

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	3
2	PRESENTAZIONE LABORATORIO I2M	5
3	ANALISI BIBLIOGRAFICA.....	8
3.1	Fatica dei materiali	8
3.1.1	Nucleazione di una fessura	10
3.1.2	Propagazione di una fessura	11
3.1.3	Calcolo della vita a fatica a tensione.....	12
3.1.4	Progettazione meccanica di fronte alla fatica	14
3.2	Fonte di smorzamento dovuto a difetti lineari: movimento delle dislocazioni	15
3.2.1	Interazione dislocazione-reticolo.....	15
3.2.2	Interazione dislocazione-precipitati.....	15
3.3	Metodo convenzionale staircase per la determinazione della durata limite di resistenza	18
3.4	Metodologia termica accelerata basata su misurazioni ad infrarossi	20
3.5	Metodo meccanico.....	28
4	MATERIALE E PROVINI	29
4.1	Lega d'alluminio 2024-T3 551	29
4.2	Geometria dei provini	31
5	MISURA DELL'ENERGIA MECCANICA	33
5.1	Struttura del dispositivo sperimentale.....	33
	Misura del $\Delta W/W$ in torsione	35
5.2	Funzionamento del dispositivo	38
6	MISURE TERMICHE SULLA SUPERFICIE	40
6.1	Approccio teorico all'analisi termica.....	40
6.2	Ordine di grandezza della variazione di temperatura.....	45
6.3	Misure a infrarossi.....	47
6.4	Post-trattamento dei dati termici	50
	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	52
6.5	Curva accelerazione in funzione della coppia	52
6.6	Curva $\Delta W/W = f(\tau)$	54
6.7	Calcolo $\Delta W/W = f(\tau)$ a partire dai dati di $\Delta W/W = f(\tau_{max})$	57
6.8	Curva $\Delta T = f_{posizione}$	61
6.9	Curva $\Delta T = f\tau_{max}$	64

6.10	Confronto tra le curve <i>E_{meccanica}</i> = <i>f(τ_{max})</i> et <i>E_{termica}</i> = <i>fτ_{max}</i>	65
6.11	Curva <i>ΔU = f(τ)</i>	66
7	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	67
7.1	Conclusioni	67
7.3	Sviluppi futuri	69
8	APPENDICI.....	72
8.1	Appendice I.....	72
8.2	Appendice II.....	73
8.3	Appendice III.....	75
8.4	Appendice IV	77
9	BIBLIOGRAFIA	89

1 INTRODUZIONE

Nei materiali metallici esiste una correlazione tra le sollecitazioni meccaniche cicliche, la deformazione plastica e il processo di danneggiamento a fatica.

Generalmente, nel campo della vita ad alto numero di cicli (oltre 10^5 cicli circa) i danni da fatica si verificano senza deformazioni plastiche macroscopiche che ne rendono difficile l'individuazione. Tuttavia, una deformazione plastica è spesso osservata intorno ai difetti nei materiali, alla base di un intaglio nelle strutture o all'estremità di una fessura già formatasi.

L'idea iniziale di una vita a fatica infinita o di un limite di fatica al di sotto del quale una cricca attiva può non comparire in un metallo non esiste più (Bathias 1999).

In questo lavoro, il limite di resistenza a fatica rappresenta il livello di sollecitazione, nel campo della vita ad alto numero di cicli (10^6 - 10^7), per il quale non si raggiunge la rottura del componente o la rottura per una data probabilità.

Il metodo tradizionale Staircase utilizzato per determinare il limite di resistenza ha grandi limitazioni in termini di tempo e costi.

Diversi autori hanno sviluppato metodi di prova accelerati basati sull'auto-riscaldamento del materiale misurato con termografia ad infrarossi o termocoppia per rilevare il verificarsi del danno e quindi determinare il limite di fatica, definito poi come un drastico cambiamento nell'evoluzione della dissipazione intrinseca.

Nessuno di questi metodi, che mostreremo in seguito, fa un bilancio energetico tra l'energia meccanica iniettata, l'energia assorbita dal materiale (o l'energia immagazzinata) e l'energia termica dissipata come calore.

Il meccanismo di degradazione del materiale al di sopra del suo limite di resistenza, caratterizzato da modifiche strutturali, presuppone che parte dell'energia meccanica fornita non venga restituita come calore, questa energia interna risultante viene interpretata come somma tra l'energia di degradazione e l'energia immagazzinata (ad esempio sotto forma di microdeformazione plastica, lavoro a freddo).

L'energia meccanica iniettata (nota W) in un sistema risonante comprendente il provino sarà confrontata con l'energia persa (non restituita), DW , misurata su una macchina risonante. D'altra

parte, l'energia dissipata in calore Q sarà dedotta dalle misure di temperatura sulla superficie del provino.

$$\Delta U = \Delta W - \Delta Q \geq 0$$

L'obiettivo di questo progetto è quello di misurare la variazione di energia interna di un materiale metallico in funzione del livello di carico ciclico in prossimità della resistenza a fatica a 10^6 cicli.

2 PRESENTAZIONE LABORATORIO I2M

L'I2M (Istituto di Meccanica ed Ingegneria) è un laboratorio annesso al CNRS, all'Università di Bordeaux, all'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), all'INP Aquitaine di Bordeaux e associato all'INRA.

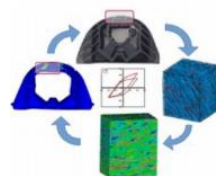


Il laboratorio si interessa alla scienza meccanica nel suo complesso: meccanica dei solidi e dei sistemi, meccanica dei fluidi, acustica, trasferimenti di calore e di massa, ingegneria civile, meccanica, progettazione, ingegneria dei processi.

Le attività dell'I2M sono strutturate in 6:

- Ingegneria civile ed ambientale (GCE);
- Ingegneria meccanica e concezione (IMC);
- Materiali, Processi e Interazioni (MPI);
- *Durabilità dei Materiali, degli Assemblaggi e delle Strutture (DuMAS)*;
- Fluidi – Trasferimenti (TREFLE);
- Acustica e Fisica (APY).

Questo progetto è stato sviluppato nel dipartimento DuMAS, anch'esso suddiviso in più tematiche:



▪ *Fatica dei materiali e delle strutture*

L'insieme dei progetti del gruppo di ricerca "Fatica dei Materiali e delle Strutture (FMS)" ha come scopo la migliore comprensione dei meccanismi caratteristici del danneggiamento da Fatica e di sviluppare delle modellizzazioni adeguate al fine di prevedere la resistenza e la durata di vita dei pezzi soggetti a carico ciclico. Il dipartimento possiede grande esperienza nel dominio della fatica multiassiale a grande numero di cicli soggetti a carichi complessi.

Nel corso degli ultimi cinque anni, ci si è concentrati sull'analisi processi di fabbricazione/microstruttura/proprietà meccaniche nella Fatica e allo stesso tempo sull'interazione fatica/ambiente in particolare la fatica-corrosione.

L'obiettivo è di comprendere il ruolo degli elementi costitutivi della microstruttura sulla tenuta a fatica per creare un legame esplicito tra i processi di fabbricazione e la tenuta in servizio dei pezzi (i processi presi in considerazione sono prevalentemente la fonderia e i processi additivi per i materiali). Lo sforzo maggiore si è concentrato sullo sviluppo di numerosi strumenti e concetti adattati per tenere conto dei parametri microstrutturali, della nucleazione della fessura e della plasticità ciclica sotto carichi complessi o a valori bassi di tensione.

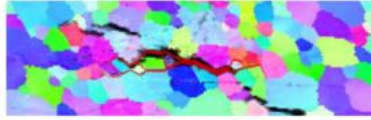
La modellizzazione del danneggiamento su scala microstrutturale è attualmente il cuore delle preoccupazioni scientifiche.



- *Vulnerabilità all'impatto dei materiali e delle strutture*

Gli studi condotti all'interno del dipartimento Dumas riguardano i materiali e le strutture eterogenee, con lo scopo di analizzare i fenomeni fisici in gioco a differenti ordini di grandezza (microscopico, mesoscopico e macroscopico), in seguito a sollecitazioni dinamiche complesse (in particolare l'impatto) et la loro modellizzazione. La tenuta residua post-impatto e i conseguenti cambiamenti impatto-fatica e fatica-impatto sono altri problemi affrontati.

Ci sono molte questioni in gioco. Dal punto di vista sperimentale, bisogna mettere in pratica delle prove adatte per elaborare e identificare dei modelli di comportamento e seguire il danneggiamento durante la fase dell'impatto e in seguito quella post-impatto, dall'altra parte bisogna mettere a punto delle prove su dei provini che rappresentino al meglio la struttura reale. Dal punto di vista numerico, bisogna proporre delle modellizzazioni multi-scala capaci di rendere conto sia degli effetti locali (materiale) sia degli effetti globali (struttura), tenendo conto la variabilità delle proprietà geometriche e materiali presenti nei materiali e strutture eterogenee. Questi lavori si appoggiano sui mezzi sperimentali di una piattaforma di prova (di 300m²) che offrono la possibilità di testare materiali e strutture su una larga gamma di velocità di deformazione (da quasi-statico a 5000 s⁻¹), d'energia (fino a più kJ) e di temperature.



- *Meccanica-Corrosione-Idrogeno*

Il gruppo si dedica all'analisi e alla modellizzazione degli effetti dell'accoppiamento tra le sollecitazioni meccaniche e l'ambiente sul comportamento meccanico, il degrado e la reattività dei materiali metallici e dei loro assemblaggi. Le modalità di rottura ottenute in queste condizioni sono la corrosione sotto sforzo, la fatica corrosione e l'indebolimento da idrogeno.

Per condurre al meglio questi studi, i mezzi di prova sono i seguenti: banchi e mini-banchi di prova meccanica, banco di carico in idrogeno gassoso, AFM-KFM, misure elettrochimiche globali.

3 ANALISI BIBLIOGRAFICA

3.1 FATICA DEI MATERIALI

Nella maggior parte delle prove sulla resistenza dei materiali, che hanno come risultato un diagramma tensione-deformazione, il carico è applicato gradualmente, per dare sufficiente tempo alle deformazioni di svilupparsi completamente.

Inoltre, il campione è portato a rottura e quindi le tensioni sono applicate una sola volta.

Prove di questo tipo sono conosciute come prove statiche; tali condizioni approssimano accuratamente molte condizioni di carico a cui gli organi strutturali e di macchina sono sottoposti.

In ogni modo, è frequente la condizione in cui le tensioni variano nel tempo, oppure fluttuano tra due livelli. Per esempio, se si considera un generico punto sulla superficie di un albero rotante, soggetto a flessione, esso è sottoposto a una tensione che va da quella minima (di compressione, e quindi negativa) a quella massima (di trazione, e quindi positiva), per poi tornare a quella minima; così per ogni rotazione dell'albero. Inoltre, se è presente un carico assiale (questo può accadere, per esempio, in presenza di ruote elicoidali o d'ingranaggi a vite), una componente assiale di tensione si va a sovrapporre a quella flessionale.

Questa e altre condizioni di carico, presenti negli elementi delle macchine, possono produrre tensioni che sono chiamate *variabili, ripetute, alternate e fluttuanti*.

Spesso componenti di macchine si rompono a causa di tensioni ripetute o variabili; tuttavia un'accurata analisi rivela che la massima tensione è ben al di sotto della tensione di rottura del materiale, e piuttosto spesso anche sotto la tensione di snervamento. La caratteristica di queste rotture è che i cicli di tensione si ripetono per un numero molto elevato nel tempo. Questo tipo d'avaria è detta *rottura a fatica*.

Quando gli elementi delle macchine vanno in avaria sotto carichi statici, di solito sviluppano una forte deformazione plastica, poiché la tensione effettiva supera quella di snervamento: ciò permette di sostituire il pezzo prima che arrivi la frattura dello stesso. Quindi la maggior parte delle avarie statiche danno un avvertimento visibile in anticipo.

Le rotture a fatica sono impreviste e totali, e quindi pericolose.

La fatica è un fenomeno più complesso, solo parzialmente conosciuto. Una rottura a fatica è in apparenza simile a una rottura fragile, perché le superfici di frattura sono lisce e perpendicolari alle direzioni delle tensioni principali, con assenza di deformazione plastica. Gli aspetti tipici di una frattura di rottura a fatica sono piuttosto differenti: una frattura a fatica presenta tre stadi di sviluppo.

Il *primo stadio* è l'inizializzazione di una o più microcricche dovuta a deformazione plastica ciclica, seguita dalla propagazione che si estende fino a due o cinque grani da quello d'origine. Le microcricche di questo primo stadio non sono visibili a occhio nudo.

Nel *secondo stadio* le microcricche diventano macrocricche, che formano superfici di frattura parallele simili ad altopiani, separati da creste longitudinali.

Gli altopiani di solito sono lisci e normali alla direzione della tensione principale massima. Queste superfici possono essere ondulate a bande chiare e scure chiamate linee di spiaggia o linee a conchiglia. Durante il ciclo di carico, queste superfici di rottura si aprono e si chiudono, sfregando tra loro, e la comparsa della linea di spiaggia dipende dai cambiamenti nel livello e nella frequenza del ciclo di carico e dalla natura della corrosione dell'ambiente.

Il *terzo stadio* s'instaura durante il ciclo di tensione finale, quando il materiale della sezione non può sopportare i carichi: si ha quindi una rottura a schianto.

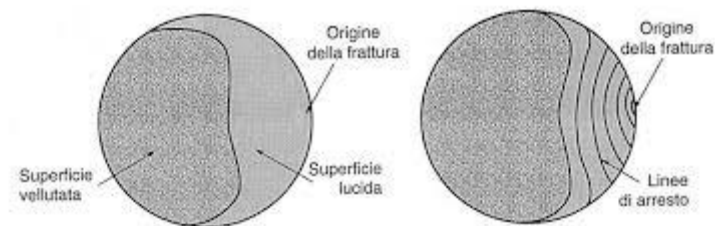


Figure 3.1-1 Superficie di schianto

La rottura per fatica è dovuta alla formazione di microdifetti e alla loro propagazione. Questi microdifetti si formano tipicamente in una discontinuità del materiale, dove la tensione ciclica è massima. Le discontinuità possono essere presenti per motivi differenti:

- Di forma, con rapidi cambiamenti della sezione resistente (fori, sedi per le linguette e chiavette ecc.) dove esiste una concentrazione delle tensioni.
- La presenza di elementi che rotolano e strisciano su altri elementi sotto alte pressioni di contatto, sviluppando tensioni di contatto concentrate sotto la superficie.

3.1.1 Nucleazione di una fessura

L'osservazione di provini sottoposti a carico a fatica mostra che il danno appare principalmente in superficie (Francois 2009). Anche se l'ampiezza del carico è inferiore al limite di snervamento convenzionale, le sorgenti di dislocazione possono essere attivate nei grani più favorevoli per lo scorrimento delle dislocazioni.

I grani nel volume interno del provino si induriscono rapidamente per incrudimento e non si deformano più. Al contrario, lo scivolamento dei grani superficiali porta alla superficie fino ad eliminare le dislocazioni, o almeno una parte di esse in modo da ridurre notevolmente l'incrudimento.

Quando l'esemplare è sottoposto a cicli, questi grani sono occupati da gruppi di dislocazioni la cui densità aumenta.

La superficie è inoltre soggetta all'aggressività dell'ambiente (ossidazione, contaminazione da idrogeno, ecc.).

Quando un provino o un componente dà luogo a una rottura a fatica, il tempo di vita può essere suddiviso in tre parti:

1. Nucleazione di una cricca;
2. Propagazione lenta della fessura su scala microscopica;
3. Propagazione brutale su scala macroscopica fino alla rottura.

In generale, in caso di fatica a gran numero di cicli, le fasi 1 e 2 rappresentano la maggior parte della vita utile ($\approx 90\%$).

I danni da fatica a un elevato numero di cicli di campioni sani sono di natura essenzialmente superficiale. Dopo le prove di fatica, la superficie dei campioni può mostrare la comparsa di rilievi associati alla formazione di bande di deformazione localizzate chiamate Persistent Slip Bands (PSBs).

Nelle prove monoassiali su provini policristallini, queste bande causano un sovraccarico locale che porterà alla formazione di microfratture in fase I, in quanto il materiale non è più in grado di assorbire la deformazione plastica. Queste bande di scorrimento appaiono in una direzione che si trova a 45 gradi dall'asse di trazione.

La formazione di intrusioni ed estrusioni e la propagazione delle crepe di stadio I sono fenomeni che si verificano su una distanza dell'ordine del grano. Infatti, non appena questa microfrattura supera

la prima barriera microstrutturale (solitamente un giunto di grani), si propagerà secondo la fase II, in una direzione perpendicolare a quella della sollecitazione principale.

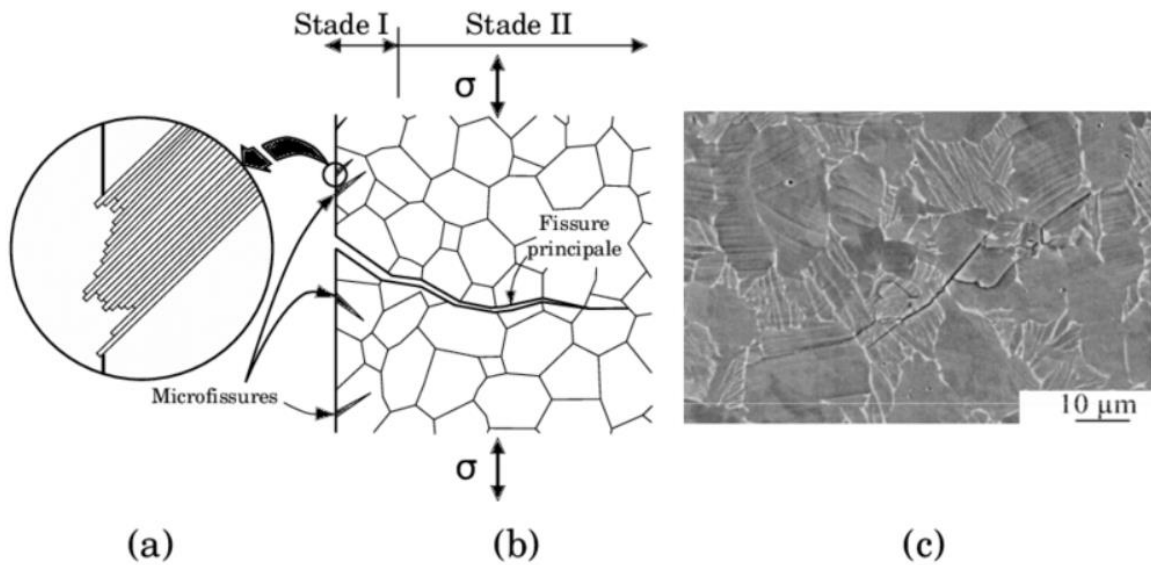


Figure 3.1-2 Intrusioni ed estrusioni sulla superficie; b: Propagazione di fessure nelle fasi I e II; c: Immagine al SEM di una fessura iniziata.

3.1.2 Propagazione di una fessura

Le cricche di fatica nascono e si propagano quando esistono sollecitazioni esterne che generano tensioni variabili nel tempo. La legge di Paris rappresenta l'evoluzione del tasso di crescita della cricca:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

a la lunghezza della fessura;

ΔK variazione del fattore di intensità dello stress;

C e m caratteristiche costanti del materiale.

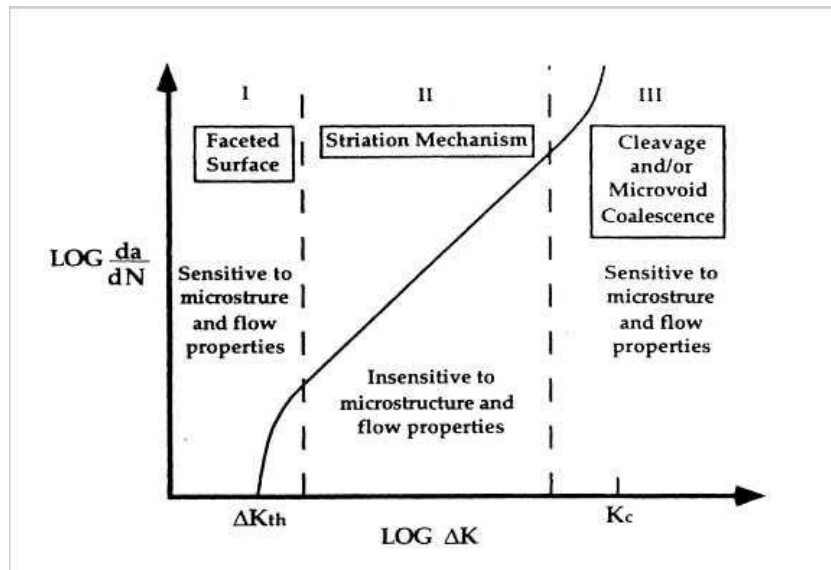


Figure 3.1-3 Nucleazione e propagazione di una cricca

3.1.3 Calcolo della vita a fatica a tensione

Per determinare la resistenza dei materiali sotto l'azione di carichi affaticanti, i provini sono sottoposti all'azione di forze periodiche o, in generale, che variano nel tempo con una specifica ampiezza: i provini sono portati a rottura al fine di conoscere il numero di cicli di tensione che essi possono sopportare.

Il dispositivo per il test di fatica più utilizzato è la macchina di R.R. Moore, che permette di avere un provino rotante ad alta velocità. Questa macchina sottopone il provino a flessione pura grazie a dei pesi.

Per stabilire la resistenza a fatica del materiale è richiesto un certo numero di prove, a causa della natura stocastica del fenomeno della fatica. Per la prova a flessione rotante, è applicato un carico costante di flessione, e il numero di rotazioni (che coincide con il numero di cicli di tensione) che portano alla rottura è registrato. La prima prova è fatta ad una tensione che è poco al di sotto della tensione di rottura del materiale. La seconda è fatta ad una tensione. Questo procedimento è iterato, e i risultati sono riportati in un diagramma S-N.

In caso di metalli e leghe ferrose il diagramma a un certo punto ("ginocchio") diventa orizzontale, dopo che il materiale è stato sottoposto a un certo numero di cicli di tensione. L'ordinata del diagramma S-N è chiamata resistenza a fatica S_f , il valore di tale resistenza deve essere sempre accompagnato al numero di cicli N al quale esso corrisponde.

Il fenomeno della fatica tra $N=1$ e $N=1000$ è generalmente classificato come *fatica a basso numero di cicli* mentre per un numero di cicli N maggiore di 1000 si parla di *fatica ad alto numero di cicli*.

Grazie a queste prove non è realmente necessario procedere ulteriormente nello studio e nella comprensione del fenomeno della fatica, eccetto che per il desiderio di conoscere il motivo per il quale avvengono le rotture a fatica, così da poter avere a disposizione metodi di progettazione più efficienti e più aderenti al fenomeno fisico. Quindi l'obiettivo primario è quello di comprendere la natura fisica del fenomeno della fatica nei materiali, per poter affrontare la progettazione in maniera ottimale.

