



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea: Luglio 2026

Influenza dei processi di lavorazione sulle curve S-N di acciai legati

Relatori:

Prof.ssa Curà Francesca Maria
Corsaro Luca

Candidati:

Fontana Giorgio

Abstract

L'analisi della resistenza a fatica dei componenti meccanici rappresenta una sfida fondamentale nell'ingegneria moderna, in particolare per quelle applicazioni – quali i settori automobilistico, aerospaziale e delle macchine utensili – in cui i componenti sono soggetti a carichi ciclici ripetuti. È noto che la vita a fatica è fortemente influenzata dallo stato superficiale del componente, il quale a sua volta dipende dai parametri di taglio adottati durante la lavorazione meccanica. Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito del progetto europeo FABEST, il cui obiettivo è lo studio della correlazione tra parametri di taglio, rugosità superficiale e vita a fatica per lo sviluppo di un modello predittivo.

Sono state analizzate cinque serie di provini in acciaio 42CrMo4+QT, designate A40, A41, A42, A43 e A44, realizzate con differenti parametri di tornitura. Le serie A43 e A44 sono state sottoposte a un trattamento di distensione delle tensioni residue, rispettivamente a partire dalle configurazioni A41 e A42, al fine di isolare l'effetto delle tensioni residue sulla risposta a fatica. La rugosità superficiale è stata misurata tramite profilometro PGS 200 su 4 profili angolari con 3 ripetizioni per profilo. I dati sono stati elaborati secondo la norma ISO 21920:2020 mediante un codice dedicato in MATLAB, con estrazione dei parametri di rugosità. È stata condotta un'analisi della varianza con il software Minitab per valutare le differenze statisticamente significative di rugosità tra le cinque serie.

Per la previsione della vita a fatica sono stati utilizzati i modelli di Kohout-Véchet e Murakami. Le curve S-N di partenza per ciascuna serie sono state ricavate dai provini con gli stessi parametri di taglio, sulla base dei dati del progetto FABEST. È stato inoltre applicato il fattore di correzione k_R della linea guida FKM per separare l'effetto della rugosità e ottenere le curve del materiale con superficie ideale (liscia). È stato sviluppato un modello numerico agli elementi finiti in ANSYS Mechanical: la geometria tridimensionale dei provini è stata realizzata in SolidWorks e importata in ANSYS. Le simulazioni hanno utilizzato il Fatigue Tool con le curve KV di input e un criterio di convergenza del 10%. Le durate fornite da ANSYS sono state successivamente elaborate mediante un codice MATLAB per ricavare le curve KV simulate e confrontarle con quelle di input e con le curve corrette FKM.

I risultati mostrano una correlazione significativa tra parametri di taglio e rugosità, evidenziata dall'ANOVA. La serie A40 ha presentato la rugosità più bassa e il miglior comportamento a fatica simulato. La correzione FKM ha evidenziato l'importanza della rugosità come fattore limitante.

Sommario

Abstract.....	a
Indice delle figure.....	e
Indice delle tabelle.....	f
Introduzione.....	1
1. Stato dell'arte e riferimenti normativi	3
1.1. Parametri di taglio, rugosità e vita a fatica: stato dell'arte	3
1.1.1. Effetto dei parametri di taglio sulla rugosità superficiale	3
1.1.2. Effetto dei parametri di taglio sulla vita a fatica	4
1.1.3. Il modello di Murakami applicato alla rugosità	5
1.1.4. Modelli di correlazione tra parametri di taglio e vita a fatica	6
1.1.5. L'importanza dell'integrità superficiale: rugosità e tensioni residue	6
1.1.6. Implicazioni per il presente studio	6
1.2. Rugosità superficiale secondo ISO 21920.....	7
1.2.1. Metodi di filtraggio dei profili	7
1.2.2. Setting Classes	8
1.2.3. Principali parametri di rugosità secondo ISO 21920	8
1.3. Tensioni residue indotte dalla lavorazione meccanica	11
1.3.1. Effetto delle tensioni residue sulla resistenza a fatica	11
1.3.2. Rilassamento delle tensioni residue	12
1.3.3. Tensioni residue nel progetto FABEST	12
1.3.4. Modellazione numerica delle tensioni residue	12
1.4. Modello di Kohout-Věchet per il calcolo della vita a fatica	13
1.4.1. Limiti dei modelli tradizionali	13
1.4.2. Derivazione del nuovo modello	14
1.4.3. Significato geometrico dei parametri	15
1.4.4. Vantaggi del modello KV	15
1.5. Modello di Murakami per l'effetto della rugosità superficiale	16
1.5.1. Il parametro $\sqrt{area}$	16
1.5.2. Applicazione del modello alla rugosità superficiale	16
1.5.3. Valutazione della dimensione equivalente di difetto per rugosità: $\sqrt{area_R}$	17

1.5.4. Applicazione al presente caso di studio	18
2. Materiali e metodi sperimentali.....	19
2.1. Materiale in esame.....	19
2.1.1. Composizione chimica	20
2.1.2. Proprietà meccaniche statiche	20
2.1.3. Considerazioni sulla durezza	21
2.1.4. Geometria dei provini	21
2.1.5. Processo di produzione e parametri di taglio	22
2.1.6. Trattamento di distensione delle tensioni residue	23
2.1.7. Considerazioni sul processo e criticità comuni	23
2.2. Misura della rugosità superficiale	24
2.2.1. Strumentazione	24
2.2.2. Calibrazione del profilometro	26
2.2.3. Procedura operativa standard SOP	29
2.2.4. Implementazione del codice MATLAB secondo ISO 21920	31
2.3. Analisi statistica e ANOVA	33
2.4. Utilizzo dei dati per la correzione delle curve S-N	33
3. Modello numerico.....	34
3.1. Curve S-N di input: dalle curve alla correzione FKM	34
3.1.1. Procedura di correzione	34
3.2. Modellazione FEM in ANSYS	36
3.2.1. Semplificazione geometrica	36
3.2.2. Modellazione CAD e importazione	37
3.2.3. Proprietà del materiale	38
3.2.4. Condizioni al contorno e carichi applicati	39
3.2.5. Impostazione del Fatigue Tool e criterio di convergenza	40
3.3. Codice MATLAB per il calcolo delle nuove curve Kohout-Věchet	40
3.3.1. Motivazione	40
3.3.2. Implementazione del codice	41
4. Risultati.....	42
4.1. Risultati delle tensioni residue indotte da lavorazione meccanica	43
4.1.1. Anova sulle tensioni residue	43
4.1.2. Confronto con le serie di riferimento	45
4.1.3. Considerazioni sul presente lavoro	46

4.2. Risultati sulla rugosità superficiale	47
4.2.1. Valori dei parametri di rugosità	47
4.2.2. Confronto tra le serie	52
4.2.3. Analisi della varianza ANOVA	52
4.2.4. Analisi dei parametri di processo legati alla rugosità	54
4.2.5. Confronto con il difetto superficiale macroscopico	55
4.2.6. Discussione dei risultati di rugosità	55
4.3. Limite di fatica secondo Murakami.....	56
4.3.1. Determinazione del passo di rugosità	56
4.3.2. Calcolo di $\sqrt{area_R}$	57
4.3.3. Calcolo di $\sqrt{area_R}$ e σ_w per le serie analizzate	57
4.3.4. Confronto tra le serie	58
4.3.5. Confronto con il coefficiente di correzione FKM	58
4.3.6. Discussione dei risultati del modello di Murakami	59
4.4. Prove a fatica mediante software FEM ANSYS	59
4.4.1. Risultati delle simulazioni	60
4.4.2. Verifica della convergenza	61
4.4.3. Analisi delle curve KV simulate	61
5. Conclusioni e sviluppi futuri	64
Sviluppi futuri.....	65
Bibliografia.....	i

Indice delle figure

Figura 1 Relazione geometrica con il parametro di Murakami.....	18
Figura 2 Provini a disposizione con numerazione	19
Figura 3 Geometria del provino standard.....	21
Figura 4 Finitura superficiale dei provini.....	22
Figura 5 Profilometro SM PGS 200.....	24
Figura 6 Piano e Tastatore del rugosimetro SM RTP 80	25
Figura 7 Parametri di misura SM RTP 80	25
Figura 8 Interfaccia grafica del rugosimetro	26
Figura 9 Piastra di calibrazione SM per confronto Rugosimetro e Profilometro.....	27
Figura 10 Confronto del profilo calibrato tra i due strumenti	28
Figura 11 Supporto per vincolare i provini	28
Figura 12 Diagramma di lavoro del codice implementato su MATLAB.....	31
Figura 13 GUI dell'app Profi2Rug in ambiente MATLAB	32
Figura 14 Modifica del modello KV con correzione FKM.....	36
Figura 15 Caratteristiche geometriche del provino per le prove a fatica	37
Figura 16 Modello 3D del provino semplificato.....	37
Figura 17 Mesh automatica generata da ANSYS.....	38
Figura 18 Carico cilindrico (in rosso) e vincolo cilindrico (in blu)	39
Figura 19 Valori di tensione residua per serie	44
Figura 20 Confronto tra tensioni residue.....	45
Figura 21 Valori di Ra per la serie A40	49
Figura 22 Valori di Ra per le serie A41 ed A43	49
Figura 23 Valori di rugosità per le serie A42 ed A44	49
Figura 24 Confronto tra le rugosità dei provini nelle diverse famiglie di appartenenza.....	52
Figura 25 Main effect plot per la rugosità.....	54
Figura 26 Esempio di profilo di rugosità normalizzato con groove visibile (A35/A40)	55
Figura 27 Stress equivalente sul componente con ANSYS (22500 N, serie A41/A43).....	59
Figura 28 Curva KV per la serie A40.....	61
Figura 29 Curva KV A41 ed A43	62
Figura 30 Curva KV per le serie A42 ed A44	62

Indice delle tabelle

Tabella 1 Parametri per le diverse Setting Classes secondo ISO 21920:2020	8
Tabella 2 Caratteristiche chimiche del 42CrMo4 + QT	20
Tabella 3 Proprietà meccaniche del 42CrMo4 + QT.....	20
Tabella 4 Parametri di taglio per tornitura dei provini	22
Tabella 5 Specifiche tecniche della misura su PGS 200	29
Tabella 6 Valori di partenza del modello di KV per le serie di riferimento	38
Tabella 7 Valori del materiale utilizzati in ANSYS.....	38
Tabella 8 Valori di tensione residua sul provino	43
Tabella 9 Anova sulle tensioni residue assiali	44
Tabella 10 Valori di rugosità medi sul provino	47
Tabella 11 Valori di rugosità statistici per le diverse serie di provini	50
Tabella 12 ANOVA: rugosità-serie di appartenenza	53
Tabella 13 Dati statistici del modello ANOVA	53
Tabella 14 Test di Tukey per le serie di appartenenza.....	53
Tabella 15 Calcolo della tensione limite a fatica per Murakami	57
Tabella 16 Durata stimata mediante software ANSYS	60
Tabella 17 Parametri KV per le serie trattate	63

Introduzione

Background e contesto del progetto FABEST

La previsione della vita a fatica dei componenti meccanici rappresenta una sfida centrale nell'ingegneria moderna, in particolare per quelle applicazioni – quali i settori automobilistico, aerospaziale e delle macchine utensili – in cui i componenti sono soggetti a carichi ciclici ripetuti. È noto da decenni che la resistenza a fatica non dipende esclusivamente dalle proprietà intrinseche del materiale, ma è fortemente influenzata dallo stato superficiale del componente, dalle tensioni residue, dalla durezza e dalla presenza di difetti. In particolare, i parametri di taglio adottati durante la lavorazione meccanica (velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata) determinano la rugosità superficiale finale, la quale a sua volta agisce da concentratore di tensioni e riduce significativamente la durata del componente. Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito del progetto europeo FABEST, un'iniziativa di collaborazione internazionale tra diverse istituzioni accademiche e industriali. L'obiettivo generale del progetto FABEST è lo studio sistematico della correlazione tra parametri di taglio, rugosità superficiale e vita a fatica, al fine di sviluppare modelli predittivi in grado di ottimizzare i processi di lavorazione meccanica per massimizzare la durata a fatica dei componenti. Come documentato da *Papuga et al.*, i risultati sperimentali ottenuti nell'ambito di FABEST costituiscono una base dati ricca e accurata, caratterizzata dall'utilizzo di un singolo lotto di materiale (acciaio 42CrMo4+QT) per garantire la consistenza dei risultati.

Motivazioni della ricerca

Nonostante la letteratura tecnica offra numerosi contributi sull'effetto della rugosità sulla fatica, la maggior parte degli studi si concentra su provini lucidati o comunque caratterizzati da finiture superficiali ottimali, che difficilmente rappresentano le condizioni reali dei componenti industriali. Inoltre, l'isolamento del singolo effetto (ad esempio, il solo effetto della rugosità) è reso complesso dalla presenza di fattori concomitanti quali le tensioni residue indotte dalla lavorazione, le disomogeneità di durezza nella sezione del semilavorato e, come recentemente osservato, il fenomeno dell'autoriscaldamento del materiale durante prove a frequenze elevate. Il progetto FABEST si distingue proprio per aver affrontato questa complessità in modo sistematico: accanto alle prove di fatica, sono state condotte analisi approfondite di rugosità (secondo la norma ISO 21920), mappe di durezza Vickers, misure di tensioni residue tramite diffrazione RX e osservazioni microstrutturali al microscopio ottico ed elettronico. Questa impostazione consente di separare, almeno parzialmente, i diversi contributi e di valutare l'effetto reale della rugosità sulla vita a fatica.

Obiettivi della tesi

Alla luce di quanto sopra, il presente lavoro di tesi si propone i seguenti obiettivi:

- Analizzare la rugosità superficiale di diverse famiglie di provini realizzati con differenti parametri di taglio, utilizzando un profilometro e implementando un codice dedicato per l'estrazione dei parametri di rugosità secondo la norma ISO 21920.
- Condurre con metodi statistici un'analisi per valutare le differenze di rugosità rispetto ai parametri di processo con il fine di accertare quali parametri ottimizzano la rugosità stessa

- Correlare la rugosità alla vita a fatica dei provini, confrontando i risultati sperimentali con i modelli predittivi di Kohout-Vechet (KV) e Murakami.
- Validare i risultati tramite simulazioni numeriche agli elementi finiti con ANSYS, modellando l'effetto della rugosità superficiale sulla distribuzione delle tensioni.
- Proporre sviluppi futuri per il progetto FABEST, tra cui l'implementazione di un sistema vibroforo con misura della temperatura in situ e la costruzione di una mappa sistematica che leghi direttamente i parametri di taglio alla vita a fatica.

