

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea  
Ingegneria Meccanica**



**Tesi di Laurea**

**INDAGINE TEORICA E  
SPERIMENTALE DEL  
COMPORTAMENTO A FATICA DEGLI  
INGRANAGGI**

**Relatori**

**Prof.ssa. F. M. CURÀ**

**Ing. L. CORSARO**

**Candidato**

**Walter MAGGIO**

**Settembre 2024**

## Sommario

L'obiettivo principale di questa tesi è stato investigare il comportamento a fatica degli ingranaggi in acciaio C45, con un particolare focus sulla stima del limite di fatica utilizzando il Two Curves Method (TCM), una metodologia innovativa basata sull'analisi termografica. Il TCM è stato analizzato sia nella sua versione classica (retta-retta) che in quella modificata (parabola-legge di potenza), evidenziando la sua capacità di fornire una stima ragionevole del limite di fatica degli ingranaggi.

Le prove sperimentali sono state condotte su ingranaggi non trattati termicamente e su ingranaggi sottoposti a tempra induttiva, utilizzando una variante del STBF europeo su un vibroforo Amsler. I risultati ottenuti hanno mostrato come il TCM riesca a individuare il punto di transizione tra la fatica a vita illimitata e quella a vita limitata, grazie all'analisi dei parametri termici, quali la differenza di temperatura e l'area sottesa alla curva temperatura-tempo.

Il TCM, nel contesto dei componenti meccanici quali gli ingranaggi, è stato validato impiegando i parametri di riferimento derivati dalla normativa ISO 6336. In un secondo momento, saranno ottenuti valori di riferimento aggiuntivi attraverso campagne sperimentali condotte sugli stessi ingranaggi, utilizzando metodologie di riferimento come la tecnica dello Stair Case. Inoltre, l'analisi ha confermato che i trattamenti termici, come la tempra induttiva, possono aumentare significativamente la resistenza a fatica degli ingranaggi, anche se la loro efficacia dipende dalla qualità e dalla precisione del trattamento.

In conclusione, il TCM si pone come un metodo promettente per la valutazione del comportamento a fatica degli ingranaggi, aprendo la strada a ulteriori sviluppi e ottimizzazioni nel campo della progettazione meccanica e della diagnostica preventiva. Le future ricerche potranno beneficiare di un perfezionamento delle attrezzature sperimentali e di una più ampia gamma di test su materiali e trattamenti diversi, al fine di confermare e ampliare l'applicabilità generale di questa metodologia.





# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	IV
<b>Elenco delle figure</b>	V
<b>1 Introduzione</b>	1
<b>2 Stato dell'arte</b>	4
2.1 Metodo Stair-Case . . . . .	4
2.2 Stima del limite di fatica attraverso termografia . . . . .	8
2.3 Attrezzature per prove di bending su ingranaggi . . . . .	14
2.3.1 Banco di prova FZG "back-to-back" . . . . .	14
2.3.2 Single Tooth Bending Fatigue (STBF) . . . . .	15
<b>3 Materiali e metodi</b>	17
3.1 Attrezzatura e setup . . . . .	17
3.2 Metodologia . . . . .	21
<b>4 Risultati</b>	25
<b>5 Conclusioni</b>	35
<b>Bibliografia</b>	37

# Elenco delle tabelle

2.1	Esempio di analisi dati con il metodo Stair-Case . . . . .	7
2.2	Caratteristiche meccaniche dei metalli . . . . .	12
2.3	Risultati ottenuti per l'acciaio C45 . . . . .	13
2.4	Risultati ottenuti per l'acciaio 25CrMo4 . . . . .	13
3.1	Valore dei coefficienti utilizzati in conformità alla normativa ISO 6336	22
3.2	Valore dei coefficienti utilizzati in conformità alla normativa ISO 6336 per il calcolo di $\sigma_{FP}$ . . . . .	23
3.3	Valore di $\sigma_{FP}$ per ruota dentata in materiale base e temprata . . . .	23
3.4	Riassunto prove eseguite . . . . .	24
4.1	Risultati ruota dentata in C45 non trattato termicamente . . . . .	25
4.2	$\sigma_{FP}$ stimate attraverso il metodo TCM per la ruota in materiale base	29
4.3	Risultati ruota dentata in C45 trattato termicamente . . . . .	29
4.4	$\sigma_{FP}$ stimate attraverso il metodo TCM per la ruota dentata con trattamento di tempra induttiva . . . . .	33

# Elenco delle figure

1.1	Diagramma di Wohler . . . . .	2
1.2	Frattura sul fondo del dente . . . . .	3
2.1	Provino standard secondo UNI-3964 . . . . .	5
2.2	Grafico delle prove eseguite seguendo il metodo Stair-Case . . . . .	6
2.3	Evoluzione della temperatura a diverse tensioni alterne di provini in (a)C45 e (b)25CrMo4 . . . . .	9
2.4	Risultati ottenuti con metodologia OCM . . . . .	10
2.5	Risultati ottenuti con metodologia TCM retta-retta . . . . .	11
2.6	Risultati ottenuti con metodologia TCM parabola-legge di potenza . . . . .	11
2.7	Banco di prova FZG back to back . . . . .	15
2.8	Metodologia americana dei test STBF . . . . .	16
2.9	Metodologia europea dei test STBF . . . . .	16
3.1	Attrezzatura installata sul vibroforo . . . . .	18
3.2	Schema attrezzatura installata sul vibroforo . . . . .	18
3.3	Dettaglio sulla verniciatura della ruota dentata e del provino di riferimento . . . . .	19
3.4	Setup termocamera . . . . .	19
3.5	Esempio di immagine termografica acquisita . . . . .	20
3.6	Esempio di elaborazione dei dati attraverso script Matlab . . . . .	20
4.1	Grafico riportante gli incrementi di temperatura puntuali registrati durante le prove per la ruota in C45 base . . . . .	26
4.2	Grafico riportante gli incrementi di temperatura in funzione della $\sigma_{max}$ applicata per la ruota in C45 base . . . . .	27
4.3	Grafico riportante i valori di area sottesa in funzione della $\sigma_{max}$ applicata per la ruota in C45 base . . . . .	27
4.4	Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale base con parametro termico $\Delta T_{temp}$ . . . . .	28

4.5	Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale base con parametro termico $A_{term}$ . . . . .	28
4.6	Grafico riportante gli incrementi di temperatura puntuale registrati durante le prove per la ruota in C45 temprata . . . . .	30
4.7	Grafico riportante gli incrementi di temperatura in funzione della $\sigma_{max}$ applicata per la ruota dentata in C45 temprato . . . . .	31
4.8	Grafico riportante i valori di area sottesa in funzione della $\sigma_{max}$ applicata per la ruota in C45 temprato . . . . .	31
4.9	Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale con trattamento di tempra induttiva con parametro termico $A_{term}$ . . . . .	32
4.10	Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM paarbolallegge di potenza della ruota con trattamento di tempra induttiva base con parametro termico $A_{term}$ . . . . .	32
4.11	Iistogramma riassumente le $\sigma_{FP}$ stimate con le diverse metodologie .	33



# Capitolo 1

## Introduzione

La fatica dei materiali metallici è un fenomeno di deterioramento progressivo che si verifica sotto l'azione di carichi ciclici, rappresentando una delle principali cause di cedimenti strutturali in molte applicazioni ingegneristiche. Comprendere i meccanismi di fatica è cruciale per la progettazione sicura e affidabile di componenti meccanici che operano in condizioni di carico variabile.

Come è stato ben riassunto da Charkaluk e Constantinescu[1], vi è l'esistenza di tre schemi di danneggiamento corrispondenti a tre domini di fatica: è possibile classificare questi ultimi in base al numero di cicli che un determinato materiale è in grado di sopportare, prima di subire un deterioramento delle sue proprietà meccaniche.

- *Numero di cicli illimitato*

il livello di carico è molto basso e si può considerare un unico sistema di slittamento per ogni grano sottoposto ad uno sforzo di taglio inferiore alla tensione di snervamento. Si evidenzia una risposta elastica in tutti i grani e l'assenza di slittamenti dei piani cristallini. In tali condizioni si può affermare che la durata del materiale è illimitata. Viene quindi definito il *limite di fatica* come la massima tensione di un ciclo di carico al di sotto del quale rientriamo nella casistica descritta in precedenza.

- *HCF: High Cycle Fatigue*

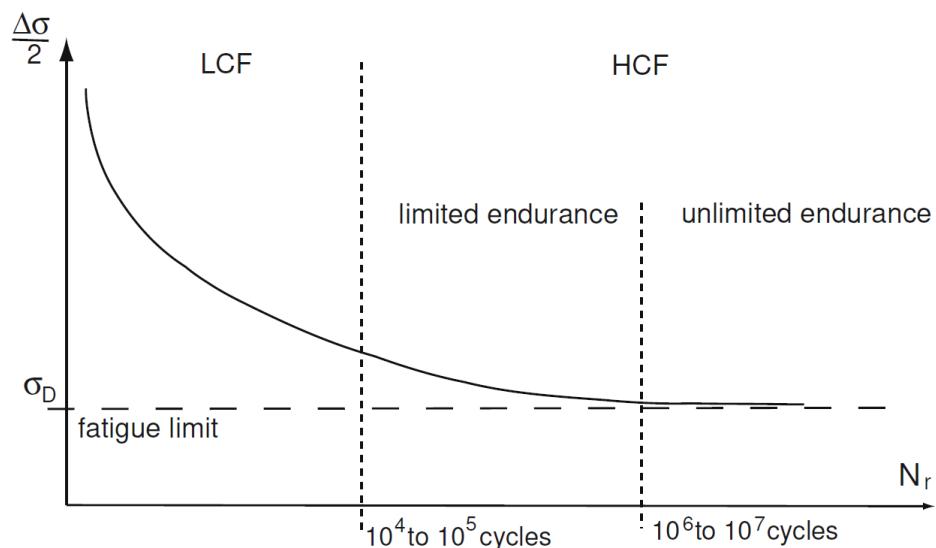
se il livello di carico aumenta, ma rimane comunque basso, è possibile considerare nuovamente un solo sistema di slittamento per ciascun grano. Tuttavia, le sollecitazioni di taglio potrebbero superare la tensione di snervamento in vari grani, che possiedono piani cristallografici favorevolmente orientati rispetto al piano di slittamento attivo e alla direzione del carico. In tali condizioni, è possibile osservare lo scorrimento delle dislocazioni e la formazione di bande di slittamento. Con questo tipo di sollecitazione, il materiale è in grado di

sopportare un elevato numero di cicli di carico. (ordine di grandezza  $10^5$ - $10^6$  cicli).

- *LCF: Low Cycle Fatigue*

nel caso in cui il carico applicato risulti molto elevato si possono osservare due fenomeni: il primo è un notevole aumento della quantità di grani plasticizzati e il secondo la presenza di diversi sistemi di slittamento dei piani cristallini nello stesso grano. In questo caso il numero di cicli che il materiale è in grado di sopportare senza presentare un deterioramento delle caratteristiche meccaniche è molto basso (ordine di grandezza  $10^4$  cicli).

Le tre casistiche vengono tipicamente rappresentate nel diagramma di Wohler: un diagramma cartesiano in cui nelle ascisse si riportano il numero di cicli e nelle ordinate la condizione di carico.



**Figura 1.1:** Diagramma di Wohler

I trattamenti superficiali influenzano fortemente il limite a fatica dei componenti, infatti uno stato tensionale di compressione sulla superficie diminuisce la possibilità di generare delle cricche per fatica su quest'ultima. Nelle applicazioni ingegneristiche i trattamenti superficiali più usati per gli acciai sono la tempra, la cementazione e la pallinatura, che vengono realizzati con lo scopo di aumentare la durezza superficiale e generare, appunto, delle tensioni residue.

Entrando nella casistica degli ingranaggi, i denti di questi ultimi sono tipicamente soggetti a sollecitazioni di flessione cicliche che raggiungono la loro massima intensità

sul fondo del dente. Si è osservato, infatti, che uno dei danni più frequenti a cui sono soggette le ruote dentate è proprio la generazione di una frattura in questa zona.



**Figura 1.2:** Frattura sul fondo del dente

L'obiettivo della presente tesi è stimare il limite di fatica di una ruota dentata in acciaio C45, sottoposta a carichi ciclici in prossimità del punto di singolo conatto del dente. Tale stima sarà realizzata attraverso l'analisi della variazione della temperatura superficiale sul fondo dei denti sollecitati, confrontando diverse metodologie di analisi dei dati. Inoltre, verrà effettuato un confronto tra una ruota dentata realizzata con materiale base e una trattata termicamente mediante un processo di tempra. Nel corso della trattazione saranno discusse le metodologie sperimentali e gli strumenti utilizzati per la realizzazione delle prove.

