5%, pertanto se la martensite si è formata, lo ha fatto in percentuale minore del 5%. Per analizzare meglio la situazione ad alto carico tra R=0.1 e R=-1 ad alto carico, si plottano i due grafici di Figura 3.30 e 3.31 in un unico grafico come segue:

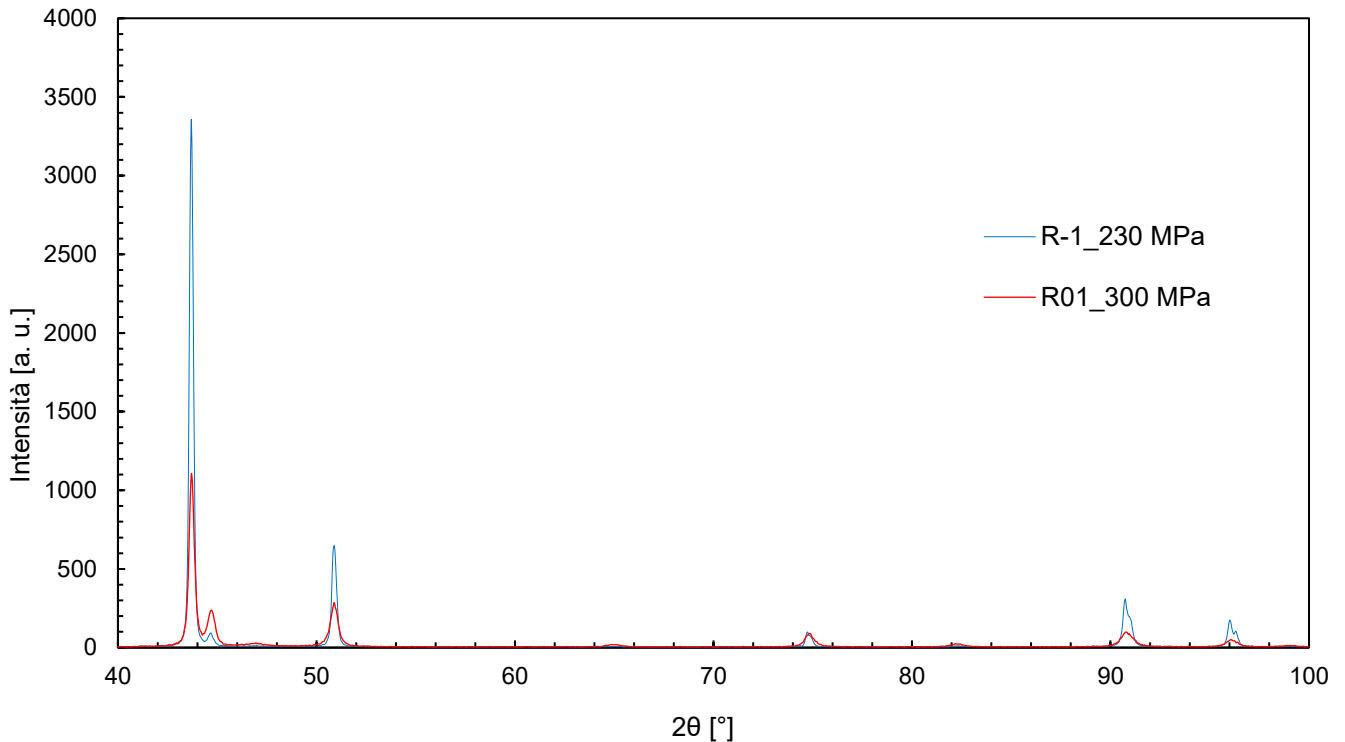


Figura 3.35 – XRD confronto R01 e R-1 ad alto carico per laminati a caldo

se si va a ingrandire la zona di interesse legata ai picchi di martensite si ottiene la seguente Figura 3.36

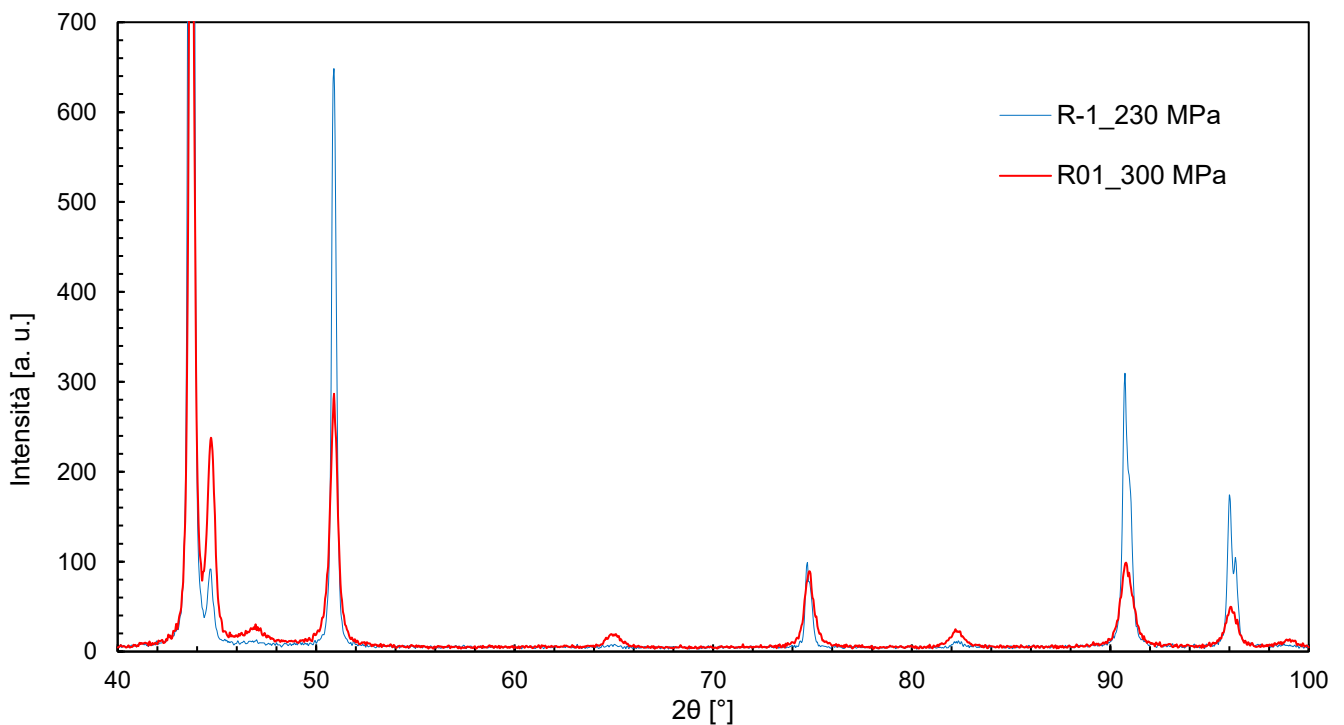


Figura 3.36 – XRD confronto R01 e R-1 ad alto carico per laminati a caldo

Dall'analisi delle Figure 3.35 e 3.36, si osserva che nella prova a $R=0.1$ c'è una maggiore intensità, ovvero quantità, di martensite mentre una minore percentuale di austenite (che si è trasformata in martensite). Questo fa sì che, a parità di cicli, a causa della presenza di una maggiore quantità di martensite, il materiale si sia incrudito e mostri una maggiore resistenza a fatica. La maggiore percentuale di martensite nel caso $R=0.1$ alto carico, è legata al fatto che la deformazione raggiunta già dopo i primi cicli, si è attestata intorno al 26%, mentre nel caso $R=-1$ la deformazione massima registrata è stata pari a 4%. Come è ben noto in letteratura, deformazioni a freddo su acciai inox austenitici come l'AISI 304L portano alla formazione di martensite anche in quantità elevate, dipendenti dalla deformazione imposta.

Per quanto concerne l'analisi $R=0.1$ tra barre trafilate a freddo (v. Figura 3.33) e piastre laminate a caldo (3.31), non è possibile graficare i due diagrammi in un unico grafico, in quanto essi hanno una texture diversa e l'intensità relativa dei picchi sarebbe poco indicativo. Ciò che si può osservare però è che nel caso $R=0.1$ trafilato a freddo, sia presente una grande quantità di martensite, dello stesso ordine di grandezza di quella presente nelle piastre laminate a caldo, motivo per cui le curve di Woehler tendono a coincidere tra i due materiali ad alto carico, con $R=0.1$.

Diversamente, confrontando Figura 3.30 e 3.34, si può osservare come nel caso delle barre trafilate ad alto carico sia presente una certa quantità di martensite, mentre nel caso di piastre laminate, la quantità di martensite non è sufficientemente elevata da essere rilevata dall'XRD. Ciò motiverebbe il fatto che la resistenza delle barre trafilate sia notevolmente maggiore di quelle laminate.

L'ultimo aspetto di analisi tra i due diversi materiali riguarda l'analisi di durezza Vickers, eseguita su ciascun provino. Sono state pertanto eseguite 3 prove per ogni campione, appena al di sotto della superficie per le piastre e a cuore per le barre.

Si seguito si riportano le figure delle impronte rilevate, un esempio per ogni provino utilizzato

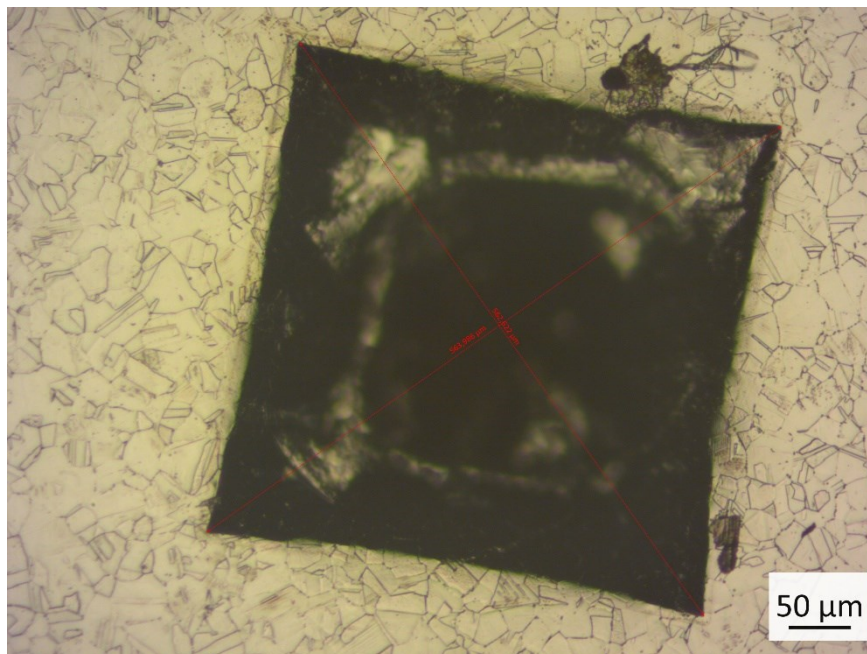


Figura 3.37 – Impronta Vickers, piastra base laminata a caldo

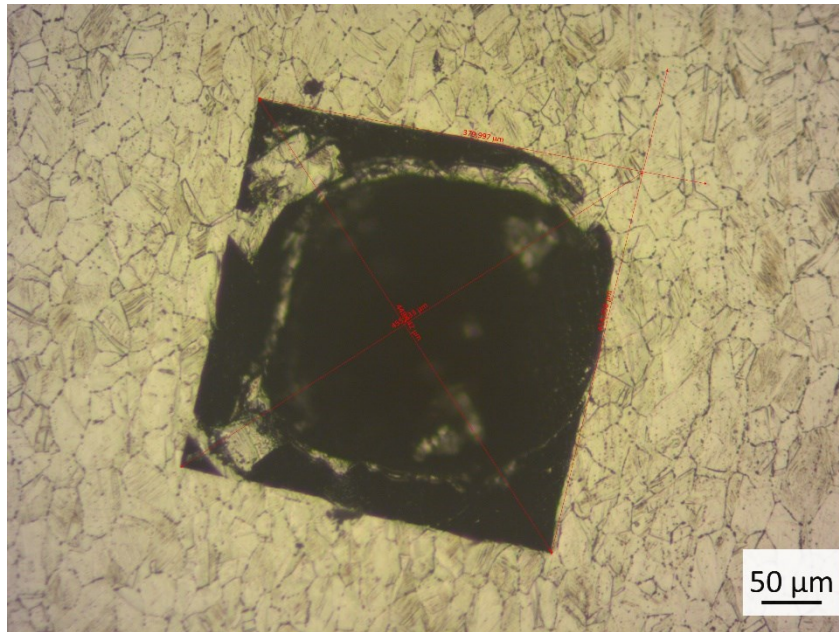


Figura 3.38 – Impronta Vickers, P_24_R01

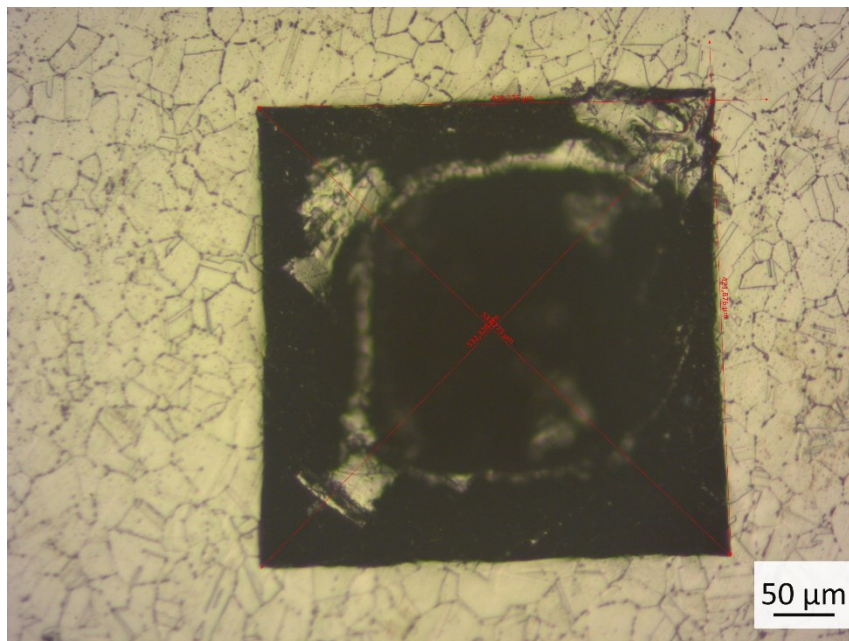


Figura 3.39 – Impronta Vickers, P_15_R01

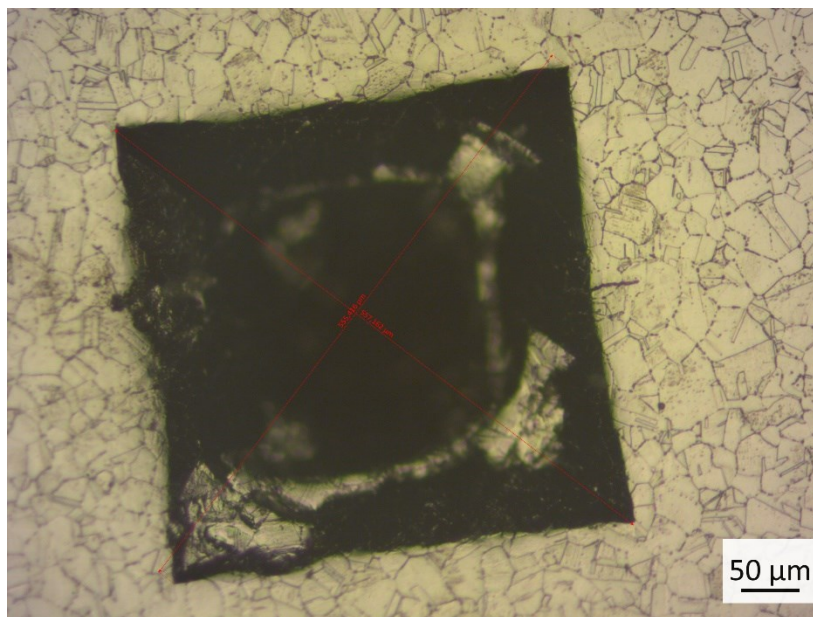


Figura 3.40 – Impronta Vickers, P_15_R01

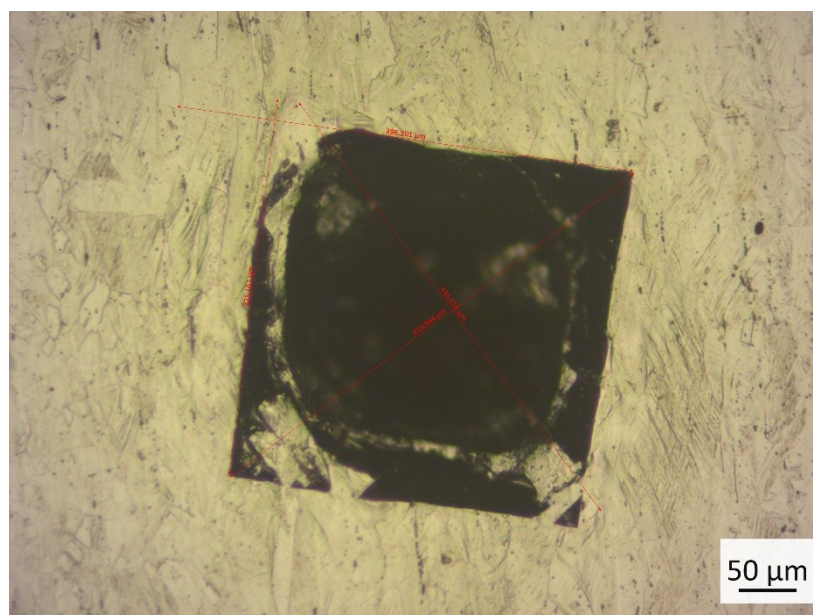


Figura 3.41 – Impronta Vickers, P_14_R01

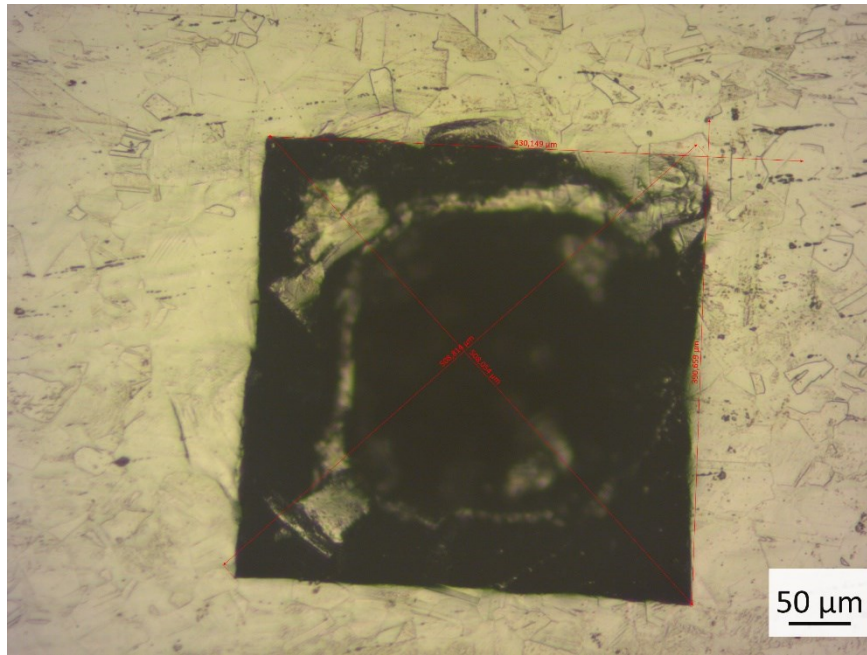


Figura 3.42 – Impronta Vickers, P_12_R-1

Di seguito si riportano i grafici con i risultati delle durezze per le sole piastre laminate a caldo:

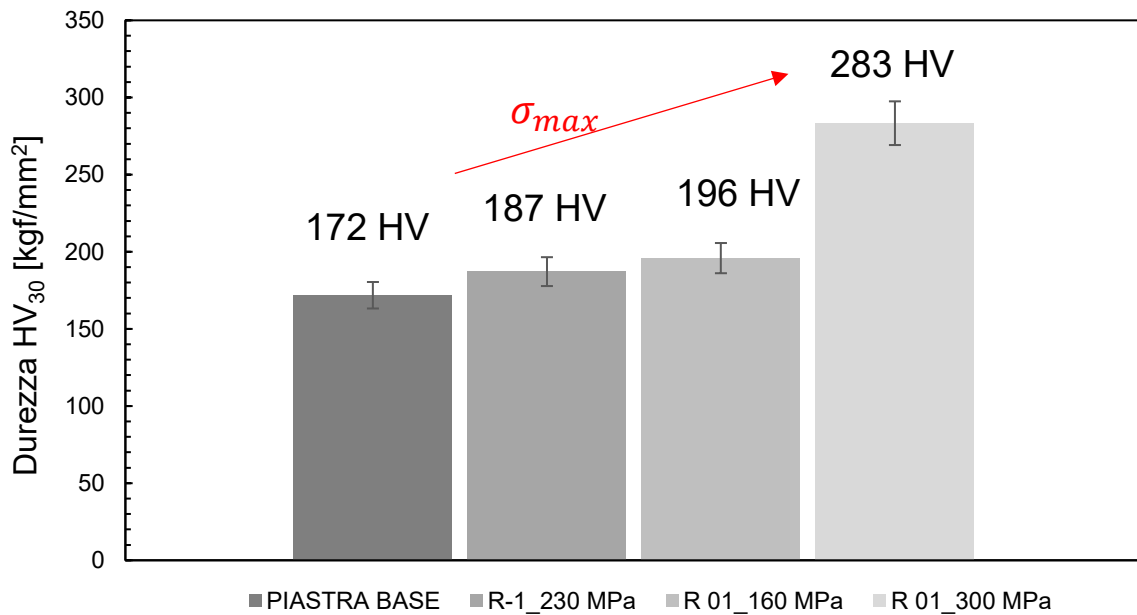


Figura 3.43 – Durezze Vickers per le piastre laminate a caldo

Dall'analisi di Figura 3.43, si osserva come la durezza aumenti all'aumentare della tensione massima del ciclo di fatica, motivo per cui il materiale incrudisce e ha maggiore resistenza. Si conferma pertanto nuovamente il fatto che a R=0.1, per effetto dei carichi elevati, della trasformazione di fase austenite-martensite a causa di elevate deformazioni e dell'aumento di durezza, il materiale mostra una resistenza a fatica maggiore rispetto a R=-1.

Di seguito, in Figura 3.44, si riporta il confronto tra le durezze delle barre e delle piastre ad alto carico:

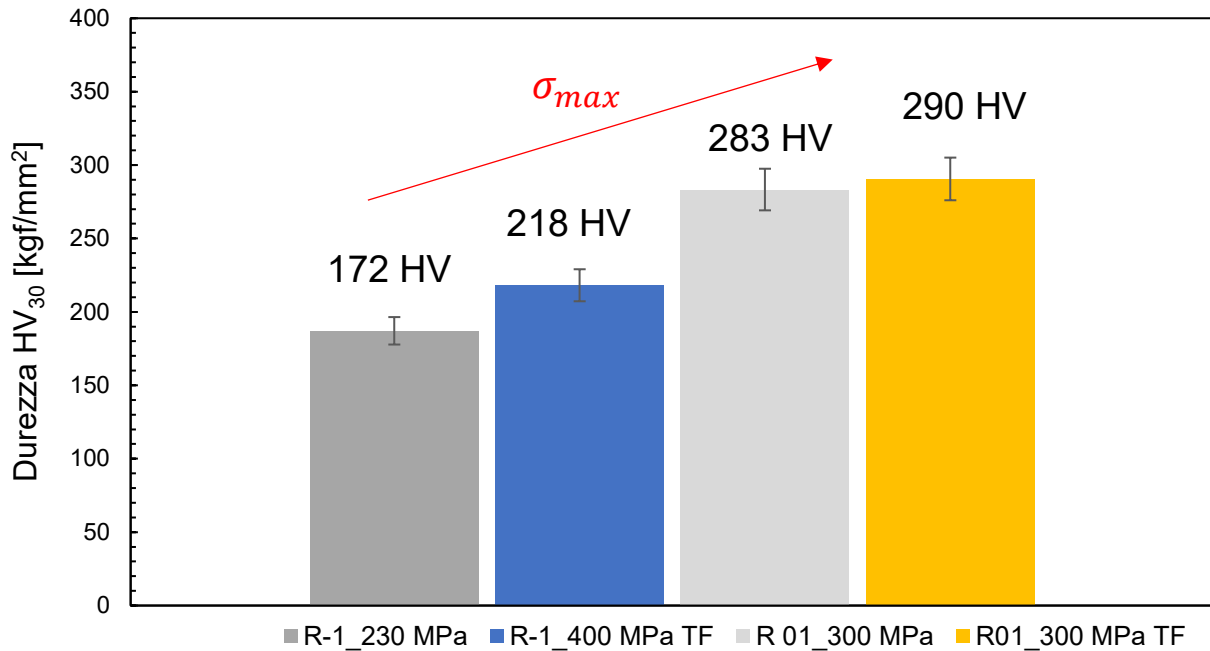


Figura 3.44 – Durezze Vickers per le piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo

Si osserva come le durezze per R=-1 siano ben differenti tra le barre e le piastre, e ciò è evidenziato dal fatto che le due curve di Woehler sono distinte tra di loro e i punti non si intersecano. Dall'altra parte invece, per R=0.1 si ottengono delle durezze che sono confrontabili tra di loro, e ciò motiva il fatto che ad alto carico i due materiali si vadano ad incontrare sugli stessi punti sperimentali.

3.2.8 Conclusioni

Nel Capitolo 3, sono state costruite le curve di Woehler mediante prove di fatica ad ampiezza costante per rapporti di ciclo R=-1 e R=0.1. Dalla costruzione delle due curve è emerso che, al contrario di quanto accade abitualmente, le curve a R=-1 e R=0.1 si intersecano, invertendo la tendenza, ovvero risulta che ad alti carichi il materiale ha una maggiore resistenza a R=0.1 rispetto a R=-1.

Inoltre, sono stati confrontati i risultati sperimentali delle piastre laminate a caldo con quelle di barre trafilate a freddo, ed è emerso che a R=-1 i due casi hanno due curve completamente diverse, mentre a R=0.1 ad alti carichi i materiali vanno a cadere nelle stesse zone della curva.

Per indagare questo aspetto è stata fatta un'analisi metallografica, seguita da prove di durezza Vickers con 30 kg, come previsto da normativa e infine tramite analisi XRD.

Ciò che è emerso è che: per quanto concerne il confronto tra piastre laminate a caldo con R=0.1 e R=-1, in presenza di una tensione media e per alti carichi, il materiale incrudisce, una frazione significativa di austenite si trasforma in martensite e si genera un aumento di durezza; ciò comporta una maggior resistenza rispetto a R=-1 ad alto carico in quanto la durezza è minore ed inoltre la quantità di martensite formatasi è estremamente ridotta.

Per ciò che riguarda il confronto barre e piastre, ad alto carico e a R=0.1 i due materiali mostrano quantità di martensite e durezze paragonabili, motivo per cui i punti sperimentali cadono nella stessa banda. Viceversa, a R=-1 la quantità di martensite e la durezza per le barre sono maggiori che per le piastre laminate a caldo, motivo per cui il materiale trafilato a freddo presenta una curva di resistenza maggiore rispetto a quella del laminato a caldo.

Capitolo 4

RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO ENERGETICO: STIMA DELLA DISSIPAZIONE DI ENERGIA CON GRADIENTE DI RAFFREDDAMENTO

4.1 Introduzione

L'obiettivo di questo Capitolo è mettere in luce l'analisi svolta sulle prove di fatica ad ampiezza costante (già trattate secondo approccio classico mediante le curve di Woehler nel Capitolo 2) e a gradini mediante l'approccio energetico. In particolare, si vanno ad esaminare i diversi risultati applicando i metodi energetici visti nel Capitolo 1, focalizzando l'attenzione sull'energia meccanica del materiale, W , e sull'energia dissipata Q . A tal proposito, come principale obiettivo di questa tesi, si vuole andare a confrontare i risultati ottenuti in termini di Q sia con la tecnica del gradiente di temperatura di Meneghetti, validata da moltissimi risultati sperimentali, e riportata in questo Capitolo, sia con l'approccio proposto da Meneghetti e Ricotta basato sull'uso della seconda armonica della temperatura, riportata nel Capitolo successivo. Si andranno pertanto a proporre i risultati sperimentali delle prove di fatica elaborate in termini energetici, dapprima ad ampiezza costante e poi a gradini, confrontando i risultati con le curve di Woehler. Si andrà a dimostrare come il parametro Q sia un ottimo parametro di danneggiamento, in quanto, come già annunciato nel Capitolo 1, esso risulta essere una proprietà del materiale.

Per fare ciò, come detto già diverse volte nel corso del Capitolo 2, le prove di fatica ad ampiezza costante sono state monitorate in modo continuo: la temperatura è stata monitorata dapprima mediante una termocoppia rame-costantina, poi tramite una termocamera (entrambe descritte nel precedente capitolo). Sono stati eseguiti almeno cinque gradienti di raffreddamento e ogni gradiente è stato preceduto (nelle prove con termocamera) da un'acquisizione del segnale di temperatura una volta raggiunta la stabilizzazione, e da due cicli di isteresi consecutivi.

Verrà descritta inoltre la procedura per il calcolo di Q da gradiente e per il calcolo dell'area di un ciclo di isteresi. Infine, si verificherà l'uso della costante termoelastica del materiale per condensare in un'unica banda di dispersione i dati in Q relativi a rapporti ciclo differenti tra di loro.

4.2 Energia dissipata Q: gradiente di raffreddamento

Questo paragrafo è dedicato allo studio dell'energia dissipata Q a fatica per un acciaio AISI 304L. Tale parametro, è stato oggetto per oltre quindici anni di studio da parte di Meneghetti, Ricotta e del gruppo di Ricerca di Costruzione di Macchine, ed è stato dimostrato quanto esso sia un parametro estremamente promettente per riassumere il danneggiamento a fatica di un acciaio.

Ciò che seguirà è una descrizione della procedura di analisi del gradiente di temperatura, dapprima mediante termocoppia e poi seguendo la procedura con la termocamera. Si andrà poi a rappresentare numericamente e graficamente i risultati per provini soggetti a basso, medio e alto carico, sia per $R=-1$ che per $R=0.1$. Si procederà poi a fare un confronto tra i diversi rapporti di ciclo e si valuterà la capacità di costruire curve di fatica Q vs Nf, confrontandole con le curve di Woehler, sia per le piastre laminate a caldo, sia per le barre trafilate a freddo. Infine, si valuteranno le prove a gradini e i loro gradienti di temperatura, prendendo a riferimento le prove più significative

4.2.1 Analisi di un gradiente di temperatura tramite termocoppia

In questo Paragrafo, viene descritta la procedura che si è seguita per l'elaborazione di un gradiente di temperatura, ricavato tramite termocoppia. La procedura per l'acquisizione della temperatura tramite la termocoppia è stata precedentemente descritta nel Capitolo 2 al Paragrafo 2.5.2, pertanto ciò che segue ne è la naturale prosecuzione. Si è proceduto così:

1. Una volta salvato il file .txt dal software Agilent si apre un foglio di lavoro Excel;
2. Si apre il file all'interno del foglio; un esempio di nome è "1_cooling_N_2859cicli_f_4Hz";
3. Sono presenti tre colonne, la prima con la data, la seconda con il tempo in secondi e il terzo con i valori di temperatura: si plotta un grafico Temperatura-tempo, ottenendone uno simile a questo:

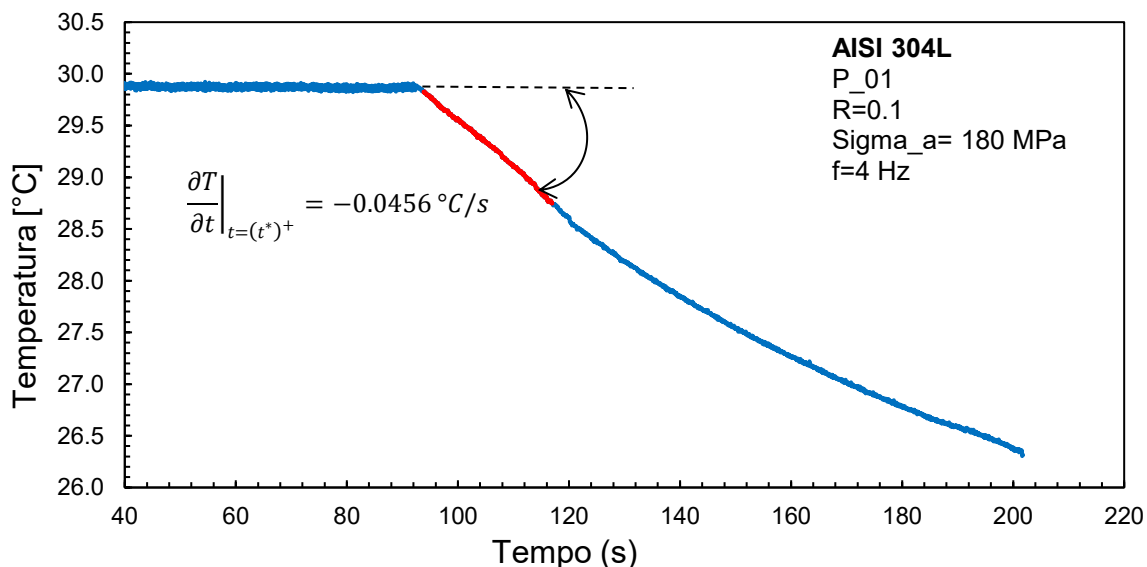


Figura 4.1 – Gradiente di temperatura per un raffreddamento del provino P_01 a $R=0.1$.

4. Si identifica il primo tratto lineare della curva di raffreddamento, mediante una retta che viene tracciata a partire dal primo punto in cui inizia il raffreddamento (evidenziato in rosso in Figura 4.1);

5. Si esegue una regressione lineare del tratto rettilineo: la pendenza della retta rappresenta il gradiente cercato, nel caso di Figura 3.1 pari a $-0.0456 \text{ }^\circ\text{C/s}$;
6. Nota la frequenza di carico, si utilizzano le formule 1.23 e 1.24 presenti nel Paragrafo 1.6.4 del Capitolo 1, che condensate portano alla seguente:

$$Q = -\rho c \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=(t^*)^+} \cdot \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

in cui ρ è la densità, mentre c è il calore specifico

4.2.2 Analisi di un gradiente di temperatura tramite termocamera

Nel seguente paragrafo viene descritta la procedura impiegata per analizzare un gradiente di temperatura adottando la termocamera FLIR SC7000 e il software collegato Altair:

1. Si apre il software Altair e si segue il seguente percorso:

FILE → OPEN IMAGE

e si seleziona il filmato da analizzare ad esempio "P_22_02";

2. Si seleziona un'area rettangolare con il pulsante evidenziato in rosso in Figura 4.2: questa sarà l'area all'interno della quale verrà calcolata la temperatura media;

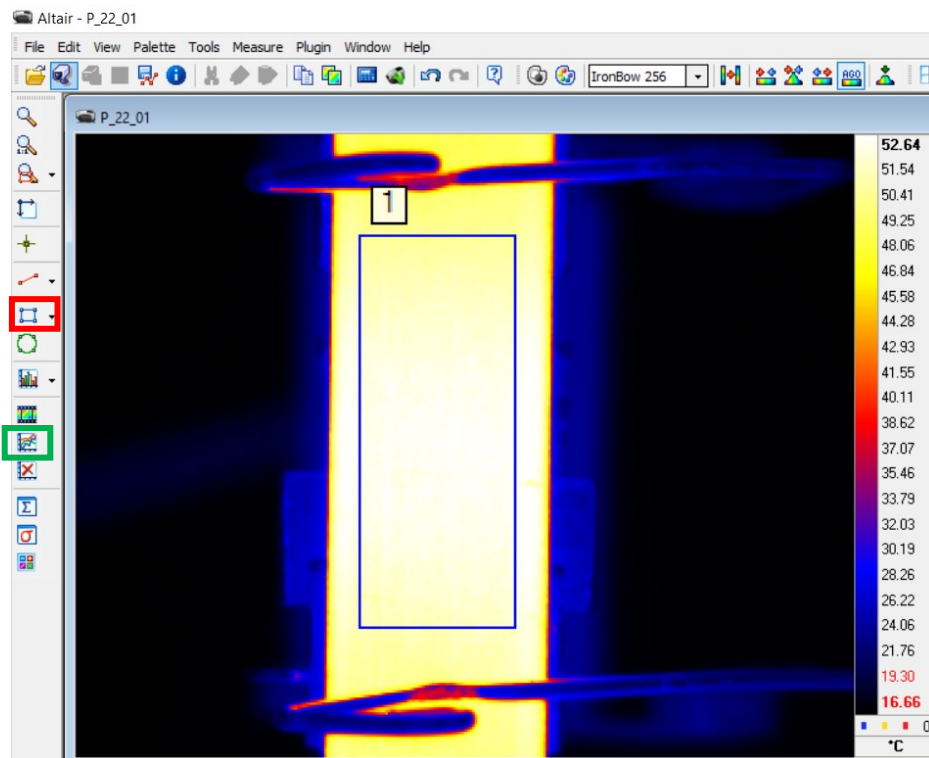


Figura 4.2 – Schermata di Altair con un filmato termografico aperto

3. Si clicca sul pulsante evidenziato in verde, nominato come “*Create Timing Graph*”: si apre una schermata in cui viene richiesto che valore si vuole andare ad avere presente all’interno dell’area selezionata; si seleziona pertanto “*Mean*”;
4. Apparirà un grafico come in Figura 3.3. Dopodiché si segue il percorso:

EDIT → COPY DIGITAL DATA → TIMING GRAPH

in questo modo viene salvato nella memoria del pc il grafico sottoforma di valori numerici;

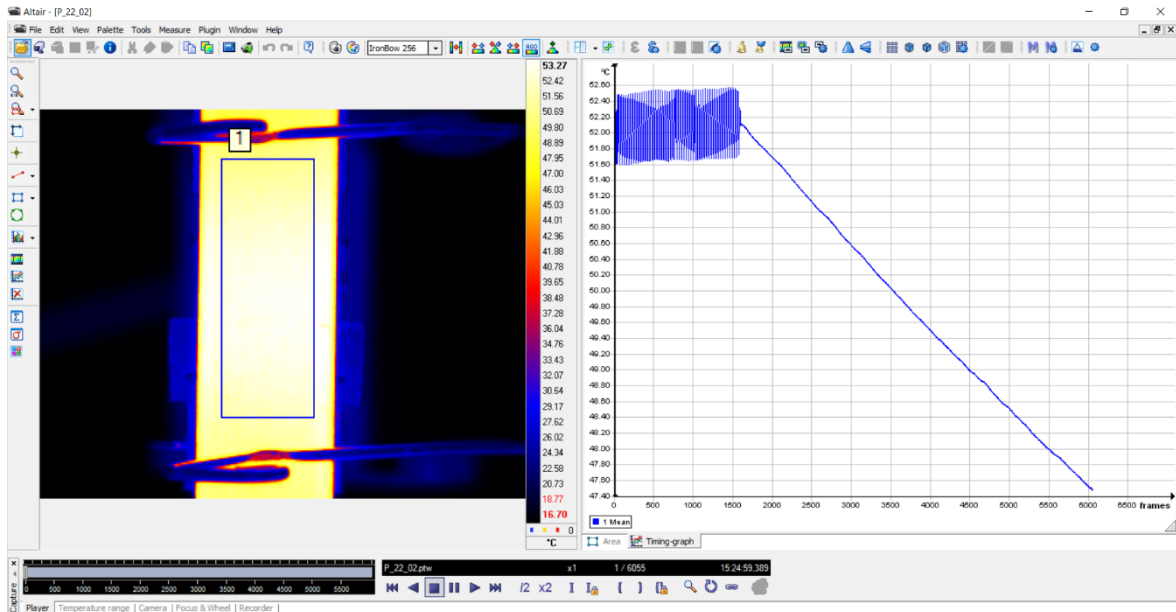


Figura 4.3 – Schermata di Altair con un filmato termografico aperto

5. Si apre poi un foglio di lavoro Excel e si clicca CTRL+V: in questo modo appariranno le colonne con i valori espressi in frames e temperatura;
6. Nota la frequenza di acquisizione della termocamera, generalmente fissata a 204.8 Hz nel caso di queste prove, si converte il numero di frames in secondi;
7. Dopodiché si segue dal punto 3 al punto 6 della procedura valida per il calcolo del gradiente con la termocoppia.

4.2.3 Risultati prove di fatica a $R=-1$ ad ampiezza costante in termini energetici tramite Q

In questo Paragrafo vengono raccolti i risultati delle prove di fatica sull’acciaio AISI 304L laminato a caldo con $R=-1$ in termini di Q. In particolare, verranno mostrati degli esempi di gradiente di temperatura a basso e ad alto carico, modo da mostrare come Q tramite gradiente sia un parametro molto stabile, e possa essere preso a riferimento, come si vedrà successivamente, per costruire delle curve di fatica che mettano in relazione l’energia dissipata durante la prova con il numero di cicli a rottura.

Di seguito, in Figura 4.4 si va a mostrare un esempio di gradiente per una prova a $R=-1$ a 180 MPa, eseguita a gradini per il provino P_19:

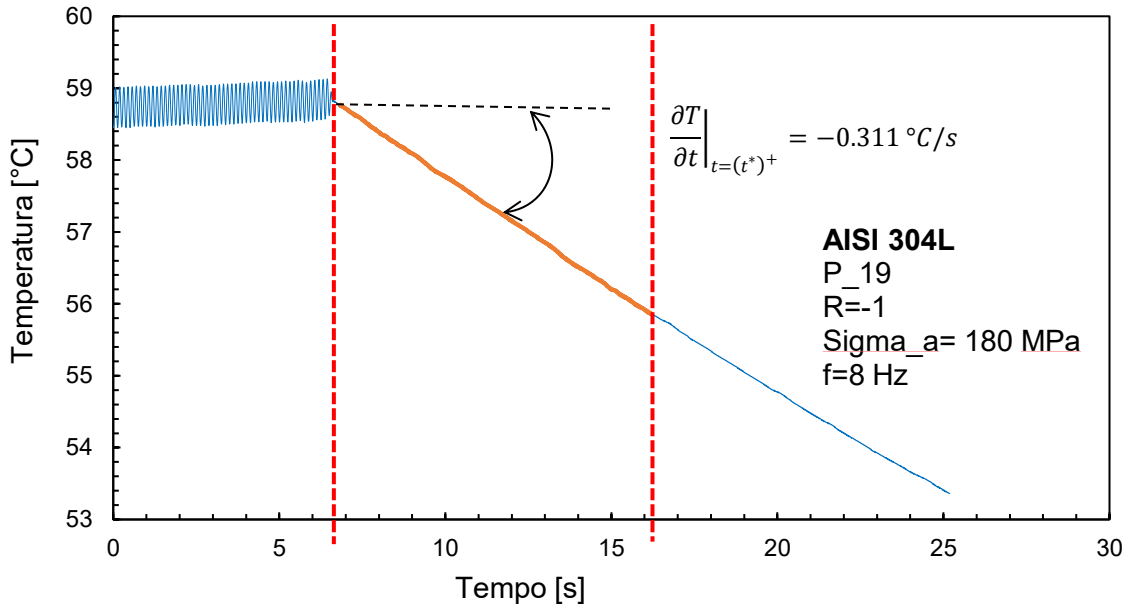


Figura 4.4 – Gradiente di temperatura per R=-1 a 180 MPa

Ciò che si osserva, è che il gradiente di raffreddamento presenta un tratto lineare per circa una decina di secondi: questo sta a significare che esso sia un fenomeno stabile e di indubbia determinazione. Inoltre, il segnale di temperatura è molto buono in quanto si è raggiunta una temperatura di stabilizzazione di 59°C, il che aiuta ad avere un tratto lineare nella prima parte di raffreddamento che prolungato.

Per confronto, si vuole andare a rappresentare un gradiente anche per carichi alti, o più precisamente medio-alti, in quanto sopra i 220 MPa non si è riusciti a salire senza andare incontro ad instabilità dell'equilibrio. In Figura 4.5 si va a rappresentarne un esempio per il provino P_19, nel gradino ad alto carico:

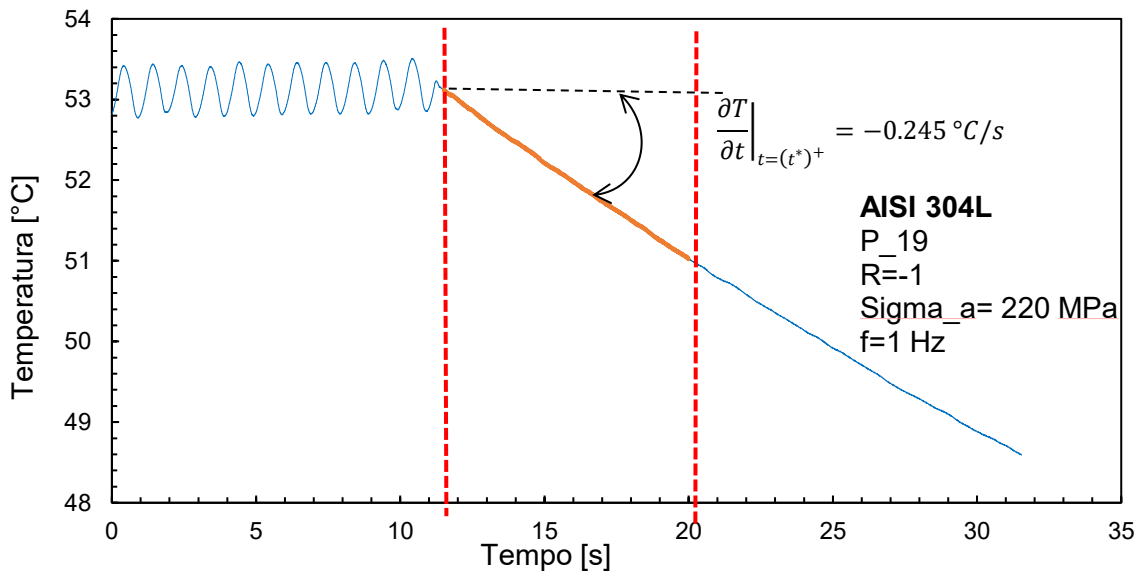


Figura 4.5 – Gradiente di temperatura per R=-1 a 220 MPa

Di seguito si va a riportare una tabella riassuntiva delle prove a $R=-1$, in cui vengono indicati i valori di ampiezza di tensione, tensione massima, minima, media e Q valutato al 50% della vita a fatica. Solo nei casi in cui al 50% della vita il provino ha mostrato valori anomali, allora si è assunto il suo valore medio.

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	Q [kJ/m ³ ciclo]	N_f
R-1_10	210	0	210	-210	522	86665
R_-1_11	230	0	230	-230	955	16857
R_-1_12	210	0	210	-210	410	105287
R_-1_17	210	0	210	-210	819	47217
R_-1_21	210	0	210	-210	798	122891
R_-1_1bis	230	0	230	-230	1440	18589
R_-1_2bis	220	0	220	-220	972	42109
R_-1_3bis	200	0	200	-200	320	450903
R_-1_4bis	190	0	190	-190	51	10145368*
R_-1_5bis	200	0	200	-200	82	10000000*
R_-1_6bis	210	0	210	-210	501	225197
R_-1_7bis	200	0	200	-200	72	10000000*

Tabella 4.1 – Risultati sperimentali in termini di Q a fatica per $R=-1$ su AISI 304L laminato a caldo

Prima di analizzare i risultati complessivi in termini di Q , a titolo di esempio, si riporta una tabella riassuntiva per una prova presa come riferimento per mostrare numericamente come Q sia stabile all'interno di una prova. Il provino in questione è il P_21, sollecitato a 210 MPa. Non viene rappresentato l'esempio a basso carico in quanto a $R=-1$ sono state eseguite prove a carichi medio alti, essendo già presenti prove a basso carico fatte in precedenza.

N° raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3449	0.2414	1.7	572
2	14635	0.2538	1.4	730
3	29954	0.2449	1.3	758
4	42721	0.2519	1.3	780
5	68321	0.2578	1.3	798
6	73009	0.2297	1.3	711
7	98247	0.2483	1.3	769

Tabella 4.2 – Valori di Q per il provino P_21 a 210 MPa, $R=-1$

Ciò che si osserva è che Q sia estremamente stabile durante tutta la vita del provino. In particolare, i valori di Q presenti nell'ultima colonna in Tabella 4.2, possono essere rappresentati graficamente, andando ad avere in ascissa il valore di cicli adimensionalizzato rispetto ai cicli di rottura. Tale grafico è mostrato in figura 4.6:

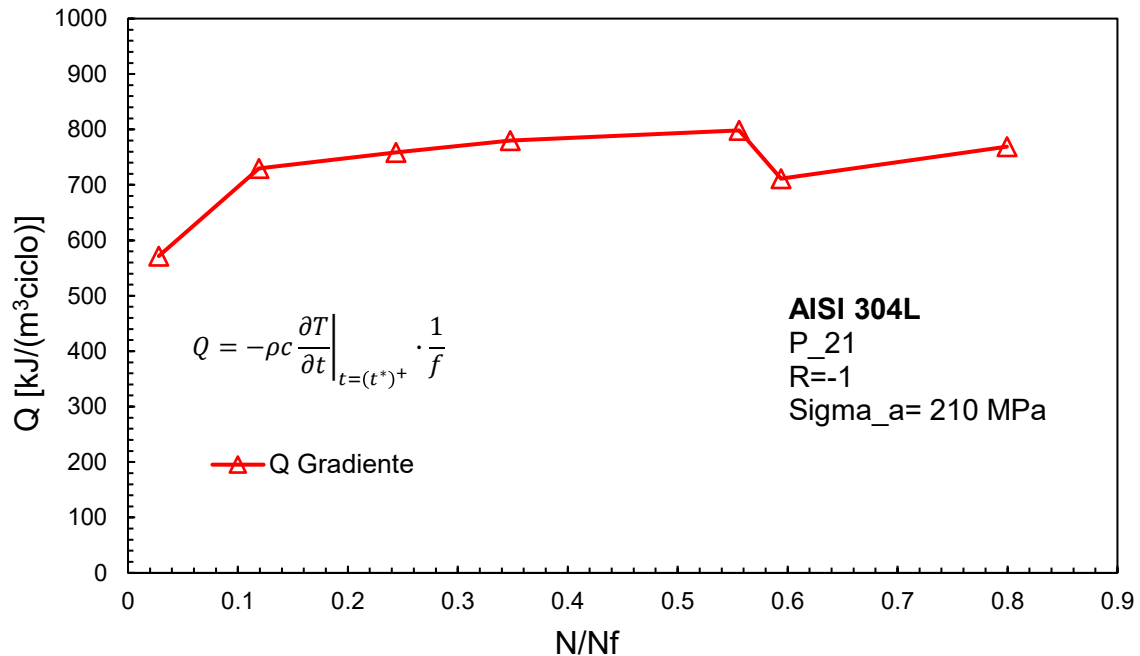


Figura 4.6 – Andamento di Q per il provino P_21 a 210 MPa

Come già detto, durante ciascuna prova e pochi istanti prima di interrompere la macchina per il calcolo del gradiente, sono stati acquisiti in successione due cicli di isteresi, in modo tale che se uno dei due fosse stato acquisito erroneamente, si avrebbe avuto a disposizione il secondo per calcolarne l'area. Inoltre, è stato fondamentale acquisire almeno 100 punti-ciclo, che corrispondeva a una frequenza di carico pari a 20 Hz. Nel caso di prove a R=-1, volendo limitare la temperatura sotto i 60°C, non si è saliti per le prove ad alto carico come queste sopra i 10 Hz, con l'aiuto di un ventilatore per raffreddare il provino in convezione forzata.

Ricordando che l'area del ciclo di isteresi rappresenta l'energia che viene immagazzinata dal materiale durante un ciclo di fatica, il suo valore lo si va a calcolare come un integrale che segue il percorso del ciclo, ovvero un integrale di linea chiuso, come segue:

$$W = \oint \sigma d\varepsilon \quad (3.2)$$

in cui σ rappresenta la tensione, mentre $d\varepsilon$ rappresenta la variazione infinitesima di deformazione. Noti i punti sperimentali del ciclo di isteresi, si può andare ad applicare un metodo che permetta di calcolare l'area discreta sottesa a una curva. Nel presente caso, si è andato ad utilizzare come metodo quello dei trapezi. Tale metodo prevede di discretizzare l'area della curva in un numero N di trapezi di area finita e facilmente calcolabile. La somma di queste aree fornisce l'area racchiusa dalla curva. Inoltre, l'unità di misura di quest'area è MJ/(m³ciclo) in quanto le tensioni sono espresse in MPa e le deformazioni sono adimensionali.

Fatta questa precisazione, si riporta in Tabella 4.3 i valori di W sempre per il provino P_21 a 210 MPa, confrontato con i valori di Q da gradiente.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	W [kJ/m ³ ciclo]	rapporto Q/W
1	3449	0.2414	1.7	572	509	1.12
2	14635	0.2538	1.4	730	694	1.05
3	29954	0.2449	1.3	758	743	1.02
4	42721	0.2519	1.3	780	726	1.07
5	68321	0.2578	1.3	798	698	1.14
6	73009	0.2297	1.3	711	682	1.04
7	98247	0.2483	1.3	769	659	1.17

Tabella 4.3 – Valori di Q e W per il provino P_21 a 210 MPa, R=-1

L'aspetto che si può sottolineare è che Q è ingegneristicamente uguale a W, ovvero in altre parole la loro differenza è estremamente ridotta: lo si può notare dall'ultima colonna di Tabella 3.3, laddove il rapporto Q/W si assesta attorno al valore unitario.

Di seguito vengono riportati in Figura 4.7 i cicli di isteresi per ciascun gradiente analizzato:

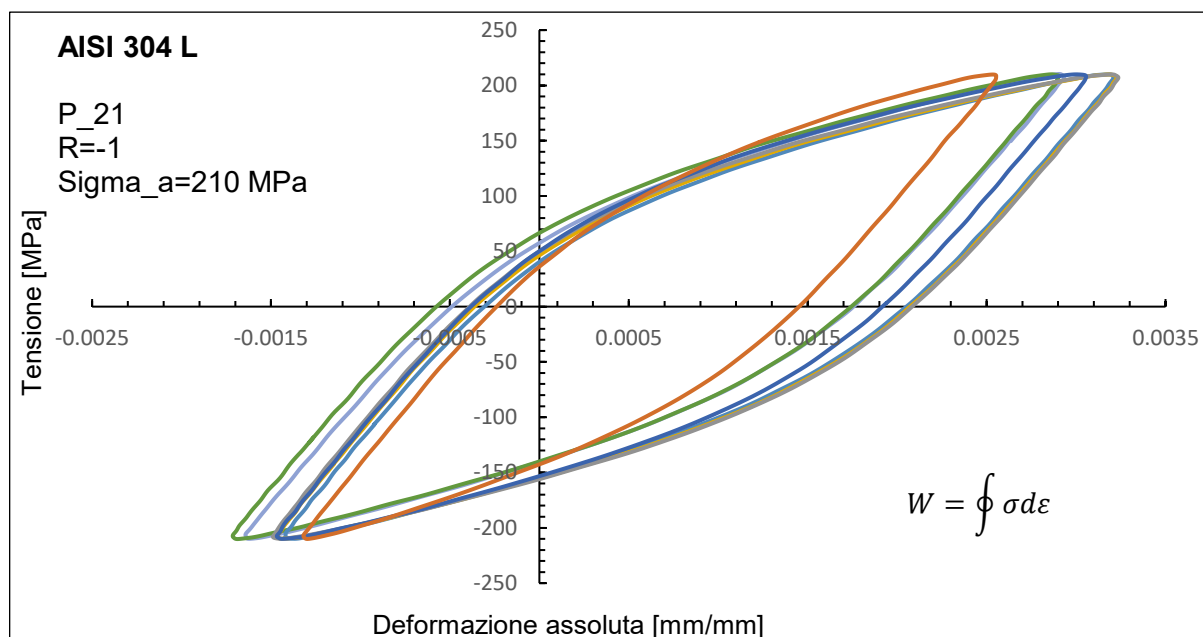


Figura 4.7 – Cicli di isteresi stabilizzati per il provino P_21 a 210 MPa

Ciò che si può notare è che i cicli di isteresi sono “panciuti”, ovvero c'è molta energia immagazzinata da parte del materiale ad ogni ciclo. Questo aspetto fa sì appunto che il materiale aumenti molto la sua temperatura anche per frequenze di carico estremamente ridotte come 1 o 2 Hz.

Il confronto tra Q e W può essere visto graficamente in Figura 4.8, che altro non è che la rappresentazione grafica dei dati presenti in Tabella 4.3

Resistenza a fatica tramite approccio energetico: confronto modello Q-Gradiente e modello Q-Seconda armonica

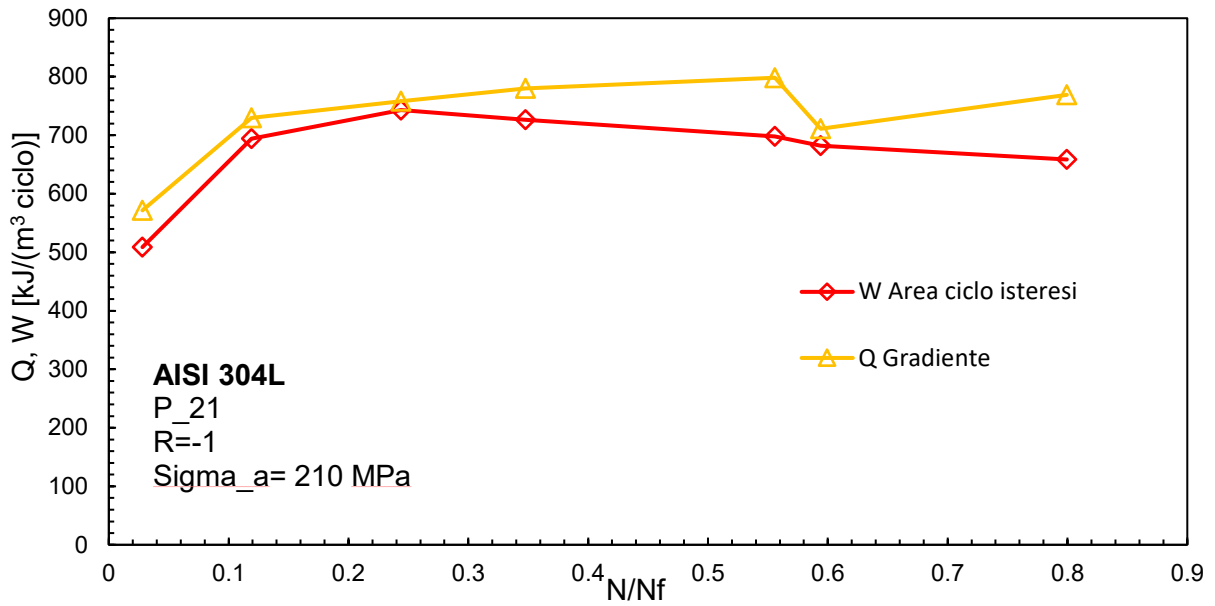


Figura 4.8 – Confronto grafico tra Q e W per il provino P_21 a 210 MPa

Una volta portato un esempio numerico per un provino specifico, si vanno ora a riassumere all'interno di uno stesso grafico i risultati per tutte le prove fatte in questa Tesi a R=-1, tranne le prove denominate "bis" di cui si hanno solo i risultati sperimentali in termini di Q al 50%.

In Figura 4.9 pertanto vengono rappresentati i valori di Q valutati tramite gradiente durante la vita normalizzata rispetto ai cicli di rottura, per ogni provino:

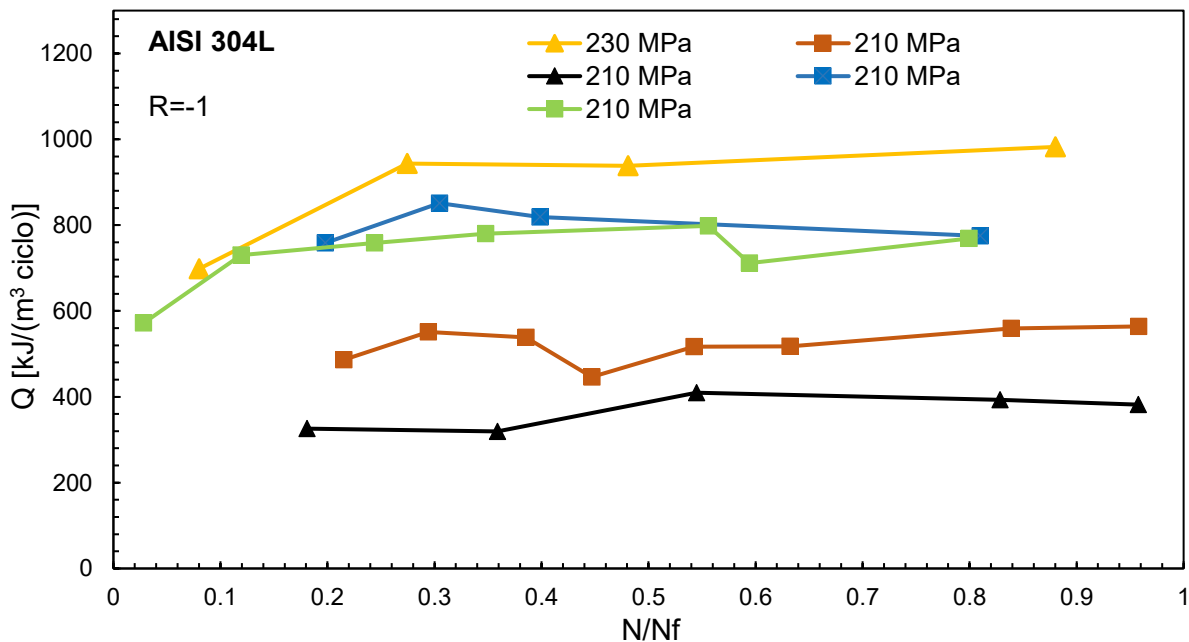


Figura 4.9 – Confronto di Q per le prove a R=-1 rispetto alla vita di ciascun provino

Si nota come, a parità di carico applicato, i valori di Q siano diversi tra i diversi provini, in quanto valori maggiori, comportano vite minori e viceversa, nonostante l'ampiezza di tensione applicata sia la stessa; ciò è legato al fatto che Q come dimostrato nel Capitolo 1, sia una proprietà del materiale, al contrario della tensione applicata.

Dopo aver ricavato l'andamento di Q all'interno della singola prova, si procede a costruire le curve di fatica del materiale, per un dato rapporto di ciclo, in questo caso -1. La convenzione utilizzata è, come già detto, quella di utilizzare il valore di Q al 50% della vita, per ciascun provino. Solo nei casi anomali in cui quel valore risulti essere diverso dalla media, allora se ne prende il valore medio.

In Figura 4.10 si va pertanto a mostrare la curva Q vs numero di cicli a rottura.

Per determinare tale curva, è stato nuovamente utilizzato il foglio di calcolo *FaticaW*, impostando come numero di cicli corrispondente a $Q_{A,50\%} \cdot 2 \cdot 10^6$. Inoltre, anche in questo caso è stata impiegata una banda di dispersione 10%-90%, ed inoltre i provini andati in run out non sono entrati nel calcolo della curva, come accade per le curve di Woehler.

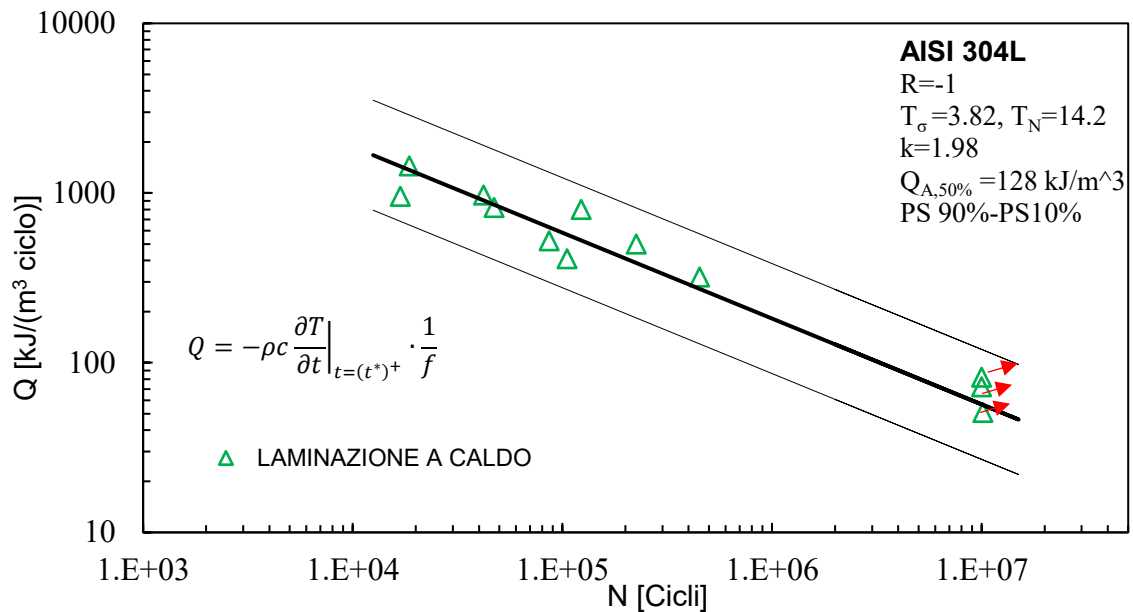


Figura 4.10 – Curva di fatica in termini di Q vs numero di cicli a rottura per R=-1.

Ciò che si osserva è che per i carichi testati, che vanno da 200 MPa a 230 MPa, i valori di Q si attestano in una banda compresa tra circa 50 e 1000 kJ/(m³ciclo). Ciò mostra come in realtà, a parità di carico applicato, Q si comporti in modo diverso rispetto all'approccio in tensione: in quest'ultimo caso, infatti, per la stessa ampiezza di tensione applicata si arriva ad ottenere un numero di cicli ben diverso tra una prova e l'altra. Ad esempio, i provini P_17 e P_21, sono stati entrambi sottoposti a 210 MPa di ampiezza di tensione, ma hanno sperimentato uno il doppio della vita dell'altro.

Se si analizzano i due provini in termini di Q, si può notare dal grafico presente in Figura 4.9 che per lo stesso carico otteniamo Q estremamente diversi tra di loro: ad esempio il provino P_17 ha un Q pari a 819 kJ/(m³ciclo), mentre P_21 ha Q pari a 798 kJ/(m³ciclo), che sono ben diversi tra di loro e infatti mostrano una vita, come detto, ben diversa (uno il doppio dell'altro).

Dopo aver analizzato le curve in termini di energia dissipata per R=-1, si va ora ad utilizzare lo stesso parametro energetico per sintetizzare il comportamento a fatica per R=0.1.

4.2.4 Risultati prove di fatica a R=0.1 ad ampiezza costante in termini energetici tramite Q

Lo scopo di questo paragrafo è di eseguire la medesima trattazione fatta per R=-1, anche per un rapporto di ciclo 0.1. In particolare, verranno mostrati degli esempi di gradiente di temperatura a basso e ad alto carico, modo da mostrare come Q tramite gradiente sia un parametro molto stabile, a prescindere dal rapporto di ciclo che si va ad utilizzare.

Di seguito, in Figura 4.11 si va a mostrare un esempio di gradiente per una prova a R=0.1 a 160 MPa (P_15), la quale è andata in run out a $2 \cdot 10^6$ di cicli:

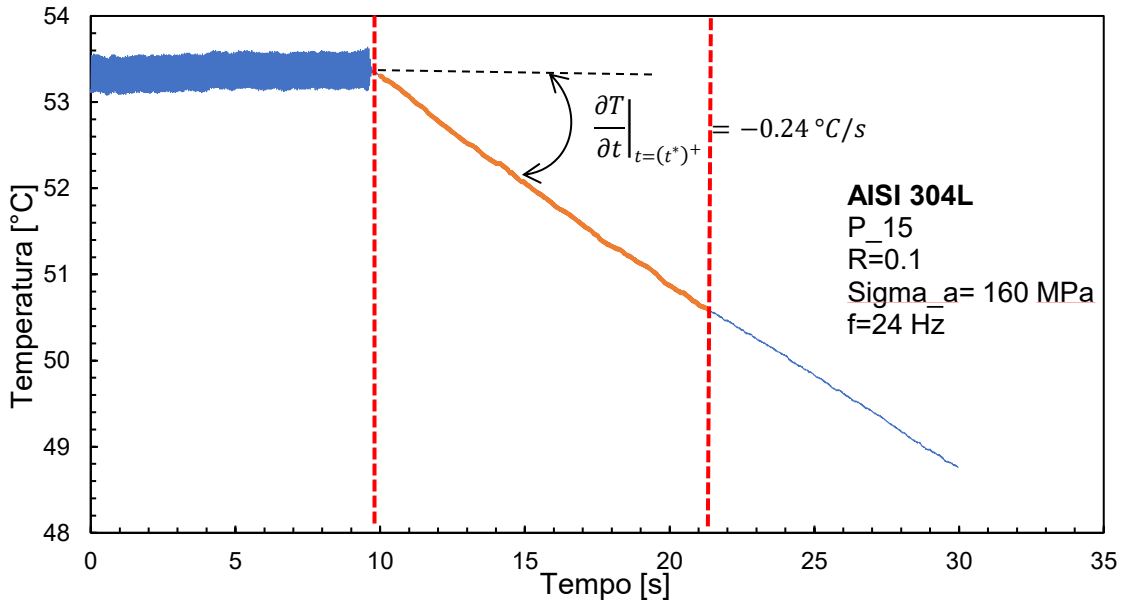


Figura 4.11 – Gradiente di temperatura per R=0.1 a 160 MPa.