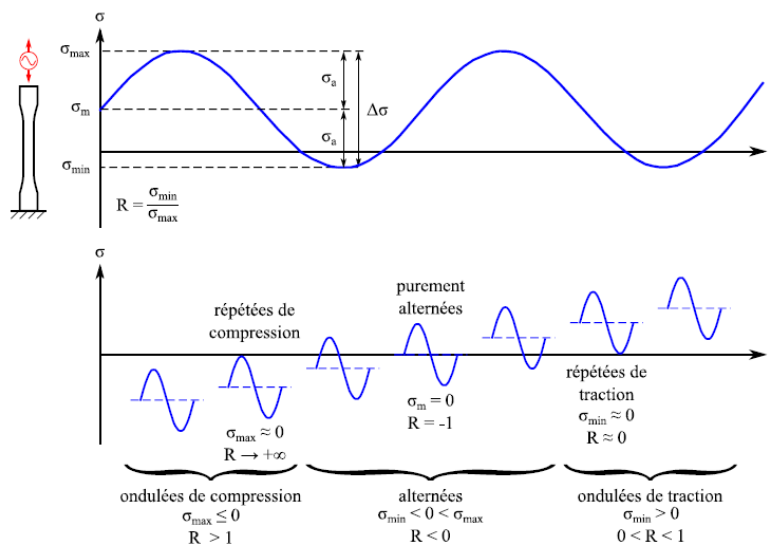


Figure 3.1-4 Tipologie di sollecitazione.

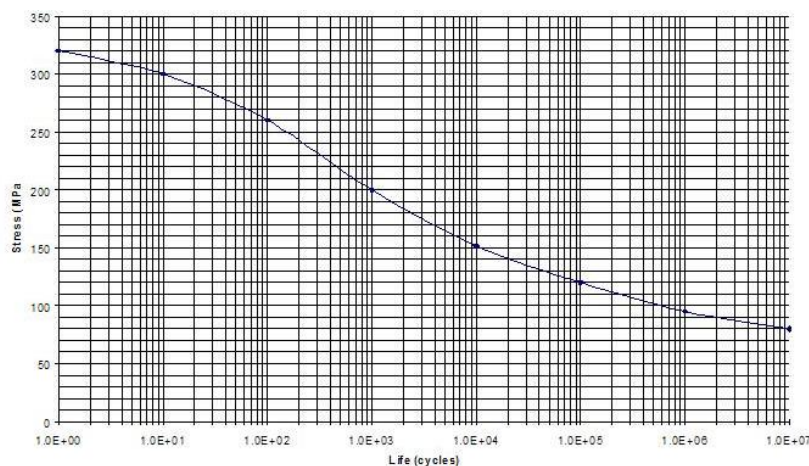


Figure 3.1-5 La curva di Wöhler (qui per una lega di alluminio con un carico di rottura statico di 320 MPa) fornisce il carico di rottura per un dato numero di cicli.

3.1.4 Progettazione meccanica di fronte alla fatica

Se le microfratture superficiali rimangono i difetti più dannosi nel campo della durata di alcuni milioni di cicli, sono i micro-difetti interni che controllano la durata di un miliardo di cicli, nel campo dei motori, turbine, cuscinetti.

In questo caso, diventano essenziali i fenomeni di localizzazione della deformazione plastica intorno ai difetti.

3.2 FONTE DI SMORZAMENTO DOVUTO A DIFETTI LINEARI: MOVIMENTO DELLE DISLOCAZIONI

Lo smorzamento globale osservato macroscopicamente è stato analizzato in relazione alle fonti di "attrito interno".

3.2.1 Effetto termoelastico

Si tratta di un flusso di calore accompagnato dalla variazione del gradiente della tensione all'interno del solido.

Se l'applicazione della tensione avviene a basse frequenze, allora il flusso di calore permette di ritrovare, in ogni istante, un campo di temperatura uniforme.

Se, invece, l'applicazione della tensione avviene ad alta frequenza, allora il flusso di calore, di cui la cinetica è legata al coefficiente di diffusione, non effettua più il trasferimento di calore. Il regime si dice adiabatico.

Si può immaginare per i casi intermedi, tra bassa e alta frequenza, un funzionamento non isoterma e non adiabatico.

3.2.2 Interazione dislocazione-reticolo

Il meccanismo utilizzato è il seguente: data una dislocazione angolare in movimento, il passaggio tra due stati stabili avviene attraverso uno stato instabile, che richiede quindi un sovraccarico energetico per essere attraversato (Nouillant, Aspect énergétique de la dégradation par fatigue 1984).

Per analogia con la nozione di potenziale gravitazionale, posizioni stabili corrispondenti ad un minimo di energia potenziale e sono chiamati valli, lo stato instabile della collina.

La transizione da una posizione all'altra può quindi essere effettuata sotto l'azione di un elevato sforzo di taglio chiamato stress PIERLS.

3.2.3 Interazione dislocazione-precipitati

Il ruolo dei precipitati è predominante nel meccanismo del danno da fatica. C'è un ruolo benefico derivante dalla dispersione dei precipitati fini, così come il ruolo dannoso svolto dagli stessi precipitati quando si presentano sotto forma di grappoli più grandi (Nouillant, Aspect énergétique de la dégradation par fatigue 1984).

I processi di addolcimento o indurimento durante le sollecitazioni cicliche dipendono principalmente dalla natura dei precipitati.

Nel caso di precipitati tagliabili, vi è una forte deformazione a livello delle fasce di scorrimento persistenti, che porta, dopo un periodo di indurimento del materiale (accumulo di dislocazioni nell'area di notevole spostamento), ad una distruzione dei precipitati, portando così ad un ammorbidimento che porta rapidamente a microfratture a livello del PSB che emergono in superficie.

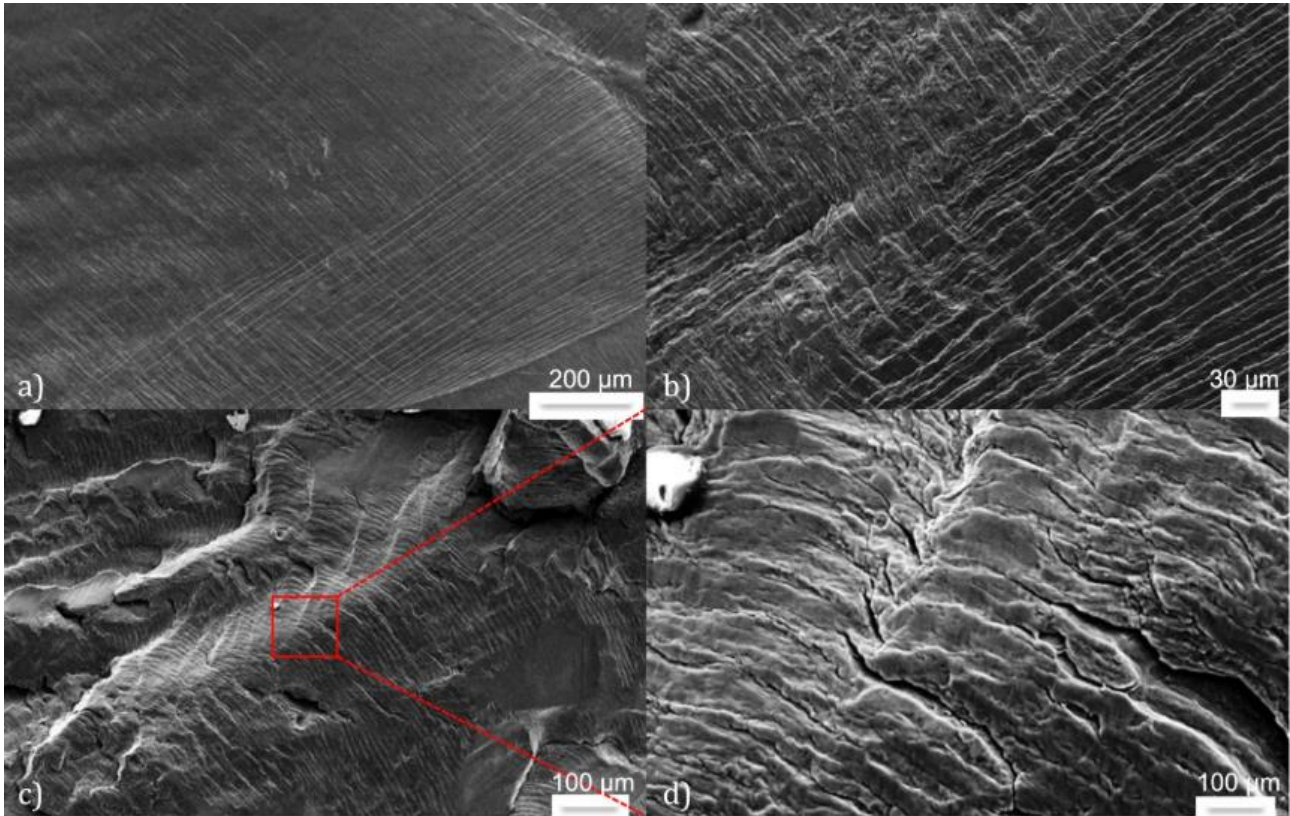


Figure 3.2-1 Micrografie al SEM che rivelano le (a) PSB ben definite dopo 100 cicli, (b) segni di nucleazione delle cricche dopo 600 cicli, (c,d) striature da fatica, irregolarità e rugosità delle superfici su una superficie di frattura dopo 3000 cicli (prova di fatica su alluminio puro a $\Delta\varepsilon = 0,95\%$).

Si possono distinguere tre meccanismi di formazione delle PBS:

- Il primo riguarda i materiali nei quali le deformazioni sono assunte da un numero relativamente piccolo di bande di scorrimento. In questi materiali, dopo un breve periodo di incrudimento strutturale si ha una fase di addolcimento. Si nota come questi materiali non presentano un valor critico di concentrazione della tensione al di là del quale si ha la formazione delle PBS.
- Il secondo scorrimento si osserva sui materiali simili alla lega di studio (A2024), le deformazioni sono omogenee e la fase di incrudimento corrisponde all'accumulo di dislocazioni attorno ai precipitati fino a un valore critico della tensione all'interfaccia precipitato-matrice. A partire da questo valore si formano le PBS.

- L'ultimo meccanismo si basa sulla definizione di "estensione della zona". In effetti, supponendo che esiste una eterogeneità della microstruttura, le deformazioni sono localizzate su un certo numero di zone non limitrofe tra loro, nelle quali l'interazione precipitano-dislocazione è fortemente attiva. Si ha quindi due tipi di comportamento all'interno dello stesso materiale: quello relativo alle zone che vedono aumentare il loro incrudimento e quindi ridurre progressivamente le zone di deformazione.

3.2.4 Smorzamento dipendente dall'ampiezza della sollecitazione

L'aumento dell'attrito interno con il livello di sollecitazione si attribuisce all'assorbimento energetico delle dislocazioni.

Sotto l'effetto di una tensione applicata $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$, la dislocazione si separa dagli ancoraggi morbidi ma resta legata a quelli duri.

Se, per un livello di sollecitazione superiore, la dislocazione si separa sia dai suoi ancoraggi morbidi che da quelli duri, si ottiene un attrito interno legato alla deformazione plastica. La micro-plasticità ha una soglia di apparizione relativamente bassa, le prime deformazioni plastiche appaiono per $\varepsilon = 10^{-5}$.

Il moltiplicarsi delle dislocazioni mobili, quando la sollecitazione aumenta, rende preponderante lo smorzamento viscoplastico.

3.3 METODO CONVENZIONALE STAIRCASE PER LA DETERMINAZIONE DELLA DURATA LIMITE DI RESISTENZA

L'approccio sperimentale del metodo Staircase richiede che il primo campione sia sottoposto ad una sollecitazione corrispondente alla resistenza a fatica prevista per un dato numero di cicli (qui 10^7 cicli) (DIESEL" 2009). Se il primo campione raggiunge 10^7 cicli senza rompersi, un nuovo campione viene testato ad un livello di sollecitazione di un passo superiore al livello precedente. L'incremento deve essere scelto in modo da corrispondere al livello previsto della deviazione standard.

Quando un campione si rompe prima di raggiungere i 10^7 cicli, il numero di cicli ottenuti viene registrato e il campione successivo viene sottoposto ad una sollecitazione che è di un incremento inferiore al livello precedente.

Con questo approccio, la somma delle rotture e dei run-out (o meno) è uguale al numero di campioni testati.

Il metodo dell'escalier è adatto solo quando è disponibile un gran numero di campioni. Le simulazioni hanno dimostrato che sono necessari circa 25 campioni per costruire una Scala per garantire che il risultato sia sufficientemente accurato.

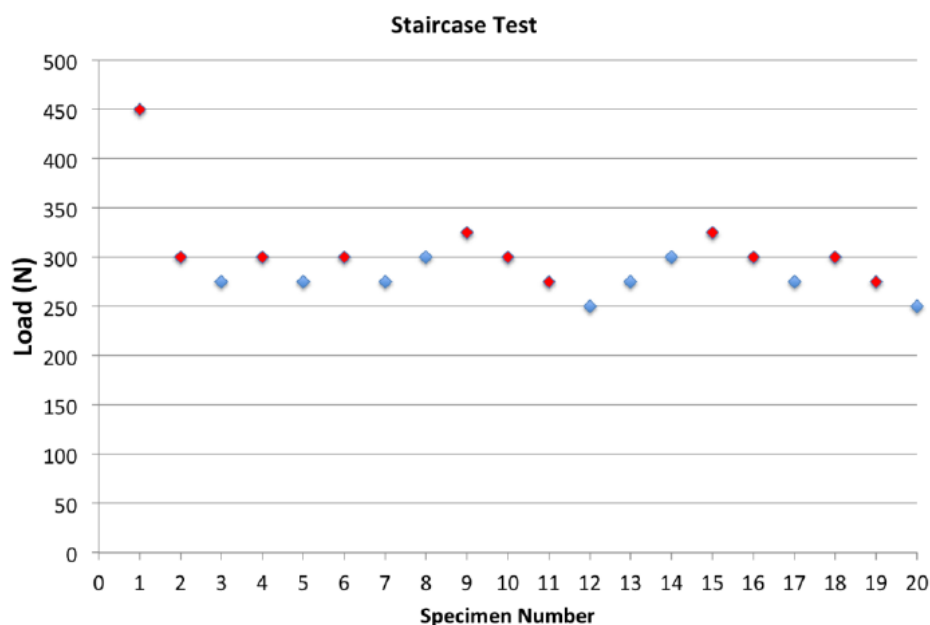


Figure 3.3-1 Esempio di diagramma ottenuto applicando il metodo Staircase a 20 campioni. In rosso i fallimenti e in blu gli esemplari sopravvissuti.

La natura di questa analisi è statistica, il valore medio e la deviazione standard per ogni esemplare sono definiti attraverso la normale distribuzione gaussiana e le regole statistiche sono quindi applicate per tener conto dell'intera popolazione di esemplari caricati.

Il risultato è quindi statistico con una dispersione relativamente elevata. Questo metodo permette di ottenere, per un lotto di campioni, il livello di stress per il quale la probabilità di guasto per un dato numero di cicli è del 50% e la deviazione standard associata.

Lo svantaggio più importante del metodo Staircase è la necessità di testare un gran numero di campioni.

I campioni dello stesso lotto non hanno la stessa microstruttura (in termini di geometria della grana e orientamento), gli stessi difetti di volume (soprattutto se ottenuti mediante stampaggio) o una condizione superficiale completamente identica (usura degli utensili di lavorazione, variabilità del processo di fabbricazione additiva, ecc.)

Nel caso di un test a 100Hz, ci vogliono settimane per completare la campagna di test (di solito tra i 25 e i 50 campioni).

Questo metodo è quindi molto impegnativo in termini di tempo e denaro.

Nell'appendice I viene applicato il metodo Staircase sul materiale utilizzato in questo progetto.

3.4 METODOLOGIA TERMICA ACCELERATA BASATA SU MISURAZIONI AD INFRAROSSI

L'utilizzo della termografia ad infrarossi, che permette di determinare il limite di resistenza nel campo della lunga durata (10^6 - 10^7 cicli), si basa sul verificarsi di una variazione di temperatura sulla superficie dei materiali in seguito all'applicazione di un carico.

Nel suo lavoro, Luong ha notato l'esistenza di una distinzione tra danno fisico al materiale e dissipazione del calore, che non è un vero indicatore di danno da fatica (Luong 1988). Si presume che il carico ciclico, la micro-deformazione plastica e il processo di danno da fatica siano correlati, per cui la dissipazione intrinseca e il danno da fatica hanno la stessa evoluzione.

La variazione di temperatura rilevata dipende da quattro diversi fenomeni:

- **Fonti di calore e dissipatori sulla superficie scansionata:** il sistema di presa potrebbe oscurare la dissipazione intrinseca;
- **Conducibilità termica,** quest'ultima regola il trasferimento di calore di conduzione e porta ad una temperatura uniforme sul provino;
- **Termoelasticità:** in campo elastico, un materiale caricato da un carico ciclico mostra una conversione reversibile dell'energia meccanica in energia termica, che porta ad una variazione di temperatura;
- **Dissipazione intrinseca:** un contributo significativo del lavoro svolto dalla deformazione plastica viene convertito in calore. Ciò si manifesta con un aumento della temperatura. Questo è rilevabile con la termografia ad infrarossi. La dissipazione intrinseca diventa un indicatore più preciso del verificarsi del danno. L'aspetto del meccanismo di danno da fatica è rivelato da un collasso del regime intrinseco di dissipazione del campione caricato.

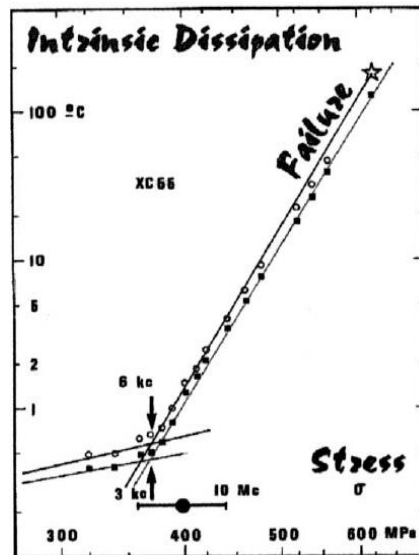


Figure 3.4-1 Evoluzione della variazione della temperatura superficiale in funzione dell'ampiezza dello stress.

Le misurazioni termiche superficiali sono condotte da una termocamera ad infrarossi, che consente il monitoraggio in tempo reale delle variazioni di temperatura durante il caricamento e misurazioni non distruttive e senza contatto.

Le immagini scattate in qualsiasi punto e con una frequenza di acquisizione imposta vengono convertite in matrici e quindi in zone isoterme di un corridoio definito. La variazione di temperatura è ottenuta con una tecnica differenziale: l'immagine istantanea viene sottratta dall'immagine 0 che rappresenta la condizione di riferimento iniziale.

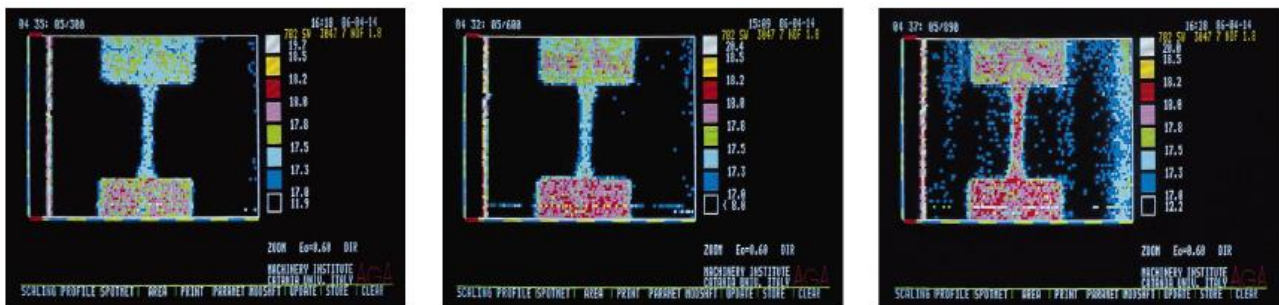


Figure 3.4-2 Immagini che mostrano la variazione termica in tre diversi momenti del carico ciclico.

Sulla base di queste considerazioni, La Rosa e Risitano hanno sviluppato una metodologia per caratterizzare le proprietà dinamiche dei materiali (G. La Rosa 1999).

Un esame approfondito dei dati registrati dopo le prime prove, utilizzando un sistema di analisi delle immagini, ha rivelato aspetti importanti che sono stati poi oggetto di ulteriori studi.

Il campione viene sottoposto a carichi ciclici di ampiezza crescente.

1. Il sistema di analisi ha esaminato la temperatura in ogni punto (pixel per pixel) su tutta la superficie del campione (di fronte alla termocamera) e ha osservato la variazione di temperatura nel tempo ($\Delta T = f(N)$, $N = \text{numero di cicli}$).
2. Se le sollecitazioni applicate erano inferiori al limite di fatica del materiale, l'aumento di temperatura ΔT nella parte più calda della superficie esterna era estremamente limitato.
3. Se le sollecitazioni erano superiori al limite di fatica, la temperatura è aumentata durante la prima parte (fase 1) della prova, poi è rimasta costante (fase 2) per un certo numero di cicli, ed infine è aumentata rapidamente per un breve periodo di tempo prima del cedimento (fase 3). La figura seguente si riferisce alle prove effettuate e mostra chiaramente le tre fasi per le diverse sollecitazioni applicate.

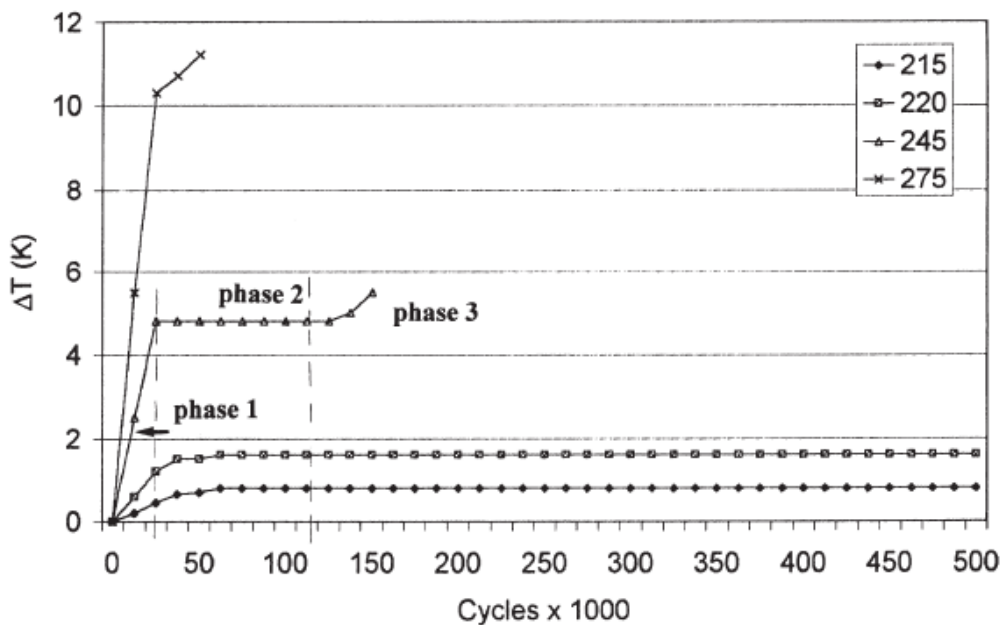


Figure 3.4-3 Variazione della temperatura superficiale in funzione del numero di cicli, a diversi livelli di sollecitazione.

4. Per livelli di carico al di sopra del limite di fatica, il tasso di aumento della temperatura nella fase 1 era più alto quanto più alto è il livello.
5. Poiché il tempo di prova è molto breve, l'influenza della temperatura ambiente è trascurabile, con variazioni di temperatura di qualche grado.