Struttura della tesi

La tesi è organizzata in cinque capitoli, oltre all'introduzione e alle conclusioni:

- Capitolo 1 – Stato dell'arte e riferimenti normativi: viene presentata una rassegna della letteratura sui modelli di fatica (Kohout-Véchet, Murakami) e sulla norma ISO 21920 per la caratterizzazione della rugosità superficiale. Vengono inoltre discussi i fattori concomitanti che influenzano la resistenza a fatica, con particolare riferimento ai risultati del progetto FABEST.
- Capitolo 2 – Materiali e metodi sperimentali: vengono descritti i materiali (acciaio 42CrMo4+QT) e le cinque serie di provini analizzate (A40, A41, A42, A43, A44), con i relativi parametri di tornitura e il trattamento di distensione delle tensioni residue applicato alle serie A43 e A44. Vengono inoltre illustrate le apparecchiature per la misura della rugosità (profilometro PGS 200), la procedura di calibrazione, l'implementazione del codice MATLAB secondo ISO 21920, e i modelli teorici per la previsione della vita a fatica (Kohout-Véchet, Murakami, correzione FKM).
- Capitolo 3 – Analisi della rugosità e statistica: vengono presentati i risultati delle misure di rugosità per le cinque serie, l'elaborazione tramite codice MATLAB e l'analisi della varianza condotta con software statistico Minitab per valutare le differenze tra le famiglie di provini.
- Capitolo 4 – Modello numerico agli elementi finiti: viene descritto lo sviluppo del modello numerico in ANSYS Mechanical, a partire dalla modellazione CAD in SolidWorks. Vengono illustrate le impostazioni della mesh, le condizioni al contorno, l'utilizzo del Fatigue Tool con le curve KV di input (ricavate dai provini con stessi parametri di taglio) e il criterio di convergenza del 10%. Le durate fornite da ANSYS sono state elaborate mediante un codice MATLAB per ricavare le curve KV simulate e confrontarle con le curve corrette FKM (materiale liscio). Vengono infine discussi i risultati delle simulazioni e l'incremento di vita a fatica attribuibile alla rimozione della rugosità.
- Capitolo 5 – Sviluppi futuri: vengono descritte le proposte per il progetto FABEST, includendo l'implementazione di un sistema vibroforo con misura in situ della temperatura di taglio e la costruzione di una mappa sistematica che leghi direttamente i parametri di taglio alla vita a fatica.
- Conclusioni: vengono riassunti i contributi originali del lavoro, discusse le limitazioni dello studio (con particolare riferimento alle semplificazioni adottate nel modello numerico e alla presenza del difetto superficiale residuo) e fornite raccomandazioni per ricerche future.

1. Stato dell'arte e riferimenti normativi

La resistenza a fatica dei componenti meccanici è un aspetto critico nella progettazione di parti soggette a carichi ciclici. È noto che la vita a fatica di un componente non dipende esclusivamente dalle proprietà intrinseche del materiale, ma è fortemente influenzata da fattori esterni quali lo stato superficiale, le tensioni residue, la durezza e la presenza di difetti. In particolare, i parametri di taglio adottati durante la lavorazione meccanica determinano la rugosità superficiale finale, che a sua volta agisce da concentratore di tensioni e riduce la durata del componente. Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito del progetto europeo FABEST, il cui obiettivo è lo studio della correlazione tra parametri di taglio, rugosità superficiale e vita a fatica. Il progetto prevede una collaborazione internazionale tra diverse istituzioni, come documentato da Papuga et al. [2], i cui risultati sperimentali costituiscono una parte fondamentale della campagna FABEST. Questo capitolo fornisce una rassegna dello stato dell'arte relativo ai tre pilastri dello studio:

- La caratterizzazione della rugosità superficiale secondo la norma ISO 21920
- I modelli per la previsione della vita a fatica, con particolare attenzione al modello Kohout-Věchet (KV) e al modello di Murakami basato sul parametro $\sqrt{area}$
- L'effetto di fattori concomitanti quali durezza, tensioni residue e risposta termica del materiale

1.1. Parametri di taglio, rugosità e vita a fatica: stato dell'arte

La relazione tra parametri di taglio, rugosità superficiale e vita a fatica è un tema centrale nella letteratura scientifica dell'ingegneria delle lavorazioni meccaniche. Negli ultimi decenni, numerosi studi hanno indagato come i principali parametri di processo (velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata, geometria dell'utensile, condizioni di lubrorefrigerazione) influenzino la finitura superficiale e, di conseguenza, la resistenza a fatica dei componenti. Il presente paragrafo offre una rassegna sintetica ma esaustiva dei principali contributi in questo ambito, con particolare attenzione agli acciai bonificati ad alta resistenza.

1.1.1. Effetto dei parametri di taglio sulla rugosità superficiale

La rugosità superficiale è il risultato diretto dell'interazione tra utensile e pezzo durante l'asportazione di truciolo. Una recente review di Abellán-Nebot et al. [5] ha identificato fino a venticinque diversi fattori che influenzano la generazione della rugosità nelle operazioni di tornitura e fresatura, classificandoli in tre categorie:

- fattori di setup (utensile, macchina, pezzo)
- fattori operativi (parametri di taglio)
- fattori di processo (usura utensile, formazione di truciolo adesivo, vibrazioni). Questo quadro complesso evidenzia come il controllo della rugosità richieda una comprensione sistematica delle interazioni tra molteplici variabili.

1.1.2. Effetto dei parametri di taglio sulla vita a fatica

L'influenza dei parametri di taglio sulla vita a fatica è mediata principalmente attraverso due canali: la rugosità superficiale (concentratore di tensioni) e le tensioni residue indotte (che modificano la tensione media effettiva del ciclo di fatica).

Diversi studi hanno dimostrato che l'avanzamento è il parametro che più fortemente correla con la riduzione della vita a fatica, a causa del suo effetto dominante sulla rugosità. Come evidenziato da Matuš et al. [1], l'avanzamento da solo non spiega completamente le differenze di comportamento a fatica, poiché altri fattori (tensioni residue, presenza di difetti) possono interferire.

La velocità di taglio mostra una correlazione positiva con la vita a fatica: all'aumentare della velocità di taglio (entro i limiti operativi), si osserva generalmente un miglioramento della resistenza a fatica. Questo effetto è attribuibile sia alla riduzione della rugosità sia alla generazione di tensioni residue compressive più favorevoli. Tuttavia, velocità eccessivamente elevate possono introdurre tensioni residue di trazione o alterazioni microstrutturali dannose, come documentato da Zielinski et al. [11].

La profondità di passata (in particolare l'ultima passata di finitura) gioca un ruolo importante nel determinare lo stato tensionale residuo. Come osservato in [1], profondità di finitura troppo ridotte (0.05 mm) possono rimuovere solo parzialmente lo strato alterato dalle passate precedenti, esponendo tensioni residue di trazione sub-superficiali che riducono la vita a fatica. Profondità maggiori (0.1 ÷ 0.15 mm) consentono di rimuovere efficacemente lo strato alterato, migliorando la risposta a fatica.

Tra i parametri di taglio, l'avanzamento è riconosciuto come il fattore più influente sulla rugosità teorica. Come evidenziato da He et al. [6] in una review sull'influenza dei parametri di tornitura, l'avanzamento determina l'altezza teorica delle rigature residue, con una relazione approssimativamente quadratica. Özdemir et al. [7] hanno applicato il metodo Taguchi e l'ANOVA per identificare i parametri ottimali per la tornitura dell'acciaio 42CrMo4, dimostrando che l'avanzamento contribuisce per oltre il 57% alla variabilità di Ra, seguito dal raggio di punta dell'utensile e dalla velocità di taglio.

Valori ottimali di rugosità sono stati ottenuti con avanzamento ridotto (0.05 mm/giro), velocità elevata (300 m/min) e profondità di passata contenuta (0.1 mm). Anche Kribes et al. [8] hanno confermato, mediante Response Surface Methodology (RSM), che l'avanzamento è il fattore dominante, contribuendo per oltre il 57% alla variabilità di Ra e oltre il 61% alla variabilità di Rt. Bouacha et al. [9] e Suresh et al. [10] hanno ulteriormente validato l'efficacia della RSM nella modellazione dell'influenza dei parametri di taglio sull'integrità superficiale.

La velocità di taglio ha un effetto meno marcato ma comunque significativo. Velocità molto basse favoriscono la formazione di truciolo adesivo (built-up edge), che aumenta la rugosità, mentre velocità elevate tendono a produrre superfici più regolari. Tuttavia, come osservato da Zielinski et al. [11], velocità di taglio troppo elevate possono introdurre tensioni residue di trazione superficiali, dannose per la fatica. Nel caso specifico del progetto FABEST, la velocità di taglio massima ottenibile con un diametro di 8 mm e un mandrino a 4000 rpm è di 100 m/min, valore ritenuto accettabile per un buon compromesso tra qualità superficiale e tensioni residue.

La profondità di passata ha generalmente un effetto secondario sulla rugosità, purché mantenuta entro valori tali da evitare vibrazioni (chatter). Tuttavia, come evidenziato da Allen et al. [12], l'interazione tra profondità di taglio e sporgenza dell'utensile può generare instabilità vibrazionali che compromettono la finitura superficiale.

Le condizioni di lubrorefrigerazione influenzano indirettamente la rugosità riducendo l'attrito e la temperatura nella zona di taglio. Come riportato in una recente review sulle strategie di raffreddamento sostenibili [13], l'uso di fluido di taglio riduce le tensioni residue e migliora la qualità superficiale, anche se il suo effetto diretto sulla rugosità è spesso secondario rispetto all'avanzamento.

1.1.3. Il modello di Murakami applicato alla rugosità

Il modello di Murakami, originariamente sviluppato per difetti e inclusioni [4], è stato successivamente esteso per valutare l'effetto della rugosità superficiale sulla resistenza a fatica. Gli studi pionieristici di Murakami, Takahashi e Yamashita [4] hanno gettato le basi per questa applicazione, dimostrando che il parametro $\sqrt{area_R}$ può essere utilizzato per quantificare l'effetto di intagli periodici di profondità irregolare. In particolare, hanno mostrato che i limiti di fatica di provini in acciaio con rugosità artificiale sono significativamente superiori a quelli di provini con un singolo intaglio, a causa dell'effetto di interferenza tra intagli adiacenti [9]. Questo risultato è di fondamentale importanza per il presente studio, poiché conferma che la rugosità non può essere trattata come un singolo difetto, ma deve essere considerata come un insieme di difetti congiunti.

La metodologia proposta da *Murakami* è stata successivamente adottata e raffinata da numerosi ricercatori. *Sesana* et al. (2017) [25] hanno applicato il modello a provini laminati e sabbiato, utilizzando i parametri R_z e R_{sm} per il calcolo di $\sqrt{area_R}$, e discutendo l'effetto combinato di rugosità e tensioni residue sul limite di fatica. Questo approccio è particolarmente rilevante per il presente studio, che analizza proprio l'effetto combinato di rugosità e tensioni residue (confronto tra le serie non distese A41/A42 e le serie distese A43/A44). Lo studio di Nakatani et al. (2019) [20] ha ulteriormente confermato l'applicabilità del modello di Murakami per superfici rugose, dimostrando che la rugosità superficiale è un fattore determinante nella degradazione della resistenza a fatica per componenti in lega di titanio prodotti mediante fabbricazione additiva, indipendentemente dalla presenza di difetti interni [20].

In anni più recenti, il modello di Murakami è stato applicato anche a materiali prodotti mediante tecniche additive. Romano et al. (2023) [17] hanno proposto una metodologia dettagliata per la definizione della profondità a e del passo p delle valli di rugosità su componenti prodotti mediante Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Il loro lavoro ha evidenziato come il modello di Murakami possa essere adattato a superfici complesse, caratterizzate da una sovrapposizione di rugosità e ondulazione, e come le simulazioni FEM possano supportare la definizione del passo di rugosità basandosi sul campo di tensioni. In particolare, hanno osservato che il modello tende a sovrastimare il limite di fatica per materiali L-PBF, proponendo una modifica dell'offset di durezza per migliorare l'accuratezza delle previsioni.

Uno studio recente su lega di alluminio 2024 [18] ha combinato il modello di Murakami con la statistica degli estremi (distribuzione di Gumbel) per la previsione del limite di fatica a

partire dalla rugosità superficiale, considerata come un insieme di micro-difetti. Questo approccio, che integra il modello di Murakami, dimostra come la caratterizzazione della rugosità debba tenere conto non solo della profondità media ma anche degli eventi estremi (i difetti più profondi e critici) [18].

1.1.4. Modelli di correlazione tra parametri di taglio e vita a fatica

La letteratura offre diversi approcci per correlare i parametri di taglio alla vita a fatica. Un approccio comune è quello di modellare la rugosità in funzione dei parametri di taglio (mediante regressione multipla o RSM) e successivamente applicare fattori correttivi (come il coefficiente k_R della FKM) per stimare la riduzione del limite di fatica. Salamanca et al. [15] hanno sviluppato un modello predittivo che lega rugosità e tensioni residue longitudinali ai parametri di taglio, utilizzando lo stesso materiale e lotto del progetto FABEST. Questo lavoro rappresenta un riferimento diretto per il presente studio. Un approccio alternativo è quello di derivare i coefficienti di Basquin in funzione della rugosità misurata, come proposto da Allen et al. [12], che hanno ottenuto relazioni matematiche tra i coefficienti di Basquin e la rugosità mediante regressione lineare multipla. Questo metodo consente di stimare la curva S-N a partire dai soli parametri di taglio e dalla rugosità attesa.

1.1.5. L'importanza dell'integrità superficiale: rugosità e tensioni residue

Un aspetto cruciale emerso dalla letteratura più recente è che rugosità e tensioni residue non possono essere trattate separatamente quando si valuta la vita a fatica. Come evidenziato nello studio di Xu et al. [16] su acciai ad alta resistenza, le caratteristiche della superficie lavorata (in particolare le tensioni residue e l'energia di dislocazione immagazzinata) influenzano il comportamento ciclico del materiale in modo complesso, modificando i meccanismi di incrudimento/incrudimento ciclico. Inoltre, come osservato da Matušů et al. [1] e da Vrbata [36] nella sua tesi sul progetto FABEST, la presenza di difetti superficiali residui (quali il solco centrale di circa 10 μm riscontrato su tutti i provini) può alterare significativamente la distribuzione delle tensioni residue e compromettere la correlazione tra rugosità misurata e vita a fatica. Questo suggerisce che i modelli predittivi basati sulla sola rugosità (anche corretta con FKM) necessitano di ulteriori affinamenti per tenere conto di difetti geometrici localizzati.

1.1.6. Implicazioni per il presente studio

La rassegna bibliografica qui condotta evidenzia tre aspetti rilevanti per il presente lavoro di tesi:

- L'avanzamento e la velocità di taglio sono i parametri più influenti sulla rugosità e, attraverso essa, sulla vita a fatica. Questa osservazione guida la scelta delle configurazioni di tornitura analizzate per le serie A40, A41, A42, A43 e A44.
- Le tensioni residue giocano un ruolo altrettanto importante quanto la rugosità, e la loro modifica (mediante trattamento di distensione nelle serie A43 e A44) consente di isolarne l'effetto.

- La presenza di difetti geometrici residui (come il solco centrale) rappresenta una sfida aperta per la modellazione predittiva.

1.2. Rugosità superficiale secondo ISO 21920

L'attuale normativa a cui si fa riferimento è la ISO 21920 che, in seguito alla sua pubblicazione nel 2021, ha sostituito i precedenti standard tra cui ISO 1302, ISO 4287 ed ISO 4288. L'obiettivo principale di questa revisione è stato quello di creare un quadro di riferimento più integrato con il fine di migliorare la comunicazione, la consistenza e l'interpretazione delle misure di rugosità superficiale nell'ambito industriale e della ricerca. La norma ISO 21920 è strutturata in tre distinte parti:

- ISO 21920-1:2021 - Indicazione della rugosità nei disegni tecnici: sostituisce la ISO 1302 e introduce nuovi simboli grafici, contraddistinti dall'aggiunta di un trattino orizzontale per distinguerli dalle indicazioni precedenti. In questa sezione vengono specificate anche le regole per l'indicazione delle condizioni di prova e i criteri di accettazione.
- ISO 21920-2:2021 - Termini, definizioni e parametri: sostituisce la ISO 4287 e la ISO 13565-2/-3, definendo in modo aggiornato i termini e i parametri per la determinazione della rugosità mediante metodo del profilo. Questa parte riconosce la crescente complessità delle superfici e amplia lo spettro dei parametri misurabili e riportabili rispetto alle precedenti normative.
- ISO 21920-3:2021 – Operatori di specifica: sostituisce la ISO 4288 e definisce le condizioni di misura predefinite, introducendo il concetto di "Setting Classes" per eliminare la variabilità dipendente dall'operatore e standardizzare le procedure di valutazione.