Ciò che si osserva, è che il gradiente di raffreddamento presenta un tratto lineare per più di dieci secondi: questo sta a significare che esso sia un fenomeno estremamente stabile e di indubbia determinazione. Inoltre, il segnale di temperatura è molto buono in quanto si è raggiunta una temperatura di stabilizzazione di 55°C.

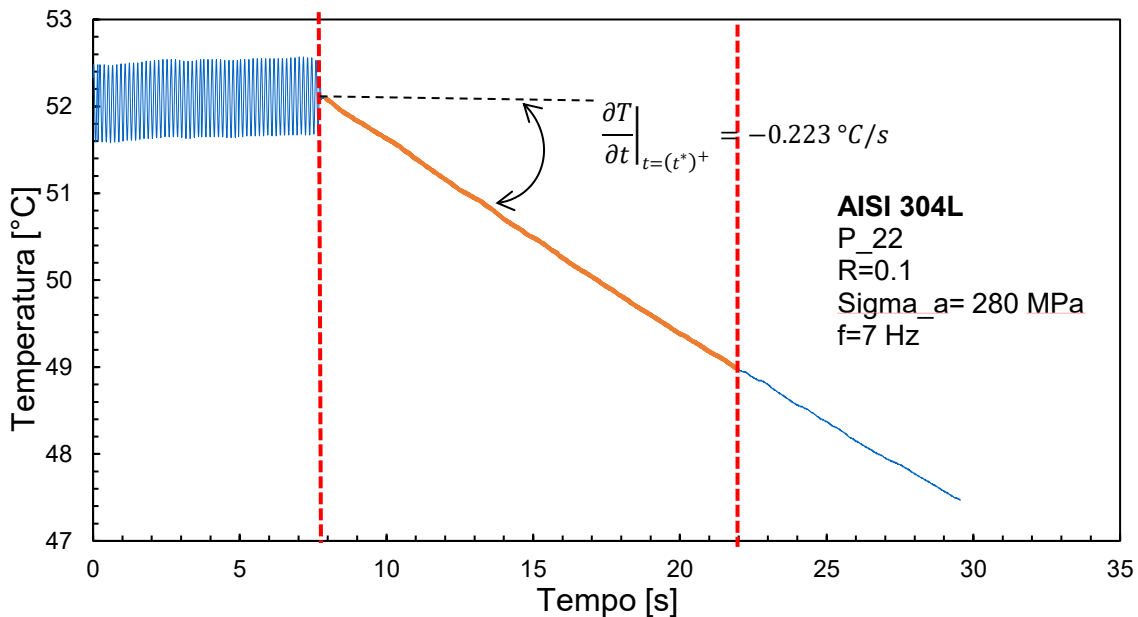


Figura 4.12 – Gradiente di temperatura per R=0.1 a 280 MPa.

In Figura 4.12 si va a rappresentare un esempio per un gradiente ad alto carico. Il caso in esame è il provino P_22, a 280 MPa. Nuovamente si osserva come il gradiente di raffreddamento mantenga la linearità per circa quindici secondi, segno che esso rappresenti una misura affidabile.

Si può riassumere dunque che sia a basso carico, sia ad alto carico, sia per $R=-1$, sia per $R=0.1$, la tecnica del gradiente di raffreddamento è in grado di fornire un'ottima stima dell'energia che il materiale è in grado di dissipare a fatica. Il valore di Q ottenuto da gradiente, verrà preso come riferimento nelle analisi successive, legate alla second armonica della temperatura.

Di seguito si va a riportare una tabella riassuntiva delle prove a $R=0.1$, in cui vengono indicati i valori di ampiezza di tensione, tensione massima, minima, media e Q valutato al 50% della vita a fatica. Solo nei casi in cui al 50% della vita il provino ha mostrato valori anomali, allora si è assunto il suo valore medio.

Provino	σ_a [MPa]	σ_m [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	Q [kJ/m ³ ciclo]	N_f
R01_1	180	220	400	40	43.7	190512
R01_2	200	244.4	444.4	44.4	68.5	81411
R01_3	160	195.6	355.6	35.6	34.5	458992
R01_4	180	220	400	40	49.4	110774
R01_5	140	171.1	311.1	31.1	21.5	2000000*
R01_6	200	244.4	444.4	44.4	51.4	121005
R01_7	240	293.3	533.3	53.3	66.7	49701
R01_8	170	207.8	377.8	37.8	39.5	332247
R01_9	260	317.8	577.8	57.8	106.5	42156
R01_15	160	195.6	355.6	35.6	41.7	2000000*
R01_16	240	293.3	533.3	53.3	98	87430
R01_22	280	342.2	622.2	62.2	117.9	50678
R01_23	280	342.2	622.2	62.2	104.4	76806
R01_24	300	366.7	666.7	66.7	84.6	75971

Tabella 4.4 – Risultati sperimentali in termini di Q a fatica per $R=0.1$ su AISI 304L laminato a caldo.

Prima di analizzare i risultati complessivi in termini di Q , a titolo di esempio, si riporta una tabella riassuntiva per una prova presa come riferimento per mostrare numericamente come Q sia stabile per un dato provino. Si prenderà prima come esempio il provino P_05, sollecitato ad un'ampiezza di tensione pari a 140 MPa e andato in run out a $2 \cdot 10^6$ di cicli.

Viene preso questo come esempio di provino a basso carico, in quanto sono stati acquisiti ben 28 gradienti di raffreddamento, e si è monitorata la prova ad intervalli regolari, ma via via crescenti, in modo da valutare l'eventuale evoluzione di Q . Infatti, per i provini andati in run out, in modo indipendente dal rapporto di ciclo, ad un certo punto il valore di Q si abbassa rispetto alle media dei valori dei precedenti raffreddamenti. Quando si è a basso carico, questo può essere un indice di un possibile run out.

Di seguito si va a rappresentare in forma tabellare i valori di Q misurati durante tutti i raffreddamenti, in modo da mostrarne l'andamento al variare del numero di cicli

Resistenza a fatica tramite approccio energetico: confronto modello Q-Gradiente e modello Q-Seconda armonica

N° raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	11474	0.0532	14	15
2	37401	0.0843	18	19
3	60155	0.0886	19	19
4	80179	0.0975	20	20
5	115050	0.1021	20	21
6	155624	0.1097	20	22
7	231237	0.1104	20	22
8	276388	0.1036	20	21
9	323162	0.0996	20	20
10	367199	0.1131	20	23
11	439288	0.106	20	21
12	483174	0.1085	20	22
13	548143	0.1047	20	21
14	584280	0.1101	20	22
15	620856	0.1028	20	21
16	739224	0.1081	20	22
17	809357	0.1073	20	22
18	886661	0.1085	20	22
19	990895	0.107	20	22
20	1038421	0.1157	20	23
21	1102473	0.1141	20	23
22	1206260	0.1104	20	22
23	1284771	0.1066	20	21
24	1397300	0.1053	20	21
25	1472080	0.1019	20	21
26	1717446	0.0803	15	22
27	1828379	0.1151	20	23
28	1958221	0.0944	20	19

Tabella 4.5 – Valori di Q per il provino P_05 a 140 MPa, R=0.1.

Già al primo colpo d'occhio si può osservare come Q, tranne nei primi cicli iniziali in cui il materiale non ancora si è stabilizzato, mostri valori nell'intorno di 21 kJ/(m³ciclo). Si può notare come i valori di Q siano estremamente minori rispetto a quelli ricavati per R=-1. Questa situazione, si vedrà nel seguito, è strettamente legata all'area del ciclo di isteresi.

In Figura 4.13, si vanno a rappresentare i valori di Q dell'ultima colonna di Tabella 4.5, rispetto ai cicli adimensionalizzati con $2 \cdot 10^6$.

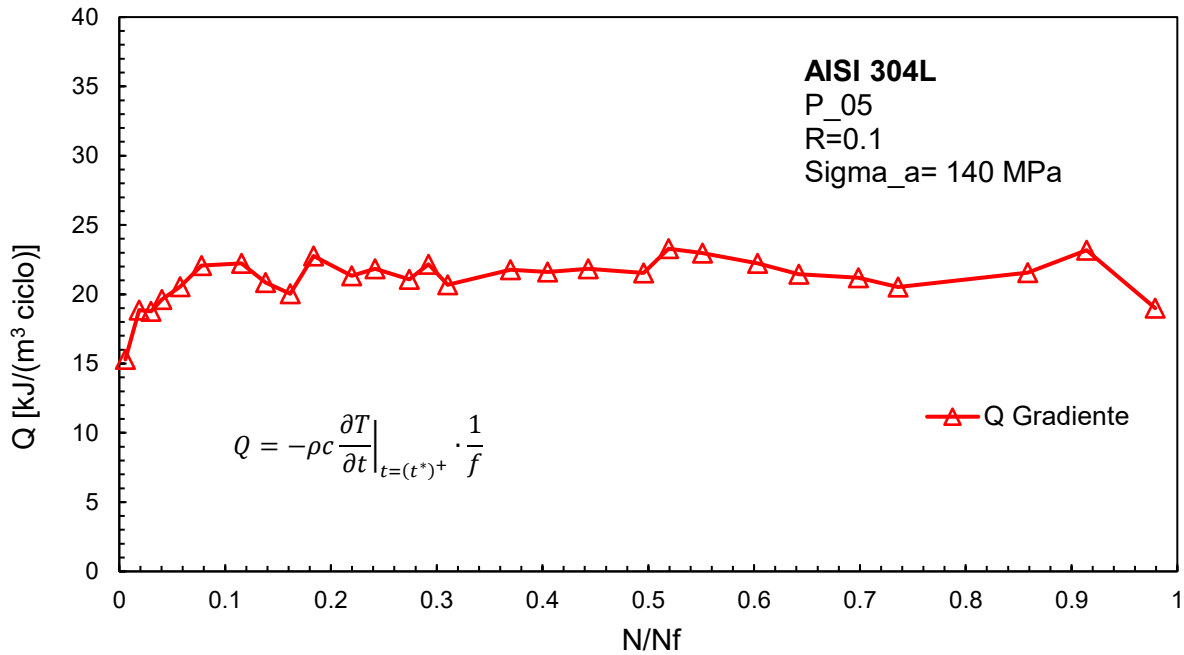


Figura 4.13 – Andamento di Q in una prova per R=0.1 a 140 MPa.

Ciò che si nota in particolare, è che Q ha tendenza ad abbassarsi verso i due milioni di cicli. Questo aspetto è tipico delle prove che vanno in run out, ovvero che Q si va ad abbassare rispetto ai valori precedenti e quando questo si verifica, si ha una riduzione del danneggiamento, motivo per cui a $2 \cdot 10^6$ si ritrova il provino ancora integro.

L'altro aspetto molto importante è che, tranne nei primi cicli in cui il materiale non si è ancora stabilizzato, Q è molto costante durante l'intero monitoraggio della prova.

Come già detto, durante ciascuna prova e pochi istanti prima di interrompere la macchina per il calcolo del gradiente, sono stati acquisiti in successione due cicli di isteresi, in modo tale che se uno dei due fosse stato acquisito erroneamente, si avrebbe avuto a disposizione il secondo per calcolarne l'area. Inoltre, è stato fondamentale acquisire almeno 100 punti-ciclo, che corrispondeva a una frequenza di carico pari a 20 Hz. Al contrario delle prove a R=-1, nelle prove a R=0.1 si è potuto salire enormemente in frequenza, in quanto, a causa dei ristretti cicli di isteresi, il materiale assorbiva meno energia. Inoltre, per avere delle buone misure sia di gradiente sia di seconda armonica, è stato necessario avere valori di temperatura sufficientemente alti, pari ad almeno 40°C; pertanto, nelle prove a R=0.1 e a basso carico come questa a 140 MPa, è stato trovato un compromesso tra avere una temperatura sufficientemente alta e una frequenza sufficientemente bassa tale da avere almeno 100 punti ciclo.

Inoltre, tra una acquisizione e l'altra è stata aumentata la frequenza fino anche a 40 Hz in modo da ridurre i tempi di prova.

L'area del ciclo di isteresi poi è stata calcolata nuovamente con il metodo dei trapezi.

Un aspetto che si è dovuto indagare è stato quello di avere dei cicli di isteresi che ai vertici presentavano un intreccio, dovuto al fatto che i cicli erano molto ristretti a basso carico e questo generava difficoltà nell'acquisizione del segnale da parte dell'estensometro.

Si è poi verificato che la perdita di area utile dovuta all'intreccio è dell'ordine di 2-5 %, pertanto sono stati considerate le aree dei cicli originali.

Resistenza a fatica tramite approccio energetico: confronto modello Q-Gradiente e
modello Q-Seconda armonica

Fatta questa precisazione, si riporta in Tabella 4.6 i valori di W sempre per il provino P_05 a 140 MPa, confrontato con i valori di Q da gradiente.

N	Cicli	Gradiente	Frequenza	Q	W
raffreddamento		[°C/s]	[Hz]	[kJ/m³ciclo]	[kJ/m³ciclo]
1	11474	0.0532	14	15	6
2	37401	0.0843	18	19	5
3	60155	0.0886	19	19	7
4	80179	0.0975	20	20	8
5	115050	0.1021	20	21	8
6	155624	0.1097	20	22	5
7	231237	0.1104	20	22	5
8	276388	0.1036	20	21	6
9	323162	0.0996	20	20	5
10	367199	0.1131	20	23	4
11	439288	0.106	20	21	10
12	483174	0.1085	20	22	7
13	548143	0.1047	20	21	2
14	584280	0.1101	20	22	10
15	620856	0.1028	20	21	4
16	739224	0.1081	20	22	6
17	809357	0.1073	20	22	8
18	886661	0.1085	20	22	7
19	990895	0.107	20	22	10
20	1038421	0.1157	20	23	8
21	1102473	0.1141	20	23	7
22	1206260	0.1104	20	22	6
23	1284771	0.1066	20	21	5
24	1397300	0.1053	20	21	5
25	1472080	0.1019	20	21	6
26	1717446	0.0803	15	22	8
27	1828379	0.1151	20	23	10
28	1958221	0.0944	20	19	8

Tabella 4.6 – *Andamento di Q e W in una prova per R=0.1 a 140 MPa.*

Un aspetto molto importante riguarda il fatto che contrariamente a quanto accade per R=-1, Q e W sono estremamente diversi, in particolare Q è il doppio o in alcuni casi il triplo rispetto a W. In Figura 4.14 si riporta l'andamento dei due parametri, mentre in Figura 4.15 si riporta l'andamento del rapporto tra Q e W.

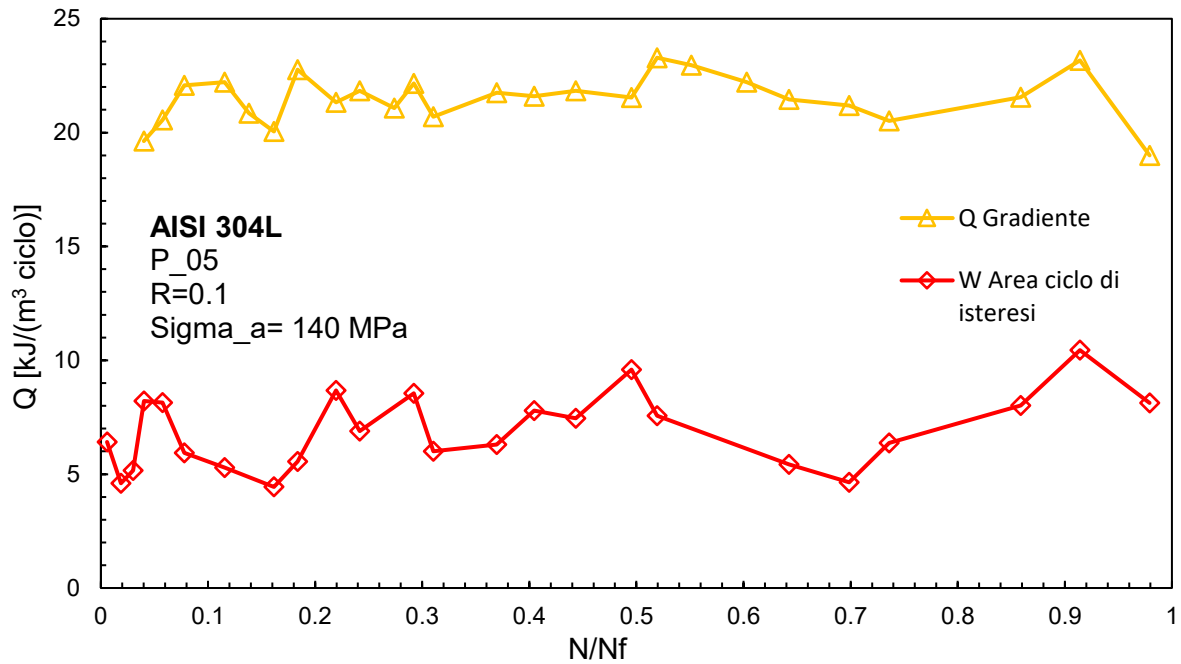


Figura 4.14 – Andamento di Q e W in una prova per R=0.1 a 140 MPa.

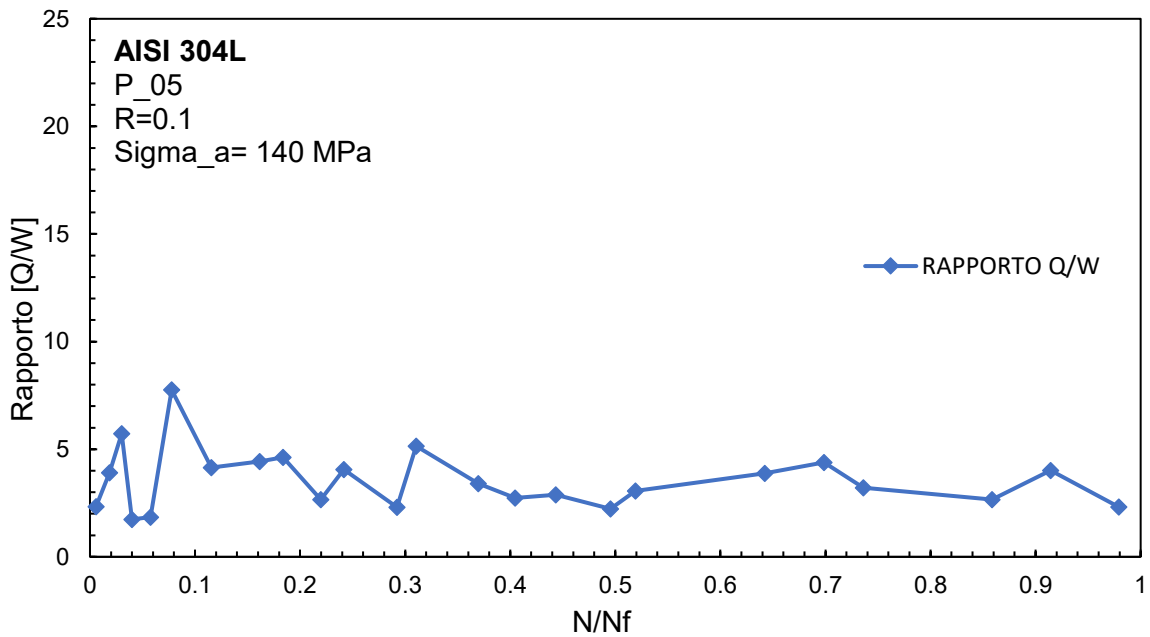


Figura 4.15 – Rapporto tra Q e W in una prova per R=0.1 a 140 MPa.

Ciò che si osserva dalla Figura 4.15, è che il rapporto tra Q e W, tranne in alcuni casi particolari, si attesta sempre attorno ad un valore compreso tra 2 e 5, a testimoniare come l'area del ciclo di isteresi sia molto ridotta rispetto al valore di Q calcolato tramite gradiente.

In Figura 4.16 si riportano alcuni cicli di isteresi di tale prova a livello esemplificativo:

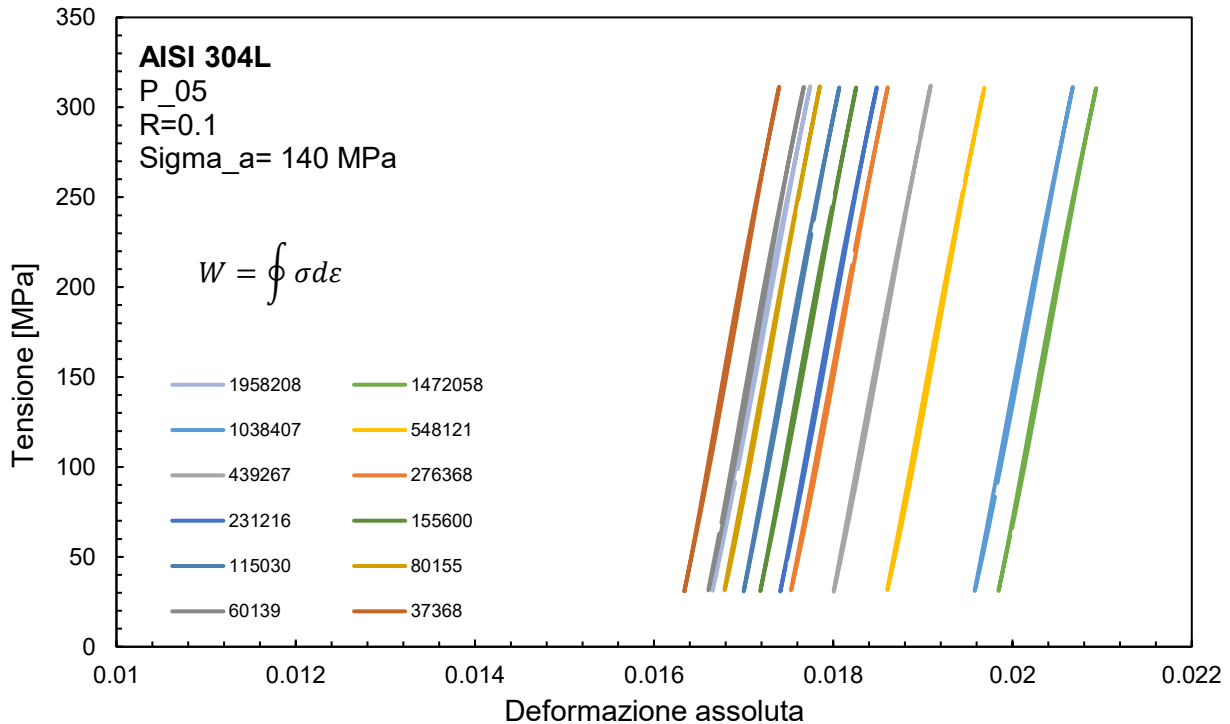


Figura 4.16 – Cicli di isteresi per R=0.1 a 140 MPa.

L'aspetto peculiare di questo grafico è che contrariamente a quanto accade con R=-1, i cicli di isteresi continuano a traslare verso deformazioni maggiori: ciò significa che durante la prova il materiale continua ad evolvere ciclicamente, e la deformazione media continua ad aumentare; questo è un aspetto che si viene a manifestare anche a carichi elevati come si vedrà nel seguito.

Un secondo aspetto rilevante è che visivamente i cicli di isteresi hanno una forma ad ago, ovvero sono estremamente ridotti in area rispetto alla controparte a R=-1: ciò è nuovamente legato al forte incrudimento che si viene a sviluppare per rapporti di ciclo R=0.1, che, come visto nel Capitolo 3, porta alla trasformazione di austenite in martensite e dunque ad un incremento significativo della resistenza del materiale. Tale incremento è legato però a una perdita di duttilità.

Dall'altra parte però si deve anche tenere conto di quanto espresso nel Capitolo 1 al Paragrafo 1.8.6, ovvero che Q per R>0 sia una frazione di \bar{W} , laddove con tale simbolo si indica l'energia di deformazione plastica. Il rapporto tra Q e \bar{W} è stato definito come Ψ .

Ciò che si vuole fare ora è verificare che effettivamente Q sia una frazione di \bar{W} . Per il calcolo di Ψ , si segue la seguente procedura:

1. Dai valori della cella di carico, si calcolano le tensioni e le deformazioni, e si costruisce il ciclo di isteresi;
2. Si va a identificare il modulo elastico E per ogni ciclo di isteresi, ovvero si determina la pendenza del ciclo nel primo tratto lineare;
3. Per ogni valore di deformazione, si calcola la quota parte plastica come differenza tra la deformazione complessiva e la deformazione elastica, quest'ultima pari al rapporto tra la tensione (per quel valore di deformazione) e il modulo E;
4. Si costruisce il grafico tensione vs deformazione plastica;
5. Si divide il ramo superiore da quello inferiore, dopodiché si calcola l'area sottesa dal ramo superiore e l'area sottesa dal ramo inferiore del ciclo di isteresi;
6. Si sommano le due aree e si ottiene \bar{W} .

Di seguito in Figura 4.17 si riporta l'andamento di Q , \bar{W} e del loro rapporto $Q/\bar{W}=\psi$

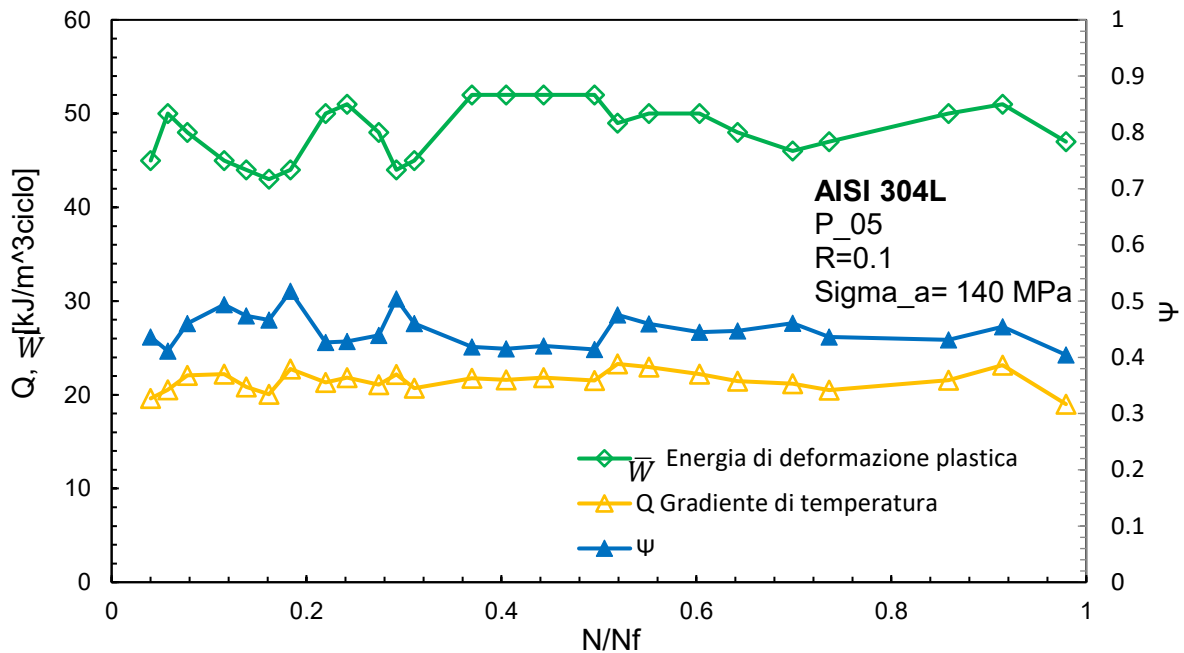


Figura 4.17 – Andamento di Q e dell'energia di deformazione plastica.

Ciò che si può osservare è il rapporto tra l'energia di deformazione plastica e Q è minore di 1, ed in particolare in questa prova si attesta nell'intorno di 0.4. Ciò significa che, se nelle prove a $R=-1$, praticamente tutta l'energia plastica di deformazione durante la fase di trazione e durante la fase di compressione va in calore, per $R=0.1$ ciò non avviene. Nel caso di una tensione media diversa da zero, solo una percentuale che va fino a circa 40% di lavoro plastico va in calore, mentre la restante parte va a finire in trasformazioni irreversibili e reversibili del materiale.

Dopo aver analizzato un caso a basso carico, si va ad analizzare ora la situazione inversa, ovvero il caso di una prova ad alto carico, e nello specifico il P_22 con ampiezza di tensione pari a 280 MPa e $R=0.1$

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3438	0.2226	7	128
2	7482	0.2014	7	115
3	16636	0.2175	7	125
4	34397	0.2051	7	117

Tabella 4.7 – Valori di Q per il provino P_22 a 280 MPa, $R=0.1$.

Ciò che si osserva dall'analisi della Tabella 4.7, è che rispetto alle prove per $R=-1$, qui tra carico basso (ovvero 140 MPa) e carico alto (280 MPa) c'è appena un ordine di grandezza di differenza, mentre nel caso di trazione-compressione con tensione media uguale a zero, come evidenziato nel precedente paragrafo, si ottengono valori che hanno ben due ordini di grandezza tra basso e alto carico.

I valori dell'ultima colonna, Q , possono essere graficati rispetto ai cicli adimensionalizzati, come mostrato in Figura 4.18. Nel caso specifico di questa prova non è stato possibile acquisire più di quattro gradienti a causa della ridotta vita del provino in esame.

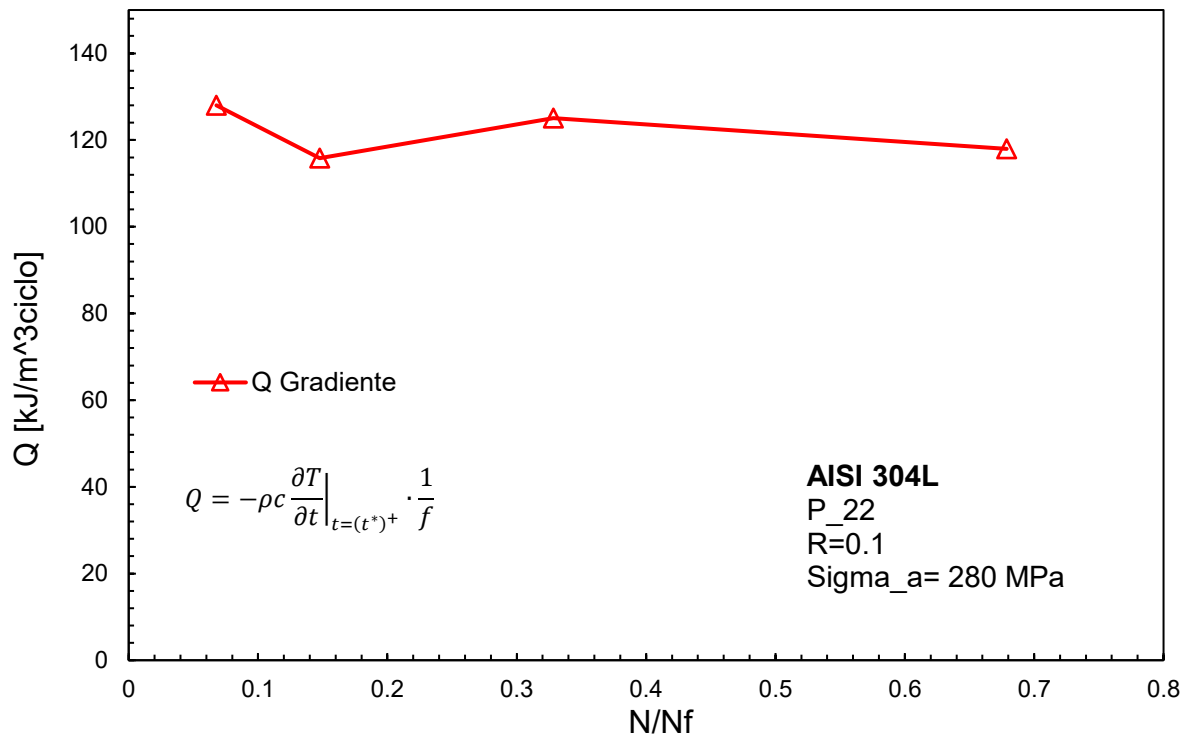


Figura 4.18 – Andamento di Q per P_22, 280 MPa, R=0.1.

Si osserva come Q sia molto stabile durante la prova, come nel caso a basso carico. Questa volta però, l'energia dissipata non si riduce avvicinandosi alla rottura, contrariamente alle prove in run out. Come nel caso precedente, sono stati acquisiti due cicli di isteresi consecutivi prima dell'interruzione della prova per il calcolo del gradiente. I risultati in forma tabellare possono essere riassunti come di seguito, confrontando W da ciclo di isteresi e Q:

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	W [kJ/m ³ ciclo]
1	3438	0.2226	7	128	83
2	7482	0.2014	7	116	82
3	16636	0.2175	7	125	81
4	34397	0.2051	7	118	78

Tabella 4.8 – Valori di Q e W per il provino P_22 a 280 MPa, R=0.1.

Ciò che si nota, è che nuovamente l'area racchiusa dal ciclo di isteresi assume valori significativamente minori che nel caso di R=-1, nonostante questa sia una prova ad alto carico. Questo accade, come già detto, a causa del forte incrudimento del materiale: tanto maggiore è il carico applicato, a R=0.1, tanto maggiore è la trasformazione di fase austenite-martensite, tanto più il materiale incrudisce e tende a chiudere cicli di isteresi ristretti. Variando il carico di 30 o 40 MPa nel caso R=-1, otteniamo uno o due ordini di grandezza differenti tra le aree racchiuse dal ciclo di isteresi, mentre a R=0.1 una variazione di 140 MPa in più non fa aumentare neanche di un ordine di grandezza l'area del ciclo di isteresi.

L'andamento di Q e W, vengono rappresentati in Figura 4.19 come segue:

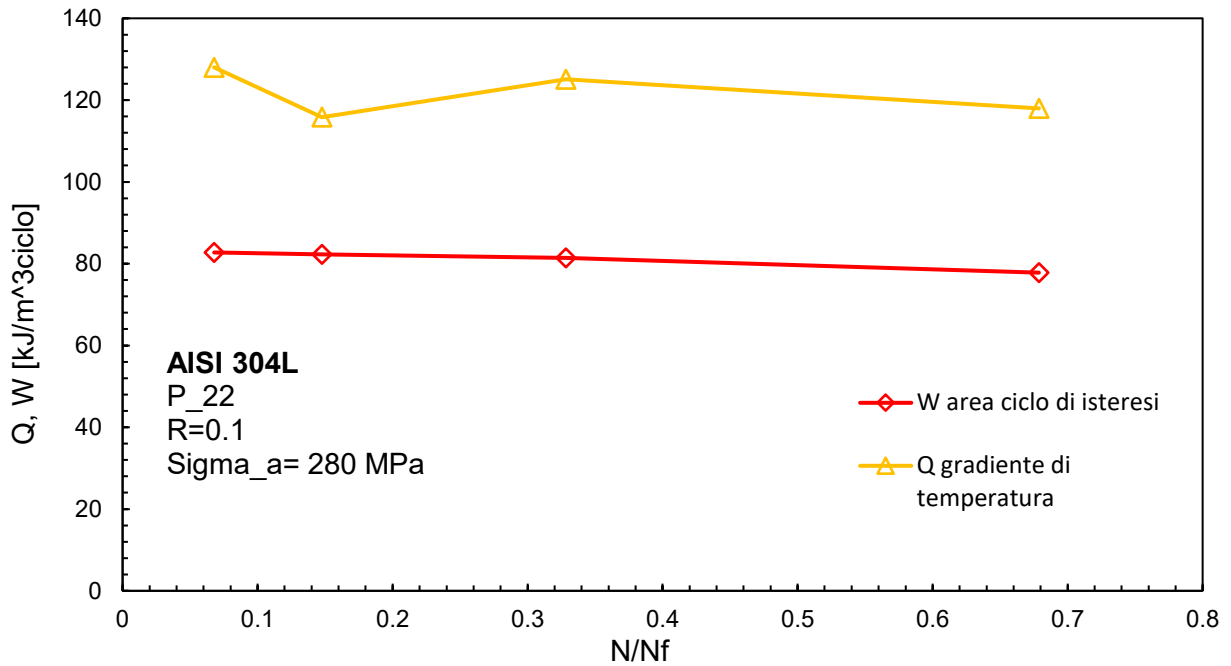


Figura 4.19 – Andamento di Q e W per P_22, 280 MPa, R=0.1.

Si va inoltre a rappresentare i cicli di isteresi, questa volta “zoomati” in modo da poter apprezzare l’area racchiusa, in quanto se si ponesse lo zero come origine del grafico, essi sembrerebbero avere comportamento lineare elastico:

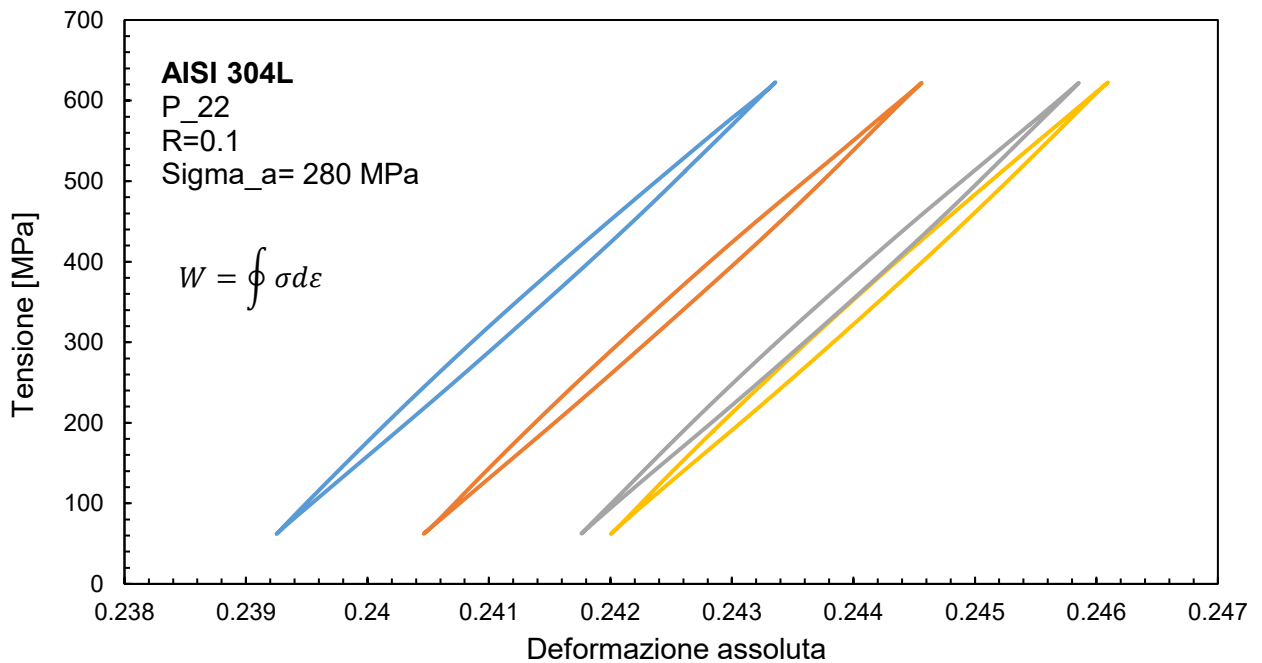


Figura 4.20 – Cicli di isteresi per P_22, 280 MPa, R=0.1.

Anche nel seguente caso, è stata calcolata \bar{W} , seguendo la procedura descritta per il caso a basso carico. Di seguito si va a riportare graficamente un ciclo di isteresi plastica, per mettere in luce la differenza rispetto ai cicli di isteresi complessivi di deformazione elastica e plastica. Ciò a significare

che nonostante il materiale incrudisca e chiuda dei cicli di isteresi di area ridotta, la plasticità è lo stesso ben evidente.

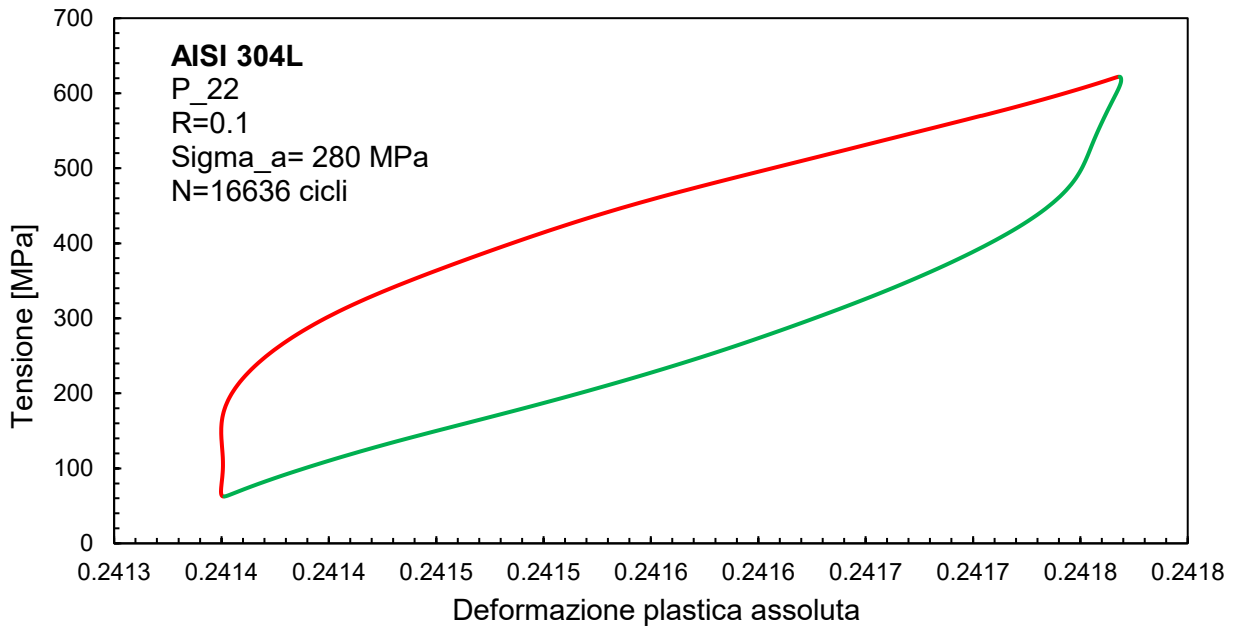


Figura 4.21 – Cicli di isteresi plastico per P_22, 280 MPa, R=0.1.

L'energia di deformazione plastica \bar{W} , è dunque data dalla somma dell'area al di sotto del ramo rosso e dell'area sotto il ramo verde, rispetto all'asse x. Si può notare dai valori in ascissa della deformazione plastica di Figura 4.21 che la differenza tra il valore massimo e minimo è pari a 0.0004 ovvero in percentuale di 0.04%; mentre la differenza tra il valore massimo e minimo del corrispettivo ciclo di isteresi è pari a 0.0041, ovvero di 0.41%, ben un ordine di grandezza in più. Ciò significa che la maggior parte di deformazione è elastica, e pertanto ad alti carichi il materiale si plasticizza ma mantenendo un'elevata elasticità. Di seguito in Figura 4.22 si riporta l'andamento di Q, \bar{W} e del loro rapporto $Q/\bar{W}=\Psi$

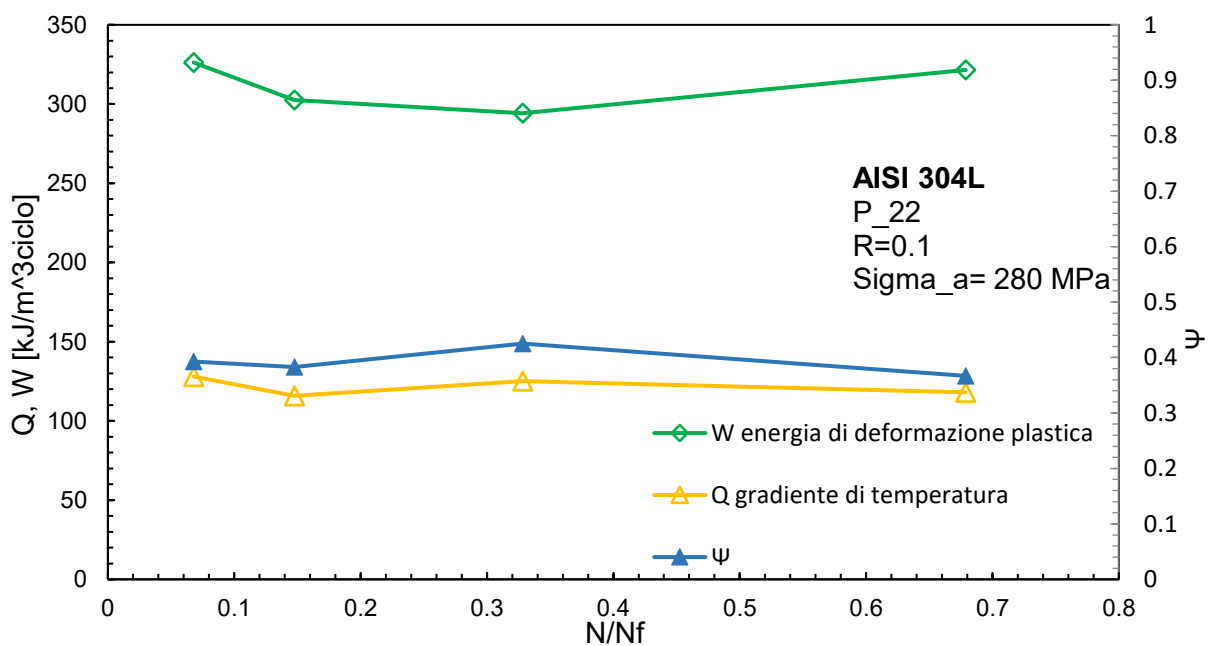


Figura 4.22 – Andamento di Q e dell'energia di deformazione plastica.

Una volta portato un esempio numerico per un provino a basso e ad alto carico, si vanno ora a riassumere all'interno di uno stesso grafico i risultati per tutte le prove fatte in questa Tesi a R=0.1.

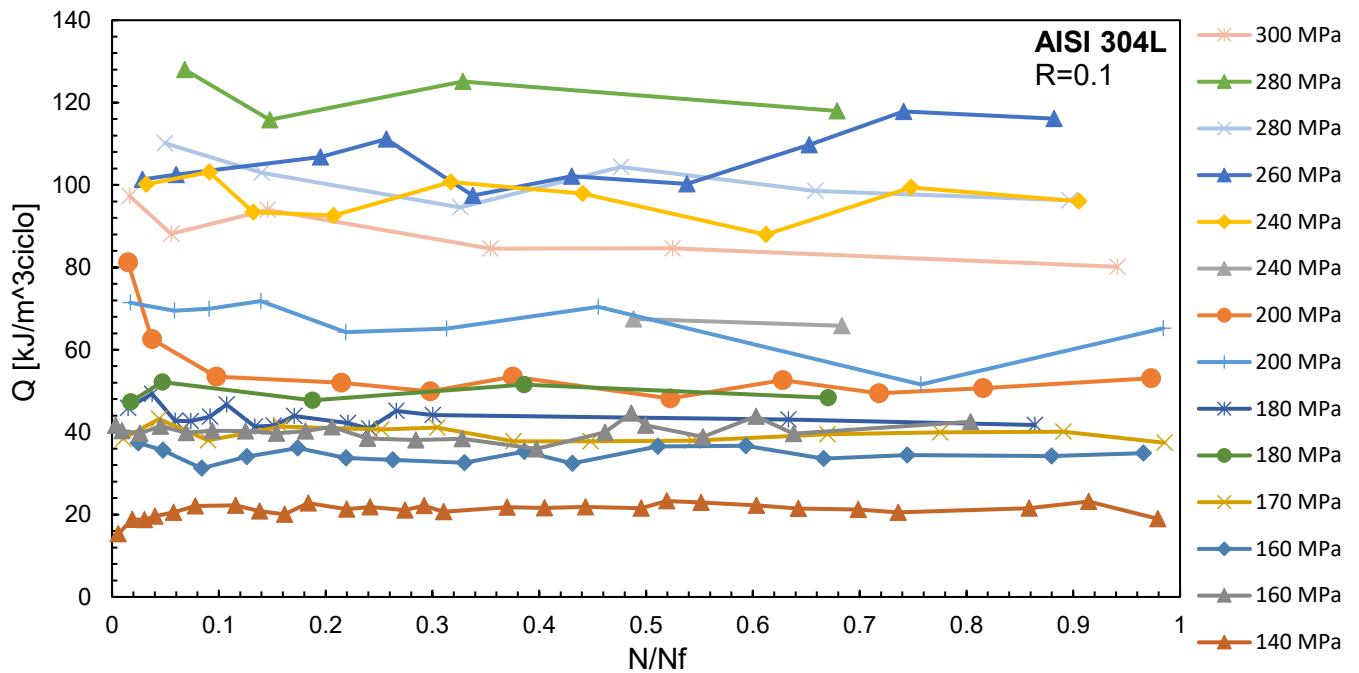


Figura 4.23 – Confronto di Q per le prove a $R=0.1$ rispetto alla vita di ciascun provino.

Ciò che si osserva è che mediamente a carichi elevati corrispondono Q più elevati, anche se Q è una misura più fedele della tensione per caratterizzare la resistenza a fatica del materiale. Un altro aspetto che si nota è che ad esempio per un carico di 300 MPa (in rosa) si ha un Q più basso di quello a 260 MPa (in blu): ciò è coerente con il fatto che a 300 MPa il materiale ha avuto una vita maggiore, e dunque un Q minore.

Dopo aver ricavato l'andamento di Q all'interno della singola prova, si procede a costruire le curve di fatica del materiale, per un dato rapporto di ciclo. La convenzione utilizzata è, come già detto, quella di utilizzare il valore di Q al 50% della vita, per ciascun provino.

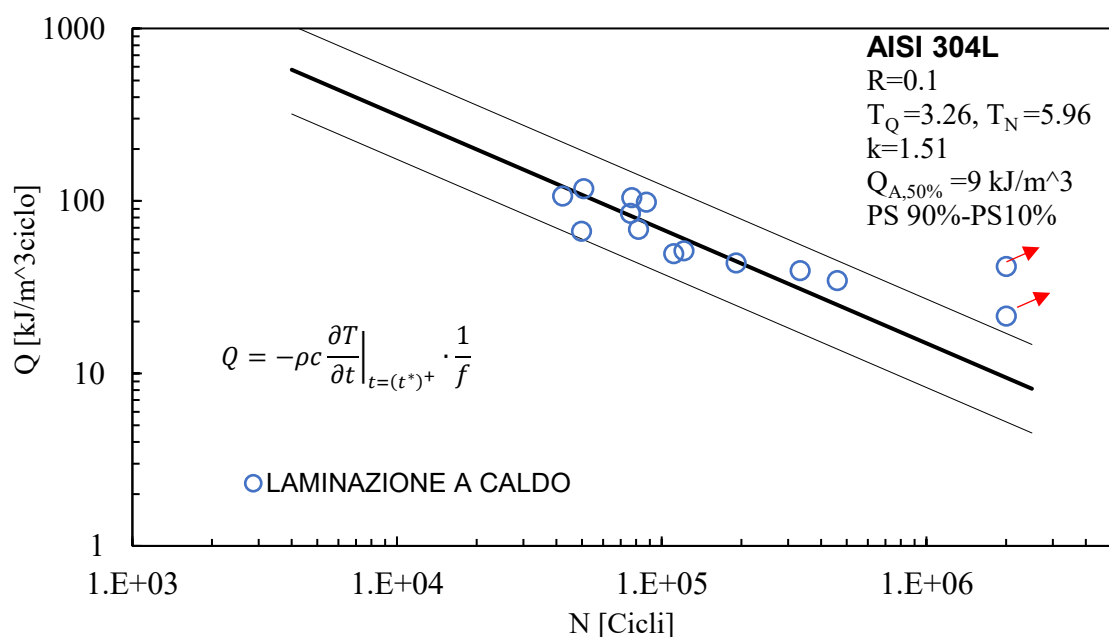


Figura 4.24 – Curva di fatica in termini di Q vs numero di cicli a rottura per $R=0.1$.

Per determinare tale curva, è stato nuovamente utilizzato il foglio di calcolo *FaticaW*, impostando come numero di cicli corrispondente a $Q_{A,50\%} \cdot 2 \cdot 10^6$. Inoltre, anche in questo caso è stata impiegata una banda di dispersione 10%-90%.

Ciò che si osserva è che per i carichi testati, che vanno da 140 MPa a 280 MPa, i valori di Q si attestano in una banda compresa tra circa 20 e 120 kJ/(m³ciclo).

Ciò che si osserva è un $Q_{A,50\%}$ pari a 9 kJ/(m³ciclo) ed una pendenza molto accentuata pari a 1.51.

La dispersione in Q assume valori accettabili pari a 3.26, mentre in N si ha un valore di 5.96 che è minore rispetto a quello ricavato per le curve di Woehler.

Ciò che viene analizzato nel prossimo paragrafo riguarda il confronto dei risultati per piastre laminate a caldo a R=-1 e R=0.1.

Di seguito in Figura 4.24, si va a rappresentare in un unico grafico il confronto per piastre laminate a caldo al variare del rapporto di ciclo R=-1 e R=0.1, sempre in termini del parametro di danneggiamento Q.

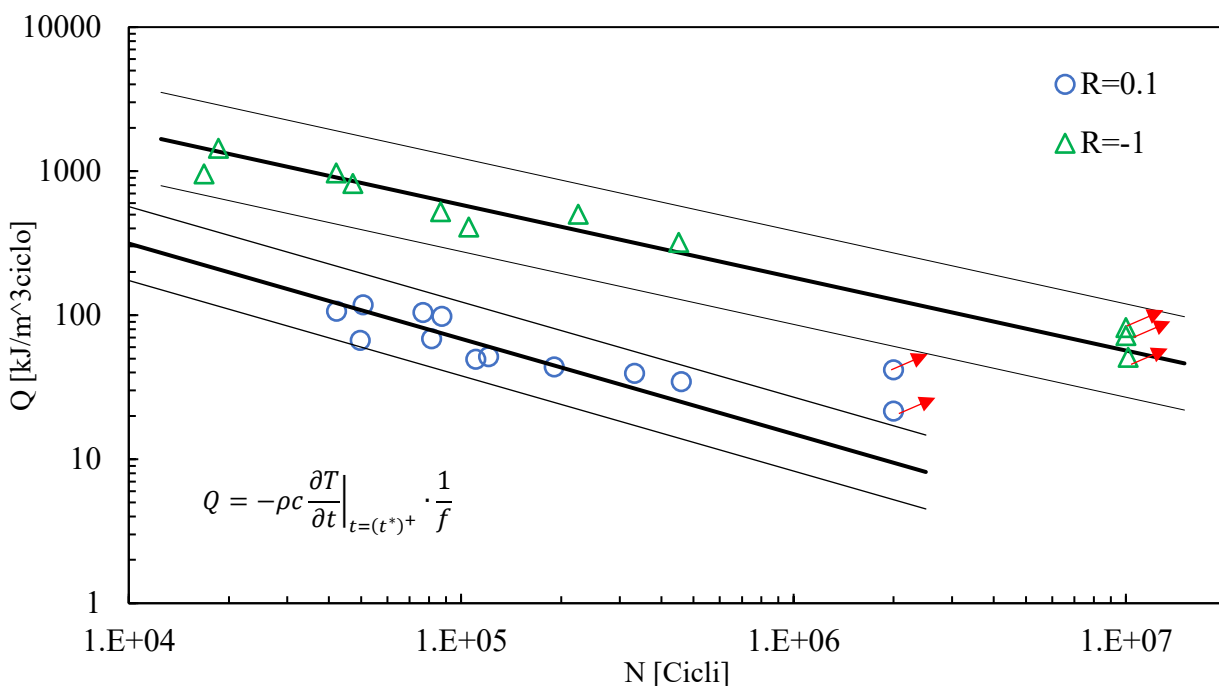


Figura 4.25 – Curve di fatica in termini di Q vs numero di cicli a rottura per R=-1 e R=0.1.

Ciò che si può constatare è che diversamente dalle curve di Woehler, le due curve in Q non si vanno ad intrecciare e sono distinte tra di loro. Ciò a testimonianza da un lato di come Q sia più rappresentativo del comportamento a fatica del materiale, in quanto nonostante avvenga l'incrudimento e la trasformazione di fase soprattutto a R=0.1, questo non porti a una intersezione delle curve; mentre dall'altro lato il grafico mostra come Q sia dipendente dal rapporto di ciclo considerato. Quest'ultimo aspetto sarà oggetto di approfondimento successivamente.

Il passo successivo consiste nell'andare a confrontare a parità di R, due materiali nominalmente uguali ma ottenuti tramite due processi differenti.

Di seguito in Figura 4.26, si evidenzia la differenza complessiva di Q all'interno di ciascuna prova al variare del rapporto di ciclo. Si tenga inoltre conto che la scala delle ordinate è espressa in scala logaritmica per motivi di migliore rappresentazione

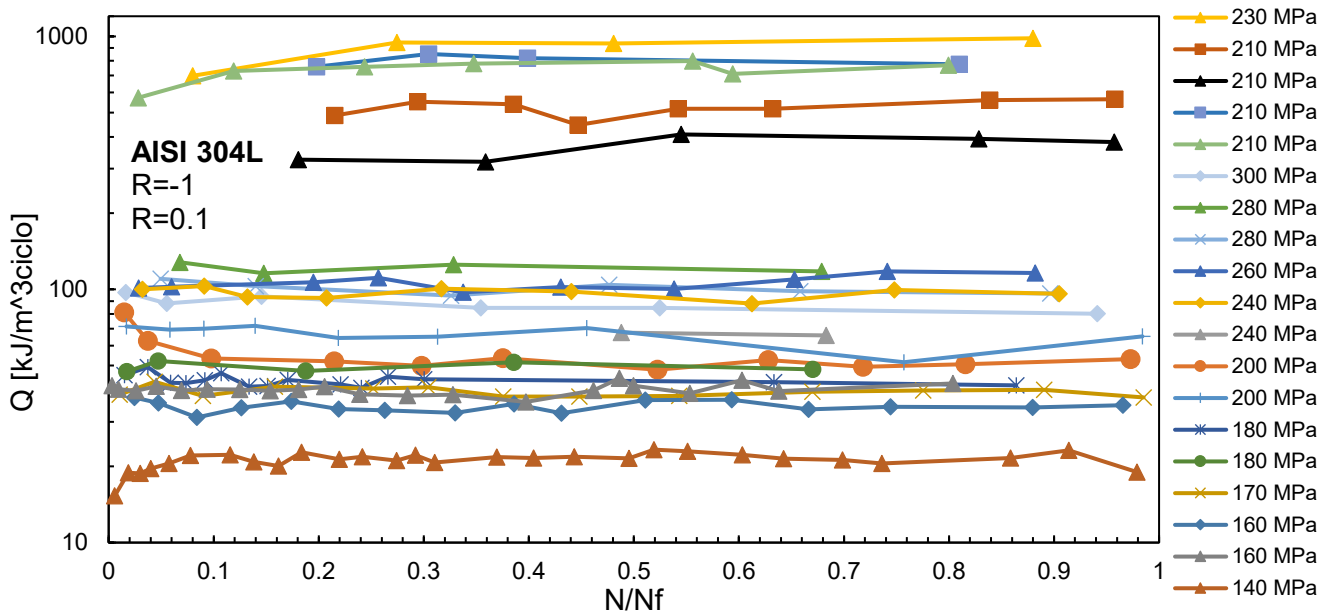


Figura 4.26 – Andamento di Q per R=-1 e R=0.1.

4.2.5 Confronto prove a R=-1 ad ampiezza costante tramite Q per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo

L'obiettivo di questo paragrafo è il confronto nel caso di fatica con tensione media nulla tra l'AISI 304L ottenuto da piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo. Questo confronto è già stato eseguito in termini di curve di Woehler nel Capitolo 3 e si è appurato come le barre trafilate abbiano una curva nettamente più alta; ciò, come visto, è legato al fatto che il processo di trafilatura comporta un aumento della percentuale di martensite e dunque di resistenza in partenza già più elevata della laminazione a caldo. Si è dunque andati ad indagare cosa accadesse confrontando i due materiali apparentemente diversi, in termini energetici, ottenendo i seguenti risultati riportati in Figura 4.27:

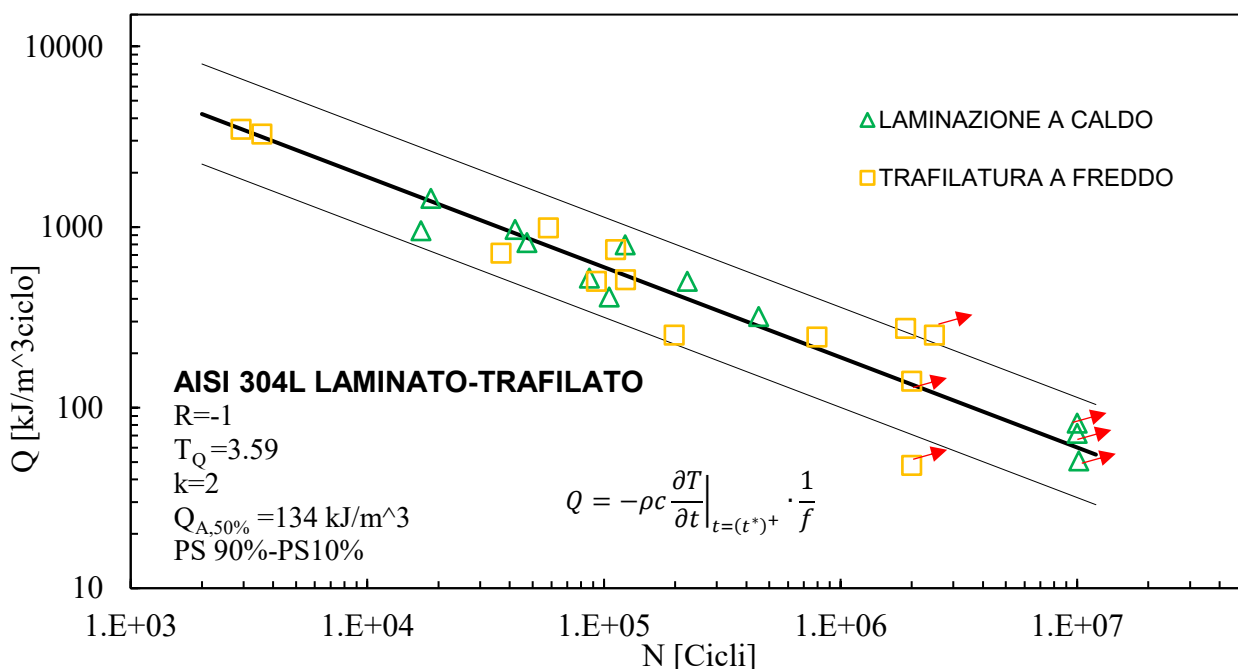


Figura 4.27 – Curve di fatica per barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo in termini di Q per R=-1.

Come si nota dalla Figura 4.27, i dati, a parità di R, ma per due differenti processi produttivi, collassano all'interno della stessa banda di dispersione, utilizzando il parametro Q. Questo è un risultato estremamente importante, che mette in luce la bontà dell'uso dell'energia dissipata durante una prova di fatica come parametro caratterizzante il danneggiamento.

Quanto si osserva mette luce sul fatto che Q sia una proprietà intrinseca del materiale e che diversamente dall'approccio classico in tensione, sia indipendente dalle condizioni al contorno, una delle quali l'incrudimento del materiale legato alle alte deformazioni a cui è sottoposto.

Un aspetto chiave, inoltre, è che se confrontata con la curva in Figura 4.1, si ottiene qui una dispersione in Q pari a 3.59 contro 3.82, migliorando la situazione nonostante la maggior quantità di punti sperimentali; si ottiene inoltre una dispersione in N di 14.9 rispetto a 14.2 nel caso di sole piastre laminate, risultati del tutto confrontabili. Un altro aspetto è che $Q_{A,50\%}$ passa da 128 kJ/(m³ciclo) a 134 kJ/(m³ciclo).

Viene confermata pertanto la capacità di Q di condensare i risultati in una banda di dispersione potendo creare quindi una unica curva di fatica.

Si vanno ora ad analizzare i risultati per R=0.1.

4.2.6 Confronto prove a R=0.1 ad ampiezza costante tramite Q per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo

L'obiettivo di questo paragrafo è proseguire il confronto iniziato nel precedente per le prove a R=-1, estendendolo a R=0.1. Nel Capitolo 3 è stato eseguito il confronto a R=0.1 per le piastre laminate a caldo e le barre trafilate a freddo, venendo alla conclusione (v. Figure 3.7 e 3.8) che i due sembrano essere due materiali completamente differenti, se analizzati in tensione. In particolare, se la curva per i trafilati a freddo ha una pendenza $k=22.05$, compatibile con un provino liscio, per le piastre laminate a caldo invece la pendenza è pari a 2.82, assumendo valori troppo bassi. Indagando questo aspetto mediante metallografia, prove di durezza e XRD, si è giunti alla conclusione che il materiale a R=0.1, laminato a caldo, si trasforma e diventa diverso rispetto al materiale di partenza.

Pertanto, è stato indagato tale aspetto utilizzando Q come parametro caratteristico del danneggiamento a fatica, ottenendo i risultati evidenziati in Figura 4.28:

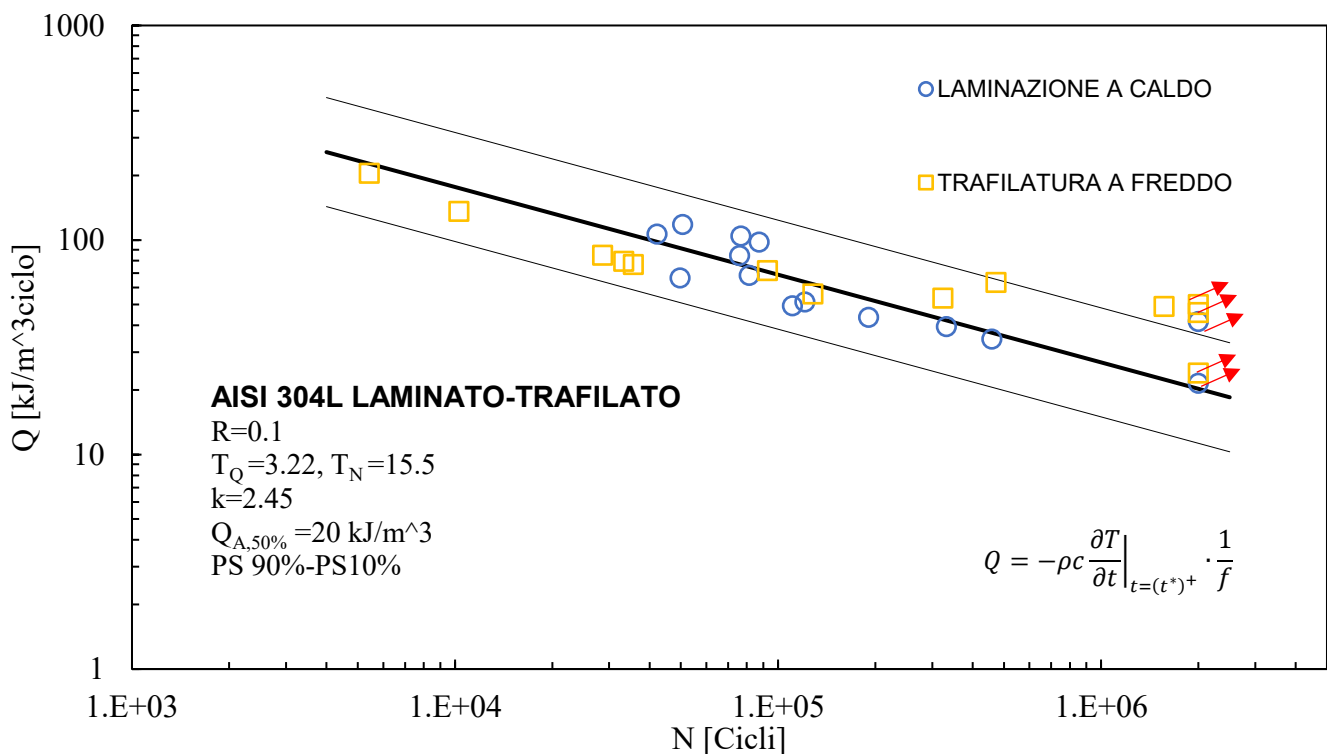


Figura 4.28 – Curve di fatica per barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo in termini di Q per R=0.1.