Durante una prova è possibile tracciare, per ogni livello di ampiezza di sollecitazione, il valore della variazione di temperatura stabilizzata ΔT_2 , al fine di ottenere la curva $\Delta T_2 = f(\sigma)$.

La variazione di temperatura non è uniforme sulla superficie, la curva $\Delta T_2 = f(\sigma)$ rappresenta il punto di maggiorazione con $\Delta T_{2,max}$.

Notiamo come il ΔT si stabilizza abbastanza rapidamente, quindi il danno nei blocchi è basso.

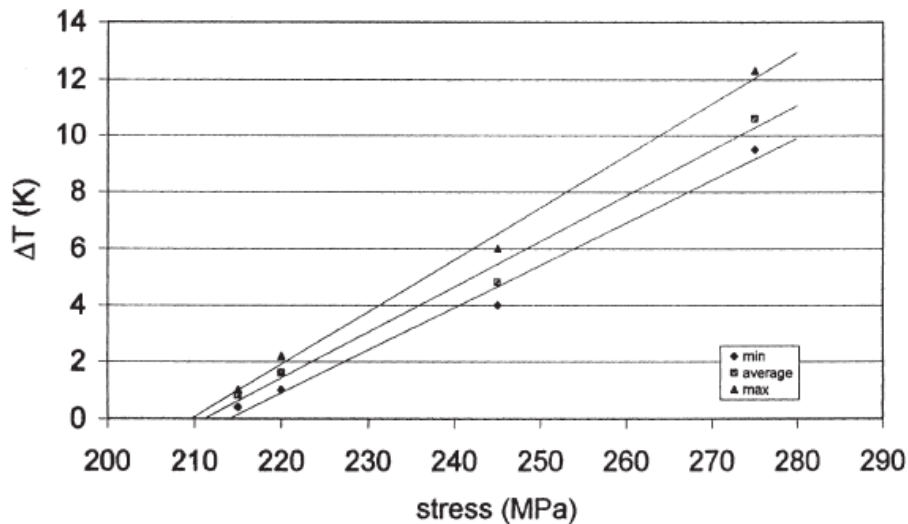


Figure 3.4-4 Limite di fatica da analisi di stabilizzazione della temperatura su acciaio C30

Il limite di resistenza si ottiene dalla lettura grafica come intersezione tra la curva $\Delta T_2 = f(\sigma)$ e l'asse delle ascisse.

La variazione di temperatura può cambiare cambiando la frequenza di carico mentre l'intersezione tra le linee non cambia.

Il metodo fornisce risultati incoraggianti per materiali come gli acciai dove l'errore tra il valore termografico (TH) e il valore della scala (SC) è piccolo. Come si può vedere nella tabella sottostante, l'errore diventa più importante per i metalli con una maggiore conducibilità termica (come l'acciaio 2024).

Component	Material	R	SC	TH.	Err. %
Specimen	C70 Steel	0	216	212	-1.8
Specimen	C30 Steel	0	414	400	-3.5
Specimen	2024 Al alloy	0	239	215	-10.0

Figure 3.4-5 Confronto tra errori sul limite di resistenza, per materiali diversi.

Infine, il metodo Risitano permette di stimare il limite di resistenza da un singolo esemplare e in tempi più brevi rispetto a quello convenzionale. Inoltre, le misure sono senza contatto e non distruttive.

A partire dalle misure termiche G. Fargione descrive un metodo per disegnare la curva di fatica S-N (Fargione, La Rosa, Geraci 2001).

Nell'indagine termografica (su cui si basa il metodo rapido per la determinazione del limite di fatica) è possibile osservare la temperatura di ogni zona (pixel per pixel) su tutta la superficie del campione, e l'evoluzione della temperatura superficiale nel tempo $T=f(N)$.

In tutte le prove effettuate, è stato riscontrato che (Fig. 3.4-6), con sollecitazioni superiori al limite di fatica σ_s (durata 106 cicli), la variazione termica aumenta durante la prima fase della prova (fase 1), poi rimane quasi costante fino a poco prima del cedimento (fase 2) e infine mostra un ulteriore aumento immediatamente prima del cedimento (fase 3). La prima fase di aumento della temperatura è limitata ad un numero molto basso di cicli rispetto al numero di cicli successivamente necessari per raggiungere il cedimento (in generale, nell'ordine del 10% dell'intera durata di vita del provino per carichi non prossimi al limite di snervamento).

La seconda fase, di "temperatura stabilizzata", varia notevolmente; per carichi applicati vicini al carico di snervamento questa fase è estremamente limitata, mentre per carichi di poco superiori al limite di fatica σ_0 si estende per quasi tutta la vita del provino. Per carichi superiori al limite di fatica, la velocità di aumento della temperatura con il numero di cicli in fase 1 e la temperatura di stabilizzazione (costante o leggermente ascendente, secondo la prima legge della termodinamica relativa alla quantità di calore per unità di volume ceduto all'esterno) in fase 2, sono più alti quanto maggiore è il carico. rispetto al limite di fatica (Fig. 3.4-7).

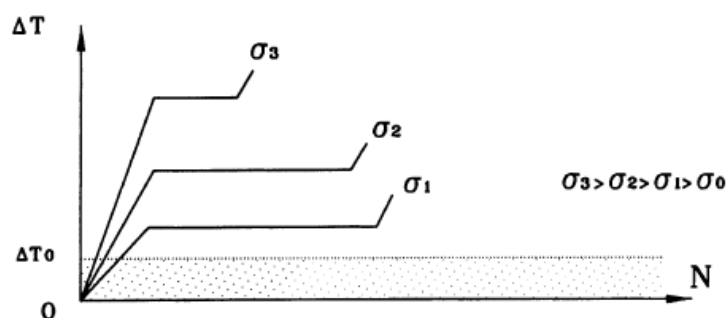


Figure 3.4-8 Funzione $T=f(N)$ per i valori di carico applicato

Nella terza fase, quella del cedimento (la completa plasticizzazione di una sezione del provino), la temperatura aumenta rapidamente per un numero relativamente piccolo di cicli.

Il cedimento a fatica può verificarsi solo se, a causa della presenza di microfratture, cedimenti locali, microcavità, ecc., il carico applicato produce un aumento della sollecitazione in un punto (o zona)

del materiale, con valori locali che superano il limite elastico. È noto che se la sollecitazione è statico, la plastificazione locale e la redistribuzione di lo stress sul materiale circostante non genera tensioni sul materiale circostante qualsiasi condizione particolarmente critica e il materiale raggiunge il fallimento solo con carichi decisamente maggiori.

Al contrario, nel caso di carico ciclico, dove la sollecitazione è quella della fatica, quando il materiale arriva alla condizione di cedimento locale (microplasticizzazione) e si genera una microfrattura, l'applicazione ripetuta della stessa sollecitazione porta alla propagazione della cricca fino a quando, nel tempo, si raggiunge la condizione di cedimento e si rompe il provino.

Se il valore della tensione locale non è sufficiente a generare una microplastificazione in qualsiasi punto del provino o dell'elemento meccanico, l'effetto sarà solo di isteresi elastica e la quantità di calore generato sarà molto limitata rispetto a quella prodotta quando, per qualche motivo, la tensione locale porta alla resa locale.

Dal punto di vista energetico, se E_c è la quantità di energia a rottura per unità di volume, ed E_p è l'energia dovuta allo snervamento per unità di volume, è possibile definire il danno cumulativo nei primi cicli N_0 come segue:

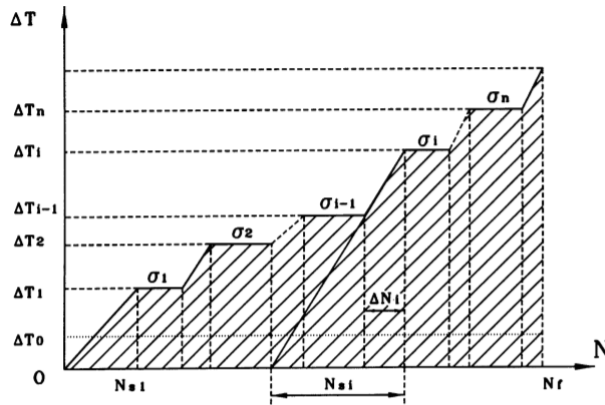
$$\int_0^{N_0} E_p dN$$

e, di conseguenza, la durata di vita residua in termini di energia come:

$$E_r = E_c - \int_0^{N_0} E_p dN$$

L'energia di deformazione plastica E_p per ciclo è praticamente proporzionale all'energia liberata come calore Q in esame. Poiché la variazione dell'energia immagazzinata del lavoro a freddo dell'energia interna è piccola rispetto all'energia dissipata come calore, Q è uguale all'energia limite E_c , che in caso di rottura a fatica caratterizza il materiale o l'elemento meccanico.

L'integrale Φ della funzione $T=f(N)$ estesa sull'intero numero di cicli N_f è proporzionale all'energia limite sopra definita. Secondo l'ipotesi che E_c sia costante per ogni materiale o componente meccanico, il valore di Φ non varia ciascun provino sottoposto a carichi diversi.



$$\Phi = \int_0^{N_0} \Delta T dN$$

$$\Phi \approx \frac{\Delta T_2^N}{2} + \Delta T_2(N_f - N_s) \approx \text{costante}$$

$$\Phi \approx \Delta T_2 N_f$$

Conoscendo il valore di Φ_{medio} del materiale e la variazione di temperatura sulla superficie è possibile determinare N_f .

σ (MPa)	Specimen	Φ	Φ_{medio}	σ (MPa)	Specimen	Φ	Φ_{medio}
245	3	439×10^3	429×10^3	275	10	406×10^3	417×10^3
	4	421×10^3			11	430×10^3	
	(5)	(592×10^3)			12	410×10^3	
	6	435×10^3			13	402×10^3	
	7	410×10^3			14	420×10^3	
	8	438×10^3			15	430×10^3	

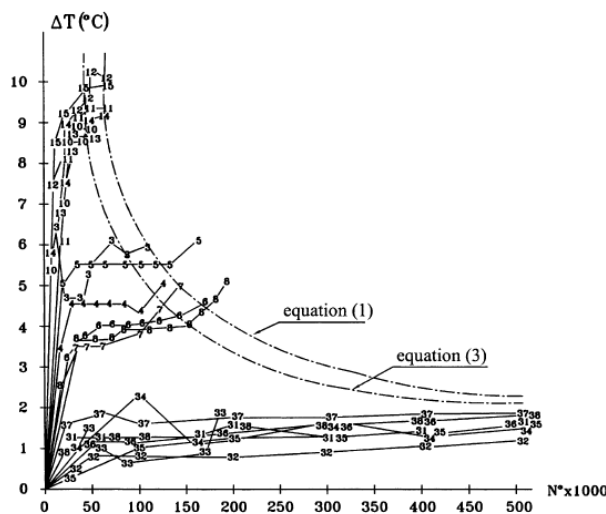


Figura 3.4-9 Curve $DT=f(N)$ per a differenti livelli di tensione

Il grafico riportato sopra descrive l'evoluzione della temperatura superficiale su provini caricati a differenti valori di tensione. La fase 2, di stabilizzazione della temperatura, si riduce all'aumentare della sollecitazione.

Sotto viene fornita la curva del Wohler per lo stesso materiale, con indicato anche il valore di limite di fatica trovato con il metodo di Risitano (212 Mpa).

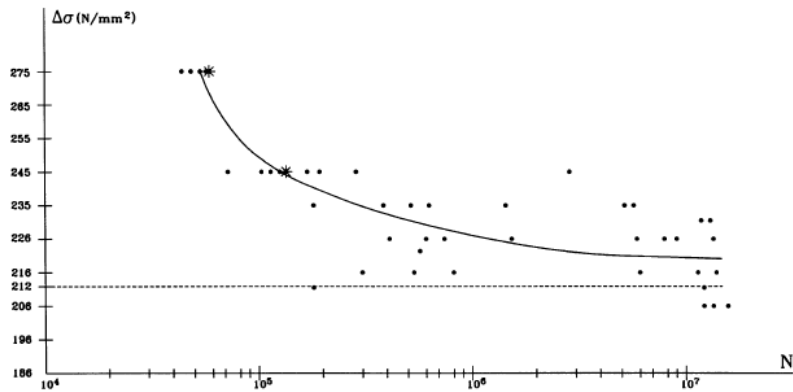


Figura 3.4-10

Va notato che non vi è alcuna considerazione energetica alla base di questa metodologia.

Secondo Meneghetti, l'energia dissipata in un volume unitario di materiale come calore sembra essere un parametro più promettente per la caratterizzazione della fatica rispetto alla temperatura superficiale (Meneghetti 2006).

Infatti, per un dato materiale, carico e condizioni limite, il primo parametro dipende solo dall'ampiezza di sollecitazione e dal rapporto di carico applicato in una prova di fatica ad ampiezza costante; il secondo parametro dipende anche dalla geometria del campione, dalla frequenza delle prove e dalle condizioni limite che determinano la velocità di trasferimento termico dal materiale all'ambiente.

Applicando il bilancio energetico, Meneghetti deduce la perdita di calore specifica per ciclo dalle misurazioni di temperatura effettuate durante la prova di fatica.

3.5 METODO MECCANICO

I metodi per la rapida determinazione della resistenza a fatica delle leghe metalliche nel campo della lunga durata ($10^6 - 10^7$ cicli) si basano su misurazioni di auto-riscaldamento del materiale.

Tuttavia, nessun metodo fa un bilancio energetico tra l'energia meccanica iniettata, l'energia assorbita dal materiale e l'energia termica dissipata sotto forma di calore.

A livello scientifico, l'obiettivo di questo lavoro è quello di misurare la variazione di energia interna di un materiale metallico in funzione del livello di stress ciclico, mentre a livello industriale l'obiettivo è quello di proporre un metodo rapido per valutare il limite di resistenza.

Secondo il primo principio della termodinamica:

$$\Delta U = \Delta W - \Delta Q \geq 0$$

ΔU : variazione dell'energia interna nel materiale;

ΔW : energia fornita per ciclo;

ΔQ : energia termica dissipata sotto forma di calore.

Il meccanismo di degradazione del materiale al di sopra del suo limite di resistenza, caratterizzato da modifiche strutturali, suggerisce che parte dell'energia meccanica fornita non viene rilasciata come calore quando viene superato il limite di resistenza del materiale (Nouillant, Energy Aspect of Fatigue Degradation 1984).

Il fatto che lo scambio di energia può essere perpetuato a tempo indeterminatamente per le sollecitazioni al di sotto di questo limite permette di ipotizzare che ci sia un'identità tra la potenza meccanica fornita e la potenza termica rilasciata nell'intervallo tra le sollecitazioni molto basse e il limite di resistenza (Nouillant, Aspect énergétique de la dégradation par fatigue 1984).

Alla fine della nostra analisi vorremmo mostrare il limite di resistenza come soglia per la comparsa di un'energia interna.

Nei capitoli seguenti presenteremo il dispositivo di prova, l'approccio sperimentale, i risultati ottenuti e la loro interpretazione.

4 MATERIALE E PROVINI

4.1 LEGA D'ALLUMINIO 2024-T3 551

Il materiale scelto per questa ricerca è la lega di alluminio temprato per precipitazione Al 2024-T3 551, ampiamente utilizzata nell'industria aeronautica.

Si tratta di una lega di alluminio con il rame (3,8%) come principale elemento di lega. Viene utilizzata in applicazioni che richiedono un elevato rapporto resistenza/massa, oltre che una buona resistenza alla fatica.

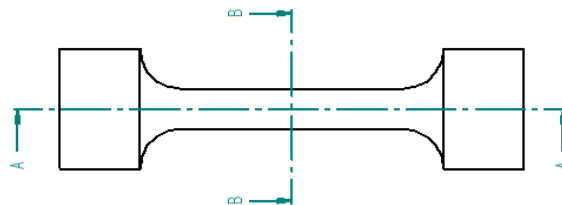
Gli altri componenti sono 0,7% Mg, 0,9% Mn, 1,1 Si.

Il contenuto chimico, identificato dalle informazioni presenti in letteratura, mostra come principali tipi di precipitati Al_7Cu_2Fe , Al_2CuMg et Al_2Cu .

Densità [kg/dm ³]	Conduttività termica [W/m.K]	R _p 0,2mini [MPa]	R _m mini [MPa]	Durezza HB
2,77	120	290	475	123

Tabella 4-1 Tabella mostrante le proprietà meccaniche dell'alluminio 2024-T3 551.

L'analisi della microstruttura con un microscopio a luce polarizzata permette di osservare la struttura, la distribuzione e la dimensione dei grani e infine di distinguere le diverse fasi. La prima immagine rappresenta il taglio in direzione assiale, mentre la seconda è il taglio perpendicolare all'asse del campione. I grani risultano molto allungati nella direzione di estrusione con limiti appena identificabili.



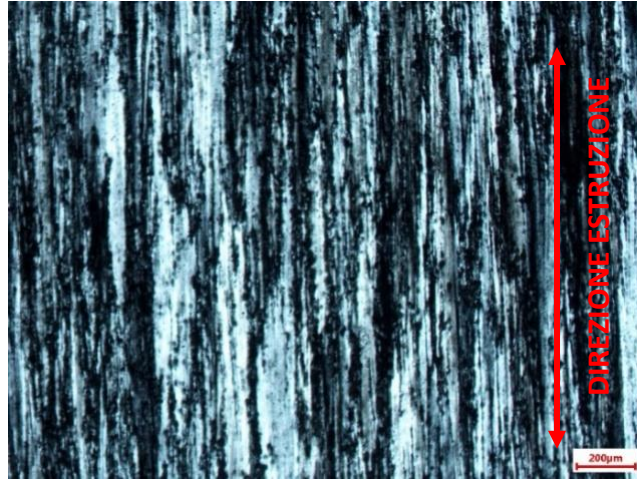


Figure 4.1-1 Taglio A-A, immagine al microscopio a luce polarizzata.

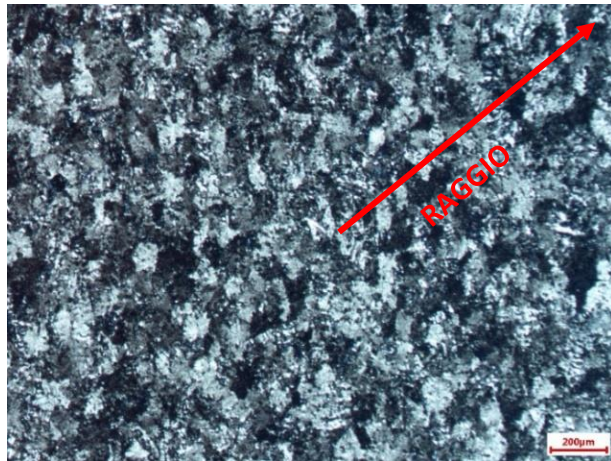


Figure 4.1-2 Taglio B_B

4.2 GEOMETRIA DEI PROVINI

I provini torsionali sono cilindri lavorati con una lunghezza attiva sufficiente a raggiungere uno stato omogeneo di sollecitazione durante la prova.

Alle due estremità, le teste di ormeggio vengono lavorate con raggi di curvatura sufficientemente ampi per evitare eccessive concentrazioni di sollecitazioni (Fig. 3.2-3).

Le teste sono dimensionate in modo da non avere microslittamenti sulle ganasce, sono le zone di assorbimento di energia non tollerabili per il tipo di misure previste.

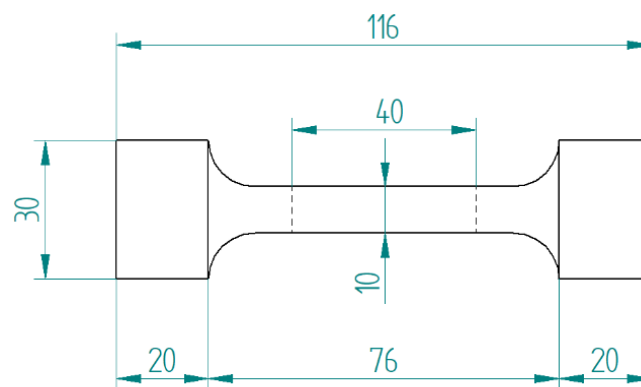


Figure 4.2-1 Provini $L_{ACT}=40\text{mm}$ et $d=10\text{mm}$

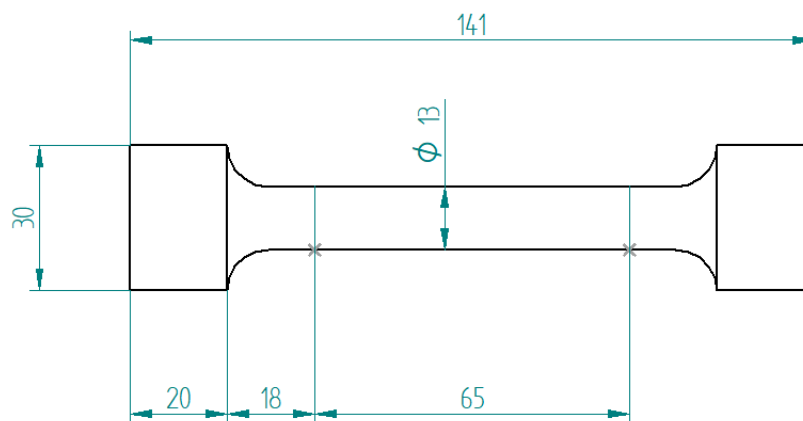


Figure 4.2-2 Provini $L_{ACT}=65\text{mm}$ et $d=13\text{mm}$

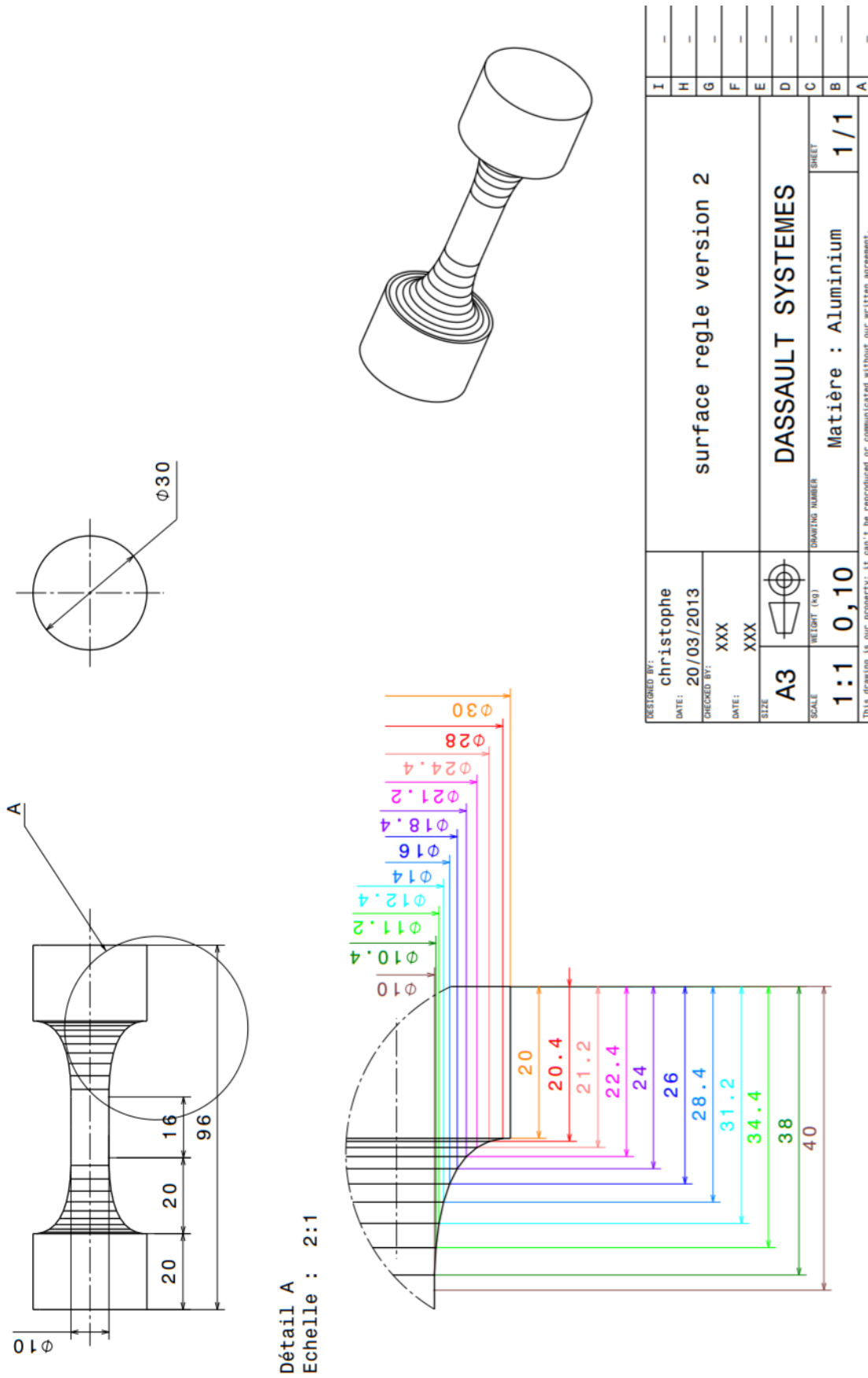


Figure 4.2-3 Tavola mostrante i raggi di curvatura abbastanza grandi da evitare eccessive concentrazioni di tensione.