Una delle innovazioni più significative della norma ISO 21920 riguarda le regole di accettazione. Mentre la precedente ISO 1302 adottava di base la predefinita “regola del 16%”, cioè era ammesso che al massimo il 16% dei valori misurati potesse superare il valore nominale, la ISO 21920 introduce come default la regola T_{max} secondo cui nessuno dei valori misurati sull'intera superficie di ispezione debba eccedere come valore di rugosità rispetto alle specifiche. Per mantenere la coerenza con le normative precedenti risulta comunque possibile indicare T16% in seguito al valore di rugosità.

1.2.1. Metodi di filtraggio dei profili

La procedura standardizzata definita dalla ISO 21920 prevede che lo strumento, nel caso di rugosimetro, analizzi mediante stilo standard il profilo della superficie in una specifica direzione di misura. Successivamente si procede isolando i vari profili P primario, W ondulazione e R rugosità mediante tre filtri con diversi parametri per ogni setting class definita dalla lavorazione stessa. I profili della norma si ottengono come segue:

- Profilo P Primario: a partire dal profilo vergine ottenuto mediante la misura sul componente viene eseguita una rimozione della forma con filtro Gaussiano F e filtro Gaussiano S, i quali hanno una certa lunghezza d'onda di riferimento per ogni setting

class. Così facendo si ottiene la superficie totale con caratteristiche di ondulazione e rugosità.

- Profilo W di Ondulazione: il profilo primario P viene elaborato mediante un ulteriore filtro Gaussiano di nome filtro S con lunghezza d'onda standardizzata ottenendo le irregolarità di ondulazione macroscopiche che vedono denaturata la forma del componente e isola invece solo l'ondulazione stessa dovuta ad esempio a giochi in fase di lavorazione.
- Profilo R di Rugosità: sottraendo al profilo primario il profilo di ondulazione si ottiene infine il profilo che risulta più interessante per lo studio del componente a fatica. Questo profilo infatti rappresenta l'andamento di rugosità sulla superficie senza contributi di ondulazione e forma del componente e pertanto è l'attore principale per la determinazione della vita a fatica.
- Per ognuno di questi profili lo strumento analizza poi i parametri secondo ISO 21920 al fine di determinare parametri che ne descrivono la rugosità. Questi parametri verranno descritti in seguito al Paragrafo 2.2.

1.2.2.Setting Classes

Per standardizzare le procedure di misura, la ISO 21920-3 introduce cinque Setting Classes (Sc1 ÷ Sc5), ciascuna con parametri predefiniti per i filtri, le lunghezze di sezione, il numero di sezioni e la lunghezza di valutazione. La Tabella 1 Parametri per le diverse Setting Classes secondo ISO 21920:2020 riporta le corrispondenze per ciascuna classe di impostazione.

Tabella 1 Parametri per le diverse Setting Classes secondo ISO 21920:2020

Setting Class	S-filter (mm)	L-filter (mm)	Lunghezza ln (mm)	Lunghezza sezione l (mm)	Ra max (μm)
Sc1	2.5	0.08	0.4	0.08	≤ 0.02
Sc2	2.5	0.25	1.25	0.25	≤ 0.1
Sc3	2.5	0.8	4.0	0.8	≤ 2
Sc4	8	2.5	12.5	2.5	≤ 10
Sc5	25	8.0	40.0	8	> 10

Per superfici ottenute mediante tornitura cilindrica, le quali presentano tipicamente valori di rugosità nel range $Ra = 0,1 - 2 \mu m$, la norma consiglia l'utilizzo di classe di impostazione Sc3, che prevede una lunghezza di valutazione pari a 4 mm equivalenti a cinque sezioni di 0,8 mm.

1.2.3.Principali parametri di rugosità secondo ISO 21920

La normativa definisce numerosi parametri atti a descrivere il profilo di rugosità della superficie misurata. Tra questi vengono descritti successivamente quelli più rilevanti nell'ambito di questo lavoro e che risultano dunque gli attori principali per descrivere nel modo più accurato possibile la caratteristica superficiale del componente. Questi valori infatti

risultano utili per descrivere sia la forma macroscopica della rugosità del componente e sia difetti puntuali mediante valori statistici e non. Per fare ciò è utile introdurre alcune grandezze che vengono usate per la valutazione di tali parametri:

- Lunghezza di campionamento l : rappresenta la lunghezza del singolo tratto misurato
- Lunghezza totale di valutazione ln : indica la lunghezza totale di valutazione
- Funzione $Z(x)$: rappresenta la funzione che assume il profilo in ogni punto x dopo il filtro
- Coordinata x : è la coordinata nella direzione in cui avviene la misura

Ra - Average Roughness (media aritmetica della deviazione)

Il parametro Ra rappresenta la media aritmetica dei valori assoluti degli scostamenti del profilo dalla linea media lungo la lunghezza di valutazione. La sua espressione matematica è:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

dove:

- l è la lunghezza di valutazione
- $Z(x)$ è lo scostamento verticale del profilo dalla linea media nella posizione x

Il parametro Ra è storicamente il più diffuso per il controllo generale della finitura superficiale grazie alla sua semplicità perché è in grado di rispondere alla domanda: “Quanto è ruvida la rugosità nel complesso?”. Questo è dovuto al fatto che si applica una media aritmetica sulla zona studiata ma allo stesso tempo Ra presenta importanti limitazioni: essendo un valore medio, non fornisce informazioni sulla forma della superficie né sugli estremi del profilo. Due superfici con lo stesso valore di Ra possono presentare morfologie molto diverse, una ad esempio dominata da picchi acuti e l'altra da valli profonde. Ra non tiene conto di dati fondamentali quali:

- Altezza dei picchi o profondità delle valli
- Direzionalità della superficie
- Difetti locali come graffi o vaiolature

Per queste ragioni, per applicazioni critiche come superfici di tenuta, contatti tribologici o studi di fatica, Ra deve essere integrato con parametri aggiuntivi.

Rz - Altezza massima

Il parametro Rz rappresenta la distanza verticale massima tra il picco più alto e la valle più profonda del profilo di rugosità all'interno della lunghezza di valutazione. Secondo la norma ISO 21920:2020, Rz è definito come la somma del più alto picco (Rp) e della più profonda valle (Rv) all'interno di una singola lunghezza di campionamento, e viene espresso come media dei valori ottenuti sulle cinque lunghezze di campionamento che compongono la lunghezza di valutazione, come in Equazione 2:

$$R_z = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Rp_i + Rv_i) \quad (2)$$

dove n è il numero di lunghezze di campionamento (tipicamente 5 per la Setting Class Sc3).

A differenza di R_a , che fornisce un valore medio dell'ampiezza di rugosità, R_z è in grado di catturare gli estremi del profilo e quindi di quantificare l'entità dei difetti superficiali più profondi, che costituiscono i siti preferenziali per l'innescio di cricche di fatica. Per questa ragione, nel contesto dello studio della resistenza a fatica dei provini, R_z risulta un parametro di gran lunga più significativo rispetto a R_a : mentre una superficie con R_a basso potrebbe nascondere picchi o valli locali particolarmente severi, R_z è in grado di identificarli e di fornire una misura diretta del concentratore di tensioni effettivamente presente sulla superficie.

Altri parametri di rugosità calcolati

Oltre a R_a e R_z , il codice MATLAB implementato per l'elaborazione dei profili secondo ISO 21920:2020 ha estratto anche gli ulteriori parametri di rugosità definiti dalla norma, tra cui:

- R_{sk} (Skewness o asimmetria del profilo): indica il grado di simmetria della distribuzione delle altezze del profilo rispetto alla linea media. Valori negativi indicano una superficie dominata da valli profonde (tipica di lavorazioni di tornitura), mentre valori positivi indicano una predominanza di picchi acuti.
- R_{ku} (Kurtosis o curtosi del profilo): descrive l'acutezza della distribuzione delle altezze. Valori superiori a 3 indicano una distribuzione con picchi più acuti rispetto a una distribuzione normale (superficie "appuntita"), mentre valori inferiori a 3 indicano una distribuzione più piatta.
- R_p (altezza massima del picco): massima distanza verticale tra il picco più alto e la linea media all'interno della lunghezza di valutazione.
- R_v (profondità massima della valle): massima distanza verticale tra la valle più profonda e la linea media all'interno della lunghezza di valutazione.
- R_{sm} (spaziatura media del profilo): valore medio della distanza tra picchi consecutivi, utile per caratterizzare la periodicità della rugosità.

Tutti questi parametri sono stati calcolati in modo sistematico per ciascuno dei profili acquisiti e per ogni serie di provini. Tuttavia, nel presente lavoro di tesi, la correlazione tra rugosità superficiale e vita a fatica è stata condotta utilizzando esclusivamente i parametri R_z e R_a (con particolare enfasi su R_z), in quanto la letteratura di riferimento, in particolare il modello di Murakami e la linea guida FKM, indica proprio questi parametri come quelli maggiormente correlati alla riduzione della resistenza a fatica. Gli altri parametri, pur essendo stati calcolati e archiviati nel database dei risultati, non sono stati oggetto di analisi approfondita né di correlazione con la vita a fatica, poiché il loro contributo, per le finalità specifiche di questa ricerca, è risultato secondario rispetto ai parametri di ampiezza che meglio descrivono l'effetto concentratore di tensioni dovuto alla rugosità. Per completezza di informazione, si rimanda il lettore alla norma ISO 21920:2020 per le definizioni dettagliate e le modalità di calcolo di ciascun parametro.

1.3. Tensioni residue indotte dalla lavorazione meccanica

Le tensioni residue sono tensioni interne presenti in un componente meccanico in assenza di carichi esterni applicati. Esse si originano quando la deformazione plastica varia lungo tutta la sezione trasversale del pezzo che è stato prodotto. Nel caso della lavorazione meccanica per asportazione di truciolo, le tensioni residue superficiali sono essenzialmente causate dagli effetti meccanici e termici associati alle severe deformazioni plastiche subite dal materiale [30]. In particolare, si distinguono due fenomeni competitivi [30]:

- Effetto meccanico: il materiale in prossimità del tagliente viene inizialmente deformato in compressione durante la lavorazione e successivamente spostato al di sotto dell'utensile, generando una deformazione plastica superficiale di trazione. Il materiale circostante tende a limitare questa deformazione anelastica, generando uno stato tensionale residuo compressivo altamente localizzato nello strato superficiale.
- Effetto termico: l'energia dissipata durante il taglio si converte in calore, determinando un aumento locale della temperatura del materiale. Se la variazione termica è particolarmente elevata, le proprietà meccaniche si riducono e il materiale subisce una deformazione plastica ad alta temperatura. Al ritorno alla temperatura ambiente, il restringimento termico genera tensioni residue prevalentemente di trazione [30].

La natura finale delle tensioni residue superficiali indotte dalla tornitura (trazione o compressione) è quindi il risultato di questi fenomeni contrastanti e dipende dai parametri di taglio adottati [26, 30].

1.3.1. Effetto delle tensioni residue sulla resistenza a fatica

Le tensioni residue di compressione sulla superficie rappresentano probabilmente il metodo più efficace per incrementare le proprietà a fatica dei componenti meccanici. Questo effetto benefico è dovuto al fatto che le tensioni residue di compressione si sovrappongono algebricamente alle tensioni applicate, riducendo la tensione massima di trazione sulla superficie e spostando il picco di tensione verso la zona interna del componente. Di conseguenza, l'innesco e la successiva propagazione delle cricche di fatica vengono rallentati [27]. Viceversa, le tensioni residue di trazione superficiali sono dannose per la resistenza a fatica, poiché si sommano alle tensioni applicate, aumentando la tensione massima effettiva e favorendo l'innesco precoce delle cricche. Come evidenziato da Čapek et al. [31], le tensioni residue macroscopiche di trazione riducono la vita a fatica, mentre variazioni significative delle microtensioni dopo molti cicli sono state attribuite a alterazioni degli arrangiamenti delle dislocazioni e delle strutture dei grani, che costituiscono il precursore dell'innesco delle cricche di fatica [31]. L'influenza delle tensioni residue è massima in prossimità del limite di fatica, dove la deformazione plastica è limitata e il rilassamento delle tensioni residue è minimo. Al contrario, la vita a fatica per alti carichi applicati (basso numero di cicli) dipende poco dalle tensioni residue, poiché la deformazione plastica ciclica ne determina un rapido rilassamento.

1.3.2. Rilassamento delle tensioni residue

Il rilassamento delle tensioni residue durante il carico ciclico è un fenomeno complesso che dipende dalla natura delle tensioni residue stesse, dalle proprietà elasto-plastiche del materiale e dal tipo di carico applicato [30]. Studi sperimentali hanno dimostrato che il rilassamento è particolarmente significativo durante il primo ciclo di carico (rilassamento quasi-statico), mentre i cicli successivi producono un rilassamento graduale e meno marcato [30].

Diversi modelli semi-empirici sono stati proposti per descrivere il rilassamento delle tensioni residue. Morrow e Sinclair [32] hanno proposto una relazione che correla il rilassamento della tensione media al numero di cicli in controllo di deformazione, basandosi sul concetto che le tensioni residue agiscono come tensione media del ciclo di fatica. Jhansale e Topper [33] hanno proposto una relazione analoga, mentre Kodama [34] ha derivato una legge logaritmica basata su misure diffrattometriche su provini pallinati.

Un aspetto fondamentale emerso dalla letteratura è che il rilassamento delle tensioni residue si verifica solo quando la sovrapposizione tra tensione residua iniziale e carico esterno supera il limite di snervamento locale del materiale, sia in trazione che in compressione [30]. In particolare, il rilassamento continuo è possibile solo se si produce nuova deformazione plastica sia nella fase di carico che in quella di scarico del ciclo di fatica [30].

1.3.3. Tensioni residue nel progetto FABEST

Nel contesto del progetto FABEST, le tensioni residue indotte dalla tornitura rappresentano un fattore cruciale per la comprensione della risposta a fatica dei provini. Come documentato da Matusů et al. [1], le misure di tensione residua eseguite con diffrazione RX hanno rivelato una notevole variabilità tra le diverse configurazioni di tornitura, con valori che vanno da -490 MPa (compressione, serie A03) a +442 MPa (trazione, serie A27) nella direzione assiale [1]. In generale, si è notato che in base alla zona in cui viene rilevata la misura i dati variano di diverse decine di punti percentuali; risultato non accettabile da un punto di vista della ricerca.

La presenza di tensioni residue compressive può compensare, almeno in parte, l'effetto negativo della rugosità sulla vita a fatica. Tuttavia, come osservato nel progetto FABEST, tensioni residue eccessivamente compressive possono diventare controproducenti, promuovendo plasticità locale o rilassamento precoce delle tensioni stesse. Inoltre, il rilassamento delle tensioni residue durante il carico ciclico può ridurre il loro effetto benefico, soprattutto a livelli di carico elevati.

1.3.4. Modellazione numerica delle tensioni residue

L'integrazione tra misure sperimentali di tensione residua (mediante diffrazione RX) e simulazioni numeriche agli elementi finiti rappresenta un approccio consolidato nella letteratura recente. Schnubel e Huber [35] hanno presentato uno studio sulla previsione della propagazione di cricche in provini in alluminio contenenti tensioni residue indotte da riscaldamento laser, utilizzando la tecnica MVCCT per calcolare il fattore di intensità delle tensioni totale K_{tot} che considera sia i carichi applicati che le tensioni residue. La loro

metodologia, schematizzata in tre fasi (simulazione del processo, estrazione di K_{tot} , calcolo di da/dN), dimostra come le simulazioni FEM possano essere efficacemente combinate con modelli analitici per la previsione della vita a fatica in presenza di tensioni residue.