Ciò che si osserva dall'analisi della Figura 4.28 è che nuovamente, anche per $R=0.1$, Q sia in grado di condensare i risultati all'interno di un'unica banda di dispersione i dati che nelle curve di Woehler non è possibile fare. Se si fa riferimento alla Figura 3.8 del precedente Capitolo, si osserva come i dati portino ad un intreccio delle due curve, con i due materiali, laminato e trafilato, che tendono ad avvicinarsi per medio-bassi cicli. In quella zona, l'incrudimento derivante dagli alti strain sulle piastre a caldo porta ad avvicinarne il comportamento a quello delle barre trafilate, già incrudite da parte del processo produttivo.

Se gli stessi dati vengono rielaborati in termini di energia dissipata dal materiale, si osserva come sia possibile ottenere un'unica curva a fatica, contrariamente alle curve di Woehler. Ciò è legato nuovamente al fatto che Q è una proprietà intrinseca del materiale, e non varia con la formazione di martensite, almeno fino a quantità ridotte.

Se si va inoltre a confrontare la curva di Figura 4.24 con quella di Figura 4.28, si osserva che nel primo caso si ottiene una dispersione in Q pari a 3.26, mentre nel secondo caso par a 3.22: ciò mostra come si riduca la dispersione considerando entrambi i materiali, migliorando la bontà della curva. Inoltre, il valore di $Q_{A,50\%}$ passa da 9 kJ/(m³ciclo) a 20 kJ/(m³ciclo).

Nella Figura 4.29 si va a rappresentare in un unico grafico la situazione complessiva delle nuove curve in Q per entrambi i materiali, laminato e trafilato, al variare del rapporto di ciclo.

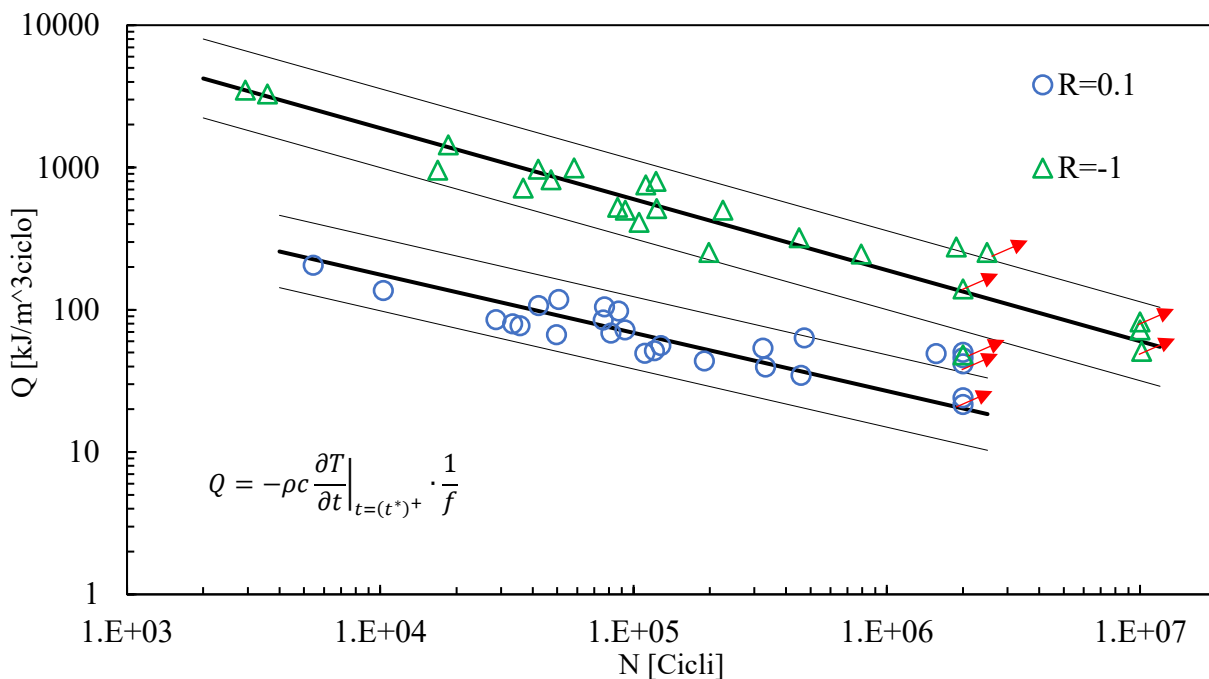


Figura 4.29 – Curve di fatica per barre trafilate a freddo e piastre laminate a caldo in termini di Q per $R=0.1$ e $R=-1$.

Si può notare che anche in questo caso le due curve rimangono separate tra di loro, a testimonianza di come Q dipenda dal rapporto di ciclo a cui è sottoposto il materiale durante la prova di fatica.

Di seguito si riportano ora due esempi per le prove a gradino, una per $R=-1$ e una per $R=0.1$ elaborate in termini di Q e di W . Queste prove sono state eseguite con l'obiettivo di fare il confronto con Q Second Harmonic, che verrà mostrato nel Capitolo 5

4.2.7 Prove di fatica a gradini per R=-1 elaborati in termini di Q

In questo paragrafo viene portato un esempio di prova a gradino eseguita per R=-1 su una piastra in AISI 304L laminata a caldo. Lo scopo è quello di confrontare Q gradiente con Q Second Harmonic, ma tali risultati vengono presentati nel capitolo successivo.

Di seguito in Tabella 4.9 si riportano i valori di ciascun gradino, in termini di cicli alla quale sono stati eseguiti i gradienti, i valori di Q e di W (area del ciclo di isteresi) e l'ampiezza di tensione applicata in quel momento per il provino P_19:

N raffreddamento	Cicli	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	W [kJ/m ³ ciclo]	σ_a [MPa]
1	16112	16	35	20	160
2	25025	8	157	164	180
3	39371	7.5	178	194	180
4	51505	2	412	465	200
5	62103	2	438	515	200
6	66054	1	986	1019	220
7	81760	1	992	1164	220
8	88309	1	954	1135	220
9	89242	0.7	1376	1715	240

Tabella 4.9 – Valori di Q, W e ampiezza di tensione per una prova a gradini a R=-1, P_19.

La prova a gradini è stata eseguita aumentando i livelli di carico 20 MPa alla volta, cercando di mantenere a un certo livello di tensione il provino per non più di 10000-15000 cicli, in modo tale che il danneggiamento subito a ciascun blocco avesse poca influenza sui gradini successivi. Ad ogni livello di carico, sono stati eseguiti quando possibile più di un gradiente, in modo tale da avere più misurazioni alla stessa ampiezza di tensione. Di seguito in Figura 4.30 si riporta l'andamento di Q e di W al variare del numero di cicli adimensionalizzato:

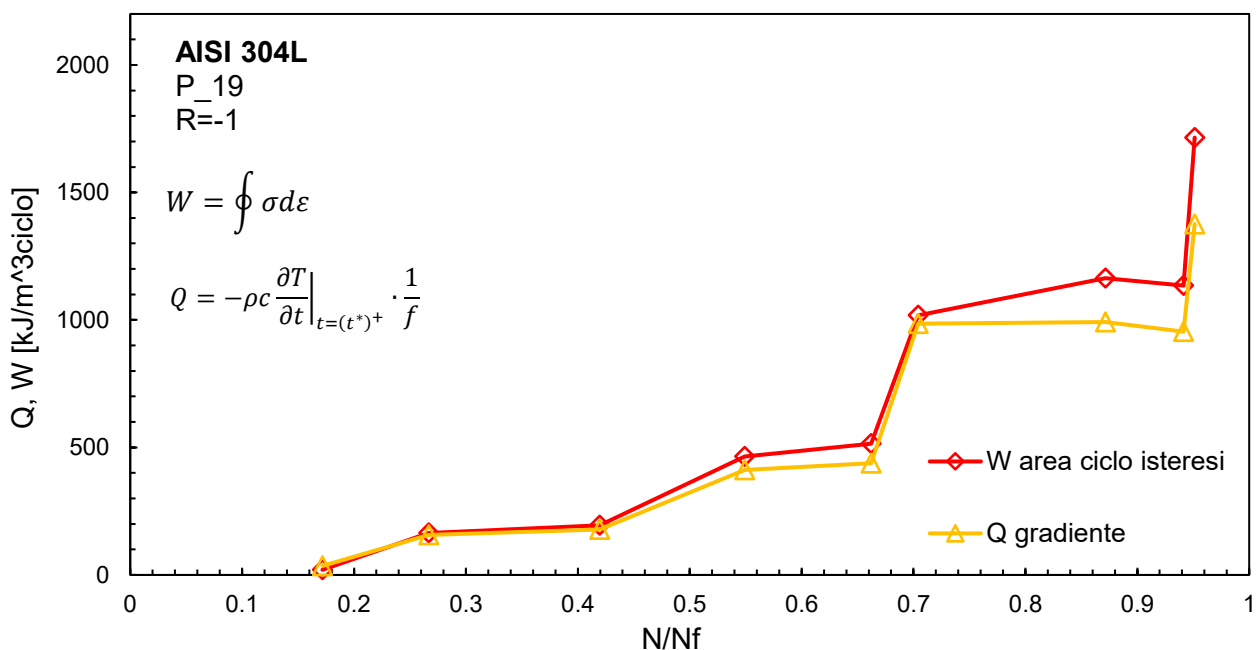


Figura 4.30 – Andamento di Q gradiente e W al variare del numero di cicli N/Nf per prova a gradini R=-1, P_19.

Ciò che si osserva è che Q e W assumono valori pressoché simili, e confermano che per R=-1 vale l'uguaglianza Q=W. Questa situazione è meno evidente per rapporti N/Nf =0.8 in su, in quanto il livello di carico in quel momento creava un inizio di buckling e quindi si andava a modificare il campo di tensione, non più rigorosamente monoassiale per quei casi. Di seguito in Figura 4.31 si riporta anche l'andamento di Q e W al variare dell'ampiezza di tensione applicata

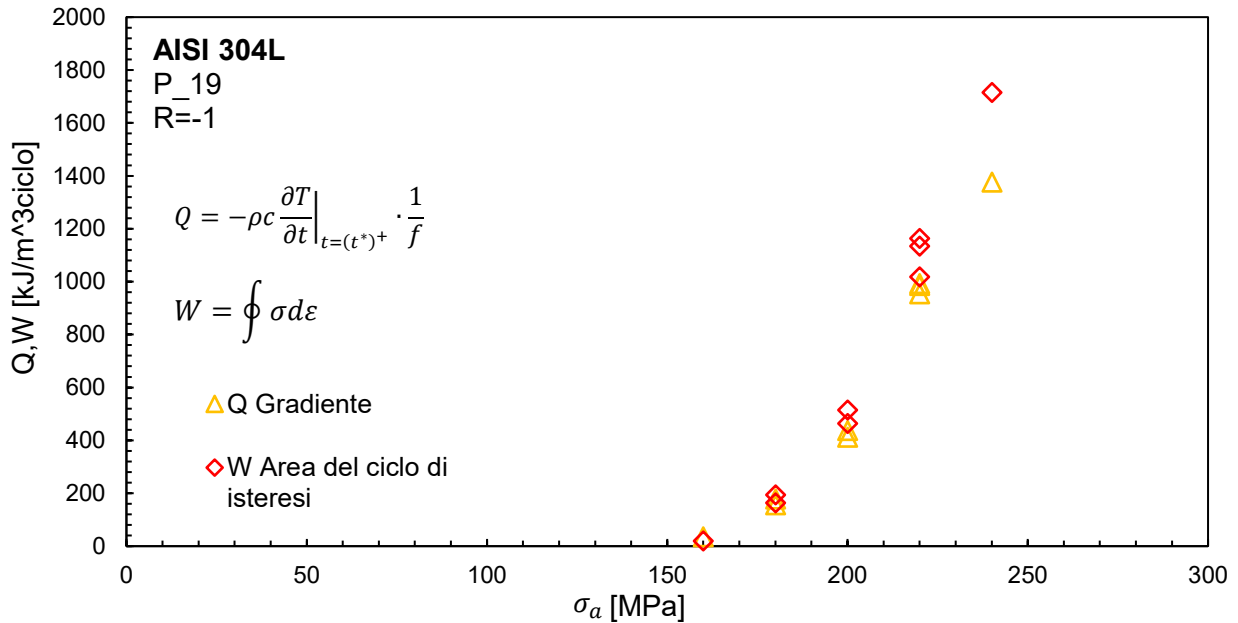


Figura 4.31 – Andamento di Q gradiente e W al variare dell'ampiezza di tensione per prova a gradini R=-1, P_19.

Ciò che si osserva in Figura 4.31 è che Q e W mostrano un forte aumento all'aumentare del livello di carico sopra i 180 MPa. Questo grafico, infatti, è stato impiegato in precedenti lavori [11,38] per fornire una stima del limite di fatica in modo rapido su C45 e AISI 304L; infatti, il dove si ha un brusco incremento di Q e di W, si ha il superamento del limite di fatica, stimabile come l'ascissa data dal punto di intersezione delle due rette dei due tratti del grafico di Figura 4.31. Questo aspetto però non è uno degli obiettivi della presente Tesi, pertanto per analisi in merito si rimanda agli articoli citati in precedenza. Si riporta ora un grafico rappresentante i cicli di isteresi per ogni livello di carico:

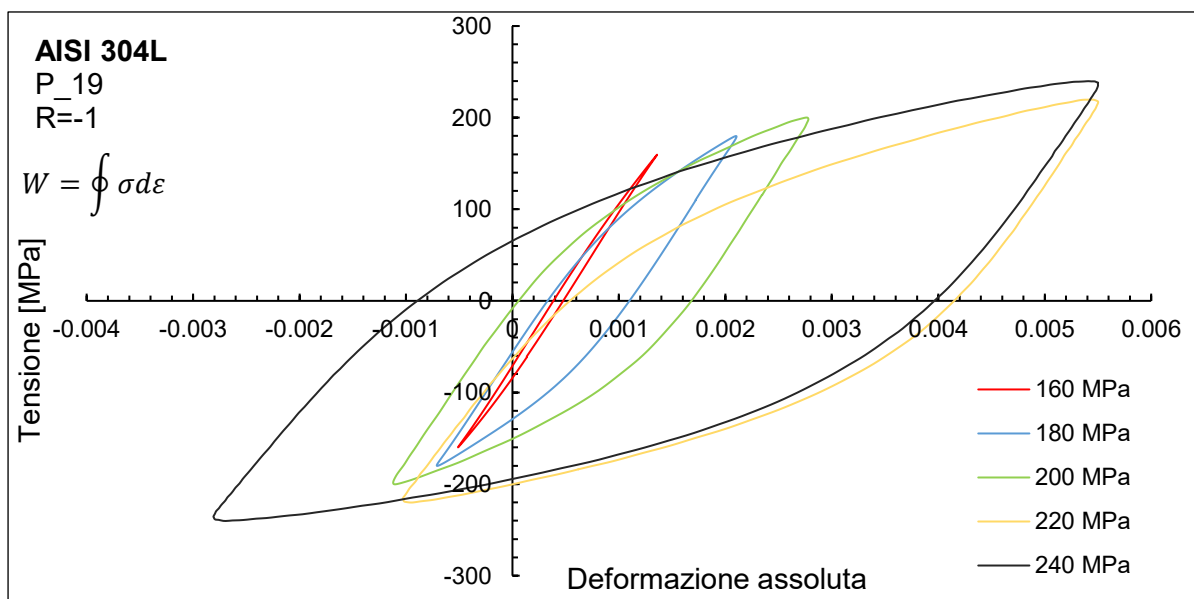


Figura 4.32 – Cicli di isteresi al variare dell'ampiezza di tensione, P_19.

Come si nota, ai bassi carichi i cicli di isteresi sono sottili, ad indicare che il materiale “mangia” poca energia e infatti i valori sono paragonabili a quelli ricavati per le prove a R=0.1. Non appena si sale la soglia dei 180 MPa le energie in gioco aumentano in modo considerevole, e ciò è ben visibile dall'aumento dell'area racchiusa dai cicli di isteresi (basti guardare quello ab 240 MPa). Si va ora a mostrare i risultati per una prova a gradini con R=0.1.

4.2.8 Prove di fatica a gradini per R=0.1 elaborati in termini di Q

Questo paragrafo è dedicato alle prove di fatica a gradini con un rapporto di ciclo R=0.1. Viene presentato un esempio numerico per il provino P_18. Di seguito in Tabella 4.10 si riportano i valori di ciascun gradino, in termini di cicli alla quale sono stati eseguiti i gradienti, i valori di Q e di W (area del ciclo di isteresi) e l'ampiezza di tensione applicata in quel momento:

N raffreddamento	Cicli	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	W [kJ/m ³ ciclo]	σ_a [MPa]
1	17107	20	44	19	160
2	29981	18	65	24	180
3	36603	18	57	22	180
4	45650	10	76	47	200
5	57525	10	69	46	220
6	63154	10	89	51	240
7	68847	10	87	47	240
8	75347	8	99	67	260
9	79809	8	95	65	260
10	83737	7	109	77	280
11	95235	7	99	69	280

Tabella 4.10 – Valori di Q, W e ampiezza di tensione per una prova a gradini a R=0.1, P_18.

La prova a gradini è stata eseguita aumentando i livelli di carico 20 MPa alla volta, cercando di mantenere a un certo livello di tensione il provino per non più di 10000-15000 cicli. Di seguito in Figura 4.33 si riporta l'andamento di Q e di W:

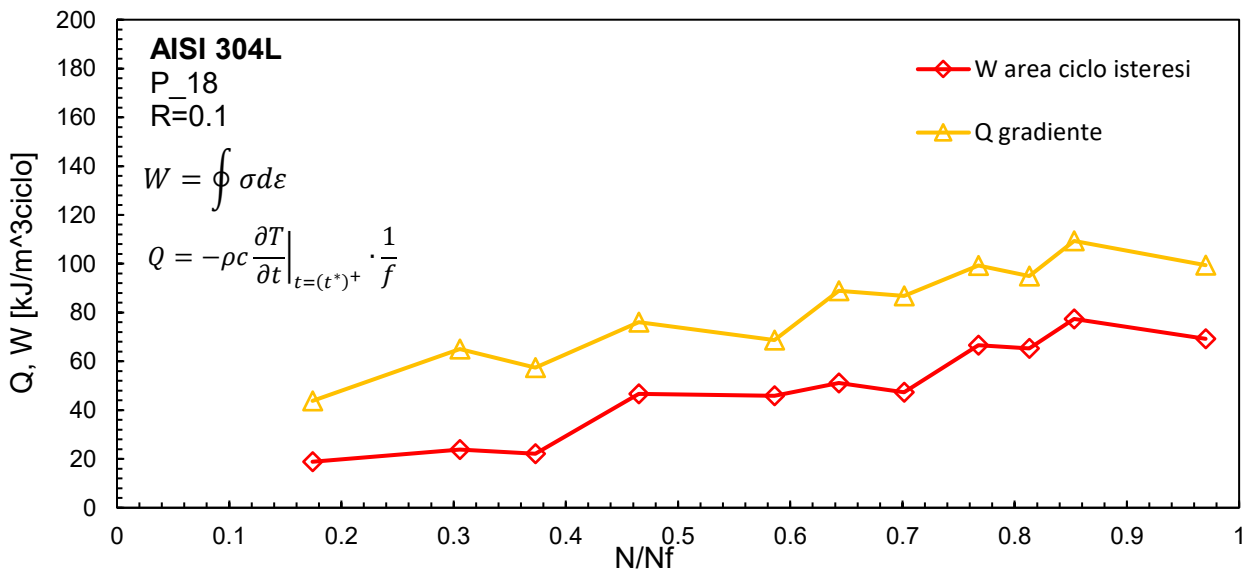


Figura 4.33 – Andamento di Q gradiente e W al variare del numero di cicli N/Nf per prova a gradini R=0.1, P_18.

Analizzando la figura precedente, si osserva come rispetto alle prove a $R=-1$ a gradini, l'incremento di Q e W incrementando il livello di carico, è molto meno marcato: in altre parole, i livelli di energia in gioco sono nettamente inferiori rispetto alle prove a gradini per $R=-1$. Questa situazione è visibile in maniera evidente dai cicli di isteresi, mostrati nella Figura 4.35.

In Figura 4.34 invece viene rappresentato l'andamento di Q e W al variare dell'ampiezza di tensione applicata:

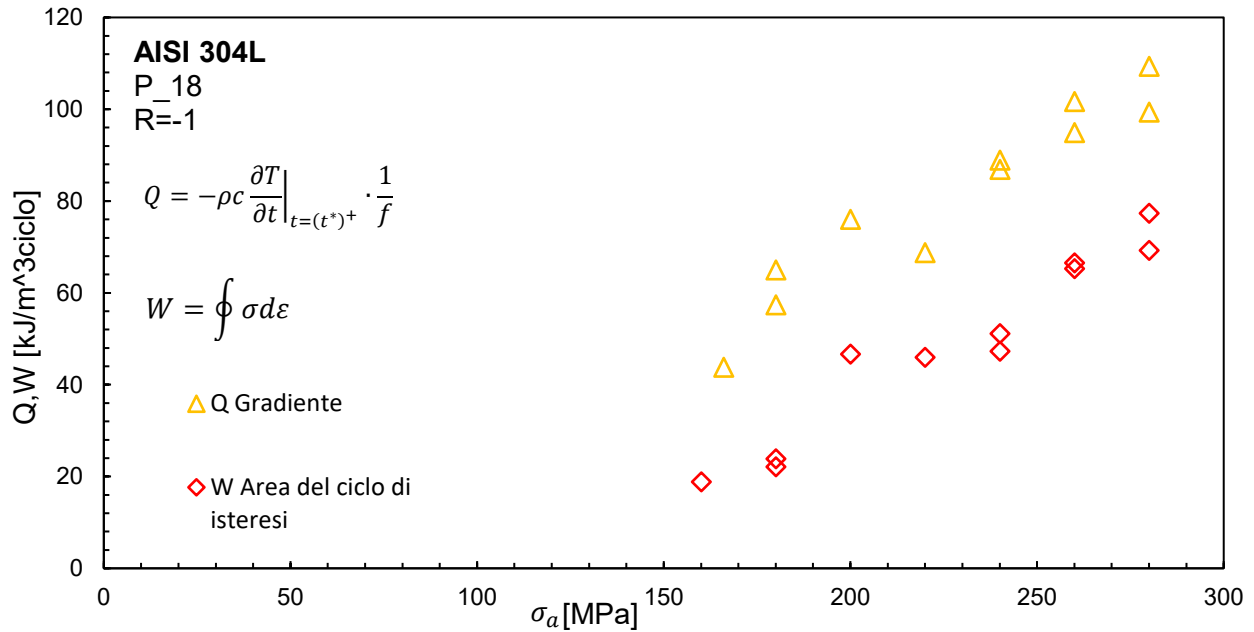


Figura 4.34 – Andamento di Q gradiente e W al variare dell'ampiezza di tensione per prova a gradini $R=0.1$, P_{18} .

Si osserva come Q sia ben maggiore di W , in contrasto come già sottolineato rispetto alle prove a $R=-1$. Infine, in Figura 4.35 si riporta il grafico che mostra l'evoluzione dei cicli di isteresi. Come detto in precedenza, nelle prove a $R=-1$ si vedono dei cicli di isteresi “panciuti” che mostrano come aumentando il carico, l'aumento di energia sia considerevolmente maggiore rispetto all'aumento di energia nelle prove a $R=0.1$ che si ha incrementando il carico di fatica.

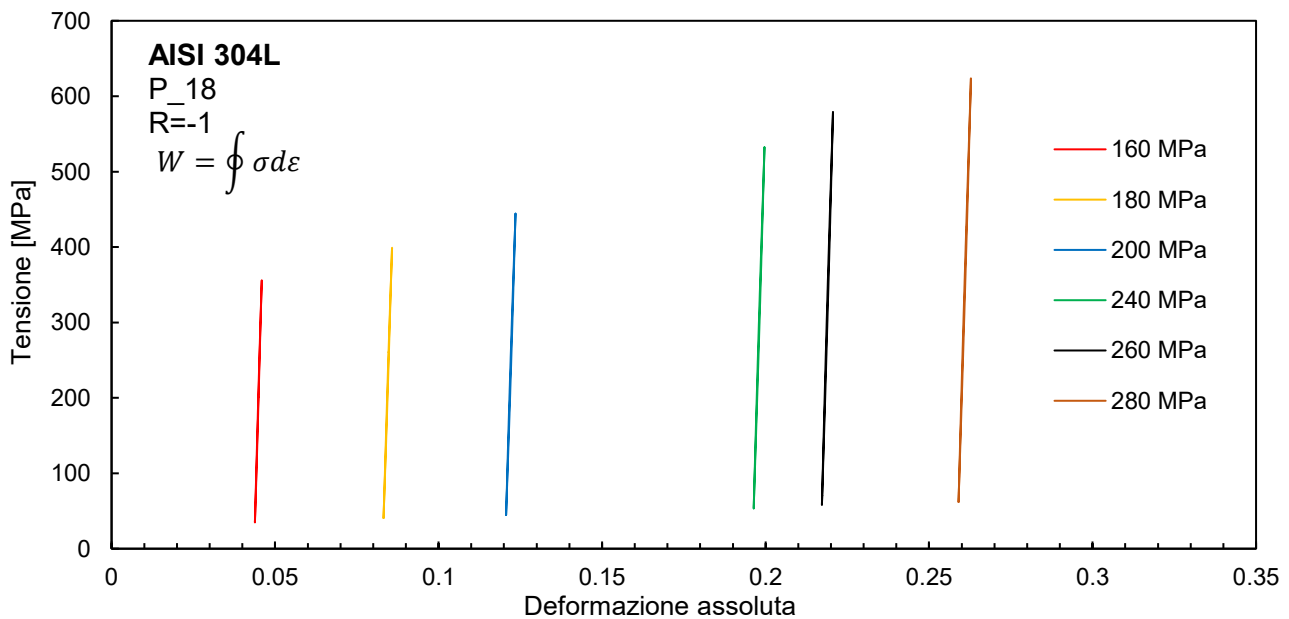


Figura 4.35 – Cicli di isteresi al variare dell'ampiezza di tensione, P_{18} .

Come si osserva dalla Figura 4.35, i cicli di isteresi non solo traslano verso deformazioni medie maggiori, all'aumentare del carico, bensì visivamente mostrano un comportamento quasi lineare elastico; basti pensare che al carico più elevato ovvero 280 MPa l'area del ciclo di isteresi si aggira attorno ai 70 kJ/(m³ciclo), che è un valore che si ritrova ai bassi carichi a R=-1. Ciò viene sottolineato per mettere in luce come a causa dell'incrudimento del materiale in presenza di una tensione media diversa da zero, i cicli di isteresi ad alto carico chiudano un'area di dimensioni esigue.

Analizzate le prove di fatica ad ampiezza costante e a gradini in termini del parametro Q ricavato da gradiente di temperatura, si vuole andare a valutare la possibilità di far collassare tutti i dati a diverso R in un'unica banda di dispersione mediante il parametro costante termoelastica

4.3 Confronto di risultati mediante \bar{Q} : sintesi energetica per diversi rapporti ciclo

4.3.1 Richiamo teorico dell'equazione Meneghetti-Ricotta

Lo scopo di questo paragrafo è quello di valutare la possibilità di condensare in un'unica banda di dispersione i risultati di Q ottenuti tramite gradiente di temperatura, per diversi rapporti ciclo. Come dimostrato nel Capitolo 1, al Paragrafo 1.6.7, l'idea che sta alla base del modello proposto da Meneghetti e Ricotta [8] è quello per cui la resistenza a fatica di un materiale sollecitato da carichi variabili nel tempo, dipenda da due fattori:

3. **Variabile di scambio termodinamica:** corrispondente all'ampiezza della forza applicata, identificata dal parametro Q;
4. **Variabile di stato:** corrispondente al livello di dell'ampiezza di forza, identificata nella *temperatura termoelastica*.

Riprendendo brevemente quanto detto nel Paragrafo 1.6.7, la temperatura termoelastica viene definita nell'ipotesi di processo adiabatico, come quella che viene raggiunta dal materiale quando esso è caricato alla tensione massima del ciclo di fatica. La sua definizione matematica è espressa dalla seguente formula:

$$\frac{T_{the}}{T_0} = -\left(\frac{\alpha}{\rho \cdot c}\right) \cdot \sigma_{max} = -K_m \cdot \sigma_{max} \quad (4.2)$$

in cui T_0 è la temperatura del materiale all'inizio del processo di carico e α è il coefficiente di dilatazione termica del materiale, ρ la densità e c è il calore specifico. Combinando le due variabili sopra citate, si perviene a un'equazione che si propone di razionalizzare l'effetto della tensione media in una prova di fatica assiale

$$\left(Q \cdot \left(\frac{|T_{the}|}{T_0}\right)^h\right)^m \cdot N_f = \bar{Q}^m \cdot N_f = cost \quad (4.3)$$

in cui h, m sono due parametri costanti del materiale ricavate tramite best-fit dei risultati sperimentali. Per valutare la costante termoelastica sono state seguite due strade: la prima mediante l'uso di rampe eseguite in controllo di forza, mentre la seconda facendo riferimento ai dati ricavati mediante

termocamera dalle prove di fatica; questo confronto è stato fatto alla luce dei risultati ottenuti dalle metallografie e dalle prove di fatica, in quanto si è visto soprattutto a R=0.1 che il materiale si trasforma e incrudisce, pertanto è nominalmente diverso dal materiale base di partenza. Si va ora ad analizzare la seconda strada, quella in cui k_m viene ricavata dalle prove di fatica.

4.3.2 Costante termoelastica K_m : calcolo dai dati delle prove di fatica

Questo paragrafo è dedicato al calcolo della costante termoelastica tramite i dati ricavati dalle prove di fatica a R=-1 e R=0.1, monitorate tramite termocamera. In particolare, l'idea che viene ad essere utilizzata è quella per cui tramite la termocamera si acquisisce la temperatura, da cui con la Trasformata di Fourier implementata in MATLAB (vedi Appendice A.4) si ricavano la prima e la seconda armonica del segnale di temperatura; una volta nota la prima armonica, essa coincide con la temperatura termoelastica e si può dunque calcolare dall'Equazione 4.2 la costante termoelastica. Per il calcolo di K_m sono stati utilizzati tutti i dati possibili ricavati tramite termocamera, per un totale di 68 misurazioni. Ciò che si è osservato è che sia per R=-1, che per R=0.1 i dati si distribuiscono in modo da generare la stessa costante termoelastica.

Per ricavarla si è seguita la seguente procedura:

1. Si calcola per ogni acquisizione di temperatura stabilizzata, tramite la FFT, il range della prima armonica del segnale di temperatura;
2. Si calcola poi il valore della temperatura T_0 , ovvero in questo caso la temperatura media sulla superficie del provino: rigorosamente non sarebbe la temperatura media, ma trasformata in Kelvin una variazione anche di qualche grado centigrado risulta ininfluente;
3. Nota l'ampiezza di tensione, se ne calcola il range e lo si trasforma in Pa;
4. Si costruisce un grafico $\frac{\Delta T_1}{T_0}$ vs $\Delta\sigma$; si esegue una regressione lineare;
5. La pendenza della retta di regressione rappresenta la costante termoelastica K_m .

In Figura 4.36 si rappresentano i dati delle prove e rielaborate secondo la procedura precedente:

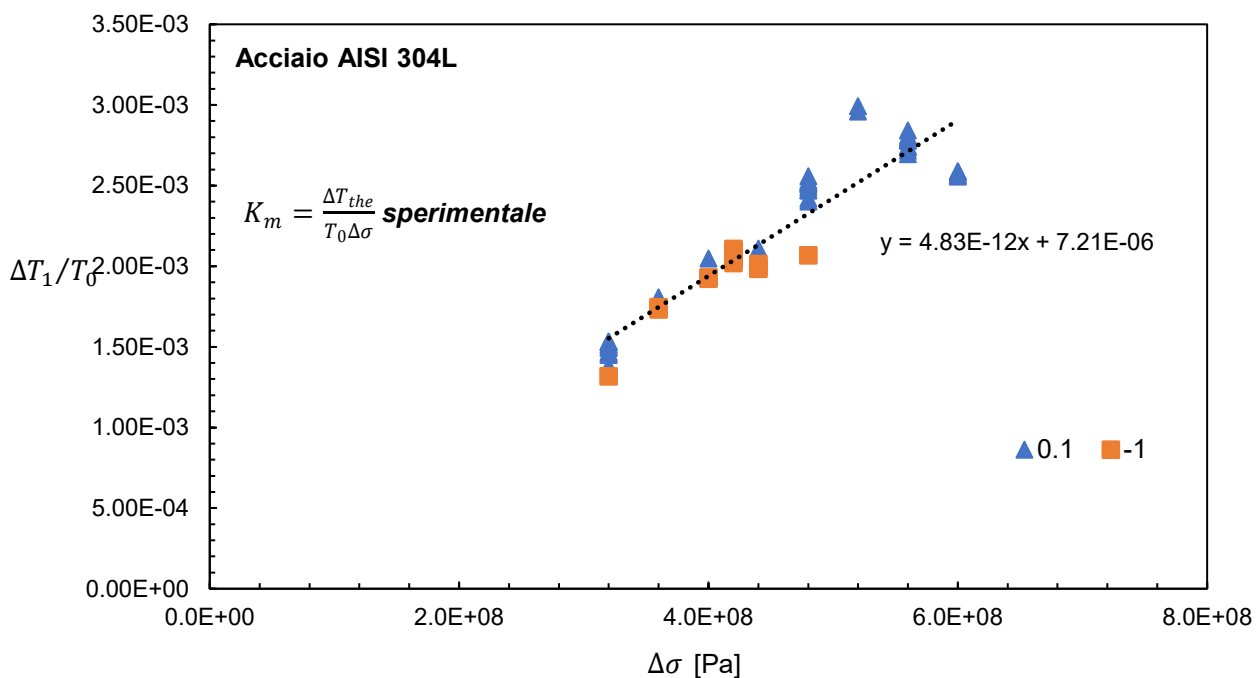


Figura 4.36 – Calcolo costante termoelastica dai dati delle prove di fatica.

Ciò che si osserva in prima analisi è che la pendenza della retta fornisce un valore di $K_m = 4.83 \cdot 10^{-12} Pa^{-1}$. Tale valore è notevolmente diverso da quello che si va a ricavare utilizzando l'Equazione 4.2 ovvero usando le costanti teoriche del materiale: in quest'ultimo caso, infatti, si ottiene $K_m = 3.97 \cdot 10^{-12} Pa^{-1}$. La motivazione della differenza tra i due valori è da ritenersi legata alle trasformazioni che subisce il materiale durante la prova, il quale a causa della formazione di martensite, cambia le sue proprietà e dunque modifica la costante termoelastica.

In linea di principio l'uso di una delle due costanti termoelastiche non va ad alterare il risultato complessivo, nel senso che si è capaci, comunque, di condensare i risultati per diversi R in un'unica banda, in quanto cambiando K_m si vanno solamente a traslare tutti i valori in alto o in basso nella curva.

Si va ad analizzare ora il calcolo di K_m utilizzando rampe in controllo di forza.

4.3.3 Costante termoelastica K_m : calcolo con rampe in controllo in forza

In questo paragrafo si va a descrivere la procedura impiegata per l'esecuzione di una rampa in controllo di forza e l'elaborazione dei dati per ricavare la costante termoelastica K_m .

Anzitutto si va a descrivere la procedura usata per eseguire le rampe tramite la macchina Schenck:

1. Si avvia il software RT3;
2. Si chiudono eventuali finestre di *FATICA* e *GENERATORE DI FUNZIONI*;
3. Si inserisce il provino e si passa in *CONTROLLO DI FORZA* (la procedura dettagliata di questi passaggi è descritta nel Capitolo 2);
4. Si seguono i seguenti percorsi:

GENERATORE → RAMPE

TEST → ACQUISIZIONE

5. Nella schermata *ACQUISIZIONE* si va ad impostare una frequenza di campionamento pari a 50 Hz e una durata di 3600 s in modo che non si arresti in autonomia ma sia l'operatore ad arrestare la rampa;
6. Si procede al salvataggio dei dati, cliccando su *FILE DATI* e si definisce una nuova cartella nominativa della rampa: ad ogni rampa, va creata una cartella nuova;
7. Si vanno a spuntare le due icone al di sotto di *FILE DATI*, in modo tale che venga avviata la procedura di acquisizione automatica;
8. Si plotta sul grafico in ascissa lo spostamento e in ordinata la forza;
9. Azzero spostamento ed eventualmente l'estensometro se è collegato;
10. Nella schermata *GENERATORE RAMPE* si imposta su *SET POINT 1* corretto in [kN] che si vuole raggiungere (ricordando di rimanere in campo elastico);
11. Si imposta su *VELOCITA' 1* il valore desiderato (per soddisfare le condizioni di adiabaticità si è proceduto ad inserire valori crescenti fino a stabilizzare la costante termoelastica);
12. Si clicca sull'icona vicino al pulsante *AVVIA RAMPA*: in questo modo la prova è ufficialmente pronta per partire;
13. Si fa partire un'acquisizione di temperatura mediante il software Agilent, la cui procedura è stata in precedenza descritta al Capitolo 2, con una frequenza di campionamento massima a 22 Hz ovvero un tempo di 1 ms;

14. Si imposta il valore del set point in compressione sul *PANNELLO DI CONTROLLO*: in questo modo si ha un range di tensione e non una tensione massima, poiché così si ha a disposizione un salto termico di maggiore entità;
15. La temperatura sale di una certa quantità a causa della compressione del materiale: si aspetta qualche secondo che essa si stabilizzi;
16. Una volta che la temperatura si è stabilizzata si clicca su *AVVIA RAMPA*;
17. Parte la rampa in controllo di forza: una volta raggiunto il valore di forza impostato si clicca su *ARRESTA RAMPA*.

Si deve osservare però che a causa della presenza del PID e dunque di una certa quantità di guadagno proporzionale, la macchina rallenterà prima di raggiungere il set point impostato, non seguendo più da un certo punto in poi il valore di velocità inserito: per ovviare a questo problema o si inserisce un set point maggiore, prestando attenzione ad arrestare la prova a carichi che garantiscano il mantenimento del materiale in campo elastico; oppure si lascia il valore di set point preimpostato tenendo conto che la macchina non lo raggiungerà in condizioni adiabatiche, e dunque in fase di elaborazione si dovrà tener conto della effettiva tensione raggiunta.

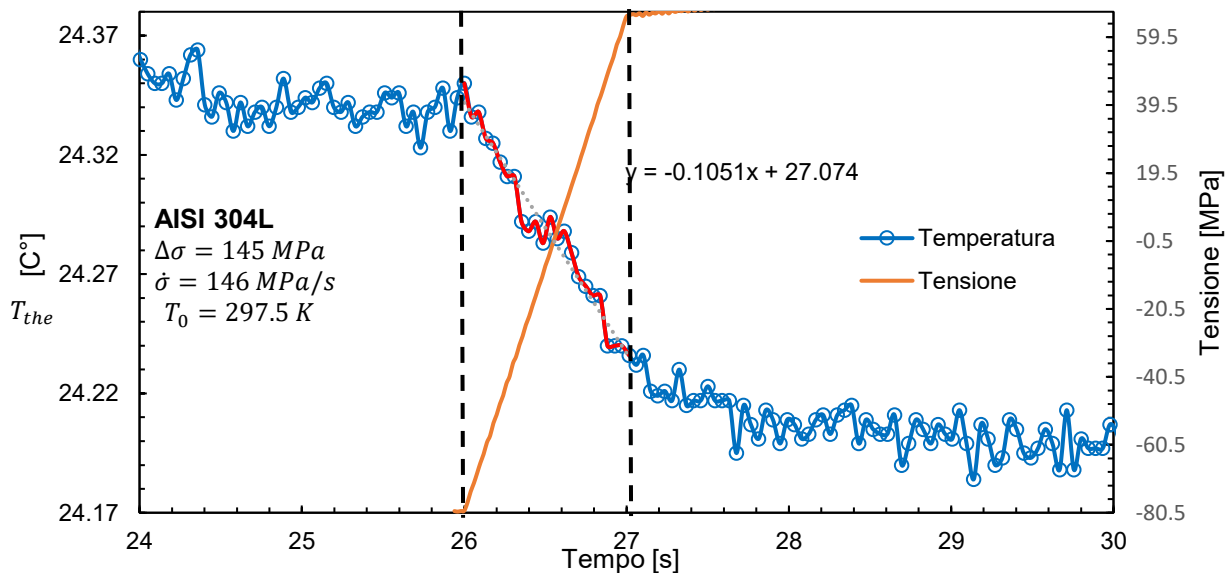


Figura 4.38 – Calcolo costante termoelastica da rampe in controllo di forza.

Una volta eseguite quattro o cinque rampe di carico controllate in forza, si vanno ad analizzare i dati tramite un foglio di lavoro Excel, come si vede in Figura 4.38: sullo stesso grafico si plotta la tensione e la temperatura.

Ciò che si va a fare consiste nell'identificare il tratto lineare di raffreddamento della temperatura, individuando gli istanti temporali corrispondenti ad inizio e fine raffreddamento. Si costruisce poi una retta di regressione che va dall'istante iniziale a quello finale e si determinano i valori corrispettivi di temperatura; la temperatura iniziale è il valore di T_0 , mentre ΔT_{the} si calcola come differenza tra T_0 e T_{Finale} . Dopodiché, noto il salto termoelastico, il range di tensione corrispondente al tratto lineare di raffreddamento e la temperatura T_0 , si inverte l'Equazione 4.2 e si ricava K_m .

In Figura 4.39 si mostra il grafico corrispondente al primo set di rampe effettuate:

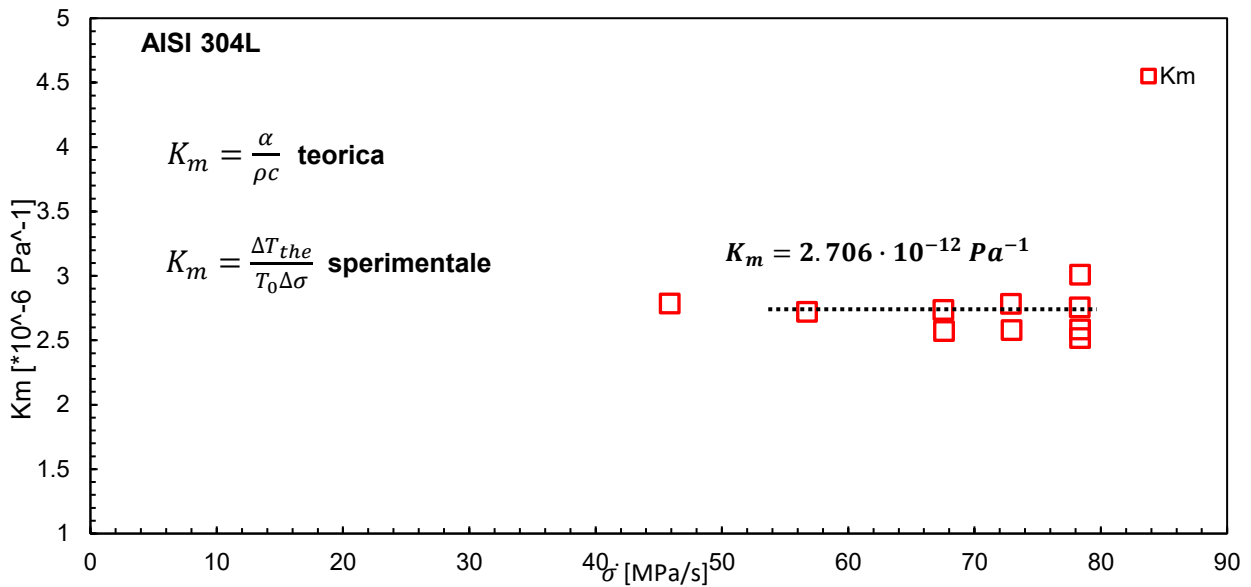


Figura 4.39 – Calcolo costante termoelastica da rampe in controllo di forza.

In Figura 4.39 viene mostrato il primo calcolo della costante termoelastica effettuato tra ± 100 MPa, avendo verificato tramite un estensometro che si rimanga nel tratto elastico, aumentando progressivamente il carico. Il risultato di K_m è estremamente diverso sia rispetto a quello teorico sia rispetto a quello sperimentale ricavato dalle prove di fatica.

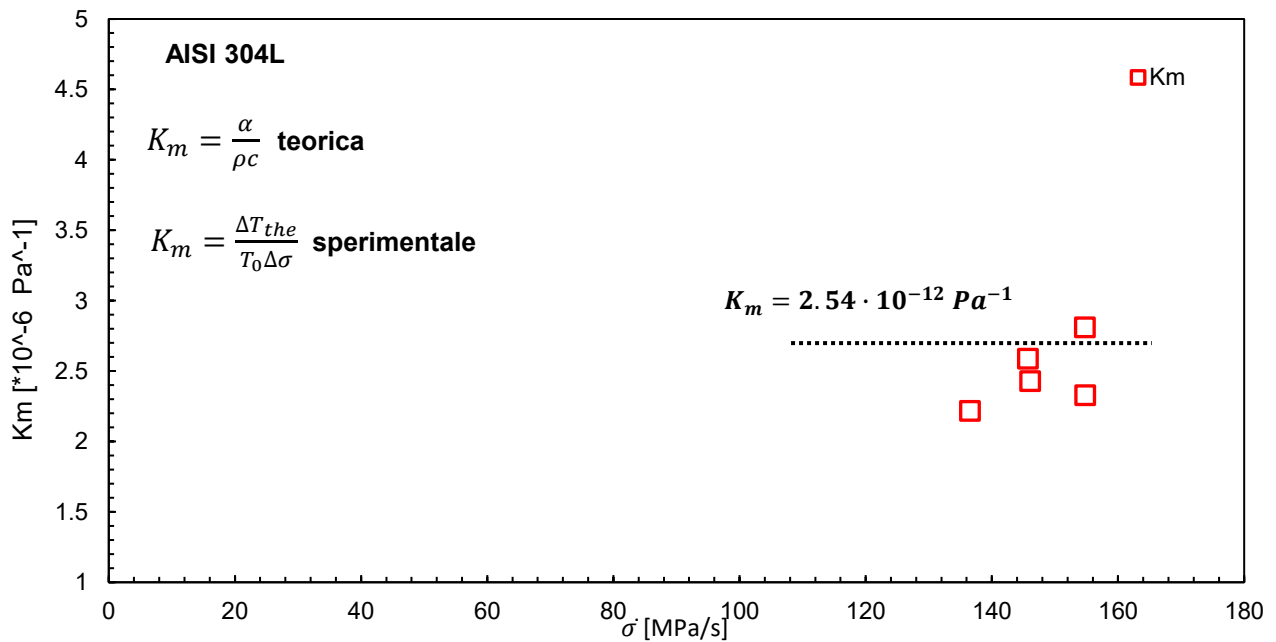


Figura 4.40 – Calcolo costante termoelastica da rampe in controllo di forza.

Per approfondire tale aspetto sono state rieseguite altre due rampe, dapprima tra ± 80 MPa e poi tra ± 50 MPa. Il primo risultato è riassunto in Figura 4.40, laddove nuovamente si ricava una costante termoelastica minore di quella precedente e minore di quella teorica. Eseguendo una prova di trazione statica sulle piastre a disposizione, ci si è accorti che veniva mantenuto il tratto elastico lineare solo fino a circa 50 MPa. Alla luce di ciò è stata eseguita una terza prova a rampa in controllo di forza, questa volta rimanendo tra -50 MPa e +50 MPa. I risultati sono evidenziati in Figura 4.41

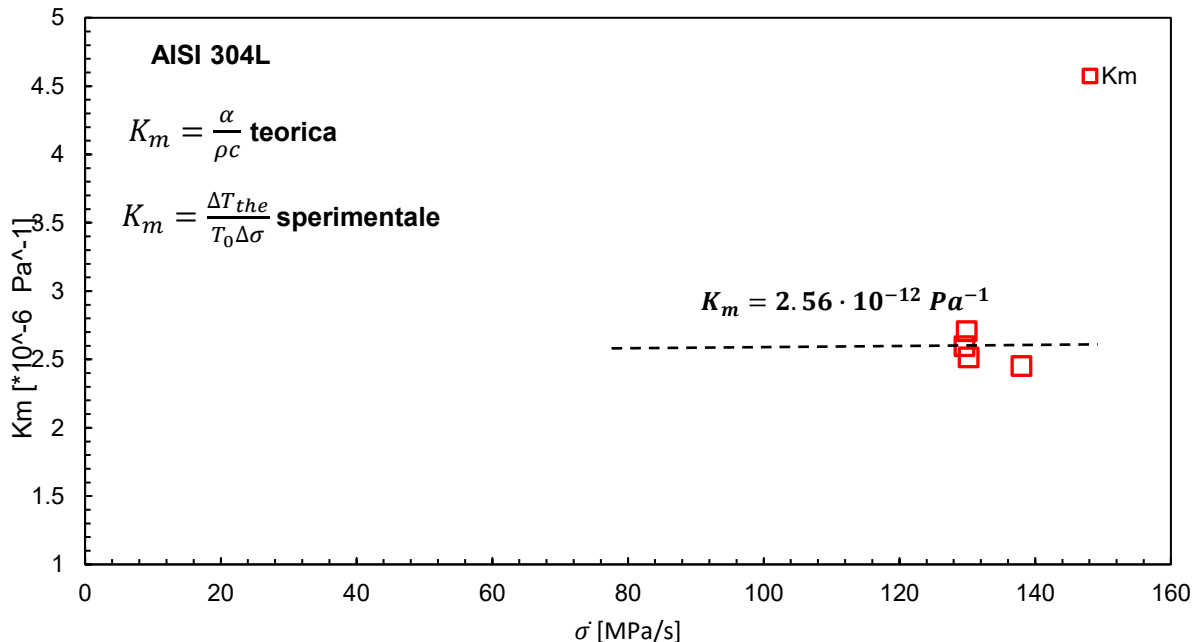


Figura 4.41 – Calcolo costante termoelastica da rampe in controllo di forza.

Dall’analisi di Figura 4.41 si evince che si va a ritrovare anche per rampe di ± 50 MPa lo stesso valore di costante termoelastica. Se ne conclude pertanto che sperimentalmente la costante termoelastica differisce da quella teorica calcolata mediante le costanti del materiale. Questo aspetto rimane un punto aperto che dovrà essere motivo di indagine successive sulle proprietà del materiale, nonostante sia difficile quantificare in modo esatto un parametro come il calore specifico avendo a disposizione una piastra di spessore così ridotto (4 mm).

In realtà, per condensare in un’unica banda di dispersione i dati, l’uso della costante termoelastica, se uguale come in questo caso per tutti i dati, fa semplicemente traslare verso il basso o l’alto i punti sperimentali, e non ha influenza sulla dispersione in Q o in N della curva \bar{Q} .

In questa trattazione si prende come costante termoelastica quella “vera”, cioè ricavata sperimentalmente tramite le rampe in controllo di forza e non mediante dati a fatica, in modo da avere coerenza con [8].

4.3.4 Costante h: calcolo da dati di prove a fatica

Per calcolare la costante h, necessaria per la costruzione della curva in \bar{Q} , si è seguito il seguente procedimento:

1. I dati delle prove di fatica sono stati suddivisi in intervalli di ampiezza fissata, in modo da distinguere i casi di low, medium e high life;
2. Per ciascun gruppo, sono stati diagrammati i punti in un grafico Q vs $\frac{T_{the}}{T_0}$;
3. Una volta impostata la scala doppio logaritmica è stata tracciata la regressione in termini di potenza, per ciascun gruppo;

4. L'esponente delle potenze di regressione fornisce per ciascun gruppo l'esponente h richiesto.

I risultati sono espressi in Figura 4.42.

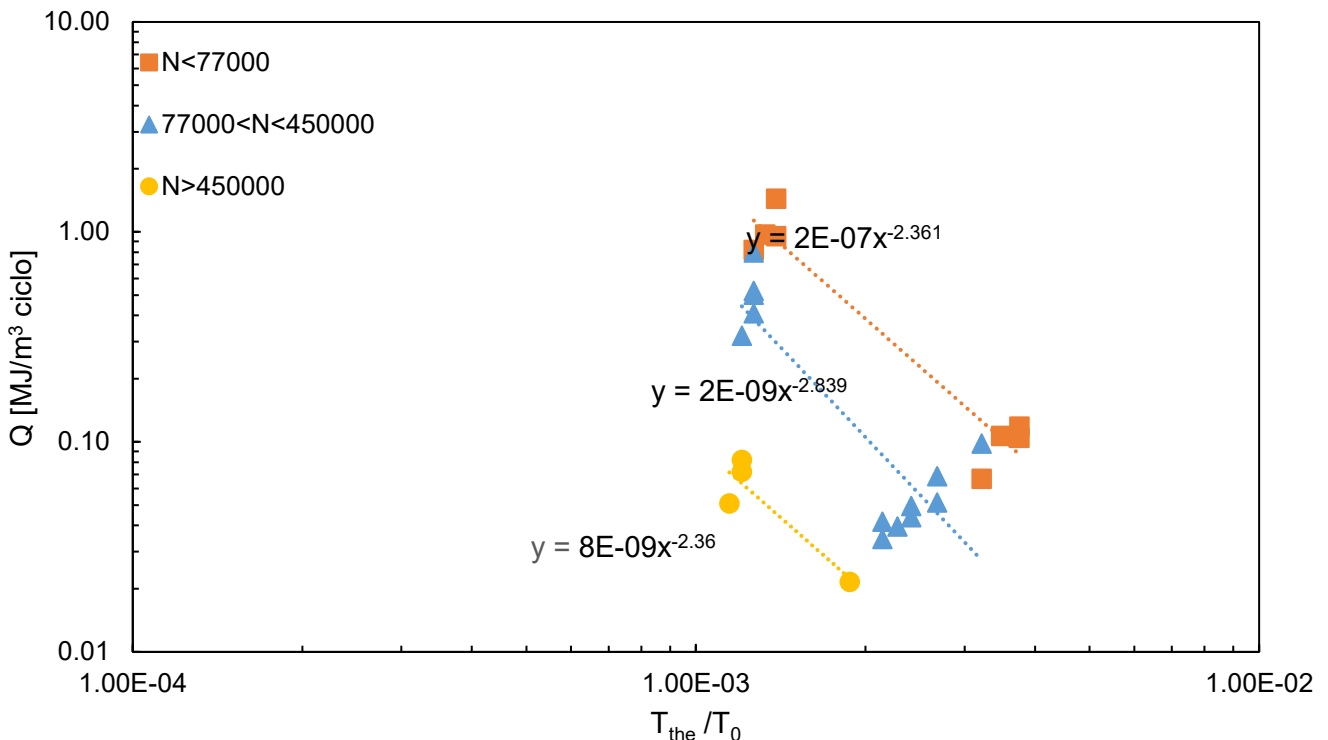


Figura 4.42 – Esponente h per il calcolo della curva di sintesi.

Ciò che si osserva è che l'esponente h ha un andamento simile per tutti e tre i casi low, medium e high life. Se si utilizza il valor medio di tali esponenti si ottiene un valore pari a $h=2.538$. Se si confronta tale dato con quello dell'articolo [8], si osserva come i due valori di h siano nettamente diversi. Infatti, nell'articolo si ritrova un valore di h pari a 4.03. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che come detto in precedenza, per effetto dell'incrudimento il comportamento del materiale è estremamente diverso da quello trafilato a freddo.

4.3.5 Curva \bar{Q} : sintesi per diversi R

In questo paragrafo viene presentata la curva di sintesi ottenuta tramite l'uso delle piastre lisce di spessore 4 mm laminate a caldo. In particolare, è stata usata la costante termoelastica ricavata da rampe in controllo di forza e non dai dati delle prove a fatica, per mantenere coerenza con articoli precedenti [8].

Le curva di sintesi in \bar{Q} usando una costante termoelastica pari a $K_m = 2.706 \cdot 10^{-12} Pa^{-1}$ e un esponente h pari a 2.538, viene rappresentata in Figura 4.43:

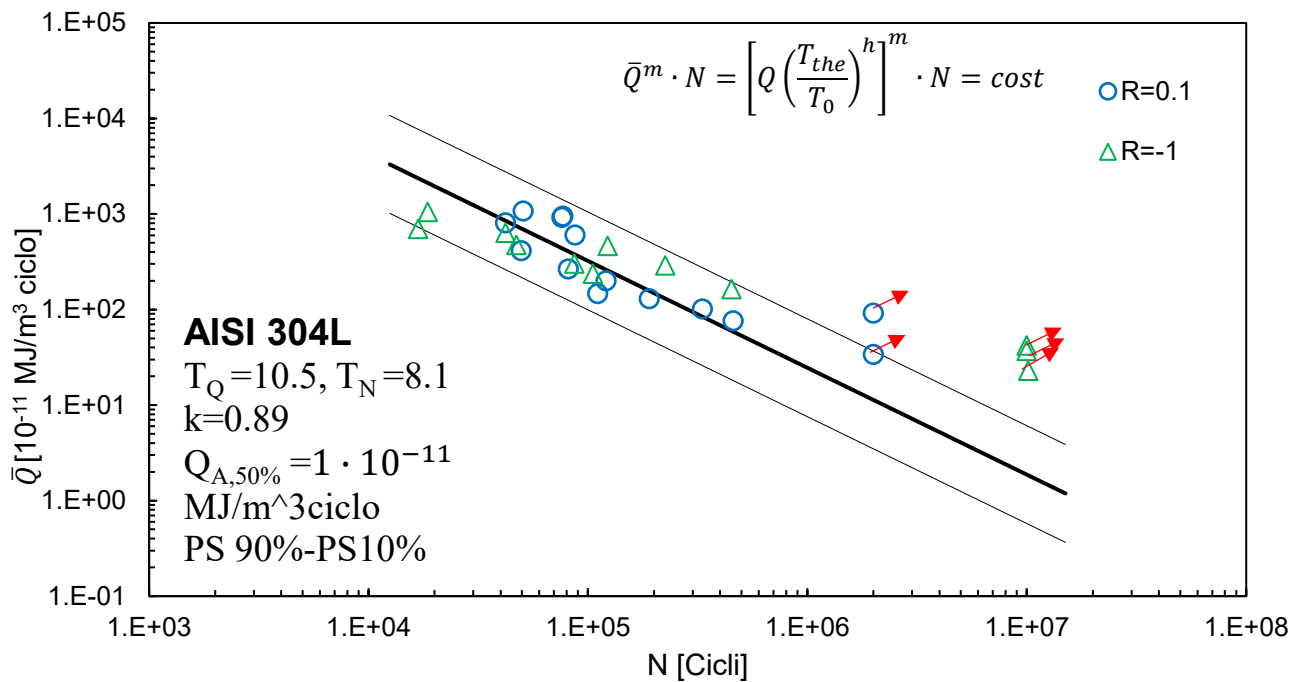


Figura 4.42 – Curva di sintesi al variare del rapporto di ciclo R.

Dall'analisi di Figura 4.42, si osserva come sia possibile condensare i risultati all'interno di un'unica banda di dispersione mediante l'uso dell'equazione determinata in [8]. In particolar modo, si ottiene una dispersione in Q di 10.5 e una in N pari a 8.1, valori del tutto confrontabili con quelli di [8]. Si osserva pertanto la bontà del modello per sintetizzare i risultati in energia al variare del rapporto di ciclo R.

Si è inoltre proceduto ad analizzare tutti i dati insieme, ovvero quelli delle piastre laminate a caldo e trafilate a freddo per valutare la possibilità di condensare i risultati insieme.

Sia utilizzando un esponente h pari a 4.03, sia usando h pari a 2.538, non si è riusciti a condensare in un'unica banda di dispersione i risultati, in quanto essi sono materiali diversi e non hanno né le stesse costanti termoelastiche né lo stesso valore di h.

Solo nel caso di andare ad impiegare una costante termoelastica diversa per le barre trafilate a freddo pari a $K_m = 3.97 \cdot 10^{-12} Pa^{-1}$ e quella da dati delle prove di fatica pari a $K_m = 4.83 \cdot 10^{-12} Pa^{-1}$ per le piastre laminate a caldo, si ottiene una curva dai valori di dispersione alti, ma tuttavia inferiori ai precedenti. Per ricavare l'esponente h è stata impiegata la stessa procedura descritta nel precedente paragrafo, utilizzando tutti i dati delle prove di fatica. Il risultato in termini di h è stato pari a 2.41, non lontano dal materiale piastre laminate a caldo. Il risultato è mostrato in Figura 4.43

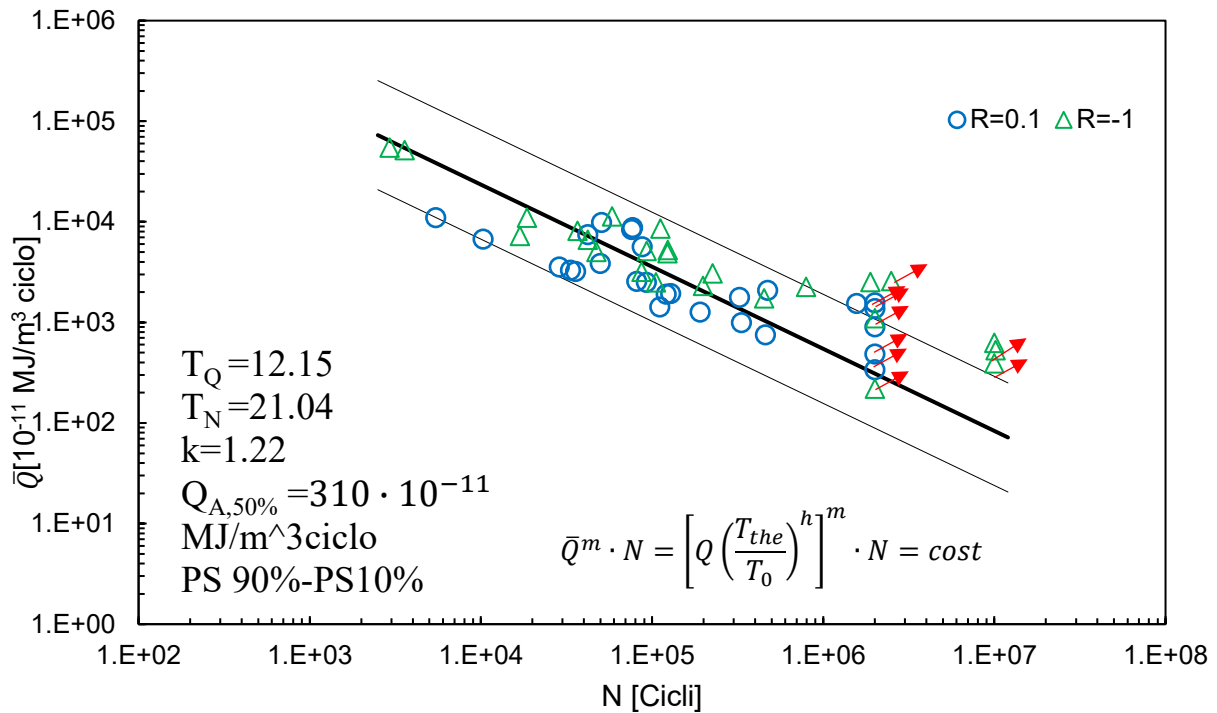


Figura 4.43 – Curva di sintesi al variare del rapporto di ciclo R per piastre laminate a caldo e barre trafilate a freddo.

Dall'analisi di Figura 4.43, si osserva come i risultati siano condensabili in una banda di dispersione solo impiegando due costanti termoelastiche diverse, cioè trattando i materiali come fossero due distinti. Se ne conclude pertanto che l'operazione di condensazione effettuata in Figura 4.43 risulti essere troppo forzata, in quanto anche la costante a rigore è diversa tra i due casi e non può essere assunta uguale.

4.4 Conclusioni

In questo Capitolo, si è proceduto all'analisi a fatica secondo il metodo energetico basato sulla dissipazione di energia. Sono state costruite le curve in Q vs Nf, in modo tale da correlare la vita a fatica con il calore dissipato durante la prova, sia per rapporti ciclo R=-1, sia per rapporti ciclo R=0.1. Sono state dapprima analizzati i casi a R=-1 e poi quelli a R=0.1, ottenendo delle curve con una banda di dispersione in Q rispettivamente pari a 3.82 e 3.26 e una dispersione in N pari a 14.2 e 5.96. Nel caso di R=0.1, si è ottenuta una dispersione in vita notevolmente ridotta, paragonabile a quella ottenuta dalle curve di Woehler.

Sono stati poi analizzati insieme i dati dalle piastre laminate a caldo e delle barre trafilate a freddo: sia per R=-1 che per R=0.1 si è riusciti a condensare in un'unica banda di dispersione tutti i risultati dalle prove di fatica, ottenendo una dispersione in Q per R=-1 pari a 3.59 e per R=0.1 pari a 3.22, mentre in N si è ottenuto rispettivamente 12.8 e 15.5. Questi dati mostrano come Q abbia la capacità di poter sintetizzare il comportamento di due materiali che secondo le curve di Woehler appartengono a due famiglie diverse, in una stessa classe di appartenenza in termini energetici. Successivamente sono stati elaborati i risultati a R=-1 e R=0.1 delle prove a gradino in termini di Q ottenuto sempre con la tecnica del gradiente di temperatura.

Infine, è stata valutata la possibilità di condensare in un'unica banda di dispersione i dati derivanti da prove di fatica a R diversi, dapprima sulle piastre laminate a caldo e poi sulle barre trafilate a freddo: è stato possibile sintetizzare i risultati in un'unica curva per le piastre laminate a caldo, mentre analizzando i dati derivanti dalle piastre e dalle barre insieme, non si è riusciti ad ottenere una banda

in Q e in N accettabile. Ciò è legato al fatto che essi sono due materiali diversi e presentano costanti termoelastiche diverse, così come l'esponente h è diverso da materiale a materiale.

Capitolo 5

RESISTENZA A FATICA TRAMITE APPROCCIO ENERGETICO: CONFRONTO MODELLO Q-GRADIENTE E MODELLO Q-SECONDA ARMONICA

5.1 Introduzione

L'obiettivo di questo Capitolo è quello di validare sperimentalmente il modello basato sulla seconda armonica della temperatura, per stimare l'energia dissipata a fatica, affrontato dal punto di vista teorico nel Capitolo 1. Per validare il modello, si andrà a prendere come riferimento l'energia dissipata Q calcolata con la tecnica del gradiente di raffreddamento, in quanto è stato negli anni dimostrato, e anche nel Capitolo 4 di questa Tesi, che esso rappresenta una misura molto solida.

Si andranno quindi a definire dapprima la procedura di analisi dei filmati (per l'analisi tramite MATLAB si rimanda all'Appendice 2), dopodiché verranno presentati i risultati principali per $R=-1$ e $R=0.1$, confrontando l'energia dissipata nei due metodi.

Le prove sono state suddivise in prove ad ampiezza costante e prove a gradini, in quanto in letteratura questo ultimo approccio è affrontato da diverse scuole di pensiero, italiane (scuola barese) ed estere (scuola giapponese).

Dapprima si introdurrà all'analisi dei filmati mediante termocamera, dopodiché si presenteranno i risultati più significativi per le prove a $R=-1$ e $R=0.1$, evidenziando analogie e differenze tra l'approccio seconda armonica per i due diversi rapporti ciclo.

5.2 Analisi di un filmato termografico

Questo paragrafo è dedicato ad esporre i passaggi che vengono seguiti per analizzare un filmato termografico con il metodo della Seconda Armonica. Il procedimento da seguire per acquisire un filmato e settare la termocamera è stato già mostrato nel Capitolo 2.

5.2.1 Compensazione del movimento ed esportazione di un filmato termografico in formato .asc

Nel presente paragrafo si descrive la procedura utilizzata per esportare un filmato termografico da analizzare successivamente tramite l'uso del software MATLAB. In particolare, nonostante siano stati acquisiti 8192 frames per quanto concerne i filmati a temperatura stabilizzata, sono state eseguite delle prove per verificare se fosse necessario adoperare 8192 frames oppure la metà, 4096. Questo confronto è stato fatto poiché l'importazione della matrice completa all'interno di MATLAB, con 8192 frames richiedeva un tempo estremamente lungo, nell'ordine delle sette ore per ogni acquisizione; per ridurre i tempi di analisi, pertanto, sono stati fatti dei confronti sia a $R=-1$ che a $R=0.1$, sia a basso carico che ad alto carico, e ne è risultato che la differenza tra 8192 e 4096 frames era dell'ordine del 5 % in termini di seconda armonica. Viceversa, si è riscontrato che la prima armonica del segnale dipende in modo significativo dal numero di frames considerati, ed in particolare sono stati registrati differenze anche del 20%. Questo aspetto non sempre si è riscontrato vero, in alcuni casi si sono ottenuti errori minori del 3%.