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

Le prime ricerche sulla fatica dei materiali metallici furono condotte nella seconda metà del XIX secolo da August Wöhler[2], un ingegnere meccanico prussiano che eseguì diversi esperimenti su assali ferroviari[3]. Lo scopo fu quello di investigare sulle motivazioni per le quali questi ultimi si rompessero nonostante fossero sollecitate con carichi al di sotto della tensione di snervamento.

Wöhler fu il pioniere nello sviluppo di un approccio sistematico e analitico allo studio della fatica. Egli progettò macchine di prova specifiche per sollecitare i provini a flessione rotante, garantendo così la ripetibilità degli esperimenti. Attraverso queste metodologie innovative, introdusse nel panorama scientifico il concetto di limite a fatica e identificò i parametri chiave che lo influenzano. Il suo lavoro venne poi rappresentato nella Curva S-N o Diagramma di Wöhler (Figura 1.1): una rappresentazione statistica degli esperimenti condotti che permette la caratterizzazione del comportamento a fatica dei materiali.

In generale, la caratterizzazione del comportamento a fatica dei materiali metallici è un procedimento dispendioso sia dal punto di vista economico sia in termini di tempo: infatti per il raggiungimento di tale scopo è necessario un cospicuo numero di prove e provini (75-90 per la costruzione del diagramma di Wöhler).

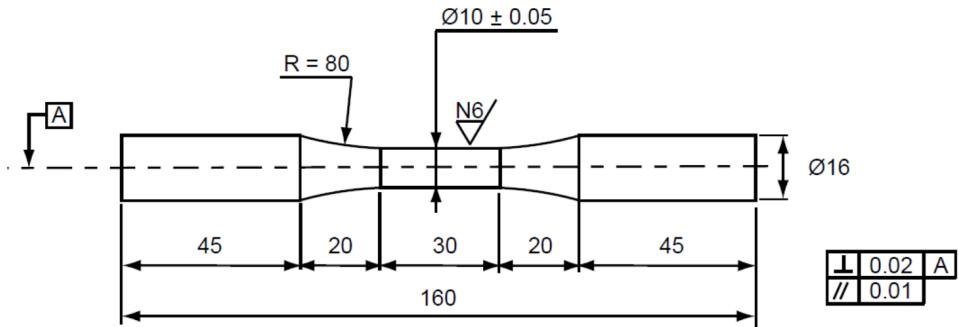
### 2.1 Metodo Stair-Case

Il metodo Stair-Case, normato nella UNI-3964[4], rappresenta lo standard per la stima del limite di fatica. La stima viene effettuata attraverso un approccio statistico che fu introdotto da W.J. Dixon durante la II guerra mondiale per lo studio di esplosivi. Risulta accettabile ipotizzare che le rotture dei provini siano distribuite normalmente e che, di conseguenza, la media e il valore mediano coincidano[5]. È possibile, in questo modo, valutare il valore mediano ( $\sigma_D = \sigma_{N(50\%)}^2$ ) e lo scarto

tipo  $s$  del limite di fatica.

Il metodo Stair-Case è un processo sperimentale e iterativo in cui viene seguita una procedura specifica normata dalla UNI-3964. Quest'ultima indica anche le condizioni di prova standard:

- sollecitazione a flessione rotante ( $\sigma_m = 0$  o  $R = -1$ );
- superficie lucidata  $R_a \leq 0.8\mu m$ .
- provino di dimensioni normate riportate nella figura sottostante;



**Figura 2.1:** Provino standard secondo UNI-3964

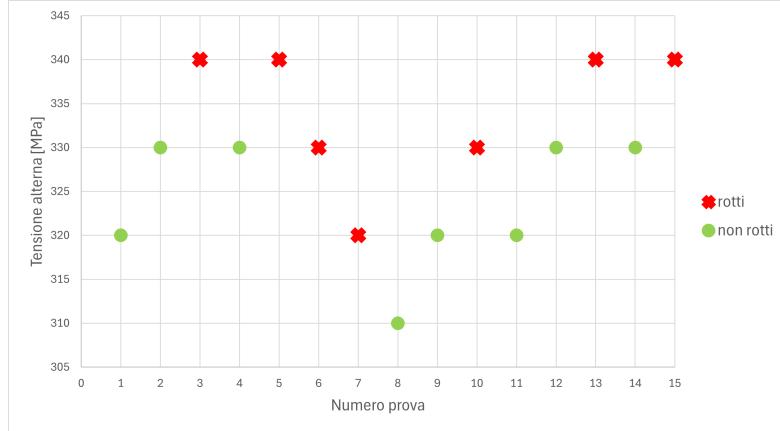
Nella fase preliminare vengono scelti i parametri di riferimento:

- numero di cicli di riferimento  $N$ ;
- livello di tensione di partenza  $\sigma_0$  (nei dintorni del valore presunto di resistenza a  $N$  cicli);
- Un delta di tensione  $d$  circa uguale allo scarto tipo del limite di fatica (che ricordiamo essere incognito): la normativa UNI-3964 suggerisce 10-20MPa.

Le prove vengono eseguite in maniera sequenziale scegliendo in maniera casuale tra i 15 inizialmente preparati: terminata la prova in caso di rottura allora la tensione alterna ( $\sigma_a$ ) della prova successiva sarà uguale alla  $\sigma_a$  della prova appena conclusa meno il delta di tensione  $d$ ; nel caso opposto, in cui il provino rimane integro, la  $\sigma_a$  della prova successiva sarà pari alla sigma alterna della prova appena conclusa addizionata dal parametro  $d$ . In sintesi:

$$\begin{aligned} \sigma_i : \text{rotta} &\rightarrow \sigma_{i+1} = \sigma_i - d \\ \sigma_i : \text{non rottura} &\rightarrow \sigma_{i+1} = \sigma_i + d \end{aligned}$$

Raggiunte le 15 prove la procedura può essere interrotta e i dati trascritti in un grafico in cui si evidenzia se i provini sono stati rotti o meno e i corrispondenti livelli di carico. Di seguito viene riportato un esempio:



**Figura 2.2:** Grafico delle prove eseguite seguendo il metodo Stair-Case

Per la stima del limite di fatica e della deviazione standard si considera l'evento meno frequente (ad esempio nel caso riportato nella Figura 2.2 l'evento meno frequente è il provino non rotto poichè si è verificato 7 volte su 15). La stima viene effettuata con le equazioni riportate di seguito[6]:

$$s = \sigma_0 + d \left( \frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2.1)$$

In cui il segno + è usato nel caso in cui l'evento meno frequente è la non rottura del provino, viceversa viene usato il segno -.

$$\begin{aligned} \text{se } F_{BA} \geq 0.3 & \quad \sigma = 1.62 \cdot d \cdot (F_{BA} + 0.029) \\ \text{se } F_{BA} < 0.3 & \quad \sigma = 0.53 \cdot d \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$F_{BA} = \frac{FB - A^2}{F^2} \quad (2.3)$$

$$A = \sum_{j=0}^{j_{max}} j \times n_j \quad (2.4)$$

$$B = \sum_{j=0}^{j_{max}} j^2 \times n_j \quad (2.5)$$

$$F = \sum_{j=0}^{j_{max}} n_j \quad (2.6)$$

Il parametro  $j$  è un intero che rappresenta il livello di tensione alterna ed  $n_j$ , è il numero di provini corrispondenti all'evento meno frequente appartenenti al livello di tensione  $j$ . Riprendendo l'esempio della Figura 2.2 e applicando il metodo appena descritto è possibile sviluppare la seguente tabella:

Tensione alterna [MPa]	$j$	$n_j$	$A$ ( $j \times n_j$ )	$B$ ( $j^2 \times n_j$ )
340	3	4	12	36
330	2	2	4	8
320	1	1	1	1
310	0	0	0	0
Total	-	7	17	45

**Tabella 2.1:** Esempio di analisi dati con il metodo Stair-Case

Continuando la trattazione dell'esempio sopra riportato, usando l'equazione 2.3 troviamo che  $F_{BA} = 0.53$  e possiamo quindi calcolare la stima del limite di fatica e dello scarto tipo rispettivamente dalle equazioni (2.1) e (2.2) ottenendo:

$$\begin{aligned}\sigma_{D(50\%)} &= 339.29 \text{ MPa} \\ s &= 9.07 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Considerando l'ipotesi di distribuzione normale delle rotture dei provini, fatta all'inizio, è possibile stimare la resistenza a fatica al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza usando le seguenti equazioni:

$$\sigma_{N(10\%)} = \sigma_{N(50\%)} - 1.28 \cdot s \quad (2.7)$$

$$\sigma_{N(90\%)} = \sigma_{N(50\%)} + 1.28 \cdot s \quad (2.8)$$

## 2.2 Stima del limite di fatica attraverso termografia

Risulta evidente che il metodo Stair-Case, descritto nel *paragrafo 2.1*, necessita di un notevole sforzo in termini economici e di impegno temporale. La letteratura dell'ultimo ventennio, di conseguenza, si è concentrata sulla ricerca di nuove metodologie che permettessero la stima del limite di fatica di materiali o componenti attraverso prove non distruttive, con una durata ragionevole consona agli standard odierni.

Feltner e Morrow[7], nel 1961, postularono che l'energia meccanica, considerata come lavoro di deformazione plastica irreversibile (equivalente all'area del ciclo di isteresi), fosse un indicatore dell'accumulo di danno da fatica. Da lì in avanti furono sviluppati diversi approcci per l'analisi della fatica di materiali e componenti: ognuno di essi assume una particolare forma di energia come indicatore di danno da fatica. Nello specifico, nell'ultimo decennio, lo studio della fatica dei metalli ha avuto un approccio multiscala con lo scopo di trovare una correlazione tra il danno macroscopico della struttura, causato da sollecitazioni cicliche, e la variazione dei parametri dissipativi correlata alla manifestazione di meccanismi irreversibili su scala microscopica.

Una chiara panoramica sul comportamento a livello microscopico dei materiali sottoposti a carichi affaticanti viene fornita da Curà *et al.*[8]:

- **sollecitazioni sotto il limite di fatica:**

il comportamento dei materiali è principalmente influenzato da fenomeni anelasticci e, sebbene siano presenti alcuni aspetti dissipativi, i fenomeni fisici sono generalmente considerati di evoluzione lineare. Sono stati proposti diversi modelli per descrivere l'anelasticità del materiale, ma il più adatto è il modello di sovrapposizione di Boltzmann, in cui i fenomeni di smorzamento sono rappresentati dal *loss angle*  $\varphi$ . Tuttavia, questo modello non possiede un equivalente meccanico diretto.

- **sollecitazioni sopra il limite di fatica:**

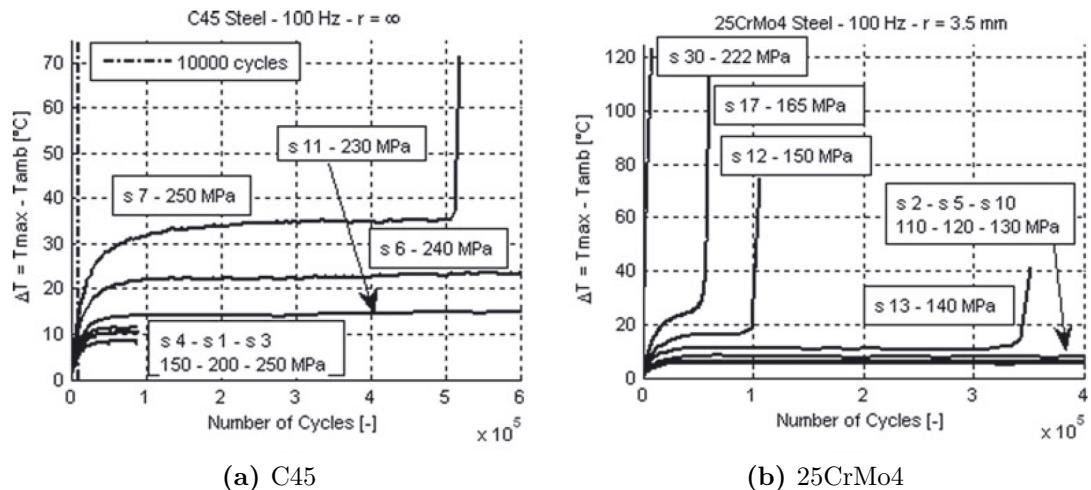
i siti di microplasticizzazione attivi aumentano significativamente, portando a vari fenomeni a livello microstrutturale, come lo scorrimento delle dislocazioni. Di conseguenza, il comportamento del materiale non può più essere considerato lineare. Per descrivere il processo di attivazione dei siti di microplasticizzazione e stimare i fenomeni di dissipazione interna e l'incremento di temperatura, è stato presentato un *modello probabilistico bidimensionale*. In particolare, nel caso di materiali sottoposti a fatica ad alto numero di cicli (*HCF*), i siti di microplasticizzazione sono trattati come inclusioni nella matrice elastica del materiale, seguendo il *Poisson Point Process* (*PPP*).