Zhu et al. [36] hanno proposto un approccio per la previsione della propagazione di cricche che considera la distribuzione delle tensioni residue e l'incremento del crack length step in funzione del gradiente tensionale residuo. Anche in questo caso, il fattore di intensità delle tensioni totale viene calcolato mediante sovrapposizione, e la velocità di propagazione viene stimata utilizzando l'equazione di Forman modificata.

Questi lavori forniscono un quadro metodologico di riferimento per la modellazione numerica delle tensioni residue. Nel presente studio, l'analisi delle tensioni residue mediante software di calcolo numerico verrà tralasciato per mancanza di informazioni relative a queste. Verrà però trattato l'argomento per completezza e verranno presentati i risultati ottenuti da altre analisi eseguite su provini della stessa serie di cui già è stato svolto il lavoro, sebbene i risultati da un punto di vista statistico siano incoerenti e troppo variabili. Si prevedono sviluppi futuri legati a un metodo più coerente di rilevare le tensioni residue presenti sul provino. In particolare, in [1] si descrive la possibilità di sviluppare un metodo di misura che sia in grado di rilevare tensioni anche in profondità rispetto alla superficie che presenta troppa variabilità.

1.4. Modello di Kohout-Věchet per il calcolo della vita a fatica

Con il fine ultimo di rappresentare al meglio i diagrammi S-N, in questo documento, la valutazione del componente della vita a fatica viene affrontata utilizzando il modello di Kohout-Věchet [3]. Si anticipa che oltre alla migliore rappresentazione dei dati nelle zone estreme del diagramma si trae vantaggio di questo modello anche perché i dati sperimentali che richiede per avere una buona approssimazione di tutto il range di tensioni risultano essere in linea con il numero di provini che si hanno a disposizione. Le motivazioni sono molteplici e verranno descritte qui di seguito.

1.4.1. Limiti dei modelli tradizionali

La curva di Wöhler (curva S-N) rappresenta la dipendenza della tensione di fatica dal numero di cicli a rottura. Sebbene durante le prove di fatica la tensione σ_i sia la variabile indipendente e il numero di cicli N_i sia il risultato della prova, per ragioni storiche le curve di fatica sono generalmente rappresentate nella forma $\sigma = f(N)$ o più spesso $\sigma = f(\log N)$.

Dal punto di vista fisico, la rottura per fatica è il risultato dell'accumulo di deformazione plastica. Tuttavia, tutti i processi che precedono la rottura sono troppo complessi per essere descritti mediante semplici concezioni fisiche. Di conseguenza, tutte le funzioni esistenti per la descrizione delle curve di fatica sono di natura fenomenologica, e la funzione proposta da Kohout e Věchet non fa eccezione.

Le principali funzioni tradizionali per la descrizione delle curve di fatica includono:

- Funzione di Basquin:

$$\sigma(N) = \alpha N^b \quad (3)$$

dove b è un numero negativo. Questa funzione rappresenta un'iperbole con esponente generale ed è valida solo per la regione a vita finita.

- Estensione al basso numero di cicli (LCF):

$$\sigma(N) = a (N + B)^b \quad (4)$$

- Funzione di Stromeier (estensione all'alto numero di cicli):

$$\sigma(N) = a N^b + \sigma_\infty \quad (5)$$

dove σ_∞ è il limite di fatica permanente.

- Funzione di Palmgren (estensione a entrambe le regioni):

$$\sigma(N) = a (N + B)^b + \sigma_\infty \quad (6)$$

Tuttavia, queste funzioni presentano diversi svantaggi: la funzione di Stromeier non ha un secondo asintoto, il parametro b non ha un significato semplice né nella funzione di Stromeier, né nella funzione di Palmgren, e nessuna di queste funzioni può essere semplificata alla forma di Basquin.

1.4.2. Derivazione del nuovo modello

Il contributo originale di Kohout e Věchet consiste nell'estendere la funzione di Basquin alle regioni a basso e ad alto numero di cicli in modo simmetrico. L'idea di base è la seguente:

- Per l'estensione alla regione a basso numero di cicli, si sostituisce N con $N+B$.
- Per l'estensione alla regione ad alto numero di cicli, si sfrutta il trucco matematico di sostituire $1/N$ con $1/N + 1/C$, che è equivalente a sostituire N con $NC/(N + C)$.

Applicando entrambe le estensioni simultaneamente, e considerando che $B \ll C$ (i loro valori differiscono di molti ordini di grandezza), si ottiene la nuova funzione:

$$\sigma(N) = a \left[\frac{(N + B)C}{N + C} \right]^b \quad (7)$$

o, in forma equivalente e più comune, espressa in termini del limite di fatica permanente σ_∞ :

$$\sigma(N) = \sigma_\infty \left[\frac{N + B}{N + C} \right]^b \quad (8)$$

dove:

- $\sigma(N)$ è l'ampiezza di tensione [MPa];
- N è il numero di cicli a rottura;
- σ_∞ è il limite di fatica permanente per $N \rightarrow \infty$ [MPa];
- b è l'esponente di Basquin (pendenza della curva nella regione a vita finita, negativo);

- B è il numero di cicli in corrispondenza del quale la curva cambia pendenza dalla regione quasi-statica alla regione a vita finita;
- C è il numero di cicli in corrispondenza del quale la curva cambia pendenza dalla regione a vita finita alla regione del limite di fatica.

1.4.3. Significato geometrico dei parametri

Nel diagramma semilog, la curva descritta dal modello KV presenta tre importanti linee rette:

- L'asintoto orizzontale per bassissimo numero di cicli ($N \ll B$): $\sigma = \sigma_1 \equiv Rm$ (carico a rottura)
- L'asintoto orizzontale per altissimo numero di cicli ($N \gg C$): $\sigma = \sigma_\infty$ (limite di fatica)
- La tangente nella regione a vita finita ($B \ll N \ll C$): $\log \sigma = \log a + b \log N$, con pendenza b .

I punti di intersezione della tangente con gli asintoti si verificano in corrispondenza di

$N = B$ e $N = C$, dove la pendenza della curva (W1) assume il valore $b/2$. Il significato geometrico dei parametri è quindi il seguente [1]:

- B e C sono i numeri di cicli in cui la curva si flette;
- b è la pendenza della tangente nella regione a vita finita;
- a è il valore estrapolato della tangente per $N=1$.

1.4.4. Vantaggi del modello KV

Secondo Kohout e Věchet, il modello KV presenta numerosi vantaggi rispetto alle funzioni tradizionali di Stromeyer e Palmgren [3]:

1. Migliore aderenza ai dati sperimentali: la somma dei quadrati degli scarti è significativamente inferiore (nell'esempio riportato, la funzione Hx ha una somma dei quadrati inferiore del 7% rispetto alla funzione di Stromeyer).
2. Parametri con significato geometrico chiaro: a differenza dei modelli di Stromeyer e Palmgren, tutti i parametri di KV hanno un'interpretazione diretta sul diagramma semilog.
3. Migliori proprietà di estrapolazione: la curva KV tende correttamente ai valori asintotici al di fuori dell'intervallo misurato, mentre la funzione di Stromeyer mostra deviazioni significative (per un numero di cicli molto elevato, la curva di Stromeyer continua a diminuire sostanzialmente, mentre la curva KV è praticamente costante).
4. Migliori proprietà di interpolazione: il modello KV consente di predire la regione a basso numero di cicli a partire da dati ad alto numero di cicli e dalla resistenza a trazione con accuratezza superiore rispetto alla funzione di Palmgren.
5. Stabilità nella determinazione dei parametri: i coefficienti di variazione dei parametri σ_1 e σ_∞ sono sostanzialmente inferiori rispetto a quelli del parametro a , poiché σ_1 e σ_∞ sono strettamente associati ai risultati ottenuti, mentre a rappresenta un'estrapolazione lontana dai dati.

1.5. Modello di Murakami per l'effetto della rugosità superficiale

La rugosità superficiale costituisce un concentratore di tensioni che favorisce l'innesco di cricche di fatica. Tuttavia, come sottolineato da Murakami [4], la valutazione dell'effetto della rugosità sulla resistenza a fatica è complessa a causa della compresenza di molteplici fattori:

1. la rugosità superficiale come concentratore di tensioni;
2. le tensioni residue indotte dalla lavorazione;
3. l'incrudimento o l'ammorbidimento dello strato superficiale;
4. le trasformazioni microstrutturali indotte dalla deformazione plastica.

Nelle componenti meccaniche reali, questi quattro fattori agiscono simultaneamente, rendendo difficile isolare il singolo contributo. Murakami propone pertanto un approccio basato sulla meccanica della frattura, in cui la rugosità viene assimilata a cricche superficiali periodiche.

1.5.1. Il parametro $\sqrt{area}$

Nei capitoli precedenti del volume Metal fatigue [4], Murakami ha introdotto il parametro $\sqrt{area}$ come grandezza geometrica unificante per la caratterizzazione di difetti, inclusioni e intagli. Per un intaglio superficiale poco profondo di profondità a [μm], vale la relazione:

$$\sqrt{area} \cong \sqrt{10} \cdot a \quad (9)$$

Tale parametro si è dimostrato efficace nel predire il limite di fatica di materiali contenenti difetti, attraverso la relazione (valida per $R=-1$):

$$\sigma_w = \frac{C \cdot (HV + 120)}{\sqrt{area}^{\frac{1}{6}}} \quad (10)$$

dove:

- σ_w è il limite di fatica [MPa];
- HV è la durezza Vickers;
- $\sqrt{area}$ è la radice quadrata dell'area del difetto [μm];
- $C = 1.43$ per difetti superficiali, $C = 1.56$ per difetti interni.

1.5.2. Applicazione del modello alla rugosità superficiale

Murakami et al. [4] hanno applicato il modello $\sqrt{area}$ al caso di intagli periodici superficiali che simulano la rugosità di tornitura. A tale scopo, sono stati realizzati provini in acciaio al carbonio (0.46% C) con diverse rugosità artificiali (100A, 150A, 200A per materiale

ricotto; 150QT per materiale bonificato), variando il passo tra gli intagli ($2b$) e la profondità media (a_{mean}).

Le osservazioni al microscopio hanno mostrato che:

- Il sito di innesco della cricca corrispondeva sempre alla radice di un intaglio, spesso in corrispondenza di un difetto più profondo da un built-up edge durante la tornitura.
- In prossimità del limite di fatica, sono state osservate cricche non propaganti alla radice degli intagli, indicando che il limite di fatica è determinato dalla condizione di soglia per la propagazione di una cricca.

Quest'ultima osservazione è fondamentale: essa dimostra che il problema della rugosità deve essere affrontato come un problema di cricche piuttosto che come un problema di intagli.

1.5.3. Valutazione della dimensione equivalente di difetto per rugosità: $\sqrt{\text{area}_R}$

Poiché la rugosità reale presenta intagli di profondità irregolare e passo finito, non è sufficiente considerare la sola profondità massima. Murakami [4] propone di assimilare gli intagli periodici a cricche superficiali periodiche e di calcolare il fattore di intensificazione delle tensioni K_I utilizzando le soluzioni note per cricche periodiche.

Il fattore di forma F per cricche periodiche è definito da:

$$K_I = F \cdot \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (11)$$

Al diminuire del passo $2b$ a parità di profondità a il K_I diminuisce a causa dell'interferenza tra cricche adiacenti. Uguagliando l'espressione generale del fattore di intensità delle tensioni per una cricca di forma arbitraria:

$$K_{I,max} = 0.65 \cdot \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad (12)$$

si ottiene la dimensione equivalente del difetto per la rugosità:

$$\text{area}_R = \frac{F^2}{0,65} \cdot a \quad (13)$$

Attraverso analisi numeriche, Murakami ha ricavato la curva riportata in Figura 1, che fornisce il rapporto $\frac{\sqrt{\text{area}_R}}{2b}$ in funzione di $a/2b$. Da questa curva si ricavano le seguenti espressioni approssimate:

$$\frac{\sqrt{\text{area}_R}}{2b} \cong 2.97 \frac{a}{2b} - 3.51 \left(\frac{a}{2b}\right)^2 - 9.74 \left(\frac{a}{2b}\right)^3 \quad \text{per} \quad \frac{a}{2b} < 0,195 \quad (14)$$

$$\frac{\sqrt{\text{area}_R}}{2b} \cong 0.38 \quad \text{per} \quad \frac{a}{2b} \geq 0,195 \quad (15)$$

Per la valutazione pratica, Murakami [4] suggerisce di assumere come profondità a il valore della massima altezza di rugosità R_y (o R_z secondo la terminologia ISO 21920), e come passo $2b$ la distanza media tra picchi consecutivi.

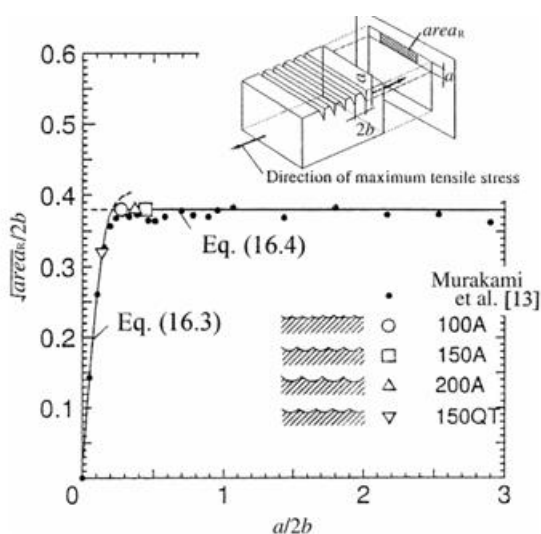


Figura 1 Relazione geometrica con il parametro di Murakami

1.5.4. Applicazione al presente caso di studio

Nel contesto del progetto FABEST, il modello di Murakami verrà applicato per:

- Quantificare l'effetto della rugosità dei provini A40, A41, A42, A43 e A44 a partire dai parametri R_z (massima altezza del profilo) misurati secondo ISO 21920 e dal passo di rugosità $2b$ (distanza media tra picchi).
- Confrontare la previsione del limite di fatica secondo l'equazione della tensione limite a fatica con i valori sperimentali ottenuti dalle curve S-N.
- Correggere le curve S-N secondo l'approccio di Murakami, ove necessario, per normalizzare l'effetto della diversa rugosità tra le serie.

2. Materiali e metodi sperimentali

Per comprendere al meglio l'ambito di cui si occupa questo documento è del tutto necessario descrivere nel dettaglio il materiale che compone i provini trattati in questa ricerca. Questo determina infatti il cuore del lavoro svolto per alcuni accorgimenti che verranno descritti in questo capitolo. Inoltre si narra nel dettaglio l'impostazione e svolgimento delle prove che sono state effettuate con il fine di fornire tutte le informazioni per lo svolgimento di ulteriori prove similari con attenzione sulla ripetibilità e accuratezza nella misura.

2.1. Materiale in esame

Tutti i provini utilizzati nel presente studio sono stati ricavati da un unico lotto di acciaio 42CrMo4+QT (bonificato, ovvero temprato e rinvenuto), acquistato in quantità di 1,4 tonnellate sotto forma di barre laminate a caldo, bonificate, di lunghezza compresa tra 5 e 6 metri e diametro di 35 mm. Le barre provengono tutte dalla medesima colata, identificata dal codice T46157, garantendo così l'omogeneità delle proprietà del materiale tra i diversi provini. La scelta di questo acciaio è motivata dalle sue caratteristiche meccaniche elevate e dalla sua limitata capacità di deformazione plastica (valori di snervamento e rottura molto vicini tra loro), condizione favorevole per lo studio dell'effetto di volume critico della rugosità superficiale sulla fatica, poiché la fase di propagazione della cricca risulta meno influente rispetto alla fase di innesco.