Alla luce di tali osservazioni si è deciso di utilizzare il codice MATLAB per ricavare il valore di seconda armonica, mentre per identificare il valore della prima armonica della temperatura si è andati ad utilizzare ancora il codice MATLAB ma confrontandolo con il software THESA, a disposizione insieme alla termocamera, in modo da sapere se il valore di prima armonica era corretto.

Dopo aver fatto queste osservazioni si passa ora alla procedura di *apertura e salvataggio*:

1. Si apre il software Altair, cliccando sull'icona cerchiata in Figura 5.1; in questo modo si va ad aprire un filmato termografico;

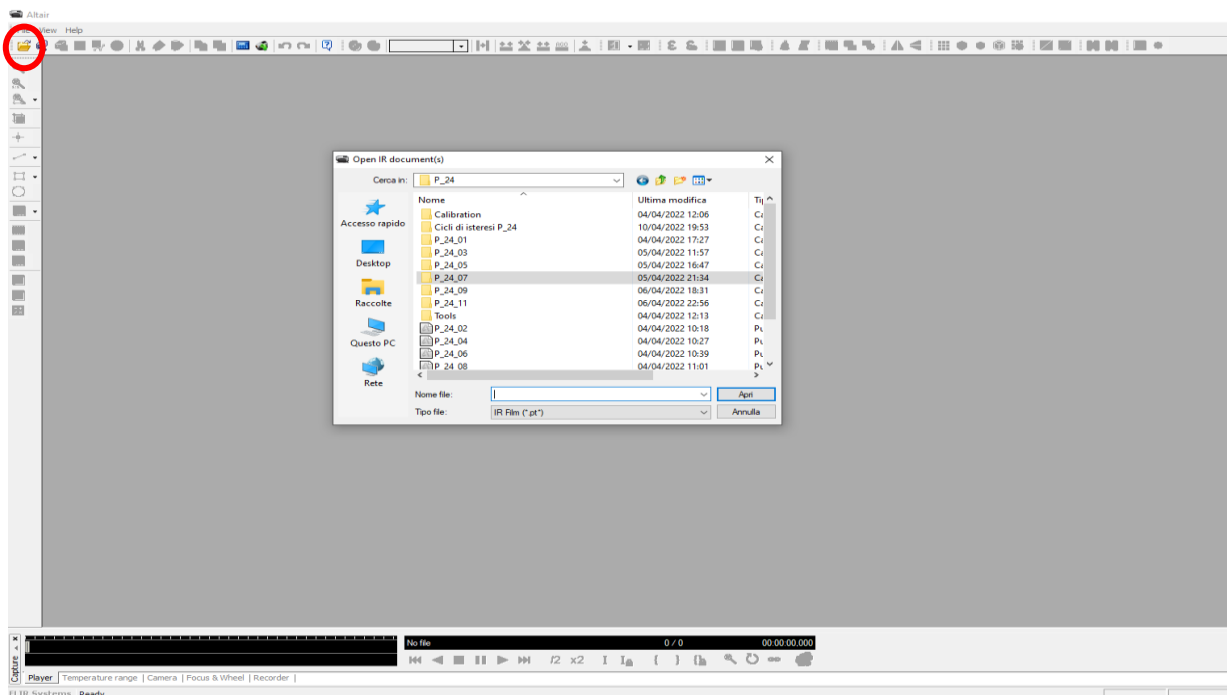


Figura 5.1 – Apertura filmato da analizzare mediante FFT.

2. I filmati usati per l'analisi in MATLAB, sono stati numerati col numero dispari, ad esempio "P_24_07";
3. Una volta aperto il filmato ci si ritrova di fronte a un'immagine, come già visto nel Capitolo 2;
4. Come detto, i filmati originali sono costituiti da 8192 frames mentre i filmati analizzati sono formati da 4096 frames: per ridurre il numero di frames si segue il seguente flusso di operazioni:

FILE → SAVE IMAGE AS

E si apre la schermata presente in Figura 5.2:

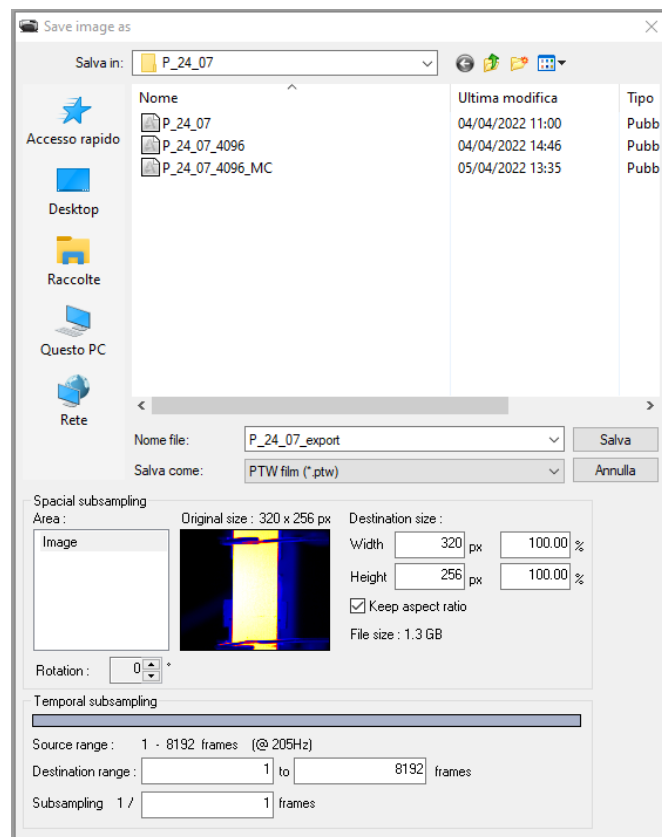


Figura 5.2 – Schermata di salvataggio filmato.

Dopodiché alla voce *Destination Range* si va ad inserire 1 to 4096 frames. Fatta tale operazione si modifica il nome in "P_24_07_4096" e si salva il filmato (in Figura 5.2 è già presente tale filmato in quanto era già stato salvato);

Una volta salvato il filmato con 4096 frames, prima di esportare la matrice dei pixel con ciascuno il valore di temperatura al variare del frame considerato, si procede alla compensazione del filmato stesso. Questa operazione viene fatta poiché durante l'acquisizione del filmato, la termocamera risulta essere fissa tramite appoggio al suolo, mentre il provino è in costante movimento, e tanto maggiori sono i carichi, tanto maggiori saranno gli spostamenti che il tratto utile esegue. Osservato questo, se non si esegue la compensazione del movimento ciascun pixel che è fisso con l'obiettivo della termocamera, leggerà valori di temperatura che fisicamente sono attribuiti a punti sulla

superficie del provino diversi. In altre parole, al pixel ad esempio in posizione 20,20 senza compensazione, verranno attribuiti valori di temperatura che in realtà sarebbero dei suoi pixel vicini. In realtà questo effetto va ad estinguersi nel momento in cui si va a prendere il valore medio all'interno di un'area come nel caso in esame, però per avere la mappa reale della temperatura è bene andare ad eseguire la procedura di compensazione:

1. Si apre il software Random Motion, in dotazione con il software Altair e ci si trova di fronte alla schermata mostrata in Figura 5.3:

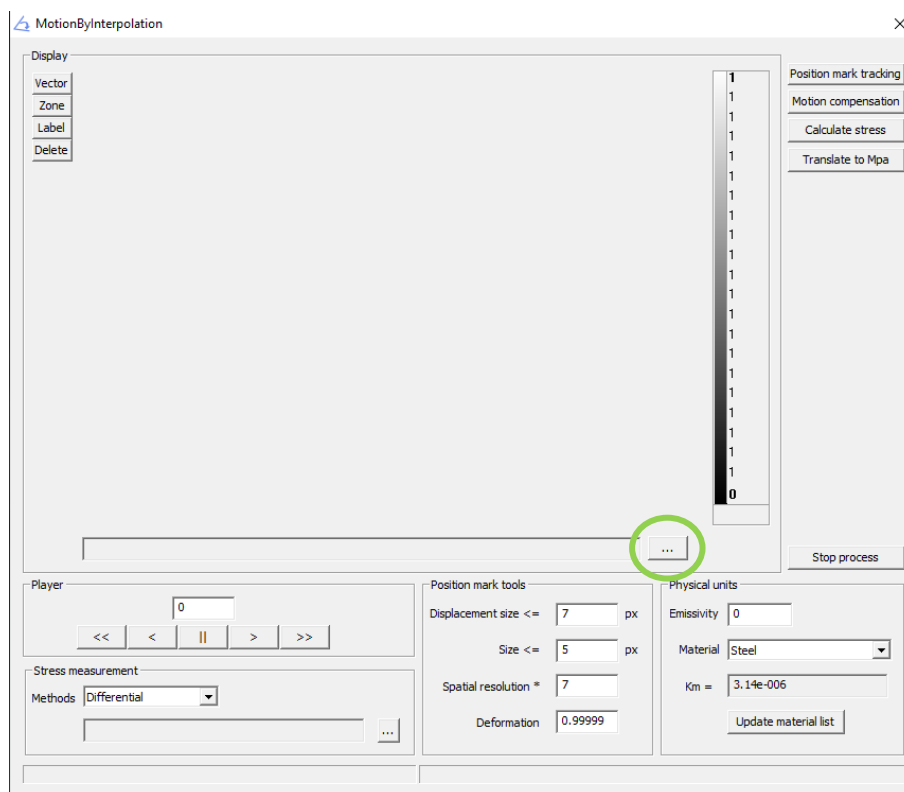


Figura 5.3 – Schermata di avvio Random Motion.

2. La prima cosa da fare consiste nell'andare ad inserire il filmato da compensare, precedentemente ridotto a 4096 frames: per fare ciò si clicca sul pulsante cerchiato in verde in Figura 5.3 e si seleziona il filmato da compensare;
3. Viene successivamente aperto il filmato e viene mostrato a video. Il passo successivo consiste nell'andare a inserire dei punti di riferimento fissi, in modo tale che il software sia in grado di rilevare l'entità del movimento. In altre parole, cliccando su *Vector* (v. Figura 5.3) si possono andare a disegnare dei vettori che verranno presi come punti di riferimento fissi. Tali vettori vengono disegnati sopra le molle dell'estensometro: grazie al movimento del provino, l'estensometro si muove, andando quindi ad uscire dalla traiettoria dei vettori appena disegnati; in questo modo il software riesce a calcolare lo spostamento di ciascun pixel e a compensare il filmato. Ciò che conviene fare è di disegnare due vettori, uno per la molla superiore e uno per quella inferiore dell'estensometro: in questo modo si hanno due punti di riferimento. È altresì importante notare che maggiori sono i punti di riferimento, maggiori saranno anche i tempi di calcolo. La schermata, una volta disegnati i vettori, che si ha di fronte è la seguente in Figura 5.4:

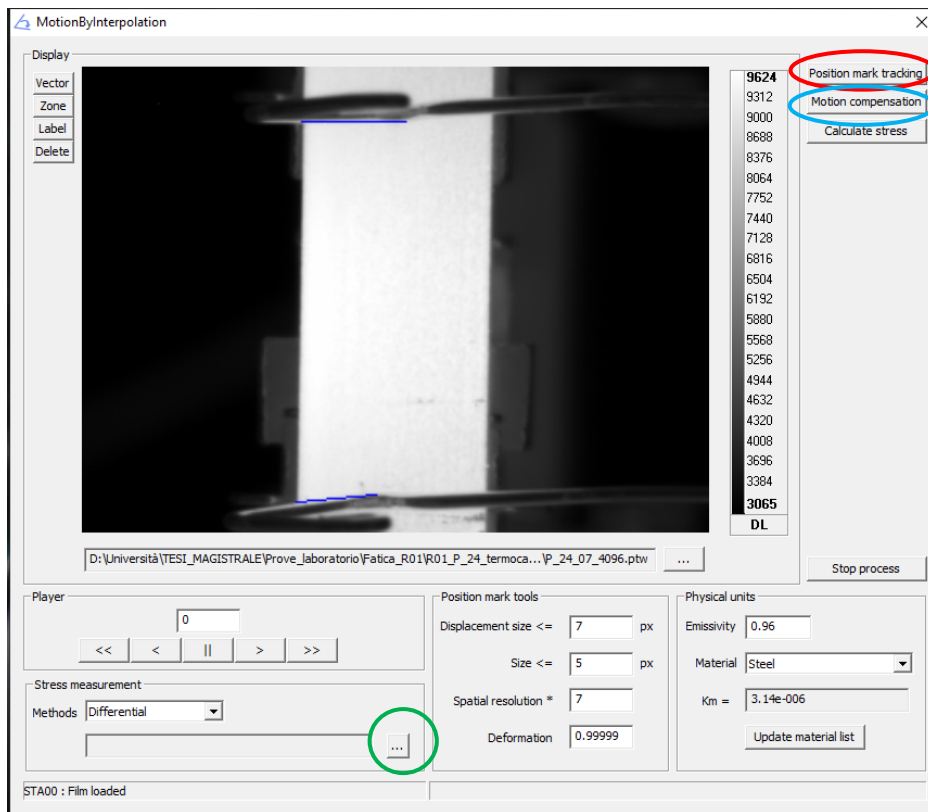


Figura 5.4 – Schermata di comando di Random Motion.

4. Il passo successivo consiste nel premere il pulsante *Position mark tracking* cerchiato in rosso in figura 5.4: in questo modo il software va ad elaborare e a salvare tutte le posizioni delle molle dell'estensometro, che verranno utilizzate nella compensazione; una volta che in basso appare la scritta *Track finished* allora si può procedere alla compensazione del filmato;
5. Lo step successivo consiste nell'andare a salvare il filmato nella cartella di riferimento prima di far partire la compensazione. Questa operazione viene fatta cliccando sul pulsante cerchiato in verde in figura 5.4: si apre una schermata in cui si va a salvare il nome del filmato. Nel caso di questa Tesi si è scelto di applicare il nome *_MC* ai filmati compensati ad esempio "P_24_07_4096_MC";
6. Si è ora pronti per compensare il filmato, cliccando sul pulsante *Motion compensation* cerchiato in azzurro.

L'intero processo di compensazione ha una durata di circa mezz'ora, a seconda delle dimensioni del provino e soprattutto del numero e della lunghezza dei vettori utilizzati.

Una volta terminata la compensazione del movimento del provino si ritorna all'interno del software Altair e si seguono i passaggi 1-3 in modo da aprire il filmato *_MC* sulla schermata di Altair.

Una volta fatto ciò si seguono i seguenti passaggi per andare a salvare il filmato:

1. Si seleziona il comando *Draw area rectangle* (cerchiato in rosso in Figura 5.5) e si disegna un'area racchiusa tra i coltelli dell'estensometro: quella sarà l'area all'interno della quale si calcolerà la seconda armonica della temperatura;
2. Fatto ciò, si segue il seguente percorso:

FILE → SAVE IMAGE AS

E nella tendina *Salva come* si seleziona *ASCII fil. (*.asc)*: in questo modo il file sarà un file di testo in cui vengono salvate le informazioni di temperatura pixel per pixel, al variare del numero di frames; si seleziona poi il numero 1 nella finestra cerchiata in verde (v. Figura 5.5) e si preme su salva

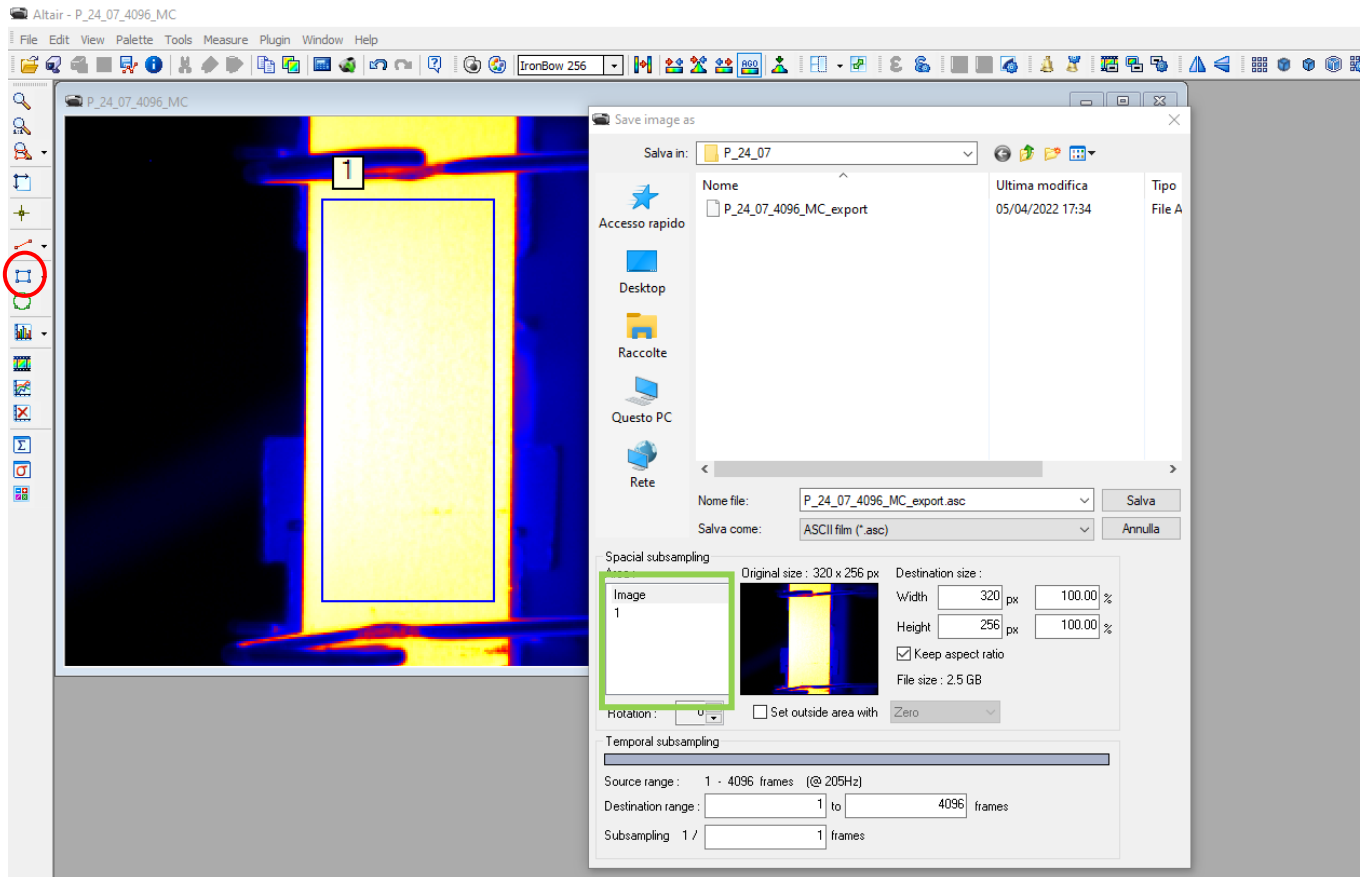


Figura 5.5 – Schermata di salvataggio in format ASCII.

Una volta compiute tali operazioni e terminata la fase di salvataggio del file .asc, si è pronti ad importare la matrice in MATLAB. Per tale operazione si rimanda all'Appendice 2.

Una volta importata la matrice in MATLAB ed eseguita la FFT per il calcolo della seconda armonica, si ricava il valore di ΔT_2 . Per il calcolo di Q da seconda armonica, che è pari a $\rho c \cdot 2\Delta T_2 \beta$, una volta noto il range dell'armonica presente alla frequenza doppia rispetto a quella di carico, l'unico parametro incognito a calcolare è pari a β . Il calcolo di tale parametro, nel caso di un materiale elasto-plastico, è funzione unica dell'esponente di incrudimento ciclico n' . Pertanto, di seguito si va a riportare la procedura impiegata per determinare n' e dunque β .

5.3 Calcolo del parametro β per un materiale elasto-plastico

Lo scopo di questo paragrafo è quello di mostrare la procedura da seguire per calcolare il parametro β nel caso di un materiale elasto-plastico. La procedura ha carattere generale sia per $R=-1$, sia per $R>0$ in quanto è stato dimostrato che tale parametro è funzione unica di n' , esponente di incrudimento ciclico.

5.3.1 Best fit dei punti di un ciclo di isteresi: uso dell'applicazione CURVE-FITTING su MATLAB

Si vanno ora a descrivere i passaggi impiegati per il best fitting dei punti sperimentali di un ciclo di isteresi. A tal riguardo, si prende come esempio un ciclo di isteresi del provino P_17, sollecitato a $R=-1$ con una $\sigma_a = 210 \text{ MPa}$. I passaggi sono i seguenti:

1. Si costruisce dapprima il ciclo di isteresi, come in Figura 5.6

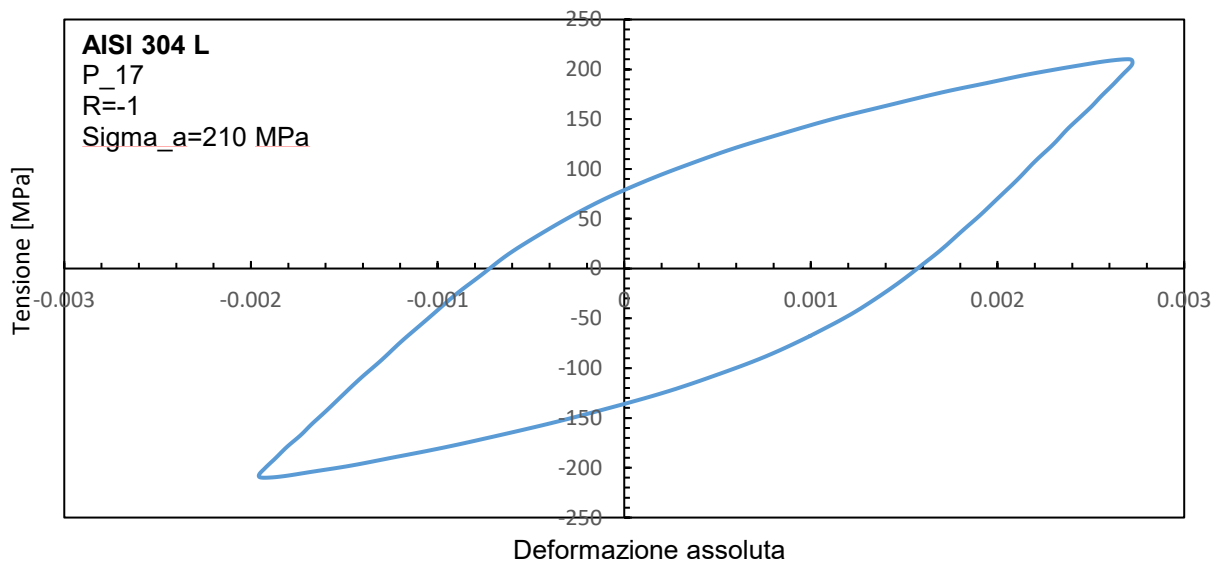


Figura 5.6 – Ciclo di isteresi per una prova a $\sigma_a = 210 \text{ MPa}$.

2. Una volta determinato il ciclo di isteresi, si vanno a sottrarre la tensione minima e la deformazione minima ai vettori tensione e deformazione, in modo tale da andare ad incernierare il ciclo nell'origine degli assi del sistema di riferimento, come mostrato in figura 5.7:

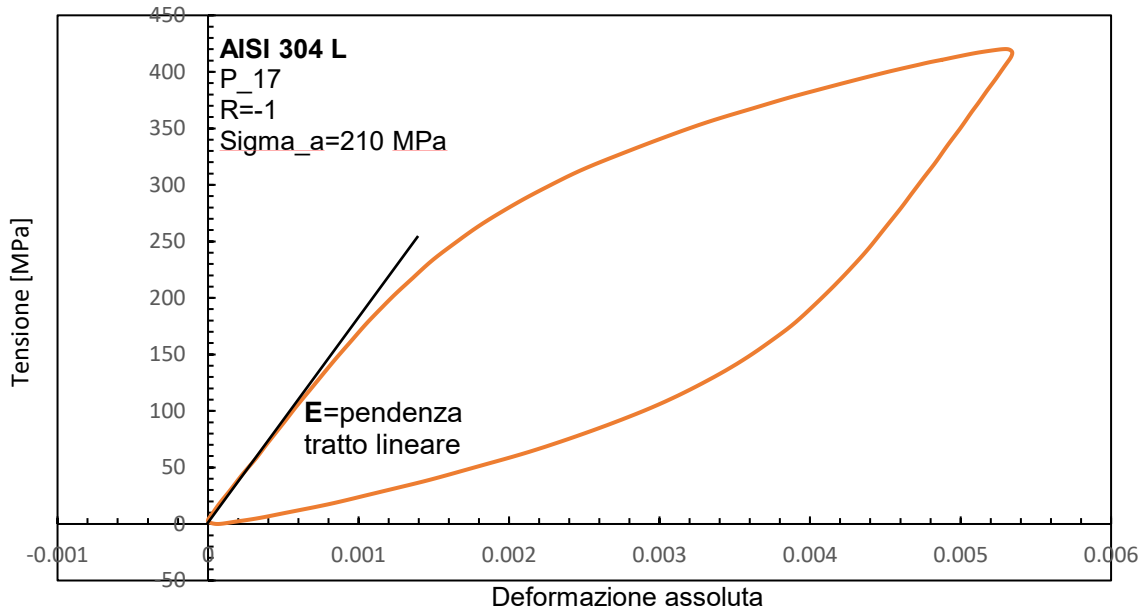


Figura 5.7 – Ciclo di isteresi per una prova a $\sigma_a = 210 \text{ MPa}$, incernierato nell'origine degli assi.

4. Dopo aver fatto ciò, si calcola il modulo elastico del ciclo di isteresi, andando ad eseguire una regressione lineare fintanto che i punti danno luogo ad un andamento lineare: capita spesso che il valore del modulo E sia minore o maggiore di quello statico, in quanto il materiale evolve durante la sua vita a fatica;
5. Una volta calcolato il modulo elastico, si isola il ramo superiore del ciclo di isteresi e lo si importa come vettore in MATLAB: si definisce x=tensione e y=deformazione;
6. Si apre l'applicazione *Curve Fitting*, cerchiata in rosso in Figura 5.8

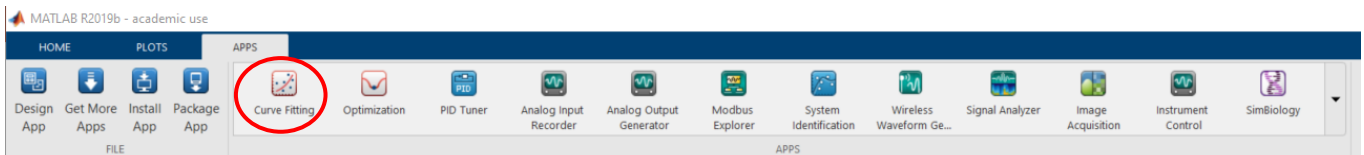


Figura 5.8 – Schermata applicazioni di MATLAB.

7. Una volta aperta l'applicazione, si vede una schermata come quella in Figura 5.9: si clicca su x *data* e si seleziona il vettore tensione; fatto ciò, si clicca y *data* e si inserisce il vettore deformazione. Dopodiché si clicca su *interpolant* e si seleziona Custom equation e si inserisce l'equazione di best-fit: nel caso in esame si utilizzato il modello Ramberg-Osgood, pertanto l'equazione di fit è la seguente:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5.1)$$

Dove E è il modulo elastico del ciclo di isteresi calcolato in precedenza

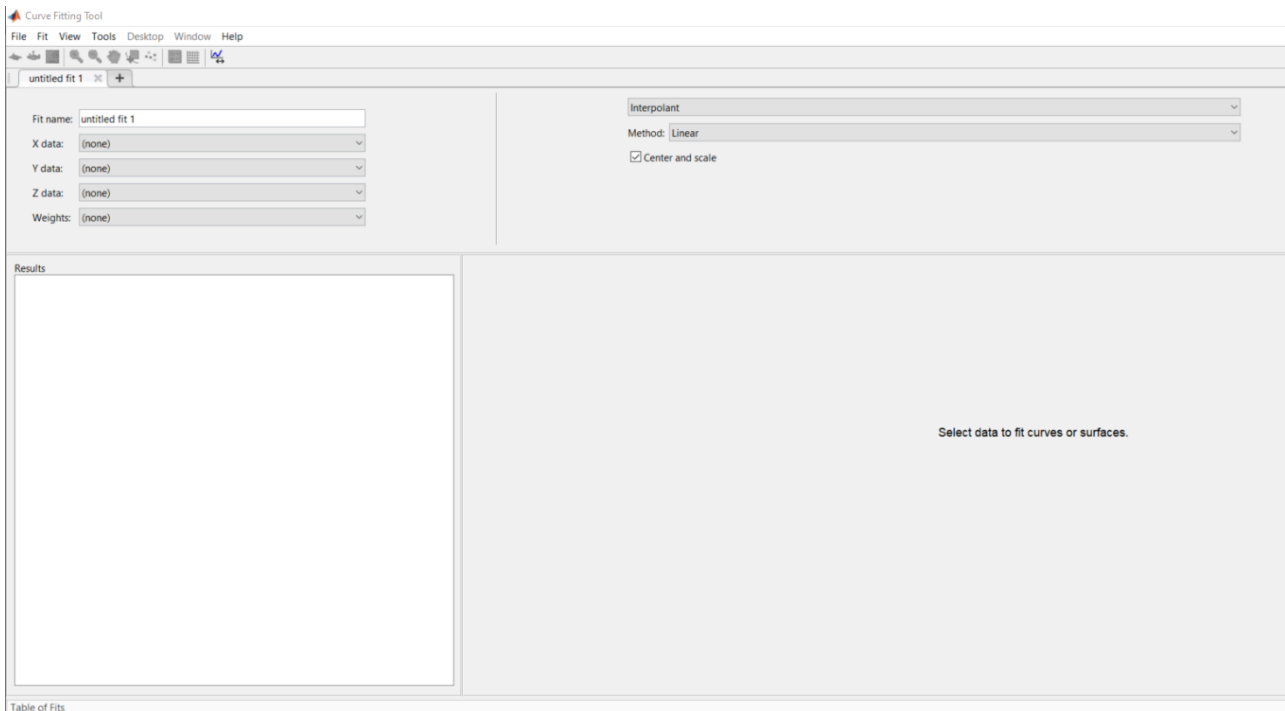


Figura 5.9 – Schermata Curve Fitting di MATLAB.

Dopo aver fatto ciò, si vanno a modificare i parametri di best fit nel caso in cui la curva non viene fittata in modo rapido, e ciò che si ottiene è la seguente immagine in Figura 5.10

General model:

$$f(x) = x/170049 + (x/K)^{(1/n)}$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$K = 1369 \quad (1351, 1388)$$

$$n = 0.2008 \quad (0.1985, 0.203)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 4.954e-08$$

$$\text{R-square: } 0.9998$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9998$$

$$\text{RMSE: } 2.296e-05$$

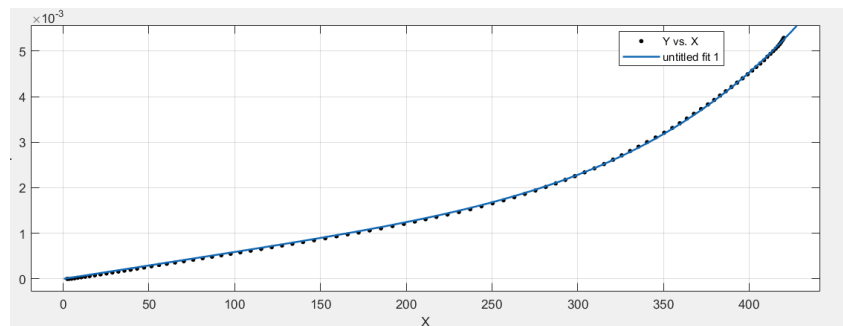


Figura 5.10– Best fit e parametri di fitting.

MATLAB restituisce i valori di K' e n' . Una volta noto l'esponente di incrudimento ciclico, si usano le equazioni viste nel Capitolo 1, diverse a seconda che si abbia un $R < -1$ e un $R > 0$, per andare a ricavare il parametro β .

Si vanno a riportare di seguito le analisi fatte dapprima a $R = -1$ e poi a $R = 0.1$. Si andranno ad analizzare prima le prove ad ampiezza costante, prendendo a riferimento due esempi e poi una prova a gradini, questo per ogni rapporto di ciclo per un totale di sei esempi.

5.4 Q con Metodo Seconda Armonica per prove a R=-1

In questo paragrafo vengono rappresentati dei risultati sperimentali per R=-1, utilizzando il metodo Seconda Armonica, proposto in letteratura da Meneghetti e Ricotta in [23, 24]. Dapprima verranno presentati due casi a R=-1 a 210 MPa e poi una prova a gradini. Verranno analizzate analogie e differenze tra le prove per poi passare alle prove a R=0.1.

5.4.1 Energia dissipata Q: prove di fatica ad ampiezza costante R=-1

Si vanno ora ad analizzare due prove di fatica ad ampiezza costante con R=-1 e $\sigma_a=210$ MPa, in quanto sono stati i massimi carichi raggiunti senza incorre in fenomeni di instabilità dell'equilibrio a causa di una sezione ristretta di 4 mm dei provini. Non sono inoltre stati testati provini a basso carico, perché come si vedrà nel seguito, la plasticità è troppo ridotta per essere identificata con successo. Il primo provino analizzato è il P_17 a R=-1 e sollecitato come detto a un'ampiezza di tensione di 210 MPa.

Di seguito in figura 5.11 si riportano i cicli di isteresi ottenuti dalle misurazioni fatte durante la prova:

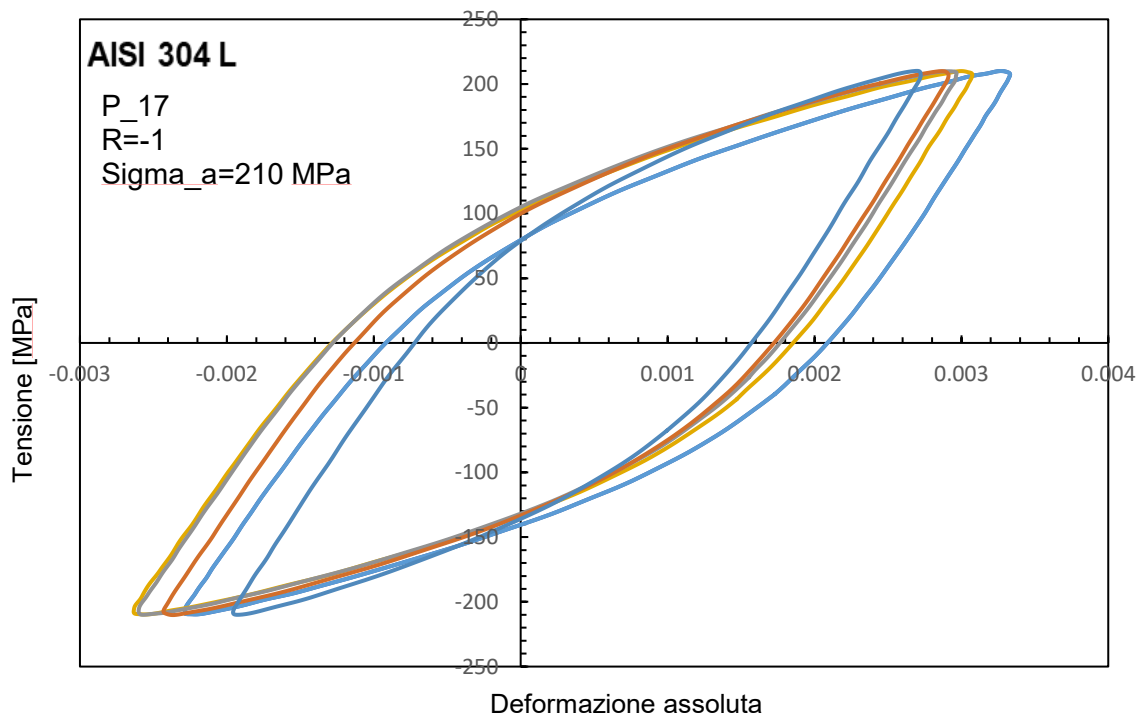


Figura 5.11– Cicli di isteresi per il provino P_17, R=-1.

Si può osservare come i cicli di isteresi innanzitutto racchiudano un'area considerevole, come già visto nel Capitolo 4, e ciò indica che il materiale sta generando molto calore e dunque un'elevata plasticità. Si può notare inoltre come i cicli di isteresi siano stabilizzati, ovvero che l'evoluzione durante la vita a fatica del provino risulti essere limitata. I suoi cicli a rottura sono inoltre pari a 47217. Di seguito si va a rappresentare il confronto tra Q e W intesa come area del ciclo di isteresi, per le misurazioni fatte durante la prova. Q è riferito alla tecnica del gradiente di raffreddamento.

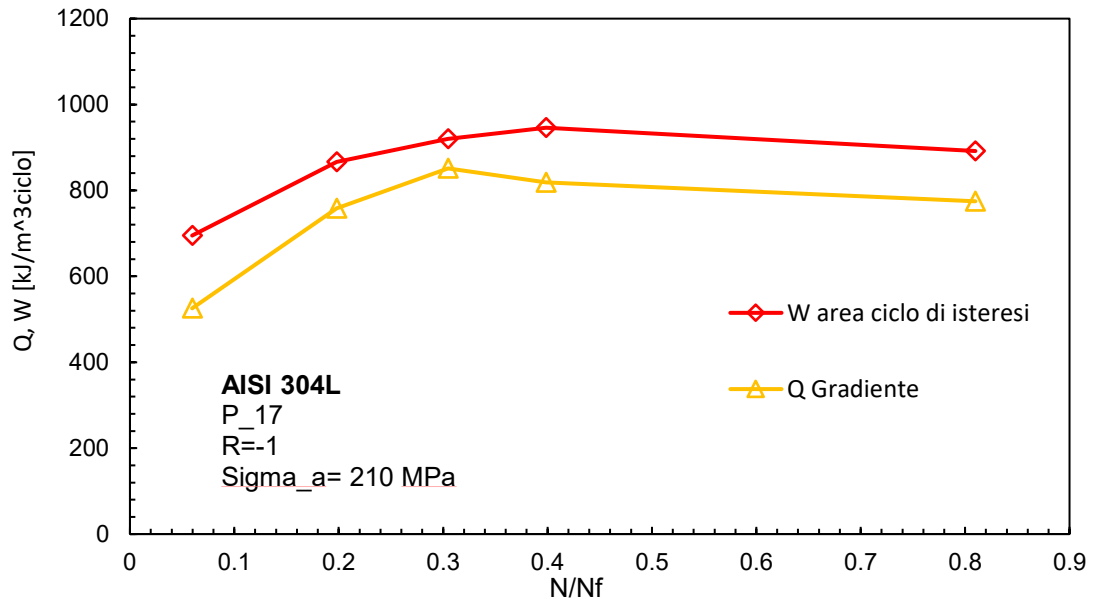


Figura 5.12– Confronto Q gradiente vs W area del ciclo di isteresi per il provino P_17, R=-1.

Osservando la Figura 5.12, si può notare come Q sia diverso da W, mentre nelle ipotesi fatte, a R=-1 l'area del ciclo di isteresi è uguale al calore che viene dissipato a fatica. Questo, tuttavia, rappresenta un caso isolato ed anomalo ed è importante sottolinearlo.

Dopo aver determinato l'area del ciclo di isteresi, e aver calcolato tramite la procedura descritta nel precedente paragrafo il parametro β , sono stati ricavati i valori della prima e seconda armonica del segnale di temperatura tramite la Trasformata Discreta di Fourier. Nel calcolo di Q da seconda armonica il range della prima armonica di T non ha influenza, ma avendo utilizzato tale valore per calcolare la costante termoelastica a fatica, se ne riporta lo stesso l'immagine grafica. In Figura 5.13 si riporta l'area della superficie del provino considerata per le analisi:

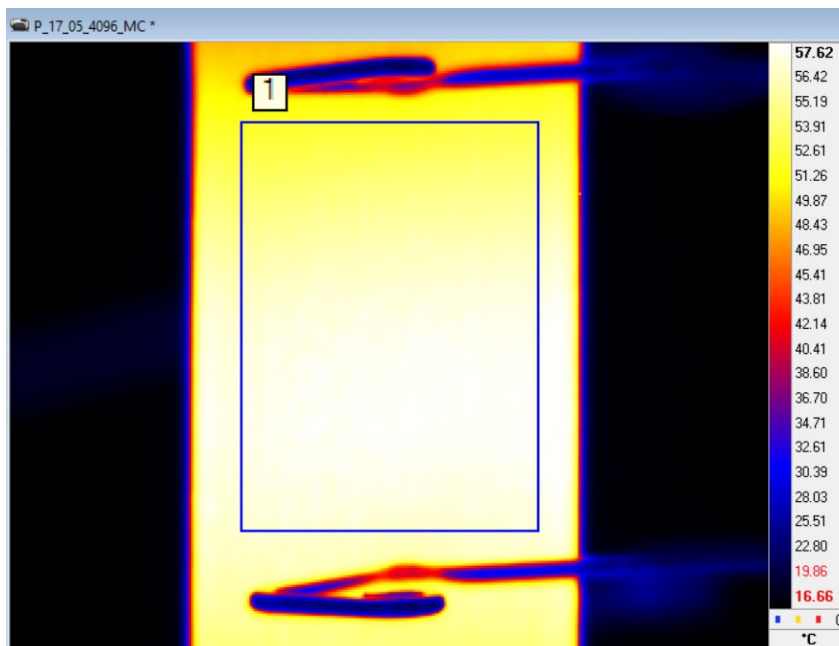


Figura 5.13– Area di analisi per il provino P_17, R=-1.

Si riporta inoltre in Figura 5.14 l'andamento temporale di un pixel durante l'acquisizione:

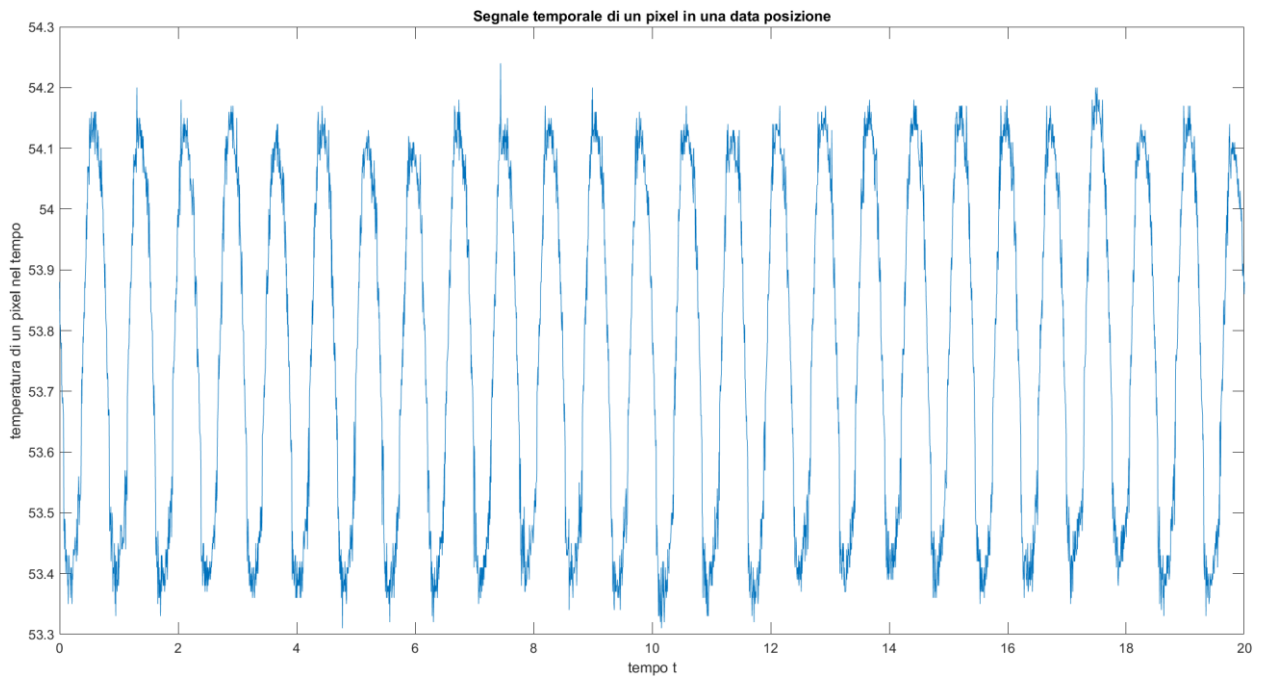


Figura 5.14– Segnale temporale di un pixel in una data posizione (35,35) per il provino P_17, R=-1.

Di seguito si riporta il grafico, come già detto per completezza, del range della prima armonica del segnale di temperatura, in Figura 5.15:

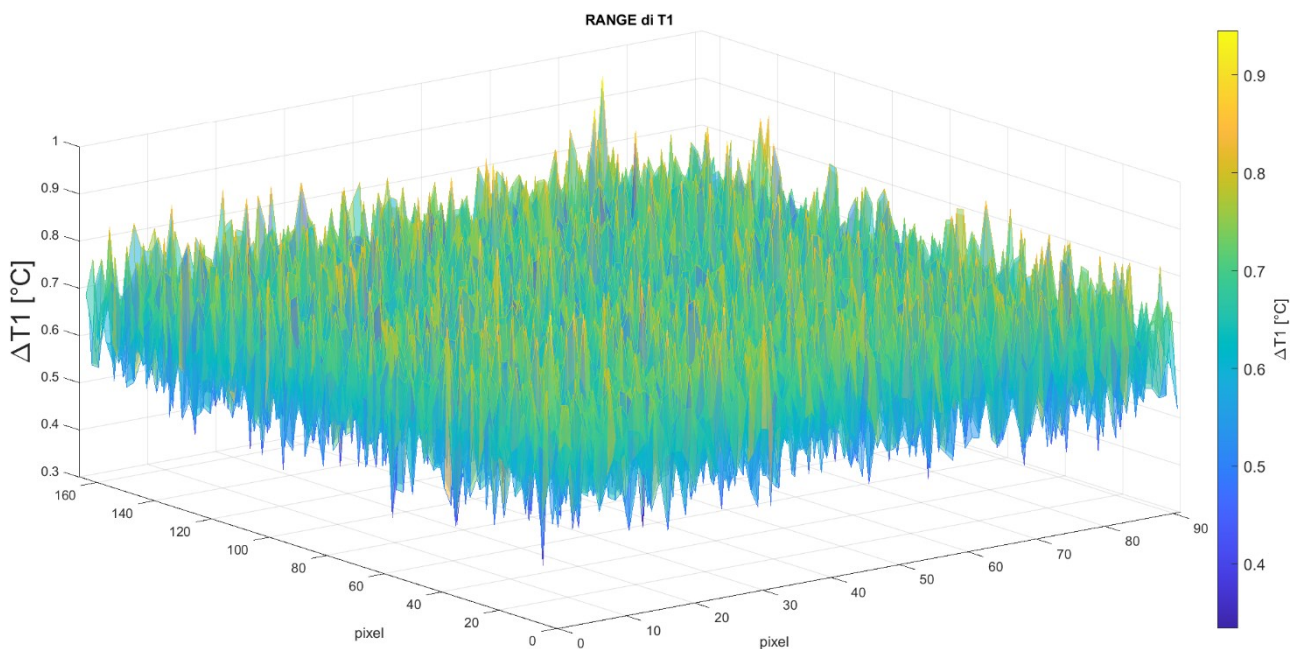


Figura 5.15– Range della prima armonica del segnale di temperatura per il provino P_17, R=-1.

Ciò che si osserva è che il segnale non è costante sulla superficie del provino, bensì abbiamo a che fare con un segnale fatto di picchi e valli: è l'effetto della termoelasticità di ciascun grano che genera tale segnale, in quanto a livello macroscopico si tratta l'acciaio come un materiale isotropo, mentre a livello microscopico il materiale ha un comportamento fortemente anisotropo.

Per quanto concerne il range della seconda armonica, legata alla plasticità e dunque al danneggiamento a fatica, si ottiene il grafico di Figura 5.16:

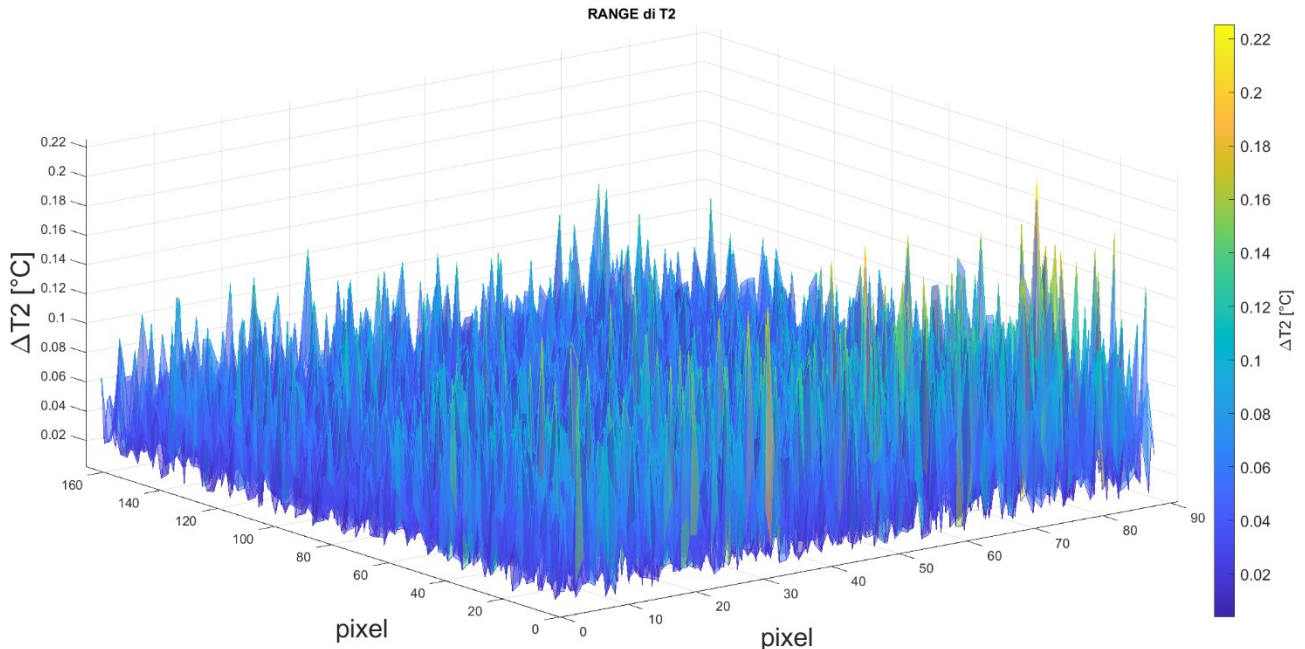


Figura 5.16– Range della seconda armonica del segnale di temperatura per il provino P_17, R=-1.

Ciò che appare evidente è che si ha nuovamente un segnale non uniforme sulla superficie a causa del fatto che un grano sta già plasticizzando, mentre l'altro grano deve ancora incrudire, ecc, però se si guarda la colorbar sulla destra in Figura 5.16, si osserva come essa abbia valori di fondo scala che hanno un ordine di grandezza di differenza, infatti va da 0.02 °C a 0.22 °C. Se si analizza la superficie del provino si osserva inoltre che tra un pixel e l'altro c'è un ordine di grandezza di differenza in termini di seconda armonica. Per capire se si trattasse effettivamente di un fenomeno fisico oppure se ci fosse la presenza di rumore, è stata fatta un'indagine a tal riguardo.

L'idea è stata quella di riprodurre fedelmente le condizioni di prove standard, ma mantenendo la macchina ferma, senza cioè applicare alcun carico: una volta inserito il provino in macchina e serrato tra le ganasce, è stato applicato l'estensometro, accesa la termocamera e scaldato il provino fino a circa 55 °C mediante un phon industriale, in modo da ricreare le stesse condizioni di prova. Dopodiché è stata fatta un'acquisizione a 4096 frames quando la temperatura ha raggiunto la stabilizzazione ed è stata analizzata mediante FFT su MATLAB.

Ciò che si è ottenuto viene rappresentato in Figura 5.17: questo grafico rappresenta il range in funzione della frequenza, ed è lo spettro del segnale nel pixel centrale. Sono stati fatti variare i parametri di posizione del pixel, valutando l'entità del rumore, ed il pixel centrale rappresenta il punto più rappresentativo. Sulla destra è stata zoomata la zona relativa alle frequenze doppie rispetto a quelle utilizzate per applicare il carico. Ciò che si osserva è che il rumore massimo assume un valore pari a $8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, mentre l'ordine di grandezza del range di seconda armonica è di $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$. Essendo pertanto il rumore vicino all'ordine di grandezza della misura in esame, si è proceduto ad utilizzare un filtro fatto appositamente per le immagini, chiamato filtro Gaussiano. Tale filtro sfrutta il principio della convoluzione e va a pesare in modo più marcato i pixel vicini al pixel che si sta considerando; è inoltre il filtro con maggiore smoothness.

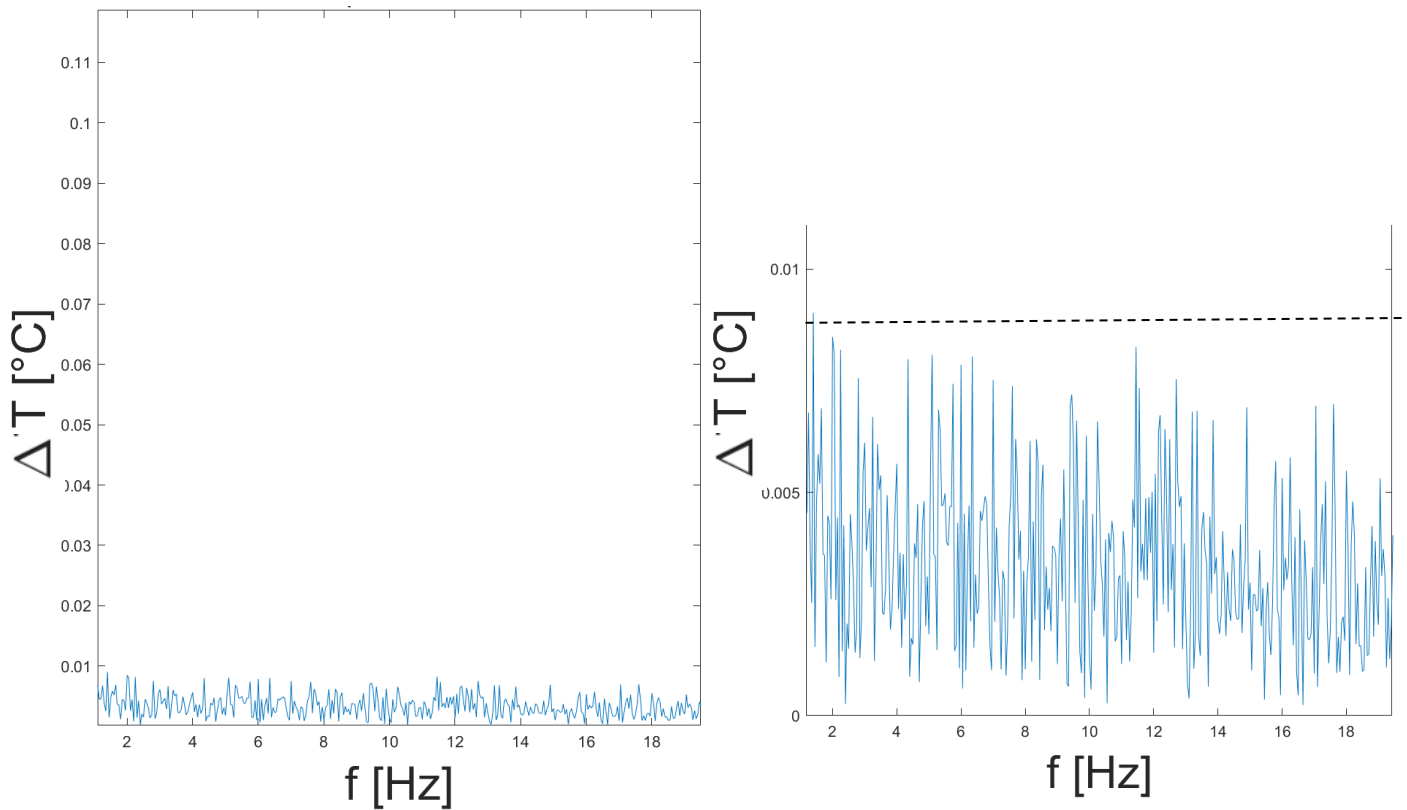


Figura 5.17– Range del segnale di temperatura per il provino fermo, per analizzare l'effetto del rumore

In Appendice 2 si riporta il codice impiegato per generare il filtro gaussiano. Di seguito si riporta il segnale di seconda armonica filtrato in Figura 5.18, mentre in Figura 5.19 si riportano le due mappe bidimensionali del segnale originale e filtrato

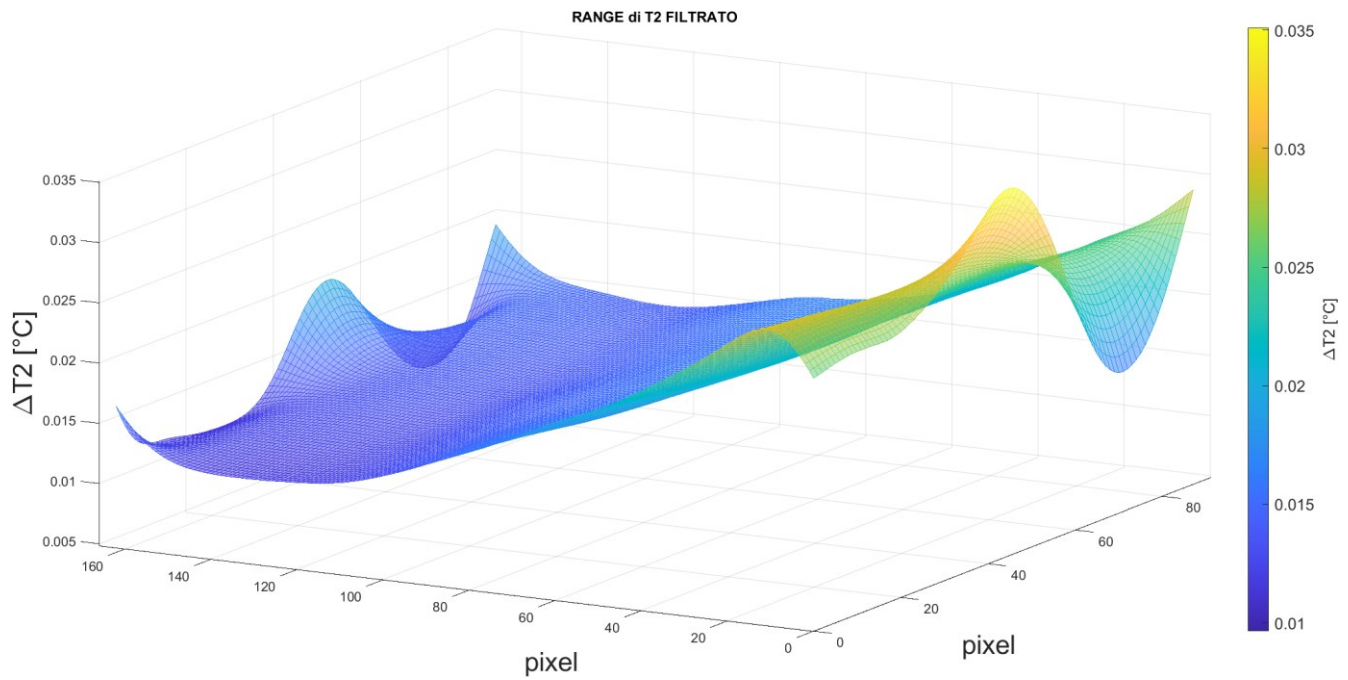


Figura 5.18– Range della seconda armonica del segnale filtrato di temperatura per il provino P_17, R=-1.

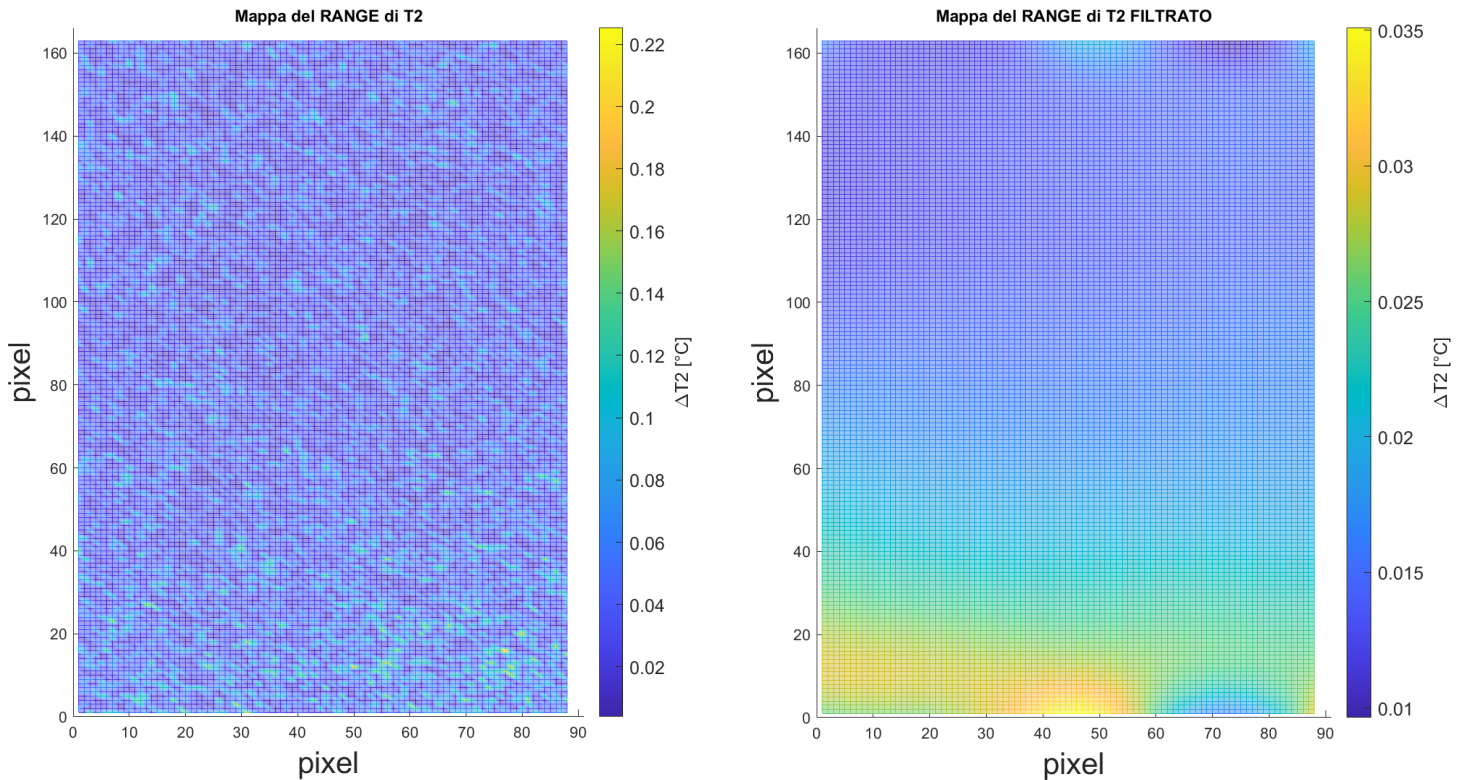


Figura 5.19– Mappa del range della seconda armonica del segnale originale (a sinistra) e filtrato (a destra) di temperatura per il provino P_17, R=-1.

Dall'analisi delle due Figure, si osserva come il valore di range di seconda armonica sia molto più uniforme andando ad applicare il filtro. Per capire se il filtro abbia o meno ridotto l'effetto del rumore oppure se abbia tagliato via anche del segnale, sono stati calcolati i valori di Q con l'approccio Seconda Armonica e confrontati con quelli di Q ottenuto tramite Gradiente di raffreddamento. Di seguito in Tabella 5.1 si riportano i valori utilizzando il segnale originale, ovvero non filtrato:

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE [kJ/m ³ ciclo]	Q_SECONDS_HARMONIC [kJ/m ³ ciclo]	Errore [%]	Beta
1	2814	526	573	9	1.917
2	9345	758	743	2	1.922
3	14385	851	621	27	1.927
4	18823	819	560	32	1.933
5	38238	775	613	21	1.953

Tabella 5.1– Risultati Q gradiente vs Q seconda armonica del segnale originale per il provino P_17, R=-1.

Analizzando la Tabella 5.1 si osserva come usando il segnale originale elaborato tramite FFT, si ottengano errori in alcuni casi elevati, mentre in altri casi errori ingegneristicamente accettabili. Inoltre, un aspetto di fondamentale importanza sta nel fatto che il parametro β è costante durante l'intera prova, il che significa che l'esponente di incrudimento ciclico n' rimane costante durante l'intera vita a fatica. L'andamento di Q da gradiente e da seconda armonica, nonché il valore dell'errore viene riportato in Figura 5.20:

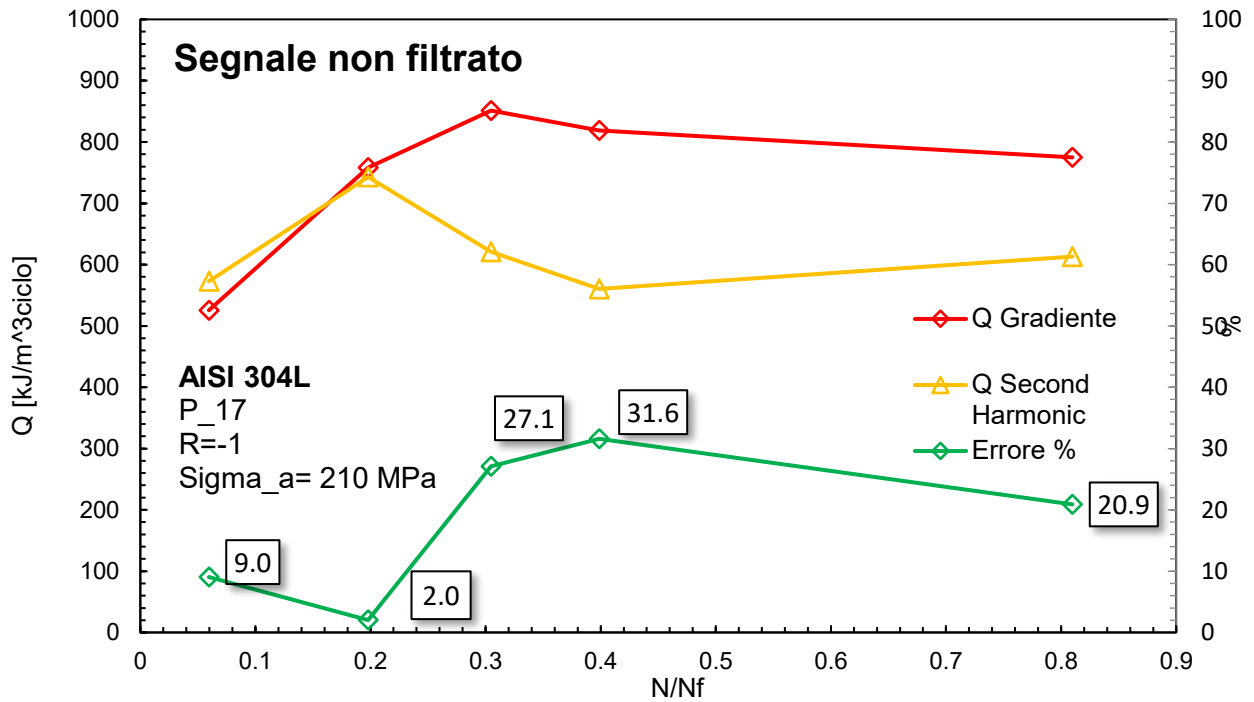


Figura 5.20– Q gradiente vs Q seconda armonica per il provino P_17, R=-1.