Possiamo dare una nuova definizione di limite di fatica che rende più forte e chiaro il collegamento con l'energia dissipata: il limite di fatica corrisponde alla zona di trasizione in cui si ha la variazione progressiva (non necessariamente repentina) dei parametri macroscopici e microscopici.

I cambiamenti della microstruttura dei metalli, sottoposti a sollecitazioni affaticanti, sono responsabili della dissipazione di calore il quale può essere anche considerato come indicatore dello stato della microstruttura del materiale[9].

Chryschoos *et al*[10][11] svilupparono una forma specifica dell'equazione di trasmissione del calore che permise di valutare la dissipazione interna (diretta conseguenza dei meccanismi irreversibili) dalla misura della temperatura della superficie.

L'evoluzione della temperatura di un materiale sottoposto a carichi affaticanti aumenta rapidamente in una fase trasitoria della prima parte della prova, per poi stabilizzarsi e rimanere costante, raggiungendo la cosiddetta *temperatura di stabilizzazione*. È stato dimostrato analiticamente che la temperatura di stabilizzazione è correlata alla tensione alternata mediante una legge di potenza se il carico è al di sopra del limite di fatica, e con una legge parabolica se è al di sotto[12]. Curà *et al.*[8] hanno fornito evidenze empiriche a supporto di questo fenomeno:



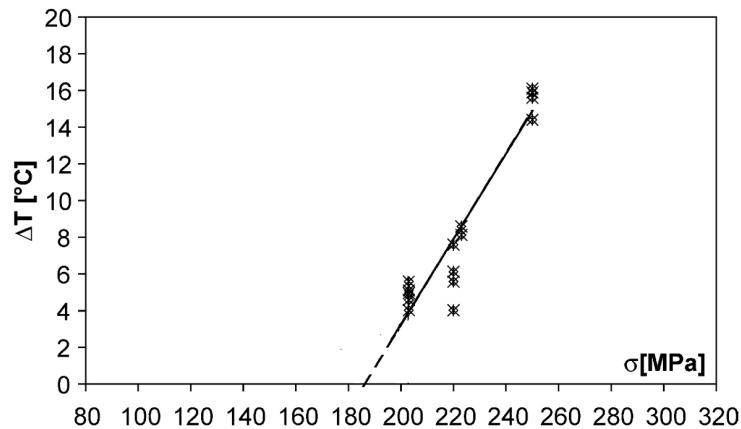
**Figura 2.3:** Evoluzione della temperatura a diverse tensioni alterne di provini in (a)C45 e (b)25CrMo4

In tale contesto si vanno ad inserire i *metodi termografici* o *metodi self-heating* per la stima del limite di fatica. Tale tecnica comporta, quindi, la misura della temperatura superficiale dei diversi provini o componenti soggetti ai carichi affaticanti. I risultati ottenuti vengono poi trasferiti in un grafico avente come ascissa il carico applicato e come ordinata il parametro termografico scelto (solitamente

la temperatura di stabilizzazione o la pendenza iniziale del grafico temperatura-tempo). I dati raccolti sono successivamente analizzati utilizzando diversi metodi di regressione, tra cui tipicamente il *metodo dei minimi quadrati*, per stimare il limite di fatica. In particolare, il danno da fatica viene rilevato da un cambio repentino nella quantità di calore dissipata, la quale, come precedentemente discusso, è direttamente proporzionale alle dissipazioni meccaniche a livello microscopico. Questa variazione indica il punto di transizione da fatica a vita illimitata a fatica a vita limitata, permettendo così di determinare il limite di fatica. In letteratura sono stati discussi metodi basati sul metodo dei minimi quadrati per l'individuazione del limite di fatica, in particolare:

- *OCM - One Curve Method*:

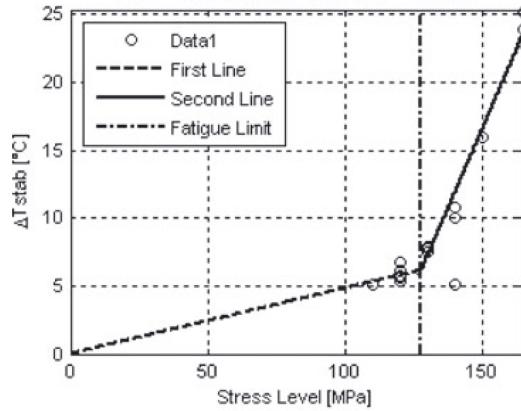
Vengono acquisiti dati termografici sollecitando il provino o il componente con carichi al di sopra del limite di fatica. La stima di quest'ultimo è determinata dall'intersezione di una retta di regressione lineare dei dati termografici con l'asse delle ascisse.



**Figura 2.4:** Risultati ottenuti con metodologia OCM

- *TCM - Two Curves Method - Retta-Retta*:

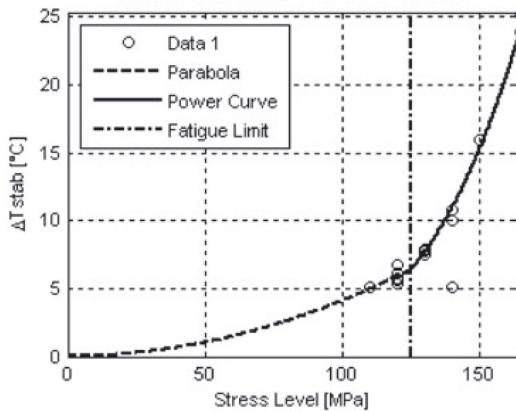
evoluzione diretta del *One Curve Method*, il limite di fatica viene stimato dall'intersezione di due rette di regressione lineare. La prima retta rappresenta i dati termografici acquisiti al di sotto del limite di fatica, mentre la seconda retta rappresenta i dati al di sopra di esso. Per identificare correttamente la migliore suddivisione del dataset, è necessaria una procedura iterativa.



**Figura 2.5:** Risultati ottenuti con metodologia TCM retta-retta

- *TCM - Two Curves Method - Parabola-Curva di potenza:*

rappresenta l'evoluzione del metodo *TCM* in forma classica. Infatti, come è stato esposto in precedenza, i fenomeni dissipativi presenti in un materiale sottoposto a carichi di fatica dipendono dalla tensione alterna applicata in maniera differente: con una legge di potenza quando le sollecitazioni sono al di sopra del limite di fatica e con una legge quadratica quando sono al di sotto. Quindi, per quanto riguarda la legge di regressione, si utilizza una parabola per i punti sotto il limite di fatica e una legge di potenza per quelli al di sopra.



**Figura 2.6:** Risultati ottenuti con metodologia TCM parabola-legge di potenza

Un confronto tra le due declinazioni della metodologia *TCM* è stato eseguito da Curà *et al.*[8]. Inoltre, nel loro lavoro la temperatura di stabilizzazione è stata

confrontata con due nuovi parametri termici: l'*incremento di temperatura* ( $\Delta T$ ) e l'*area sottesa al grafico temperatura-tempo* ( $A$ ). Nello specifico, questi ultimi sono stati riferiti a un numero basso di cicli (minore di  $10^4$ ) in modo tale da non raggiungere la temperatura di stabilizzazione. Le prove sono state eseguite su due tipologie di provini realizzati in due materiali differenti: un provino standard (secondo la normativa ASTM E 466-72[13]) in C45 e un provino intagliato (spessore  $s = 3\text{mm}$  e raggio di intaglio  $r = 3.5\text{mm}$ ) in 25CrMo4. Entrambi i materiali sono stati inizialmente caratterizzati staticamente e a fatica seguendo la metodologia Stair-Case, già trattata nel *paragrafo 2.1*, e nel caso dell'acciaio 25CrMo4 sono state eseguite delle prove aggiuntive necessarie per tracciare il diagramma di Wohler.

Materiale	C45	25CrMo4
Tensione di rottura [MPa]	800	461
Tensione di snervamento [MPa]	500	407
Raggio di intaglio [mm]	$\infty$	3.5
$k_t$	-	1.95
Frequenza di test [Hz]	100	100
$\sigma_{D-1(10\%)}$	251	147
$\sigma_{D-1(50\%)}$	239	129
$\sigma_{D-1(90\%)}$	227	112
$s$ [MPa]	9.00	13.69

**Tabella 2.2:** Caratteristiche meccaniche dei metalli

Le prove sono state eseguite utilizzando un vibroforo Amsler 10HFP 422, applicando ai campioni un carico alternato sinusoidale simmetrico ( $R = -1$ ) con una frequenza di 100 Hz. I dati termici sono stati acquisiti mediante una termocamera a infrarossi (Agema Thermo vision 900) a una frequenza di 4-30 Hz e successivamente elaborati con un software dedicato. La superficie dei campioni è stata previamente pulita e verniciata di nero per garantire un coefficiente di emissività pari o superiore a 0.9 e migliorare la qualità dei dati raccolti. Durante l'esecuzione dei test, oltre alla temperatura superficiale del campione, al numero di cicli eseguiti e al carico applicato, è stata registrata anche la temperatura di un campione non sottoposto a nessun carico e dello stesso materiale di quello testato. Tale misura rappresenta la temperatura di riferimento durante la prova, necessaria poichè, per ogni frame acquisito, l'incremento di temperatura ( $\Delta T$ ) è calcolato come differenza tra la temperatura massima sulla superficie del provino testato e quella del provino di riferimento. Per l'acciaio 25CrMo4 vengono considerati due set di dati  $D1$  e l'insieme  $D1$  e  $D2$  i quali, in ordine, si riferiscono a prove effettuate vicino al limite

di fatica (*SCM*) e significativamente sopra (Diagramma di Wohler). I risultati ottenuti vengono sintetizzati nelle seguenti tabelle:

C45				
Parametri termografici	<i>TCM</i> ORIGINALE		<i>TCM</i> MODIFICATO	
	$\sigma_{D-1(50\%)} [\text{MPa}]$	Differenza percentuale da SCM [%]	$\sigma_{D-1(50\%)} [\text{MPa}]$	Differenza percentuale da SCM [%]
$\Delta T_{\text{stab}} [\text{°C}]$	237	-0.84	235	-1.67
Area 10000 cicli [ $^{\circ}\text{C}^*\text{s}$ ]	236	-1.26	237	-0.84
$\Delta T$ 10000 cicli [ $^{\circ}\text{C}$ ]	233	-2.51	232	-2.93

**Tabella 2.3:** Risultati ottenuti per l'acciaio C45

25CrMo4				
Parametri termografici	<i>TCM</i> ORIGINALE		<i>TCM</i> MODIFICATO	
	$\sigma_{D-1(50\%)} [\text{MPa}]$	Differenza percentuale da SCM [%]	$\sigma_{D-1(50\%)} [\text{MPa}]$	Differenza percentuale da SCM [%]
$\Delta T_{\text{stab}} [\text{°C}]$	128	-0.78	125	-3.10
Area 5050 cicli [ $^{\circ}\text{C}^*\text{s}$ ] ( <i>D1</i> )	137	6.20	136	5.43
Area 5050 cicli [ $^{\circ}\text{C}^*\text{s}$ ] ( <i>D1 e D2</i> )	160	24.03	134	3.88
$\Delta T$ 5050 cicli [ $^{\circ}\text{C}$ ] ( <i>D1</i> )	129	0	128	-0.78
$\Delta T$ 5050 cicli [ $^{\circ}\text{C}$ ] ( <i>D1 e D2</i> )	160	24.03	136	5.43