5 MISURA DELL'ENERGIA MECCANICA

5.1 STRUTTURA DEL DISPOSITIVO SPERIMENTALE

Il dispositivo disponibile presso il laboratorio I2M permette di valutare la densità volumetrica di energia assorbita per ciclo DW , con una precisione di $10^{-4} W$. E' una macchina che opera alla risonanza meccanica dell'unità sperimentale (60-100 Hz).

Il sistema può essere schematizzato come segue:

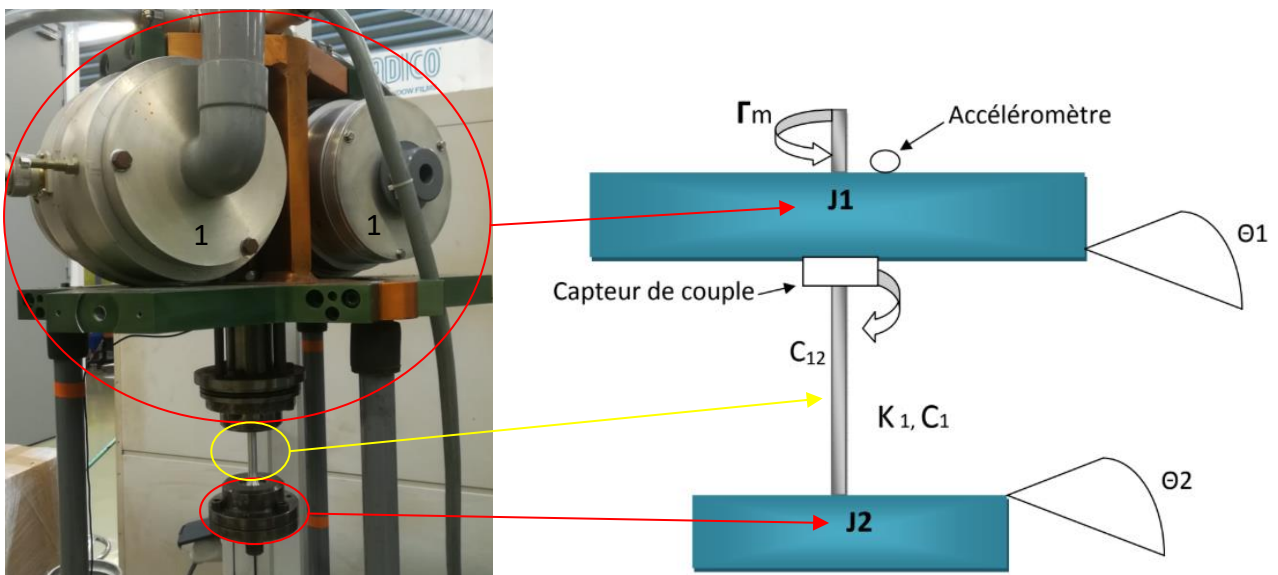


Figure 5.1-1 Schema del dispositivo

1. Due vasi vibranti in serie generanti una coppia;
2. Sensore accelerazione ;
3. Sensore coppia ;
4. Provino fissato alle estremità ;
5. Grande massa di inerzia J_1 costituente un incastramento;
6. Inerzia J_2 .

Il principio del dispositivo consiste nell'applicare all'inerzia J_1 (elevata) una coppia motrice proveniente dalle forze di due eccitatori elettromagnetici. Se questa coppia compensa la coppia elastica del provino, allora si può considerare J_1 un incastrato virtuale del risonatore costituito dall'inerzia J_2 e dal provino che viene assimilato ad una rigidità k .

Le variabili Coppia e Accelerazione, che verranno introdotte successivamente, si riferiscono all'ampiezza della coppia e all'ampiezza dell'accelerazione.

Se il movimento θ_1 è in quadratura con θ_2 dell'inerzia J_2 , la superficie del ciclo di isteresi è equivalente alla superficie dell'ellisse descritta in un diagramma di torsione coppia-angolo:

$$\Delta W = \pi \times C_{12} \times \theta_1$$

Non conoscendo direttamente θ_1 , quest'ultimo può essere sostituito da $\frac{\ddot{\theta}_1}{d_{12} \cdot \omega^2}$, misurata dall'accelerometro posto su J_1 .

Con d_{12} distanza tra il sensore di accelerazione montato orto-radialmente e l'asse di torsione.

Esiste una frequenza propria del sistema tale che :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{J_2}}$$

Otteniamo :

$$\Delta W = \pi \times C \times \frac{Acc}{\omega^2 \times d_{12}}$$

$$\Delta W = \frac{\pi \times J_2}{k \times d_{12}} \times C_{12} \times Acc \quad (\text{Eq. 5.1.1})$$

MISURA DEL $\frac{\Delta W}{W}$ IN TORSIONE

L'obiettivo è quello di mostrare lo smorzamento strutturale in funzione delle variabili misurate, della coppia nel provino e dell'accelerazione angolare della parte superiore.

La caratteristica $\left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{glo} = f(tensione)$ corrisponde allo smorzamento strutturale di un cilindro pieno sottoposto ad una sollecitazione di taglio variabile tra 0, al centro del provino, e la sollecitazione massima sulla superficie esterna del cilindro. Questa sollecitazione varia linearmente tra il centro e la superficie laterale. È possibile scrivere $\tau = f(r) = \tau_{max} \cdot r$ (con raggio r del provino).

Se notiamo W l'energia elastica immagazzinata nel provino tra un campo di taglio zero e il valore massimo raggiunto e notiamo ΔW la parte di energia elastica non restituita durante il ciclo di carica e scarica, troviamo allora la quantità $\frac{\Delta W}{W}$ caratteristica del materiale testato.

Le ipotesi alla base del nostro lavoro sono le seguenti:

- Viene considerato solo il dominio elastico macroscopico dove c'è linearità tra sollecitazione e deformazione;
- La microstruttura nel campione è omogeneo.

Per calcolare $\frac{\Delta W}{W}$ in funzione della tensione considereremo l'espressione della coppia in un cilindro pieno di raggio r , lunghezza l e modulo di taglio G :

$$C_{12} = \frac{\pi G r^4 (\theta_1 - \theta_2)}{2l} \quad (5.2.1)$$

Notiamo la coppia in funzione del raggio :

$$C_{12} = k(\theta_1 - \theta_2)$$

Si ottiene:

$$(\theta_1 - \theta_2) = \frac{C_{12}}{k}$$

L'energia immagazzinata nel provino risulta:

$$W = \frac{1}{2} C_{12} (\theta_1 - \theta_2)$$

Rimpiazzando $(\theta_1 - \theta_2)$:

$$W = \frac{1}{2k} C_{12}^2 \quad (5.2.2)$$

Si arriva all'espressione di $\frac{\Delta W}{W}$ $\left(\frac{(5.2.1)}{(5.2.2)} \right)$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta W}{W} &= \frac{\frac{\pi \times J_2}{k \times d_{12}} \times C_{12} \times Acc}{\frac{1}{2k} C_{12}^2} \\ &= \frac{2\pi J_2}{d_{12}} \times \frac{Acc}{C_{12}} \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

Lo sforzo di taglio esercitato sul provino è :

$$\tau = \frac{Gr}{L} (\theta_1 - \theta_2) \quad (5.2.4)$$

Riprendendo l'equazione (5.2.1) si deriva $(\theta_1 - \theta_2)$ in funzione della coppia C_{12} :

$$(\theta_1 - \theta_2) = \frac{2C_{12}l}{\pi Gr^4} \quad (5.2.5)$$

Sostituendo (5.2.5) nella (5.2.4) si ottiene :

$$\tau_{max} = \frac{2C_{12}}{\pi r^3} \quad (5.2.6)$$

La coppia C_{12} è misurata alla periferia del cilindro quindi si calcola τ_{max} .

In torsione la misura simultanea dell'accelerazione (Acc) e della coppia (C_{12}) a cui è sottoposto il provino e purché il servocomando di fase mantenga una quadratura tra coppia e spostamento angolare a J_1 possiamo quindi esprimere la caratteristica $\frac{\Delta W}{W} = f(\tau)$.

Con una costante, questa caratteristica corrisponde alla funzione $\frac{Acc}{C_{12}} = f(C_{12})$.

5.2 FUNZIONAMENTO DEL DISPOSITIVO

La prova consiste in un carico ciclico attraverso scalini crescenti di sollecitazione di taglio. Il blocco superiore si attiva quando la caratteristica $\frac{\Delta W}{W}$ è stabilizzata.

Si può notare che la sollecitazione di taglio τ_{max} e la coppia C_{12} hanno la stessa evoluzione secondo la relazione (5.2.6).

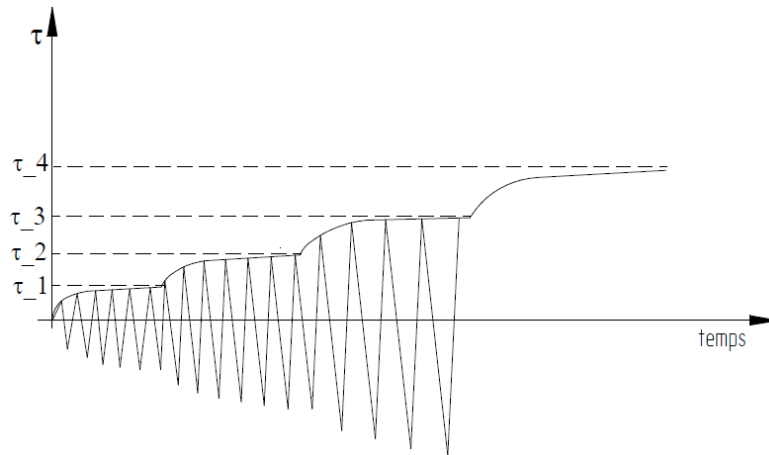


Figure 5.2-1 Evoluzione tensione nel tempo

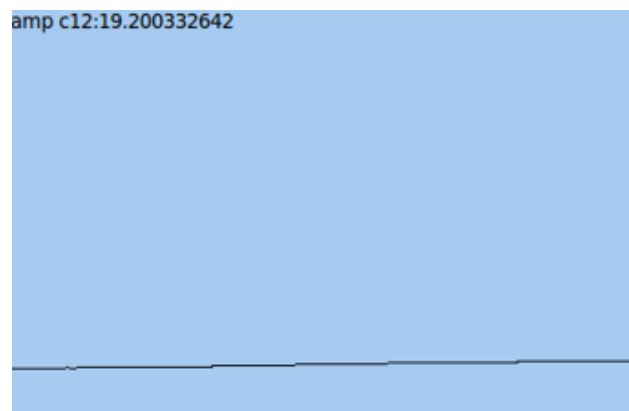


Figure 5.2-2 Finestra di controllo della Coppia sul software PcAxe

I dati al termine di una prova sono raccolti in un file Scilab dove troviamo per ogni momento il valore dell'ampiezza della coppia (C), l'ampiezza dell'accelerazione (Acc) e la fase. Per la post-elaborazione, i dati sono stati trasferiti al software Matlab.

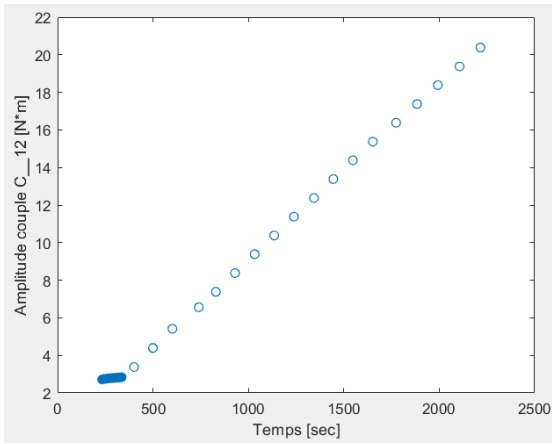


Figure 5.2-3 Dati amplitudine Coppia

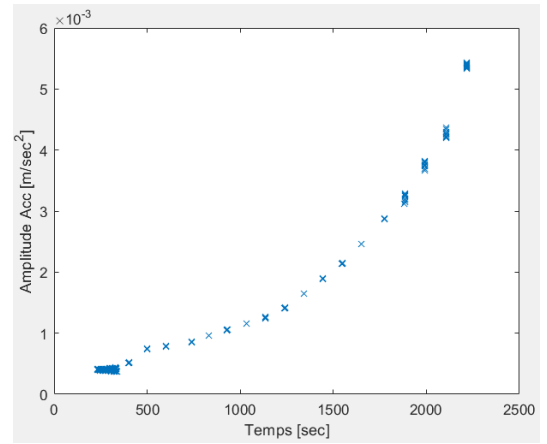


Figure 5.2-4 Dati amplitudine Accelerazione

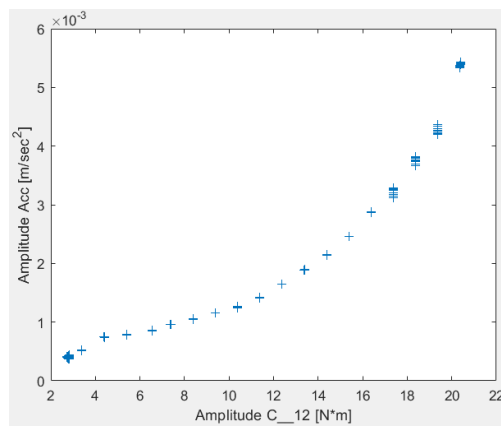


Figure 5.2-5 Accelerazione in funzione della coppia

6 MISURE TERMICHE SULLA SUPERFICIE

6.1 APPROCCIO TEORICO ALL'ANALISI TERMICA

Abbiamo affrontato lo studio termografico con un approccio teorico alla termografia.

Il *flusso termico* o *flusso di calore*, notato a φ , tra due fluidi a temperature diverse T_i corrisponde al trasferimento di calore Q che scorre per unità di tempo tra i due fluidi:

$$\varphi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Il flusso termico è espresso in joule al secondo (J/s). L'evoluzione del trasferimento termico è governata dai principi della termodinamica e dall'equazione del calore.

Esistono tre tipi di trasferimento termico, che possono coesistere:

- *Conduzione*, dovuta alla progressiva diffusione dell'agitazione termica nel materiale;
- *Convezione*, trasferimento termico che accompagna i movimenti macroscopici della materia;
- *Irradiazione*, che corrisponde alla propagazione dei fotoni.

Per studiare il fenomeno fisico dello scambio termico in un campione caricato ciclicamente in torsione, è necessario determinare un modello semplificato del sistema e confrontare gli ordini di grandezza tra i flussi conduttivi, convettivi e radiativi per definire quello che regola lo scambio termico.

▪ Flusso conduttivo

Equazione del calore :

$$d_v(\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}) + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

λ : conducibilità termica del materiale, nel caso dell'alluminio in esame $\lambda_{Alu} = 120 \frac{W}{m \cdot K}$;

q : densità sul volume delle fonti di calore.

In regime stazionario :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

E se λ è isotropo, l'equazione diventa :

$$\lambda \nabla^2 T + q = 0$$

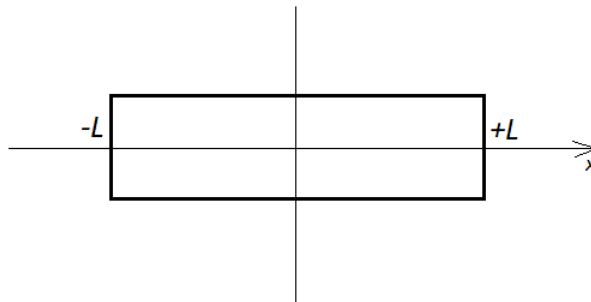
Nel caso monodimensionale, 1D :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -q$$

Da dove :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q}{\lambda}x + A \quad \text{et} \quad T(x) = -\frac{qx^2}{2\lambda} + Ax + B$$

Modello della parte attiva del provino :



Si introducono le condizioni limite per cui alle estremità non vi è variazione di calore

$$T(x = \pm L) = T_0$$

$$L = L_{act}/2.$$

Si ottiene:

$$T(x) = T_0 + \frac{qL^2}{2\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) \quad 6.1.1$$

Considerando una variazione di temperatura di 1°C al centro ($x = 0$) su un provino di lunghezza attiva $L_{act} = 10\text{mm}$, possiamo calcolare la densità del flusso di calore q :

$$q_{10} = \frac{2\lambda\Delta T}{L^2} = 11,2 \cdot 10^6$$

Da cui il flusso di calore risulta :

$$\varphi_{C_{10}} = q_{10} * V = 8,8 \cdot 10^{-2} \quad 6.1.2$$

$$V = \pi r^2 L = 3,14 \cdot 0,005^2 \cdot 0,01$$

▪ **Flusso convettivo**

Il coefficiente di scambio convettivo per cilindri verticali in aria (regime laminare) per campioni torsionali:

$$h_c = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25} \quad (H \text{ altezza del cilindro})$$

Nel caso di torsione l'altezza del cilindro (il provino è verticale) varia tra i 20 e i 40 mm (parte attiva) in questo caso per un $\Delta T_{max} = 1^\circ C$, si ha

$$3,17 < h_c < 3,77$$

Si considera un valore medio:

$$h_c = 3,50 \cdot (\Delta T)^{0,25}$$

Si ottiene l'espressione del flusso convettivo $\varphi_{LC_{10}}$ (flusso convettivo su 10mm di parte attiva) :

$$\varphi_{LC_{10}} = h_c \cdot S \cdot (\Delta T)$$

$$S = \pi d L_{act} = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,01 = 3,14 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{LC_{10}} &= 3,50 \cdot (\Delta T)^{0,25} \cdot S \cdot (\Delta T) \\ &= 3,50 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^{1,25} \end{aligned}$$

Si $\Delta T < 1^\circ C$:

$$\varphi_{LC_{10}} = 11 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T^{1,25} \quad 6.1.3$$

▪ **Flusso radiativo**

Nel caso di trasferimento radiativo, il flusso radiativo ha l'espressione :

$$\varphi_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T^4 - T_2^4)$$

σ : costante di Stefan-Boltzmann [5,67·10⁻⁸ W/(m² ·K⁴)]

ε : emissività della superficie [$\varepsilon = 1$]

$$\varphi_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T^2 + T_2^2)(T^2 - T_2^2)$$

$$\varphi_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T^2 + T_2^2)(T + T_2)(T - T_2)$$

Considerando $(T - T_2) = \Delta T$ et $\sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T^2 + T_2^2)(T + T_2) = h_R$ il coefficiente di scambio radiativo, si ottiene:

$$\varphi_R = h_r \cdot S \cdot \Delta T$$

Alla temperatura ambiente e con $\Delta T = 1^\circ C$, $h_r = 5,73 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Sia $\varphi_{LR_{10}}$ il flusso radiativo su 10 mm di parte attiva:

$$\varphi_{LR_{10}} = 19 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T$$

6.1.4

Confrontando gli ordini di grandezza dei flussi conduttivi (6.1.2), convettivi (6.1.3) e radiativi (6.1.4), si dimostra che la distribuzione della temperatura è ben rilevata dal fenomeno conduttivo derivante dalla distribuzione delle fonti di calore. Abbiamo valutato l'errore commesso:

$$\%err = \frac{\varphi_{LC_{10}} + \varphi_{LR_{10}}}{\varphi_{C_{10}}} = \frac{(11 + 19) \cdot 10^{-4}}{11,2 \cdot 10^{-2}} = 2,6$$

Questa analisi ci ha permesso di determinare l'evoluzione della variazione di temperatura secondo la lunghezza mediante l'espressione (6.1.1):

$$\Delta T = \frac{qL^2}{2\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)$$

La grandezza descrive una parabola con il punto di massimo al centro ($x = 0$) del provino:

$$\Delta T_{max} = \frac{qL^2}{2\lambda}$$

6.1.5

6.2 ORDINE DI GRANDEZZA DELLA VARIAZIONE DI TEMPERATURA

Secondo il 1° principio della termodinamica, la variazione di energia interna deriva dalla differenza tra l'energia assorbita, ΔW , per ciclo (che può essere misurata direttamente su una macchina risonante) e l'energia termica, $E_{termica}$, (dissipata in calore) che può essere dedotta dal campo di temperatura misurato in superficie.

$$\Delta U = E_{meccanica} - E_{termica} \quad 6.2.1$$

$$E_{meccanica} = \Delta W \cdot f \quad 6.2.2$$

$$E_{termica} = q \cdot V_{act} \quad 6.2.3$$

Utilizzando l'espressione (6.1.5) per la densità delle sorse di calore:

$$E_{termica} = \frac{2\lambda\Delta T_{max}}{L^2} \cdot V_{act} \quad 6.2.4$$

Confrontando gli ordini di grandezza dell'energia meccanica e termica, dai dati meccanici già disponibili abbiamo fatto una prima stima dell'ordine di grandezza della variazione di temperatura che si verificherà in superficie:

$$\frac{\lambda\Delta T_{max}}{L^2} \cdot V_{act} \approx \Delta W \cdot f$$

$$\frac{\lambda\Delta T_{max}}{L^2} \cdot V_{act} \approx \pi \times C \times \frac{Acc}{\omega^2 \times d_{12}} \cdot f$$

$$\Delta T_{max} \approx \pi \times C \times \frac{Acc}{\omega^2 \times d_{12}} \cdot f \cdot \frac{L^2}{\lambda \cdot V_{act}}$$

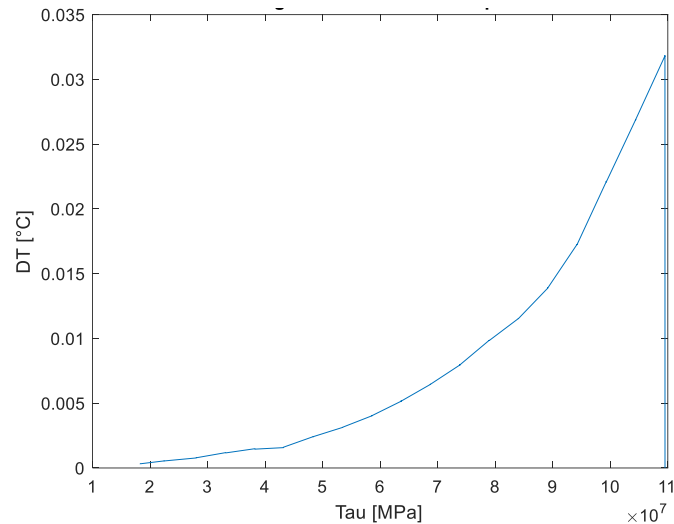


Figure 6.2-1 Stima dell'ordine di grandezza della temperatura che dovremmo misurare sulla superficie del provino durante il carico ciclico di torsione.