In Figura 5.21 si riportano direttamente i valori di Q gradiente e Q da Seconda Armonica filtrando il segnale di temperatura:

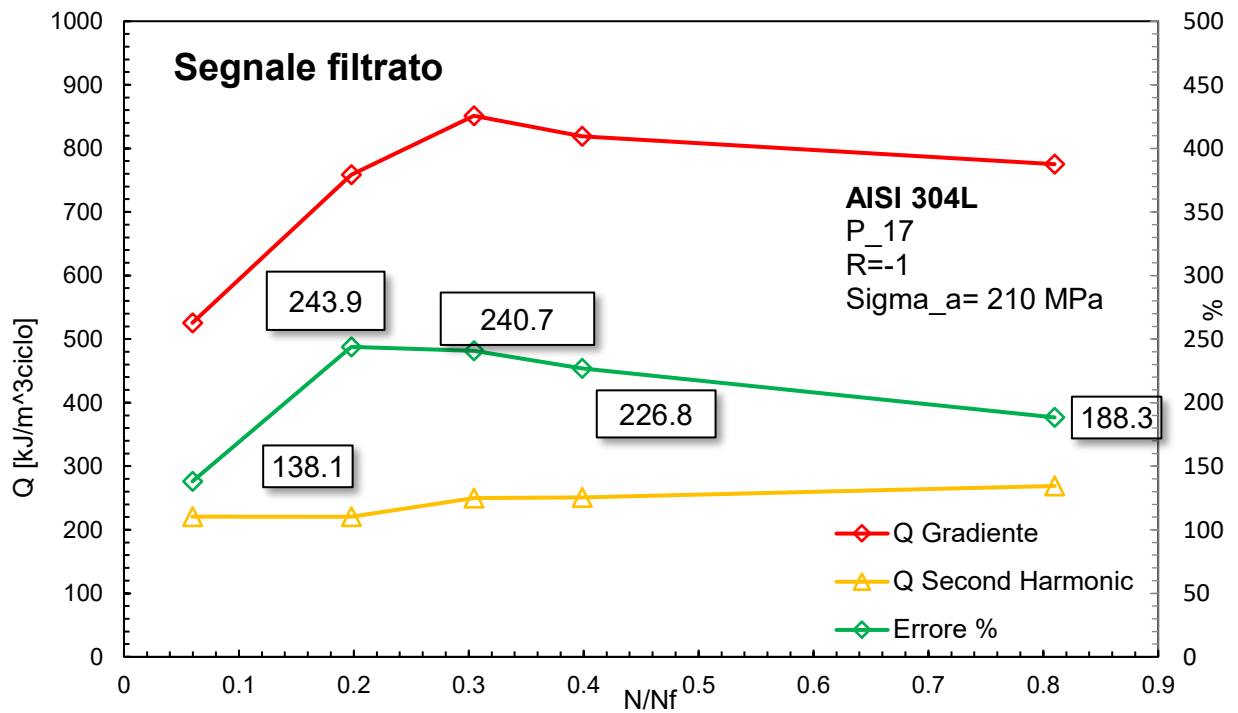


Figura 5.21– Q gradiente vs Q seconda armonica segnale filtrato per il provino P_17, R=-1.

Si osserva subito che filtrando il segnale si vanno a tagliare troppe informazioni compreso quelle del segnale vero e proprio oltre al rumore, andando a sottostimare Q arrivando anche ad errori pari al 243%. Se ne conclude pertanto che per $R=-1$, filtrare dà luogo a sottostime dell'energia dissipata a fatica.

Dopo aver appurato che il filtraggio del segnale per $R=-1$ non dà risultati positivi, si va ora ad analizzare il secondo caso a $R=-1$ con un'ampiezza di tensione pari sempre a 210 MPa, ovvero il provino P_21. Per quanto concerne i cicli di isteresi e l'area di questi ultimi W confrontata con Q da gradiente, si rimanda al Capitolo 4, Paragrafo 4.2.3, in quanto sono già stati rappresentati. Si riporta dunque in Figura 5.22 il range della seconda armonica del segnale di temperatura, mettendo in evidenza come visivamente si veda la differenza tra il segnale originale e filtrato. In questo caso particolare, il segnale non filtrato medio e quello filtrato medio tendono ad assumere valori che non si discostano molto uno dall'altro, con differenze per tutte le misurazioni fatte, dell'ordine dell'8%.

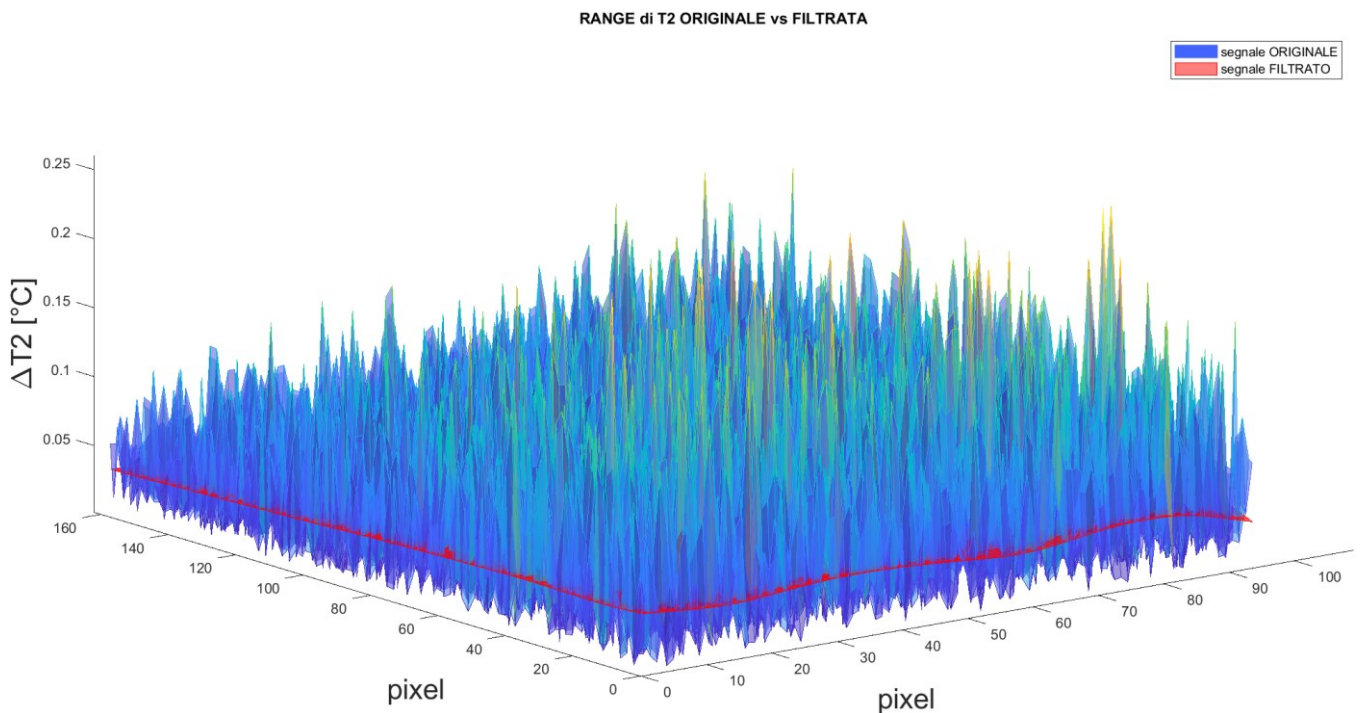


Figura 5.22– Range della seconda armonica del segnale non filtrato (blu) e filtrato (rosso) di temperatura per il provino P_21, $R=-1$.

Si osserva inoltre come il segnale filtrato tenda ad essere uniforme sulla superficie del provino, livellando i picchi e le valli del segnale di seconda armonica non filtrato.

Nel caso precedente ovvero per il P_17 a $R=-1$, si è osservata una differenza tra il segnale non filtrato medio e quello filtrato medio pari al 50%, ed appunto in quel caso l'errore tra Q con segnale filtrato e Q da seconda armonica diventava anche dell'ordine del 300%.

Avendo constatato che per $R=-1$ si debba usare il segnale originale in quanto quello sottoposto a filtraggio taglia segnale oltre che rumore, si riporta ora in Figura 5.23 la mappa 2D del segnale originale ovvero non filtrato a sinistra e la mappa 2D del segnale filtrato a destra, ricordando che in questo caso specifico la differenza tra i due valori medi è nell'ordine dell'8%

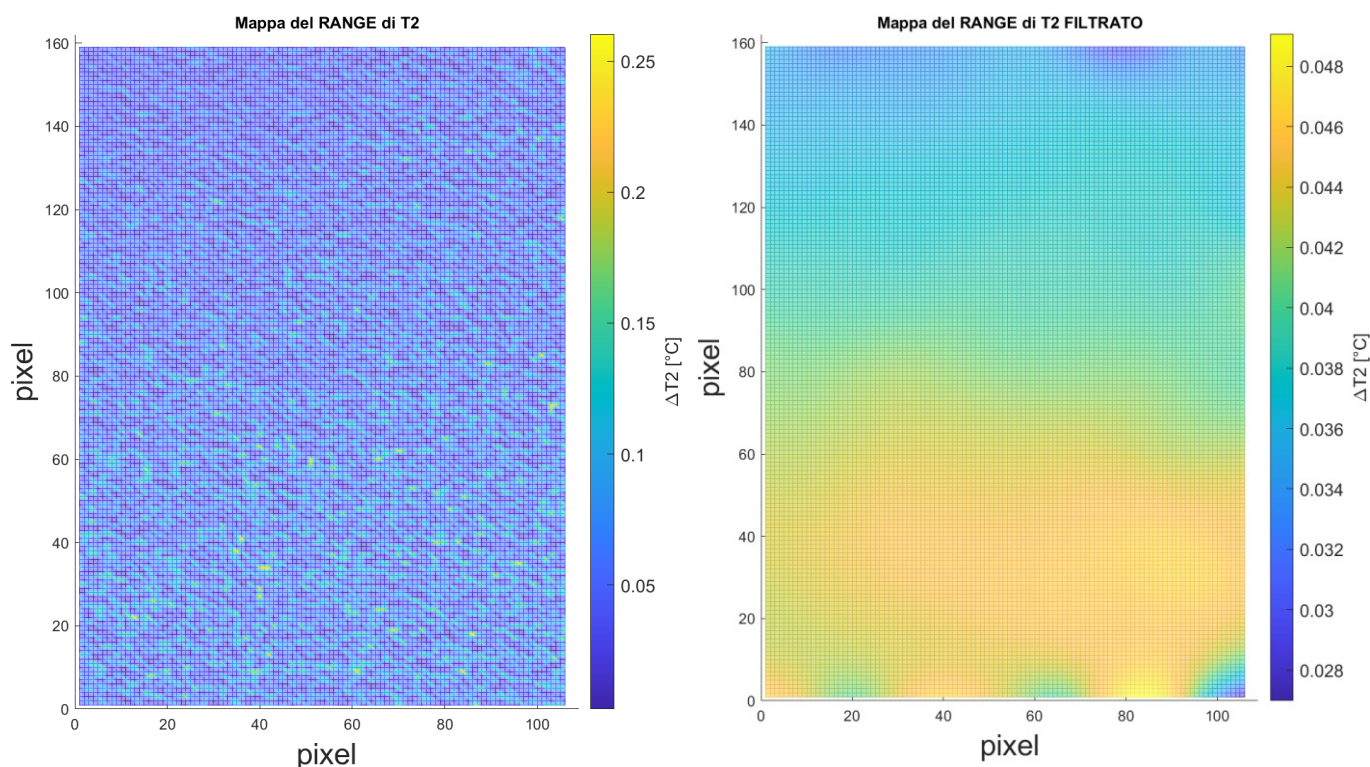


Figura 5.23 – Mappa range della seconda armonica del segnale non filtrato (sinistra) e filtrato (destra) di temperatura per il provino P_21, R=-1.

Si riporta ora in forma tabellare il confronto tra Q calcolato tramite gradiente e Q da seconda armonica, utilizzando il segnale non filtrato.

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE [kJ/m ³ ciclo]	Q_SECOND_HARMONIC [kJ/m ³ ciclo]	Errore [%]	Beta
1	3449	572	446	21.9	1.912
2	14635	730	723	0.9	1.948
3	29954	758	737	2.8	1.924
4	42721	780	738	5.4	1.925
5	68321	798	708	11.3	1.937
6	73009	711	718	0.9	1.938
7	98247	769	637	17.1	1.941

Tabella 5.2– Risultati Q gradiente vs Q seconda armonica del segnale originale per il provino P_21, R=-1.

Analizzando la Tabella 5.2, si osserva come rispetto al caso precedente la differenza tra l'energia dissipata in calore ricavata tramite gradiente e tramite seconda armonica, sia notevolmente minore. Tranne due casi in cui l'errore si aggira attorno al 20%, negli altri cinque raffreddamenti l'errore è minore del 10%, ed in particolare in due casi sotto l'1%. Questo aspetto mostra come nuovamente il segnale originale non filtrato, nonostante contenga del rumore, grazie al fatto che i cicli di isteresi racchiudono un'area considerevole, dia ottimi risultati con Q gradiente. Questo avviene poiché avendo W molto elevate e uguali numericamente a Q, il segnale di plasticità è importante ed è poco affetto da rumore. Di seguito si riporta in Figura 5.24 il confronto tra il range seconda armonica originale e filtrata, mentre in Figura 5.25 si riporta l'andamento di Q gradiente, Q seconda armonica e il loro errori (dati presenti in Tabella 5.2)

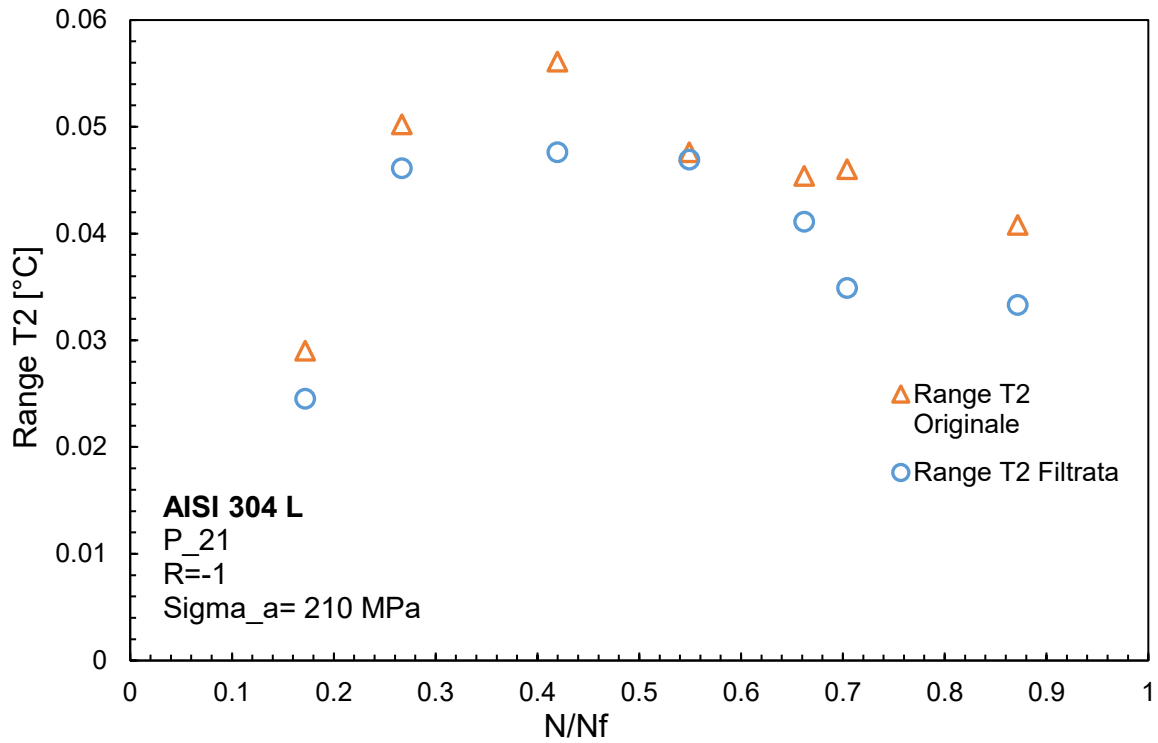


Figura 5.24 – Range seconda armonica originale e filtrata per il provino P_21, R=-1.

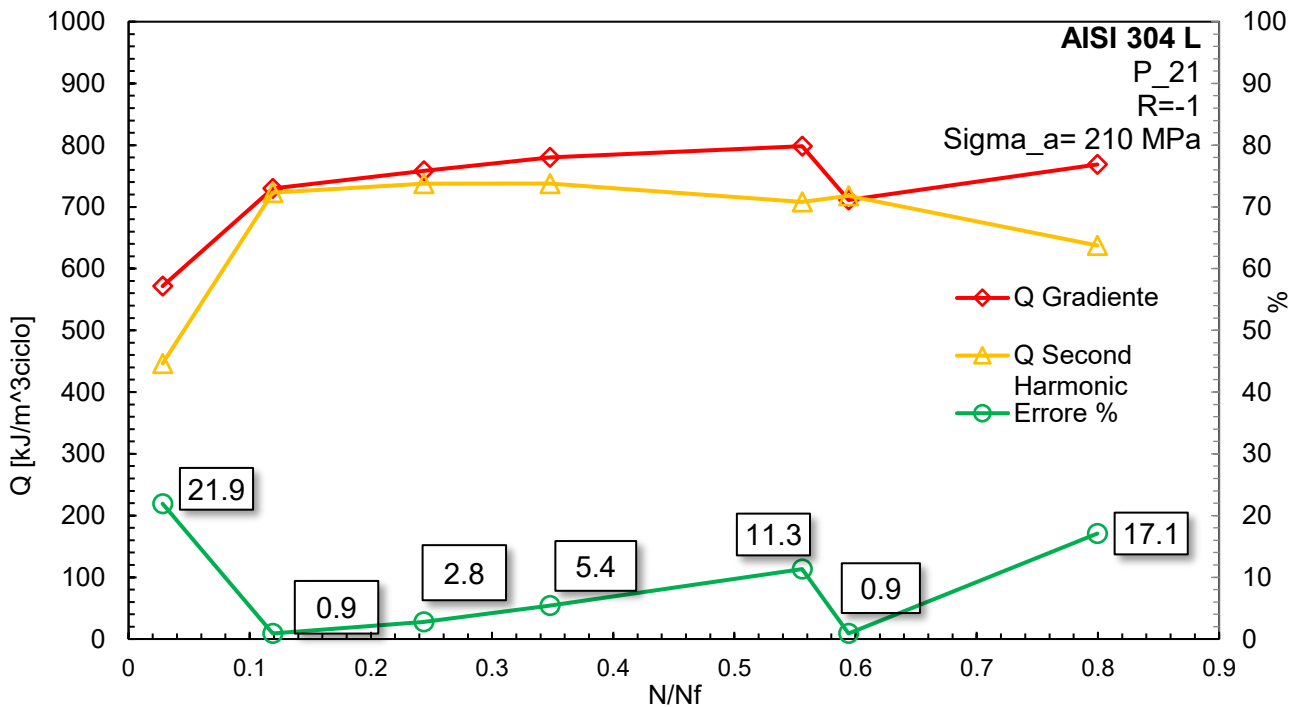


Figura 5.25 – Confronto Q seconda armonica segnale non filtrato e Q gradiente per il provino P_21, R=-1.

Si osserva dall'analisi di Figura 5.24 come durante la prova i valori di range seconda armonica originale abbiano valori nell'intorno di 0.045 °C. Ciò evidenzia come il rumore, che ha valore massimo di $8 \cdot 10^{-3}$ °C, sia praticamente ininfluenza sulle misure ad alto carico per R=-1, o comunque abbia una influenza ma in modo moderato (vedasi i risultati del provino P_17 precedentemente analizzato). In Figura 5.25 si vede graficamente come l'errore tra i due casi sia ingegneristicamente accettabile.

5.4.2 Energia dissipata Q: prove di fatica a gradini per R=-1

In questo paragrafo viene presentata una prova a gradini eseguita a R=-1, per il provino P_19. In particolare, sono stati eseguiti blocchi di carico per una durata di circa 15000 cicli, ad incrementi di 20 MPa alla volta, in modo da avere un danno limitato che non interferisse con la misura del blocco successivo, e che però dall'altro lato garantisse il raggiungimento della stabilizzazione. I cicli di isteresi e i relativi valori di area confrontati con quelli di Q da gradiente sono stati riportati nel Capitolo 4, Paragrafo 4.2.7. Di seguito si riportano lo stesso in Figura 5.26 i cicli di isteresi al variare del carico applicato in modo tale visualizzarne l'incremento di area all'aumentare del carico applicato, mentre in Figura 5.27 e 5.28 si riporta un esempio di mappa di delta T2 per basso e alto carico.

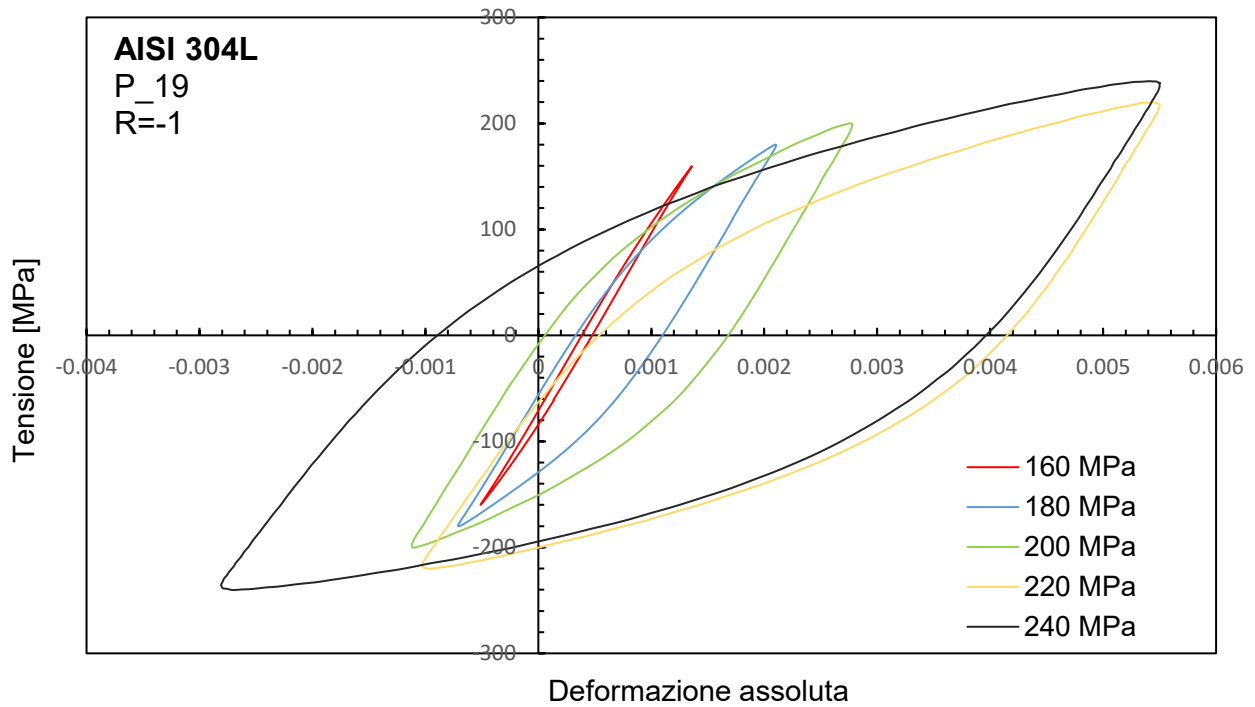


Figura 5.26 – Cicli di isteresi al variare del carico applicato per il provino P_19, R=-1.

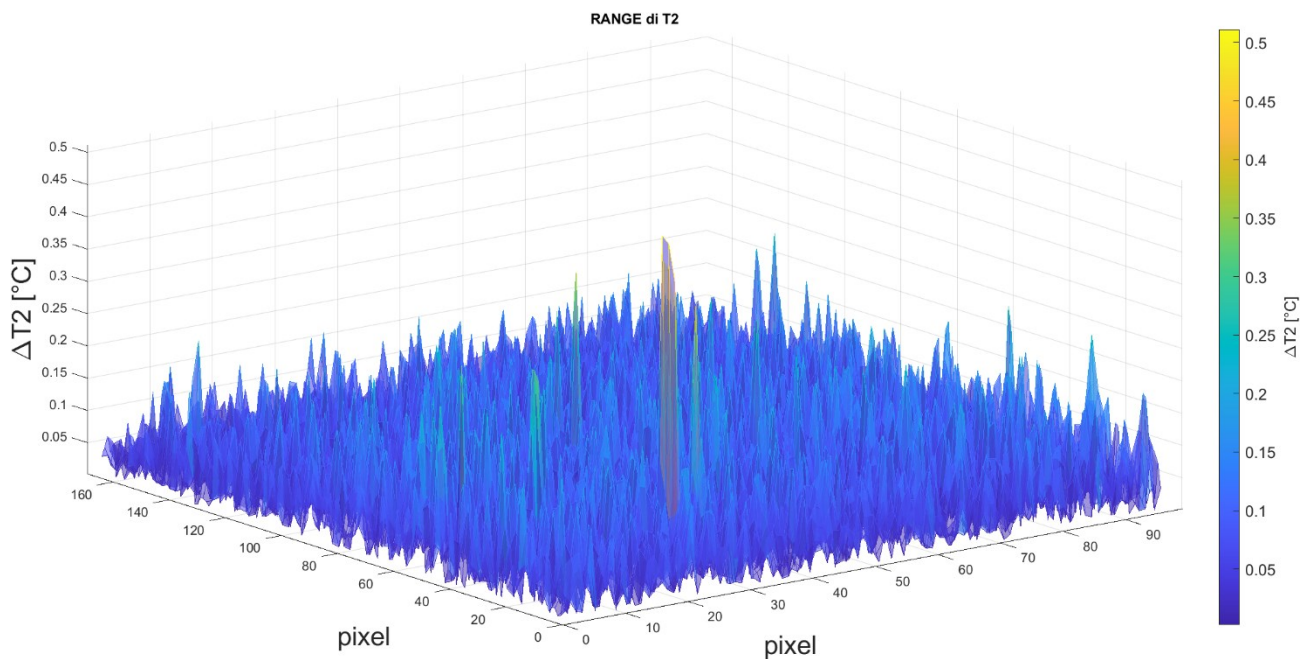


Figura 5.27 – Mappa range seconda armonica a 160 MPa per il provino P_19, R=-1.

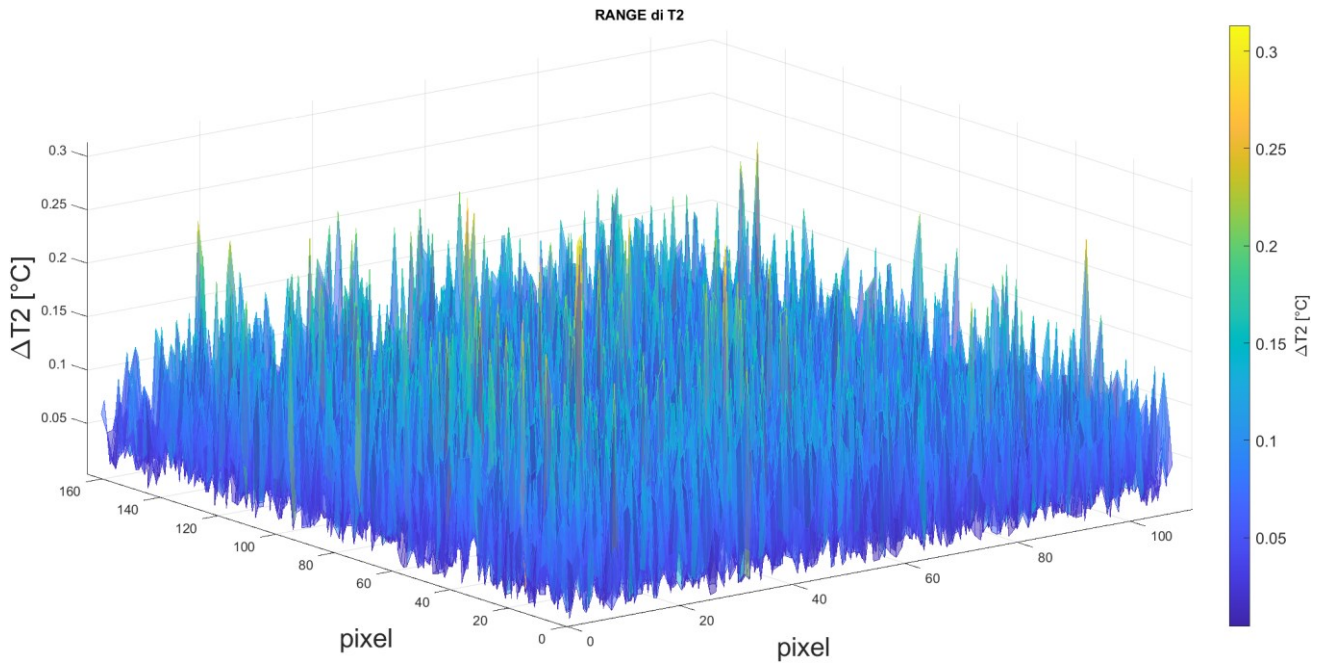


Figura 5.28 – Mappa range seconda armonica a 240 MPa per il provino P_19, R=-1.

Si osserva dalla Figura 5.26 come ci sia un forte incremento di area racchiusa dai cicli di isteresi, ovvero di energia che la macchina immette all'interno del materiale con l'incrementare dei carichi. Si vedrà nel seguito che questo fatto non avviene in modo così evidente per R=0.1.

Analizzando le Figure 5.27 e 5.28 si vede come ci siano in entrambi i casi dei forti picchi di range seconda armonica, ma la maggior parte del segnale si va ad attestare attorno a un valor medio diverso: in altre parole, a basso carico il segnale visivamente è posizionato più in basso, mentre ad alto carico si sposta verso valori maggiori. Il fatto che vengano raggiunti dei picchi di entità simile tra basso e alto carico è ancora una volta indice del fatto che è impossibile che questa situazione rappresenti la realtà fisica, in quanto a basso carico si devono ottenere dei picchi di minore entità.

Di seguito in Tabella 5.3 si riportano i valori di confronto applicando Q gradiente e Q da seconda armonica

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE	Q_SECOND_HARMONIC	Errore	
		[kJ/m ³ ciclo]	[kJ/m ³ ciclo]	[%]	Beta
1	16112	35	52	46.1	1.728015
2	25025	157	50	68.4	1.866029
3	39371	178	72	59.8	1.892237
4	51505	412	360	12.6	1.918785
5	62103	438	594	35.6	1.92762
6	66054	986	863	12.4	1.949652
7	81760	992	909	8.4	1.94725
8	88309	954	929	2.6	1.956326
9	89242	1376	1070	22.2	1.954647

Tabella 5.3– Risultati Q gradiente vs Q seconda armonica del segnale originale per il provino P_19, R=-1.

Si osserva che beta rimane pressoché costante anche aumentando i carichi in quanto n' non varia .

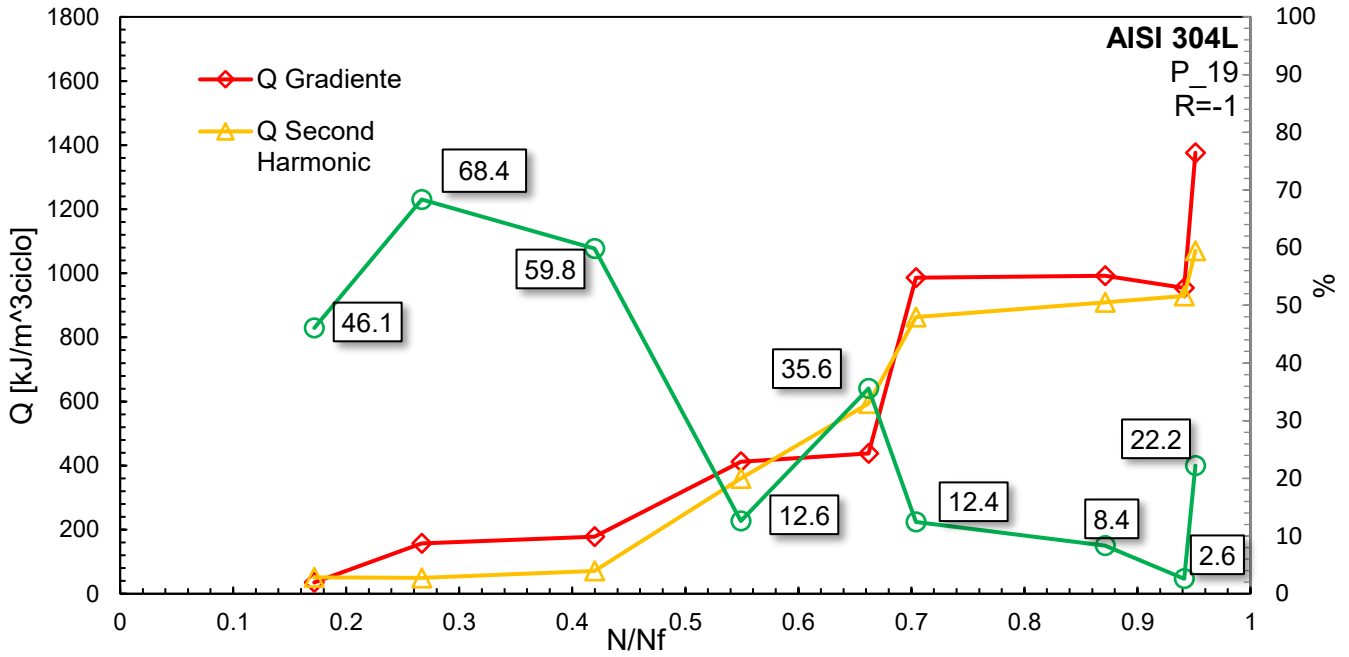


Figura 5.29 – Confronto Q seconda armonica segnale non filtrato e Q gradiente per il provino P_19, R=-1.

In Figura 5.29 sono stati riportati i risultati del confronto tra Q da gradiente e Q da seconda armonica, considerando nuovamente il segnale originale ovvero non filtrato. Ciò che si osserva è che l'errore decresce all'aumentare del carico applicato. Questo accade in quanto ad alti carichi si ha una maggiore energia assorbita dal materiale (maggiore area racchiusa dal ciclo di isteresi) il che comporta una maggiore plasticità del materiale e dunque una maggiore intensità del segnale di temperatura. Questa catena di eventi porta ad un valore di range di seconda armonica sufficientemente elevato tale da non risentire del rumore legato alla catena di misura. Il fatto che si abbia un aumento della dissipazione oltre ad essere visibile dall'aumento dell'area dei cicli di isteresi, è visibile anche dalla Figura 5.30 in cui si rappresenta la variazione di range seconda armonica al variare della vita del provino:

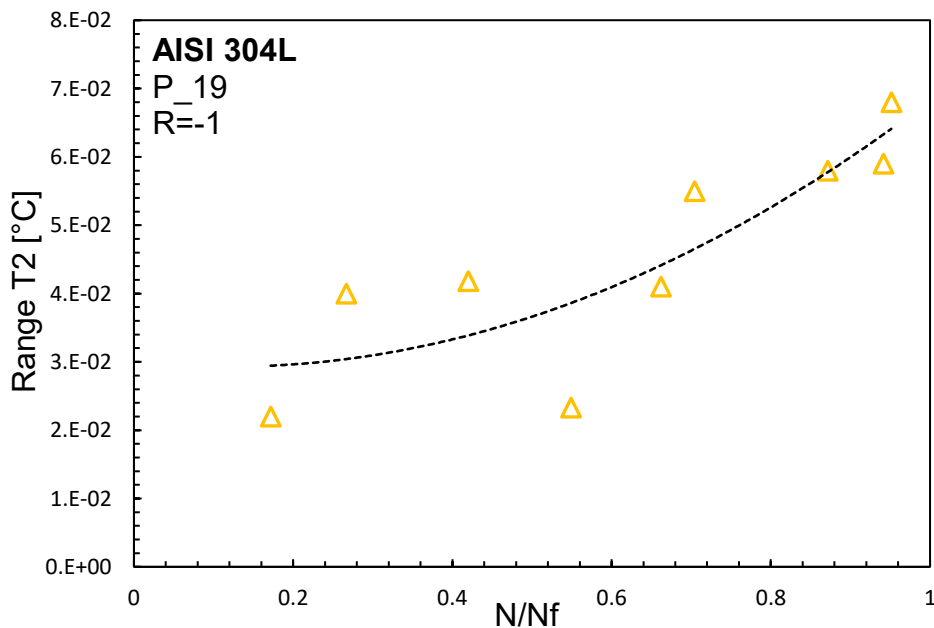


Figura 5.30 – Range di seconda armonica al variare della vita a fatica per il provino P_19, R=-1.

5.5 Q con Metodo Seconda Armonica per prove a R=0.1

In questo paragrafo vengono rappresentati dei risultati sperimentali per R=0.1, utilizzando il metodo Seconda Armonica, proposto in letteratura da Meneghetti e Ricotta in [23, 24] ed esteso al caso R>0 in [36]. Dapprima verranno presentati due casi a R=0.1 a 280 MPa e poi una prova a gradini. Verranno analizzate analogie e differenze tra le prove, confrontando i risultati con le prove a R=-1.

5.5.1 Energia dissipata Q: prove di fatica ad ampiezza costante R=0.1

Si vanno ora ad analizzare due prove di fatica ad ampiezza costante con R=0.1 e $\sigma_a=280$ MPa. Sono stati anche testati provini a basso carico, ma l'effetto della plasticità è stato così ridotto da essere impossibile da quantificare.

Il primo provino analizzato è il P_22 a R=0.1 e sollecitato ad un'ampiezza di tensione di 280 MPa. Di seguito in figura 5.31 si riportano i cicli di isteresi ottenuti dalle misurazioni fatte durante la prova, che sono stati già evidenziati nel Capitolo 4 ma che vengono mostrati per evidenziarne la differenza con i cicli di isteresi a R=-1:

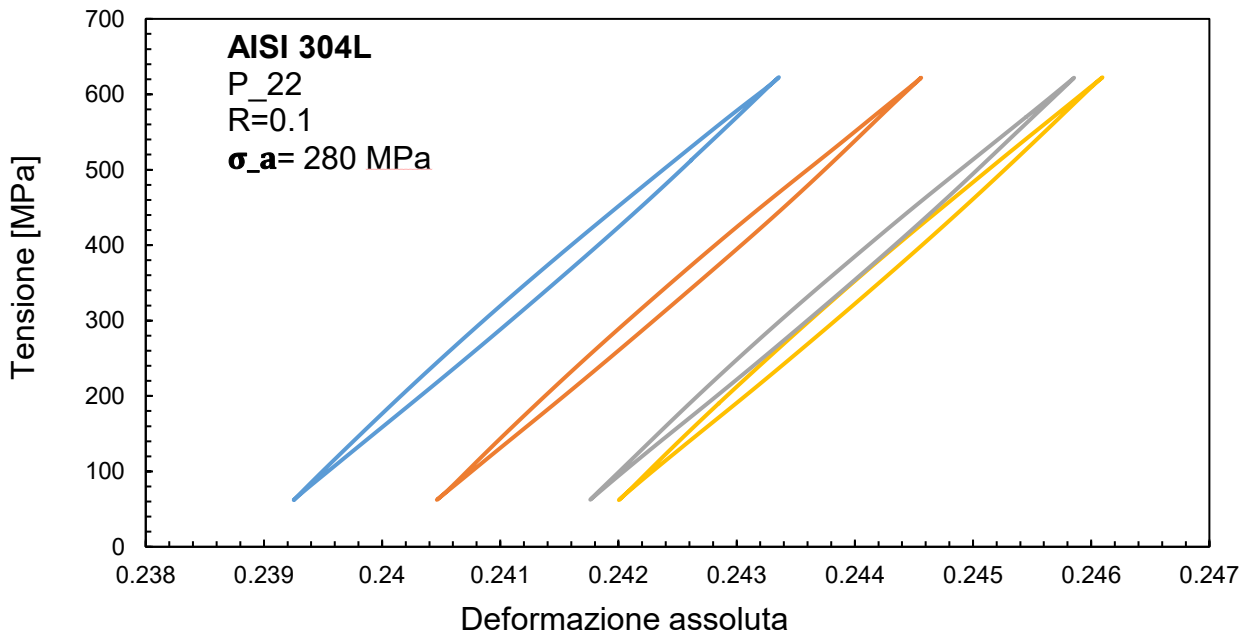


Figura 5.31 – Cicli di isteresi per il provino P_22, R=0.1.

Come si osserva rispetto alla Figura 5.11 i cicli hanno un'area ben ristretta, a causa dell'incrudimento del materiale (analizzato nel dettaglio nel Capitolo 3)

Dopo aver determinato l'area del ciclo di isteresi, e aver calcolato tramite la procedura descritta nel precedente paragrafo il parametro β , sono stati ricavati i valori della prima e seconda armonica del segnale di temperatura tramite la Trasformata Discreta di Fourier. Nel calcolo di Q da seconda armonica il range della prima armonica di T non ha influenza, ma avendo utilizzato tale valore per calcolare la costante termoelastica a fatica, se ne riporta lo stesso l'immagine grafica. In Figura 5.32 si riporta l'area della superficie del provino considerata per le analisi:

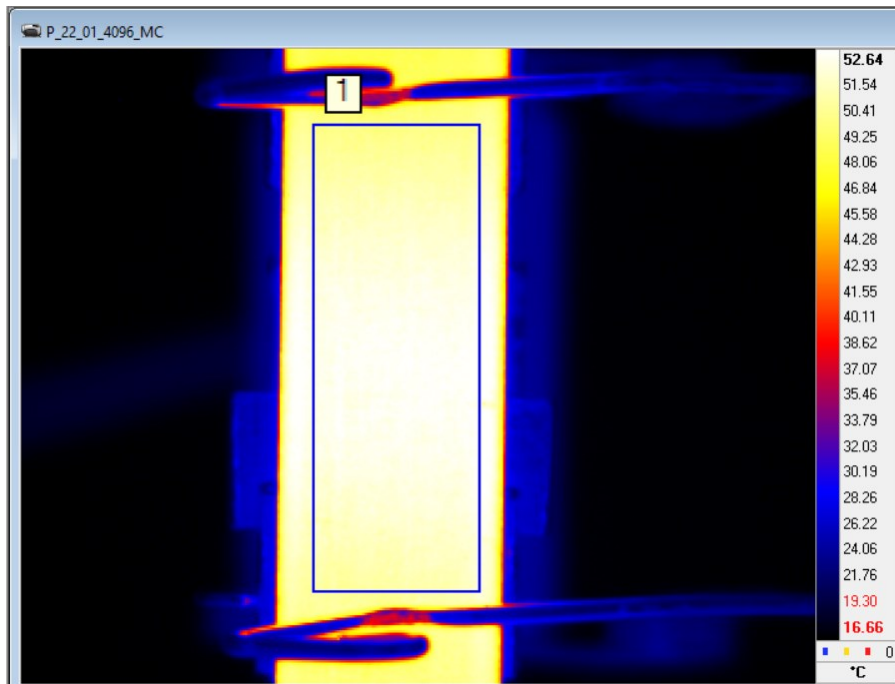


Figura 5.32 – Area di analisi per il provino P_22, R=0.1.

Una volta eseguita la FFT si ottengono appunto il range di prima e seconda armonica. Prima di rappresentarli, si riporta in Figura 5.33 l'andamento temporale di un pixel preso a riferimento (pixel centrale):

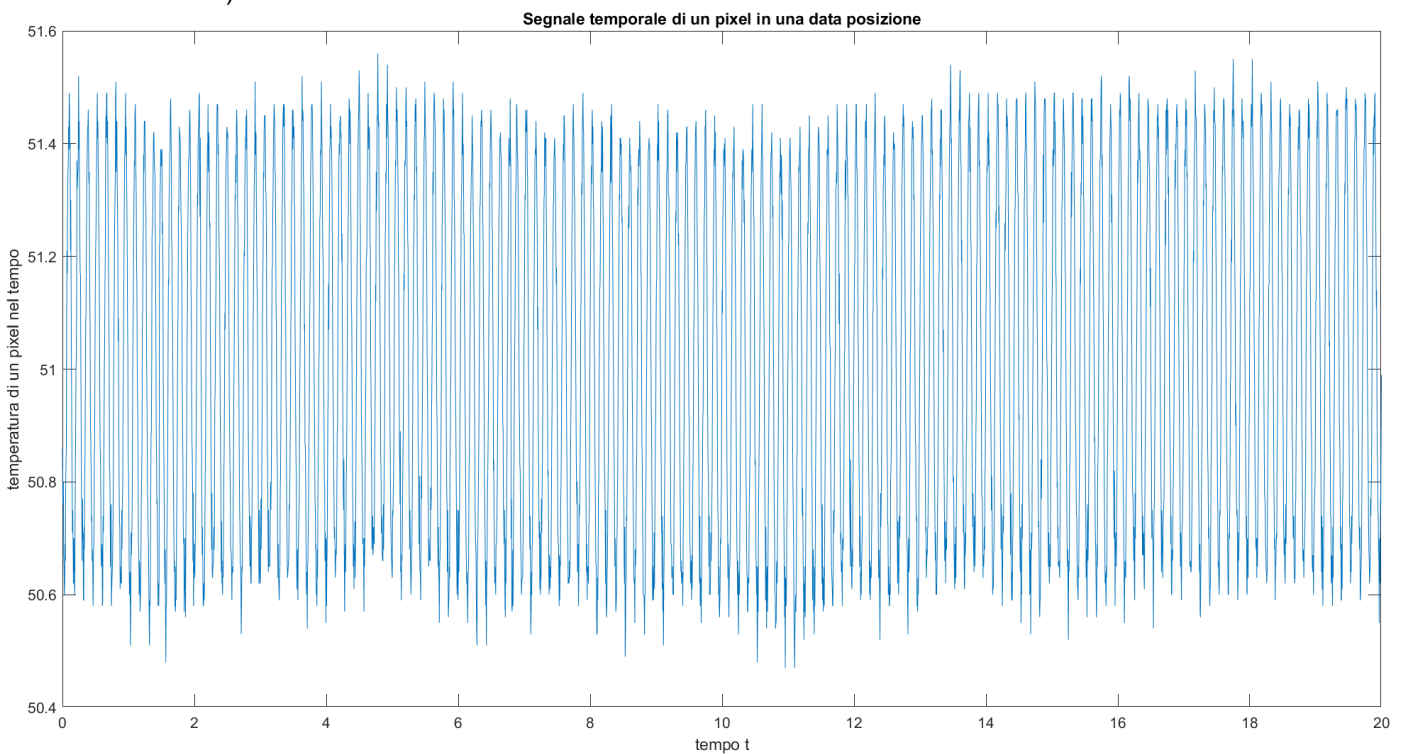


Figura 5.33 – Segnale tempo variante per un pixel centrale per il provino P_22, R=0.1.

Se si confronta la Figura 5.33 con la Figura 5.14, si osserva la differenza in termini di frequenza di carico: nel primo caso è stata impiegata una frequenza di 1.3 Hz, mentre in questo caso di 7 Hz.

Si riporta ora in Figura 5.34 il range di prima armonica del segnale di temperatura per il provino in esame:

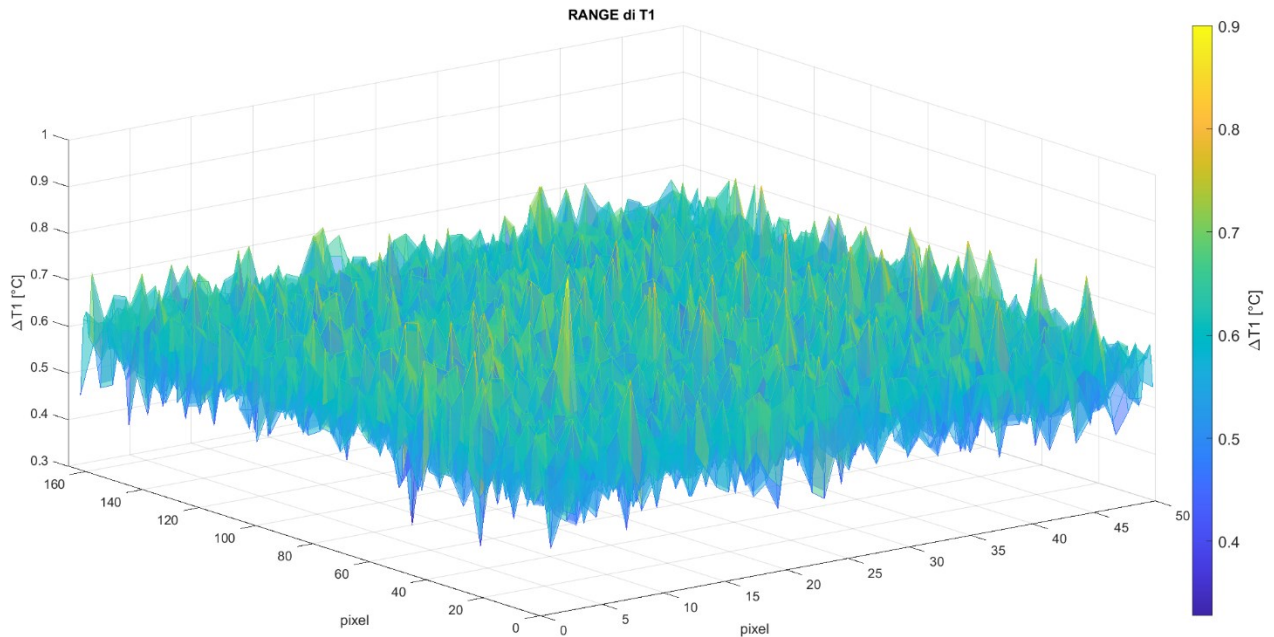


Figura 5.34 – Range di prima armonica per il provino P_22, R=0.1.

Dal confronto di Figura 5.34 con Figura 5.15 si osserva come nel caso della prova a R=0.1 si abbia un valore medio maggiore, nell'intorno di 0.6°C. Questo è legato al fatto che il range termoelastico è proporzionale, mediante K_m , a $\Delta\sigma$ e dunque in questo caso $\Delta\sigma = 560 MPa$ mentre a R=-1 $\Delta\sigma = 420 MPa$. In Figura 5.35 si riporta invece il grafico 3D del range di seconda armonica:

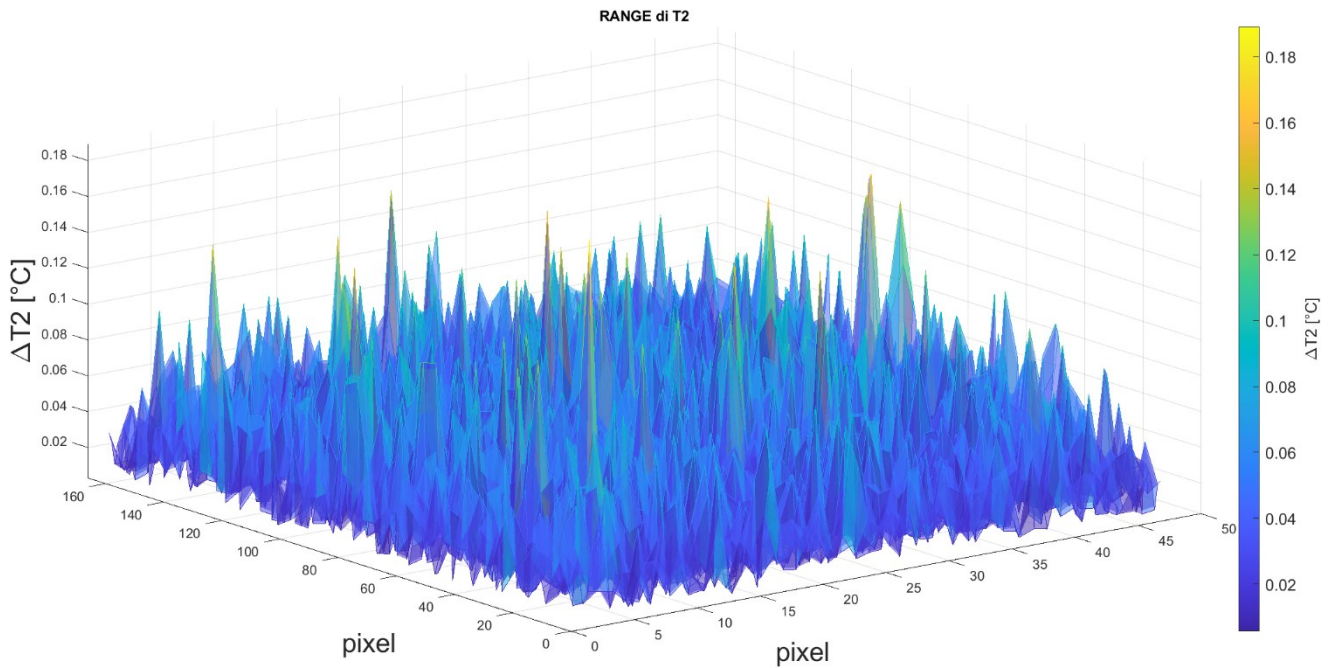


Figura 5.35 – Range di seconda armonica per il provino P_22, R=0.1.

Anche in questo caso si sono osservati delle differenze tra un pixel e l'altro in termini di range di seconda armonica anche di un ordine di grandezza. Si è ritenuto opportuno dunque fare un confronto tra il segnale originale e quello filtrato, al fine di valutare se nel caso di $R=0.1$, si ottenevano gli stessi risultati che a $R=-1$. Di seguito si rappresenta in Figura 3.36 la mappa 3D del range seconda armonica filtrata:

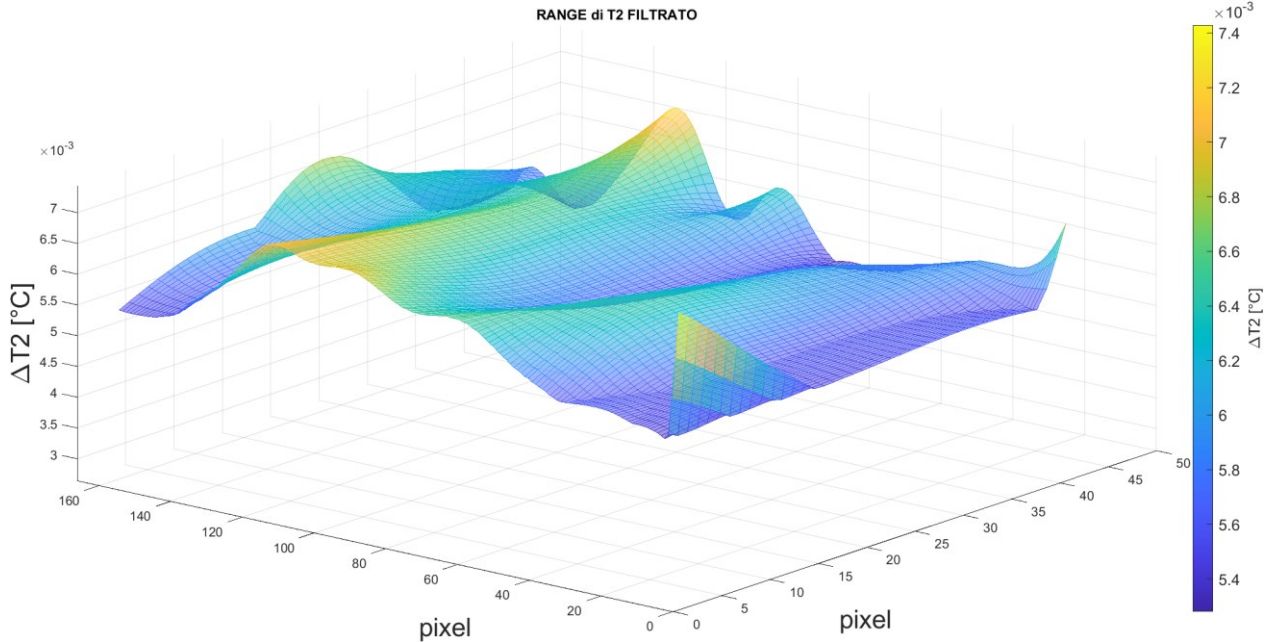


Figura 5.36 – Range di seconda armonica per il provino P_22, $R=0.1$.

Nuovamente si osserva come essa appaia molto più bilanciata all'interno della superficie, in quanto i picchi e le valli vengono ad essere filtrati mediante filtro Gaussiano per immagini. Si riportano ora le due precedenti immagini in termini di mappe 2D sulla superficie:

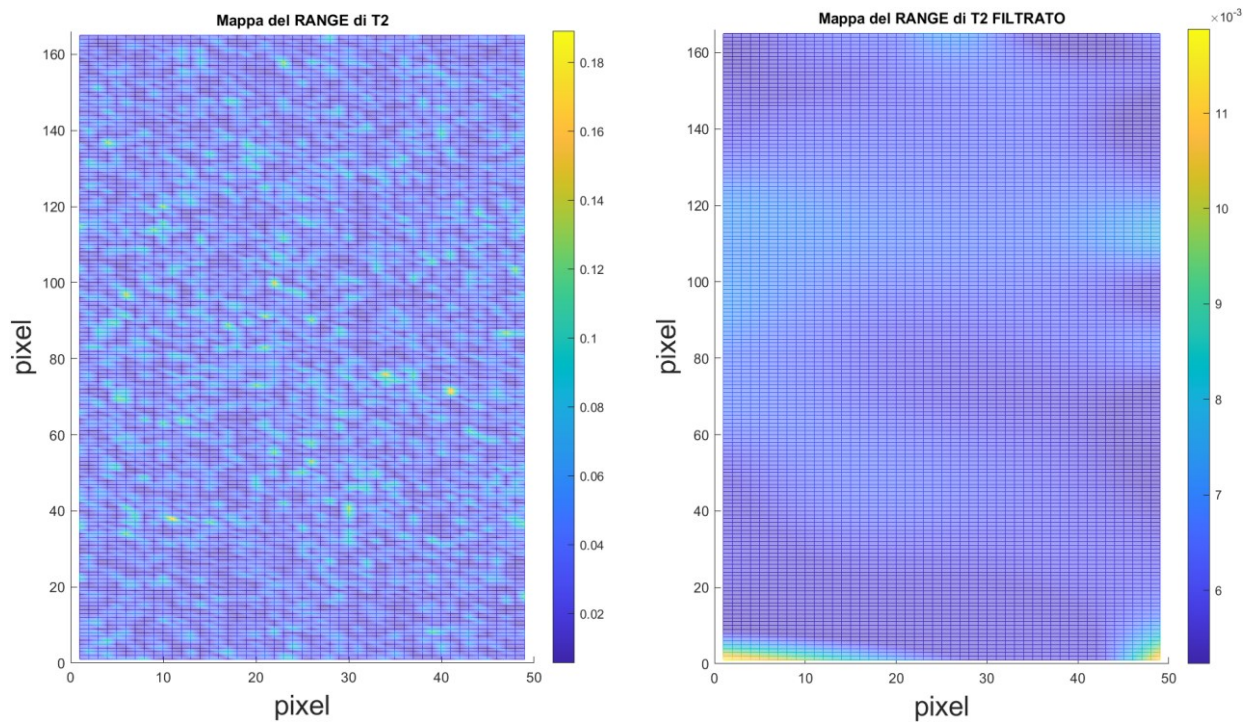


Figura 5.37– Mappa del range della seconda armonica del segnale originale (a sinistra) e filtrato (a destra) di temperatura per il provino P_22, $R=0.1$.

Dall'analisi delle due Figure, si osserva come il valore di range di seconda armonica sia molto più uniforme andando ad applicare il filtro. Per capire se il filtro abbia o meno ridotto l'effetto del rumore oppure se abbia tagliato via anche del segnale, sono stati calcolati i valori di Q con l'approccio Seconda Armonica e confrontati con quelli di Q ottenuto tramite Gradiente di raffreddamento. Di seguito in Figura 5.38 si riportano i valori utilizzando il segnale originale, ovvero non filtrato:

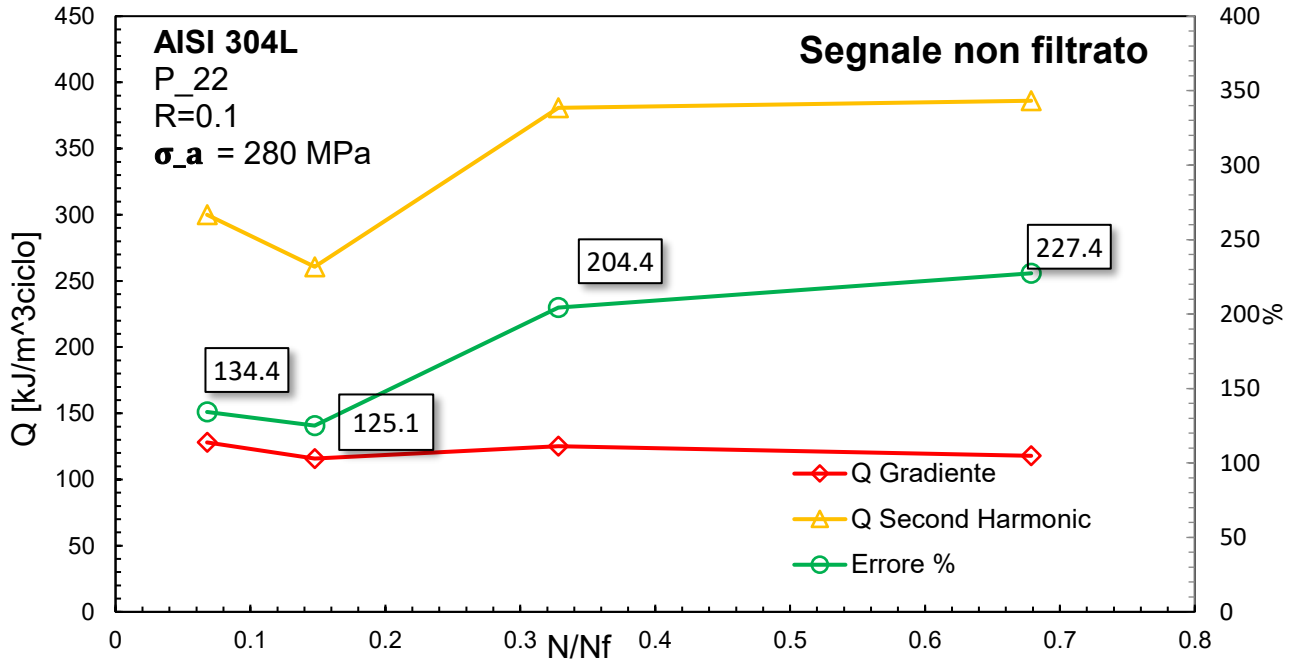


Figura 5.38– Q da gradiente vs Q da seconda armonica con segnale originale per il provino P_22, R=0.1.

Ciò che si osserva dalla Figura 5.38 è che gli errori nelle misurazioni sono sempre maggiori del 100% con picchi anche superiori al 200%. Questo aspetto lo si è ritenuto legato alla difficoltà di avere forti segnali anche ad alto carico a R=0.1: se da un lato aumentare i carichi a R=-1 comporta un aumento considerevole di energia che viene accumulata meccanicamente sul materiale, farlo a R=0.1 non dà gli stessi risultati. Ciò è dovuto al fatto che a causa della presenza di una tensione media diversa da zero, per salire ad alto carico la tensione massima raggiunge valori molto elevati: basti pensare che a 300 MPa si raggiungono i 666 MPa di tensione massima, ben superiori allo snervamento e superiori anche alla tensione di rottura, stimata da una prova statica in controllo di spostamento e pari a 577 MPa. Ciò significa che se il materiale non si è rotto staticamente, vuole dire che esso si è incrudito e ciò ha comportato un aumento importante della tensione di rottura; d'altro canto, però un incrudimento del materiale genera dei cicli di isteresi di area estremamente ridotta, che è ciò che accade in queste prove. Siccome l'area racchiusa dal ciclo di isteresi è legata all'energia che la macchina immette nel provino, più si sale con i carichi, più si pensa di andare ad immettere maggiore energia, mentre in realtà si sta andando verso la progressiva chiusura dei cicli di isteresi a causa dell'incrudimento. Questo fatto giustifica il perché anche salendo con i carichi non si abbia la possibilità di avere sempre dei segnali stabili di temperatura.

Alla luce di queste osservazioni, si è proceduto ad applicare il filtro gaussiano dopo aver eseguito la FFT e i risultati sono stati confrontati con Q da gradiente di temperatura. I risultati numerici sono prima espressi in forma tabellare in Tabella 5.4 e poi graficamente, in Figura 5.39, considerando i valori filtrati.

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE [kJ/m ³ ciclo]	Q_SECOND_HARMONIC [kJ/m ³ ciclo]	Errore [%]	Beta
1	3438	128	151	18.2	2.848
2	7482	116	119	2.8	2.901
3	16636	125	139	11.3	2.835
4	34397	118	112	4.7	2.971

Tabella 5.4– Risultati Q gradiente vs Q seconda armonica del segnale filtrato per il provino P_22, R=0.1.

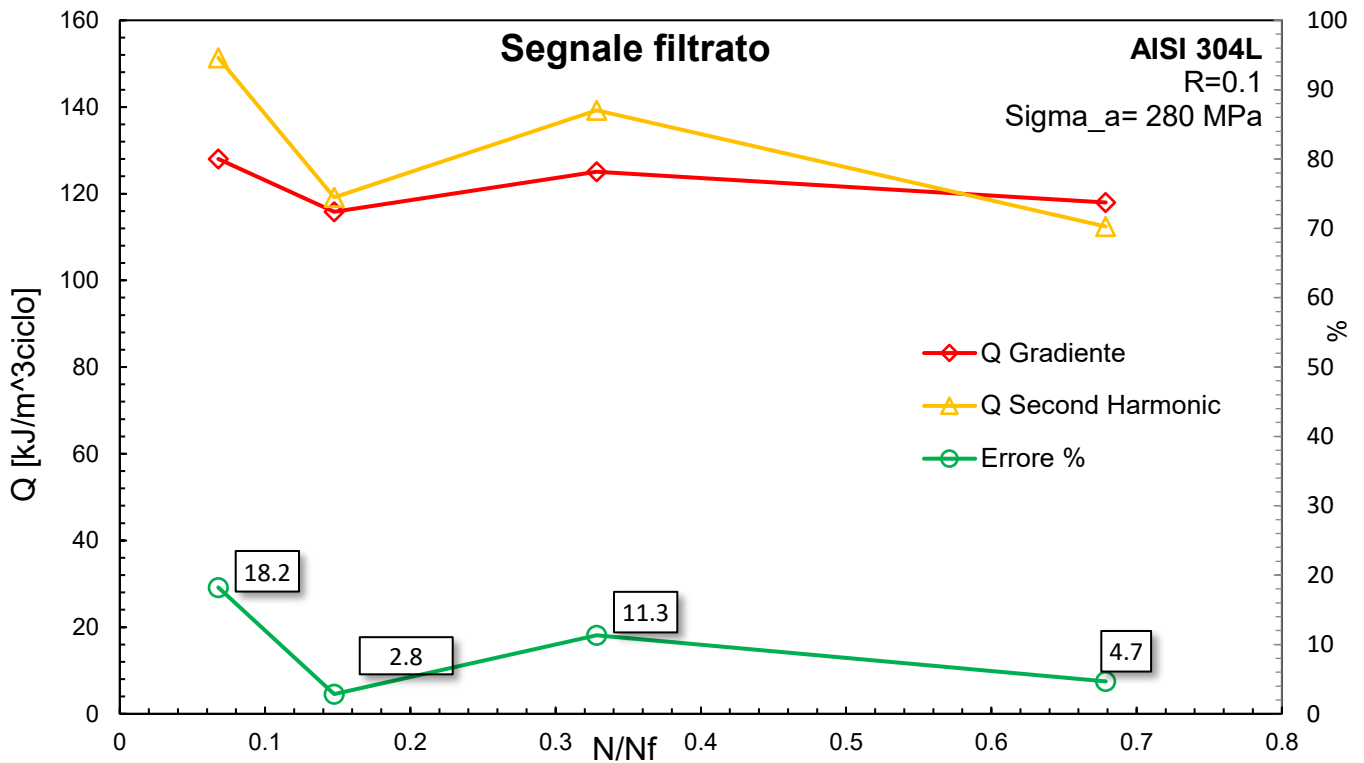


Figura 5.39– Q da gradiente vs Q da seconda armonica con segnale filtrato per il provino P_22, R=0.1.

Dall'osservazione della tabella e del grafico sopra, si evince che in questo caso l'effetto del filtraggio garantisce errori ingegneristicamente accettabili, con un solo picco massimo di 18%. Si osserva dunque una situazione opposta a quella verificatasi per le prove a R=-1, laddove il filtraggio andava a tagliare troppo segnale oltre che rumore.

Ciò che si può concludere analizzando tali grafici, è che per R=0.1, il segnale originale contiene molto rumore, in quanto l'ordine di grandezza del range di seconda armonica non filtrato è dell'ordine di circa $2 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$. Tale valore è comparabile con quello del rumore massimo ricavato di $8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$. Questo significa inevitabilmente che a R=0.1 il segnale legato alla plasticità è cos' basso da non poter utilizzare il segnale originale, bensì vi sia l'obbligo di effettuare un qualche tipo di filtraggio.