**Tabella 2.4:** Risultati ottenuti per l'acciaio 25CrMo4

Come è possibile notare nelle tabelle 2.3 e 2.4, entrambe le metodologie *TCM*, originale e modificato, stimano con buona approssimazione il limite di fatica quando i punti acquisiti sono vicini alla zona di transizione tra fatica a vita illimitata e quella a vita limitata (errore massimo 2.93% per C45 e 6.20% per 25CrMo4). Tale comportamento risulta differente quando ai punti vicino al limite di fatica ne vengono aggiunti degli altri, nettamente al di sopra del limite: considerato il set di dati *D1* e *D2* per 25CrMo4 (tabella 2.4) la stima del limite di fatica attraverso la metodologia *TCM* originale porta ad errori nettamente più elevati, pari al 24.03%. Al contrario, utilizzare una regressione parabola-legge di potenza (*TCM* modificato) porta ad una stima notevolmente migliore del limite di fatica (errore massimo 5.43%). In sintesi, quando i dati acquisiti si trovano in prossimità del limite di fatica, entrambe le procedure forniscono una stima accurata. Tuttavia, nel caso di dati a tensioni alterne significativamente diverse tra loro e distanti dal limite di fatica, il metodo *TCM* originale perde efficacia. Al contrario, la versione modificata del metodo continua a ottenere una stima precisa anche in queste condizioni. Un confronto tra i parametri termografici evidenzia che l'area sottesa e l'incremento di temperatura forniscono una stima sufficientemente accurata del limite di fatica, nonostante la temperatura di stabilizzazione non sia stata raggiunta. Questo

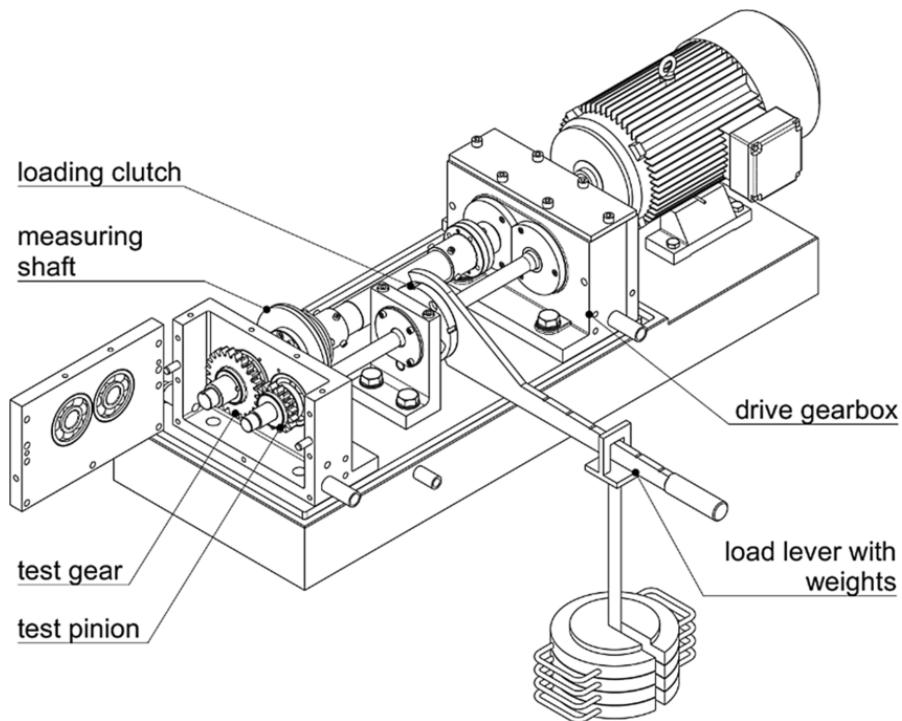
risultato è particolarmente significativo in un'ottica di ottimizzazione del tempo necessario per l'esecuzione delle prove: riducendo il numero di cicli eseguiti, si può infatti diminuire il tempo complessivo richiesto per completare il test.

## 2.3 Attrezzature per prove di bending su ingranaggi

La resistenza a fatica alla flessione della radice del dente rappresenta uno dei parametri fondamentali nella progettazione degli ingranaggi. Tale sollecitazione raggiunge la sua massima intensità alla base del dente, a causa della distanza dal punto di applicazione del carico e della presenza di fattori di concentrazione dello sforzo. Secondo lo stato dell'arte, si ritiene che, negli ingranaggi cementati soggetti a elevati livelli di stress, le cricche inizino a formarsi prevalentemente nella radice del dente. È possibile applicare un trattamento di pallinatura che induce uno strato superficiale con tensioni residue di compressione, estendendosi fino a pochi decimi di millimetro dalla superficie. Tuttavia, gli strati di materiale più profondi possiedono proprietà meccaniche significativamente inferiori rispetto alla superficie trattata, e questo, combinato con la presenza di inclusioni non metalliche, può facilitare la nucleazione di cricche al di sotto dello strato superficiale compresso[14]. In letteratura, sono state proposte diverse metodologie a banco per la stima del limite di fatica degli ingranaggi, le quali verranno analizzate di seguito.

### 2.3.1 Banco di prova FZG "back-to-back"

Il banco di prova in oggetto è stato sviluppato da Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebe (origine dell'acronimo FZG), un istituto di ricerca tedesco, specializzato nello studio e nell'analisi degli ingranaggi e dei sistemi di trasmissione di potenza. Il termine "back to back" si riferisce alla configurazione dei due ingranaggi che vengono testati all'interno di questo banco di prova. Le due ruote dentate sono montate su alberi contrapposti, con i loro denti che sono in presa diretta gli uni con gli altri. Tale disposizione simula in maniera accurata l'ingranamento reale, come se gli ingranaggi fossero parte di un sistema di trasmissione operativo. Questa particolare configurazione crea un circuito di potenza chiuso, in cui l'energia meccanica trasferita da un ingranaggio all'altro viene riciclata all'interno del sistema. Di conseguenza, il banco di prova è progettato per minimizzare le perdite di energia, rendendo possibile una valutazione più precisa e affidabile delle prestazioni degli ingranaggi sotto condizioni di carico controllato.

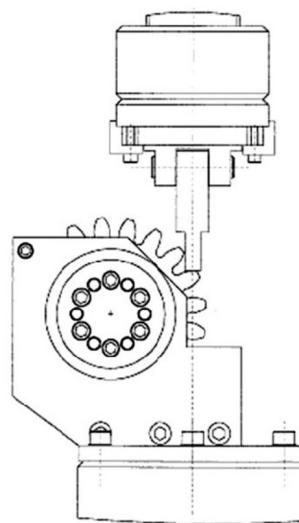


**Figura 2.7:** Banco di prova FZG back to back

### 2.3.2 Single Tooth Bending Fatigue (STBF)

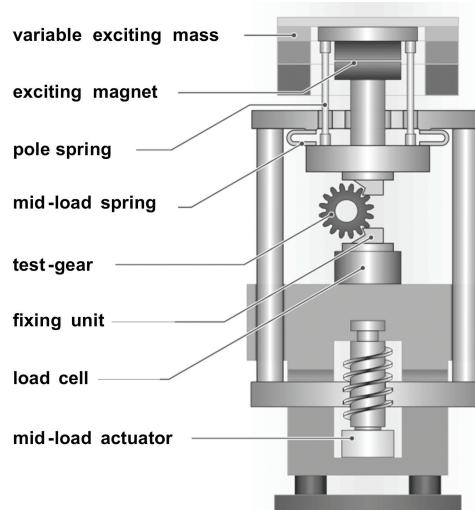
Le prove iniziali di flessione a fatica, anziché simulare direttamente l'ingranamento, vengono generalmente eseguite utilizzando uno schema STBF. I dati necessari per simulare le effettive condizioni di funzionamento devono essere determinati mediante l'applicazione di opportuni fattori correttivi. Questi fattori derivano dalla differenza nel *rapporto di carico R* e dalle considerazioni statistiche relative al numero di denti coinvolti nel carico. Nella pratica, gli ingranaggi sono sottoposti a carichi ciclici con un *rapporto di carico* pari a  $R = 0$ ; tuttavia, per ragioni tecniche e pratiche, i test STBF vengono condotti con un  $R \cong 0.1$ [15]. Tali prove sono generalmente eseguite su macchine idrauliche o pulsatori meccanici. In letteratura sono descritti due distinti schemi di applicazione del carico, che vengono illustrati di seguito:

1. i test STBF, nella loro versione classica, sono normati nella SAE J1619[16]. In tale metodologia, l'ingranaggio è sostenuto da un albero e solo un dente è sottoposto al carico, mentre un secondo funge da vincolo ed è posto più in basso. Questo variante dei test STBF è principalmente diffusa negli Stati Uniti.



**Figura 2.8:** Metodologia americana dei test STBF

2. nella versione europea dei test STBF due denti vengono caricati simultaneamente: questo è reso possibile dalle proprietà dell'evolvente, e in particolare dalla distanza di tre denti, nota come *misura di Wildhaber*. In queste condizioni le due forze, uguali e opposte, risultano perfettamente bilanciate, eliminando così la necessità di utilizzare un alberino di supporto.



**Figura 2.9:** Metodologia europea dei test STBF

# Capitolo 3

## Materiali e metodi

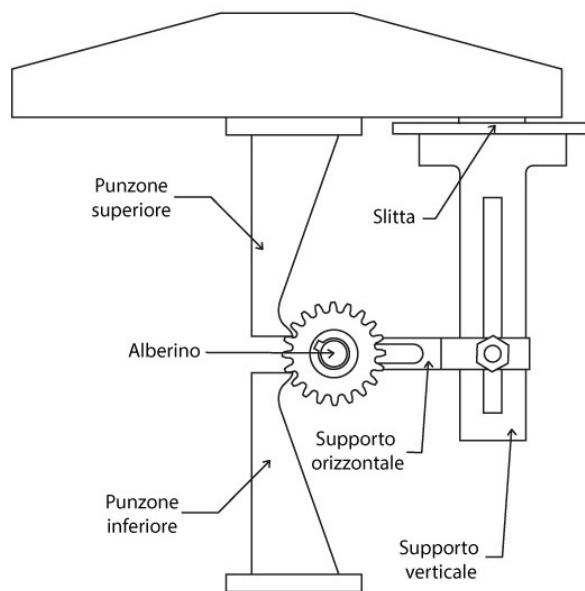
L'indagine sperimentale è stata condotta su due ingranaggi con modulo pari a  $m = 3$  mm, entrambi realizzati in acciaio C45 (secondo la norma UNI 7874[17], corrispondente all'AISI 1045). Uno degli ingranaggi è stato testato nello stato di fornitura, mentre l'altro è stato sottoposto a un trattamento di tempra induttiva. L'acciaio C45 è stato preliminarmente caratterizzato sia staticamente sia a fatica utilizzando la metodologia Stair-Case [4]. Gli esperimenti sono stati eseguiti utilizzando un vibroforo Amsler 10HFP 422, dotato di una cella di carico da 100 kN, operando a una frequenza di circa 145 Hz.

### 3.1 Attrezzatura e setup

Per sollecitare gli ingranaggi a fatica, è stata adottata una variante della metodologia STBF (*Single Tooth Bending Fatigue*), equipaggiando il vibroforo con un'attrezzatura specifica per sfruttare la condizione di Wildhaber e sollecitare due denti nel punto di singolo contatto *C*. Come illustrato nella *Figura 3.1* e *3.2*, sull'inudine superiore sono montati un punzone e una slitta, quest'ultima consente l'allineamento della mezzeria della ruota con l'asse di sollecitazione. La slitta è fissata mediante viti filettate a un supporto verticale e a uno orizzontale, i quali permettono, rispettivamente, di posizionare orizzontalmente il dente centrale e di avvicinare la ruota ai punzoni. Un alberino, avvitato al supporto orizzontale, sostiene la ruota durante le prove. Per quanto riguarda l'attrezzatura, è stata realizzata in acciaio C45.