Figura 2 Provini a disposizione con numerazione

2.1.1. Composizione chimica

La composizione chimica dell'acciaio 42CrMo4+QT utilizzato, fornita dal produttore TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, è riportata nella Tabella 2. La composizione è conforme alla norma ISO 683-17.

Tabella 2 Caratteristiche chimiche del 42CrMo4 + QT

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	H (ppm)	N (ppm)
% peso	0.41	0.24	0.77	0.015	0.005	1.06	0.19	0.12	0.16	0.021	1.3	90

Si notano i seguenti aspetti rilevanti:

- Il contenuto di carbonio (0.41%) rientra nel range tipico per questo acciaio (0.38-0.45%), garantendo elevate resistenza meccanica e temprabilità.
- Il contenuto di zolfo (0.005%) e fosforo (0.015%) è relativamente basso, riducendo il rischio di segregazioni e inclusioni dannose.
- I tenori di idrogeno (1.3 ppm) e azoto (90 ppm) sono inferiori ai valori critici; pertanto, non si prevedono effetti negativi dovuti a infragilimento da idrogeno, fenomeno che si manifesta principalmente in acciai martensitici.

2.1.2. Proprietà meccaniche statiche

Le proprietà meccaniche statiche del materiale, fornite dal produttore e riportate in Tabella 3, evidenziano un comportamento a elevata resistenza con limitata duttilità.

Tabella 3 Proprietà meccaniche del 42CrMo4 + QT

Proprietà	Simbolo	Valore
Resistenza a trazione (UTS)	Rm	1097 MPa
Carico di snervamento	Rp0.2	1001.5 MPa
Allungamento a rottura	A	16.5 %
Strizione	Z	62.5 %
Grano	-	8 (secondo ASTM)

Si osserva che il rapporto tra carico di snervamento e resistenza a trazione è prossimo a 0.91, indicando un margine di deformazione plastica molto limitato prima della rottura. Come sottolineato da Papuga et al. [2], questa caratteristica è favorevole per l'applicazione del concetto di volume critico, poiché l'innescio di una cricca in corrispondenza di un difetto superficiale (ad esempio una valle di rugosità) non viene facilmente compensato da fenomeni di arrotondamento della punta della cricca (crack blunting), rendendo più chiara la correlazione tra rugosità e riduzione della vita a fatica.

2.1.3.Considerazioni sulla durezza

Sebbene la durezza Vickers non sia una proprietà meccanica statica nel senso stretto è utile anticipare che i valori medi di durezza HV10 riscontrati sulle sezioni dei provini si collocano nell'intervallo tipico per questo acciaio dopo bonifica, compreso approssimativamente tra 310 HV10 e 370 HV10 come evidenziato da Papuga et al. [2], con una variabilità significativa in funzione della posizione radiale all'interno della barra semilavorata. Questa disomogeneità, può influenzare la risposta a fatica dei provini e deve essere opportunamente considerata nell'analisi dei risultati. I valori di durezza nell'ambito di questo lavoro risultano particolarmente utili per la valutazione della vita a fatica proprio per quanto riguarda l'applicazione del modello predittivo di Murakami e per l'applicazione del modello FKM.

2.1.4.Geometria dei provini

I provini utilizzati nel presente studio appartengono alle serie A40, A41, A42, A43 e A44. Tutti i provini presentano una geometria a clessidra con diametro della sezione critica pari a 8 mm e attacco filettato M16 × 1 alle estremità per il trasferimento del carico sulla macchina di prova Amsler HFP422. Il raggio di transizione tra la zona filettata e la dimensione minima centrale è pari a 64 mm. La rugosità desiderata da specifica è pari a 0,8 micron sebbene questa sia poi, come successivamente illustrato, molto variabile in funzione dei parametri di taglio. Questa geometria è illustrata in Figura 3 ed è stata adottata per evitare sottosquadri pericolosi tra il raccordo e l'asse cilindrico centrale.

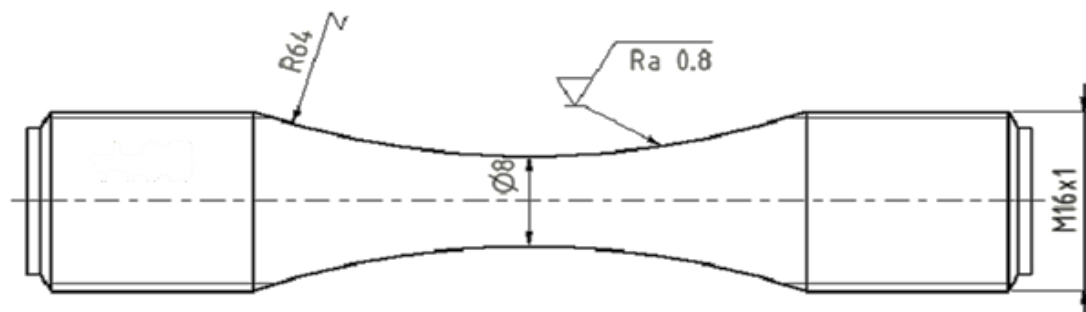


Figura 3 Geometria del provino standard

La scelta del diametro di 8 mm è motivata da considerazioni pratiche legate ai limiti operativi del tornio utilizzato per la produzione dei provini (velocità massima di rotazione di 4000 rpm), che consentono di raggiungere una velocità di taglio di 100 m/min – valore ritenuto accettabile per ottenere una buona qualità superficiale senza la necessità di una successiva rettifica manuale. La finitura è buona come visibile nella successiva Figura 4:



Figura 4 Finitura superficiale dei provini

2.1.5. Processo di produzione e parametri di taglio

Tutti i provini sono stati realizzati presso il VSB – Technical University of Ostrava, utilizzando un tornio DMG Mori NLX 2500MC/700 con utensili Sandvik Coromant (inserti DNMG 15 06 04/08) e fluido di lubrorefrigerazione Decocut 1040 per le passate di sgrossatura. I parametri di tornitura per ciascuna serie sono riassunti in Tabella 4. Le serie A40, A41 e A42 sono state prodotte secondo le configurazioni ottimizzate rispettivamente delle fasi 2 e 1 della campagna FABEST [1]. Le serie A43 e A44 sono state realizzate con gli stessi identici parametri di taglio rispettivamente di A41 e A42, ma successivamente sottoposte a un trattamento di distensione delle tensioni residue descritto in seguito.

Tabella 4 Parametri di taglio per tornitura dei provini

Parametro	Simbolo	A40	A41	A43	A42	A44
Configurazione di riferimento	-	A35	A26	A26	A29	A29
Velocità di taglio a D = 8 mm	vc [m/min]	100	75.4	75.4	75.4	75.4
Velocità del mandrino	[rpm]	3979	3000	3000	3000	3000
Avanzamento	f [mm/giro]	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10
Raggio di punta dell'utensile	R [mm]	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8
Altezza ultima passata (finitura)	h1 [mm]	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10
Altezza penultima passata	h2 [mm]	0.15	0.10	0.10	0.20	0.20
Altezza terzultima passata	h3 [mm]	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
Altezza totale finitura	[mm]	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40
Fluido di refrigerazione Decocut 1040	-	Sì	Sì	Sì	Sì	Sì
Trattamento di distensione	-	No	No	Sì	No	Sì

2.1.6. Trattamento di distensione delle tensioni residue

Dopo la fase di tornitura, le serie A43 e A44 sono state sottoposte a un trattamento termico di distensione (stress relieve annealing). L'idea alla base di questa scelta è piuttosto chiara: ridurre le tensioni residue di origine termica e meccanica indotte dalla lavorazione, intervenendo però il meno possibile sulla microstruttura del materiale. Per acciai bonificati come il 42CrMo4+QT, questo tipo di trattamento si esegue di solito a temperature dell'ordine dei 500-650°C, seguite da un raffreddamento lento in forno. Se tutto funziona come previsto, il risultato è uno stato tensionale residuo prossimo allo zero. Tutto ciò viene svolto per i seguenti motivi:

In primo luogo, il confronto tra le serie non distese (A41, A42) e quelle distese (A43, A44) consente di isolare il contributo delle tensioni residue sulla vita a fatica. A parità di parametri di taglio e di rugosità, eventuali differenze di durata possono essere ragionevolmente attribuite alla presenza o meno di tensioni residue.

In secondo luogo, disporre di provini con tensioni residue trascurabili offre l'opportunità di validare i modelli predittivi (Basquin, Kohout-Véchet, Murakami) in condizioni più "pulite", cioè senza l'incertezza aggiuntiva legata a uno stato tensionale residuo non ben definito.

Infine, questi provini rappresentano un termine di paragone prezioso per le simulazioni numeriche agli elementi finiti in ANSYS. Se il modello FEM riesce a riprodurre il comportamento dei provini distesi, si può avere maggiore fiducia nella sua capacità di predire anche quello dei provini non distesi, dove le tensioni residue giocano un ruolo più complesso.

Va detto, tuttavia, che nella pratica le cose non sono andate proprio lisce come ci si sarebbe aspettati. Le misure di tensione residua effettuate sui provini hanno mostrato una variabilità tale da mettere in discussione l'affidabilità dei dati stessi: a seconda del punto in cui veniva eseguita la misura, i valori cambiavano in modo significativo. Questo ha reso difficile trarre conclusioni univoche sull'efficacia del trattamento di distensione. Per questo motivo, come si vedrà più avanti, si è scelto di adottare un approccio prudentiale, escludendo le tensioni residue dal modello numerico e accettando di sottostimare leggermente la vita a fatica pur di non introdurre dati incerti.

2.1.7. Considerazioni sul processo e criticità comuni

Un aspetto rilevante, comune a tutte le serie prodotte esclusivamente per tornitura (quindi A40, A41, A42, A43 e A44), è la presenza di un difetto superficiale consistente in un solco di circa 10 µm di profondità e 400-500 µm di lunghezza, localizzato al centro della sezione critica. Tale difetto è attribuito a un gioco nel meccanismo del tornio durante la transizione della traiettoria dell'utensile tra le due estremità del provino.

2.2. Misura della rugosità superficiale

2.2.1. Strumentazione

Le misure di rugosità superficiale sono state effettuate utilizzando un profilometro SM PGS 200 presso il laboratorio di metrologia del DIMEAS del Politecnico di Torino visibile in Figura 5.



Figura 5 Profilometro SM PGS 200

Lo strumento è dotato di uno stilo con raggio di punta di $40\text{ }\mu\text{m}$ e consente l'acquisizione di profili primari di rugosità con elevata risoluzione verticale. La scelta del profilometro PGS 200 è motivata dalla sua capacità di rilevare con accuratezza profili anche non perfettamente planari come nel caso di questa ricerca ed è pertanto risultato valido in seguito a taratura e calibrazione dei risultati con confronto diretto del rugosimetro. Inoltre, è importante notare che il raggio di punta è maggiore rispetto allo stilo del rugosimetro ma questo aspetto viene bilanciato dal fatto che l'angolo che copre la punta dello stilo del profilometro è solamente 22 gradi. Si è osservato sperimentalmente infatti che il contributo sul profilo che forniva la geometria della punta rispetto al rispettivo strumento di misura è quasi nullo, e ove possibile è stato corretto in post-processing mediante codice di calcolo. In Figura 6 è possibile osservare il rugosimetro SM RTP 80 utilizzato per la validazione dei risultati.

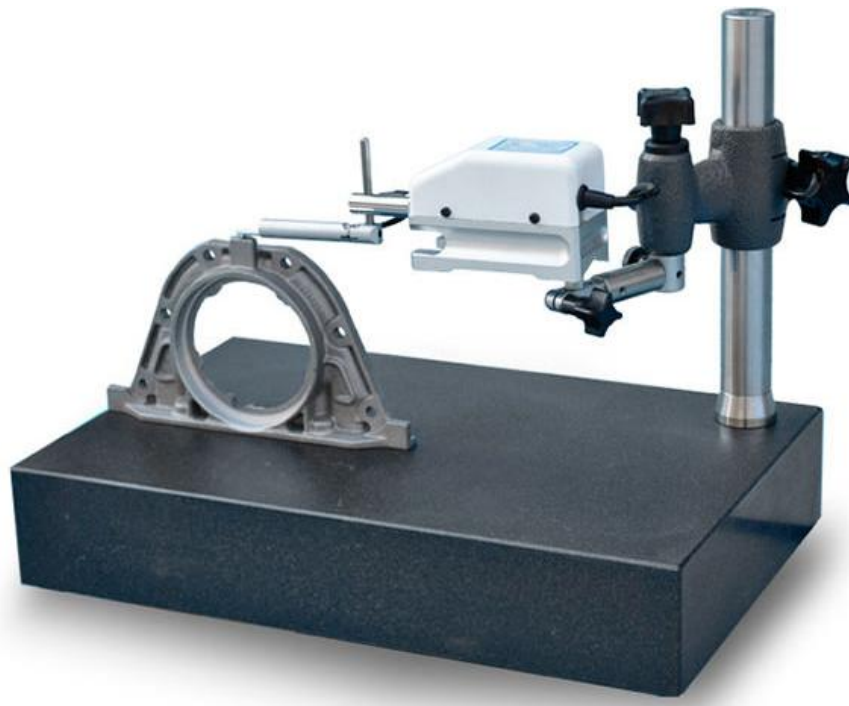


Figura 6 Piano e Tastatore del rugosimetro SM RTP 80

Le misure sul rugosimetro sono state svolte come da normativa ISO 21920 con i parametri nella seguente Figura 7.