In Figura 5.40 si va a rappresentare la differenza che sussiste tra il range della seconda armonica originale e quello filtrato, in modo da mettere in luce quanto il segnale originale sia carico di rumore e di quanto esso necessiti senza dubbio di un filtraggio.

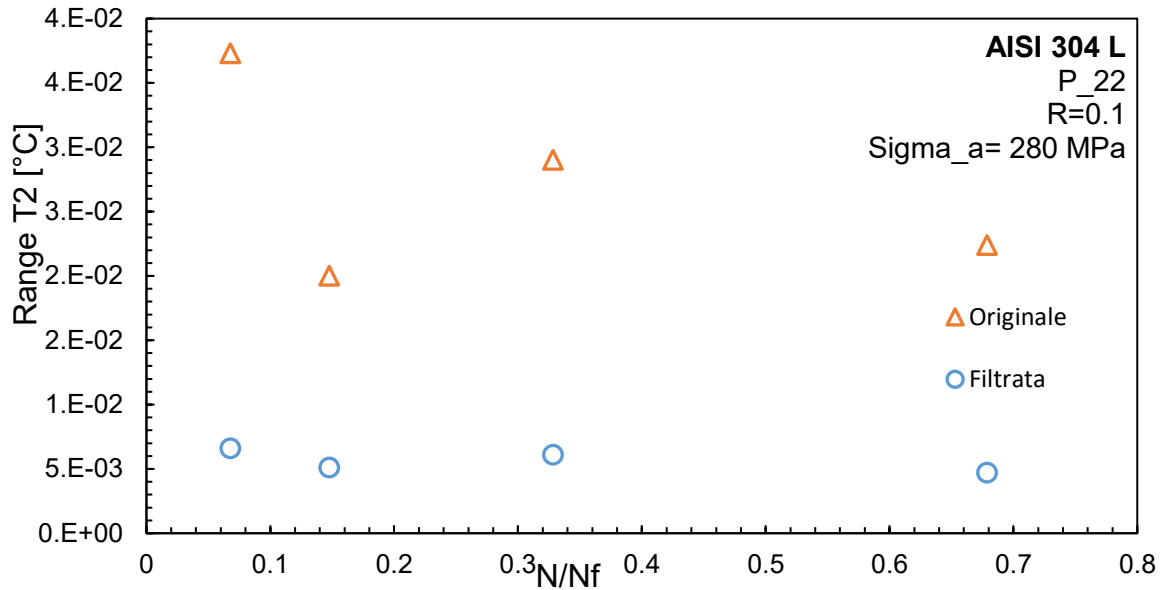


Figura 5.40– Differenze tra range di seconda armonica originale e filtrata per il provino P_22, R=0.1.

Come si osserva, il valore di seconda armonica filtrata ha gli stessi valori del rumore dato dalla catena di misura, sinonimo che ad alto carico non si riesce ad avere un segnale pulito e stabile per un R=0.1.

Questo fatto legato al rumore è ancor più evidente nella prova P_23 effettuata sempre con una ampiezza di tensione pari a 280 MPa. I cicli di isteresi vengono riportati in Figura 5.41

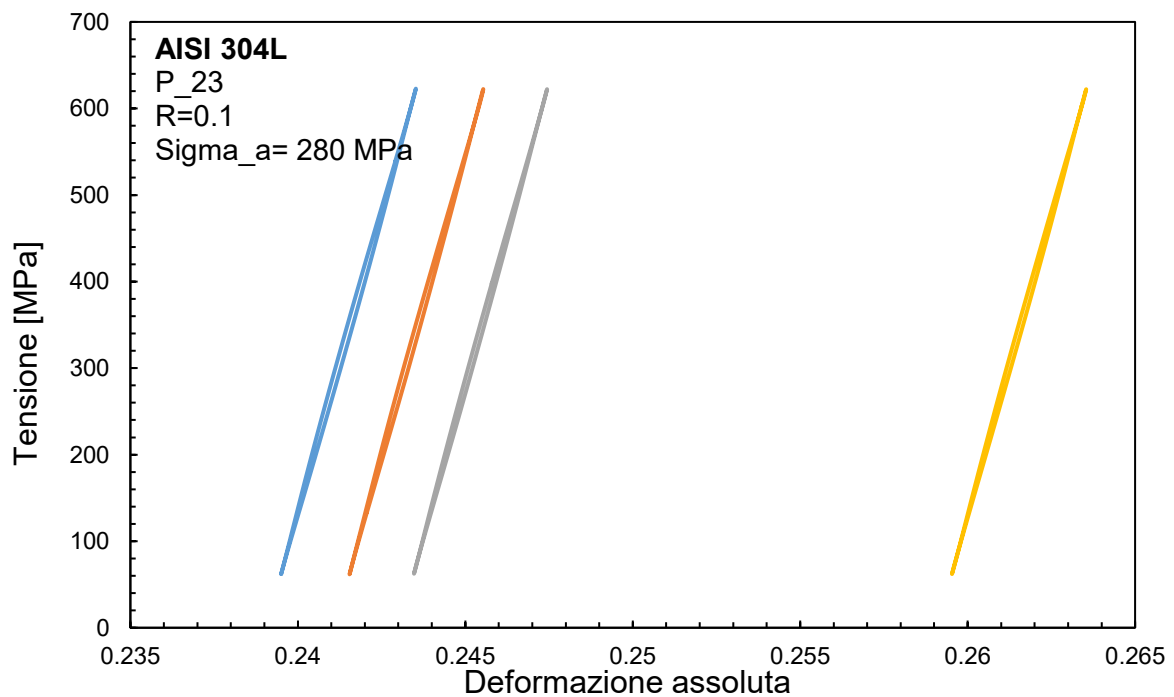


Figura 5.41– Cicli di isteresi per il provino P_23, R=0.1.

In particolare, sono state acquisite un numero maggiore di cicli e di gradienti, ma nei cicli intermedi l'estensometro ha avuto dei problemi di calibrazione e ha fornito dei valori errati, pertanto questi cicli

non vengono riportati in Figura 5.41. In Figura 5.42 si riporta invece il confronto tra Q e W, ricordando come detto che non tutti i cicli sono stati acquisiti correttamente. Viceversa, in termini di Q si riporta l'andamento di tutte le misurazioni:

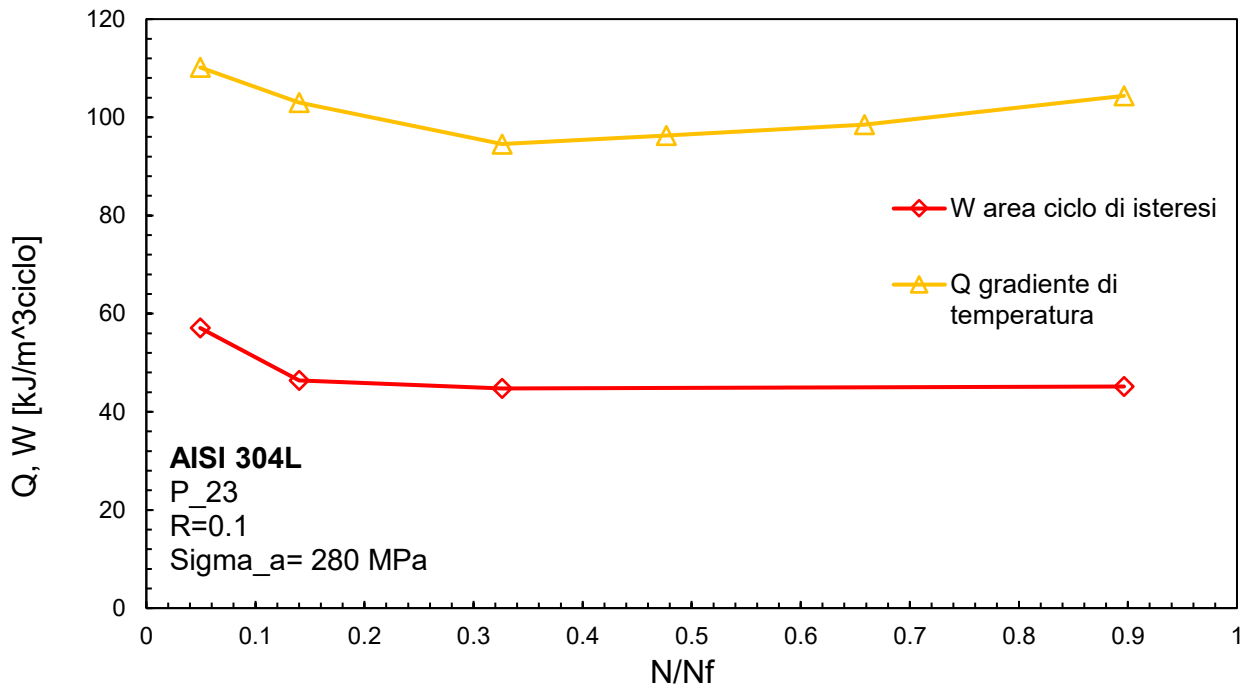


Figura 5.42– Confronto Q da gradiente vs W area del ciclo di isteresi P_{23} , $R=0.1$.

Si osserva nuovamente che per $R=0.1$ i valori di Q sono nettamente superiori rispetto ai valori di W, area del ciclo di isteresi. Si va ora a riportare in Figura 5.43 il range della seconda armonica originale vs filtrata:

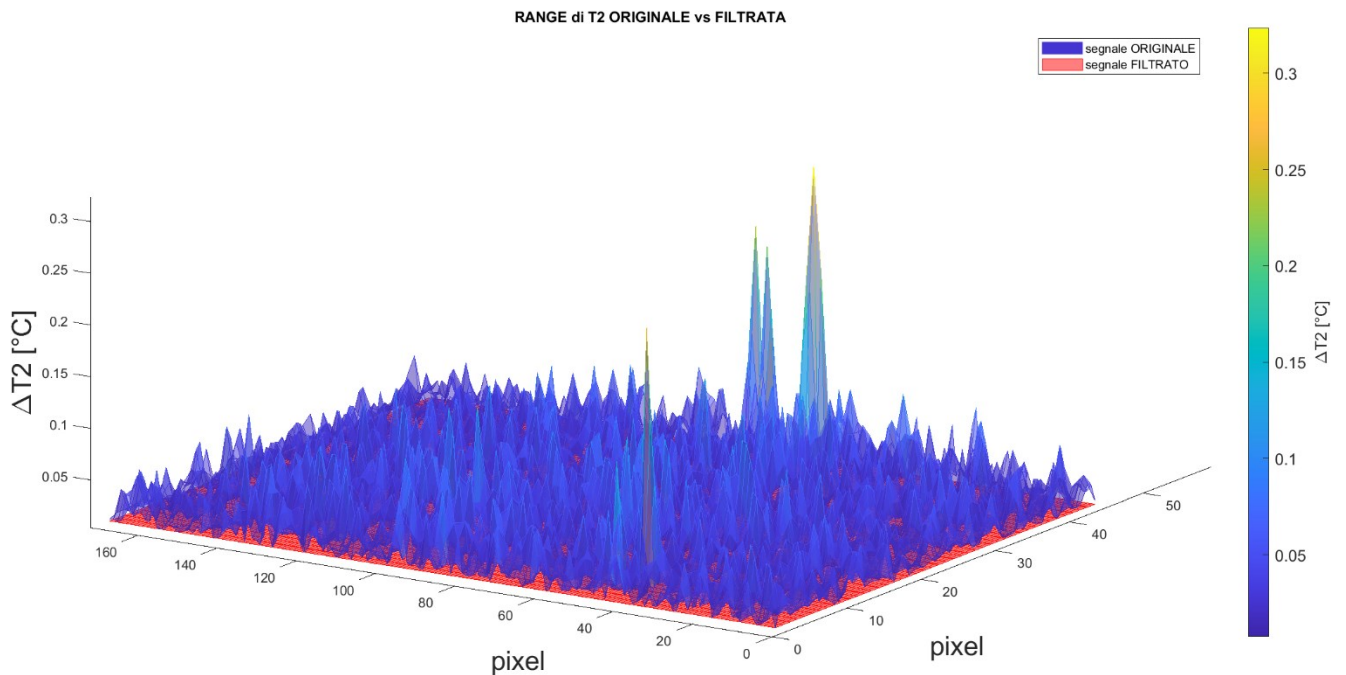


Figura 5.43– Range seconda armonica originale e filtrata i P_{23} , $R=0.1$.

Di seguito in Figura 5.44 si riporta la mappa 2D originale (a sinistra) e filtrata (a destra)

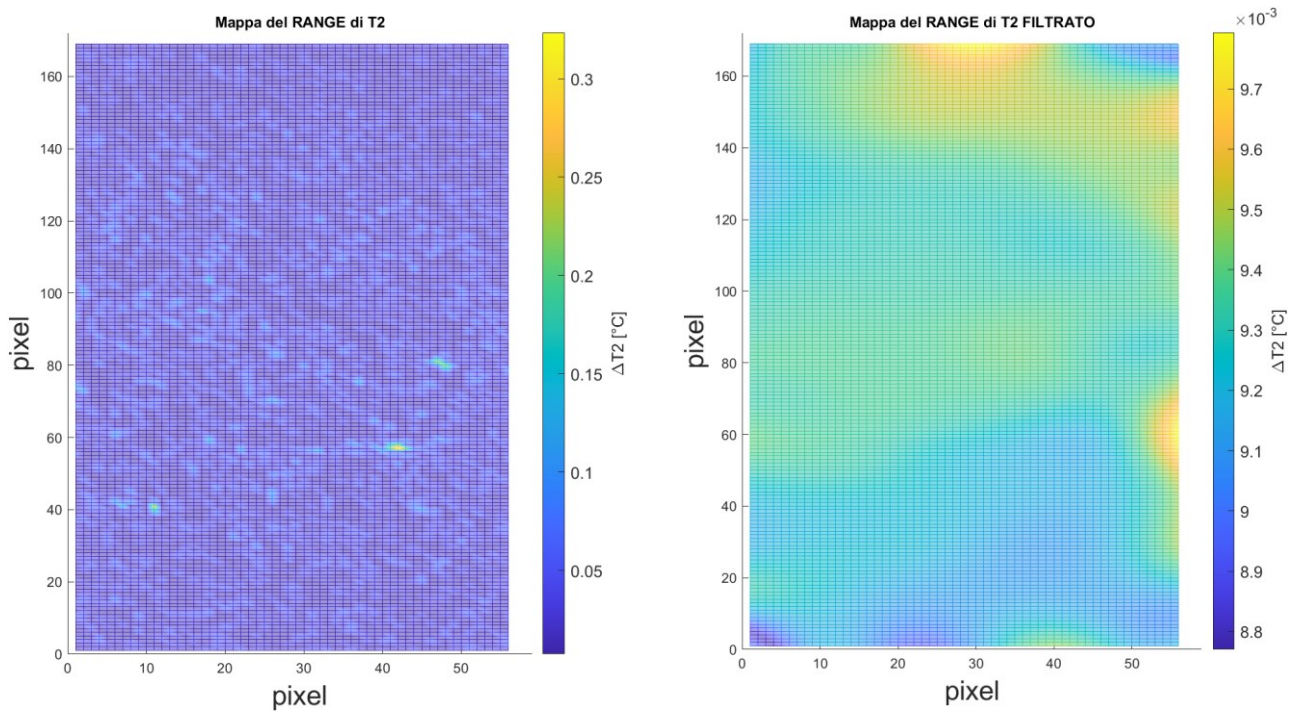


Figura 5.44 – Mappa range seconda armonica originale e filtrata il provino P_23, R=0.1.

Si riporta ora in tabella 5.5 il confronto tra Q gradiente e Q da seconda armonica per il segnale filtrato, in quanto come già dimostrato per l'altra prova, il segnale originale è troppo elevato poiché contiene al suo interno del rumore legato alla catena di misura.

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE	Q_SECOND_HARMONIC	Errore	Beta
		[kJ/m ³ ciclo]	[kJ/m ³ ciclo]	[%]	
1	3796	110	145	32	2.848
2	10749	103	134	30	2.901
3	25040	95	54	43	2.835
4	36605	104	127	21	2.971

Tabella 5.5– Risultati Q gradiente vs Q seconda armonica del segnale filtrato per il provino P_23, R=0.1.

Si osserva dalla colonna contenente l'errore, che esso assume valori maggiori del 20%, e pertanto i risultati ottenuti in termini di Q da seconda armonica non sono ingegneristicamente accettabili. Ciò avviene perché con tutta probabilità, non si riesce a filtrare completamente il rumore. I risultati di Q da seconda armonica filtrata si discostano con un errore maggiore di quanto accadeva per il provino P_22: questo è anche legato al fatto che nonostante siano a parità di carico, per il P_23 Q da gradiente sia minore di quello per il P_22. Ciò significa minore energia in gioco e dunque una maggiore influenza del rumore nella misurazione.

I risultati espressi in forma tabellare, vengono poi rappresentati in forma grafico in Figura 5.45, mostrano Q calcolato con la tecnica del gradiente di raffreddamento vs Q calcolato con la tecnica della seconda armonica:

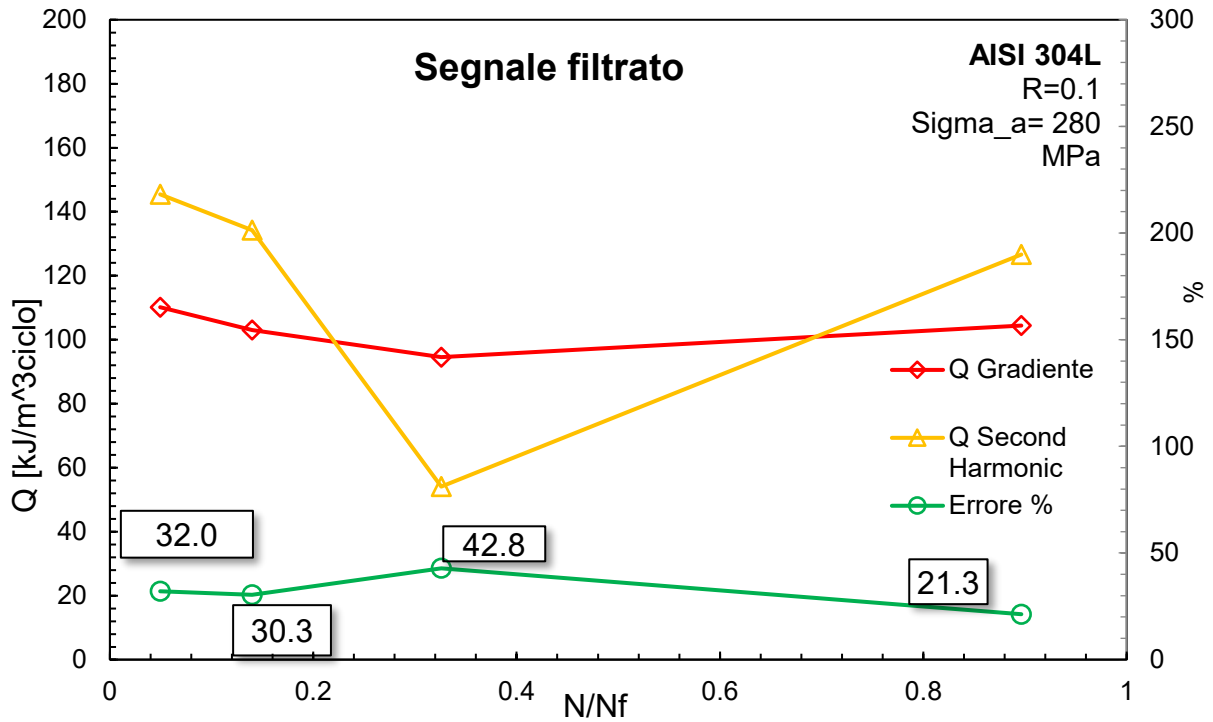


Figura 5.45 – Q gradiente vs Q seconda armonica segnale filtrato per il provino P_23, R=0.1.

Di seguito in Figura 5.46 si riporta il confronto tra range di seconda armonica originale e filtrata, mettendo in luce ancora quanto sia sovrastimata l'armonica del segnale originale a causa del rumore

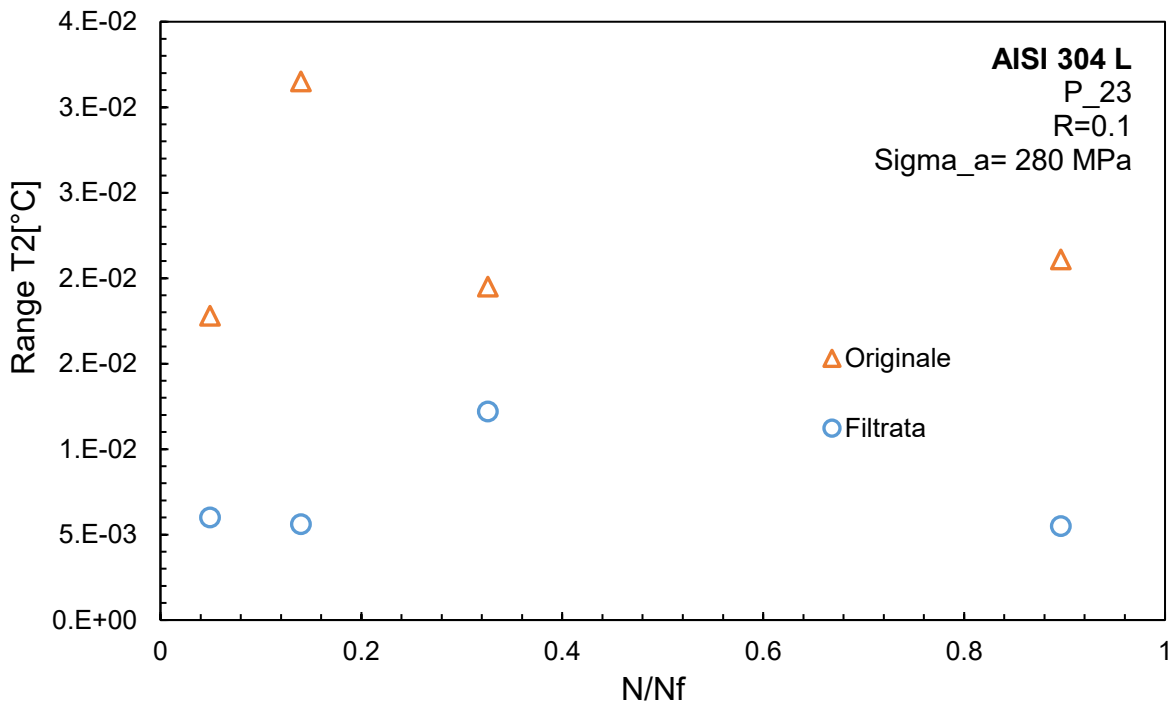


Figura 5.46 – Range seconda armonica filtrata e originale per il provino P_23, R=0.1.

5.5.2 Energia dissipata Q: prove di fatica a gradini per R=0.1

In questo paragrafo si riporta l'esempio di una prova a gradini per R=0.1, ovvero il provino P_18. In particolare, sono stati eseguiti blocchi di carico per una durata di circa 15000 cicli, ad incrementi di 20 MPa alla volta, in modo da avere un danno limitato che non interferisse con la misura del blocco successivo, e che però dall'altro lato garantisce il raggiungimento della stabilizzazione. I cicli di isteresi e i relativi valori di area confrontati con quelli di Q da gradiente sono stati riportati nel Capitolo 4, Paragrafo 4.2.8. Di seguito si riportano lo stesso in Figura 5.47 i cicli di isteresi al variare del carico applicato in modo tale visualizzare quanta poca plasticità ci sia in queste prove a R=0.1, mentre in Figura 5.48 si riporta la mappa di delta T2 per un carico di 280 MPa. Non viene riportato il grafico a basso carico, in quanto le energie in gioco sono dell'ordine di $20 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ ciclo})$, troppo basse per dare luogo a dei segnali attendibili. Anche i valori impiegati come confronto tra Q Gradiente e Q seconda armonica, fanno riferimento a carichi che partono da 260 MPa, in quanto per carichi minore la plasticizzatine è troppo bassa per dare misure attendibili.

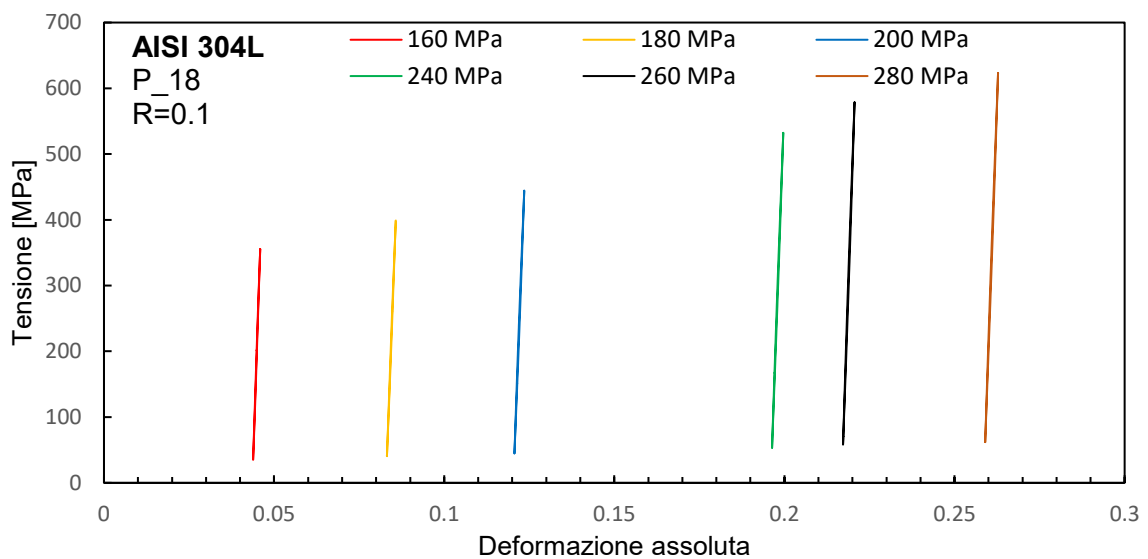


Figura 5.47 – Cicli di isteresi al variare del carico per il provino P_18, R=0.1.

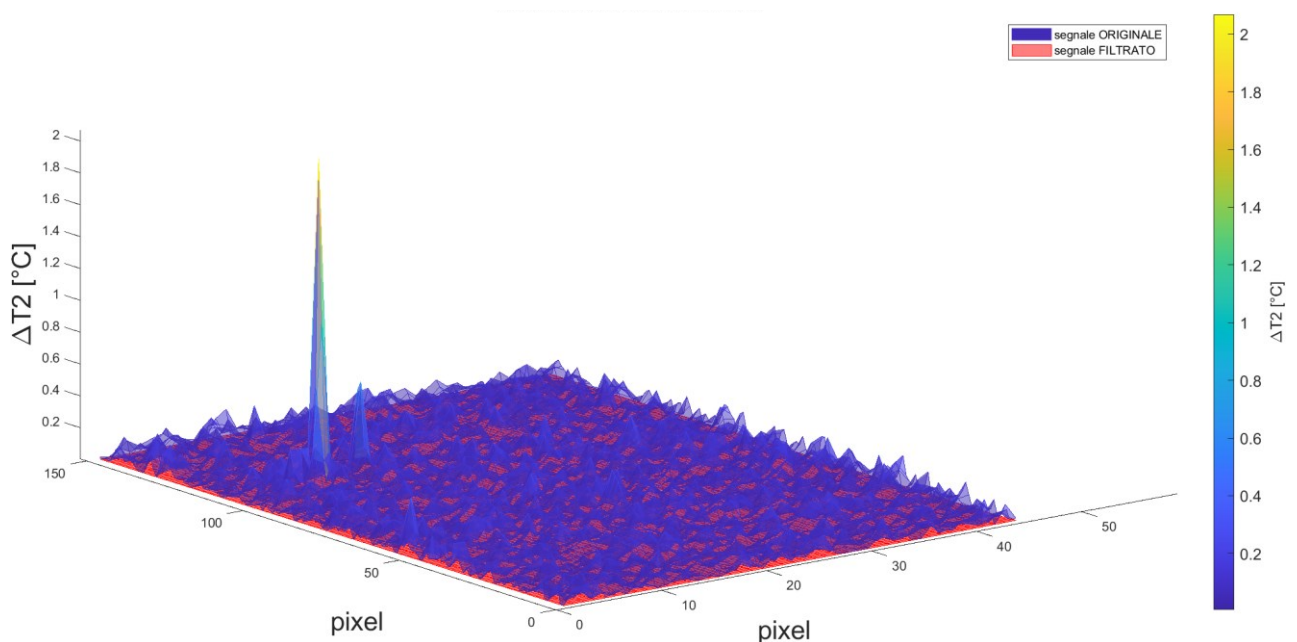


Figura 5.48 – Range seconda armonica originale e filtrata per il provino P_18, R=0.1.

Dall'analisi di Figura 5.48, si vede come esistano dei picchi presenti sulla superficie del provino, dovuti probabilmente alla presenza di strisci sulla superficie dei provini causati dall'estensometro: nelle prove a gradini infatti, a causa dell'elevata deformazione del provino con l'aumento dei carichi, si era costretti a togliere l'estensometro e a doverlo rimettere nella sua posizione, salvando la deformazione media, in quanto veniva altrimenti superato sia meccanicamente che elettricamente il limite dello stesso (le deformazioni a 280 MPa hanno raggiunto anche il 26%).

Fatta tale precisazione, anche riducendo l'area e togliendo via quella porzione, il risultato mediato della seconda armonica originale non ha influenza, in quanto esso coinvolge un numero limitato di pixel. Si riportano nel seguito in Figura 5.49 le mappe 2D per i segnali originale e filtrato:

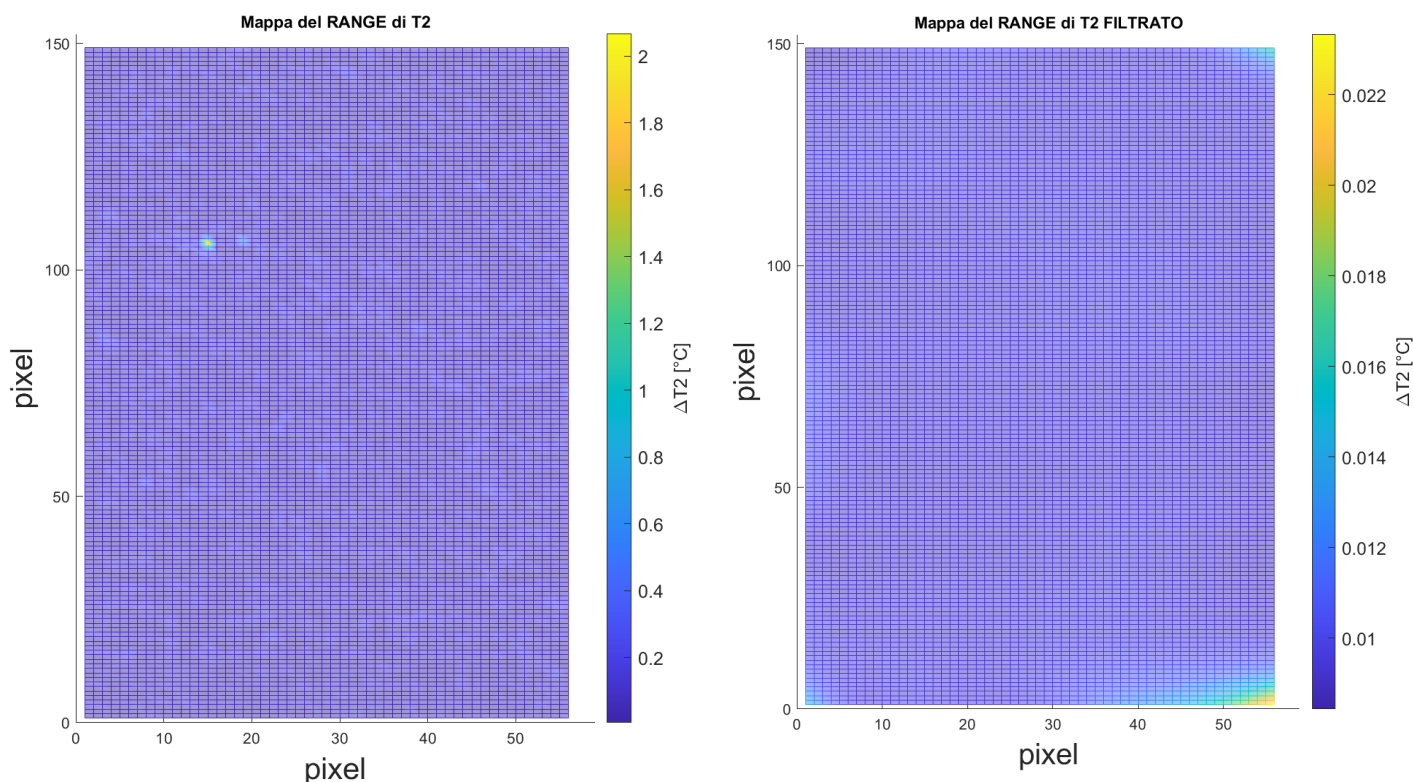


Figura 5.49 – Mappa di range seconda armonica originale e filtrata per il provino P_18, R=0.1.

Si riporta ora in Tabella 5.6 il confronto fatto solo sugli ultimi tre gradienti, rispettivamente a 260 MPa il primo e a 280 MPa gli ultimi due:

N raffreddamento	Cicli	Q_GRADIENTE [kJ/m ³ ciclo]	Q_SECOND_HARMONIC [kJ/m ³ ciclo]	Errore [%]	Beta
9	79809	95	193	103	2.848
10	83737	109	203	86	2.901
11	95235	99	162	63	2.835

Tabella 5.6 – Q gradiente vs Q seconda armonica segnale filtrato per il provino P_18, R=0.1.

Ciò che si osserva subito è che l'errore, anche ad alto carico è superiore al 60%: questo fatto è legato sempre alla presenza del rumore che non viene filtrato correttamente, ed il segnale ottenuto risulta essere superiore rispetto al valore di Q gradiente. Le energie in gioco ancora una volta sono limitate, ed inoltre si può osservare come nell'ultimo gradiente il materiale si sia incrudito ulteriormente a causa di una diminuzione dell'energia dissipata a fatica, chiudendo dei cicli di isteresi ancora di più.

Graficamente, il risultato ottenuto viene presentato in Figura 5.50

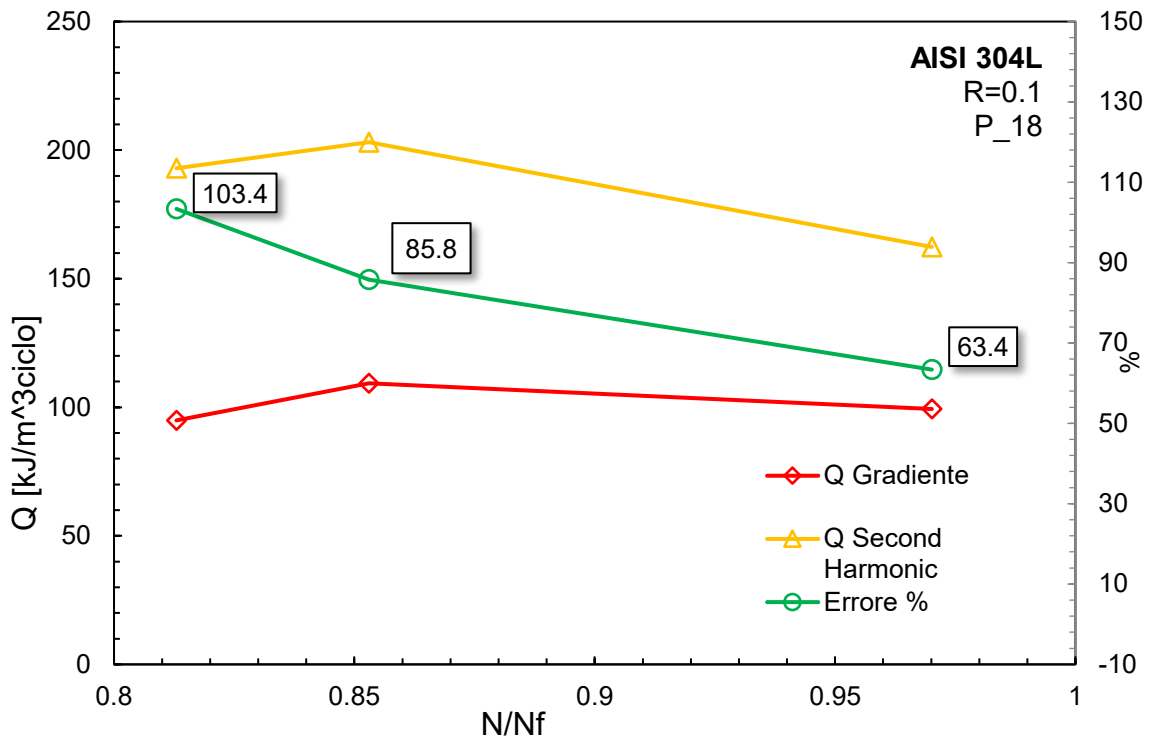


Figura 5.50 – Q gradiente vs Q seconda armonica filtrata per il provino P_18, R=0.1.

Si può osservare quindi come non sempre il filtraggio sia capace di fornire risultati accettabili in termini di seconda armonica, ma dipende in modo rilevante dall'effettiva energia in gioco: maggiore energia, corrisponderà a minore disturbo e dunque ad un segnale più facile da filtrare.

5.6 Conclusioni

In questo Capitolo sono state analizzate le prove di fatica secondo approccio energetico basato sull'uso della seconda armonica del segnale di temperatura. Dapprima è stata richiamata la procedura impiegata per andare ad analizzare un filmato termografico una volta che è stato compensato. Successivamente si è descritta la procedura di calcolo del parametro beta, che per un materiale elasto-plastico che segue la legge di Ramberg-Osgood, è funzione dell'esponente di incrudimento ciclico.

Dopo aver fatto ciò, sono stati presentati i risultati del calcolo di Q mediante approccio seconda armonica confrontati con Q calcolato da gradiente, preso come valore di riferimento per l'energia dissipata in quanto (nel Capitolo 4) è stato dimostrato essere una misura solida. Il confronto è stato fatto dapprima per le prove a fatica a R=-1 e ad ampiezza costante: dall'analisi delle mappe di seconda armonica si è osservato come da un pixel all'altro si abbiano differenze di valori anche pari ad un ordine di grandezza; per indagare questo aspetto e capire se si trattasse di rumore è stata fatta una acquisizione a macchina ferma, ma portando il provino nelle stesse condizioni della prova classica. Ciò che ne è emerso è che vi è la presenza di un rumore legato alla catena di acquisizione che ha valori massimi nell'intorno di $8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, il quale però ha quasi lo stesso ordine di grandezza della seconda armonica ovvero $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$. Per indagare questo aspetto è stato impiegato un codice MATLAB che permette di filtrare il segnale mediante un filtro gaussiano creato appositamente per filtrare immagini: ne è emerso che si riusciva ad ottenere una mappa di temperatura più uniforme. Sono stati pertanto eseguiti i confronti sia a segnale originale, sia a segnale filtrato con Q da

gradiente d è emerso che i risultati migliori si ottengono non filtrando il segnale. Questa motivazione si è pensato che possa risiedere nel fatto che ad alto carico i cicli di isteresi racchiudono un'area ampia, e quindi c'è molta energia che viene trasmessa dalla macchina al provino; in queste situazioni si è visto che il range della seconda armonica della temperatura raggiunge valori dell'ordine di $7 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ ed è dunque poco affetto dal rumore. Ad alto carico si sono ottenuti casi con errori dell'1%, mentre in altre situazioni si è arrivati a errori dell'ordine del 20% rispetto a Q gradiente.

È stata poi analizzata una prova a gradini per $R=-1$ ed è emerso che all'aumentare del carico, grazie a una maggiore plasticità, il segnale risultava meno disturbato e le misure davano risultati più aderenti a Q gradiente.

Successivamente sono stati presentati i risultati delle prove ad ampiezza costante a $R=0.1$ ad alto carico. È emerso che facendo il confronto tra il segnale originale e quello filtrato, il segnale filtrato, a differenza di $R=-1$, dava risultati migliori. Ciò è probabilmente dovuto a una ridotta plasticità causata da un forte incrudimento del materiale a $R>0$, che chiude cicli di isteresi di area esegua. Essendo l'energia in gioco ridotta, diventa difficile eseguire le misure e anche filtrando i risultati sono variabili da provino a provino, a parità di carico. Nei due casi presentati a 280 MPa, il primo ha dato errori compresi nel 10%, mentre il secondo superiori al 20% fino a picchi del 40%. Infine, è stata analizzata una prova a gradini che ha confermato come anche ad alto carico, filtrando il segnale, sia difficile ottenere sempre dei risultati coerenti, a causa della ridotta plasticità, in quanto filtrando il segnale si hanno range di seconda armonica dell'ordine di $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$, quando invece la risoluzione della termocamera è di $10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$. Se ne conclude pertanto che a $R>0$, a causa della ridotta plasticità, sia difficile eseguire questo tipo di misure senza incorrere in errori legati alla presenza del rumore, dando luogo a volte a risultati ingegneristicamente accettabili, mentre ad altre a risultati troppo distanti dal valore di Q gradiente, preso come riferimento.

Capitolo 6

CONCLUSIONI DEL LAVORO DI TESI

6.1 Conclusioni

In questo Capitolo si vanno a riassumere brevemente i capitoli precedenti e le conclusioni a fine di ogni Capitolo. Il Capitolo 1 è stato dedicato all'analisi dei metodi energetici, analizzando dapprima i metodi termici per poi passare a quelli basati sul Primo Principio della Termodinamica. Sono state analizzate le diverse forme energetiche, dall'energia meccanica legata all'area del ciclo di isteresi, alla variazione di energia interna fino ad arrivare all'energia dissipata sottoforma di calore Q . Proprio riguardo a quest'ultima forma, è stato affrontato in modo dettagliato il metodo basato sul Gradiente di raffreddamento proposto da Meneghetti, e tutte le sue applicazioni e proprietà. È stato poi analizzato il modello Meneghetti-Ricotta per andare a sintetizzare l'effetto tensione media tramite la costante termoelastica ed infine si è proceduto a mostrare la trattazione analitica del modello Second Harmonic per calcolare Q , sia per $R=-1$ sia per $R=0.1$, proposto sempre da Meneghetti e Ricotta.

Il Capitolo 2 è stato dedicato alle strumentazioni utilizzate, dalla macchina di prova, all'estensometro, alla termocoppia ed alla termocamera, andando a mostrare le procedure utilizzate per eseguire le misurazioni durante la prova. Nel Capitolo 3 sono stati affrontati i risultati ottenuti dalle curve di Woehler sia per $R=-1$ che per $R=0.1$. Dalla costruzione delle due curve è emerso che le curve a $R=-1$ e $R=0.1$ si intersecano, ovvero risulta che ad alti carichi il materiale ha una maggiore resistenza a $R=0.1$ rispetto a $R=-1$.

Inoltre, sono stati confrontati i risultati sperimentali delle piastre laminate a caldo con quelle di barre trafilate a freddo, e si è trovato che a $R=-1$ i due casi hanno due curve completamente diverse, mentre a $R=0.1$ ad alti carichi i materiali vanno a cadere nelle stesse zone della curva.

Per indagare questo aspetto è stata fatta un'analisi metallografica, seguita da prove di durezza Vickers con 30 kg, come previsto da normativa e infine tramite analisi XRD (diffrazione ai raggi x). Ciò che è emerso è che: per quanto concerne il confronto tra piastre laminate a caldo con $R=0.1$ e $R=-1$, in presenza di una tensione media e per alti carichi, il materiale incrudisce, una frazione significativa di austenite si trasforma in martensite e si genera un aumento di durezza; ciò comporta una maggior resistenza rispetto a $R=-1$ ad alto carico in quanto la durezza è minore ed inoltre la quantità di martensite formata è molto poca.

Per ciò che riguarda il confronto barre e piastre, ad alto carico e a $R=0.1$ i due materiali mostrano quantità di martensite e durezza paragonabili, motivo per cui i punti sperimentali cadono nella stessa banda. Viceversa, a $R=-1$ la quantità di martensite e la durezza per le barre sono maggiori che per le piastre laminate a caldo, motivo per cui il materiale trafilato a freddo presenta una curva di resistenza maggiore rispetto a quella del laminato a caldo.

Nel Capitolo 4 invece, si è proceduto all'analisi a fatica secondo la dissipazione di energia. Sono state costruite le curve in Q vs N_f , sia per rapporti ciclo $R=-1$, sia per rapporti ciclo $R=0.1$. Sono state dapprima analizzati i casi a $R=-1$ e poi quelli a $R=0.1$, ottenendo delle curve con una banda di dispersione in Q rispettivamente pari a 3.82 e 3.26 e una dispersione in N pari a 14.2 e 5.96. Nel caso di $R=0.1$, si è ottenuta una dispersione in vita notevolmente ridotta, paragonabile a quella ottenuta dalle curve di Woehler.

Sono stati poi analizzati insieme i dati dalle piastre laminate a caldo e delle barre trafilate a freddo: sia per $R=-1$ che per $R=0.1$ si è riusciti a condensare in un'unica banda di dispersione tutti i risultati dalle prove di fatica, ottenendo una dispersione in Q per $R=-1$ pari a 3.59 e per $R=0.1$ pari a 3.22, mentre in N si è ottenuto rispettivamente 12.8 e 15.5. Questi dati mostrano come Q abbia la capacità

di poter sintetizzare il comportamento di due materiali che secondo le curve di Woehler appartengono a due famiglie diverse, in una stessa classe di appartenenza in termini energetici. Infine, è stata valutata la possibilità di condensare in un'unica banda di dispersione i dati derivanti da prove di fatica a R diversi, dapprima sulle piastre laminate a caldo e poi sulle barre trafilate a freddo: è stato possibile sintetizzare i risultati in un'unica curva per le piastre laminate a caldo, mentre analizzando i dati derivanti dalle piastre e dalle barre insieme, non si è riusciti ad ottenere una banda in Q e in N accettabile. Ciò è legato al fatto che essi sono due materiali diversi e presentano costanti termoelastiche diverse, così come l'esponente h è diverso.

Infine, nel Capitolo 5 sono state analizzate le prove di fatica con l'uso della seconda armonica della temperatura. Si è descritta la procedura di calcolo del parametro beta, che per un materiale elasto-plastico che segue la legge di Ramberg-Osgood, è funzione dell'esponente di incrudimento ciclico. Dopo aver fatto ciò, sono stati presentati i risultati del calcolo di Q mediante approccio seconda armonica confrontati con Q calcolato da gradiente, preso come valore di riferimento per l'energia dissipata. Il confronto è stato fatto dapprima per le prove a fatica a $R=-1$ e ad ampiezza costante: dall'analisi delle mappe di seconda armonica si è osservato come da un pixel all'altro si abbiano differenze di valori anche pari ad un ordine di grandezza; per indagare questo aspetto è stata fatta una acquisizione a macchina ferma, ma portando il provino nelle stesse condizioni della prova classica. Ciò che ne è emerso è che vi è la presenza di un rumore legato alla catena di acquisizione che ha valori massimi nell'intorno di $8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, il quale però ha quasi lo stesso ordine di grandezza della seconda armonica ovvero $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$. È stato inoltre impiegato un codice MATLAB che permettesse di filtrare il segnale mediante un filtro gaussiano creato appositamente per le immagini: ne è emerso che si riusciva ad ottenere una mappa di temperatura più uniforme. Sono stati pertanto eseguiti i confronti sia a segnale originale, sia a segnale filtrato con Q da gradiente ed è emerso che i risultati migliori si ottengono non filtrando il segnale. Questa motivazione si è pensato che possa risiedere nel fatto che ad alto carico i cicli di isteresi racchiudono un'area ampia, e quindi c'è molta energia che viene trasmessa dalla macchina al provino; in queste situazioni si è visto che il range della seconda armonica della temperatura raggiunge valori dell'ordine di $7 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ ed è dunque poco affetto dal rumore. Ad alto carico si sono ottenuti casi con errori dell'1%, mentre in altre situazioni si è arrivati a errori dell'ordine del 20% rispetto a Q gradiente.

È stata poi analizzata una prova a gradini per $R=-1$ ed è emerso che all'aumentare del carico, grazie a una maggiore plasticità, il segnale risultava meno disturbato e le misure davano risultati più aderenti a Q gradiente.

Successivamente sono stati presentati i risultati delle prove ad ampiezza costante a $R=0.1$ ad alto carico. È emerso che facendo il confronto tra il segnale originale e quello filtrato, il segnale filtrato, a differenza di $R=-1$, dava risultati migliori. Ciò è probabilmente dovuto a una ridotta plasticità causata da un forte incrudimento del materiale a $R>0$, che chiude cicli di isteresi di area esegua. Essendo l'energia in gioco ridotta, diventa difficile eseguire le misure e anche filtrando i risultati sono variabili da provino a provino, a parità di carico. Nei due casi presentati a 280 MPa, il primo ha dato errori compresi nel 10%, mentre il secondo superiori al 20% fino a picchi del 40%. Infine, è stata analizzata una prova a gradini che ha confermato come anche ad alto carico, filtrando il segnale, sia difficile ottenere sempre dei risultati coerenti, a causa della ridotta plasticità, in quanto filtrando il segnale si hanno range di seconda armonica dell'ordine di $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, quando invece la risoluzione della termocamera è di $10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$. Se ne conclude pertanto che a $R>0$, a causa della ridotta plasticità, sia difficile eseguire questo tipo di misure senza incorrere in errori legati alla presenza del rumore.

BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. Luong, M.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Eng. Des.* 1995, 158, 363–376.
3. Meneghetti, G. Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation. *Int. J. Fatigue* 2007, 29, 81–94.
4. Meneghetti, G.; Ricotta, M. The use of the specific heat loss to analyse the low- and high cycle fatigue behaviour of plain and notched specimens made of a stainless steel. *Eng. Fract. Mech.* 2012, 81, 2–16.
5. 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.
6. Meneghetti, G.; Ricotta, M.; Atzori, B. Experimental evaluation of fatigue damage in two-stage loading tests based on the energy dissipation. *Pro. Inst. Mech. Eng. Part C Mech. Eng. Scie* 2015, 229, 1280–1291.
7. The specific heat loss combined with the thermoelastic effect for an experimental analysis of the mean stress influence on axial fatigue of stainless-steel plain specimens. *Frattura ed Integrità Strutturale* 2014, 30, 191-200.
8. 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. *Int. J. Fatigue* 2016, 82, 60–70.
9. 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*.
10. 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.
11. Ricotta M, Meneghetti G, Atzori B, Risitano G, Risitano A. Comparison of Experimental Thermal Methods for Fatigue Limit Evaluation of a Stainless Steel. *Metals* 2019, 9:677-700.
12. N.W. Klingbeil, A total dissipated energy theory of fatigue crack growth in ductile solids, *International Journal of Fatigue*, 25, 2003, 117–128.
13. G. Risitano, D. Santonocito, Experimental and numerical assessment of the end of the thermoelastic effect during static traction test, *Procedia Structural Integrity*, 28, 2020, 1449–1457.
14. T. Sakagami, S. Kubo, E. Tamura, T. Nishimura, Identification of plastic-zone based on double frequency lock-in thermographic temperature measurement, *Proc. of ICF11*, 2005, Italy.
15. F. Curà, G. Curti, and R. Sesana. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels. *International Journal of Fatigue*, 27(4):453–459, apr 2005
16. J. Kaleta, R. Blotny, and H. Harig. Energy Stored In A Specimen Under Fatigue Limit Loading Conditions. *Journal Of Testing And Evaluation*, 19(4):326–333, 1991.
17. G. Meneghetti, M. Ricotta, L. Negrisolo, and B. Atzori. A Synthesis of the Fatigue Behavior of Stainless Steel Bars under Fully Reversed Axial or Torsion Loading by Using the Specific Heat Loss. *Key Engineering Materials*, 577-578:453–456, 2013.
18. Damali, A. Esin, Micro-plastic strain energy criterion applied to reversed biaxial fatigue, *Fracture* 1997, vol. 2, ICF4, 1201-1206, 1997.

19. G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, and A. Risitano. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International Journal of Fatigue*, 24(1):11–19, 2002.
20. 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
21. Palumbo, D.; Galietti, U. Thermoelastic Phase Analysis (TPA): A new method for fatigue behaviour analysis of steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2017, 40, 523–534.
22. Feltner CE, Morrow JD. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Trans. ASME, Ser. D: J Basic Eng* 1961;83:15–22
23. G. Meneghetti, M. Ricotta. Estimating the intrinsic dissipation using the second harmonic of the temperature signal in tension-compression fatigue. part I: theory. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Under review
24. G. Meneghetti, M. Ricotta. Estimating the intrinsic dissipation using the second harmonic of the temperature signal in tension-compression fatigue. part II: Experiment. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Under review
25. Manson SS. Behaviour of materials under conditions of thermal stress. NACA TN-2933, National Advisory Committee for Aeronautics; 1954.
26. Coffin LF. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Trans ASME* 1954;76:931–50.
27. Curti G, La Rosa G, Orlando M, Risitano A. Analisi tramite infrarosso termico della “temperatura limite” in prove di fatica (in Italian). 14th AIAS Italian National Conference, Catania, Italy, 1986:211–20
28. M. P. Luong, Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique, *Mechanics of Materials* 28, 1998, 155-163
29. G R Halford. The energy required for fatigue. *Journal of Materials, ASTM*, 1(1):3–18, 1966.
30. R. Blotny and J. Kaleta. A method for determining the heat energy of the fatigue process in metals under uniaxial stress - Part 1 & 2. *International Journal of Fatigue*, 8(1):29–38, 1986.
31. L. Audenino, L. Goglio, M. Rossetto, *Metodi sperimentali per la progettazione*, Levrotto&Bella, Torino, 1997
32. R. T. Potter, L. J. Greaves, *The application of Thermoelastic Stress Analysis Technique in Fiber Composites*, Proceedings of the Conference on Optical and Opto-Electronic Applied Sciences and Engineering, Bellingham, WA: SPIE; vol. 817, 1990, 134-146.
33. M. Miner, *Cumulative Damage in Fatigue*, Santa Monica, California, 1945, A159-A164.
34. Smith KN, Watson P, Topper TH. A stress–strain function for the fatigue of metals. *J Mater* 1970;5:767–78.
35. Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum. *ASTM STP* 1970;462:1–14.
36. Mauro Ricotta, Marco Veronese, Giovanni Meneghetti. Estimating the specific heat loss from temperature measurements in tension-tension fatigue: theory and experiments (Under review)
37. Audenino A. L., Goglio L., Rossetto M. (1997) *Metodi sperimentali per la progettazione*;
38. Monti, Giancarlo (2020) *Stima del limite di fatica di un acciaio C45 basato sull'applicazione di metodi energetici*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova
39. Blum, Alessandro (2014) *Analisi delle tensioni e deformazioni elastoplastiche basata sulla dissipazione di energia*, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova

RINGRAZIAMENTI

Un Ringraziamento speciale alla mia Famiglia,
a mamma e a papà,
siete i miei pilastri, vi voglio bene
è merito vostro se ho raggiunto questo traguardo

Un grazie alla mia Alice, che c'è sempre stata
in tutti questi cinque, a volte difficili, anni
grazie per essere stata con me

Un ringraziamento speciale ai Professori
Meneghetti e Ricotta
Grazie per l'aiuto nell'affrontare questo ultimo traguardo universitario
e grazie per aver infuso la passione in me per la Ricerca
a voi va la mia stima come Persone e come Professori

Marco

APPENDICE 1

RIASSUNTO DELLE PROVE A FATICA TRAMITE Q-GRADIENTE

In questa Appendice, si riportano i risultati in forma tabellare dei valori di Q da gradiente di temperatura. I dati delle prove ad ampiezza costante sono riportati nel Capitolo 3, mentre per i dati relativi ai gradini, si riportano all'interno delle tabelle successive.

A.1.1 Prove di fatica a R=0.1

P_01 Nf=190512 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2859	0.0456	4	46
2	7094	0.049	4	49
3	11222	0.0425	4	43
4	14019	0.0424	4	43
5	17457	0.0435	4	44
6	20425	0.0464	4	47
7	25435	0.0411	4	41
8	28812	0.0413	4	42
9	32459	0.0436	4	44
10	42075	0.0419	4	42
11	45841	0.0406	4	41
12	50677	0.0449	4	45
13	57199	0.0439	4	44
14	120647	0.1283	12	43
15	164599	0.1244	12	42

Tabella A.1.1 – Q provino P_01.

P_02 Nf=81411 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1246	0.0967	4	97
2	4202	0.1313	6	88
3	11054	0.2567	11	94
4	26910	0.2731	13	85
5	39862	0.2733	13	85
6	71507	0.1991	10	80

Tabella A.1.2 – Q provino P_02.

P_03 Nf=458992 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]
1	11221	0.0929	10	37
2	21810	0.1062	12	36
3	38501	0.1008	13	31
4	57910	0.1184	14	34
5	79780	0.1348	15	36
6	100558	0.134	16	34
7	120572	0.1405	17	33
8	151444	0.1456	18	33
9	177130	0.1667	19	35
10	197788	0.1529	19	32
11	234545	0.1725	19	37
12	272314	0.173	19	37
13	305813	0.1585	19	34
14	341697	0.1625	19	34
15	403707	0.1614	19	34
16	443248	0.1648	19	35

Tabella A.1.3 – Q provino P_03.

P_04 Nf=110774 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]
1	1906	0.0353	3	47
2	5216	0.0648	5	52
3	20766	0.1185	10	48
4	42724	0.1409	11	52
5	74257	0.1441	12	48

Tabella A.1.4– Q provino P_04.

P_05 Nf=RUNOUT 2 MILIONI di cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]
1	11474	0.0532	14	15
2	37401	0.0843	18	19
3	60155	0.0886	19	19
4	80179	0.0975	20	20
5	115050	0.1021	20	21
6	155624	0.1097	20	22
7	231237	0.1104	20	22
8	276388	0.1036	20	21
9	323162	0.0996	20	20
10	367199	0.1131	20	23

11	439288	0.106	20	21
12	483174	0.1085	20	22
13	548143	0.1047	20	21
14	584280	0.1101	20	22
15	620856	0.1028	20	21
16	739224	0.1081	20	22
17	809357	0.1073	20	22
18	886661	0.1085	20	22
19	990895	0.107	20	22
20	1038421	0.1157	20	23
21	1102473	0.1141	20	23
22	1206260	0.1104	20	22
23	1284771	0.1066	20	21
24	1397300	0.1053	20	21
25	1472080	0.1019	20	21
26	1717446	0.0803	15	22
27	1828379	0.1151	20	23
28	1958221	0.0944	20	19

Tabella A.1.5– Q provino P_05.

P_06 Nf=121005 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]
1	1794	0.0565	2.8	81
2	4506	0.0622	4	63
3	11810	0.1062	8	53
4	25969	0.1162	9	52
5	36055	0.1116	9	50
6	45395	0.1195	9	53
7	63221	0.1137	9.5	48
8	75983	0.1242	9.5	53
9	86885	0.1167	9.5	49
10	98686	0.1196	9.5	51
11	117724	0.1318	10	53

Tabella A.1.6– Q provino P_06.

P_07 Nf=121005 cicli.

I valori di Q sono errati a causa del distacco parziale della termocoppia

P_08 Nf=332247 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3466	0.0572	6	38
2	14572	0.1073	10	43
3	29839	0.1038	11	38
4	52639	0.1335	13	41
5	83719	0.1362	13.5	41
6	101141	0.1379	13.5	41
7	124795	0.1313	14	38
8	148841	0.1407	15	38
9	180466	0.1413	15	38
10	222557	0.152	15.5	39
11	257608	0.1537	15.5	40
12	295876	0.1593	16	40
13	327356	0.1488	16	37

Tabella A.1.8– Q provino P_08.

P_09 Nf=42156 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1196	0.0755	3	101
2	2527	0.0764	3	103
3	8217	0.1194	4.5	107
4	10822	0.1242	4.5	111
5	14232	0.1089	4.5	97
6	18141	0.1268	5	102
7	22688	0.137	5.5	100
8	27518	0.1499	5.5	110
9	31245	0.161	5.5	118
10	37184	0.1586	5.5	116

Tabella A.1.9– Q provino P_09.

P_15 Nf=RUNOUT A 2 MILIONI di cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	6225	0.1034	10	42
2	18556	0.1002	10	40
3	52160	0.0987	10	40
4	90383	0.103	10	41
5	138609	0.0991	10	40
6	187401	0.1003	10	40
7	249483	0.1001	10	40
8	307767	0.0987	10	40
9	361715	0.24	24	40
10	411382	0.1026	10	41

11	478040	0.0956	10	38
12	568945	0.0947	10	38
13	655406	0.0954	10	38
14	794394	0.0893	10	36
15	922954	0.0992	10	40
16	972375	0.1108	10	45
17	999218	0.1035	10	42
18	1106457	0.0965	10	39
19	1205839	0.1089	10	44
20	1275828	0.0985	10	40
21	1607549	0.1056	10	43

Tabella A.1.10– Q provino P_15.

P_16 Nf=87430 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2804	0.199	8	100
2	7962	0.2049	8	103
3	11558	0.1857	8	93
4	18117	0.1839	8	93
5	27708	0.2502	10	101
6	38507	0.219	9	98
7	53530	0.1966	9	88
8	65398	0.247	10	99
9	79120	0.2387	10	96

Tabella A.1.11– Q provino P_16.

P_22 Nf=50678 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3438	0.2226	7	128
2	7482	0.2014	7	116
3	16636	0.2175	7	125
4	34397	0.2051	7	118

Tabella A.1.12– Q provino P_22.

P_23 Nf=76806 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3796	0.2189	8	110
2	10749	0.2047	8	103
3	25040	0.1879	8	95
4	36605	0.2541	9.8	104
5	50557	0.2447	10	99
6	68849	0.2391	10	96

Tabella A.1.13– Q provino P_23.

P_24 Nf=75971 cicli.

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]
1	1246	0.0967	4	97
2	4202	0.1313	6	88
3	11054	0.2567	11	94
4	26910	0.2731	13	85
5	39862	0.2733	13	85
6	71507	0.1991	10	80

Tabella A.1.14– Q provino P_24.

P_18 Nf=98167 cicli GRADINI

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]	Sigma_a [MPa]
1	17107	0.2176	20	44	166
2	29981	0.2907	18	65	180
3	36603	0.2567	18	57	180
4	45650	0.1889	10	76	200
5	57525	0.1708	10	69	220
6	63154	0.2209	10	89	240
7	68847	0.2158	10	87	240
8	75347	0.2021	8	102	260
9	79809	0.1886	8	95	260
10	83737	0.1901	7	109	280
11	95235	0.1728	7	99	280

Tabella A.1.15– Q provino P_18.

P_25 Nf=105702 cicli GRADINI

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m³ciclo]	Sigma_a [MPa]
1	20124	0.2834	18	63	180
2	41129	0.0982	4	99	200
3	69119	0.156	12	52	220
4	91778	0.179	11	66	240
5	94000	0.1576	8.5	75	260
6	105332	0.2389	7.5	128	310

Tabella A.1.16– Q provino P_25.

A.1.1 Prove di fatica a R=-1

P_10 Nf=86665 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	4191	0.2599	3	349
2	7519	0.2006	2	404
3	12178	0.2071	2	417
4	18654	0.2415	2	486
5	25501	0.2875	2.1	551
6	33408	0.2676	2	539
7	38735	0.2217	2	446
8	46997	0.2826	2.2	517
9	54775	0.2828	2.2	517
10	72694	0.2778	2	559
11	83018	0.2802	2	564

Tabella A.1.17– Q provino P_10.

P_11 Nf=16857 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	1347	0.2601	1.5	698
2	4625	0.2579	1.1	944
3	8106	0.233	1	938
4	14833	0.244	1	982

Tabella A.1.18– Q provino P_11.

P_12 Nf=105287 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2321	0.0502	1	202
2	9137	0.1012	1.5	272
3	19023	0.1213	1.5	326
4	37787	0.119	1.5	319
5	57368	0.1526	1.5	410
6	87223	0.1465	1.5	393
7	100810	0.1422	1.5	382

Tabella A.1.19– Q provino P_12.

P_17 Nf=42217 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	2814	0.2611	2	526
2	9345	0.3014	1.6	758
3	14385	0.2749	1.3	851
4	18823	0.2645	1.3	819
5	38238	0.2503	1.3	775

Tabella A.1.20– Q provino P_17.

P_21 Nf=122891 cicli

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]
1	3449	0.2414	1.7	572
2	14635	0.2538	1.4	730
3	29954	0.2449	1.3	758
4	42721	0.2519	1.3	780
5	68321	0.2578	1.3	798
6	73009	0.2297	1.3	711
7	98247	0.2483	1.3	769

Tabella A.1.21– Q provino P_21.

P_19 Nf=93812 cicli GRADINI

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Sigma_a [MPa]
1	16112	0.1405	16	35	160
2	25025	0.3113	8	157	180
3	39371	0.3321	7.5	178	180
4	51505	0.2047	2	412	200
5	62103	0.2175	2	438	200
6	66054	0.2449	1	986	220
7	81760	0.2465	1	992	220
8	88309	0.237	1	954	220
9	89242	0.2393	0.7	1376	240

Tabella A.1.22– Q provino P_19.

P_20 Nf=104215 cicli GRADINI

N raffreddamento	Cicli	Gradiente [°C/s]	Frequenza [Hz]	Q [kJ/m ³ ciclo]	Sigma_a [MPa]
1	24252	0.1702	18	38	160
2	30995	0.2153	7	124	180
3	41295	0.2369	7	136	180
4	49504	0.1321	2	266	200
5	61125	0.167	2	336	200
6	76953	0.1804	2	363	200
7	86593	0.2305	1	928	220

8	91924	0.2329	1	938	220
9	96373	0.2458	1	989	220
10	98096	0.2729	0.8	1373	240

Tabella A.1.23– Q provino P_20.

APPENDICE 2

CODICI MATLAB IMPIEGATI PER IL CALCOLO DELLA FFT SU FILMATI TERMOGRAFICI

In questa Appendice, si riportano i codici impiegati per il calcolo della FFT. Verrà dapprima descritta la procedura per l'importazione del singolo frame, dopodiché dell'intera matrice ed infine verrà inserito il codice di calcolo per la FFT sul filmato termografico. Parte di questo codice è stato tratto da una Tesi precedente [38].