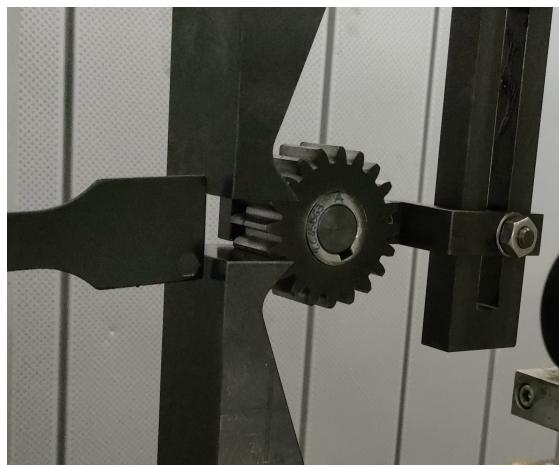


**Figura 3.1:** Attrezzatura installata sul vibroforo



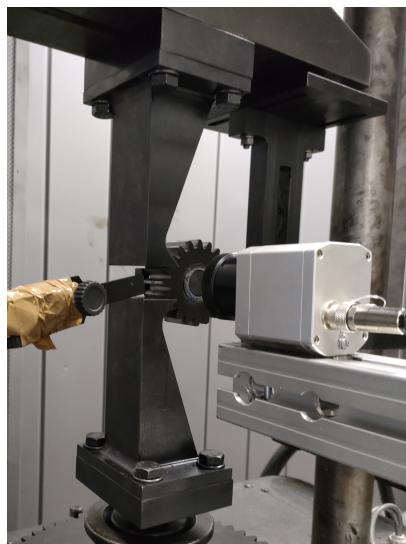
**Figura 3.2:** Schema attrezzatura installata sul vibroforo

Sia la ruota dentata che il provino di riferimento sono stati rivestiti con una vernice nera al fine di garantire un'emissività  $\epsilon = 0,95$ , in modo da ottimizzare l'acquisizione dei dati.



**Figura 3.3:** Dettaglio sulla verniciatura della ruota dentata e del provino di riferimento

Per l'acquisizione dei dati termografici è stata utilizzata una termocamera ad infrarossi (IR Technology Timage XT) montata su uno stativo e posizionata ad una distanza di 65 mm dalla superficie della ruota dentata.



(a)

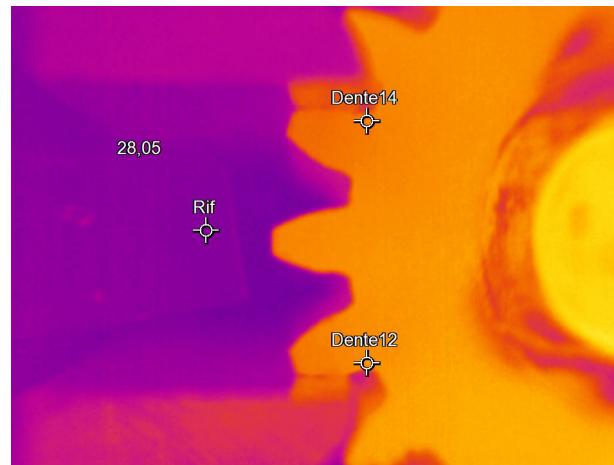


(b)

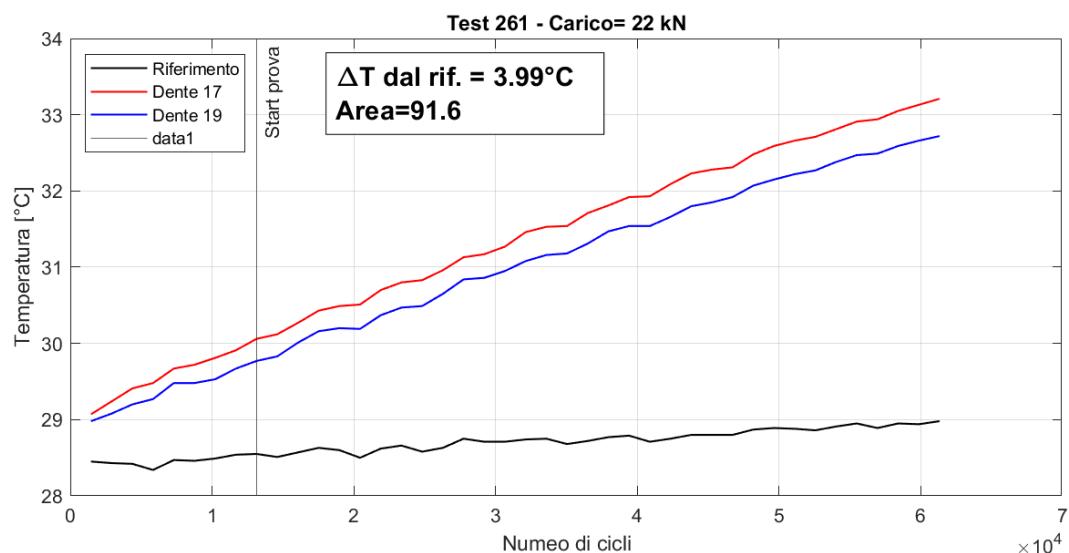
**Figura 3.4:** Setup termocamera

Le immagini termografiche sono state acquisite mediante il software proprietario Timage Connect ad una frequenza di 0,1 Hz. Nello specifico il rilevamento della

temperatura superficiale, come è possibile notare nella *Figura 3.5*, è avvenuto in tre punti: sul raccordo di fondo dente soggetto a tensioni di trazione del dente superiore, del dente inferiore e sul provino di riferimento. In ogni punto la temperatura è stata rilevata come media di una area quadrata di lato pari a 2 pixel. Terminata la prova i dati sono stati estratti sotto forma di file .dat ed elaborati attraverso uno script Matlab (Figura 3.6).



**Figura 3.5:** Esempio di immagine termografica acquisita



**Figura 3.6:** Esempio di elaborazione dei dati attraverso script Matlab

## 3.2 Metodologia

Come descritto nel paragrafo precedente, le prove sono state condotte bloccando tre denti in modo da riprodurre la metodologia per l'esecuzione della *misura di Wildhaber*. Questa configurazione implica che il punto di contatto tra il punzone e il dente sia approssimativamente coincidente con il *punto di singolo contatto più alto (HPSC)*, noto anche come *High Point of the Single tooth Contact*. Inoltre, l'angolo di pressione ( $\alpha$ ) risulta essere approssimabile all'angolo di applicazione della forza. Tale tipologia di prova (STBF) si presenta come un buon compromesso in termini di costi e di tempo rispetto alle prove con banco FZG nonostante siano presenti degli svantaggi poiché il dente non replica perfettamente le condizioni operative.

Inoltre, si è reso necessario correlare il carico applicato con la corrispondente tensione al piede del dente e, a tale scopo, si è deciso di adottare il metodo di calcolo descritto nella normativa ISO 6336[18] sotto riportato:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha} \cdot K_\gamma \cdot Y_F \cdot Y_S \cdot Y_\beta \cdot Y_B \cdot Y_{DT} \quad (3.1)$$

$$F_t = F \cdot \cos \alpha \quad (3.2)$$

Dove  $\sigma_F$  è la tensione massima a fondo dente e  $F_t$  è la forza tangenziale massima applicata sul dente la quale viene calcolata con la formula riportata nell'equazione 3.1. Sono inoltre presenti diversi coefficienti correttivi i quali vengono illustrati di seguito:

- $K_A$  fattore di sovraccarico;
- $K_\gamma$  fattore di distribuzione del carico;
- $K_V$  fattore di dinamica;
- $K_{F\beta}$  fattore di distribuzione del carico superficiale;
- $K_{F\alpha}$  fattore di distribuzione del carico trasversale;
- $Y_F$  fattore di forma;
- $Y_S$  fattore di sollecitazione;
- $Y_\beta$  fattore di inclinazione d'elica;
- $Y_B$ : Fattore di spessore della corona;
- $Y_{DT}$ : Fattore di profondità del dente.

Nella tabella successiva si sintetizzano i valori dei coefficienti utilizzati e sopra descritti:

Coefficiente	Valore
$K_A$	1
$K_\gamma$	1
$K_V$	1
$K_{F\beta}$	1
$K_{F\beta}$	1
$Y_F$	1.77
$Y_S$	1.82
$Y_\beta$	1
$Y_B$	1
$Y_{DT}$	1

**Tabella 3.1:** Valore dei coefficienti utilizzati in conformità alla normativa ISO 6336

La normativa prescrive che, affinché sia garantita l'integrità dell'ingranaggio, deve essere soddisfatta la condizione  $\sigma_F \leq \sigma_{FP}$ , dove  $\sigma_{FP}$  è definita come la tensione permissibile. La determinazione di tale tensione riveste particolare importanza, poiché rappresenta il valore di riferimento con cui confrontare le stime del limite di fatica ottenute mediante la metodologia TCM. La ISO 6336 propone due metodi per il calcolo della tensione permissibile, denominati *metodo A* e *metodo B*. Nel metodo A, la stima di  $\sigma_{FP}$  è eseguita attraverso qualunque procedura appropriata (FEM, formule integrali, procedure sperimentali con misure di tensione, etc); tuttavia, tale approccio non è stato adottato poiché avrebbe richiesto un notevole impiego di tempo e la disponibilità di un numero maggiore di ingranaggi. Il metodo scelto è il *metodo B*, in cui la stima di  $\sigma_{FP}$  è calcolata attraverso la seguente formula:

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X \quad (3.3)$$

La  $\sigma_{Flim}$  rappresenta la tensione limite di fatica per un ingranaggio di riferimento con modulo 5 mm. Applicando opportuni fattori correttivi, si determina la tensione permissibile  $\sigma_{FP}$  per l'ingranaggio specifico in esame.

Nel dettaglio:

- $Y_{ST}$  fattore di correzione dello sforzo;
- $Y_{NT}$  fattore di durata;
- $Y_{\delta relT}$  fattore di sensibilità relativo;
- $Y_{RrelT}$  fattore di superficie relativo;
- $Y_X$  fattore dimensionale;
- $S_{Fmin}$  coefficiente di sicurezza.

I cui valori calcolati sono riportati nella seguente tabella:

Coefficiente	C45 base	C45 temprato
$Y_{ST}$	2	2
$Y_{NT}$	1	1
$Y_{\delta relT}$	0.98	0.99
$Y_{RrelT}$	1.07	1.07
$Y_X$	1	1
$S_{Fmin}$	1	1

**Tabella 3.2:** Valore dei coefficienti utilizzati in conformità alla normativa ISO 6336 per il calcolo di  $\sigma_{FP}$

Si riportano quindi i valori di tensione permisibile a fondo dente  $\sigma_{FP}$  stimati attraverso la metodologia sopra descritta:

Ruota dentata	$\sigma_{FP}$ [MPa]
C45 base	555
C45 temprato	934

**Tabella 3.3:** Valore di  $\sigma_{FP}$  per ruota dentata in materiale base e temprato

Per entrambe le ruote dentate, sia quella temprata che quella non temprata, è stato scelto di eseguire i test con livelli di carico crescenti, partendo da valori inferiori al limite di fatica e superandolo progressivamente. Nel dettaglio, per l'ingranaggio

in materiale base sono state condotte un totale di 7 prove, iniziando con un carico di 11000 N e incrementandolo di 2000 N ad ogni prova, fino a raggiungere 17000 N. L'incremento è stato poi ridotto a 1000 N per le prove successive. Analogamente, per la ruota temprata sono state eseguite 7 prove, partendo da un carico di 17000 N e aumentandolo prima di 1000 N e poi di 1500 N, fino a 19500 N. Da 20500 N l'incremento è stato ridotto a 500 N per ogni prova successiva. Quanto detto viene sintetizzato nelle seguenti tabelle:

Ruota dentata in C45 base			Ruota dentata in C45 temprata		
Carico [N]	Numero ruota	Numero denti	Carico [N]	Numero ruota	Numero denti
11000	1	16-18	17000	3	12-14
13000	1	17-19	18000	3	12-14
15000	1	17-19	19500	3	13-15
17000	1	17-19	20500	3	15-17
18000	2	1-3	21000	3	15-17
19000	2	2-4	21500	3	16-18
20000	2	5-7	22000	3	17-19

(a)

(b)

**Tabella 3.4:** Riassunto prove eseguite

Come discusso nel paragrafo 2.3.2, i test sono stati condotti utilizzando un *rapporto di carico R* diverso da  $-1$ . Sebbene per simulare una condizione di lavoro reale sarebbe ideale un rapporto  $R = 0$ , ciò non è tecnicamente fattibile. Un rapporto di carico  $R = 0$  richiederebbe infatti l'assenza di precarico, condizione che potrebbe causare il distacco del punzone dal dente, compromettendo così l'accuratezza e la validità dei risultati sperimentali.

La stima del limite di fatica è stata realizzata attraverso la metodologia TCM (paragrafo 2.2), sia nella sua declinazione originale (*retta-retta*) ma anche nella versione *parabola-curva di potenza*. Il confronto, inoltre, è stato effettuato tra due parametri termografici scelti:

- $\Delta T_{\text{temp}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]: Differenza di temperatura tra piede del dente e provino di riferimento alla conclusione della prova;
- $A_{\text{term}}$  [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}$ ]: Area sottesa alla curva della temperatura nel grafico temperatura-tempo.