Il grafico sopra ci mostra la temperatura che dovremmo aspettarci di trovare.

La sensibilità teorica della termocamera a infrarossi utilizzata è di 10 mK.

La variazione di temperatura in superficie dipende quindi dal coefficiente di conducibilità λ e dalla lunghezza del campione. Non potendo cambiare il materiale, le dimensioni dei campioni possono essere regolate per ottenere una maggiore variazione di temperatura.

Abbiamo quindi prodotto campioni con una lunghezza attiva di $L_{act} = 65mm$. L'aumento della lunghezza attiva del campione avrebbe ridotto la frequenza di lavoro della macchina, questo effetto è stato compensato aumentando il raggio a $r = 6,5mm$.

Purtroppo, questi campioni non erano utilizzabili perché non si è tenuto conto che la coppia massima applicabile dalla macchina è 21Nm, la tensione tangenziale è funzione della coppia secondo l'equazione (5.2.6), su campioni con raggio $r=6,5mm$ si possono raggiungere solo 47MPa.

Infine, dai dati meccanici e termici, l'energia interna sarà ottenuta in funzione dell'ampiezza della sollecitazione di taglio.

6.3 MISURE A INFRAROSSI

Le misurazioni termiche sono state effettuate da una telecamera a infrarossi montata davanti alla macchina di torsione. Questo è controllato dal software Altair.

Una termocamera è un dispositivo senza contatto che rileva l'energia a infrarossi (calore) e la converte in un segnale elettronico, che viene poi elaborato per produrre un'immagine termica su un monitor video ed eseguire calcoli di temperatura. Il calore rilevato da una termocamera può essere quantificato o misurato con estrema precisione, consentendo di monitorare non solo le prestazioni termiche, ma anche di identificare e valutare la gravità relativa dei problemi dovuti al calore.

La temperatura misurata è influenzata da disturbi legati alla riflessione termica, all'emissione nell'ambiente e al trasferimento di calore da parte di elementi estranei (morsetti della macchina) che richiederebbero l'eliminazione delle cause di disturbo (camera adiabatica, inibizione della riflessione, isolamento termico della macchina).

Nel nostro caso, le pareti di cartone intorno alla manipolazione hanno impedito il riflesso della luce sulla superficie del campione.

Inoltre, poiché la variazione di temperatura superficiale attesa a causa del carico ciclico è inferiore a 1°C, abbiamo dovuto tener conto, nella nostra analisi, della variazione della temperatura ambiente nella stanza.

La termocamera utilizzata è una FLIR SC7000, nell'allegato 2 vengono specificate le sue caratteristiche tecniche.



Figure 6.3-1 Dispositivo durante la prova a fatica

Le misurazioni termiche sono state condotte secondo il seguente schema per garantire le stesse condizioni in prove diverse.

1. Pulire la superficie del provino da verniciare con carta e acetone;
2. Montare il provino sul dispositivo di manipolazione;
3. Applicare un sottile strato di vernice di cerniera sulla parte attiva del campione, che deve essere il più possibile omogenea e uniforme;

NOTA: preferibilmente iniziare il test al mattino ed eseguire la procedura di preparazione la sera prima.

4. Programmare le impostazioni di registrazione della telecamera sul software Altair:

Frequenza d'acquisizione : $f_{ACQ} = 25 \text{ Hz}$,

Tempo d'integrazione : $t_{INT} = 1609 \mu\text{s}$

Campionamento : 1/1 (o 1/2) ;

Media : 1 (o 2) ;

5. Impostare i parametri della prova meccanica:

Incremento amplitudine della coppia: increment amp. c12 = 1 ;

Soglia dell'incremento dell'amplitudine della coppia: seuil incr sur err amp C12 = 0,5 ;

6. Avviare i test di torsione e allo stesso tempo la registrazione della pellicola infrarossa per avere i dati sincronizzati;
7. Arrestare la prova quando la coppia raggiunge i 22Nm, oltre questo valore il livello di corrente che scorre attraverso le bobine costituisce la base per le saldature dei cavi.

6.4 POST-TRATTAMENTO DEI DATI TERMICI

Come descritto nella bibliografia, il risultato delle misurazioni termiche è sotto forma di immagini termiche che esprimono il valore istantaneo della temperatura di ogni punto del campione.

Ciò che ci interessa è la variazione di temperatura in superficie, quindi l'analisi viene condotta con una tecnica differenziale: l'immagine ottenuta all'inizio del test (immagine di riferimento ($t = 0$ s, condizione 0) viene sottratta dall'immagine ottenuta ad un dato numero di cicli.

Per la post-elaborazione dei dati termici abbiamo utilizzato il software di calcolo numerico Matlab. I dati sotto forma di immagini termiche sono convertiti in matrici $T(x_i ; x_j ; t_k)$, con $O(x ; y)$ il sistema di coordinate. Ogni elemento della matrice $T(x ; y)$ rappresenta la temperatura dell'elemento xij al momento dato.

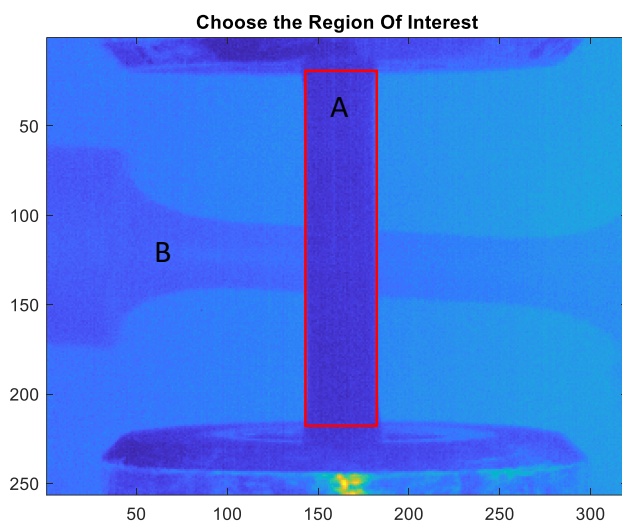


Figure 6.4-1 In rosso è selezionato il dominio di nostro interesse

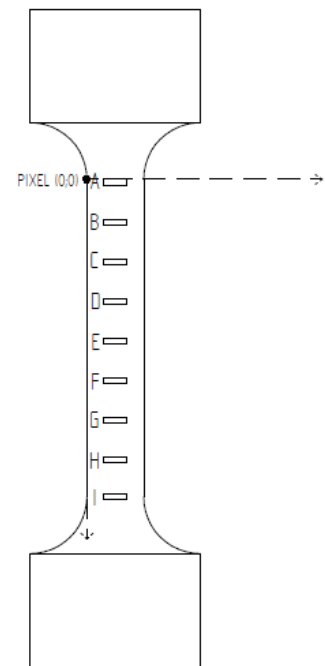


Figure 6.4-2 Rappresentazione delle zone

In base alla lunghezza sono state definite 9 zone (zona A, zona B, zona B, ecc....) della stessa dimensione $6,2 \text{ mm}^2$, su ciascuna di esse è stata poi calcolata la temperatura media tenendo conto di tutti gli elementi interni.

Il processo di definizione delle dimensioni ottimali delle aree, che riduce al minimo il rumore nelle misurazioni, è specificato nell'appendice III.

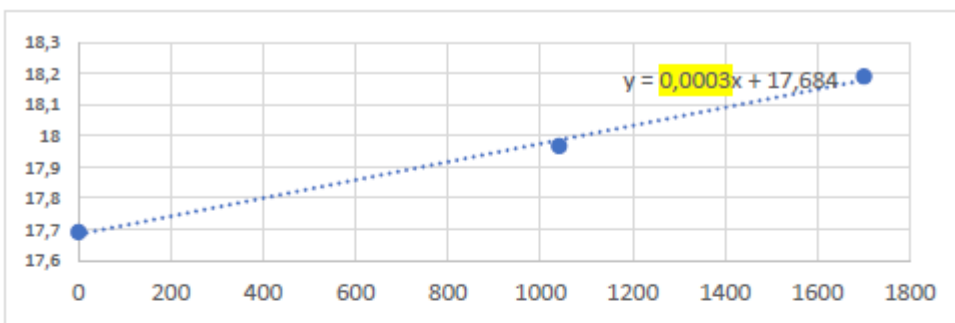
L'osservazione della variazione di temperatura sulla superficie del campione alle sue spalle B, fornisce l'evoluzione della temperatura nell'ambiente circostante durante il periodo di prova.

La grandezza presentata nel prossimo capitolo, "Risultati e discussione", è l'effettiva variazione di temperatura tenendo conto che l'ambiente non è adiabatico.

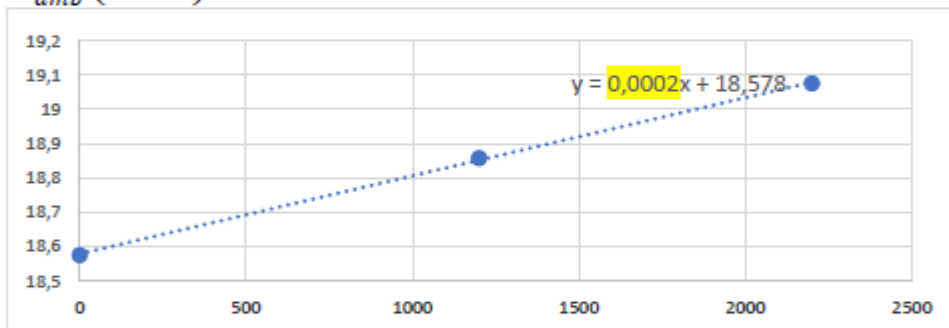
$$\Delta T = \Delta T_{reale} = \Delta T_{misurata} - \Delta T_{amb}$$

ΔT_{amb} è calcolato in ogni momento moltiplicando il tasso di crescita della variazione della temperatura ambiente per il tempo (in secondi).

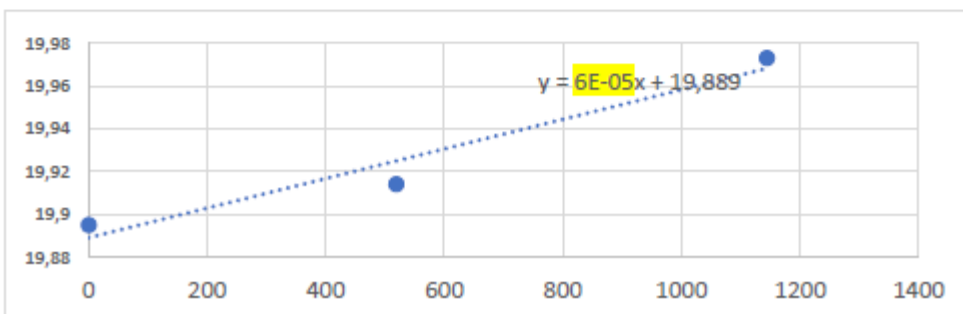
$$\Delta T_{amb} (11h00) = 3e - 4 \times sec$$



$$\Delta T_{amb} (13h30) = 2e - 4 \times sec$$



$$\Delta T_{amb} (16h30) = 6e - 5 \times sec$$



L'appendice II riporta gli script utilizzati per il post-trattamento dei dati.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati delle misurazioni meccaniche e termiche effettuate congiuntamente saranno presentati e commentati nell'ordine seguente:

- Curva accelerazione in funzione della coppia imposta;
- Curva $\Delta W/W = f(\tau)$;
- Curva $\Delta W = f(\tau)$;
- Calcolo $\Delta W/W = f(\tau)_{intr}$ a partire dai dati $\Delta W/W = f(\tau)_{glo}$;
- Curva $\Delta T = f(\text{posizione})$;
- Curva e $\Delta T = f(\tau)$;
- Paragone tra le curve $E_{meccanica} = f(\tau)$ et $E_{termica} = f(\tau)$;
- Curva $\Delta U = f(\tau)$.

6.5 CURVA ACCELERAZIONE IN FUNZIONE DELLA COPPIA

Il funzionamento della macchina aumentando i blocchi di ampiezza di sollecitazione è ben rappresentato nel diagramma sottostante che rappresenta la coppia imposta in funzione del tempo.

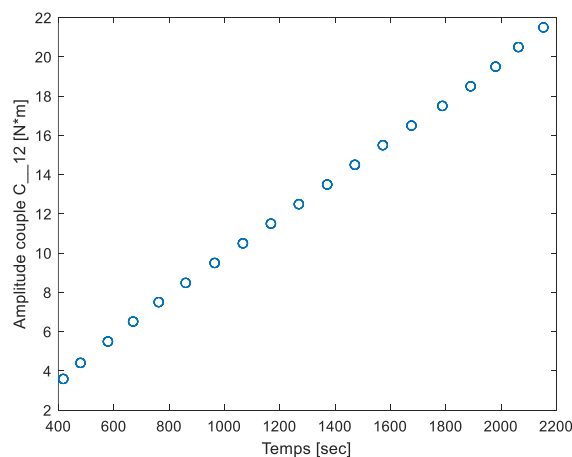


Figure 6.5-1 Dati ampli C_12 in funzione del tempo

L'evoluzione della coppia imposta al provino è ovviamente lineare, quindi nei dati all'uscita dell'accelerazione troviamo più questa linearità:

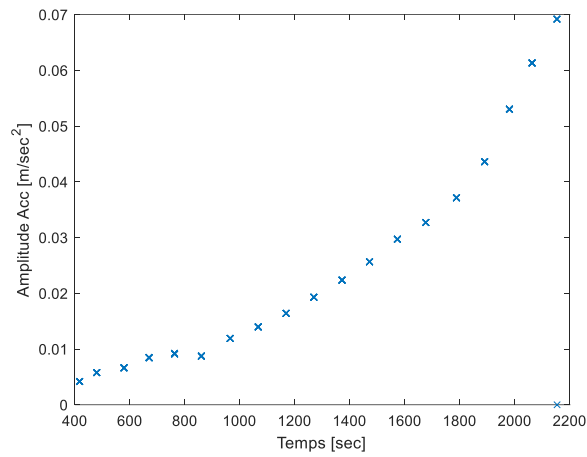


Figure 6.5-2 Dati Acc in funzione del tempo

Il comportamento del materiale non è linearmente elastico durante il carico, la prima fase in cui l'accelerazione evolve meno rapidamente può essere sintomatico di un indurimento del materiale. Si presume che ci siano cambiamenti a livello microstrutturale, come il movimento delle dislocazioni o la loro interazione con le precipitazioni.

Come abbiamo notato nella bibliografia, sebbene il carico rimanga nel range elastico macroscopico, la fatica è un fenomeno che si verifica con deformazioni plastiche localizzate intorno ai difetti dei materiali (alla scala microscopica).

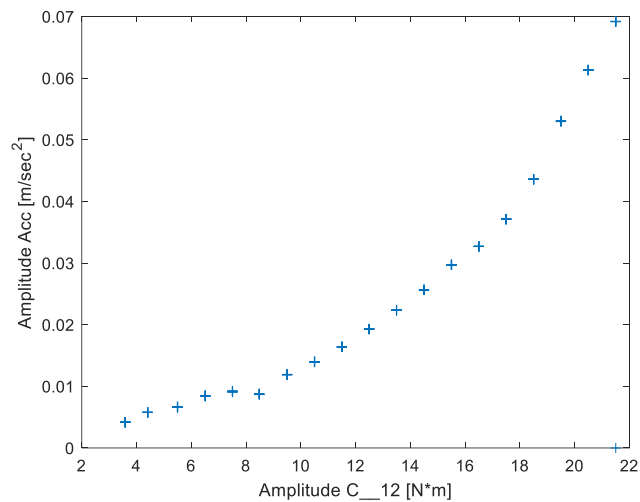


Figure 6.5-3 Dati accelerazione in funzione della coppia

6.6 CURVA $\Delta W/W = f(\tau)$

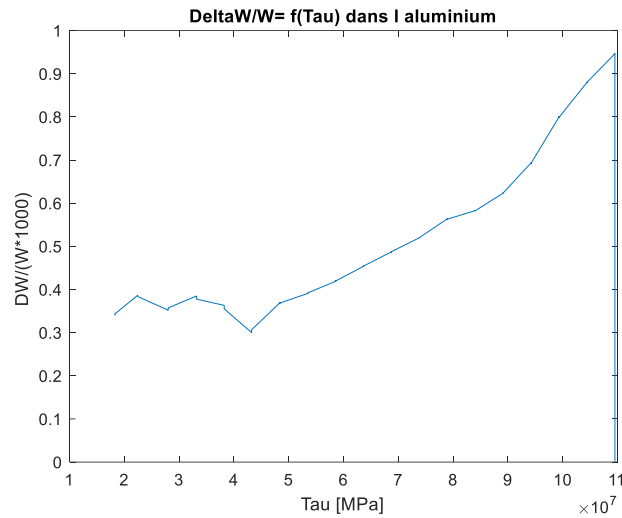


Figure 6.6-1 Caratteristica $\frac{\Delta W}{W}$ della lega A2024

Ci sono tre diversi comportamenti a seconda del livello di taglio:

- Un primo livello in cui $\frac{\Delta W}{W}$ varia relativamente poco;
- Un secondo livello in cui $\frac{\Delta W}{W}$ varia linearmente con la sollecitazione di taglio;
- Un terzo livello dove $\frac{\Delta W}{W}$ varia notevolmente a seconda del vincolo τ e si raggiunge il dominio plastico.

Per valori di sollecitazione che si avvicinano al limite di resistenza, va notato che la caratteristica $\Delta W/W=f(\tau)$ ha una pendenza quasi costante che aumenta con il livello di sollecitazione.

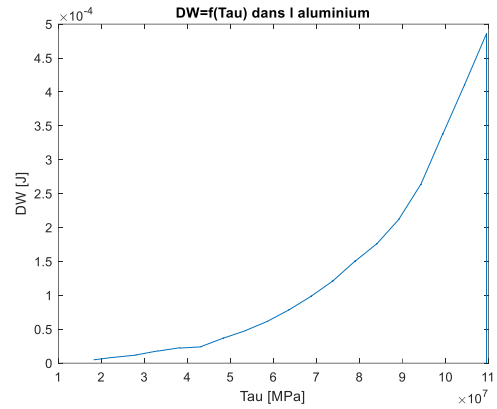
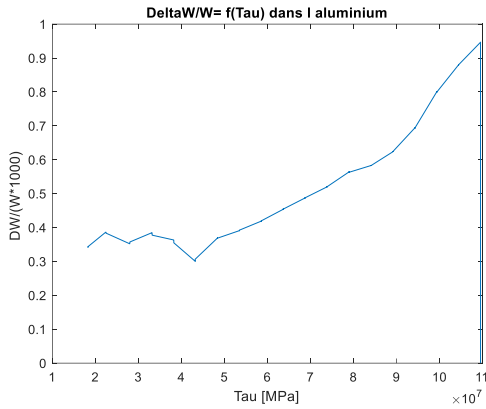
Se trascuriamo il terzo comportamento in cui si manifesta la plasticità locale, la variazione di pendenza tra i primi livelli è dovuta a due diversi comportamenti microstrutturali.

Il rapporto di stage di Salma Belfiqih mostra come l'intersezione tra le due linee di regressione dia un valore di sollecitazione di taglio vicino a quello trovato con il metodo convenzionale Staircase (Belfiqih 2015). Il limite di resistenza viene quindi interpretato come il confine tra due diversi comportamenti microstrutturali.

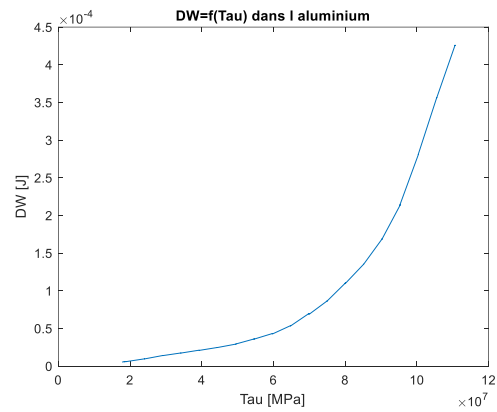
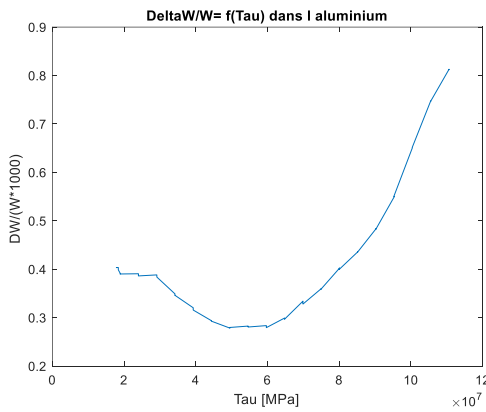
Queste considerazioni sul cambiamento microstrutturale del materiale durante un carico ciclico torsionale devono essere confermate osservando la microstruttura del materiale, a partire dalla comparsa di bande di scorrimento persistenti sulla superficie.

Le figure seguenti mostrano la caratteristica $\Delta W/W = f(\tau)$ e l'energia assorbita per ciclo $\Delta W = f(\tau)$ su un campione sottoposto a diversi carichi.

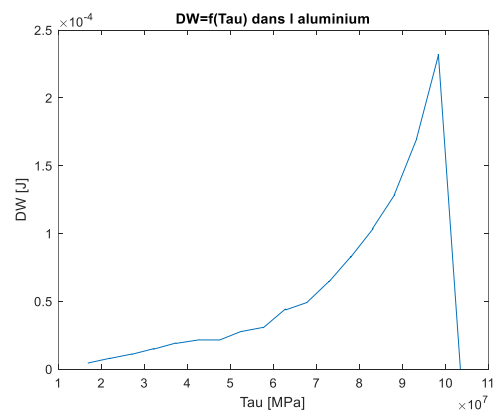
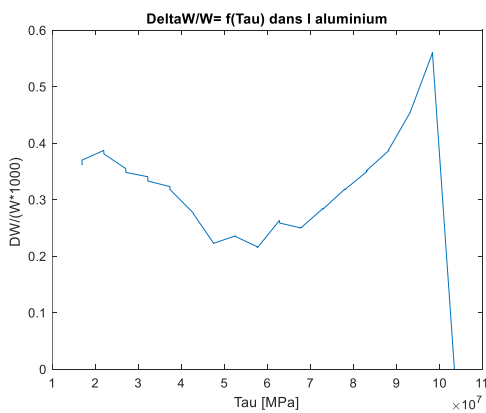
Primo carico fino a 110MPa



Secondo carico fino a 110 MPa



Terzo carico fino a 110 MPa



Dalle immagini vediamo come l'energia assorbita dal sistema mantenga la stessa tendenza al rialzo mentre la caratteristica di smorzamento nel secondo e terzo carico mostra un comportamento decrescente nella prima parte che aumenta nella seconda parte.