A.2.1 Importazione della matrice del primo frame

Un filmato termografico è costituito da una matrice tridimensionale, dove righe e colonne rappresentano i pixel mentre la terza dimensione è rappresentata dai frames. Una volta aver seguito la procedura descritta nel Capitolo 5 per salvare il file termografico in formato .asc, il passo successivo consiste nell'importare il primo frame. Si segue perciò la seguente procedura:

1. Si apre il software MATLAB;
2. Si segue il seguente percorso

HOME → IMPORT DATA → FILE .ASC

3. Si seleziona il file .asc ad esempio "P_24_07_4096_MC_export.asc"; una volta fatto ciò si apre una schermata contenente il file .asc, di cui si rappresenta una porzione in Figura A2.1

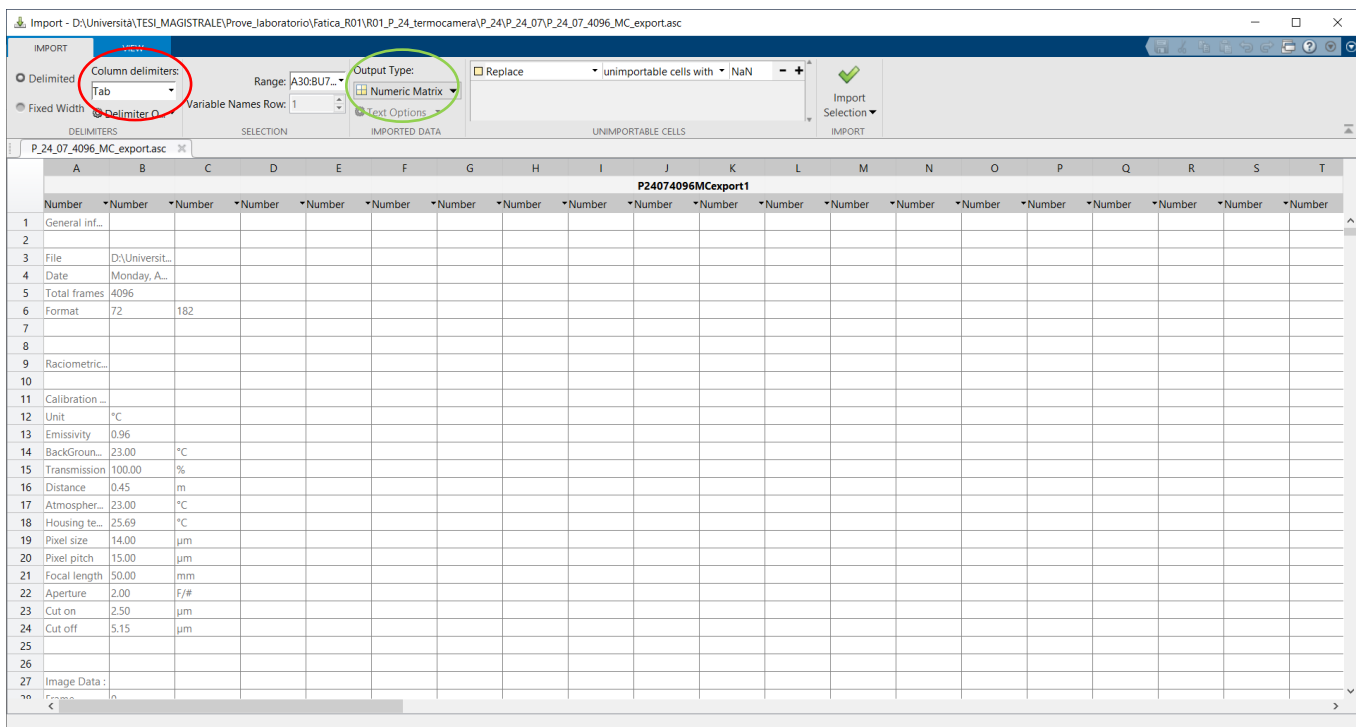


Figura A.2.1– Schermata di apertura per l'importazione del codice su MTLAB

4. Si clicca su *Column delimiters* (cerchiato in rosso) e si preme su *Tab*;

5. Fatto ciò, si clicca su *Output type* (cerchiato in verde) e si preme *Numeric Matrix*;
6. Si seleziona manualmente la matrice del primo frame, identificata come 0;
7. Una volta fatto questo passaggio, si clicca su *Import selection* e poi *Generate Script*. Dopo aver premuto il pulsante, si aprirà uno script su MATLAB, che viene di seguito riportato.

```

%% Import data from text file
% Script for importing data from the following text file:
%
%   filename:
D:\Università\TESI_MAGISTRALE\Prove_laboratorio\Fatica_R01\R01_P_24_termo
camera\P_24\P_24_07\P_24_07_4096_MC_export.asc
%
% Auto-generated by MATLAB on 05-Apr-2022 18:43:57

%% Setup the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 72);

% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [30, 211];
opts.Delimiter = "\t";

% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["Generalinformation", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9",
"VarName10", "VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14",
"VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19",
"VarName20", "VarName21", "VarName22", "VarName23", "VarName24",
"VarName25", "VarName26", "VarName27", "VarName28", "VarName29",
"VarName30", "VarName31", "VarName32", "VarName33", "VarName34",
"VarName35", "VarName36", "VarName37", "VarName38", "VarName39",
"VarName40", "VarName41", "VarName42", "VarName43", "VarName44",
"VarName45", "VarName46", "VarName47", "VarName48", "VarName49",
"VarName50", "VarName51", "VarName52", "VarName53", "VarName54",
"VarName55", "VarName56", "VarName57", "VarName58", "VarName59",
"VarName60", "VarName61", "VarName62", "VarName63", "VarName64",
"VarName65", "VarName66", "VarName67", "VarName68", "VarName69",
"VarName70", "VarName71", "VarName72"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double"];

% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";

% Import the data
P24074096MCexport =
readtable("D:\Università\TESI_MAGISTRALE\Prove_laboratorio\Fatica_R01\R01
_P_24_termocamera\P_24\P_24_07\P_24_07_4096_MC_export.asc", opts);

%% Convert to output type

```

```
P24074096MCexport = table2array(P24074096MCexport);

%% Clear temporary variables
clear opts
```

Il codice sopra riportato serve ad importare il primo frame della matrice 3D all'interno di MATLAB. Per importare la matrice completa si esegue un ciclo *for* che permette di importare tutti i 4096 frames del filmato. Il codice appena importato viene salvato come "script_importazione_24_07_AISI304L".

A.2.2 Importazione della matrice completa

Di seguito si riporta il codice commentato per l'importazione della matrice completa 3D. Una volta lanciato lo script, si devono attendere alcune ore prima che esso sia completato: maggiore è il numero di frames, maggiore sarà il tempo di importazione che cresce esponenzialmente all'aumentare dei frames. Il codice che si riporta viene denominato "script_importazione_matrice_completa_24_07_AISI304L"

```
%% Script importazione matrici file in un'unica matrice 3D

u=182;      %numero di righe
v=72;      %numero di colonne
w=4096;    %frame

%creazione matrice di zeri per velocizzare lo script
T_matrix_24_07_AISI304L=zeros(u,v,w); %provino 24, prova 07 ACCIAIO
AIS304L

%ciclo for importando le w matrici
for i=1:w

filename='D:\Università\TESI_MAGISTRALE\Prove_laboratorio\Fatica_R01\R01_
P_24_termocamera\P_24\P_24_07\P_24_07_4096_MC_export.asc';

% Setup the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", v);
startframe=30+(u+5)*(i-1); %prima riga del frame iesimo
endframe=startframe+(u-1); %ultima riga del frame iesimo

%definizione del range e dei limiti
opts.DataLines = [startframe, endframe];
opts.Delimiter = "\t";

% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["Generalinformation", "VarName2", "VarName3",
"VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9",
"VarName10", "VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14",
"VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19",
"VarName20", "VarName21", "VarName22", "VarName23", "VarName24",
"VarName25", "VarName26", "VarName27", "VarName28", "VarName29",
"VarName30", "VarName31", "VarName32", "VarName33", "VarName34",
"VarName35", "VarName36", "VarName37", "VarName38", "VarName39",
"VarName40", "VarName41", "VarName42", "VarName43", "VarName44",
"VarName45", "VarName46", "VarName47", "VarName48", "VarName49",
"VarName50", "VarName51", "VarName52", "VarName53", "VarName54",
"VarName55", "VarName56", "VarName57", "VarName58", "VarName59",
"VarName60", "VarName61", "VarName62", "VarName63", "VarName64",
```

```

"VarName65", "VarName66", "VarName67", "VarName68", "VarName69",
"VarName70", "VarName71", "VarName72"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double"];

% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";

% Import the data
P24074096MCexport =
readtable("D:\Università\TESI_MAGISTRALE\Prove_laboratorio\Fatica_R01\R01
_P_24_termocamera\P_24\P_24_07\P_24_07_4096_MC_export.asc", opts);

%% Convert to output type
P24074096MCexport = table2array(P24074096MCexport);

% Imposizione della matrice i-esima alla posizione i-esima della
% matrice 3D
T_matrix_24_07_AISI304L(:, :, i) = P24074096MCexport;
end

save('T_matrix_24_07_AISI304L.mat')

% Clear temporary variables
clear opts

```

Una volta lo script viene lanciato, si attende il tempo necessario per importare l'intera matrice. Fatto ciò, si costruisce lo script per il calcolo della FFT, con annessi grafici.

A.2.3 Calcolo della FFT e grafici di prima e seconda armonica per i filmati termografici

In questo paragrafo dell'Appendice 2, si ripota il codice utilizzato per il calcolo della trasformata di Fourier discreta e i relativi grafici. In particolare, s1 e s2 sono il numero di righe e di colonne da eliminare per eliminare i bordi del provino che possono essere stati inclusi in fase di selezione dell'area (se si seleziona l'area internamente alla superficie del provino questi valori vengono posti uguali a 0). b1 e b2 sono il numero di righe e di colonne che vengono eliminate per eliminare l'effetto bordo che può venire a crearsi.

Le righe di codice contrassegnate dal simbolo % servono ad indicare i commenti, necessari per la comprensione dello script. In particolare, si vuole sottolineare che è presente un parametro da impostare denominato sigma: questo parametro serve per definire la deviazione standard in termini di numero di pixel, in modo che la Gaussiana abbia dimensione pari 3 volte la deviazione standard (questo comando è inserito come width). Viene riportato sia il codice per i risultati non filtrati con annessi grafici, sia quello con i dati filtrati, contraddistinti da "_filt"

```

%% Calcolo range della seconda armonica del provino 24, prova 07

close all
clc
clear all
%scirvi a= 1 se vuoi il grafico
a=1;
%% importazione matrice 3D ordinata
load('T_matrix_24_07_AISI304L.mat');

s1=1; %righe da eliminare per eliminare picchi di bordo
s2=1; % colonne da eliminare per picchi di bordo
%valori nulli perchè selezionata l'area interna del provino
u=182-(2*s1);
v=72-(2*s2);
w=4096;

%righe da eliminare per togliere l'effetto bordo del filtro
b1=2;
b2=2;

%ridimensionamento matrice 3D in modo che dim(T_matrix)=u x v x w
T_matrix_24_07_AISI304L = T_matrix_24_07_AISI304L(s1+1:end-s1,s2+1:end-
s2,1:w);

%% Parametri
fload = 13; % [Hz] frequenza di carico
N = w; % numero punti campionati
fc = 204.8; % [Hz] frequenza di campionamento
t = (0 : 1/fc : (N-1)/fc)'; % [s] vettore tempo
f = (0 : N/2)*fc/N; % [Hz] vettore frequenza

%% segnale temporale di un pixel ad esempio in posizione (20,20)
if a == 1
pix1=20;
pix2=20;
temperatura = T_matrix_24_07_AISI304L(pix1,pix2,:);
temperaturalp(:) = temperatura(1,1,:); %vettore temperatura di 1 pixel
figure(1)
plot(t,temperaturalp)
title('Segnale temporale di un pixel in una data posizione')
xlabel('tempo t')
ylabel('temperatura di un pixel nel tempo')
end

%% Applicazione Trasformata di Fourier

% Trasformata di Fourier per ogni pixel al variare di j e k del segnale
originale
%Creazione matrice TF_norm fomrata da soli zeri per velocizzare lo script

```

```

%ed applicazione della DFT per ogni pixel
TF = zeros(u-2*b1+1,v-2*b2+1,w);
for j = 1:u
    for k = 1:v
        TF(j,k,:) = fft(T_matrix_24_07_AISI304L(j,k,:)); %DFT
    end
end

%% Spettro ampiezza in frequenza

TF_abs = abs(TF/N); %spettro di ampiezza
TF_abs = TF_abs(:,:,1:(N/2+1)); %one sided spectrum
TF_abs(:,:,2:end-1) = 2*TF_abs(:,:,2:end-1); %x2

%% passaggio da vettore frequenza a numero di punti del vettore

a1=((N/2+1)*fload*2/fc);

for j = 1:u
    for k = 1:v
        T0(j,k,:) = 2*TF_abs(j,k,1); %T0=primo valore del vettore (in
        RANGE ma dopo viene correttamente rappresentato in ampiezza)

        i1 = floor(a1*9/10):ceil(a1*11/10); %intorno di fload
        T1(j,k,:) = 2*max(TF_abs(j,k,i1)); %T1=massimo in i1 in RANGE

        i2 = floor(2*a1*9/10):ceil(2*a1*11/10); %intorno di 2*fload
        T2(j,k,:) = 2*max(TF_abs(j,k,i2)); %T2=massimo in i2 in RANGE
    end
end

% Calcolo valori medi RANGE T1 e T2 NON FILTRATI
Range_T1_nonfilt_medio=median(T1(b1:end-b1,b2:end-b2,:), 'all'); %in RANGE
Range_T2_nonfilt_medio=median(T2(b1:end-b1,b2:end-b2,:), 'all') %in RANGE

%% Filtraggio di ogni frame del segnale con Campana gaussiana
sigma = 8; %deviazione standard della campana
width = 6*sigma+1; %dimensione filtro tale che comprenda 3*sigma

%creazione matrice T_matrix_filt di zeri per velocizzare lo script
T_matrix_24_07_AISI304L_filt = zeros(u,v,w);

%applicazione del filtro gaussiano per ogni frame
for i = 1:w
    T_matrix_24_07_AISI304L_filt(:,:,i)=imgaussfilt(T_matrix_24_07_AISI304L(:
    :,i),sigma,'FilterSize',[width width]);
end

%% Trasformata di Fourier per ogni pixel al variare di j e k del segnale
filtrato

%creazione matrice TF_filt di zeri per velocizzare lo script

```

```

TF_filt = zeros(u,v,w);
for j = 1:u
for k = 1:v
TF_filt(j,k,:) = fft(T_matrix_24_07_AISI304L_filt(j,k,:)); %DFT
end
end

%% Spettro ampiezza in frequenza
TF_abs_filt = abs(TF_filt/N); %spettro ampiezza
TF_abs_filt = TF_abs_filt(:, :, 1:(N/2+1)); %one sided spectrum
TF_abs_filt(:, :, 2:end-1) = 2*TF_abs_filt(:, :, 2:end-1);%x2

% Calcolo componenti ampiezza di Fourier come il massimo in un intorno di
fload e 2fload
for j = 1:u
for k = 1:v
T0_filt(j,k,:) = TF_abs_filt(j,k,1); %T0=primo valore del vettore
i1 = floor(a1*9/10):ceil(a1*11/10); %intorno di fload
T1_filt(j,k,:) = 2*max(TF_abs_filt(j,k,i1)); %T1=massimo in i1 in RANGE
i2 = floor(2*a1*9/10):ceil(2*a1*11/10); %intorno di 2*fload
T2_filt(j,k,:) =2* max(TF_abs_filt(j,k,i2)); %T2=massimo in i2 in RANGE
end
end

%% Differenza percentuale tra il RANGE di temperatura T2 ed il suo valor
medio per analizzare la dispersione dei valori nell'area
% Calcolo del valor medio in un'intervallo interno per evitare di
% considerare i picchi di bordo causati dal filtro

T0_medio=median(T0_filt(b1:end-b1,b2:end-b2,:), 'all');
RANGE_T1_medio=median(T1_filt(b1:end-b1,b2:end-b2,:), 'all'); %RANGE
di T1
RANGE_T2_medio=median(T2_filt(b1:end-b1,b2:end-b2,:), 'all') %RANGE
di T2

%Calcolo differenza percentuale di T2 rispetto al valor medio
for j = 1:u-2*b1
for k = 1:v-2*b2
Delta(j,k) = (T2_filt(j+b1,k+b2)-RANGE_T2_medio)/RANGE_T2_medio*100;
%segnale filtrato
end
end
% Media dei valori assoluti della differenza percentuale lungo l'area
Delta_medio=median(abs(Delta(b1:end-b1,b2:end-b2,:)), 'all');

%% Differenza percentuale tra il RANGE di T1 NON FILTRATO e FILTRATO
for j = 1:u-2*b1
for k = 1:v-2*b2
Delta_T1(j,k) = (T1(j+b1,k+b2)-
T1_filt(j+b1,k+b2))/Range_T1_nonfilt_medio*100;
end
end

```

```

% Media dei valori assoluti della differenza percentuale lungo l'area
Delta_T1_Filt_NonFilt=median(abs(Delta_T1(b1:end-b1,b2:end-b2,:)),'all');

%% Differenza percentuale tra il RANGE di T2 NON FILTRATO e FILTRATO
for j = 1:u-2*b1
for k = 1:v-2*b2
Delta_T2(j,k) = (T2(j+b1,k+b2)-
T2_filt(j+b1,k+b2))/Range_T2_nonfilt_medio*100;
end
end
% Media dei valori assoluti della differenza percentuale lungo l'area
Delta_T2_Filt_NonFilt=median(abs(Delta_T2(b1:end-b1,b2:end-b2,:)),'all');

%% DIFFERENZA SEGNALI ORIGINALI-FILTRATI MEDI
DIFF_PERCENT_T1=abs((Range_T1_nonfilt_medio-
RANGE_T1_medio)/Range_T1_nonfilt_medio*100); %differenza percentuale tra
il valore T1 medio non filtrato e T1 medio filtrato
DIFF_PERCENT_T2=abs((Range_T2_nonfilt_medio-
RANGE_T2_medio)/Range_T2_nonfilt_medio*100) %differenza percentuale tra
il valore T2 medio non filtrato e T2 medio filtrato
if a == 1
    %% Grafici
    %% Spettro delle AMPIEZZE di un singolo pixel come riferimento (es.
(20,20))
    figure(2)
    subplot(1,2,1)
    % pix1=20;
    % pix2=20;
    spett_amp = TF_abs(pix1,pix2,:);
    spett_amp_p(:) = spett_amp(1,1,:);

    plot(f,spett_amp_p)
    xlabel('f [Hz'],'FontSize',30)
    ylabel('T [°C'],'FontSize',30)
    title('Spettro AMPIEZZE');

    subplot(1,2,2)
    spett_amp_filt = TF_abs_filt(pix1,pix2,:);
    spett_amp_filt_p(:) = spett_amp_filt(1,1,:);
    plot(f,spett_amp_filt_p)
    xlabel('f [Hz'],'FontSize',30)
    ylabel('T [°C'],'FontSize',30)
    title('Spettro AMPIEZZE FILTRATO');

    %% grafico di confronto tra il segnale filtrato ed il segnale
originale di un generico frame (es. frame 1000)
    figure(3)
    hold on

```



```

surf(T_matrix_24_07_AISI304L(:,:,1000),'FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','inter
p');
    surf(T_matrix_24_07_AISI304L_filt(:,:,1000),'FaceColor','red');
    view([-37.5 30]);
    xlabel('pixel','FontSize',20)
    ylabel('pixel','FontSize',20)
    zlabel('T [°C]','FontSize',20)
    legend('segnale ORIGINALE', 'segnale FILTRATO')
    title ('Confronto segnale ORIGINALE e FILTRATO di un frame generico')

    %% grafico 3D di T0, confronto tra segnale originale e filtrato
    figure(4)
    subplot(1,2,1)
    surf(flip(T0/2),'FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','interp')    %ritorno di
T0 in AMPIEZZA
    xlim([0 v]);
    ylim([0 u]);
    xlabel('pixel')
    ylabel('pixel')
    zlabel('T0 [°C]')
    title('T0');

    subplot(1,2,2)
    surf(flip(T0_filt),'FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','interp')
    xlim([0 v]);
    ylim([0 u]);
    xlabel('pixel')
    ylabel('pixel')
    zlabel('T0 [°C]')
    title('T0 FILTRATO');

    %% grafico 3D del RANGE di T1, confronto tra segnale originale e
filtrato
    figure(5)
    subplot(1,2,1)
    surf(flip(T1),'FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','interp')
    colorbar
    xlim([0 v]);
    ylim([0 u]);
    xlabel('pixel')
    ylabel('pixel')
    zlabel('\DeltaT1 [°C]','FontSize',20)
    title('RANGE di T1');

    subplot(1,2,2)
    surf(flip(T1_filt),'FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','interp')
    colorbar
    xlim([0 v]);
    ylim([0 u]);
    xlabel('pixel')

```

```

ylabel('pixel')
xlabel('\DeltaT1 [°C]','FontSize',20)
title('RANGE di T1 FILTRATO');

% Grafico delle due superfici T1 ORIGINALE e T1 FILTRATA sullo stesso
plot
figure(6)
hold on
surf(flip(T1(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp') %RANGE T1 originale
surf(flip(T1_filt(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'FaceColor','red', 'EdgeColor','red') %RANGE T1
filtrata
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([0.5*min(min(T1(b1:end-b1,8:end-8,:)) max(max(T1(b1:end-
b1,8:end-8,:))))]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
xlabel('\DeltaT1 [°C]','FontSize',20)
title('RANGE di T1 ORIGINALE vs FILTRATA');
legend('segnale ORIGINALE', 'segnale FILTRATO')
view([-37.5 30])

% grafico 3D del RANGE di T2, confronto tra segnale originale e
filtrato
figure(7)
subplot(1,2,1)
surf(flip(T2(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp')
colorbar
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([0.5*min(min(T2(b1:end-b1,8:end-8,:)) max(max(T2(b1:end-
b1,8:end-8,:))))]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
xlabel('\DeltaT2 [°C]','FontSize',20)
title('RANGE di T2');

subplot(1,2,2)
surf(flip(T2_filt(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp')
colorbar
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([0.5*min(min(T2_filt(b1:end-b1,b2:end-b2,:))
max(max(T2_filt(b1:end-b1,b2:end-b2,:))))]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
xlabel('\DeltaT2 [°C]','FontSize',20)

```

```

title('RANGE di T2 FILTRATO');

% Grafico delle due superfici T2 ORIGINALE e T2 FILTRATA sullo stesso
plot
figure(8)
hold on
surf(flip(T2(b1:end-b1,8:end-
8,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor', 'interp') %RANGE T2 originale
surf(flip(T2_filt(b1:end-b1,8:end-
8,:)), 'FaceAlpha',0.5, 'FaceColor', 'red', 'EdgeColor', 'red') %RANGE T2
filtrata
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([0.5*min(min(T2(b1:end-b1,8:end-8,:)) max(max(T2(b1:end-
b1,8:end-8,:))))]);
xlabel('pixel', 'FontSize',20)
ylabel('pixel', 'FontSize',20)
zlabel('\DeltaT2 [°C]', 'FontSize',20)
title('RANGE di T2 ORIGINALE vs FILTRATA');
legend('segnale ORIGINALE', 'segnale FILTRATO')
view([-37.5 30]);

% grafico differenza percentuale di T2 rispetto a T2media e curve di
isolivello
figure (9)
subplot(1,2,1)
surf(flip(Delta), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor', 'interp');
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([1.5*min(min(Delta)) 1.5*max(max(Delta))]);
xlabel('pixel')
ylabel('pixel')
zlabel('%')
title('Differenza percentuale RANGE di T2 rispetto a T2 media SEGNALE
FILTRATO');
subplot(1,2,2)
contour(flip(Delta),10, 'ShowText', 'on');
title('Curve di isolivello differenza percentuale')

% grafico differenza percentuale T1 NON FILTRATA e FILTRATA
figure (10)
surf(flip(Delta_T1), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor', 'interp');
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([1.5*min(min(Delta_T1)) 1.5*max(max(Delta_T1))]);
xlabel('pixel')
ylabel('pixel')
zlabel('%')
title('Differenza percentuale RANGE di T1 NON FILTRATA rispetto a T1
FILTRATA');

```

```

%% grafico differenza percentuale T2 NON FILTRATA e FILTRATA
figure (11)
surf(flip(Delta_T2), 'FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp');
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
zlim([1.5*min(min(Delta_T2)) 1.5*max(max(Delta_T2))]);
xlabel('pixel')
ylabel('pixel')
zlabel('%')
title('Differenza percentuale RANGE di T2 NON FILTRATA rispetto a T2
FILTRATA');

%% grafico 2D del RANGE di T1, confronto tra segnale originale e
filtrato
figure(12)
subplot(1,2,1)
surface(flip(T1(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceColor','interp','FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp')
c=colorbar('FontSize',12);
c.Label.String = '\DeltaT1 [°C]';
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
title('Mappa del RANGE di T1');

subplot(1,2,2)
surface(flip(T1_filt(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceColor','interp','FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp')
c=colorbar('FontSize',12);
c.Label.String = '\DeltaT1 [°C]';
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
title('Mappa del RANGE di T1 FILTRATO');

%% grafico 2D del RANGE di T2, confronto tra segnale originale e
filtrato
figure(13)
subplot(1,2,1)
surface(flip(T2(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceColor','interp','FaceAlpha',0.5, 'EdgeColor','interp')
c=colorbar('FontSize',12);
c.Label.String = '\DeltaT2 [°C]';
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)

```

```
title('Mappa del RANGE di T2');

subplot(1,2,2)
surface(flip(T2_filt(b1:end-b1,b2:end-
b2,:)), 'FaceColor','interp','FaceAlpha',0.5,'EdgeColor','interp')
c=colorbar('FontSize',12);
c.Label.String = '\DeltaT2 [°C]';
xlim([0 v]);
ylim([0 u]);
xlabel('pixel','FontSize',20)
ylabel('pixel','FontSize',20)
title('Mappa del RANGE di T2 FILTRATO');
end
```


APPENDICE A.3

SCHEDE PROVINI

Nome Provino:	R01_1
----------------------	-------

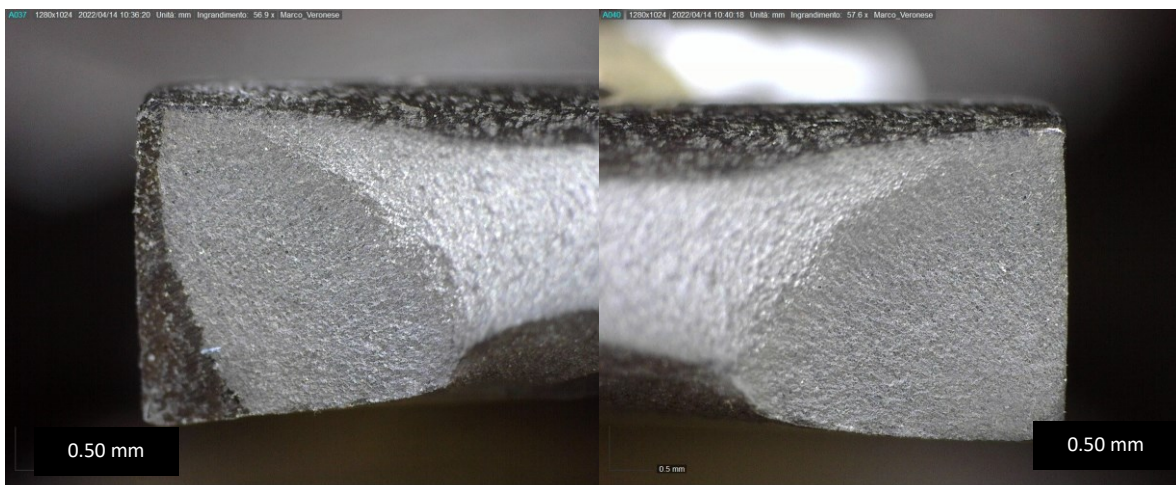
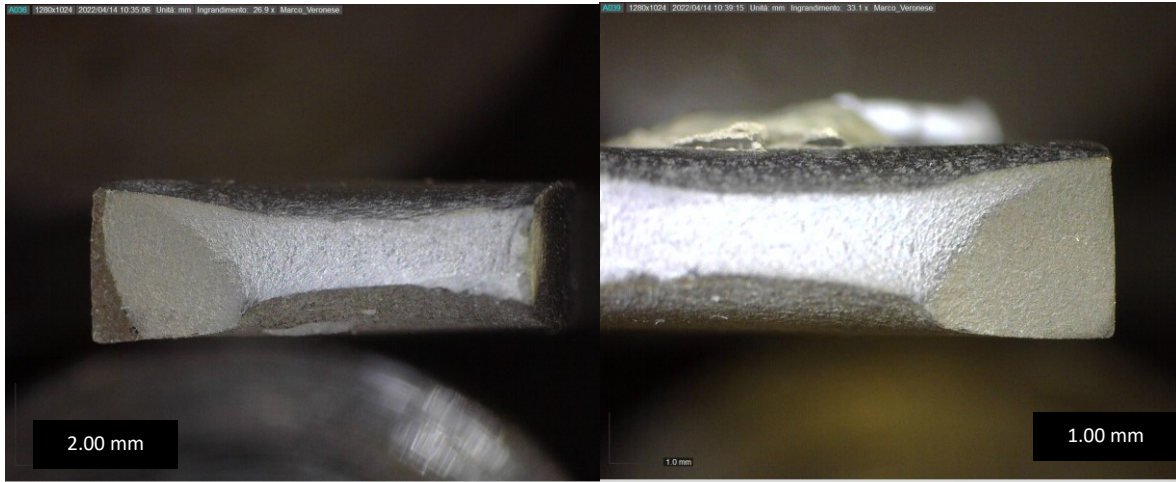
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	4/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

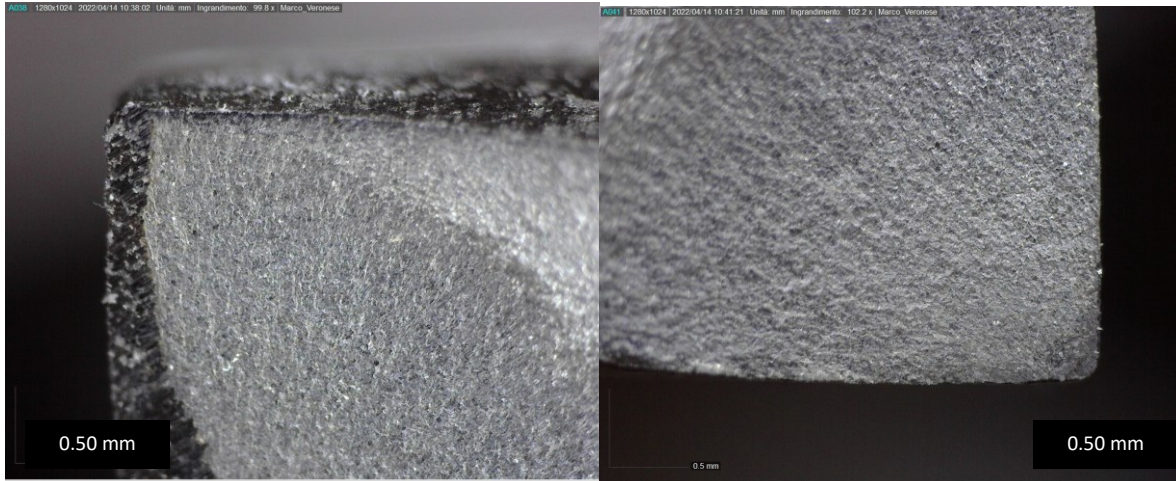
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,13	Frequenza f_L [Hz] =	4 fino a 12
Spessore s [mm]=	3,95		
F_{max} [kN] =	19,2	σ_{max} [MPa] =	400
F_{min} [kN] =	1,9	σ_{min} [MPa] =	40
σ_a [MPa] (ampiezza) =	180	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	190512	NOTE	

Danneggiamento







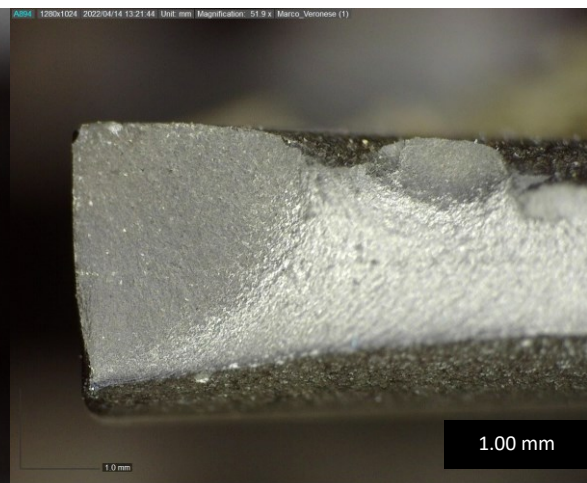
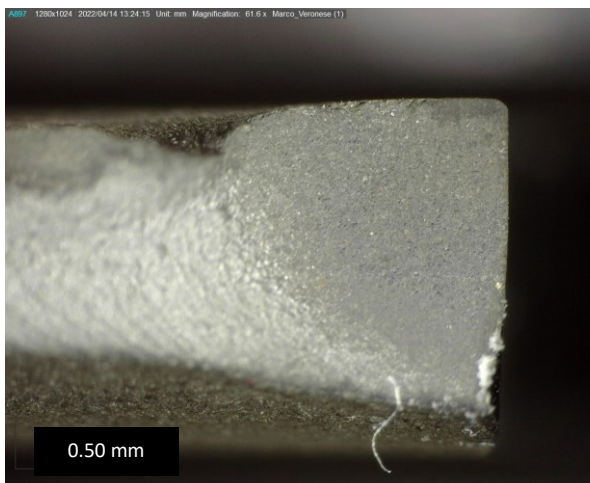
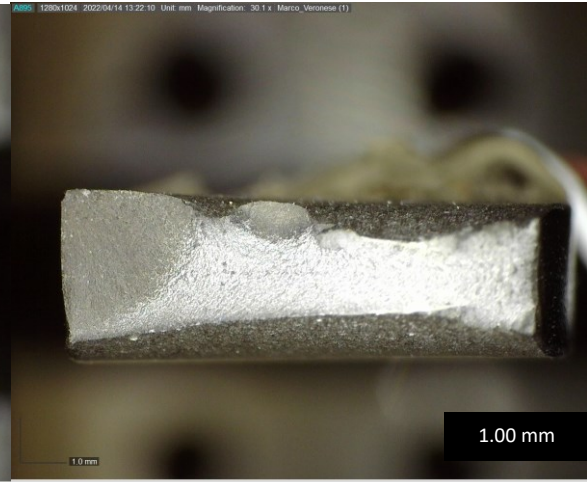
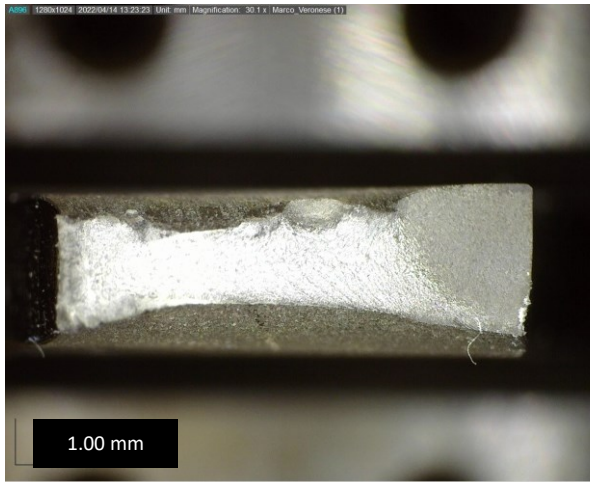
Nome Provino:	R01_2		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	6/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

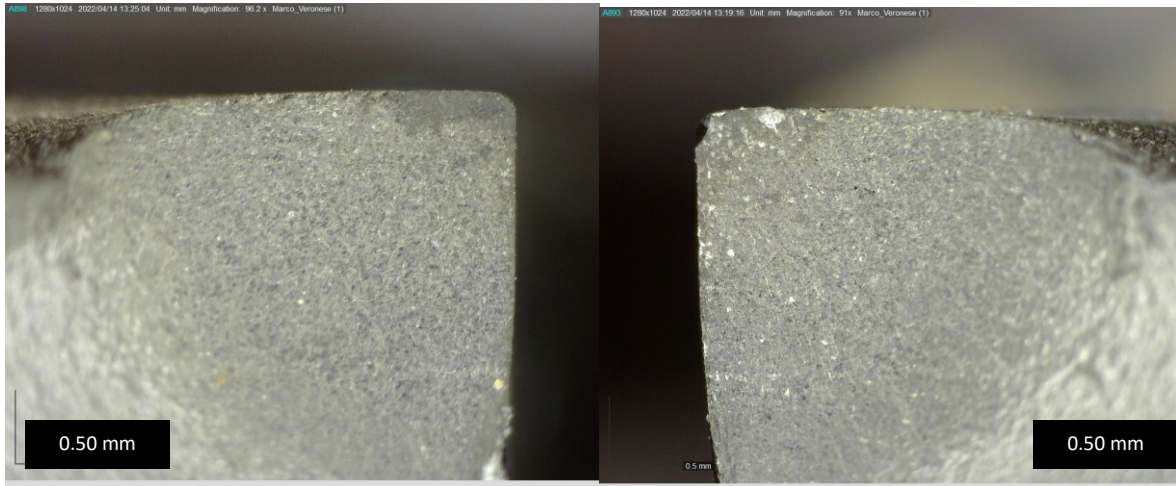
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 9,5
Spessore s [mm]=	4,35		
F_{max} [kN] =	23,4	σ_{max} [MPa] =	444,4
F_{min} [kN] =	2,3	σ_{min} [MPa] =	40
σ_a [MPa] (ampiezza) =	200	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	81411	NOTE	

Danneggiamento







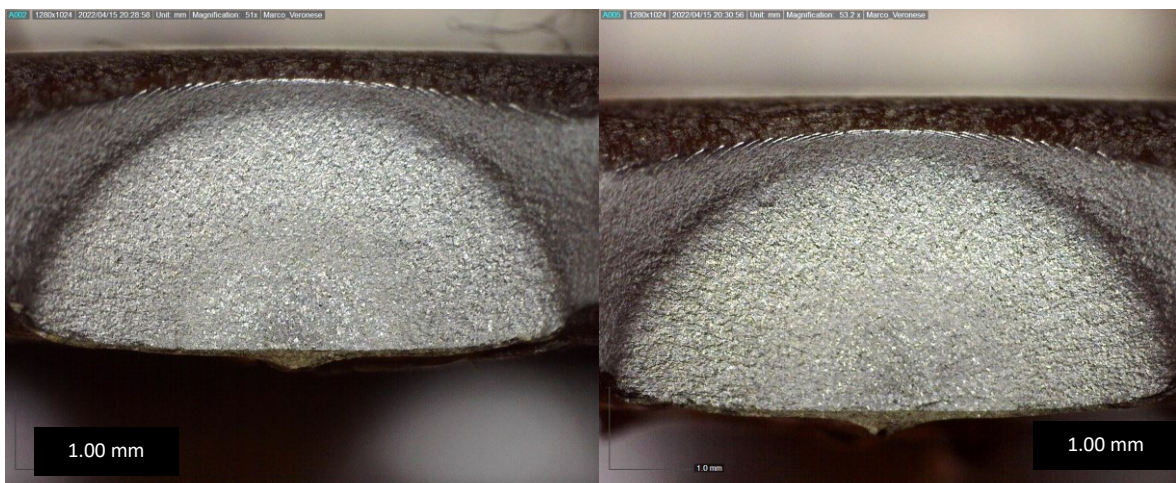
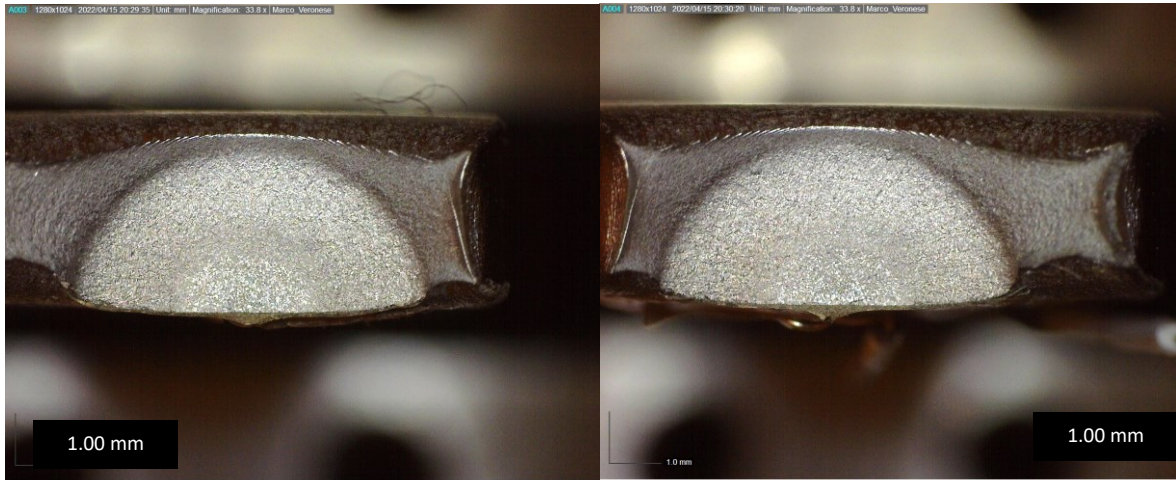
Nome Provino:	R01_3		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	7/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

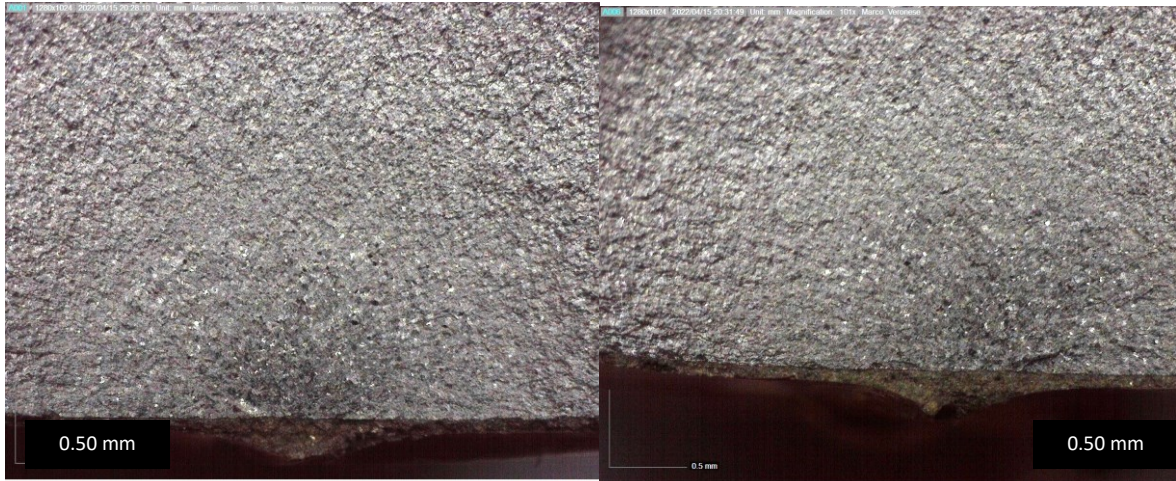
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 19
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	17,6	σ_{max} [MPa] =	355,6
F_{min} [kN] =	1,8	σ_{min} [MPa] =	35,6
σ_a [MPa] (ampiezza) =	160	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	458992	NOTE	

Danneggiamento







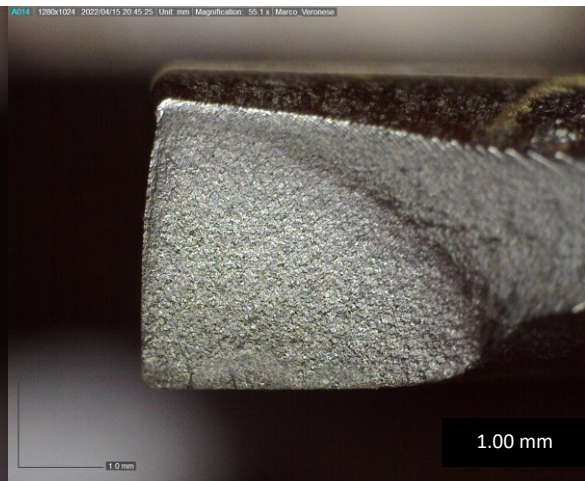
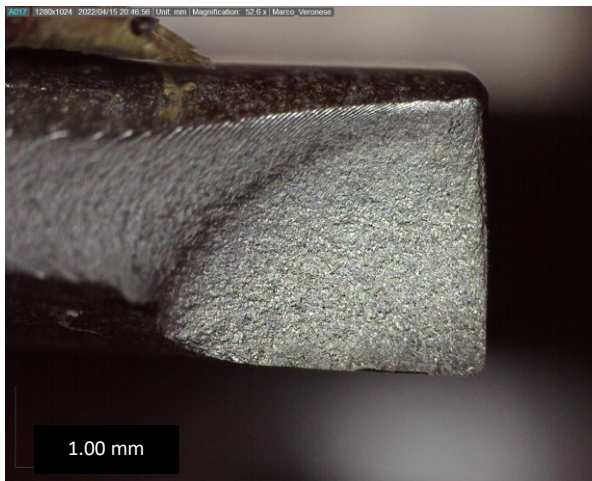
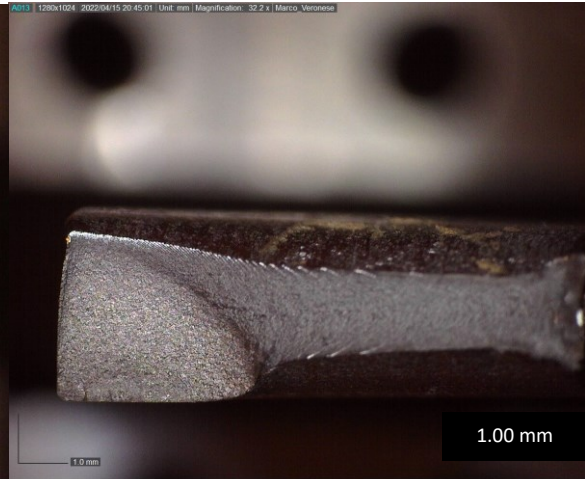
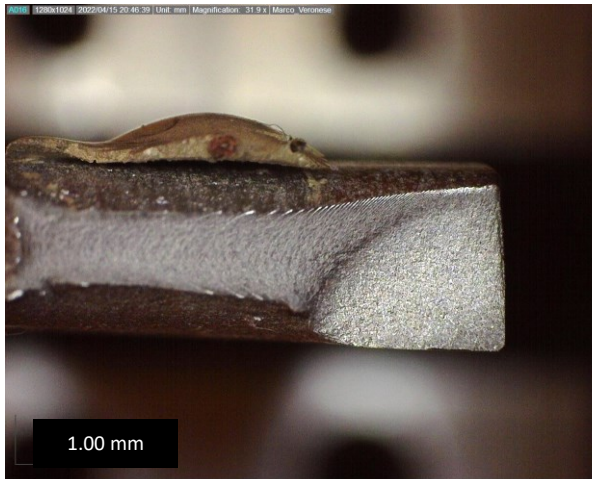
Nome Provino:	R01_4		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	8/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

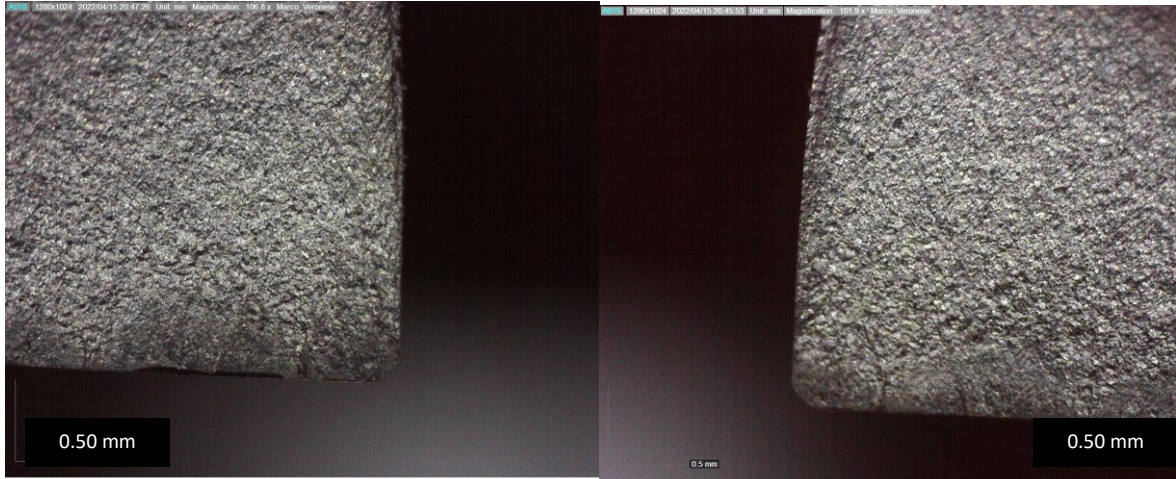
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 12
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	19,8	σ_{max} [MPa] =	400
F_{min} [kN] =	2,0	σ_{min} [MPa] =	40
σ_a [MPa] (ampiezza) =	180	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	110774	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_5

Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	11/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 34
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	15,4	σ_{max} [MPa] =	400
F_{min} [kN] =	1,5	σ_{min} [MPa] =	40
σ_a [MPa] (ampiezza) =	140	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	2000000	NOTE	
	*		

Danneggiamento



Nome Provino: R01_6

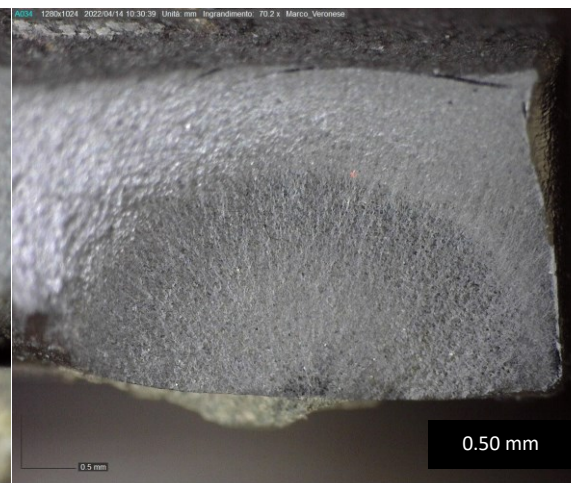
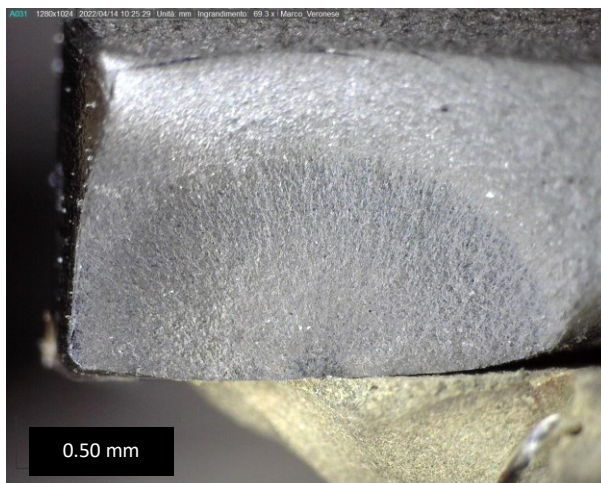
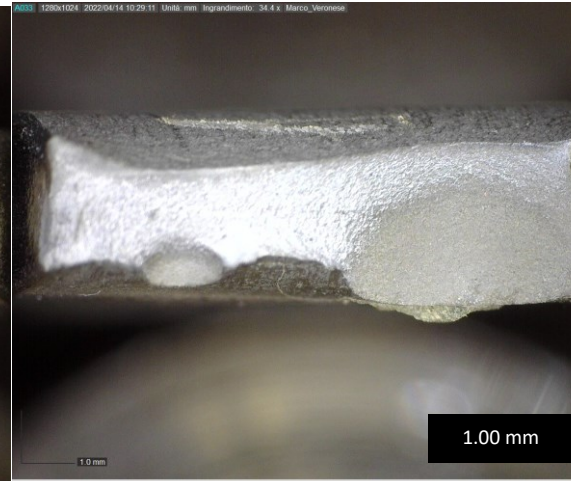
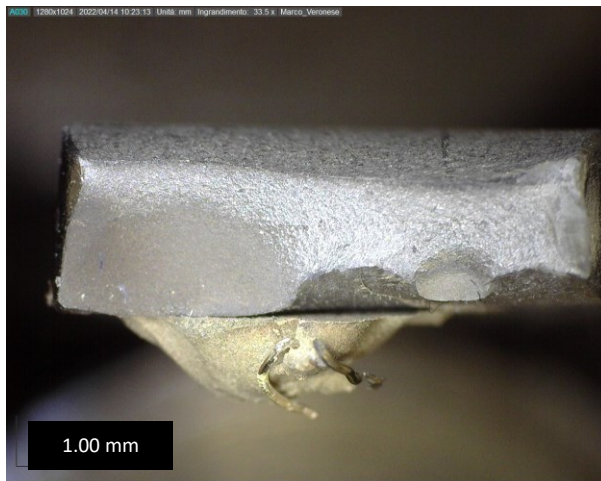
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	12/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

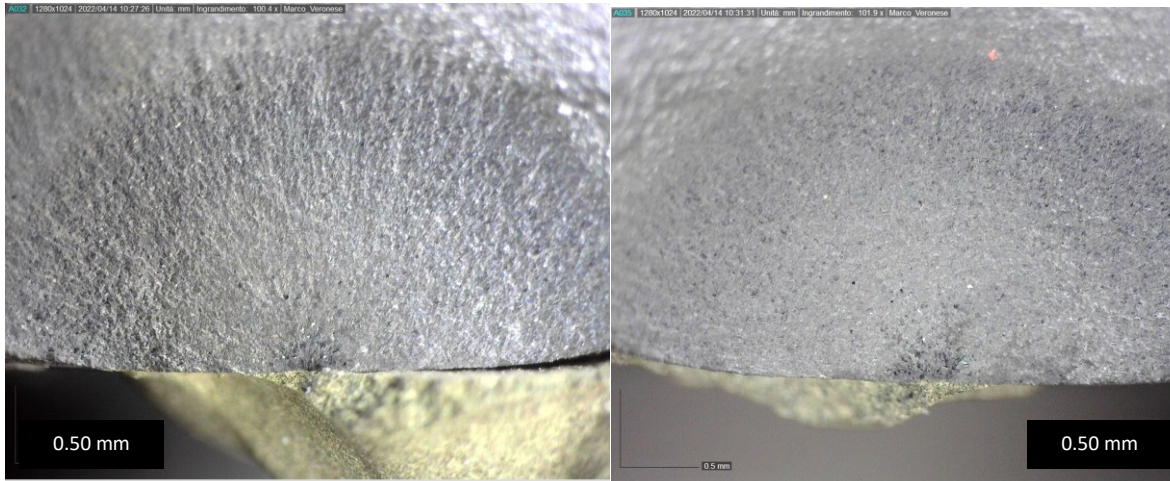
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 10
Spessore s [mm]=	4,0		
F_{max} [kN] =	21,5	σ_{max} [MPa] =	444,4
F_{min} [kN] =	2,2	σ_{min} [MPa] =	44,4
σ_a [MPa] (ampiezza) =	200	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	121005	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_7

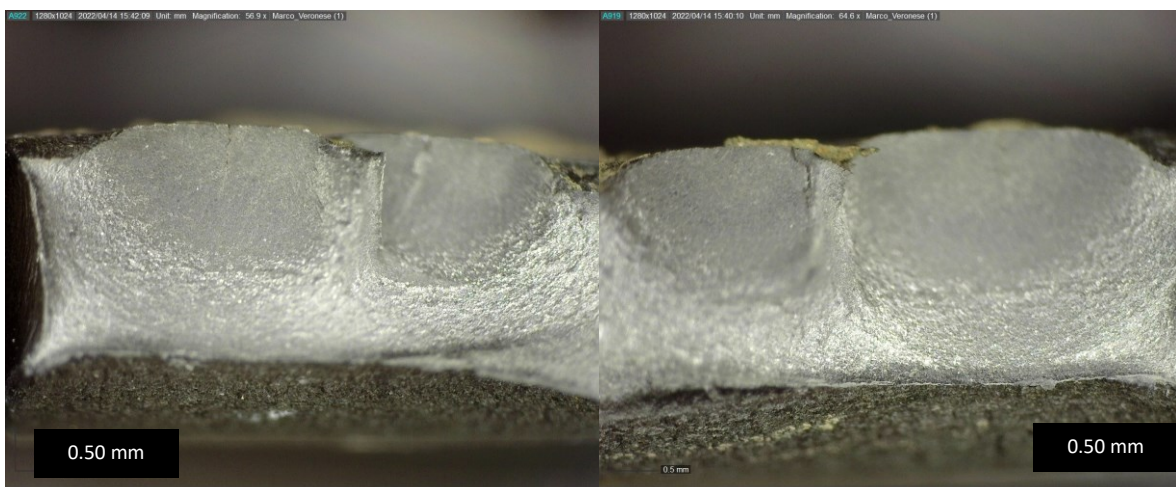
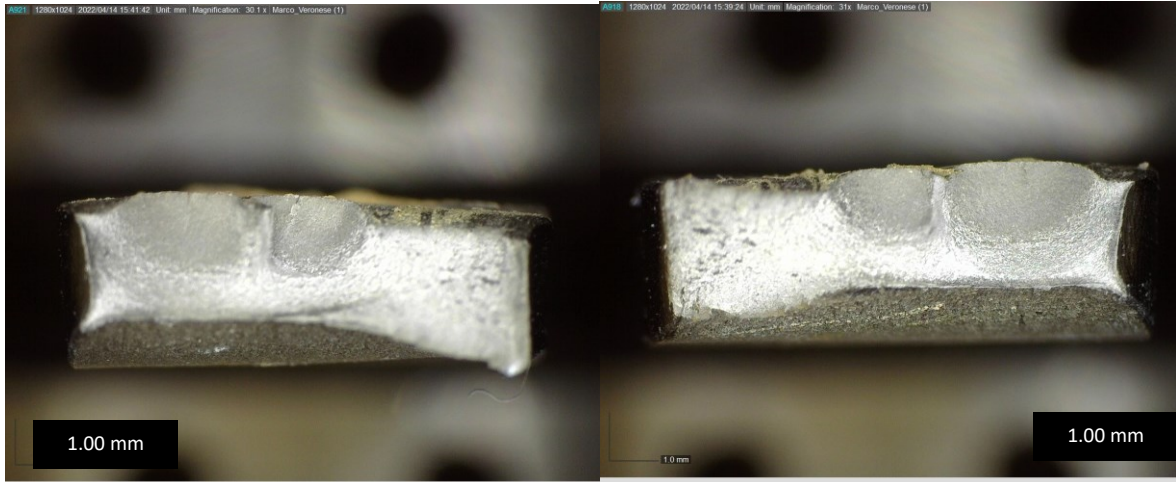
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	14/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

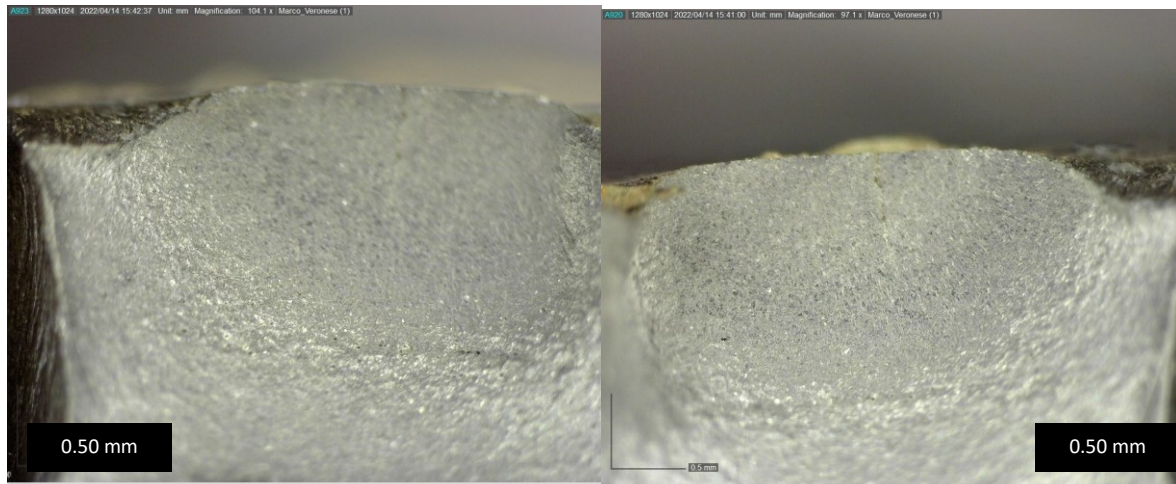
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 6
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	26,5	σ_{max} [MPa] =	533,3
F_{min} [kN] =	2,6	σ_{min} [MPa] =	53,3
σ_a [MPa] (ampiezza) =	240	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	49701	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_8

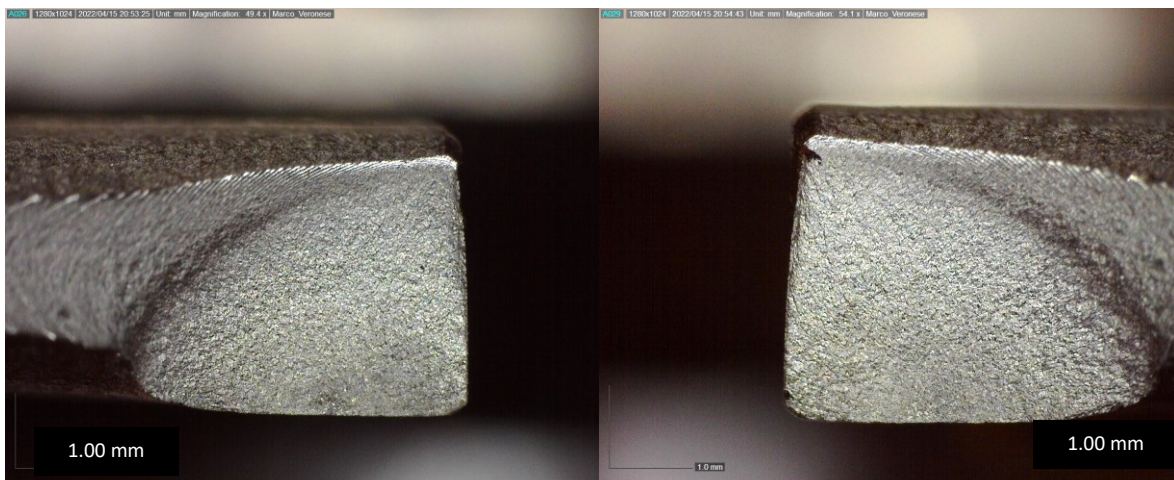
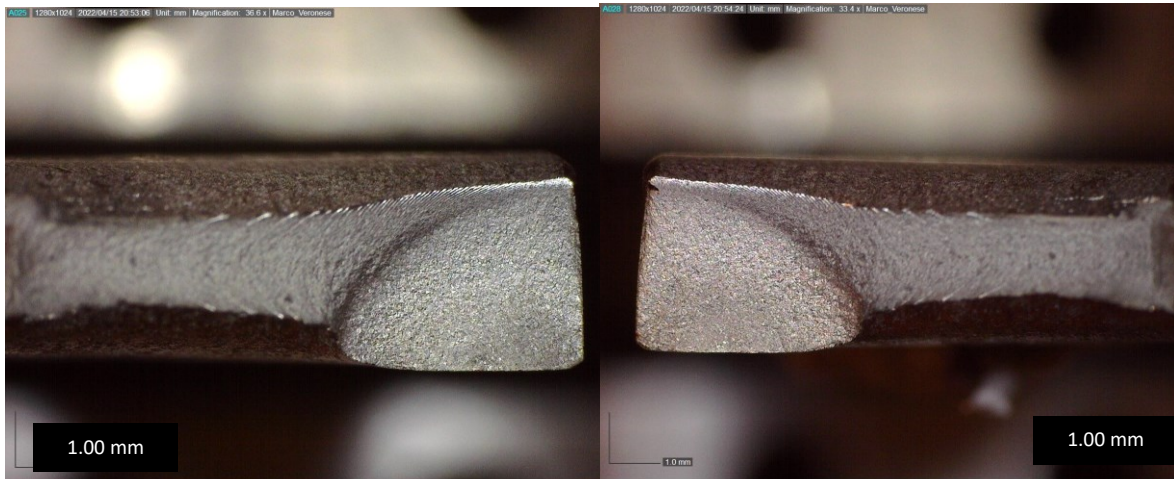
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	18/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,1	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 17
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	18,7	σ_{max} [MPa] =	377,8
F_{min} [kN] =	1,9	σ_{min} [MPa] =	37,8
σ_a [MPa] (ampiezza) =	170	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	332247	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_9

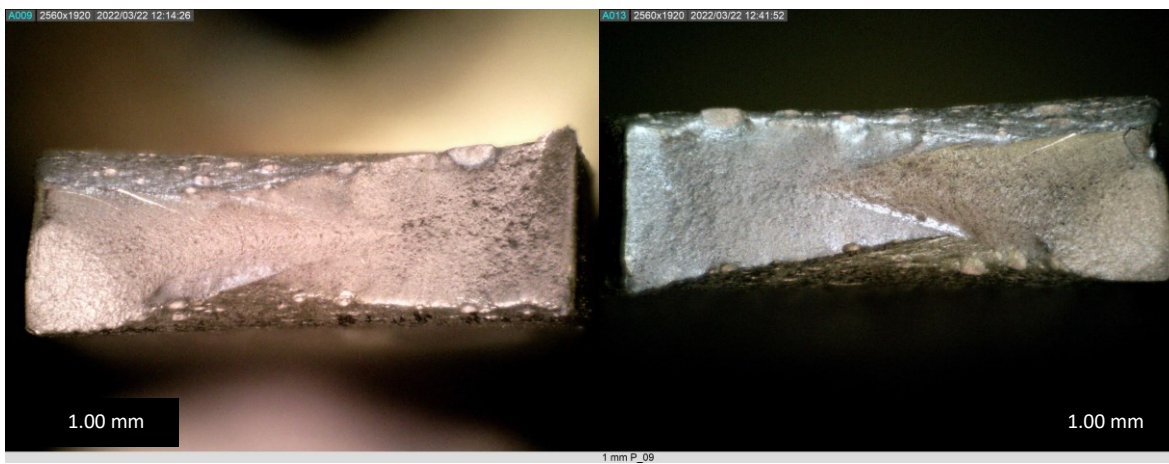
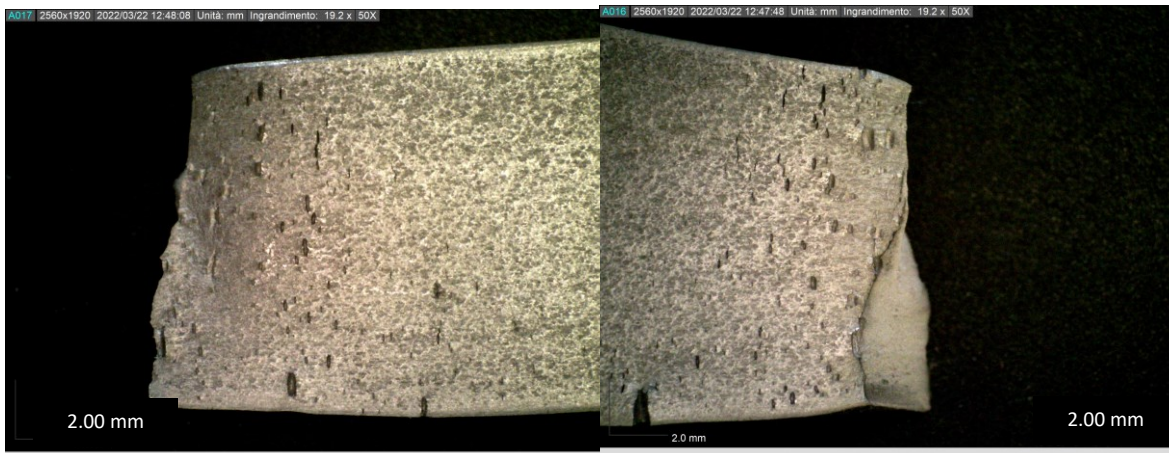
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	19/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

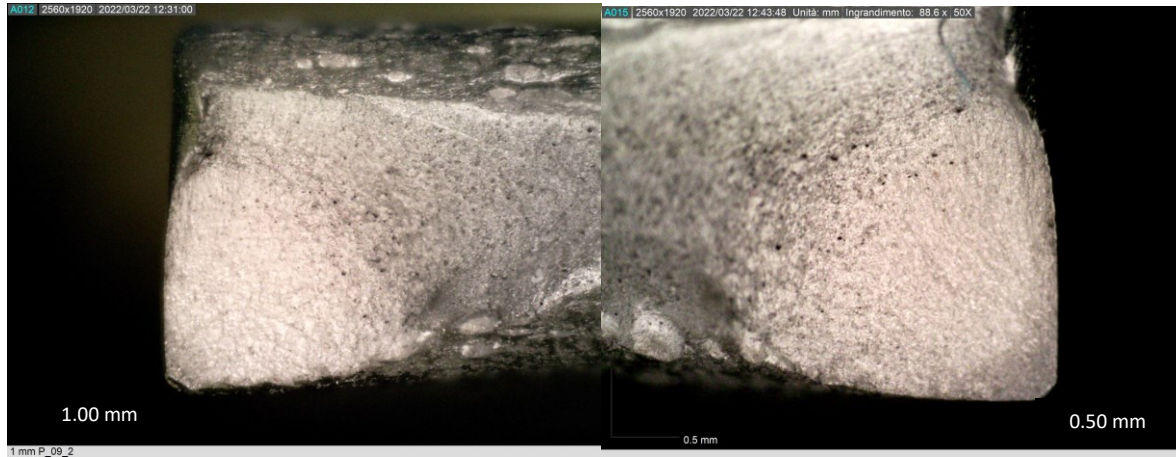
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 8
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	28,4	σ_{max} [MPa] =	577,8
F_{min} [kN] =	2,8	σ_{min} [MPa] =	57,8
σ_a [MPa] (ampiezza) =	260	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	42156	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_10