# Capitolo 4

## Risultati

Per entrambi gli ingranaggi sono stati estrapolati gli incrementi di temperatura e le aree sottese sia del dente superiore che inferiore, tale condizione ha permesso un'analisi più dettagliata e accurata dei risultati ottenuti.

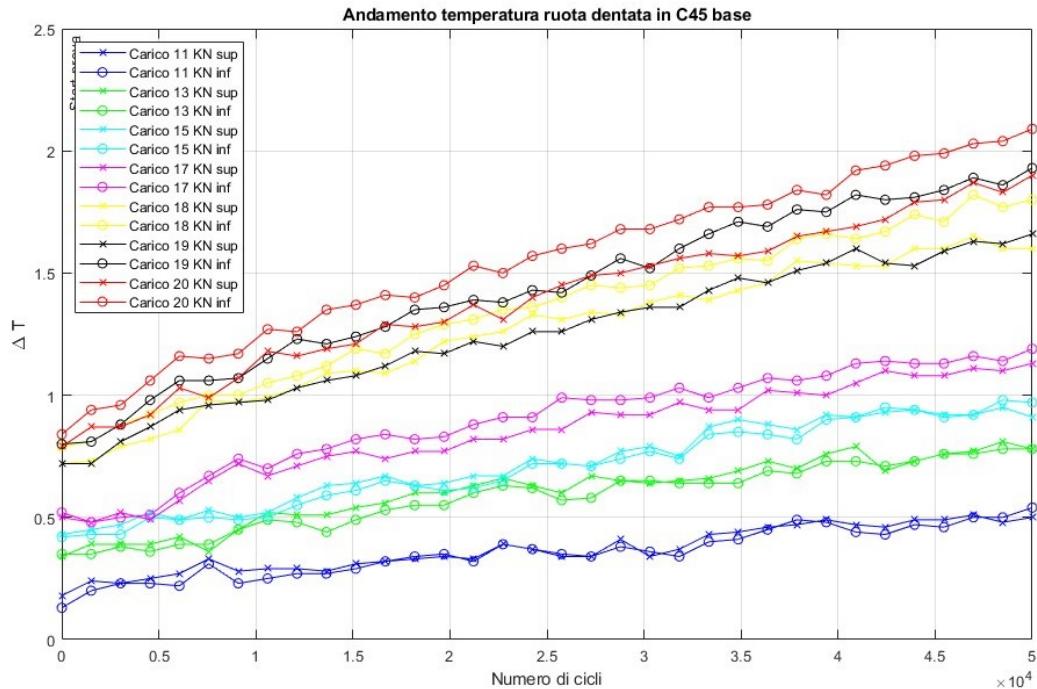
I risultati ottenuti per la ruota dentata in C45 base vengono riassunti nella tabella seguente:

Ruota dentata in C45 base							
$F_{vib\ max}$ [N]	N. cicli [-]	Frequenza [Hz]	Dente inferiore		Dente superiore		
			$\Delta T_{temp}$ [°C]	$A_{term}$ [°C·s]	$\Delta T_{temp}$ [°C]	$A_{term}$ [°C·s]	
11000	50000	145	0,54	11,7	0,5	12,2	
13000	50000	144,16	0,78	19,2	0,78	20	
15000	50000	146,66	0,97	23,2	0,91	23,8	
17000	50000	145,57	1,19	29,6	1,13	28	
18000	50000	145	1,8	44,6	1,6	41,4	
19000	50000	145	1,93	47,4	1,66	41,3	
20000	50000	145	2,09	51,2	1,9	46,1	

**Tabella 4.1:** Risultati ruota dentata in C45 non trattato termicamente

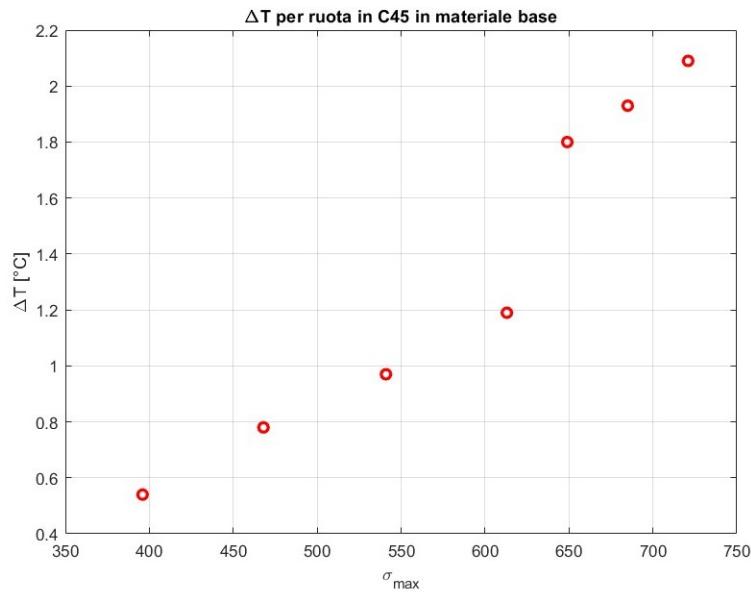
Per ciascuna prova sono stati eseguiti 50.000 cicli di carico a una frequenza di circa 145 Hz. In generale, si osserva una forte correlazione tra l'incremento del carico e l'aumento dei parametri termici considerati, in linea con quanto discusso nel paragrafo 2.2. Inoltre è evidente che, per ogni livello di carico, sia la temperatura  $\Delta T_{temp}$  sia l'area sottesa  $A_{term}$  del dente inferiore risultano sistematicamente superiori a quelle rilevate per il dente superiore, indicando che quest'ultimo è

sottoposto a sollecitazioni inferiori rispetto al dente posto in basso. Tale trend è nettamente visibile nel grafico sottostante (figura 4.1) riportante gli incrementi di temperatura puntuale registrati durante le prove dove, si nota anche, come il divario tra l'incremento del dente superiore e inferiore tende ad aumentare quando vi è un aumento del carico.

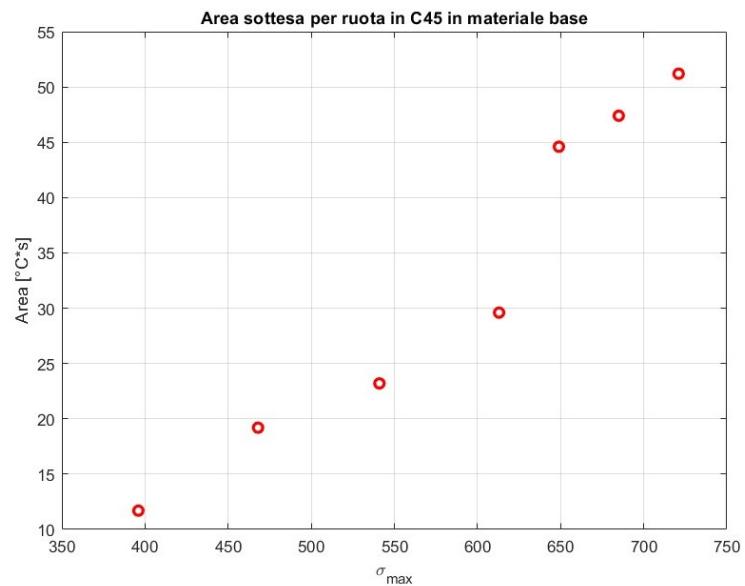


**Figura 4.1:** Grafico riportante gli incrementi di temperatura puntuale registrati durante le prove per la ruota in C45 base

La presenza di un supporto per la ruota dentata implica che il carico, applicato dalla parte superiore della macchina, venga distribuito in modo differente tra il dente superiore e quello inferiore. In particolare, si può affermare che il dente inferiore è sollecitato dall'intero carico, poiché rappresenta l'unica reazione di vincolo. Per queste ragioni, si è deciso di considerare esclusivamente i parametri termici acquisiti sul dente inferiore, e su di essi sono stati costruiti i grafici parametro termografico-tensione, fondamentali per la metodologia TCM (Figure 4.2 e 4.3).

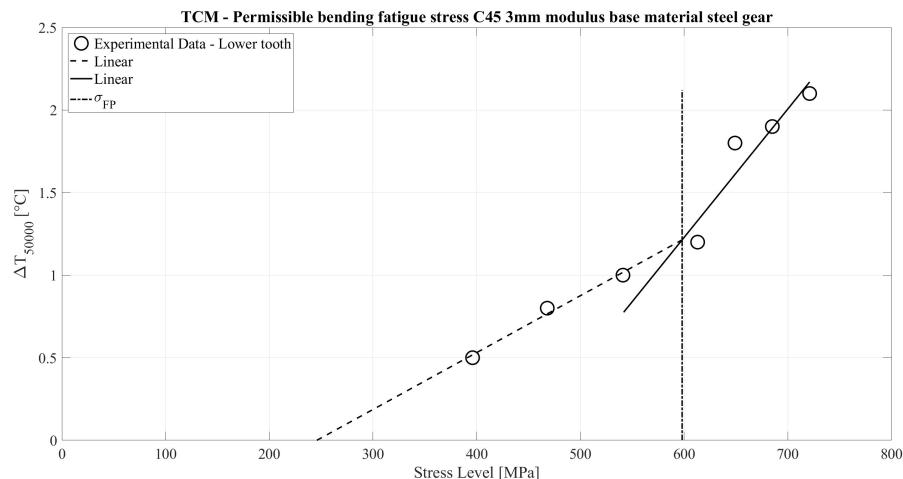


**Figura 4.2:** Grafico riportante gli incrementi di temperatura in funzione della  $\sigma_{\max}$  applicata per la ruota in C45 base

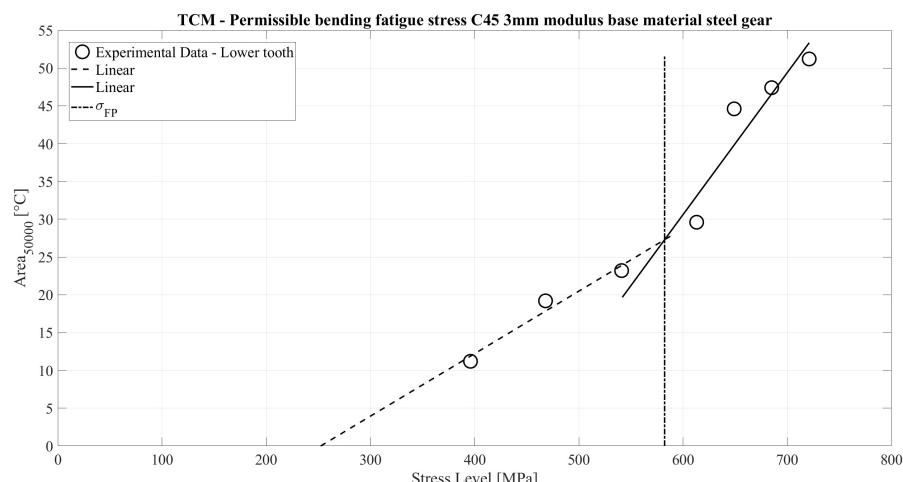


**Figura 4.3:** Grafico riportante i valori di area sottesa in funzione della  $\sigma_{\max}$  applicata per la ruota in C45 base

Dai grafici riportati nella pagina precedente è possibile osservare come i primi quattro dati seguano un andamento diverso rispetto agli altri tre, in accordo con quanto discusso nel paragrafo 2.2. Il limite di fatica è infatti individuato nel punto in cui si verifica una discontinuità nella crescita dei parametri termici poiché, al di sotto di tale limite, si manifestano fenomeni dissipativi differenti rispetto a quelli osservati quando il carico supera il limite di fatica. Il metodo TCM nella versione *retta-retta* è stato quindi applicato sui dati termografici raccolti e i risultati ottenuti saranno presentati nei prossimi grafici.



**Figura 4.4:** Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale base con parametro termico  $\Delta T_{temp}$



**Figura 4.5:** Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale base con parametro termico  $A_{term}$

Si riassumono nella seguente tabella le stime di  $\sigma_{FP}$  ottenute dai grafici sopra riportati (figure 4.5 e 4.4).