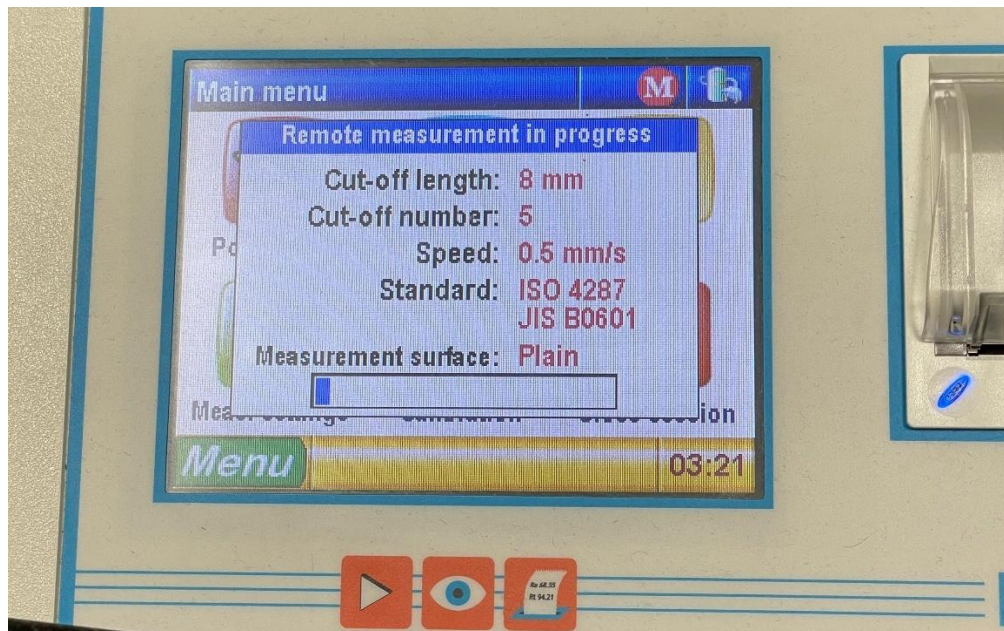


Figura 7 Parametri di misura SM RTP 80

Ed i risultati, analizzati in questo caso dal software del computer del profilometro, sono visibili in Figura 8:

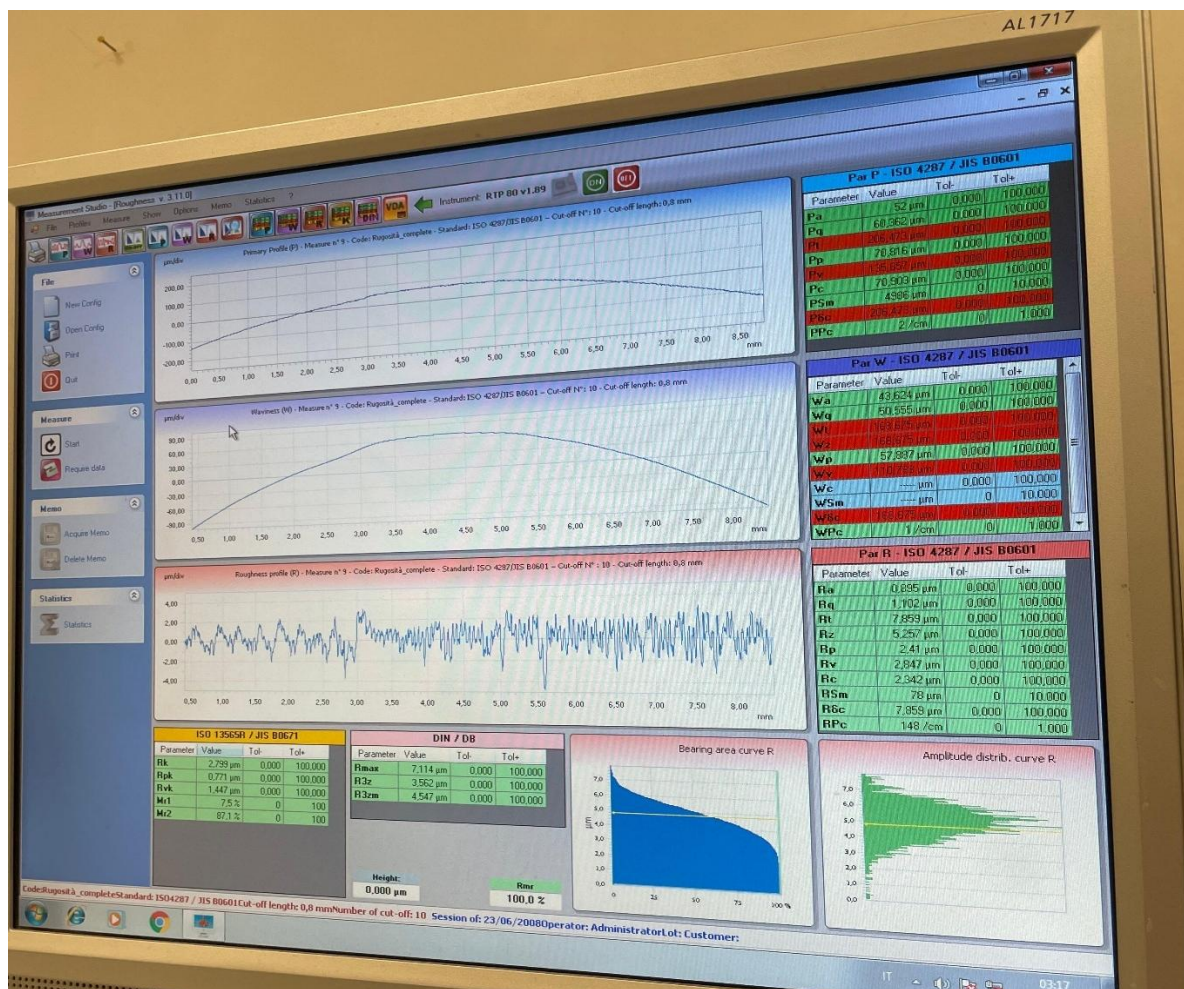


Figura 8 Interfaccia grafica del rugosimetro

L'interfaccia grafica, oltre a fornire in maniera visibile l'andamento dei profili misurati, ha la possibilità di esportare i profili in formato accessibile dal software analogo che è stato sviluppato. Questa prima fase di apprendimento del lavoro è stata utile per il successivo svolgimento dell'attività fornendo informazioni per la taratura del metodo di misura sviluppato.

2.2.2. Calibrazione del profilometro

La calibrazione è stata eseguita utilizzando una piastra calibrata (campione di rugosità) fornita in dotazione con il rugosimetro. Tale piastra presenta una superficie con valori di rugosità noti e certificati, tipicamente con parametri Ra e Rz riferibili a campioni di acciaio con lavorazione di rettifica o tornitura di riferimento. Si osservi la piastra di calibrazione in Figura 9 in cui è possibile notare a sinistra la misura svolta con rugosimetro SM RTP 80, mentre a destra in modo analogo con SM PGS 200.



Figura 9 Piastra di calibrazione SM per confronto Rugosimetro(sinistra) e Profilometro(destra)

La procedura operativa seguita è stata la seguente:

1. Pulizia della piastra calibrata: la superficie della piastra è stata accuratamente pulita con acetone per rimuovere eventuali contaminanti (oli, polveri) che potessero alterare la misura.
2. Posizionamento della piastra calibrata: la piastra è stata fissata in morsa sul profilometro, assicurando l'allineamento con la direzione di scansione.
3. Acquisizione dei profili: sulla piastra sono stati acquisiti 4 profili primari in posizioni diverse, con le stesse modalità utilizzate per i provini (stessa velocità, stessa lunghezza di misura, stesso cut-off).
4. Elaborazione dei dati: i profili grezzi sono stati importati in MATLAB ed elaborati con lo stesso script implementato per i provini (rimozione della forma, livellamento, filtraggio gaussiano secondo ISO 16610-21, calcolo dei parametri Ra e Rz secondo ISO 21920).

Si osservi come i risultati siano simili dal punto di vista grafico in Figura 10 a meno di alcune variazioni nelle valli dovute al raggio di punta dello stilo del profilometro che risulta leggermente più grande rispetto alla controparte e quindi tocca in anticipo la superficie in direzione da sinistra a destra.

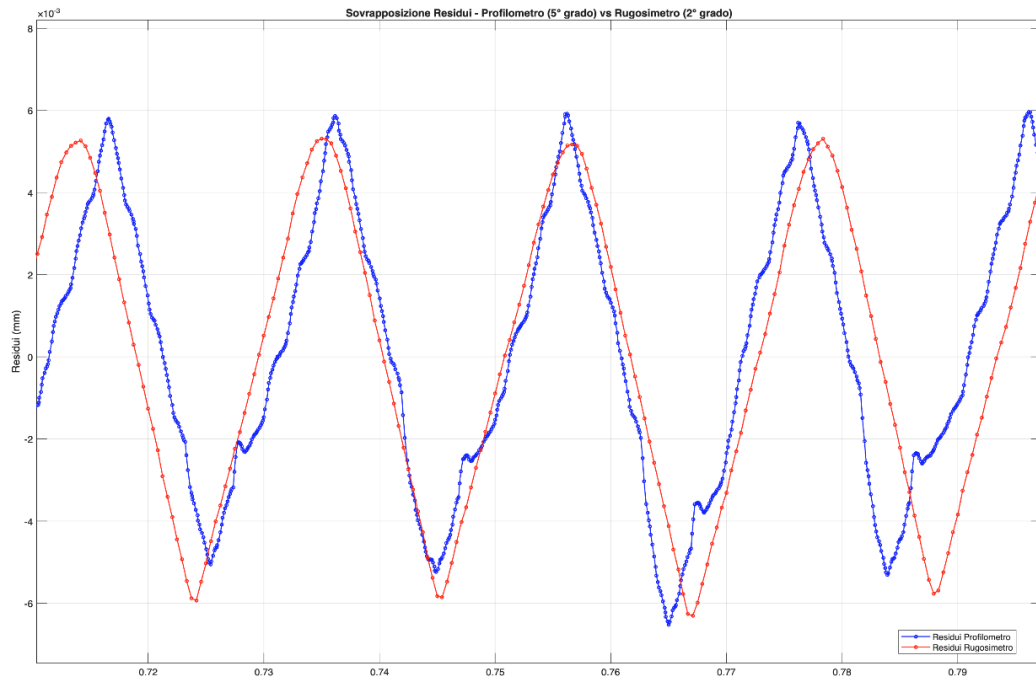


Figura 10 Confronto del profilo calibrato tra i due strumenti

In questa fase si è reso possibile osservare questo fenomeno che è stato corretto successivamente nel codice implementando una funzione che ricostruisse le valli mancanti a partire dalla geometria dello stilo. Ad ulteriore conferma che i dati fossero attendibili per quanto riguarda l'implementazione del calcolo della rugosità secondo ISO 21920, i profili sono stati analizzati direttamente dal rugosimetro e i dati risultanti hanno confermato l'attendibilità del metodo di misura. Si noti inoltre la differenza nel passo delle valli dovuta a una diversa inclinazione della piastra in fase di setup, questo errore è dovuto a una mancanza di riferimenti fissi sul rugosimetro che tuttavia viene corretto sul profilometro grazie al supporto che è stato ideato proprio per la misura dei provini di cui qui di seguito si tratta.



Figura 11 Supporto per vincolare i provini

Il supporto infatti, in Figura 11, è stato progettato in modo che per via delle superfici inclinate il centraggio sia sempre consistente durante la misura ed è stato stampato per manifattura additiva in PETG con stampante FMD per avere una buona resistenza agli attriti che si generano togliendo e inserendo un altro provino. Il supporto ha infine un piano di riscontro in direzione della misura così che anche il movimento assiale, seppur inesistente per via della poca forza di contatto dello strumento, risultasse vincolato meccanicamente.

2.2.3. Procedura operativa standard SOP

Al fine di garantire la riproducibilità delle misure e minimizzare gli errori sistematici, è stata seguita una Procedura Operativa Standard (SOP) articolata nelle seguenti fasi:

Fase 1: Pulizia della superficie

Prima di ogni sessione di misura, la superficie del provino nella zona da rilevare è stata accuratamente pulita con solvente acetone per rimuovere eventuali contaminanti (oli residui di lavorazione, polveri, impronte digitali). Questa operazione è fondamentale per evitare che particelle estranee possano influenzare la misura.

Fase 2: Posizionamento del provino

Il provino a clessidra è stato fissato sul supporto dedicato, progettato appositamente per garantire la ripetibilità durante l'acquisizione. Successivamente, è stato eseguito un orientamento locale della zona di misura in modo da allineare la direzione di scansione dello stilo con la generatrice del provino (direzione assiale), ovvero la direzione perpendicolare alle rigature di tornitura e questa procedura avviene grazie a una funzione specifica del PGS200 con cui è possibile trovare il massimo o minimo della quota muovendosi con microregolazioni.

Fase 3: Configurazione del profilometro

Il profilometro PGS 200 è stato configurato con i parametri riportati in Tabella 5, mantenuti costanti per tutte le misure e per tutte le serie di provini

Tabella 5 Specifiche tecniche della misura su PGS 200

Parametro	Valore
Raggio di punta dello stilo	40 μm
Angolo della punta dalla verticale	22°
Forza di contatto	0.7 mN
Velocità di scansione	0.02 mm/s
Lunghezza di misura (tracciato)	4 mm
Cut-off (lunghezza di ondulazione)	0.8 mm

Fase 4: Acquisizione dei profili

Per ciascun provino, sono stati acquisiti 4 profili primari in posizioni angolari equidistanti (distanze di 90° l'uno dall'altro) sulla sezione critica. Per ogni posizione angolare, sono state eseguite tre ripetizioni della misura a parità di condizioni, senza riposizionare il provino, per consentire un'analisi statistica della ripetibilità. Complessivamente, per ogni provino sono

stati acquisiti 12 profili grezzi (4 posizioni $\times$ 3 ripetizioni) e sono stati salvati in un database per la futura fruibilità.

Fase 5: Importazione in MATLAB ed elaborazione

I profili grezzi acquisiti sono stati esportati in formato “.csv” e successivamente importati in MATLAB. È stato eseguito uno script di elaborazione dedicato che implementa le seguenti operazioni:

- Rimozione della forma: sottrazione di una linea di tendenza (polinomiale di ordine opportuno) per eliminare le componenti di forma macroscopica;
- Livellamento: correzione dell'inclinazione del profilo per garantire che la linea media sia orizzontale;
- Filtraggio gaussiano: applicazione di un filtro Gaussiano conforme alla ISO 16610-21 per separare la componente di rugosità dalla componente di ondulazione.

Fase 6: Calcolo dei parametri di rugosità

Per ciascuno dei 5 profili (mediando sulle 3 ripetizioni), lo script MATLAB calcola i seguenti parametri secondo la norma ISO 21920:2020:

- R_a (scostamento aritmetico medio del profilo)
- R_z (altezza massima del profilo)
- R_{sk} (asimmetria del profilo, skewness)
- R_{ku} (curtosi del profilo)
- eventuali parametri aggiuntivi (R_p , R_v , R_{sm})

Successivamente, per ciascun provino, sono stati calcolati:

- Valore medio μ di ciascun parametro
- Deviazione standard σ di ciascun parametro

Fase 7: Archiviazione dei dati

Tutti i dati acquisiti ed elaborati sono stati archiviati in un database strutturato per la successiva correlazione con:

- i parametri di taglio adottati per ciascuna serie.
- le tensioni residue indotte da lavorazione meccanica.
- i risultati delle prove di fatica (curve S-N e vita a fatica).