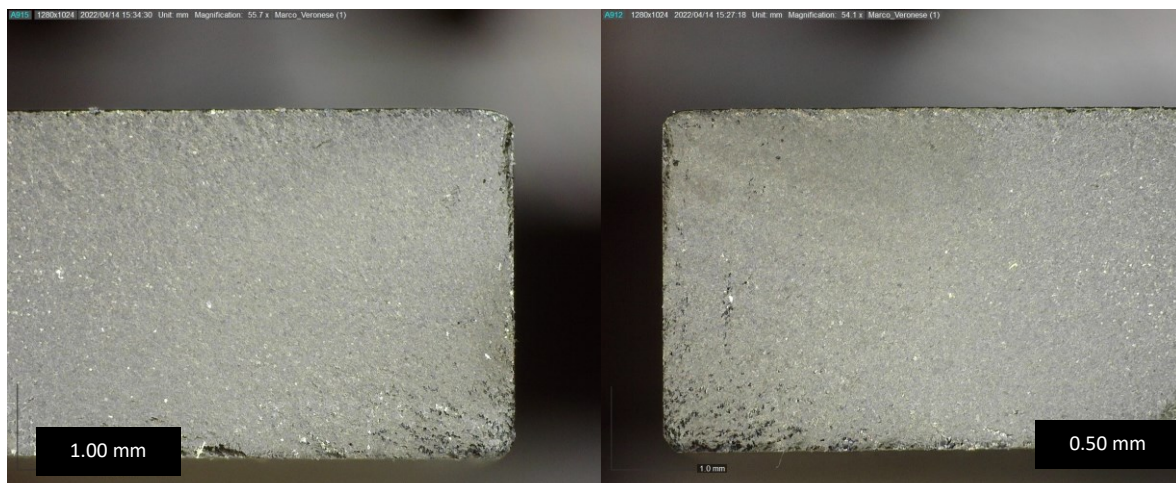
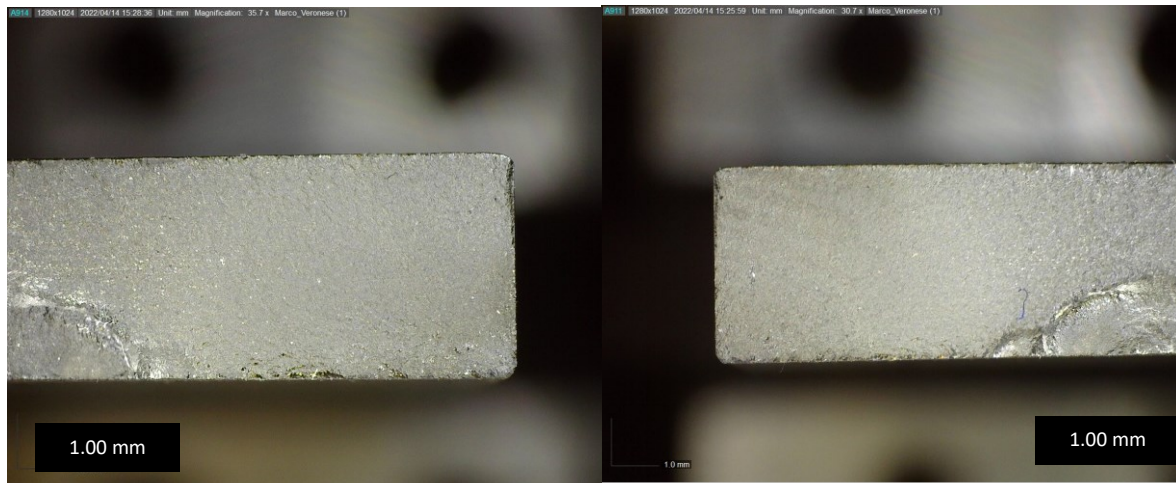
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	20/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

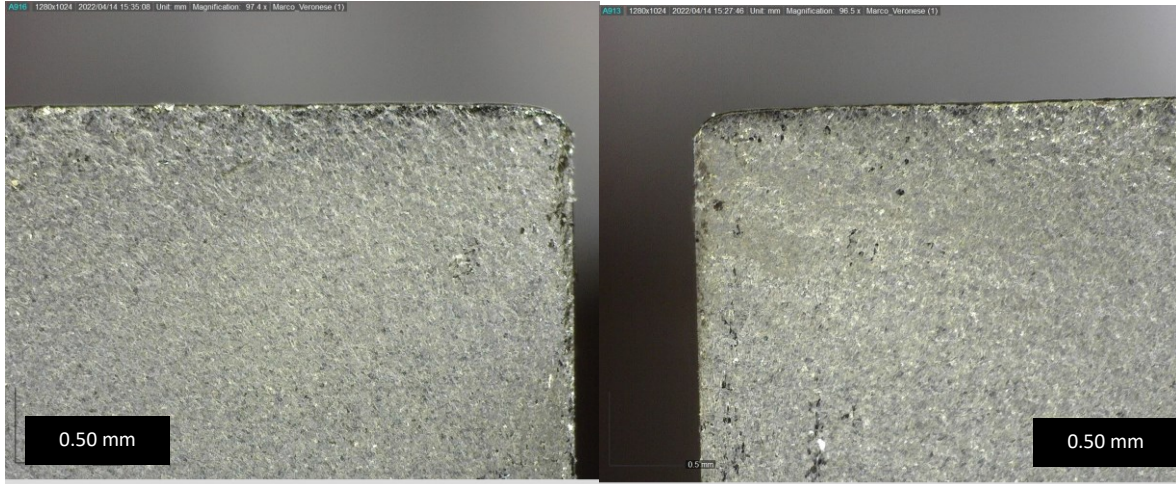
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20	Frequenza f_L [Hz] =	1 a 2.1
Spessore s [mm]=	3,97		
F_{max} [kN] =	16,7	σ_{max} [MPa] =	210
F_{min} [kN] =	-16,7	σ_{min} [MPa] =	-210
σ_a [MPa] (ampiezza) =	210	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	86665	NOTE	

Danneggiamento







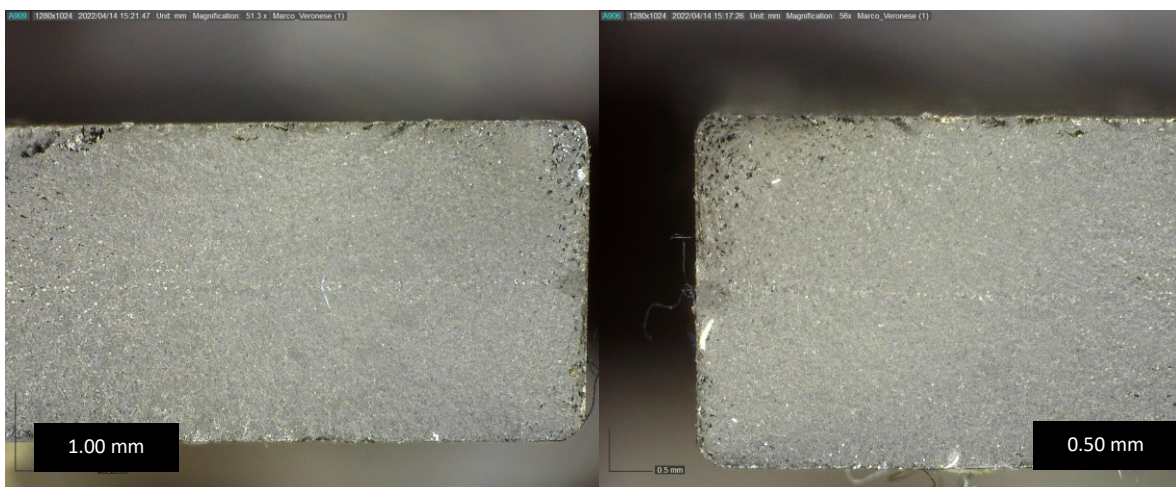
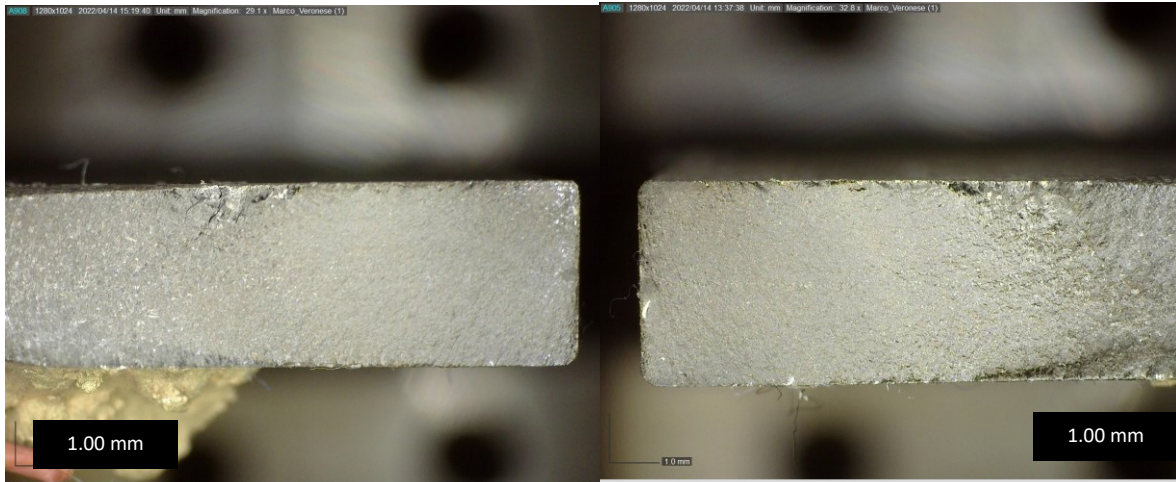
Nome Provino:	R_-1_12		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	21/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

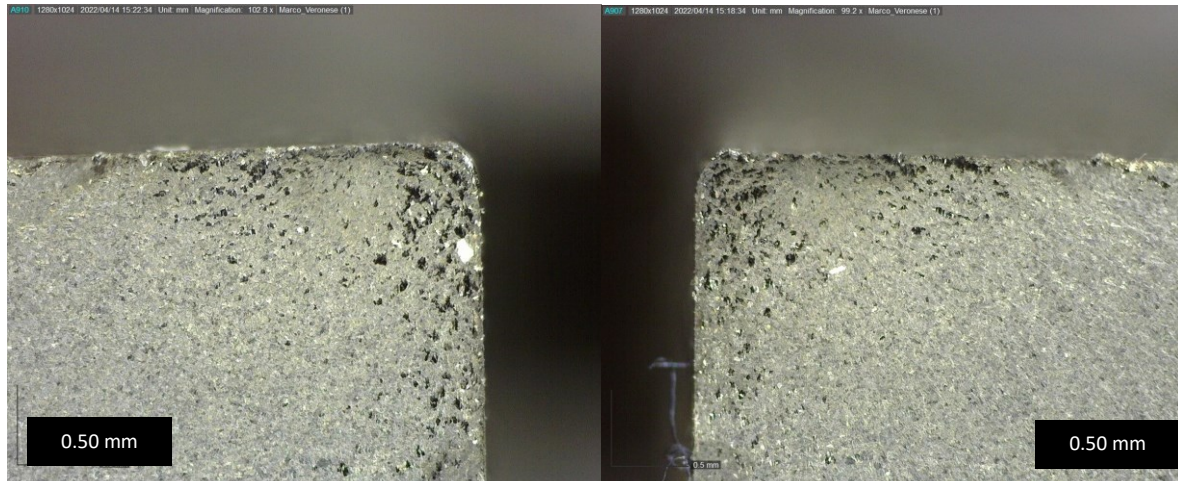
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20	Frequenza f_L [Hz] =	1 a 1.5
Spessore s [mm]=	4		
F_{max} [kN] =	16,8	σ_{max} [MPa] =	210
F_{min} [kN] =	-16,8	σ_{min} [MPa] =	-210
σ_a [MPa] (ampiezza) =	210	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	105287	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_14

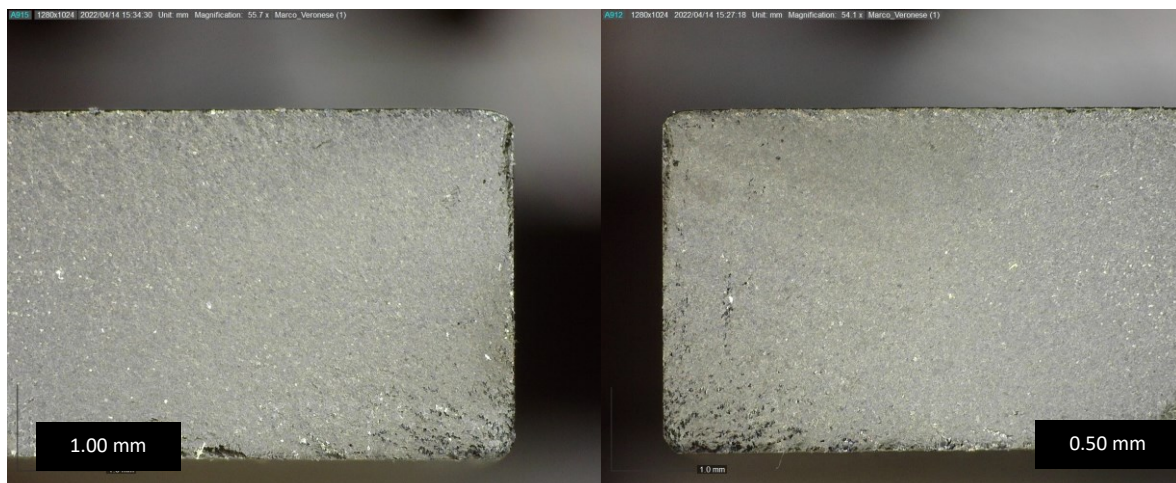
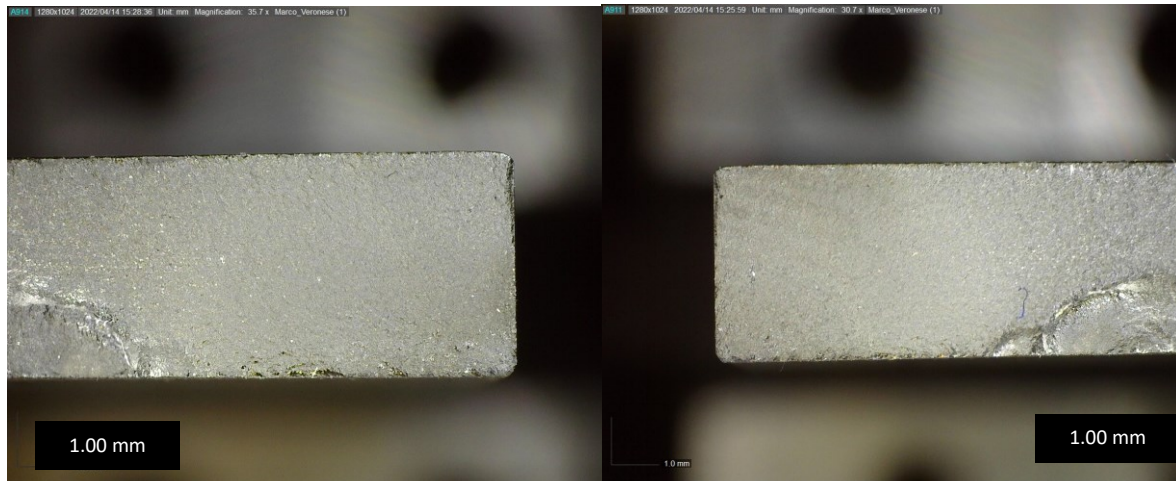
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	22/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

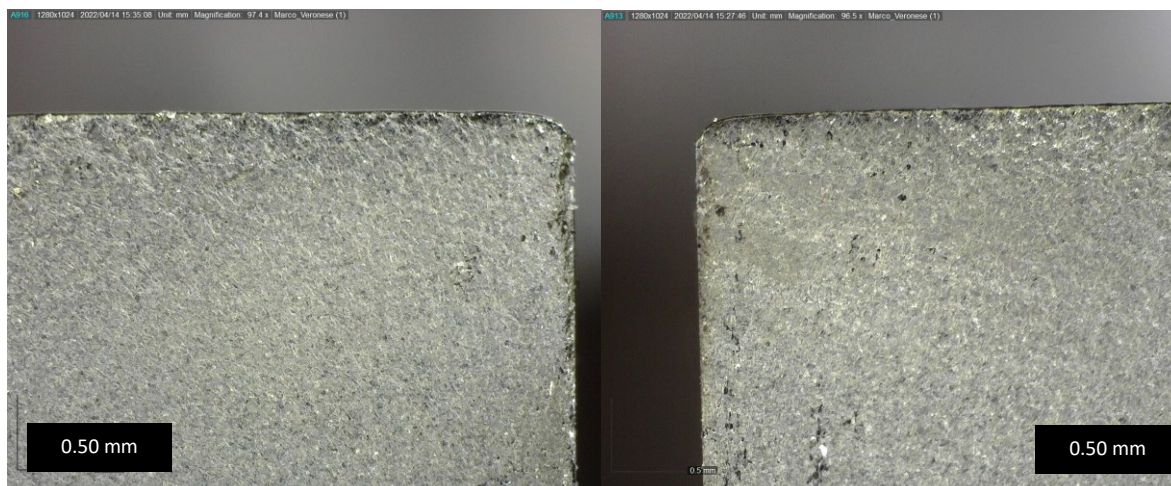
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20	Frequenza f_l [Hz] =	1 a 2
Spessore s [mm]=	4		
F_{max} [kN] =	16,8	σ_{max} [MPa] =	210
F_{min} [kN] =	-16,8	σ_{min} [MPa] =	-210
σ_a [MPa] (ampiezza) =	210	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	119785	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino:	R01_15		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	25/10/2021	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 10
Spessore s [mm]=	4		
F_{max} [kN] =	17,4	σ_{max} [MPa] =	355,6
F_{min} [kN] =	1,7	σ_{min} [MPa] =	35,6
σ_a [MPa] (ampiezza) =	160	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	2000000*	NOTE	

Danneggiamento



Nome Provino: R01_16

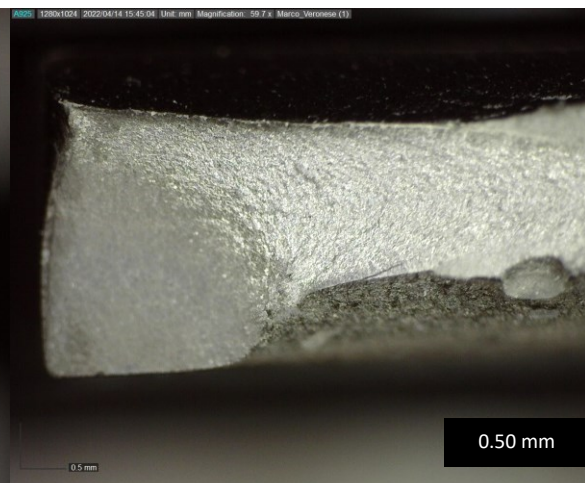
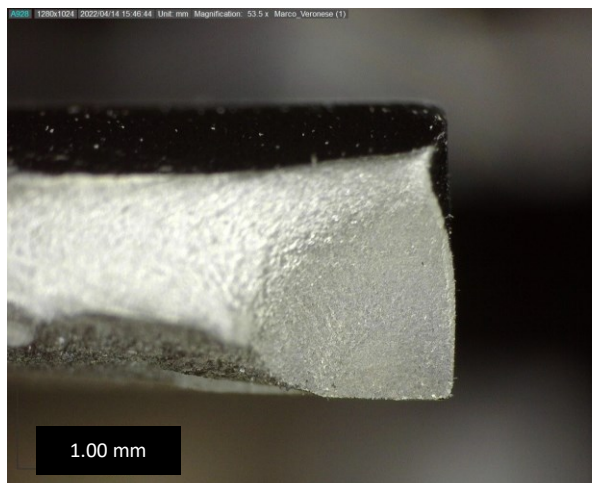
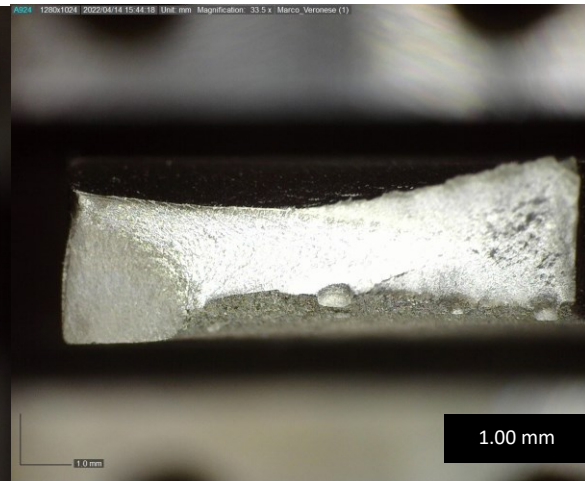
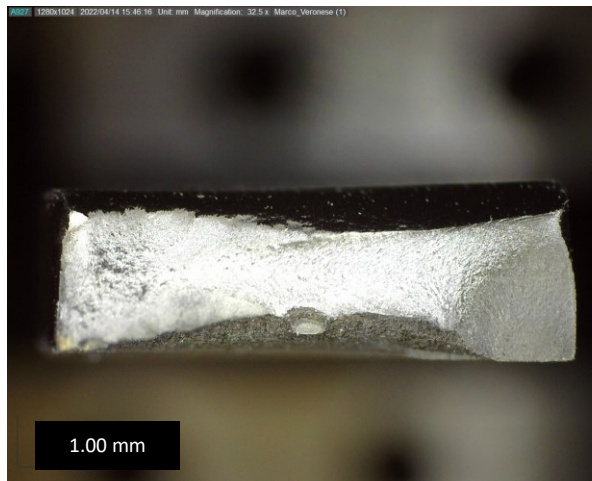
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	26/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

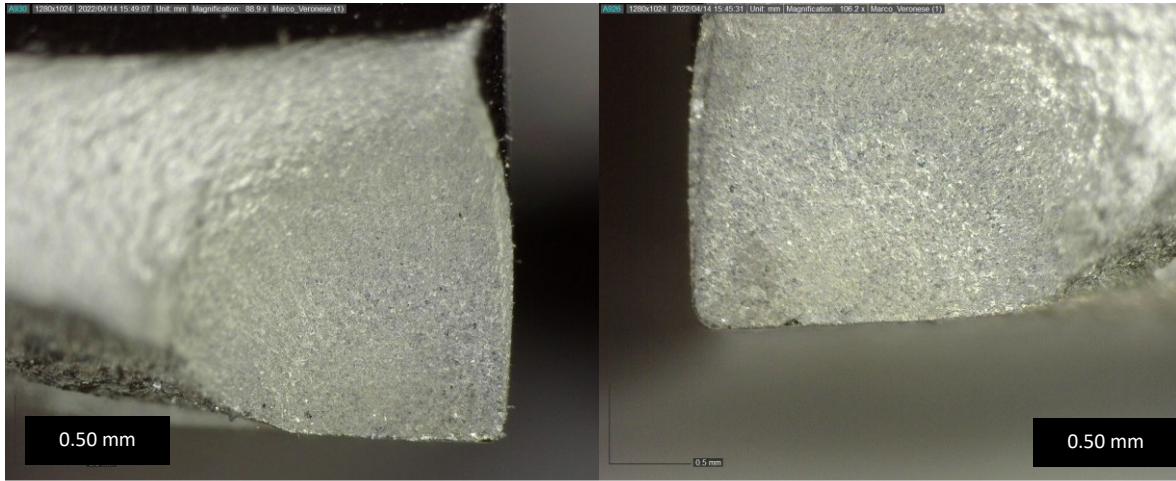
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 9
Spessore s [mm]=	4		
F_{max} [kN] =	26,0	σ_{max} [MPa] =	533,3
F_{min} [kN] =	2,6	σ_{min} [MPa] =	53,3
σ_a [MPa] (ampiezza) =	240	Rapporto di ciclo =	1,0
N° cicli a rottura =	87430	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_17

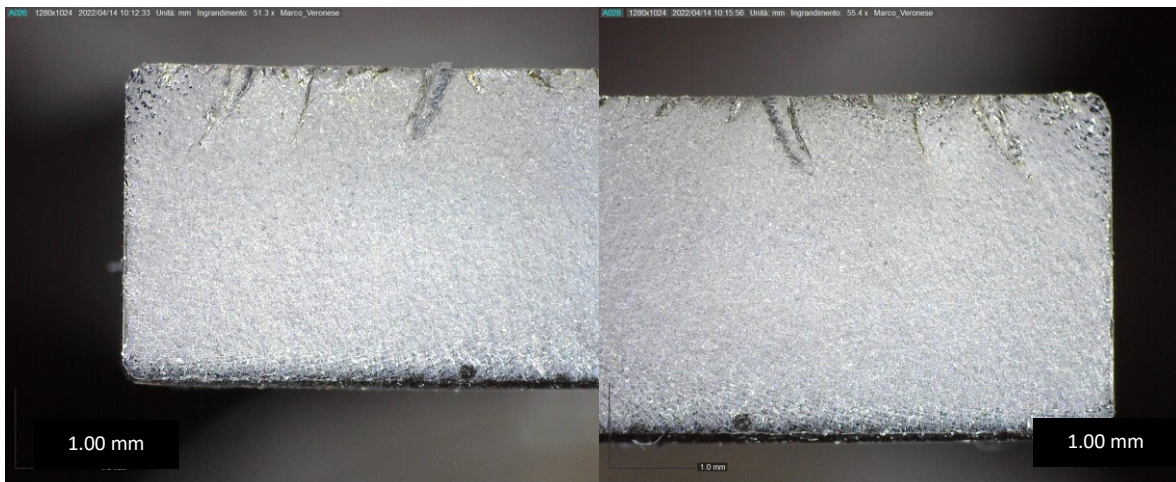
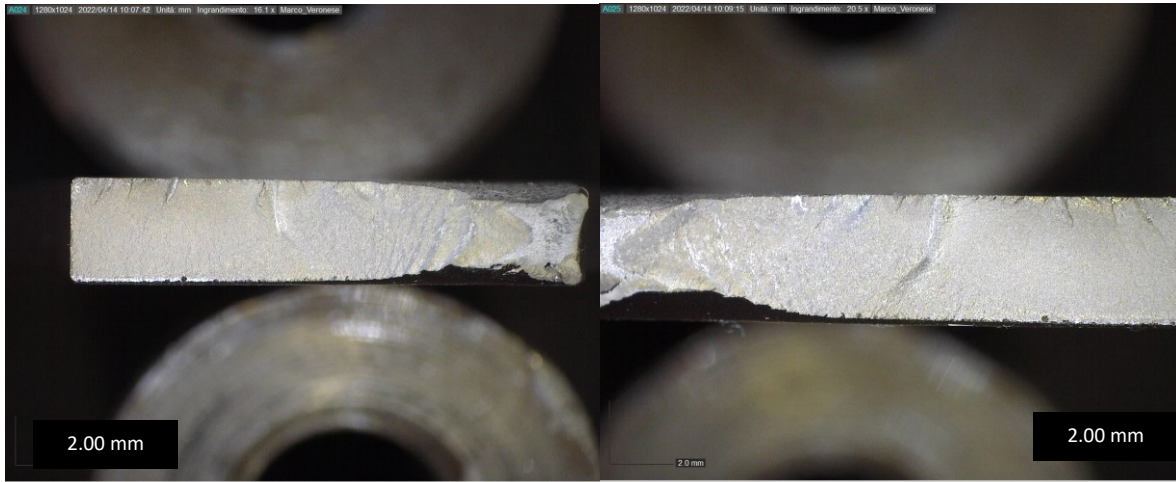
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	27/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

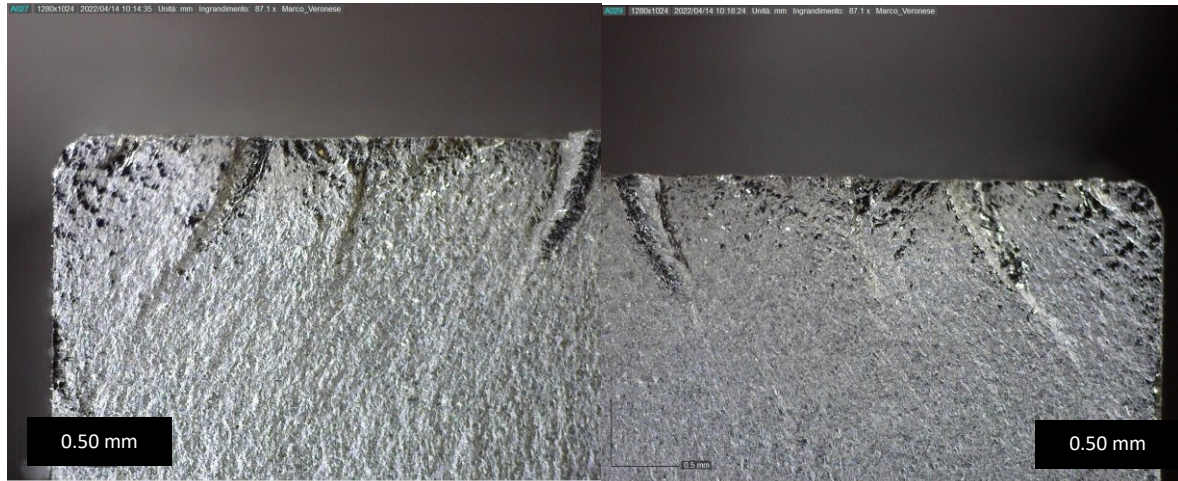
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 a 1.5
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	17,4	σ_{max} [MPa] =	210
F_{min} [kN] =	-17,4	σ_{min} [MPa] =	-210
σ_a [MPa] (ampiezza) =	210	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	47217	NOTE	

Danneggiamento







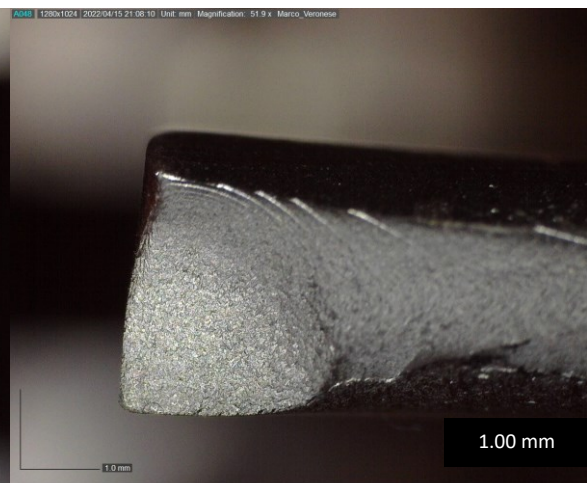
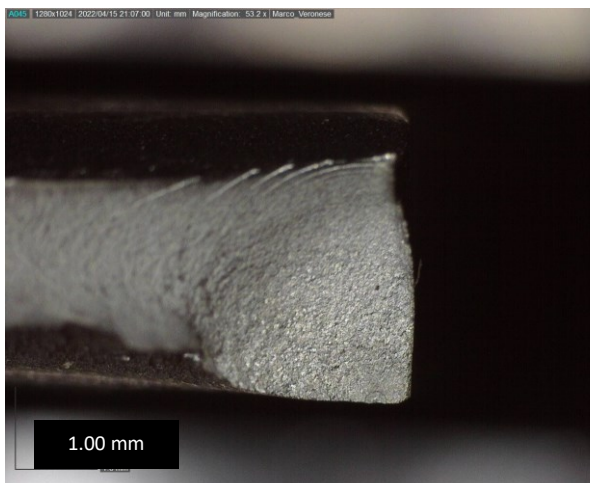
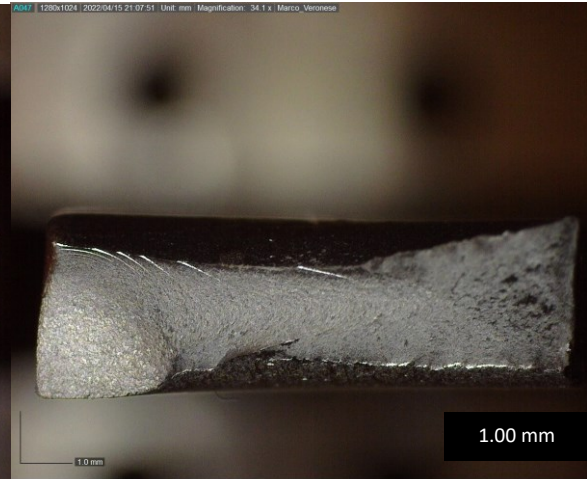
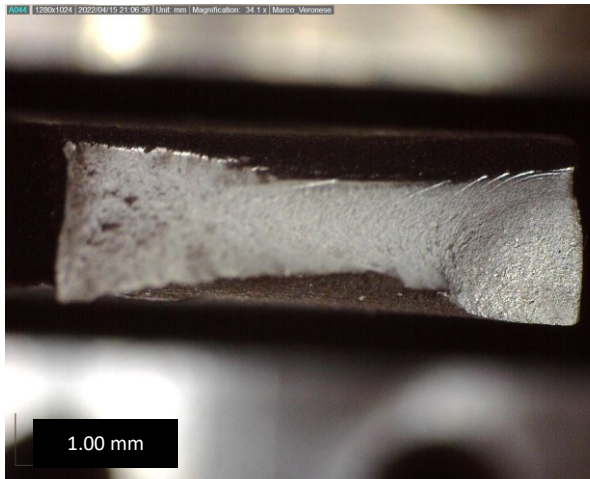
Nome Provino:	R01_18		
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	28/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 20
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	17,8	σ_{max} [MPa] =	622
F_{min} [kN] =	1,8	σ_{min} [MPa] =	62,2
σ_a [MPa] (ampiezza) =	160	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	98167	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_19

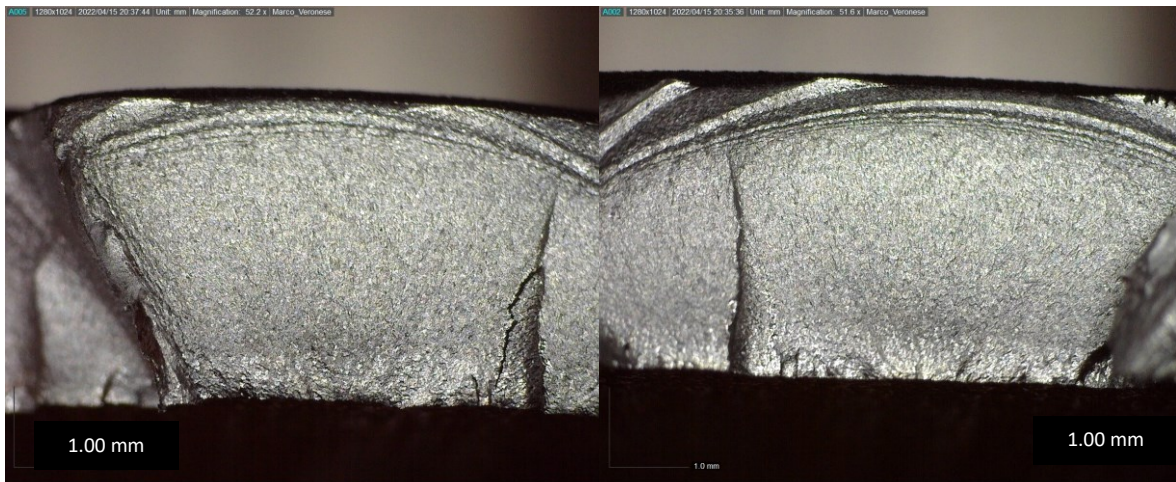
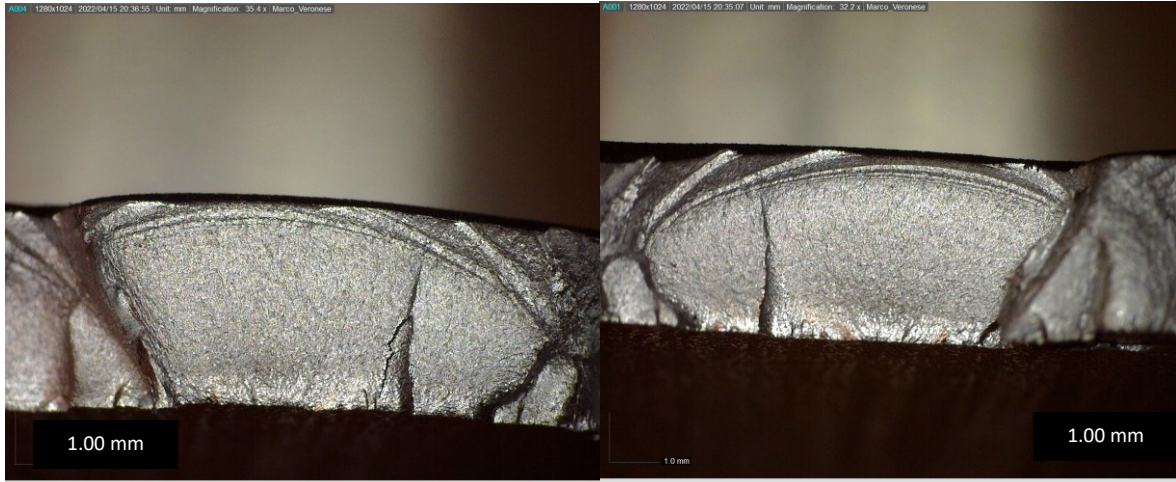
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	29/10/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	1		
Set parametri di processo	-		

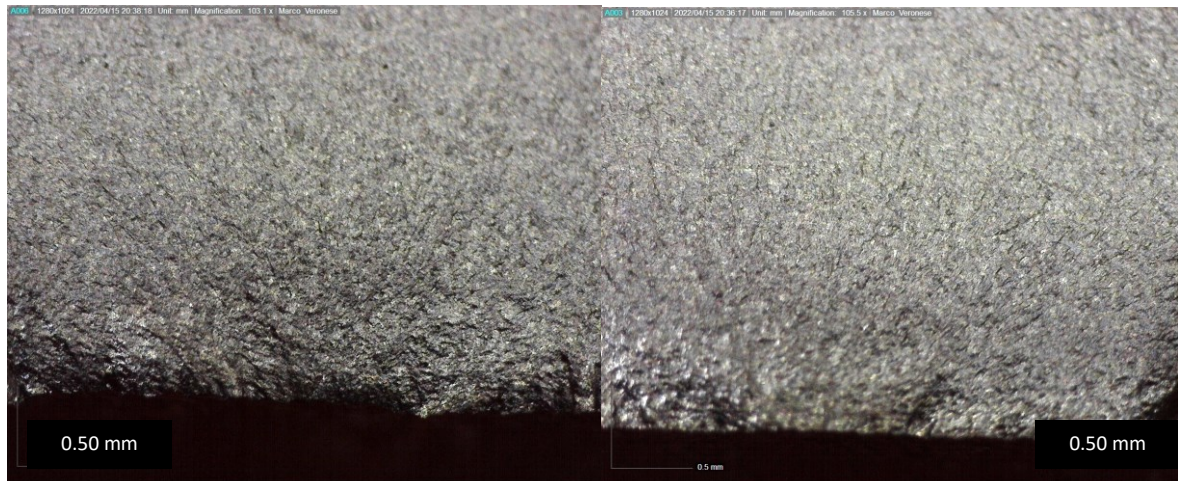
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 16
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	13,3	σ_{max} [MPa] =	240
F_{min} [kN] =	-13,3	σ_{min} [MPa] =	-240
σ_a [MPa] (ampiezza) =	160	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	93812	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_20

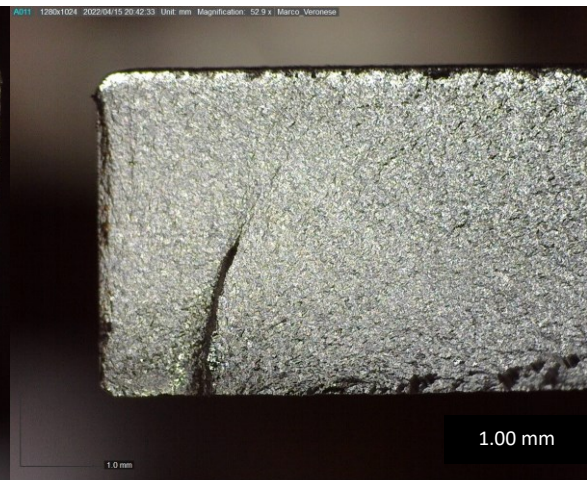
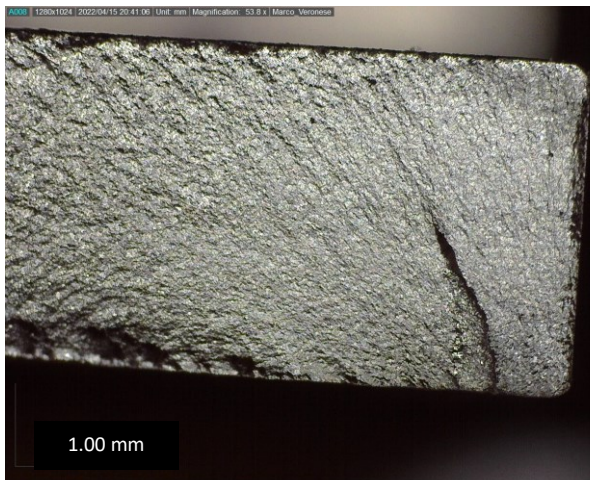
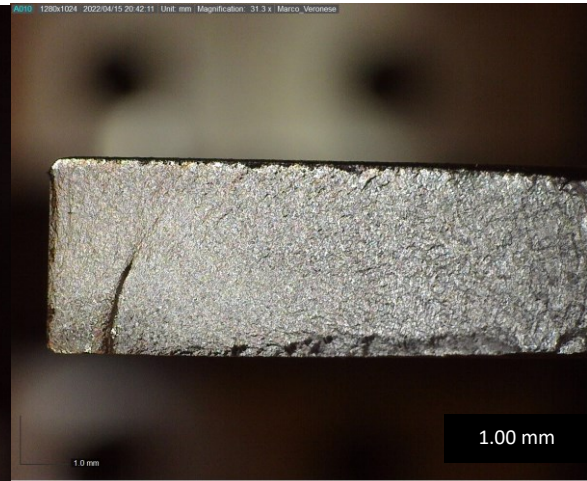
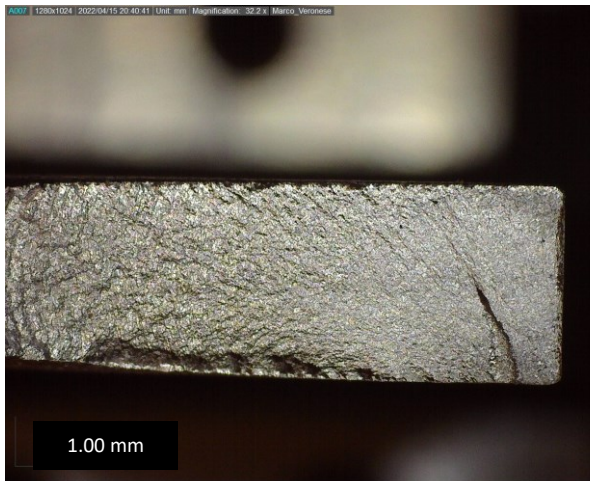
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	3/01/2022	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

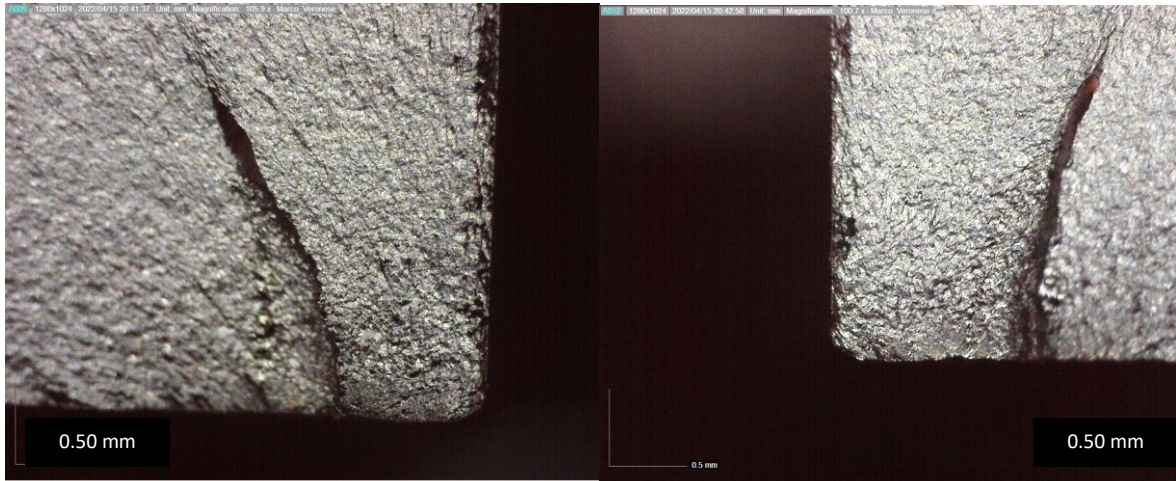
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 16
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	13,3	σ_{max} [MPa] =	240
F_{min} [kN] =	-13,3	σ_{min} [MPa] =	-240
σ_a [MPa] (ampiezza) =	160	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	104215	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R_-1_21

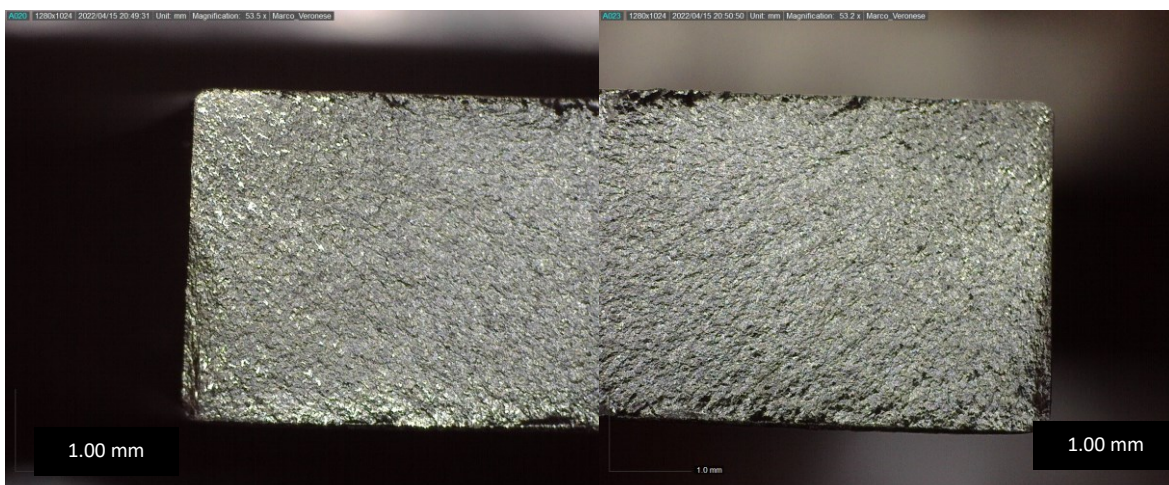
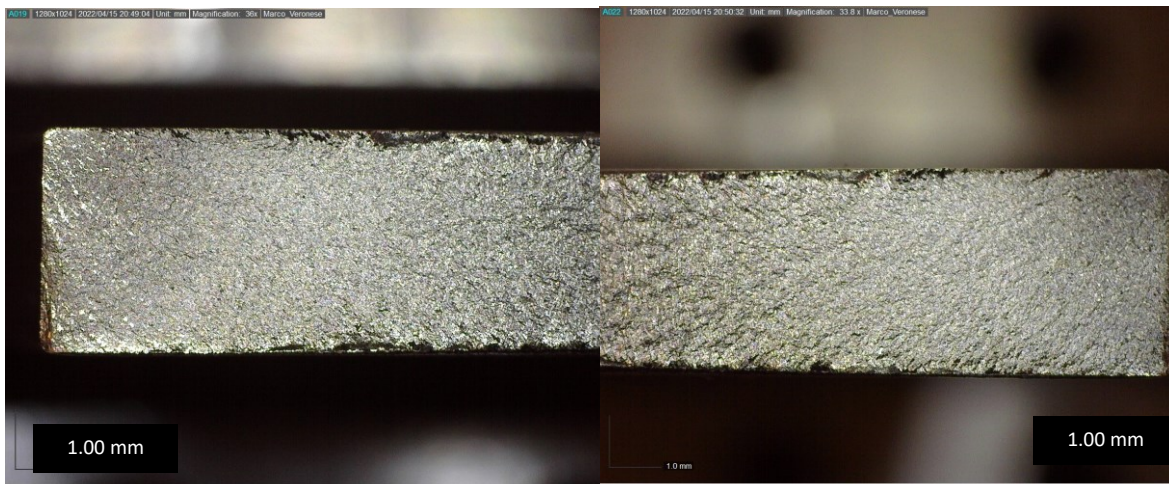
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	4/01/2022	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

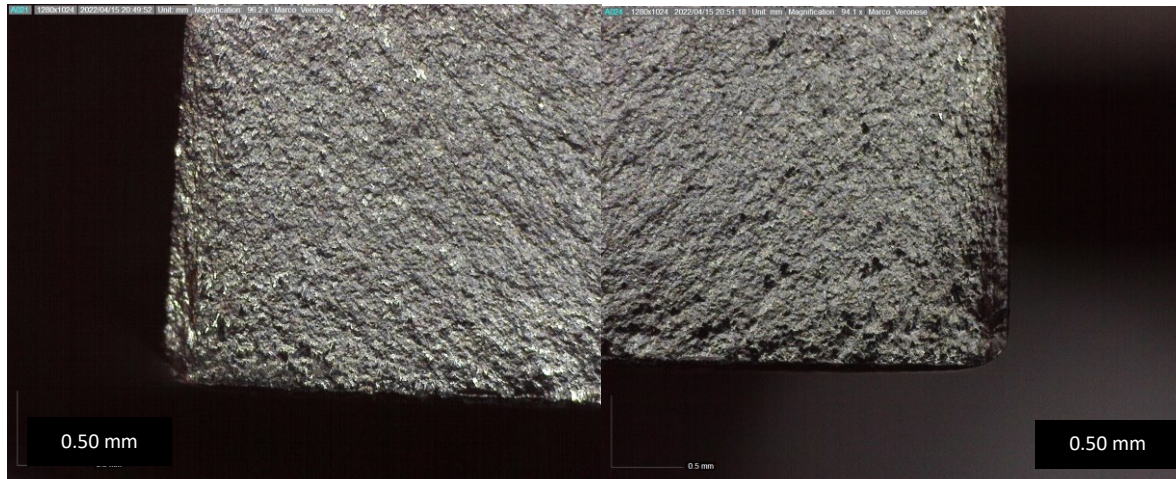
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	20,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 a 2
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	17,4	σ_{max} [MPa] =	210
F_{min} [kN] =	-17,4	σ_{min} [MPa] =	-210
σ_a [MPa] (ampiezza) =	210	Rapporto di ciclo =	-1
N° cicli a rottura =	122891	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_22

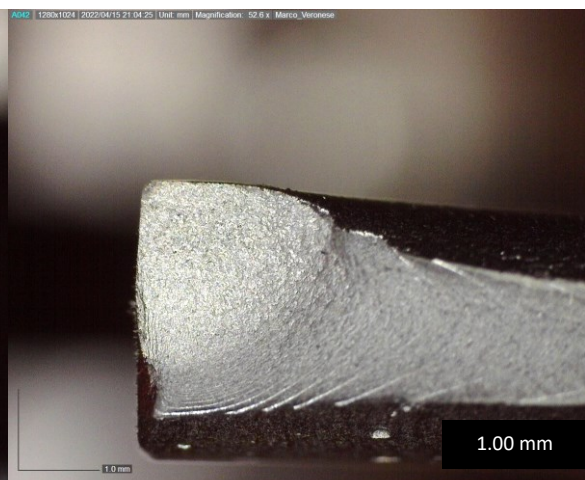
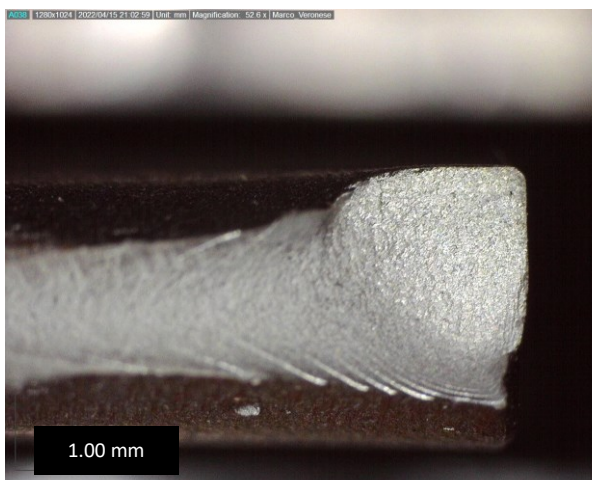
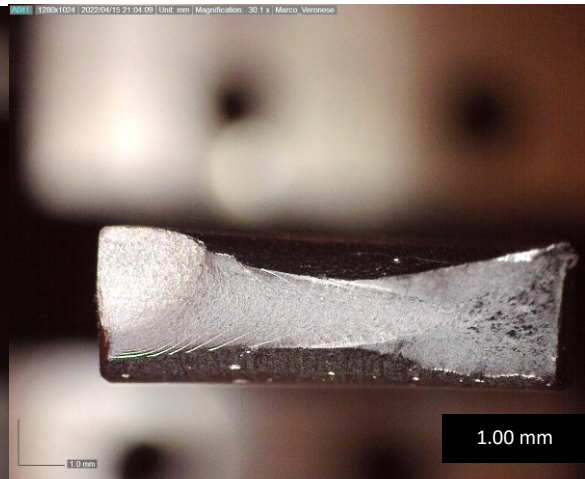
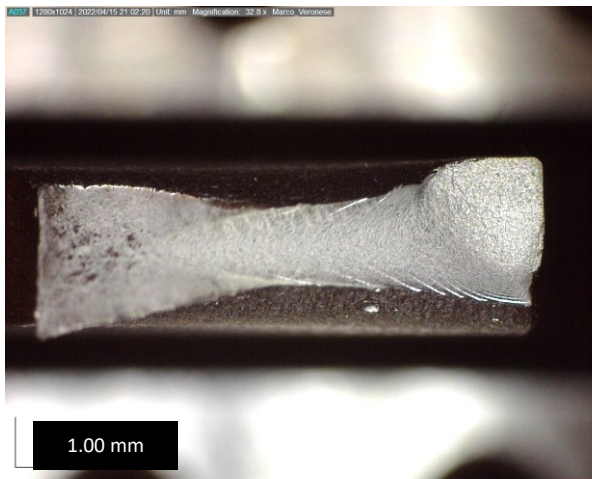
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	4/01/2022	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
Set parametri di processo	-		

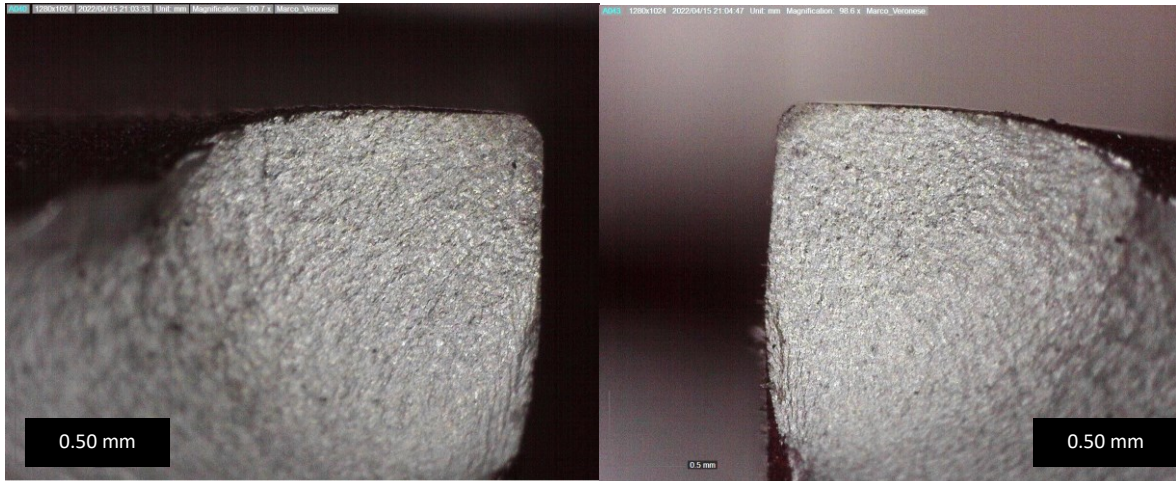
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	11,8	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 7
Spessore s [mm]=	3,8		
F_{max} [kN] =	27,9	σ_{max} [MPa] =	622,2
F_{min} [kN] =	2,8	σ_{min} [MPa] =	62,2
σ_a [MPa] (ampiezza) =	280	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	50678	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_23

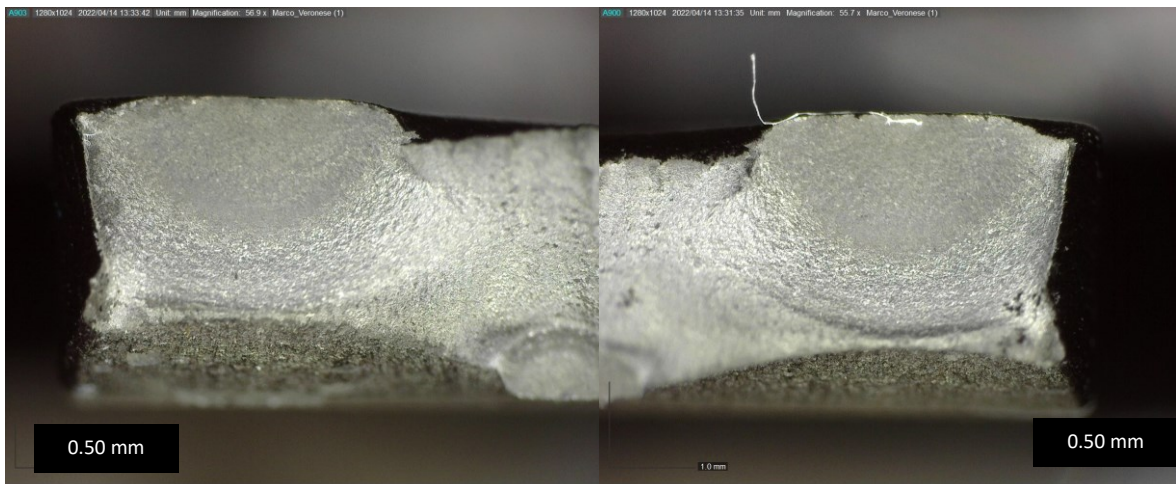
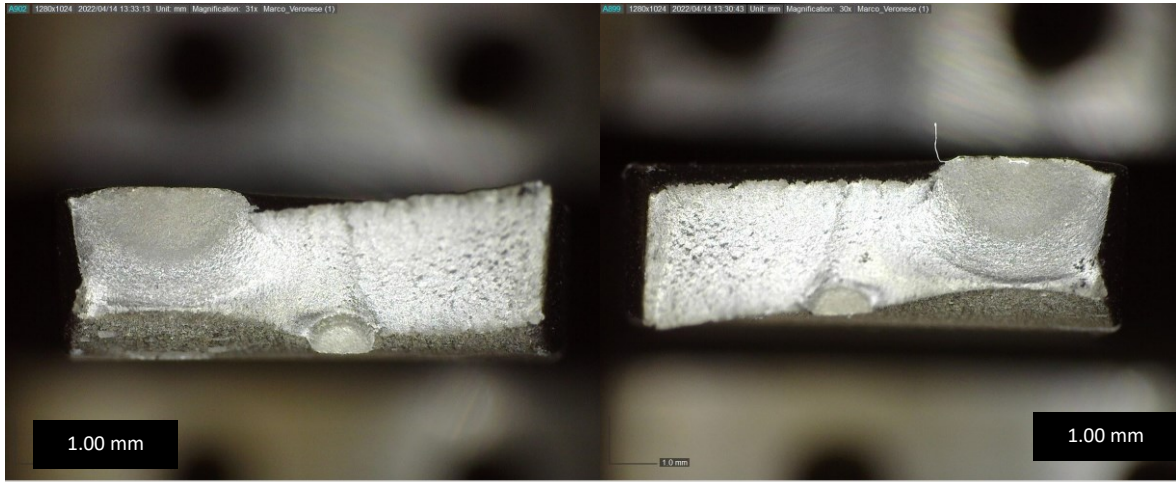
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	10/01/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	2		
Set parametri di processo	-		

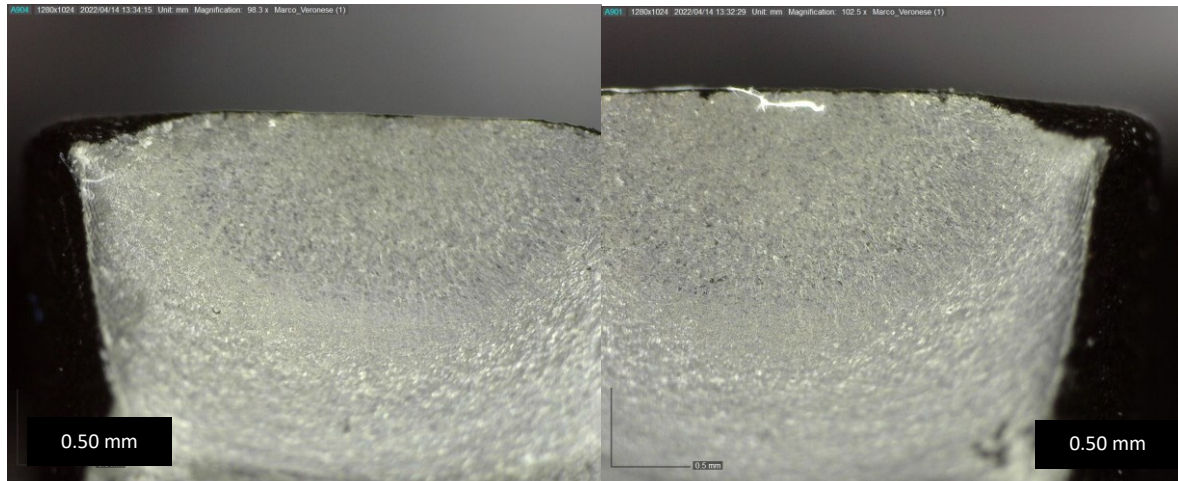
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	11,5	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 8
Spessore s [mm]=	3,8		
F_{max} [kN] =	27,2	σ_{max} [MPa] =	622,2
F_{min} [kN] =	2,7	σ_{min} [MPa] =	62,2
σ_a [MPa] (ampiezza) =	280	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	76806	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_24

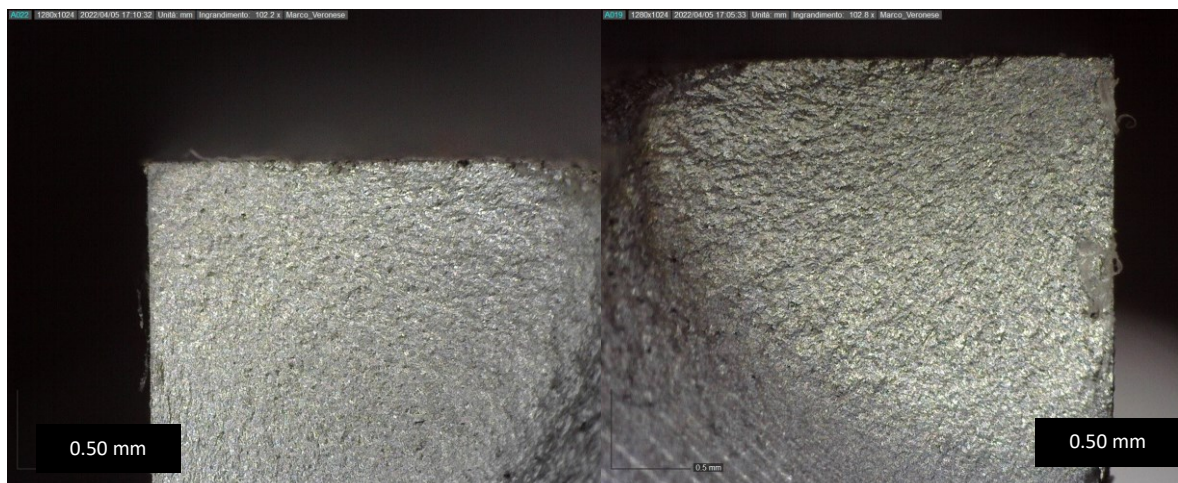
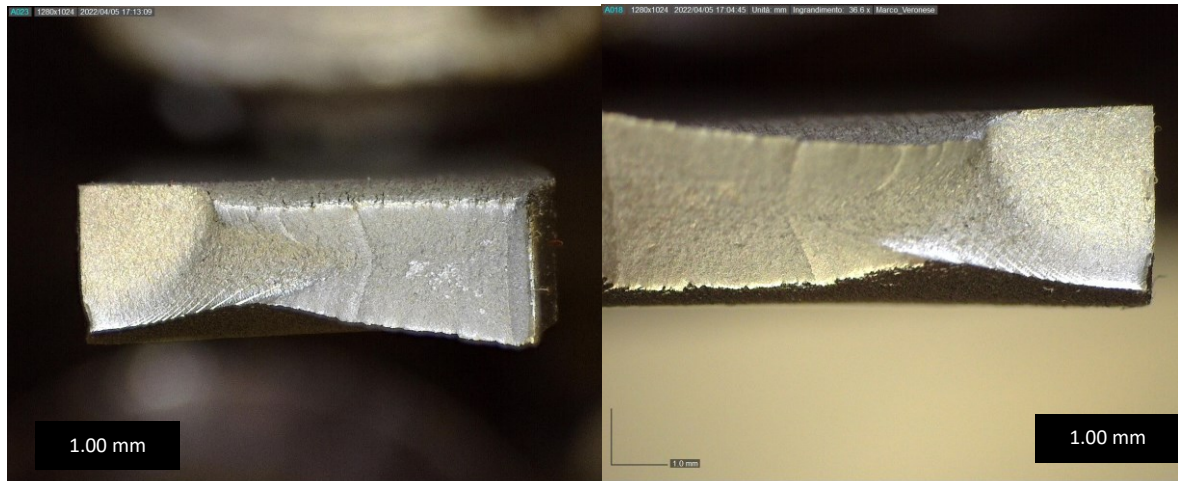
Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	11/01/2022	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	2		
Set parametri di processo	-		

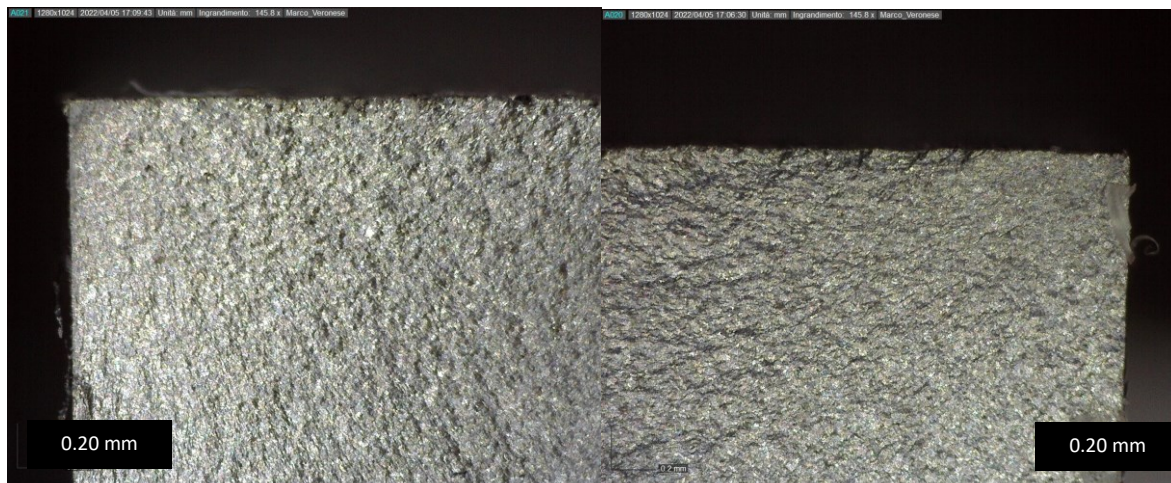
Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	10,9	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 7
Spessore s [mm]=	3,6		
F_{max} [kN] =	33,1	σ_{max} [MPa] =	666,7
F_{min} [kN] =	3,31	σ_{min} [MPa] =	66,7
σ_a [MPa] (ampiezza) =	300	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	75971	NOTE	

Danneggiamento







Nome Provino: R01_25

Tipo di prova:	Fatica	Materiale:	AISI 304L
Data:	14/01/202	Operatore/i di lab.:	Marco Veronese
	2		
Set parametri di processo	-		

Dati prove di fatica

Larghezza l [mm] =	12,2	Frequenza f_L [Hz] =	1 fino a 20
Spessore s [mm]=	4,1		
F_{max} [kN] =	20	σ_{max} [MPa] =	733
F_{min} [kN] =	2	σ_{min} [MPa] =	73
σ_a [MPa] (ampiezza) =	180	Rapporto di ciclo =	0,1
N° cicli a rottura =	105702	NOTE	

Danneggiamento