Parametro termico	$\sigma_{FP(TCM)}$ [MPa]
$\Delta T_{temp}$	598
$A_{term}$	582

**Tabella 4.2:**  $\sigma_{FP}$  stimate attraverso il metodo TCM per la ruota in materiale base

È immediatamente evidente che, nonostante siano stati utilizzati due parametri termici differenti, la stima di  $\sigma_{FP(TCM)}$  risulta complessivamente comparabile, sebbene il valore ottenuto attraverso gli incrementi di temperatura sia leggermente superiore rispetto a quello derivante dalle aree sottese. Inoltre, i risultati ottenuti sono coerenti con le previsioni delle stime effettuate secondo la norma ISO 6336.

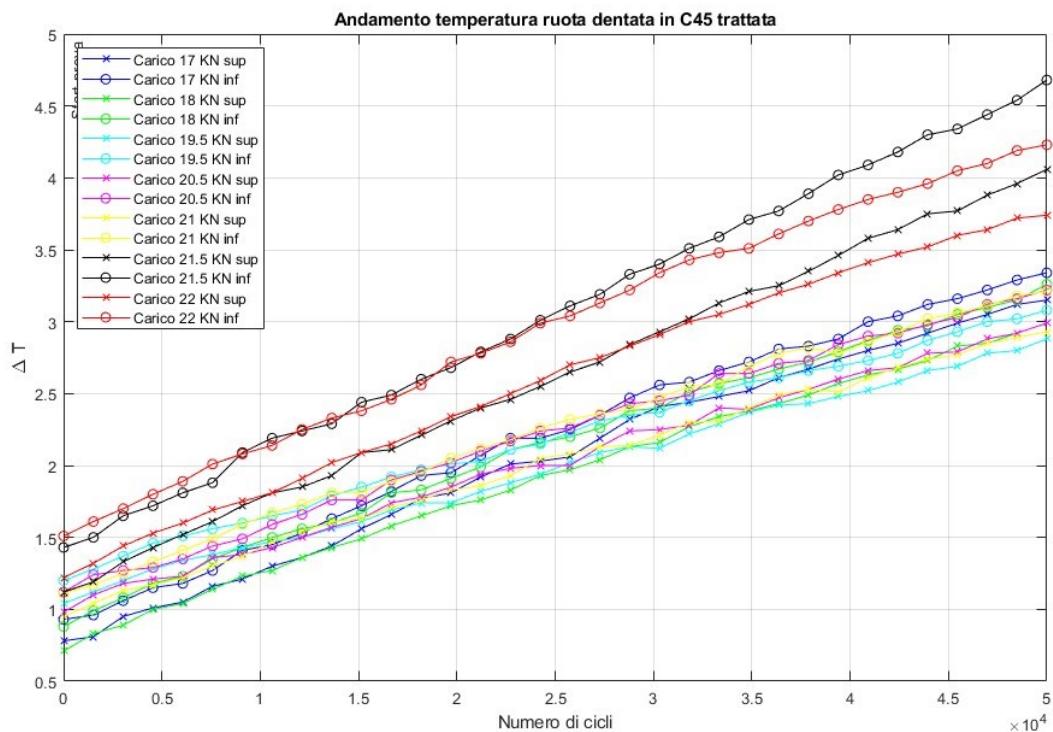
Si è scelto di applicare esclusivamente il metodo TCM nella sua formulazione originale, poiché i punti acquisiti si trovano nell'intorno del limite di fatica, e per tale ragione non era possibile osservare un trend di tipo parabola-legge di potenza.

Per quanto riguarda la ruota dentata in acciaio C45 temprata i risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella:

Ruota dentata in C45 con trattamento di tempra induttiva							
$F_{vib\ max}$ [N]	N. cicli [-]	Frequenza [Hz]	Dente inferiore		Dente superiore		
			$\Delta T_{temp}$ [°C]	$A_{term}$ [°C·s]	$\Delta T_{temp}$ [°C]	$A_{term}$ [°C·s]	
17000	50000	146,5	3,34	72,6	3,15	67,2	
18000	50000	145,5	3,26	70,7	2,99	63,4	
19500	50000	145	3,08	72,2	2,88	65,3	
20500	50000	145	3,22	73,1	2,99	66,9	
21000	50000	145	3,21	73,8	2,93	66,2	
21500	50000	146	4,68	100,7	4,06	86,3	
22000	50000	146	4,23	97,7	3,74	85,4	

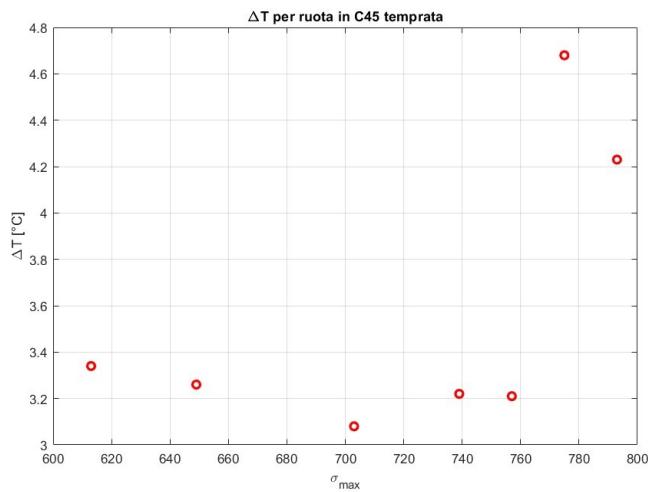
**Tabella 4.3:** Risultati ruota dentata in C45 trattato termicamente

Così come per la ruota dentata in materiale base, anche per quella temprata per ogni prova sono stati eseguiti 50000 cicli ad una frequenza di circa 145 Hz. Anche in questo caso i parametri termografici del dente inferiore risultano sistematicamente più alti di quello superiore per le medesime motivazioni discusse prima, nonostante tale fenomeno risulti notevolmente accentuato. Nel grafico seguente si riporta l'andamento puntuale della temperatura durante l'esecuzione delle prove a diversi carichi per la ruota dentata trattata con tempra induttiva.

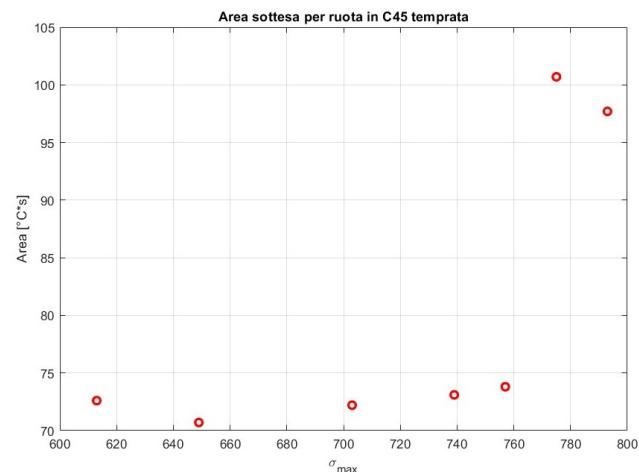


**Figura 4.6:** Grafico riportante gli incrementi di temperatura puntuali registrati durante le prove per la ruota in C45 temprata

Analogamente a quanto fatto per la ruota dentata in materiale base, anche per quella temprata sono stati considerati esclusivamente i parametri termografici acquisiti sul dente inferiore. A partire da questi dati, sono stati sviluppati i grafici riportati nelle Figure 4.7 e 4.8.



**Figura 4.7:** Grafico riportante gli incrementi di temperatura in funzione della  $\sigma_{\max}$  applicata per la ruota dentata in C45 temprato

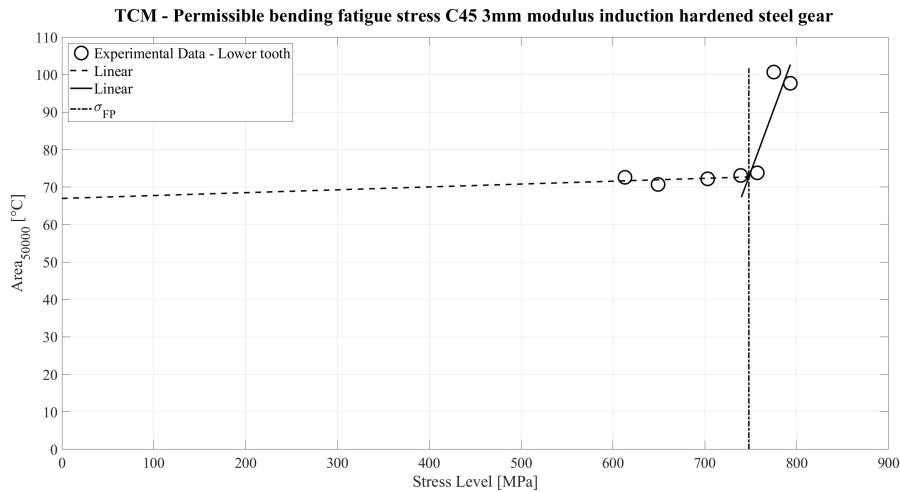


**Figura 4.8:** Grafico riportante i valori di area sottesa in funzione della  $\sigma_{\max}$  applicata per la ruota in C45 temprato

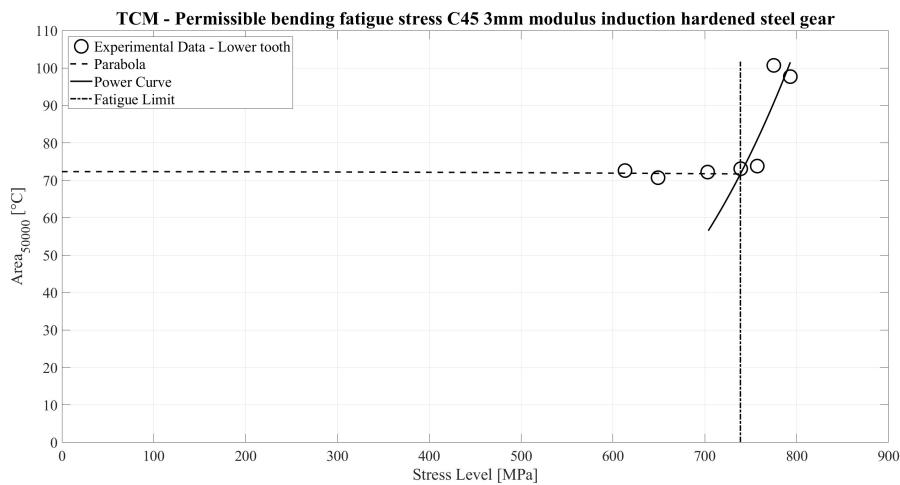
Analizzando i grafici, si osserva una significativa presenza di fluttuazioni, particolarmente pronunciate quando l'incremento di temperatura  $\Delta T_{\text{temp}}$  viene considerato come parametro termico. Al contrario, l'area sottesa  $A_{\text{term}}$  si dimostra un parametro più robusto e affidabile, poiché meno suscettibile a fattori esterni che potrebbero influenzare i risultati. In generale, l'uso dell'area sottesa come parametro termico è

preferibile quando gli incrementi di temperatura sono relativamente bassi (nell'ordine di grandezza di circa 2-5 °C), poiché presenta una maggiore stabilità rispetto alla variazione di temperatura. Tuttavia, nel caso di incrementi di temperatura più elevati, entrambi i parametri termici dimostrano un'affidabilità comparabile.

Anche in questo caso è stata applicato il metodo TCM sui parametri termici rilevati i cui risultati si riassumono nei seguenti grafici.



**Figura 4.9:** Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM retta-retta della ruota in materiale con trattamento di tempra induttiva con parametro termico  $A_{term}$



**Figura 4.10:** Grafico estrapolato dall'applicazione del metodo TCM parabola-legge di potenza della ruota con trattamento di tempra induttiva base con parametro termico  $A_{term}$

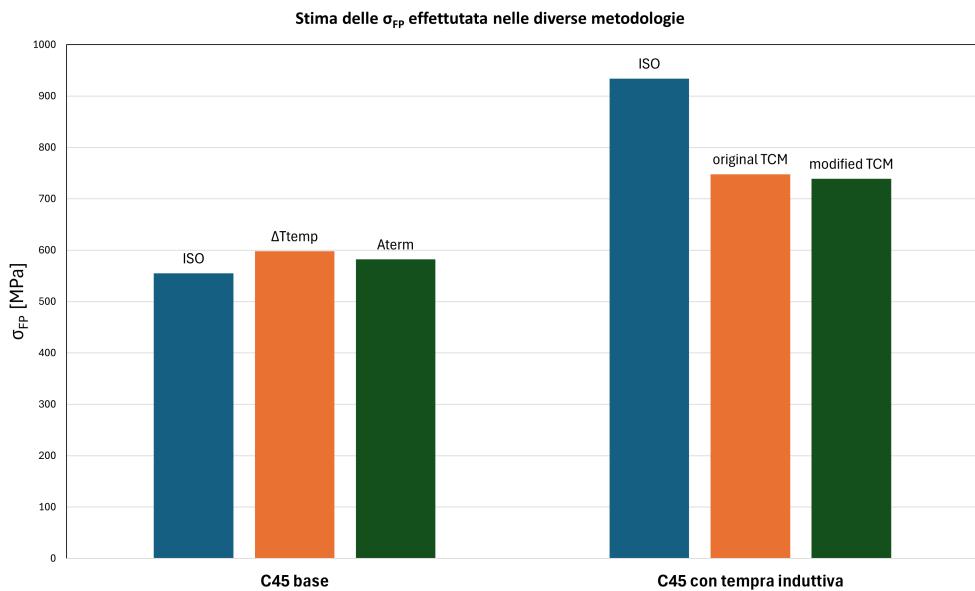
Si sintetizza nella seguente tabella le stime di  $\sigma_{FP}$  ottenute dai grafici sopra riportati (figure 4.9 e 4.10).