Il superamento del limite di fatica, stimato in 75 MPa, ha portato a cambiamenti strutturali che hanno alterato il comportamento del materiale.

Nelle curve c) ed e) si può notare che i valori dello smorzamento strutturale sono diminuiti rispetto alla prova sul provino bianco.

Inoltre, osserviamo:

- $\tau < 50 \text{ MPa}$: lo smorzamento strutturale $\frac{\Delta W}{W}$ diminuisce ;
- $\tau > 50 \text{ MPa}$: lo smorzamento strutturale $\frac{\Delta W}{W}$ aumenta.

6.7 CALCOLO $\Delta W/W = f(\tau)$ A PARTIRE DAI DATI DI $\Delta W/W = f(\tau_{max})$

La caratteristica che abbiamo presentato in precedenza è stata ottenuta dai dati di coppia misurati alla periferia del campione (5.2.6). Nel caso di un cilindro pieno sottoposto a carico torsionale, la tensione tangenziale varia linearmente a seconda del raggio:

$$\tau = \frac{C \cdot r}{I_p}$$

I_p Momento d'inerzia polare.

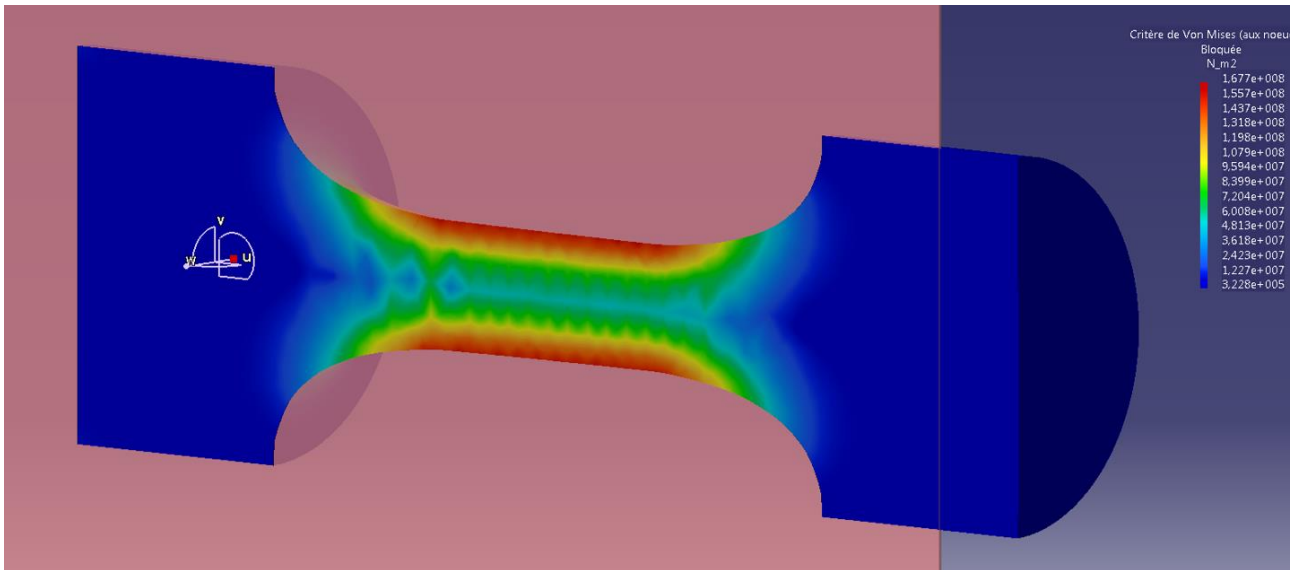
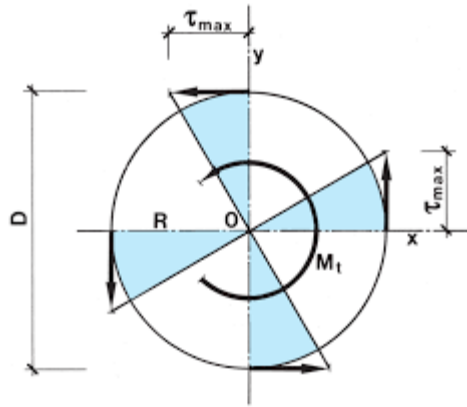


Tabella 6.7-1 L'analisi FEM ci mostra il campo tensionale all'interno del provino

Un metodo che prevede la discretizzazione della tensione in N valori, tra 0 e il livello massimo τ_{max} raggiunto, ci permetterà di tracciare la caratteristica intrinseca $\left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{intr} = f(\tau)$ in funzione di τ_{max} misurata.

Nell'analisi seguente considereremo $\frac{\Delta W}{W} = f(\tau_{max}) = \left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{glo}$:

1. Si può considerare per il primo livello, a un basso livello di tensione, $\frac{\Delta W}{W} = f(\tau_1) = \left(\frac{\Delta W}{W}\right)_{glo}$

con $\tau_1 = \tau_{max}$.

$$\frac{V_0}{V_0} \cdot \frac{\Delta W_{\tau_1}}{W_{\tau_1}} = \left(\frac{\Delta W_{\tau_{max}=\tau_1}}{W_{\tau_{max}=\tau_1}}\right)_{glo} \cdot \frac{V_0}{V_0}$$

E

$$V_0 \cdot \Delta W_{\tau_1} = V_0 \cdot \Delta W_{\tau_{max}=\tau_1}$$

$$V_0 = V_{act} = \pi r^2 L_{act}$$

2. Per il livello di sollecitazione τ_2

$$\frac{\Delta W_{\tau_1} \cdot V_1 + \Delta W_{\tau_2} \cdot V_2}{W_{\tau_1} \cdot V_1 + W_{\tau_2} \cdot V_2} = \left(\frac{\Delta W_{\tau_{max}=\tau_2}}{W_{\tau_{max}=\tau_2}}\right)_{glo} \cdot \frac{V_0}{V_0}$$

Et

$$\Delta W_{\tau_1} \cdot V_1 + \Delta W_{\tau_2} \cdot V_2 = V_0 \cdot \Delta W_{\tau_{max}=\tau_2}$$

$$V_0 = V_1 + V_2 = \pi \left(\frac{r}{2}\right)^2 L_{act} + \pi \left[r^2 - \left(\frac{r}{2}\right)^2\right] L_{act}$$

Nella seconda espressione : ΔW_{τ_1} è determinato allo step precedente e $\Delta W_{\tau_{max}=\tau_2}$ attraverso i dati misurati, si deduce $\Delta W_{\tau_2} \cdot V_2$.

Nella prima espressione resta sconosciuto solamente il valore $W_{\tau_2} \cdot V_2$, una volta calcolato si ottiene

$$\frac{\Delta W}{W} = f(\tau_2).$$

Il metodo si ripete fino al livello di tensione τ_n

$$\frac{\Delta W_{\tau_1} \cdot V_1 + \Delta W_{\tau_2} \cdot V_2 + \dots + \Delta W_{\tau_n} V_n}{W_{\tau_1} \cdot V_1 + W_{\tau_2} \cdot V_2 + \dots + W_{\tau_n} V_n} = \left(\frac{\Delta W_{\tau_{max}=\tau_n}}{W_{\tau_{max}=\tau_n}}\right)_{glo} \cdot \frac{V_0}{V_0}$$

$$V_0 = V_1 + V_2 + \dots + V_n .$$

Abbiamo applicato il metodo iterativo, sopra descritto, con i dati della curva 7.2-1.

Sono stati definiti N=10 livelli di sollecitazione $\tau_1 = 10MPa, \dots, \tau_{10} = 110MPa$.

Il grafico seguente illustra i risultati ottenuti su Excel :

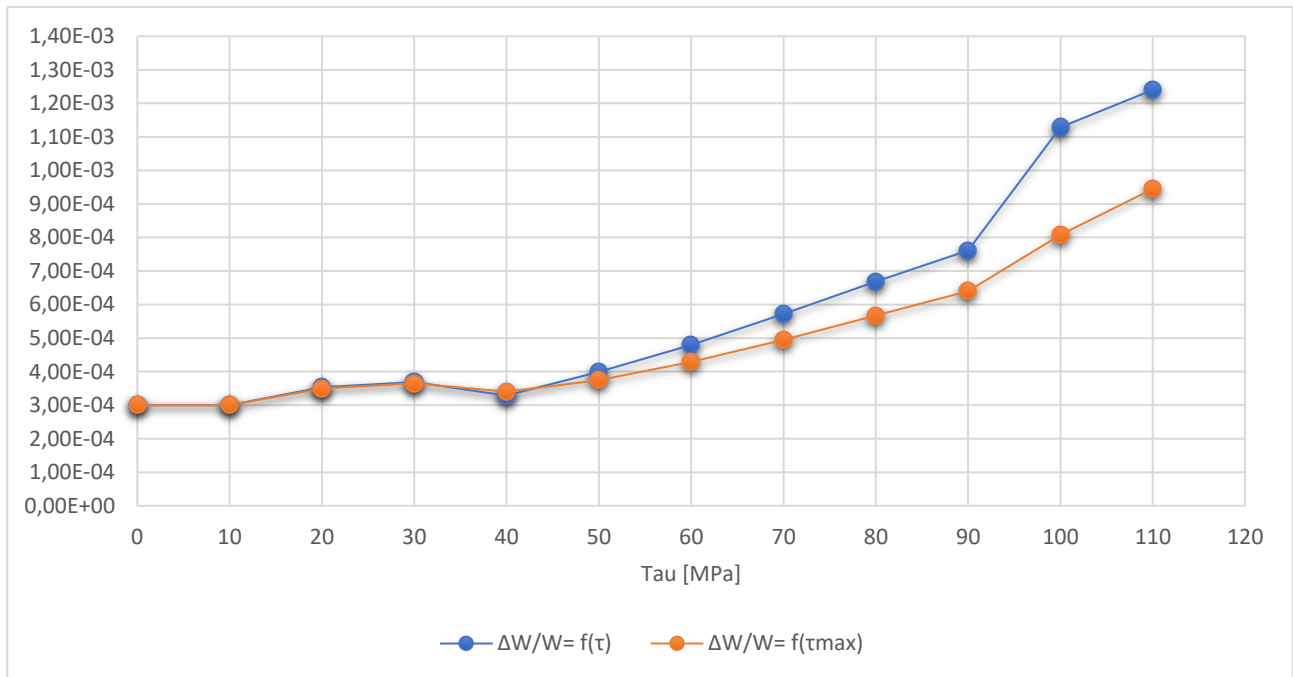


Figure 6.7-1 Paragone tra la caratteristica intrinseca (in blu) e la caratteristica globale (in arancione) ;

Si può notare che per bassi livelli di stress, nella zona dove la caratteristica $\Delta W/W$ si mantiene costante, le due curve coincidono.

Ciononostante, a partire da $\tau = 40 \text{ MPa}$, la curva intrinseca $\frac{\Delta W}{W} = f(\tau) > \frac{\Delta W}{W} = f(\tau_{max})$.

Questo approccio permette di tener conto della reale distribuzione della tensione su una sezione circolare sottoposta a semplice torsione.

Sarà necessario sviluppare un algoritmo sul software Matlab per ottenere direttamente la curva $\frac{\Delta W}{W} = f(\tau)$ a partire dai dati in uscita.

Un'ulteriore soluzione potrebbe essere produrre dei provini forati in cui la tensione si sviluppi tra un diametro esterno di 10 mm e uno interno di 8mm, in questo caso si può ipotizzare che la tensione tangenziale sia pressoché uniforme sulla corona circolare risultante.

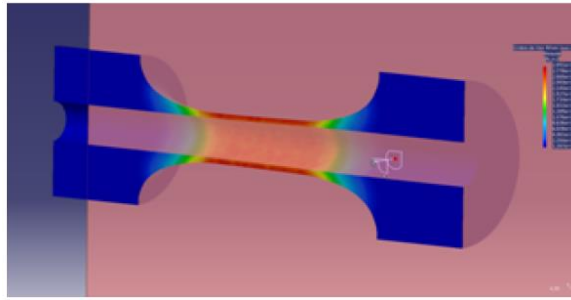


Figure 6.7-2 campo tensionale su un provino forato

Il principale problema consisterà nell'assicurarsi, durante la fabbricazione dei provini, che il diametro esterno ed interno siano coassiali tra loro e allo stesso modo anche lo stato superficiale del cilindro interno. Le lavorazioni a freddo tra il raggio esterno ed interno potrebbero portare ad un notevole incrudimento del materiale, per cui si potrebbe produrre il foro per elettroerosione, per eliminare questa problematica.

Essendo l'ordine di grandezza delle quantità misurate relativamente piccolo, questi fattori potrebbero influire notevolmente sulla caratteristica DW/W .

6.8 CURVA $\Delta T = f(\text{posizione})$

Le immagini termiche registrate durante il caricamento a torsione ciclica sono state convertite in matrici sul software Matlab, come spiegato nel capitolo 6.4, e post-elaborate.

Si ricorda che:

$$\Delta T = \frac{qL^2}{2\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right)$$

La variazione di temperatura dovuta a fonti di calore q descrive teoricamente una parabola.

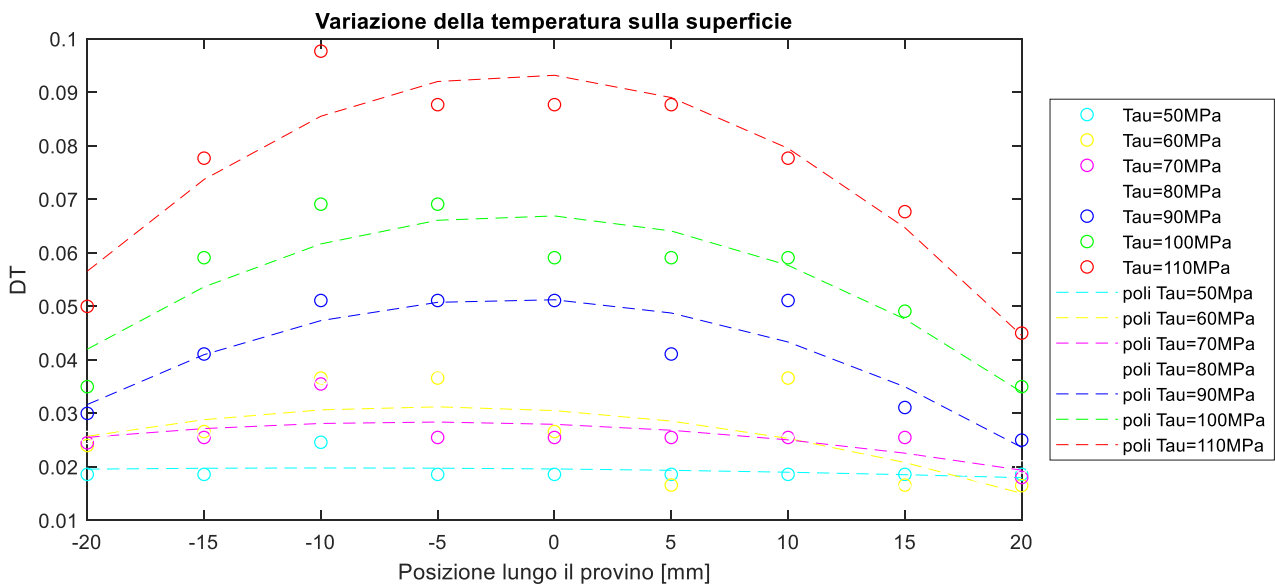


Figure 6.8-1 Variazione della temperatura sulla superficie in funzione della posizione sul provino

Il grafico descrive la variazione di temperatura in superficie in funzione della lunghezza del campione durante il caricamento fino a 110MPa. Questa è la prova che ha dato la curva $\frac{\Delta W}{W}$ (7.2-1).

Sotto i 50MPa non abbiamo rilevato alcuna variazione di temperatura.

Abbiamo finalmente trovato l'evoluzione teorica parabolica con il massimo quasi al centro del campione, con $\Delta T_{max}(\tau = 110MPa) = 0,0977 \text{ } ^\circ C$.

Come ulteriore verifica dell'evoluzione parabolica della temperatura lungo la superficie, le stesse misure erano state condotte attraverso 4 termocoppie posizionate sulla lunghezza attiva di un provino caricato fino a 150Mpa.

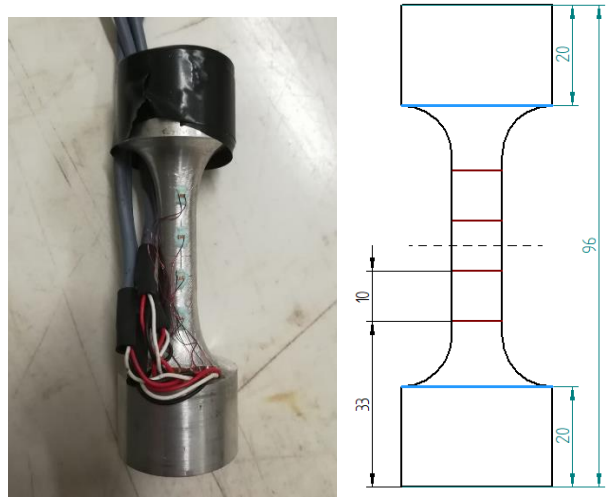


Figure 6.8-2 Termocoppie sul provino testato

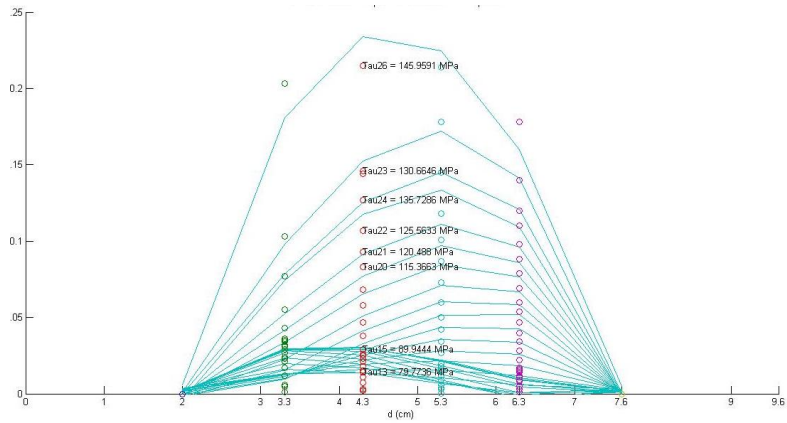


Figure 6.8-3 Evoluzione della variazione di temperatura superficiale su un provino tramite termocoppie

Si può dire che il modello teorico presentato nel capitolo 5.1 è stato confermato sia dalle misure tramite termografia infrarossi sia tramite termocoppie.

Nel grafico seguente viene introdotta l'incertezza di misura relativa alla sensibilità della termocamera a infrarossi.

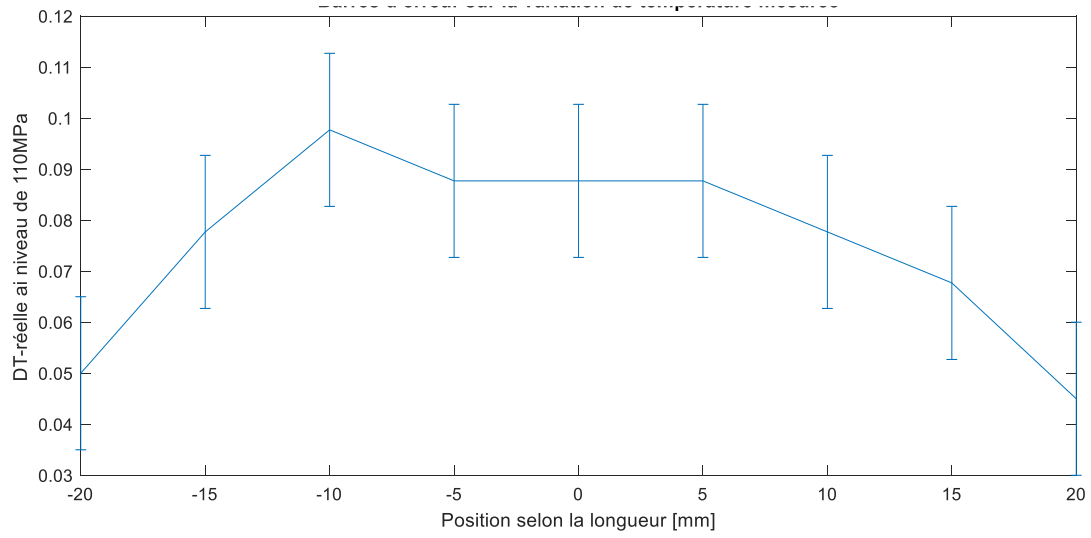


Figure 6.8-4 Barre d'erreur sulla variazione di temperatura misurata

Il valore di incertezza è stimato a 0,015°C.

6.9 CURVA $\Delta T = f(\tau_{max})$

Il capitolo 3.4 presenta il metodo di Risitano, in base al quale viene disegnato il diagramma $\Delta T_{stabilizzata} = f(tensione)$. La figura 3.4-3 mostra che la variazione di temperatura si stabilizza abbastanza rapidamente, quindi possiamo assumere che ciò che misuriamo in ogni blocco sia $\Delta T_{stabilizzata}$.

Secondo il metodo Risitano, la curva si ottiene prendendo il punto con la massima variazione di temperatura sulla superficie del campione.