2.2.4. Implementazione del codice MATLAB secondo ISO 21920

Il codice MATLAB sviluppato per l'elaborazione dei profili segue fedelmente le prescrizioni della norma ISO 21920:2020. In Figura 12 è riportato uno schema a blocchi del funzionamento:

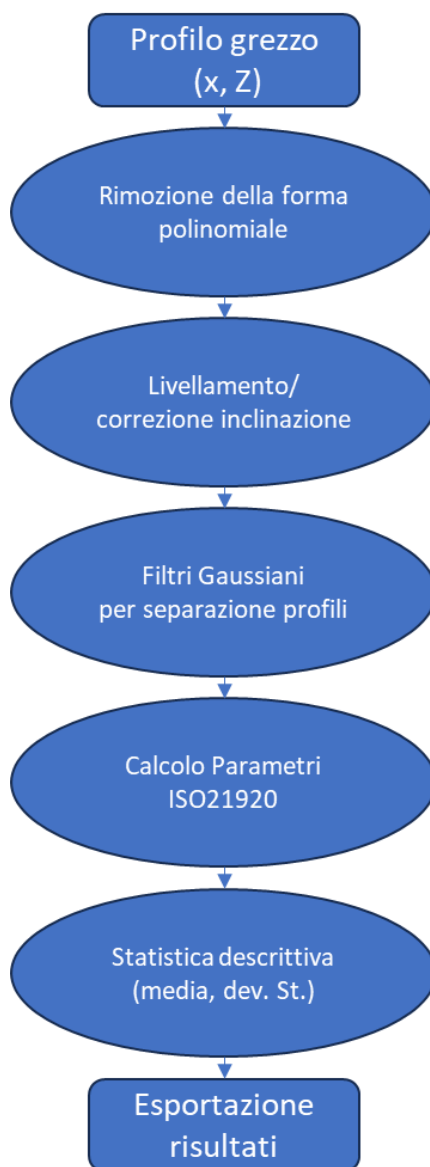


Figura 12 Diagramma di lavoro del codice implementato su MATLAB

Il tutto è stato progettato in ambiente MATLAB per via della possibilità di implementazione di interfaccia grafica che rende del tutto universale lo svolgimento di questa tipologia di misure senza avere a disposizione un rugosimetro oppure per provini che, come nel caso in esame, hanno una forma tale per cui risulta impossibile una misurazione standard. La GUI sviluppata appositamente per queste misure è visibile in Figura 13:

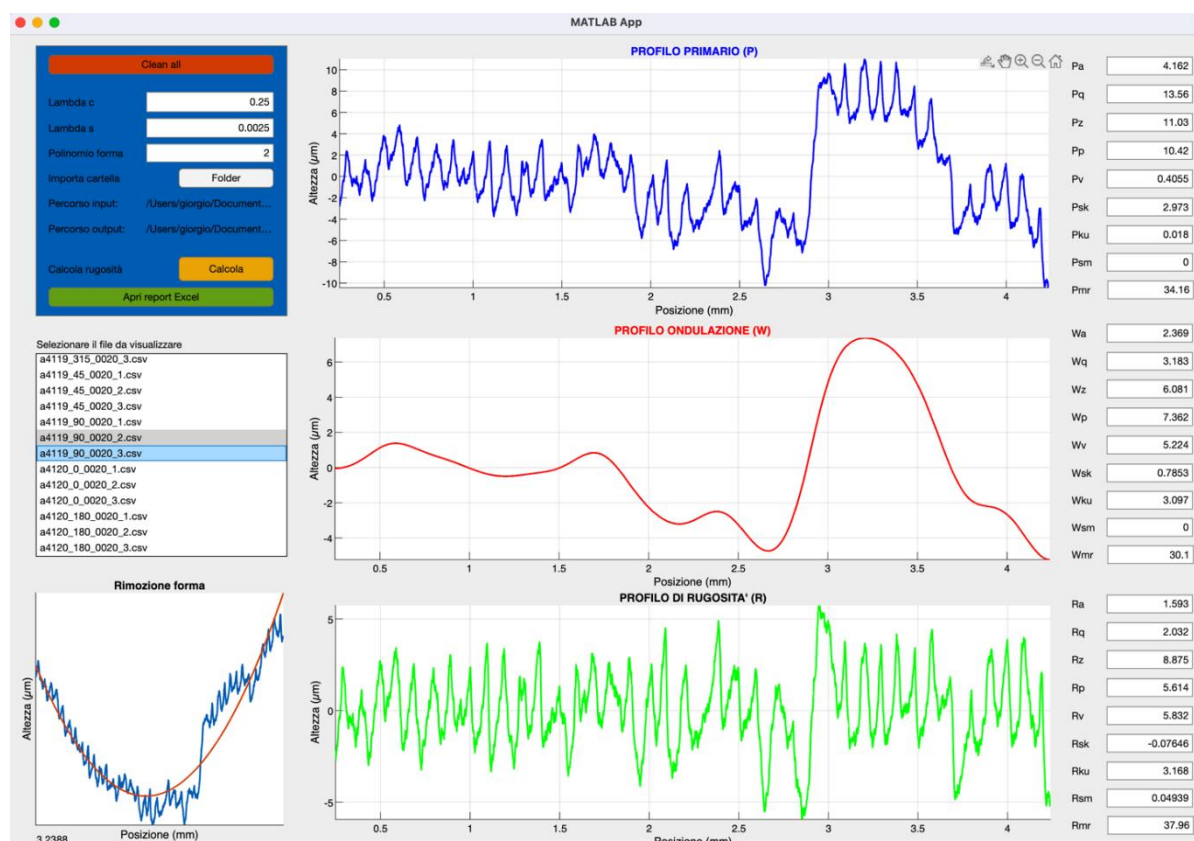


Figura 13 GUI dell'app Profi2Rug in ambiente MATLAB

L'app qui realizzata vede in dettaglio l'applicazione della normativa in ogni suo step per un controllo in fase di calcolo. Viene utilizzata nel seguente modo:

1. Importazione della cartella contenente i profili in formato .csv e impostazione dei parametri di filtro e interpolazione.
2. Calcolo per tutti i profili ed export dei risultati su foglio di calcolo Excel.
3. Possibilità di visualizzare e analizzare in diretta ogni profilo selezionandolo dalla lista importata.

Si osservi in basso a sinistra il profilo grezzo importato dalla rilevazione al profilometro e la forma polinomiale di grado personalizzabile utilizzata per il livellamento e rimozione della forma. Al centro l'applicazione diretta della ISO che estrapola il profilo primario, di ondulazione e di rugosità e a destra l'elaborazione dei profili per ottenere i valori di rugosità per ogni profilo. L'interfaccia grafica è simile per scelta a quella del rugosimetro così da avere un utilizzo più immediato per l'utente che è abituato a strumentazione simile. Come precedentemente descritto i vantaggi dell'utilizzo di profilometro e app sviluppata sono molteplici:

- Universalità del metodo: è possibile misurare valori di rugosità anche di componenti complessi come, ad esempio, ingranaggi che non presentano una superficie perfettamente piana o comunque con una differenza tra quota di misura maggiore a 5 mm a differenza del rugosimetro.
- Maggiore potenza di calcolo: a differenza del software per il rugosimetro questa procedura permette di salvare tutti i profili che poi possono essere elaborati da processori con potenze più elevate rispetto all'hardware associato allo strumento.

- Semplicità di utilizzo: l'interfaccia grafica, sebbene non obbligatoria da usare, semplifica l'utilizzo all'utente medio che non conosce nel dettaglio la programmazione.

2.3. Analisi statistica e ANOVA

Sulla base dei valori medi dei parametri di rugosità ottenuti per ciascuna serie, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) con software commerciale Minitab per valutare se le differenze tra le serie A40, A41, A42, A43 e A44 siano statisticamente significative. Nel contesto del presente studio, l'ANOVA viene applicata per verificare se le differenze di rugosità misurate tra le cinque serie di provini (A40, A41, A42, A43, A44) siano attribuibili ai diversi parametri di taglio e ai trattamenti superficiali oppure se siano riconducibili alla variabilità naturale del processo di misura e di fabbricazione. In particolare, l'ANOVA è stata applicata per confrontare la rugosità e tensioni residue tra le serie con diversi parametri di taglio. I risultati di questa analisi sono presentati e discussi nel Capitolo 4.

L'interpretazione dei risultati dell'ANOVA si è basata principalmente sul p-value e sul coefficiente di determinazione R^2 . Il p-value, confrontato con la soglia di significatività dello 0,05, ha permesso di stabilire se le differenze osservate fossero statisticamente significative: un valore inferiore a 0,05 indica che esiste almeno una differenza significativa tra le medie delle serie, consentendo di rifiutare l'ipotesi nulla e attribuire le variazioni di rugosità ai diversi parametri di taglio e trattamenti; al contrario, un p-value superiore a 0,05 suggerirebbe che le differenze misurate potrebbero essere dovute al caso e che i fattori considerati non esercitano un effetto statisticamente rilevabile. Parallelamente, l' R^2 ha fornito un'indicazione sulla bontà del modello: un valore prossimo a 1 significa che quasi tutta la variabilità della rugosità è spiegata dalla variabile "serie", confermando il ruolo predominante delle condizioni di lavorazione; un valore basso, invece, indicherebbe che gran parte della variabilità rimane inspiegata e che altri fattori non considerati influenzano in modo significativo la rugosità.

2.4. Utilizzo dei dati per la correzione delle curve S-N

I valori di rugosità misurati, in particolare il parametro R_z , sono stati successivamente impiegati per applicare il fattore di correzione K_r secondo la linea guida FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau), al fine di normalizzare le curve S-N delle diverse serie a un valore di rugosità di riferimento. Tale correzione segue la relazione:

$$K_r = 1 - \alpha_r * \log_{10}(R_z) * \log_{10}\left(\frac{2 * R_m}{R_{m,N,min}}\right) \quad (16)$$

dove:

- R_z altezza massima del profilo
- R_m resistenza a trazione ($R_m = 1097$ Mpa)
- α_r e $R_{m,N,min}$ costanti del materiale (acciai: $\alpha_r = 0,22$ e $R_{m,N,min} = 400$ Mpa) da manuale

3. Modello numerico

In assenza di una campagna sperimentale dedicata l'intero studio sulla correlazione tra parametri di taglio, tensioni residue, rugosità superficiale e vita a fatica è stato condotto per via numerica, utilizzando il software commerciale agli elementi finiti ANSYS. L'obiettivo principale del modello numerico è duplice:

1. Simulare la distribuzione delle tensioni nella sezione critica dei provini A40, A41, A42, A43 e A44, per comprendere come le diverse condizioni superficiali (rugosità, tensioni residue) influenzino il campo tensionale;
2. Applicare il Fatigue Tool di ANSYS per stimare la vita a fatica dei provini, utilizzando come curva S-N di input le curve di Kohout-Věchet (KV) corrette secondo la linea guida FKM, in modo da "isolare" l'effetto della rugosità e confrontare i diversi scenari.

Sebbene in origine si volessero verificare i provini di cui è stata svolta la caratterizzazione su vibroforo Amsler, la scelta è stata obbligata dall'improvvisa indisponibilità dello strumento. Si è scelto quindi di utilizzare l'approccio di simulare la vita a fatica tramite ANSYS con il fine di fornire una previsione sulla durata per futuri sviluppi dell'attività. I risultati hanno dimostrato una validità del metodo e verranno descritti più approfonditamente al Capitolo 4.

3.1. Curve S-N di input: dalle curve alla correzione FKM

Come descritto nei capitoli precedenti, per ciascuna serie di provini (A40, A41, A42, A43, A44) sono state determinate le curve S-N utilizzando il modello di Kohout-Věchet (KV), basato sui dati di letteratura e sui risultati del progetto FABEST. Tali curve incorporano l'effetto combinato di:

- rugosità superficiale;
- tensioni residue indotte dalla tornitura;
- microstruttura del materiale;
- geometria del provino.

Per separare il solo effetto della rugosità, è stato applicato il fattore di correzione k_R della linea guida FKM:

$$K_r = 1 - \alpha_r * \log_{10}(Rz) * \log_{10}\left(\frac{2 * R_m}{R_{m,N,min}}\right) \quad (16)$$

dove:

- Rz è l'altezza massima del profilo di rugosità misurata su ciascuna serie [μm];
- $R_m = 1097 \text{ MPa}$ è la resistenza a trazione dell'acciaio 42CrMo4+QT da datasheet.

3.1.1. Procedura di correzione

Partendo dalla curva KV espressa nella forma alternativa che esplicita il limite di fatica:

$$\sigma_a = \sigma_{FL} \left(\frac{N+B}{N+C} \right)^b \quad (17)$$

la correzione viene applicata nel modo seguente:

1. Correzione del limite di fatica: il limite di fatica sperimentale viene diviso per k_R per ottenere il limite di fatica del materiale liscio:

$$\sigma_{FL, liscio} = \frac{\sigma_{L, sper}}{k_R} \quad (18)$$

2. Correzione dell'esponente b : poiché la curva deve tendere allo stesso valore di resistenza a trazione per $N \rightarrow 0$ (indipendente dalla rugosità), la modifica del limite di fatica deve essere accompagnata da una modifica dell'esponente.

$$\sigma_a = k_R * \sigma_{FL, liscio} \left(\frac{N+B}{N+C} \right)^{b_k} \quad (19)$$

e imponendo che per $N=0$ si ottenga $\sigma_a = Rm$ (indipendente da k_R), si ricava:

$$b_k = \frac{\log k_R}{\log \left(\frac{C}{B} \right)} + b \quad (20)$$

3. Costruzione della curva corretta: con i nuovi parametri $\sigma_{FL, liscio}$ e b_k (mantenendo invariati B e C), si ottiene la curva S-N che rappresenta il comportamento del materiale in assenza di rugosità.

Si osservi appunto come le curve, in seguito a correzione, vengano traslate in modo non lineare verso carichi maggiori per durate maggiori evidenziando un aumento della vita a fatica in VHCF. Il tutto si può esprimere anche come una variazione del limite di fatica dovuto all'assenza di imperfezioni sul provino avendo eliminato la rugosità.

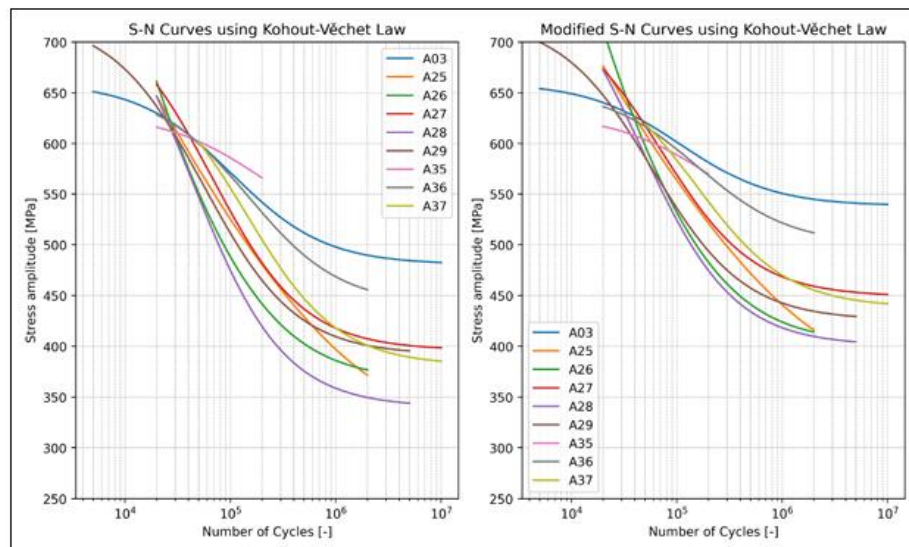


Figura 14 Modifica del modello KV con correzione FKM

Ciò risulta utile per avere un punto di partenza come materiale da importare in ANSYS per lo studio della vita a fatica. Si suppone quindi in assenza di altri dati sperimentali che i provini avendo:

1. Materiale identico: i provini sono ottenuti dallo stesso lotto di acciaio.
2. Tensioni residue indotte dalla lavorazione simili: come verificato precedentemente.
3. Forma identica: i provini hanno tutti la stessa forma da specifica.
4. Stessi trattamenti termici.

Si comportino in maniera simile a meno del fattore dovuto alla rugosità superficiale e di conseguenza ai parametri di taglio con cui sono stati ottenuti.

3.2. Modellazione FEM in ANSYS

3.2.1. Semplificazione geometrica

Un primo tentativo di modellazione ha previsto l'inserimento del profilo di rugosità reale (acquisito dal profilometro) direttamente sulla superficie della sezione critica del provino. Tuttavia, questa strategia si è rivelata non praticabile a causa delle seguenti difficoltà:

- Dimensione degli elementi: la rugosità presenta dettagli dell'ordine di pochi micron (tipicamente R_z tra 2 e 10 μm), che richiederebbero elementi finiti con dimensioni inferiori a 1 μm , portando a un numero di elementi e nodi computazionalmente proibitivo (milioni di elementi).
- Convergenza della mesh: la presenza di picchi e valli molto ravvicinati genera gradienti di tensione estremamente elevati, con serie difficoltà di convergenza.
- Tempi di calcolo: anche ipotizzando una mesh semplificata, i tempi di soluzione sarebbero risultati incompatibili.

Pertanto, si è scelto di adottare un modello geometricamente semplificato (superficie liscia) e di introdurre l'effetto della rugosità a posteriori tramite il coefficiente k_R , come descritto al paragrafo 3.1.

3.2.2. Modellazione CAD e importazione

La geometria tridimensionale del provino è stata realizzata utilizzando il software di modellazione parametrica SolidWorks. Il modello CAD riproduce fedelmente le dimensioni del provino reale, come illustrato in Figura 15.