Parametro termico	$\sigma_{FP(TCM)}$ [MPa]
original TCM	748
modified TCM	739

**Tabella 4.4:**  $\sigma_{FP}$  stimate attraverso il metodo TCM per la ruota dentata con trattamento di tempra induttiva

Sia il TCM nella sua versione originale (*retta-retta*) che il TCM modificato (*parabola-legge di potenza*) hanno portato a due risultati molto vicini e perfettamente comparabili. La  $\sigma_{FP(TCM)}$  stimata per la ruota temprata risulta essere più alta delle stima fatta per l'ingranaggio in materiale base, il che è in linea con quanto previsto, poichè il trattamento superficiale conferisce una maggiore resistenza ai carichi affaticanti.

È stato effettuato un confronto tra la stima del limite di fatica effettuata attraverso il metodo TCM nelle sue due declinazioni ( $\sigma_{FP(TCM)}$ ) e la  $\sigma_{FP}$  di riferimento stimata con la normativa ISO-6336.



**Figura 4.11:** Istogramma riassumendo le  $\sigma_{FP}$  stimate con le diverse metodologie

È evidente come, per la ruota dentata in materiale C45 non trattato, le stime del limite di fatica ottenute mediante il metodo TCM siano approssimativamente equivalenti alla tensione  $\sigma_{FP}$  di riferimento, calcolata secondo la normativa ISO. In effetti, si riscontra un errore massimo del 7%, confermando così l'affidabilità del TCM, che si dimostra una soluzione valida per la stima del limite di fatica di componenti e materiali, offrendo una procedura più rapida ed economica rispetto al metodo standard Stair-Case.

Per quanto riguarda la ruota dentata sottoposta a tempra induttiva, i risultati appaiono inizialmente molto inferiori rispetto alla tensione  $\sigma_{FP}$  di riferimento stimata secondo la norma ISO-6336, con un errore massimo di circa il 21%. Tuttavia, tale discrepanza è giustificata dalla tipologia di tempra applicata all'ingranaggio, che non è stata ottimizzata per migliorare la resistenza a flessione. In particolare, dalle analisi metallografiche e dalle prove di durezza condotte sull'ingranaggio, è emerso che la tempra è stata realizzata fin sotto il diametro primitivo, non raggiungendo il raccordo di fondo dente; di conseguenza, sebbene si sia verificato un aumento di durezza al piede del dente, questo incremento è nettamente inferiore a quello ottenibile con una tempra completa. Alla luce di quanto detto, è ragionevole supporre che il limite di fatica della ruota dentata in C45 temprata sia inferiore alla  $\sigma_{FP}$  calcolata secondo la norma ISO, ma superiore alla tensione ammissibile per l'ingranaggio in C45 non trattato, dato l'aumento di durezza al piede del dente confermando nuovamente l'affidabilità del metodo TCM.

# Capitolo 5

## Conclusioni

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è stato quello di investigare il comportamento a fatica degli ingranaggi, con particolare attenzione alla stima del limite di fatica utilizzando metodologie innovative basate sulla termografia. I risultati ottenuti nel corso delle prove sperimentali hanno permesso di confermare l'efficacia delle metodologie termografiche impiegate, evidenziando la capacità di queste ultime di fornire una stima accurata del limite di fatica degli ingranaggi. In particolare, la metodologia TCM, analizzata sia nella sua versione classica (*retta-retta*) che in quella più recente (*parabola-legge di potenza*), ha mostrato risultati promettenti, evidenziando una robustezza nell'interpretazione dei dati termografici. I parametri termici scelti, come la differenza di temperatura ( $\Delta T_{\text{temp}}$ ) e l'area sottesa alla curva temperatura-tempo ( $A_{\text{term}}$ ), si sono rivelati affidabili nel caratterizzare la risposta a fatica del materiale, permettendo di identificare con precisione il limite di fatica degli ingranaggi testati. Le prove sperimentali condotte hanno inoltre evidenziato come i trattamenti termici applicati agli ingranaggi possano influenzare significativamente la loro resistenza a fatica, confermando l'importanza di un'accurata progettazione e lavorazione degli ingranaggi in applicazioni critiche. Un limite dello studio risiede nel fatto che le prove sono state condotte su un numero limitato di campioni, il che potrebbe influenzare la generalizzabilità dei risultati. Tuttavia, le metodologie sviluppate e testate in questa tesi rappresentano una solida base per future ricerche nel campo della stima del limite di fatica attraverso tecniche non distruttive. È stata condotta, infatti, una campagna sperimentale su prove di flessione dei denti di ingranaggio utilizzando la metodologia STBF nella sua versione europea, mediante l'installazione di sovrastrutture su un vibroforo Amsler. L'utilizzo di tale apparecchiatura ha consentito, per la prima volta, di eseguire prove di flessione a fatica a frequenze significativamente più elevate rispetto a quelle comunemente riportate in letteratura, permettendo altresì di rilevare incrementi di temperatura apprezzabili e di velocizzare notevolmente il tempo di prova.

Per quanto riguarda i futuri sviluppi, assume particolare rilevanza il miglioramento delle sovrastrutture montate sul vibroforo necessarie per l'esecuzione dei test. Dai dati ottenuti, è emerso che il dente inferiore degli ingranaggi fosse soggetto a sollecitazioni maggiori rispetto a quello superiore. Questo fenomeno è riconducibile al fatto che il carico, applicato dall'alto verso il basso, si ripartiva su due punti di applicazione: il dente superiore e il supporto della ruota dentata. Al contrario, il dente inferiore, essendo l'unico punto di reazione vincolata, sopportava l'interezza del carico applicato. Alla luce di queste osservazioni, il setup sperimentale potrebbe essere ottimizzato mediante l'adozione di sovrastrutture che eliminino la necessità del supporto per la ruota dentata, riducendo così le sollecitazioni non uniformi sui denti. Inoltre, si suggerisce di ampliare il numero di campioni testati, includendo diverse tipologie di materiali e trattamenti superficiali, per valutare l'applicabilità generale della metodologia proposta. In aggiunta, l'integrazione di modelli numerici avanzati potrebbe migliorare ulteriormente la precisione delle stime e permettere un confronto diretto con i dati sperimentali.

In conclusione, il lavoro svolto rappresenta un contributo significativo nella comprensione del comportamento a fatica degli ingranaggi e nella validazione di tecniche innovative per la stima del limite di fatica, aprendo la strada a ulteriori sviluppi nel campo della progettazione meccanica e della diagnostica preventiva.

# Bibliografia

- [1] Eric Charkaluk e Andrei Constantinescu. «Dissipative aspects in high cycle fatigue». eng. In: *Mechanics of materials* 41.5 (2009), pp. 483–494. ISSN: 0167-6636 (cit. a p. 1).
- [2] Harald Zenner e Karsten Hinkelmann. «August Wöhler – founder of fatigue strength research». eng. In: *Steel construction : design and research* 12.2 (2019), pp. 156–162. ISSN: 1867-0520 (cit. a p. 4).
- [3] Wikipedia. *August Wöhler*. 2024. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/August\\_W%C3%B6hler](https://it.wikipedia.org/wiki/August_W%C3%B6hler) (cit. a p. 4).
- [4] UNI – Ente Italiano di Normazione. «UNI3964-Prove meccaniche dei materiali metallici.» In: (1985) (cit. alle pp. 4, 17).
- [5] B Roger Rabb. «Staircase testing-confidence and reliability». In: *WIT Transactions on Engineering Sciences* 40 (2003) (cit. a p. 4).
- [6] I. M. W. Ekaputra, Rando Tungga Dewa, Gunawan Dwi Haryadi e Seon Jin Kim. «Fatigue Strength Analysis of S34MnV Steel by Accelerated Staircase Test». In: *Open Engineering* 10.1, 48 (mag. 2020), p. 48. DOI: 10.1515/eng-2020-0048 (cit. a p. 6).
- [7] C. E. Feltner e Jo Dean Morrow. «Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture». In: *Journal of Basic Engineering* 83.1 (mar. 1961), pp. 15–22. ISSN: 0021-9223. DOI: 10.1115/1.3658884. eprint: [https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/83/1/15/5503111/15\\\_1.pdf](https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/83/1/15/5503111/15\_1.pdf). URL: <https://doi.org/10.1115/1.3658884> (cit. a p. 8).
- [8] F. CURÀ, A. E. GALLINATTI e R. SESANA. «Dissipative aspects in thermographic methods». In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 35.12 (2012), pp. 1133–1147. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2012.01701.x>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1460-2695.2012.01701.x>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1460-2695.2012.01701.x> (cit. alle pp. 8, 9, 11).

- [9] Connesson, N., Maquin, F. e Pierron, F. «Dissipative energy as an indicator of material microstructural evolution». In: *EPJ Web of Conferences* 6 (2010), p. 38013. DOI: 10.1051/epjconf/20100638013. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100638013> (cit. a p. 9).
- [10] André Chrysochoos e Hervé Louche. «An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation». In: *International Journal of Engineering Science* 38.16 (2000), pp. 1759–1788. ISSN: 0020-7225. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7225\(00\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7225(00)00002-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722500000021> (cit. a p. 9).
- [11] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru e A. Galtier. «Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels». In: *International Journal of Fatigue* 26.3 (2004), pp. 221–229. ISSN: 0142-1123. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00171-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112303001713> (cit. a p. 9).
- [12] F. Curà e R. Sesana. «Mechanical and thermal parameters for high-cycle fatigue characterization in commercial steels». In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 37.8 (2014), pp. 883–896. DOI: <https://doi.org/10.1111/ffe.12151>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ffe.12151>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ffe.12151> (cit. a p. 9).
- [13] ASTM International. *Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. ASTM E466-72. ASTM International, 1972. URL: <https://www.astm.org/Standards/E466.htm> (cit. a p. 12).
- [14] W. Kratzsch, H. Meier e F. K. S. Hsu. «Investigations on the Tooth Root Bending Strength and the Fatigue Fracture Characteristics of Case-Carburized and Shot-Peened Gears of Different Sizes». In: *Journal of Mechanical Engineering Science* 229.5 (2015), pp. 825–837. DOI: 10.1177/0954406214555565 (cit. a p. 14).
- [15] Giorgio Gasparini, Stefano Mariani, Damiano Colombo e Carlo Gorla. «Bending Fatigue Tests of Helicopter Case Carburized Gears: Influence of Material, Design and Manufacturing Parameters». In: *Gear Technology* 26.6 (2009), pp. 58–63 (cit. a p. 15).
- [16] Society of Automotive Engineers. *SAE J1619: Surface Fatigue Strength of Powder Metallurgy (P/M) Gears*. SAE International. SAE Standard. 2007. URL: [https://www.sae.org/standards/content/j1619\\_200710/](https://www.sae.org/standards/content/j1619_200710/) (cit. a p. 15).

## BIBLIOGRAFIA

---

- [17] UNI Ente Italiano di Normazione. *Norma UNI 7874:1979 - Acciai fucinati e stampati: Bonifica e normalizzazione*. Italian. 1979. URL: [<https://store.uni.com/uni-7874-1979>] (<https://store.uni.com/uni-7874-1979>) (cit. a p. 17).
- [18] *Calcolo della capacità di carico degli ingranaggi cilindrici a denti diritti ed elicoidali – Parte 1: Principi e applicazioni generali*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2020. URL: <https://store.uni.com/uni-iso-6336-1-2020> (cit. a p. 21).