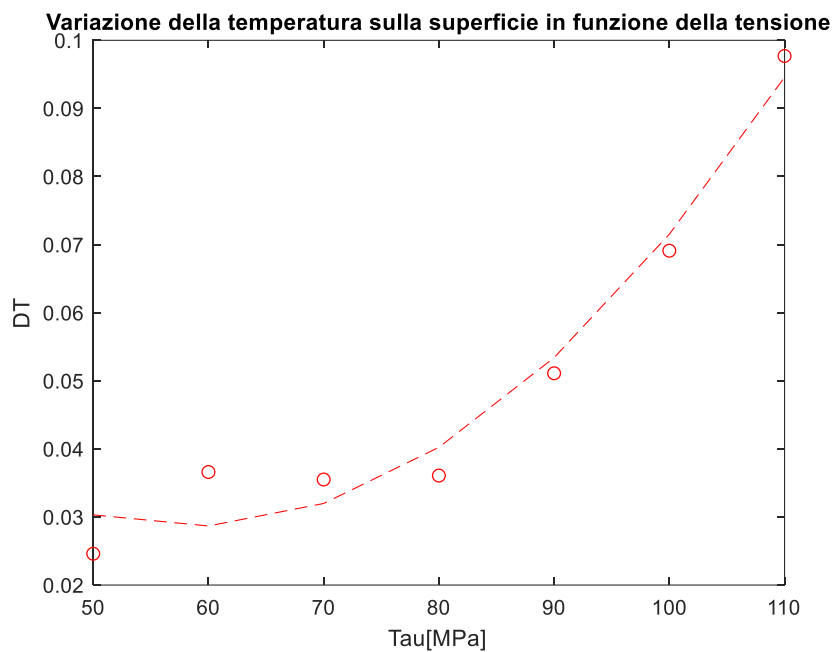


Figure 6.9-1 Temperatura in superficie in funzione del livello di tensione

6.10 CONFRONTO TRA LE CURVE $E_{meccanica} = f(\tau_{max})$ ET $E_{termica} = f(\tau_{max})$

On reprend les relations du chapitre 6.2 :

$$\Delta U = E_{meccanica} - E_{termica} \quad 6.2.1$$

$$E_{meccanica} = \Delta W \cdot f \quad 6.2.2$$

$$E_{termica} = q \cdot V_{act} \quad 6.2.3$$

$$E_{termica} = \frac{2\lambda\Delta T_{max}}{L^2} \cdot V_{act} \quad 6.2.4$$

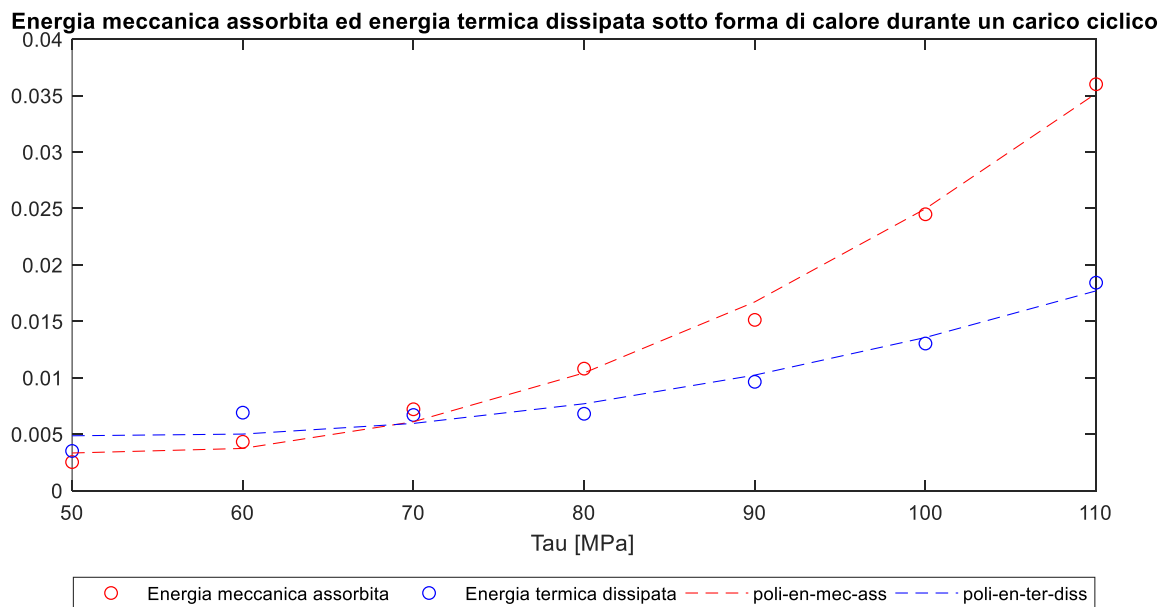


Figure 6.10-1 Energia meccanica assorbita ed energia termica dissipata in funzione del carico ciclo in torsione

6.11 CURVA $\Delta U = f(\tau)$

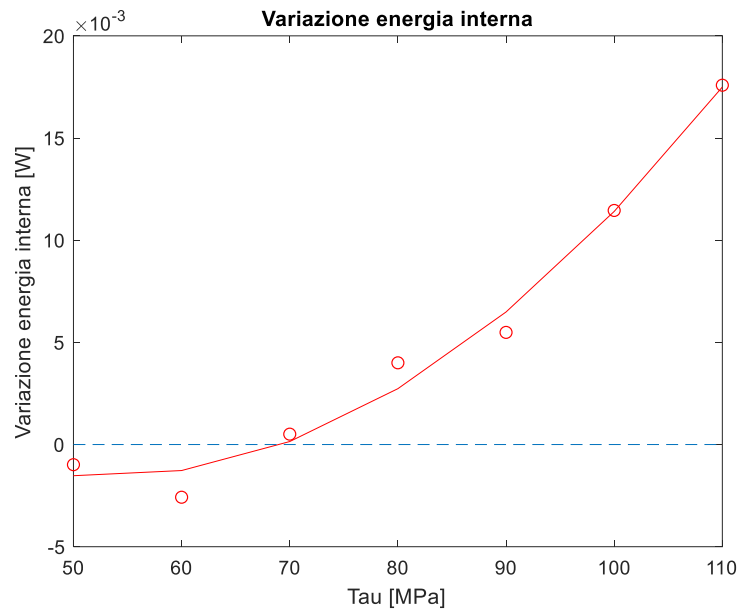


Figure 6.11-1 Variazione dell'energia interna durante un carico ciclico in torsione

Il grafico precedente è il frutto di cinque mesi di lavoro, qui possiamo vedere la variazione di energia interna del materiale in funzione della tensione crescente. Si nota una duplice evoluzione, una fase in cui si mantiene pressoché nulla, tenendo conto dell'incertezza sugli strumenti di misura, e una seconda fase in cui cresce repentinamente.

Il valore di tensione in cui si ha il cambiamento dell'andamento della curva è stimato a 70Mpa, valore non lontano dal limite a fatica trovato con il metodo Staircase (vedi appendice I).

7 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

7.1 CONCLUSIONI

In questo elaborato si è voluto investigare l'aspetto energetico del fenomeno fisico della fatica ad alto numero di cicli. Anche se a livello macroscopico si lavora nel dominio elastico del materiale, al di sotto della tensione di snervamento, a livello microscopico si ha la plastificazione in alcune zone del materiale. Numerosi autori hanno ipotizzato la presenza di un'energia di plastificazione del materiale correlata all'aumento di temperatura sulla superficie del provino testato ciclicamente. Nessuna di queste metodologie, però, si basa su un bilancio energetico.

Il nostro lavoro prende in considerazione l'energia meccanica iniettata e l'energia termica dissipata sotto forma di calore, la cui differenza dona l'energia interna non restituita. Secondo il primo principio della termodinamica infatti:

$$\Delta U = \Delta W - \Delta Q \geq 0$$

Il progetto si è sviluppato in più fasi, la ricerca bibliografica ha permesso di contestualizzare il lavoro negli ambiti della fatica, interpretato come fenomeno microstrutturale e al tempo stesso energetico, e della termografia a infrarossi, che ci ha dato gli strumenti per ricavare l'energia termica a partire dal campo di temperatura sulla superficie del provino.

La misura dell'energia meccanica si è compiuta grazie alla macchina in risonanza presente presso i laboratori I2M, per quanto riguarda l'energia termica è stato, invece, necessario sviluppare un modello teorico che permettesse di ottenere l'energia termica a partire dalla temperatura superficiale sul provino testato e poi verificarlo sperimentalmente.

Il post-processamento dei dati meccanici e termici ha richiesto il trasferimento dei dati Scilab e Altair in file matlab per poter essere trattati sullo stesso software e poi confrontati ed analizzati.

Al termine di questa analisi, riveliamo poi il limite di resistenza come soglia per la comparsa di una variazione dell'energia interna del materiale.

Di notevole interesse sarebbe stato correlare i risultati ottenuti sulla variazione d'energia interna con delle osservazioni microstrutturali del materiale, per dimostrare come il limite di resistenza possa rappresentare la frontiera tra due comportamenti differenti.

La fatica è un fenomeno dipendente da molteplici fattori, come lo stato superficiale e i trattamenti superficiali del materiale, l'ambiente esterno e la temperatura. Una campagna di test su provini in condizioni differenti potrebbe mostrare se la variazione di energia interna dipende da questi fattori o meno.

Le difficoltà riscontrate nei 5 mesi di lavoro hanno riguardato principalmente l'aspetto sperimentale dello stage, l'approvvigionamento del materiale per i provini, l'utilizzo della macchina di prova, i fattori esterni che influiscono sulle grandezze misurate e l'elaborazione di dati caratterizzati da una propria incertezza.

7.3 SVILUPPI FUTURI

Le curve del capitolo 7 mostrano chiaramente un cambiamento nel comportamento del materiale durante il carico ciclico, che è spiegato dai cambiamenti microstrutturali del materiale.

Sarà interessante indagare questo fenomeno e confermarlo con osservazioni della microstruttura.

Per confermare queste considerazioni, viene proposta una campagna di test con osservazioni di superficie che utilizza la microscopia elettronica a scansione per rilevare la comparsa di bande di scorrimento permanenti.

L'approccio sperimentale di queste prove è specificato sopra:

La superficie da osservare al SEM è limitata dalla lavorazione di una superficie piana (fig 8.2-1), ci concentriamo su questa piccola area.

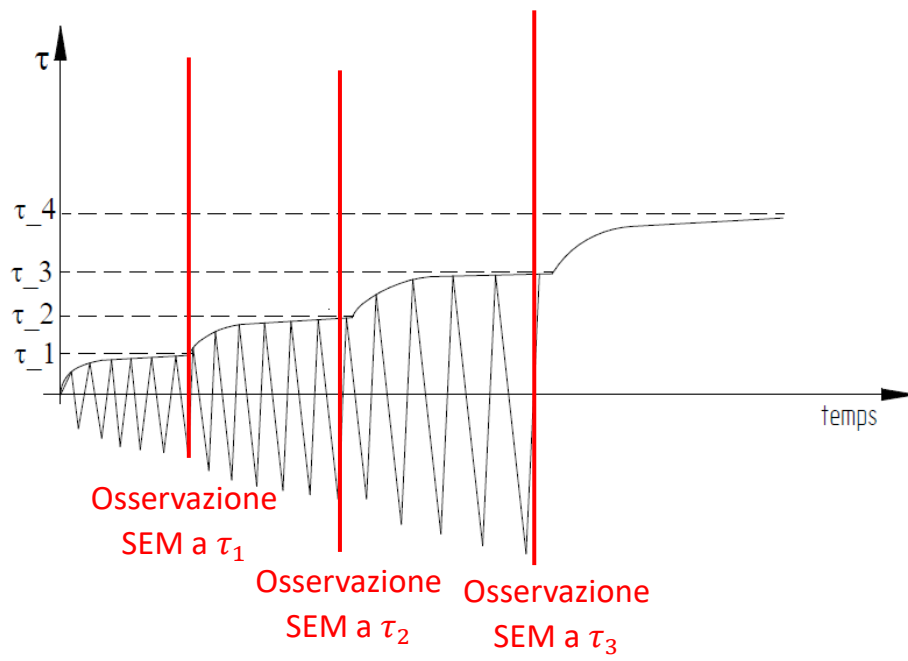
La fase di lucidatura dell'area comprende:

Vengono condotte prove di manipolazione ad ampiezza costante; dopo ogni carico, la superficie viene osservata al SEM per verificare l'aspetto dei nastri di scorrimento, a partire dal livello $\tau = 40 \text{ MPa}$ fino a $\tau = 110 \text{ MPa}$.

Per i livelli bisogna stabilire il tempo di prova in cicli o secondi.

1. L'osservazione del campione non ancora caricato al SEM fornirà le immagini di riferimento.
2. Montare con cura il provino sulla macchina, facendo attenzione a non toccare l'area lucidata.
3. Avviare la prova di blocco e attendere fino a quando il livello di sollecitazione da raggiungere, quando l'incremento di coppia deve essere impostato a zero per condurre la prova ad ampiezza costante.
4. Fermare il test e smontare il campione per osservarlo al SEM.
5. Dopo l'osservazione SEM, passare al livello successivo di stress.

Schema del test:



Faire un méplat sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'une fraise de 5 mm de rayon

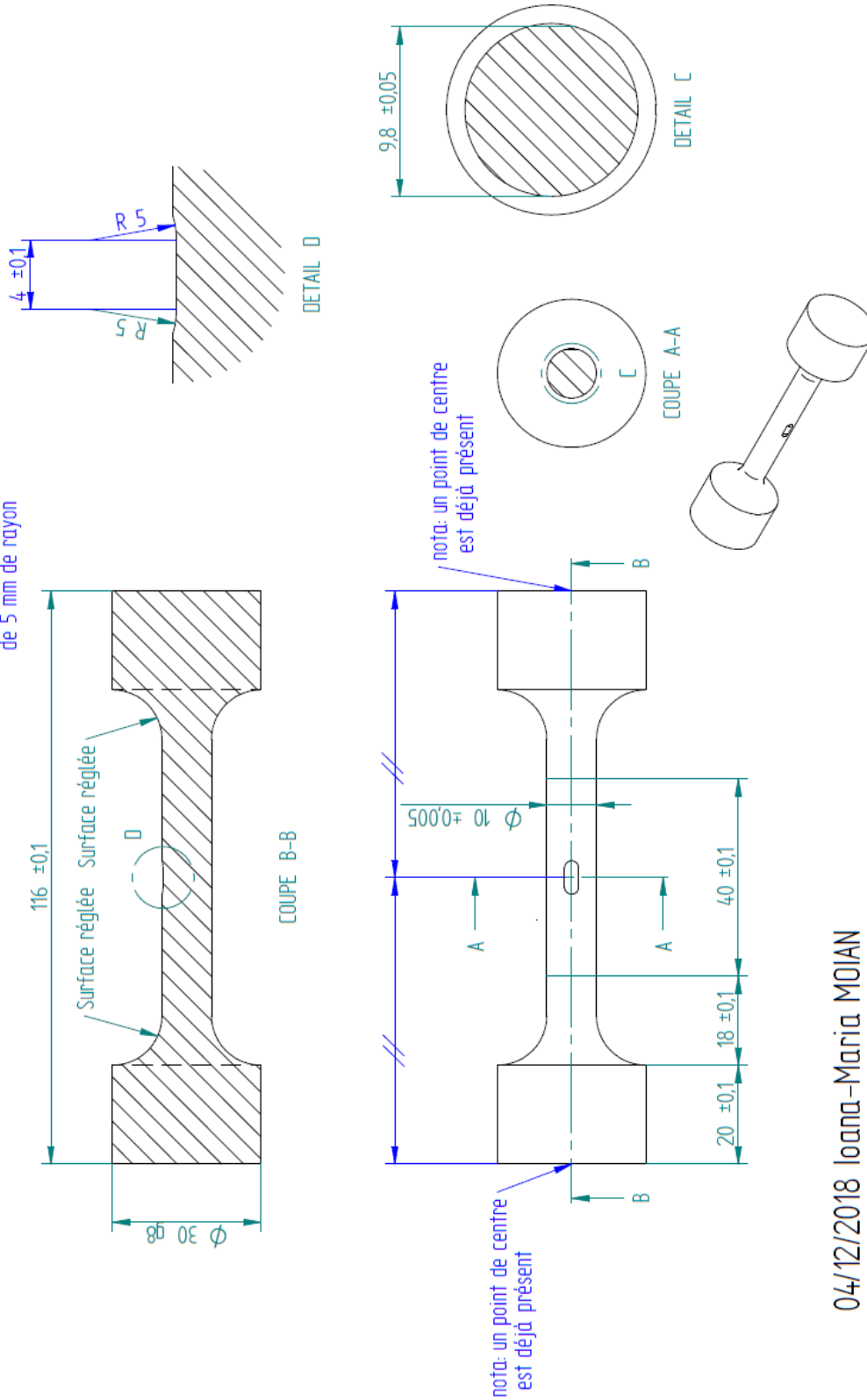


Figure 7.3-1 Piano piatto su un campione di lunghezza attiva $L_{ACT}=40\text{mm}$ e raggio $r=10\text{mm}$.

8 APPENDICI

8.1 APPENDICE I

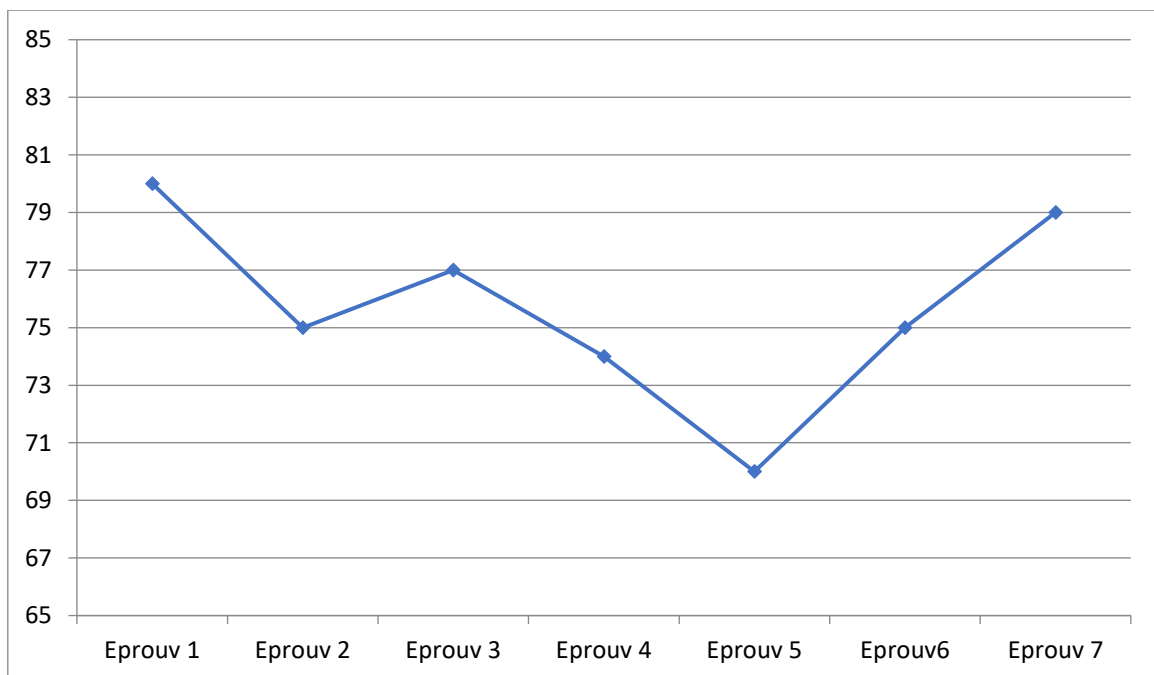
Prima di procedere con la determinazione del limite a fatica tramite la nuova metodologia presentata, abbiamo applicato il metodo StairCase.

La tabella mostra l'evoluzione della resistenza a fatica durante attraverso il metodo Staircase.

80 MPa	75 MPa	77 MPa	74 MPa	70 MPa	75 MPa	79 MPa
$2 \cdot 10^6$	N.R.	$4.6 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^6$	N.R.	N.R.	$2 \cdot 10^6$

Tabella 8.1-1

Questo metodo dona una resistenza meccanica all'incirca di 75Mpa.



8.2 APPENDICE II

La serie FLIR SC7000 è disponibile con un'ampia gamma di rivelatori per qualsiasi applicazione nell'analisi singola e multispettrale. Il ricercatore può scegliere tra i rivelatori di antimonio dell'indio a onde medie (InSb) e di tellururo di mercurio e tellururo di cadmio (MCT).

Sono disponibili anche rilevatori MCT operanti nella banda a onde lunghe.

FLIR SC7000 è dotata di una ruota filtro rimovibile e motorizzata a 4 posizioni, questo permette imaging di eventi in una parte selezionata dello spettro elettromagnetico.

Le finestre consentono di leggere selettivamente un sottoinsieme dell'immagine totale con dimensioni della finestra regolabili dall'utente ad un frame rate molto più elevato. Le dimensioni e le posizioni delle finestre del sottocampione possono essere scelte arbitrariamente e sono facilmente definibili tramite il software di controllo della telecamera. A seconda del modello e del rivelatore, la serie FLIR SC7000 è in grado di fornire immagini termiche fino a una velocità di 62.000 Hz.

Il tempo di integrazione è regolabile in incrementi di nanosecondi. L'attivazione esterna intelligente consente di sincronizzare l'acquisizione dell'immagine agli eventi più fugaci.

La serie FLIR SC7000 si integra perfettamente con il software FLIR Altair che consente la visualizzazione intuitiva, la registrazione e l'elaborazione avanzata dei dati termici fornito dalla telecamera.



Le caratteristiche tecniche sono specificate nell'estratto del catalogo del rivenditore.

Imaging Specifications

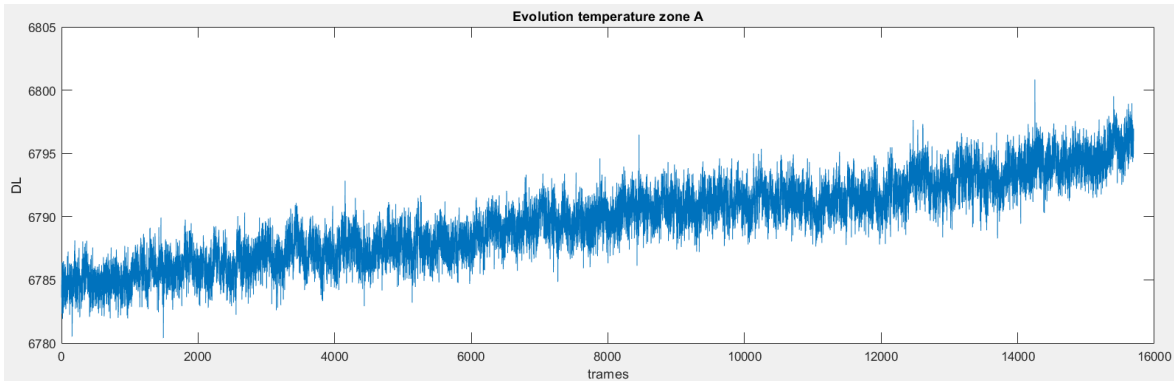
System Overview	SC7210-7500 / SC7300	SC7300L / SC7900VL	SC7600-7650 / SC7700	SC7750L / SC7790VL
Waveband	MW	LW	MW	LW
Sensor type	InSb / MCT	MCT	InSb / MCT	MCT
Pixel Resolution	320x256	320x256	640x512	640x512
Pixel Pitch	30µm	30µm	15µm	16µm
Spectral ranges	1.5 - 5.1 µm for InSb (BB) 3.7 - 4.8 µm for MCT	7.7 - 9.3 µm for SC7300L 7.7 - 11.5 µm for SC7900VL	1.5 - 5.1 µm	8.0 - 9.4 µm for the SC7750L 8.0-11.5 µm for the SC7790VL
Measurement				
NETD	<20mK for InSb / <25mK for MCT	<20mK / <25mK	<20mK / <25mK	<30mK / <37mK
Standard Camera Calibration Range	5°C to 300°C for InSb 5°C to 150°C for MCT	5°C to 150°C	5°C to 300°C for InSb 5°C to 150°C for MCT	5°C to 80°C
Optional Camera Calibration Range	-20°C to 300°C / -20°C to 150°C 5°C to 1500°C / 5°C to 500°C up to 2500°C / up to 1500°C up to 3000°C (for InSb only)	-20°C to 150°C 5°C to 150°C up to 1500°C	-20°C to 300°C / -20°C to 150°C 5°C to 1500°C / 5°C to 150°C up to 2500°C / up to 1500°C up to 3000°C for SC7700 -20°C to 250°C / 5°C to 150°C up to 1500°C	-20°C to 80°C 5°C to 80°C 80°C to 300°C 300°C to 1100°C
Digital Full Frame rate	InSb: 190 Hz - 380 Hz full frame up to 3 kHz - 39.8 kHz with windowing MCT: 230 Hz full frame up to 25 kHz with windowing	230 Hz full frame up to 23 kHz with windowing	InSb: 100 Hz full frame up to 3.425 kHz with windowing MCT: 115Hz Full Frame up 3.0 kHz with windowing	115 Hz full frame up to 62 kHz with windowing
Interfaces				
Digital Data Output	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link
Command & Control	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link	GigE, Camera Link
FPA Windowing	Arbitrary Size and Location (fixed for SC7210)	Arbitrary Size and Location	Arbitrary Size and Location	Arbitrary Size and Location
f/#	f/3.0 for InSb and f/2.0 for MCT	f/2.0	SC7600 f/3.0 SC7650 f/2.5 SC7700 f/3.0	f/2.0
Filter Options	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters. No Filter with the SC7650E (DACH only)	Fixed motorised 4 Position Filter Wheel. Field replaceable Filters
Optics				
Available optics	12mm - 44°x 36° (not available in SWB) 25mm - 22°x 17° 27mm - 20°x 16° in SWB 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm (n.a. in SWB) Close up x3 - 3.2x2.6mm (n.a. in SWB) Close up x1 - 9.6x7.7mm WD 300mm (n.a. in SWB)	12mm - 44°x 36° 25mm - 22°x 17° 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm Close up x3 - 3.2x2.6mm	12mm - 44°x 36° (n.a. in SWB) 25mm - 22°x 17° 27mm - 20°x 16° in SWB 50mm - 11°x 8.8° 100mm - 5.5°x 4.4° 200mm - 2.75°x 2.2° Close up x1 - 9.6x7.7mm (n.a. in SWB) Close up x3 - 3.2x2.6mm (n.a. in SWB) Close up x1 - 9.6x7.7mm WD 300mm (n.a. in SWB)	25mm - 23.6°x 18.1° 50mm - 11.7°x 9.4° 100mm - 5.9°x 4.7°

Imaging performance	
Dynamic Range	14 bit, 16 bit with TRE
Camera Temp Calibration	Yes
Ambient Drift Compensation	Yes
Temp. Measurement Accuracy	+/-1% or +/-1°C
HypercalTM / CNUC™ Functionality	Yes
Interfaces	
Analog Input	Yes
Analog Video	Composite or S-Video

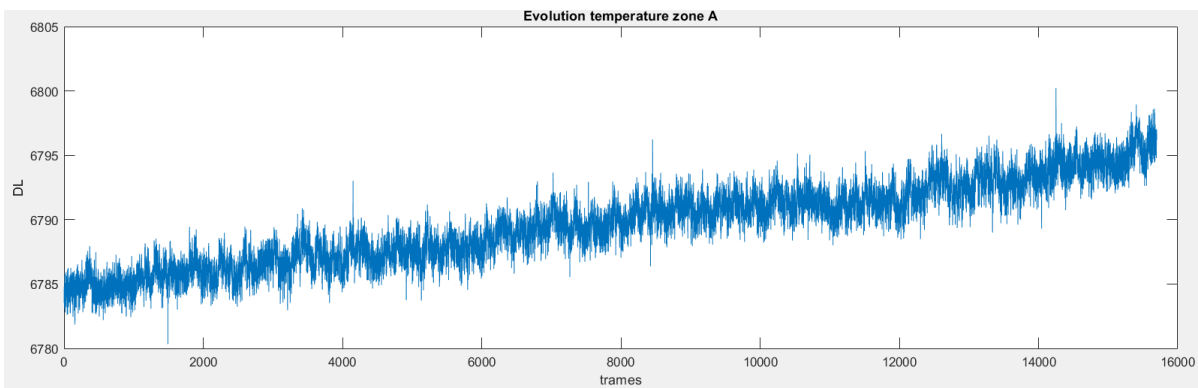
8.3 APPENDICE III

Abbiamo studiato la dimensione ottimale dell'area su cui mediare la temperatura minimizzando il rumore sulle misure. Un'area di 20x4 pixel ci è sembrata la scelta più ragionevole.

Zona di 4x4 pixels

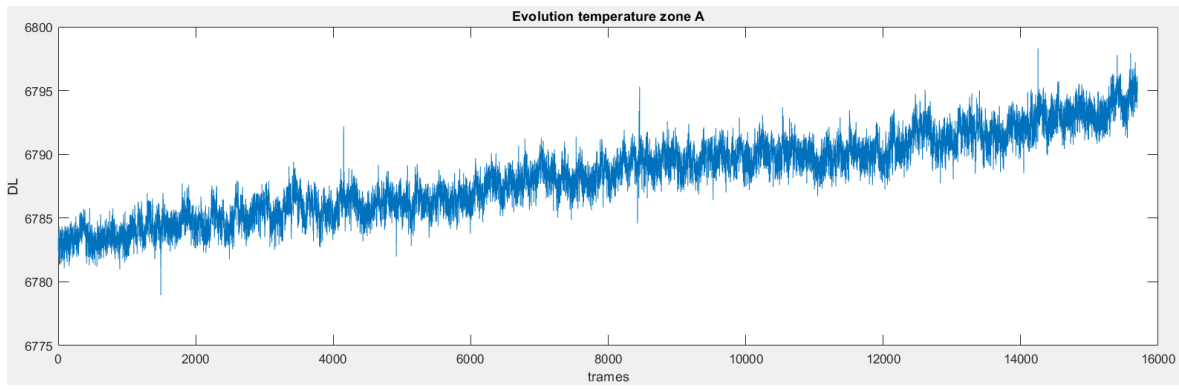


Zona di 10x4 pixels

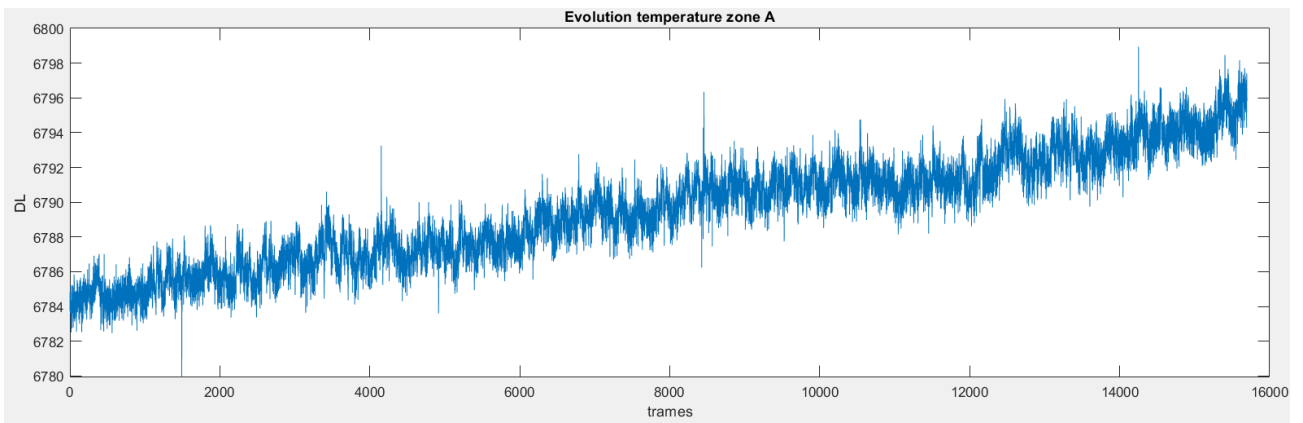


Zona di 20x4 pixels





Zona di 34x4 pixels



8.4 APPENDICE IV

A seguire viene presentato lo Script Matlab sviluppato per il post-trattamento dei dati termici.

```
<< close all
clear all
clc

load('20190220_ep15_25Hz_sous_ech_1sur4_moy1_essai10h00_export',
'T')

%% DONNEES

%Définition dimensions matrice T
[mm,nn,o]=size(T);
t=1:o;

%Definition sousmatrices/zones de T
n_zones=9;
m=(mm)/(n_zones+1);
n=(nn)/2;

%Definition demi-hauteur zones
r=2;

%Definition demi-largeur zones
s=10;

%Contraintes mesurées Tau=[Tau_1(notée à t_1),Tau_2(notée à t_2),
ecc..]
Tau=[20,30,40,50,60,70,80,90,100,110]';

%Temps notation contraintes
t_t_reference=1;

t_1=300;
t_2=520;
t_3=750;
t_4=990;
```

```

t_5=1150;
t_6=1570;
t_7=1800;
t_8=2000;
t_9=2222;
t_10=2300;

%Variation température ambiente
frequence_aquisition=25;
taux_crois=0.0247;
%% TEMPERATURE MOYENNE SUR 9 ZONES à LONGUEUR DIFFERANTE

%Definition soumatrices 3D
zone_A=T((m-r):(m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_B=T((2*m-r):(2*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_C=T((3*m-r):(3*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_D=T((4*m-r):(4*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_E=T((5*m-r):(5*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_F=T((6*m-r):(6*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_G=T((7*m-r):(7*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_H=T((8*m-r):(8*m+r),(n-s):(n+s),:);
zone_I=T((9*m-r):(9*m+r),(n-s):(n+s),:);

%Température moyenne dans chaque zone
M1_zone_A=mean(mean(zone_A,1),2);
M1_zone_B=mean(mean(zone_B,1),2);
M1_zone_C=mean(mean(zone_C,1),2);
M1_zone_D=mean(mean(zone_D,1),2);
M1_zone_E=mean(mean(zone_E,1),2);
M1_zone_F=mean(mean(zone_F,1),2);
M1_zone_G=mean(mean(zone_G,1),2);
M1_zone_H=mean(mean(zone_H,1),2);
M1_zone_I=mean(mean(zone_I,1),2);

%Vecteur avec les données moyenne

```

```

M2_zone_A=reshape(M1_zone_A,[o,1]);
M2_zone_B=reshape(M1_zone_B,[o,1]);
M2_zone_C=reshape(M1_zone_C,[o,1]);
M2_zone_D=reshape(M1_zone_D,[o,1]);
M2_zone_E=reshape(M1_zone_E,[o,1]);
M2_zone_F=reshape(M1_zone_F,[o,1]);
M2_zone_G=reshape(M1_zone_G,[o,1]);
M2_zone_H=reshape(M1_zone_H,[o,1]);
M2_zone_I=reshape(M1_zone_I,[o,1]);

```

```

%Translation sautes

```

```

DD=zeros(5512,1);
EE=10*ones(13117-5512,1);
FF=20*ones(22598-13117,1);
GG=30*ones(34079-22598,1);
HH=40*ones(50435-34079,1);
II=50*ones(o-50435,1);

```

```

M_zone_A=(M2_zone_A+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_B=(M2_zone_B+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_C=(M2_zone_C+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_D=(M2_zone_D+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_E=(M2_zone_E+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_F=(M2_zone_F+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);
M_zone_G=(M2_zone_G+cat(1,DD,EE,FF,GG,HH,II))*0.0065)-
24.0965*ones(o,1);

```

```

M_zone_H=( (M2_zone_H+cat (1,DD,EE,FF,GG,HH,II) ) *0.0065) -
24.0965*ones (o,1) ;
M_zone_I=( (M2_zone_I+cat (1,DD,EE,FF,GG,HH,II) ) *0.0065) -
24.0965*ones (o,1) ;

%plot(M_zone_A) ;

%legend('M_zone_A','M_zone_B','M_zone_C','M_zone_D','M_zone_E','M_
zone_F','M_zone_G','M_zone_H','M_zone_I') ;

%% MOYENNAGE SUR LE TEMPS
%Ameliorer le signal
%k=0;
%MM_zone_A=[];
%z=25;
%i=fix(o/z);
%while k<i

    % v=mean(M_zone_A((1+k*z):(z+k*z),1));
    % MM_zone_A=cat(1,MM_zone_A,v*ones(z,1));
    % k=k+1;
%end

%% TEMPERATURE EN FONCTION DE LA POSITION
x=[m,2*m,3*m,4*m,5*m,6*m,7*m,8*m,9*m];

%Temps mesure amplitude contrainte de torsion
%A chaque instant est lie une valeur d'amplitude de contrainte pris
a main
%pendant l'essai

```



```

Evol_temp_t_reference=[M_zone_A(t_t_reference),M_zone_B(t_t_refere
nce),M_zone_C(t_t_reference),M_zone_D(t_t_reference),M_zone_E(t_t_
reference),M_zone_F(t_t_reference),M_zone_G(t_t_reference),M_zone_
H(t_t_reference),M_zone_I(t_t_reference)];
Evol_temp_t_1=[M_zone_A(t_1),M_zone_B(t_1),M_zone_C(t_1),M_zone_D(
t_1),M_zone_E(t_1),M_zone_F(t_1),M_zone_G(t_1),M_zone_H(t_1),M_zon
e_I(t_1)];
Evol_temp_t_2=[M_zone_A(t_2),M_zone_B(t_2),M_zone_C(t_2),M_zone_D(
t_2),M_zone_E(t_2),M_zone_F(t_2),M_zone_G(t_2),M_zone_H(t_2),M_zon
e_I(t_2)];
Evol_temp_t_3=[M_zone_A(t_3),M_zone_B(t_3),M_zone_C(t_3),M_zone_D(
t_3),M_zone_E(t_3),M_zone_F(t_3),M_zone_G(t_3),M_zone_H(t_3),M_zon
e_I(t_3)];
Evol_temp_t_4=[M_zone_A(t_4),M_zone_B(t_4),M_zone_C(t_4),M_zone_D(
t_4),M_zone_E(t_4),M_zone_F(t_4),M_zone_G(t_4),M_zone_H(t_4),M_zon
e_I(t_4)];
Evol_temp_t_5=[M_zone_A(t_5),M_zone_B(t_5),M_zone_C(t_5),M_zone_D(
t_5),M_zone_E(t_5),M_zone_F(t_5),M_zone_G(t_5),M_zone_H(t_5),M_zon
e_I(t_5)];
Evol_temp_t_6=[M_zone_A(t_6),M_zone_B(t_6),M_zone_C(t_6),M_zone_D(
t_6),M_zone_E(t_6),M_zone_F(t_6),M_zone_G(t_6),M_zone_H(t_6),M_zon
e_I(t_6)];
Evol_temp_t_7=[M_zone_A(t_7),M_zone_B(t_7),M_zone_C(t_7),M_zone_D(
t_7),M_zone_E(t_7),M_zone_F(t_7),M_zone_G(t_7),M_zone_H(t_7),M_zon
e_I(t_7)];
Evol_temp_t_8=[M_zone_A(t_8),M_zone_B(t_8),M_zone_C(t_8),M_zone_D(
t_8),M_zone_E(t_8),M_zone_F(t_8),M_zone_G(t_8),M_zone_H(t_8),M_zon
e_I(t_8)];
Evol_temp_t_9=[M_zone_A(t_9),M_zone_B(t_9),M_zone_C(t_9),M_zone_D(
t_9),M_zone_E(t_9),M_zone_F(t_9),M_zone_G(t_9),M_zone_H(t_9),M_zon
e_I(t_9)];

```

```
Evol_temp_t_10=[M_zone_A(t_10),M_zone_B(t_10),M_zone_C(t_10),M_zon  
e_D(t_10),M_zone_E(t_10),M_zone_F(t_10),M_zone_G(t_10),M_zone_H(t_  
10),M_zone_I(t_10)];
```

```
%Variation temperature ambiante
```

```
Evol_temp_amb=[taux_crois*t_1,taux_crois*t_2,taux_crois*t_3,taux_c  
rois*t_4,taux_crois*t_5,taux_crois*t_6,taux_crois*t_7,taux_crois*t  
_8,taux_crois*t_9];
```

```
%Variation Temperature à la surface de l'éprouvette:
```

```
DT_t_1=(Evol_temp_t_1)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_1*ones(9,1);  
DT_t_2=(Evol_temp_t_2)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_2*ones(9,1);  
DT_t_3=(Evol_temp_t_3)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_3*ones(9,1);  
DT_t_4=(Evol_temp_t_4)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_4*ones(9,1);  
DT_t_5=(Evol_temp_t_5)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_5*ones(9,1);  
DT_t_6=(Evol_temp_t_6)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_6*ones(9,1);  
DT_t_7=(Evol_temp_t_7)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_7*ones(9,1);  
DT_t_8=(Evol_temp_t_8)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_8*ones(9,1);  
DT_t_9=(Evol_temp_t_9)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_9*ones(9,1);  
DT_t_10=(Evol_temp_t_10)'-(Evol_temp_t_reference) '-  
taux_crois*t_10*ones(9,1);
```

```
nombres_zones=(1:9)';
```

```

longueur=(1:9)';

pol1=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_1,2),longueur);
pol2=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_2,2),longueur);
pol3=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_3,2),longueur);
pol4=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_4,2),longueur);
pol5=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_5,2),longueur);
pol6=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_6,2),longueur);
pol7=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_7,2),longueur);
pol8=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_8,2),longueur);
pol9=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_9,2),longueur);
pol10=polyval(polyfit(nombres_zones,DT_t_10,2),longueur);

plot(longueur,pol1,longueur,pol2,longueur,pol3,longueur,pol4,longueur,pol5,
longueur,pol6,longueur,pol7,longueur,pol8,longueur,pol9,longueur,pol10);
plot(longueur,pol1,longueur,pol3,longueur,pol4,longueur,pol6,longueur,pol8,
longueur,pol9,longueur,pol10);

xlabel('Zones');
ylabel("Delta DL");
title('Variation Temperature/DL dans chaque zone en augmentant la
contrainte')

%% DEFINITION ZONE MAX VARIATION TEMPERATURE

pos_Max_DT=5;
%find(DT_t_10==max(DT_t_10))
%% COURBE VARIATION TEMPERATURE-TAU
DT_max=[DT_t_1(pos_Max_DT),DT_t_2(pos_Max_DT),DT_t_3(pos_Max_DT),D
T_t_4(pos_Max_DT),DT_t_5(pos_Max_DT),DT_t_6(pos_Max_DT),DT_t_7(pos
_Max_DT),DT_t_8(pos_Max_DT),DT_t_9(pos_Max_DT),DT_t_10(pos_Max_DT)
]';

```

```

plot(Tau,DT_max);

pol_tau=polyval(polyfit(Tau,DT_max,2),Tau);
plot(Tau,DT_max,'o',Tau,pol_tau);

%Barres incertitude
err = 0.015*ones(size(DT_max));
errorbar(Tau,DT_max,err);

plot(longueur,pol1,longueur,pol2,longueur,pol3,longueur,pol4,longueur,pol5,
longueur,pol6,longueur,pol7,longueur,pol8,longueur,pol9,longueur,pol10);

plot(Tau,DT_max,'o',Tau,pol_tau);
xlabel('Tau [MPa]');
ylabel('Température');
title('DT=f(Tau) ');

plot(M_zone_A);
plot(DT_t_1);
DT_t=[DT_t_1,DT_t_2,DT_t_3,DT_t_4,DT_t_5,DT_t_6,DT_t_7,DT_t_8,DT_t_9,DT_t_10];>>

```

A seguire viene presentato lo Script Matlab sviluppato per il post-trattamento dei dati meccanici.

```

%SCRIPT POUR RETRAITER LES DONNEES MECANIQUES

%Il faut récupérer e convertir les données .sce en .mat,
%le fichier matlab maintient le meme nom duquel scilab.
close all
clear all
clc

%% DONNEES

```

```

% Sensibilité couple[V/N.m]
sc=1;
% Sensibilité acceleration[V/m/s²]
sa=1;
% Module de cisaillement G [Pa]
G=26000000000;
%Rayon [m]
r=0.005;
%Longueur active [m]
L=0.04;
%Volume active [m³]
V_act=pi*r^2*L;
%Frequence [Hz]
f=72;
omega=2*pi*f;
%Raideur [N*m]
k_longueur_active=(pi/2)*(G*r*r*r*r)/L;

J=0.0022;
d_12=0.047;
k_frequence=((2*pi*f)^2)*J;

%% Raideur equivalente de la partie active et les raccordements
rec_Keq_racc=(0);
for i_racc=1:18;
    rec_Keq_racc=1/((pi*G*0.5*(r+i_racc*2e-
04)^4)/0.001)+rec_Keq_racc;
end
Keq_raccordamenti=1/rec_Keq_racc;

K_equivalente=(k_longueur_active*Keq_raccordamenti)/(Keq_raccordam
enti+2*k_longueur_active);

```

```

%% Une fois enregistré le fichier .mat dans le dossier de travail
on extract
%4 vecteurs: Phase, Temps, Couple, Acceleration.

load('TR_eprouv_006_09_01_2019_16h30.mat');

DATA=(TR_eprouv_006_09_01_2019_16h30);
k=0;
z=4;
[i,l]=size(DATA);

%Vecteur Phase
Phase=zeros(i/4,1);
while k<i/4

    v=DATA(k*z+1);    Phase(k+1,1)=v;
    k=k+1;
end

k=0;
%Vecteur Couple
C_12=zeros(i/4,1);
while k<i/4

    w=DATA(k*z+2);
    C_12(k+1,1)=w;
    k=k+1;
end

k=0;
%Vecteur Acc
Acc=zeros(i/4,1);
while k<i/4

```

```

    x=DATA(k*z+3);
    Acc(k+1,1)=x;
    k=k+1;
end

k=0;
%Vecteur Temps
Temps=zeros(i/4,1);
while k<i/4

    y=DATA(k*z+4);
    Temps(k+1,1)=y;
    k=k+1;
end

%% CALCUL DW/W=f(TAU)
%E: deltaW/W
%Tau: Contrainte

E=(2*pi*J*Acc*(1/sa)*1000)./(d_12*C_12);
Tau=(2*C_12*(1/sc))/(pi*(r^3));

figure(1)
plot(Tau,E);
title('DeltaW/W= f(Tau) dans l aluminium');
xlabel('Tau [MPa]');
ylabel('DW/(W*1000) ');

%% CALCUL DW=f(Tau_max)

DW=pi*C_12.*Acc/(omega^2*d_12);

figure(2);
plot(Tau,DW);

```

```
title('DW=f(Tau) dans l aluminium');  
xlabel('Tau [MPa]');  
ylabel('DW [J]');
```


9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Budynas, Nisbett. Progetto e costruzione di macchine. III edizi.one. 2014. Cap 6-1/2/3.
- [2] Bathias. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1999.
- [3] Bathias, Pineau. *Fatigue des matériaux et des structures* . Vol. 1. Hermes Science Publications, 2008.
- [4] Belfiqih, Salma. «Dispositif de mesure de l'amortissement interne d'un matériau dans le domaine "élastique".» 2015.
- [5] DIESEL", CO-ORDINATING WORKING GROUP "CLASSIFICATION SOCIETIES –. *Guidance for evaluation of fatigue tests*. 2009.
- [6] Francois, Pineau, Zaoui. *Viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture et mécanique du contact*. Lavoisier-Hermès, 2009.
- [7] G. La Rosa, A. Risitano. «Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components.» *International journal of fatigue*, 1999.
- [8] B. Wisner. «Investigation of particle fracture during fatigue of aluminium 2024» *International journal of fatigue*.2018.
- [9] Luong, Minh Phong. «Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique.» *Mechanics of materials*, 1988.
- [10] Meneghetti, G. «Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation.» *Journal of fatigue*, 2006.
- [11] Nouillant, M. «Aspect énergétique de la dégradation par fatigue .»
Aspect énergétique de la dégradation par fatigue. 1984.
- [12] S. Spigarelli «Metallurgia Meccanica» 2012. Cap.6
- [13] A. Hunshe, P. Neumann. «Quantitative measurement of persistent slip band profiles and crack initiation» 1985.
- [14] S. Lenci. «Lezioni di meccanica strutturale» *Pitagora*, 2009.

- [15] S. Deschanel. «Acoustic emission multiplets as early warnings of fatigue failure in metallic materials» *Scientific Reports*. 2017