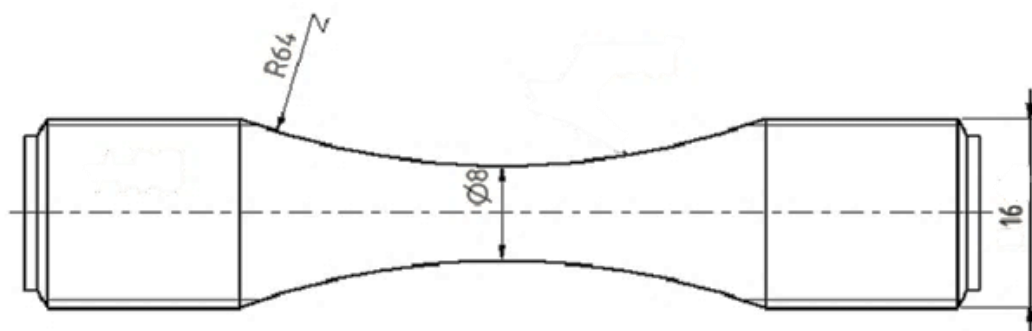


Figura 15 Caratteristiche geometriche del provino per le prove a fatica

In Figura 16 si osservi dunque il provino semplificato delle caratteristiche descritte generato per rivoluzione.

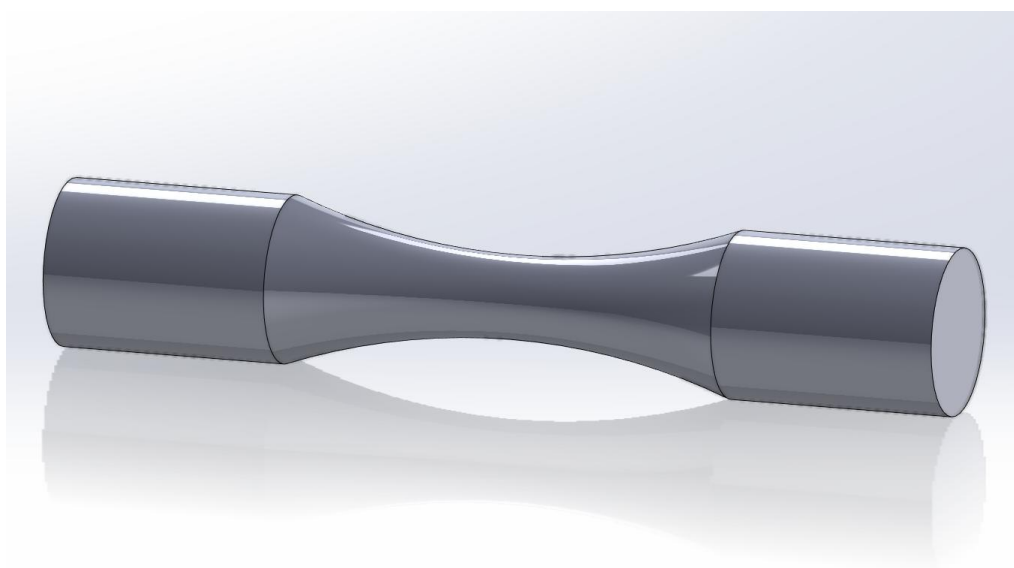


Figura 16 Modello 3D del provino semplificato

Successivamente, il modello è stato esportato in formato Parasolid(.x_t) e importato in ANSYS Mechanical per le successive fasi di mesh, applicazione dei carichi e analisi. La conformazione del reticolo di mesh del provino è stato inizialmente generato automaticamente dal software e si presenta come in Figura 17:

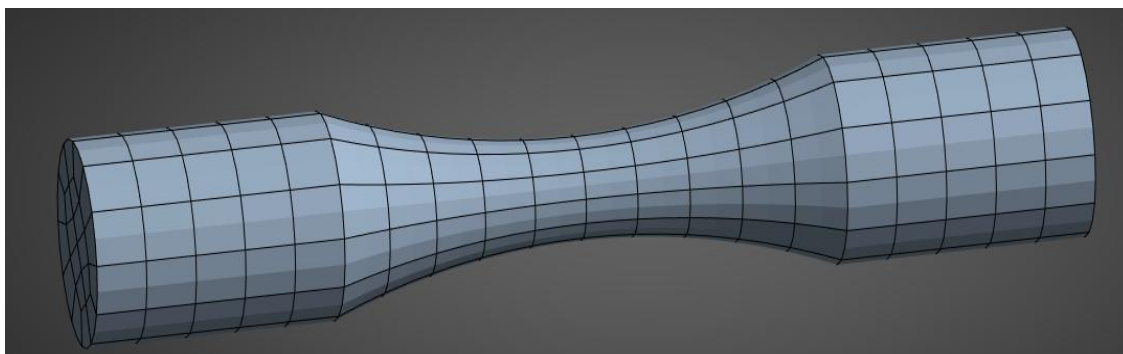


Figura 17 Mesh automatica generata da ANSYS

3.2.3. Proprietà del materiale

Le caratteristiche del materiale sono state ricavate a partire dai parametri delle curve KV dalla pubblicazione [1]. I seguenti valori dalla Tabella 6 prendono parte nel calcolo delle caratteristiche del materiale:

Tabella 6 Valori di partenza del modello di KV per le serie di riferimento

	A35	A26	A29
a	1390	5920	4930000
bk	-0,0721	-0,223	-0,812
B	59600	1	52600
C	1,04E+14	262000	112000
R2	0,95	0,95	0,95

A partire da questi valori, sapendo che ANSYS accetta come caratteristiche del materiale per il calcolo della vita a fatica la tabella con i valori per ogni livello di carico, sono stati valutati per tutto il range possibile i nuovi valori del materiale secondo la correzione FKM suggerita da [1]:

Tabella 7 Valori del materiale utilizzati in ANSYS

Cicli	Tensione A35	Tensione A35 corretta	Tensione A26	Tensione A26 corretta	Tensione A29	Tensione A29 corretta
1,00E+00	629,10	629,10	5072,15	5101,93	723,44	723,44
2,00E+00	629,10	629,10	4633,66	4676,85	723,43	723,44
5,00E+00	629,10	629,10	3970,05	4030,58	723,42	723,42
1,00E+01	629,09	629,09	3468,13	3539,07	723,39	723,40
2,00E+01	629,08	629,09	3002,44	3080,63	723,33	723,35
5,00E+01	629,06	629,06	2463,50	2546,66	723,15	723,21
1,00E+02	629,02	629,03	2115,41	2199,48	722,86	722,98
2,00E+02	628,95	628,96	1814,61	1897,71	722,27	722,51
5,00E+02	628,72	628,75	1480,62	1560,40	720,51	721,12
1,00E+03	628,35	628,41	1269,39	1345,61	717,63	718,84
2,00E+03	627,60	627,73	1088,63	1160,73	712,01	714,38
5,00E+03	625,46	625,76	889,74	955,94	696,28	701,86

1,00E+04	622,10	622,68	765,49	827,15	673,27	683,42
2,00E+04	616,11	617,18	661,17	718,40	636,37	653,60
5,00E+04	602,07	604,27	551,27	603,12	567,49	596,93
1,00E+05	585,97	589,45	488,24	536,62	511,47	549,78
2,00E+05	565,77	570,80	441,70	487,32	464,90	509,76
5,00E+05	535,29	542,54	402,57	445,72	425,49	475,23
1,00E+06	511,21	520,13	385,99	428,04	409,49	461,03
2,00E+06	487,29	497,78	376,67	418,09	400,81	453,28
5,00E+06	456,72	469,07	370,67	411,68	395,37	448,40
1,00E+07	434,64	448,24	368,59	409,46	393,51	446,73
2,00E+07	413,54	428,25	367,54	408,33	392,58	445,89
5,00E+07	387,15	403,13	366,90	407,65	392,01	445,38
1,00E+08	368,30	385,10	366,69	407,42	391,82	445,21

I valori che emergono evidenziano come la correzione secondo FKM agisca in modo non lineare. Infatti, è possibile osservare che il modello non varia la tensione per LCF, mentre i valori in VHCF vengono aumentati. Il comportamento qui descritto evidenzia che la rugosità del provino influisce sul limite di fatica del materiale come noto da letteratura scientifica.

3.2.4. Condizioni al contorno e carichi applicati

Il modello è stato vincolato in modo da riprodurre le condizioni di una prova di fatica in carico controllato a trazione/compressione pura ($R = -1$) come se il provino fosse montato sul vibroforo Amsler:

- Vincolo: sulla faccia terminale di un'estremità del provino sono stati applicati spostamenti nulli in tutte le direzioni (vincolo di incastro).
- Carico: sulla faccia opposta è stata applicata una forza assiale distribuita corrispondente a diverse ampiezze di tensione nominale alterna simmetrica σ_a , nell'intervallo di interesse per la fatica.

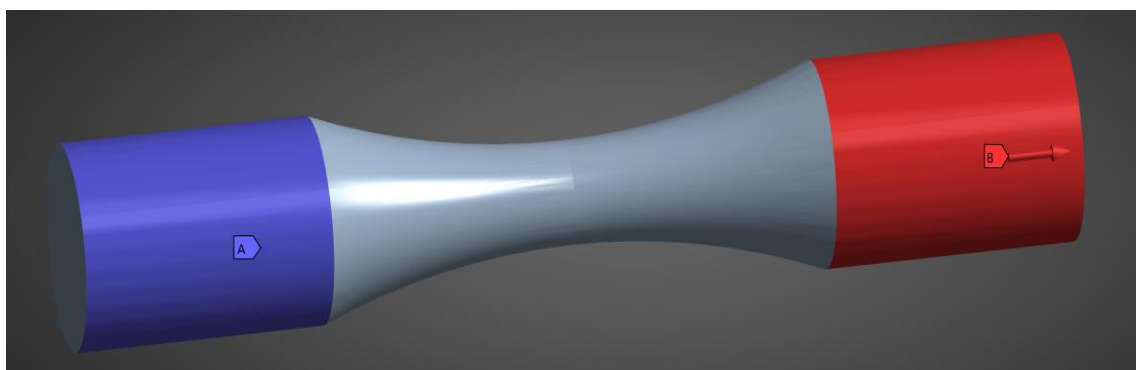


Figura 18 Carico cilindrico (in rosso) e vincolo cilindrico (in blu)

Sono state analizzate 12 ampiezze di tensione per ciascuna serie, coprendo la regione di transizione dal limite di fatica alla vita finita (da circa 10^3 a 10^7 cicli) per ottenere tutto il range utile a trovare le nuove curve di Kohout-Věchet.

3.2.5. Impostazione del Fatigue Tool e criterio di convergenza

L'analisi della vita a fatica è stata condotta utilizzando il Fatigue Tool integrato in ANSYS Mechanical. La procedura adottata è la seguente:

1. Analisi statica lineare: per ciascuna ampiezza di tensione, è stato risolto il problema elastico lineare e sono state estratte le tensioni principali e di von Mises nella sezione critica.
2. Definizione della curva S-N di input: come curva S-N di riferimento è stata utilizzata la curva KV ricavata dai provini con gli stessi parametri di taglio della serie in esame, inserita manualmente nel Fatigue Tool tramite tabella (σ_a, N).
3. Impostazioni del Fatigue Tool:
 - Tipo di carico: trazione alterna simmetrica ($R = -1$);
 - Metodo di combinazione delle tensioni: tensione principale massima (per cricche di tipo I);
 - Trattamento delle tensioni medie: metodo di Goodman (anche se con $R = -1$ la tensione media è nulla);
 - Criterio di convergenza: è stato impostato un criterio di convergenza del 5% (opzione "Convergence" del Fatigue Tool). Ciò significa che l'algoritmo di soluzione itera fino a quando la variazione della vita a fatica calcolata tra due iterazioni successive scende al di sotto del 10%. Questo valore garantisce un buon compromesso tra accuratezza e tempi di calcolo.
4. Estrazione dei risultati: per ciascuna ampiezza di tensione, il Fatigue Tool ha restituito il numero di cicli a rottura N previsto dal modello.

3.3. Codice MATLAB per il calcolo delle nuove curve Kohout-Věchet

I dati di vita a fatica ottenuti da ANSYS (per ciascuna serie e per ciascuna ampiezza di tensione) sono stati elaborati mediante un codice sviluppato in ambiente MATLAB al fine di ricavare le corrispondenti curve di Kohout-Věchet per ogni serie di provini.

3.3.1. Motivazione

Il Fatigue Tool di ANSYS fornisce direttamente i valori di N per i singoli punti di carico, ma non restituisce automaticamente i parametri della curva KV (σ_∞, b, B, C) che ne descrivono l'andamento analitico. Il codice MATLAB è stato implementato per:

- Eseguire la regressione non lineare sui dati (σ_a, N) secondo il modello KV;
- Determinare i parametri ottimali della curva che meglio interpola i punti simulati;
- Confrontare la curva KV simulata con quella di input (derivata dai provini con stessi parametri di taglio);

- Produrre grafici (curve S-N in scala log-log) e tabelle riassuntive.

3.3.2. Implementazione del codice

Il codice MATLAB è stato strutturato nei seguenti segmenti principali:

1. Importazione dei dati: lettura dei file di esportazione contenenti per ciascuna serie i valori di σ_a e N .
2. Definizione del modello KV: implementazione della funzione di Kohout-V  chet nella forma:

dove i parametri da ottimizzare sono σ_∞ , b , B , C .
3. Regressione non lineare: utilizzo della funzione *lsqcurvefit* (contenuta nel *Optimization Toolbox*) per minimizzare la somma dei quadrati degli scarti in termini di $\log N$ (coerente con la natura delle prove di fatica, dove la tensione   la variabile indipendente). Sono stati forniti valori iniziali ragionevoli per i parametri a partire dalla letteratura del progetto FABEST.
4. Calcolo degli indicatori di bont  di adattamento:
 - Coefficiente di determinazione R^2 ;
 - Intervalli di confidenza al 95% per ciascun parametro.
5. Confronto con le curve di riferimento: la curva KV simulata   stata sovrapposta graficamente alla curva KV di input (da dati FABEST).
6. Esportazione dei risultati: salvataggio dei parametri KV simulati e dei grafici in formato “.fig”, “.png” e “.xlsx”.

4. Risultati

I risultati sono stati suddivisi in tre blocchi, ciascuno dedicato a un aspetto specifico dell'indagine.

Il primo blocco (paragrafo 4.1) riporta una rassegna su ciò che già è disponibile come valori per quanto riguarda l'analisi delle tensioni residue sul componente. Dai dati disponibili è stata eseguita un'analisi per valutare la bontà dei dati stessi. L'obiettivo di queste analisi è capire come comportarsi per i successivi test mediante ANSYS da punto di vista delle tensioni residue stesse. Per valutare questo aspetto si è fatto uso dell'analisi della varianza con software Minitab

Il secondo blocco (paragrafo 4.2) raccoglie gli esiti delle misurazioni di rugosità eseguite con il profilometro PGS 200 sulle cinque serie di provini. Le acquisizioni, condotte secondo la procedura operativa standard descritta nel secondo capitolo, sono state elaborate con il codice MATLAB sviluppato ad hoc in conformità alla ISO 21920:2020. Per ciascuna serie sono stati estratti i principali parametri di rugosità, con particolare attenzione a R_a e R_z . L'analisi si è poi concentrata sulle differenze osservate tra le serie, cercando di ricondurle ai diversi parametri di taglio adottati (velocità, avanzamento, profondità di ultima passata). Un capitolo a parte ha riguardato l'influenza del trattamento di distensione delle tensioni residue, applicato alle serie A43 e A44. Per valutare la significatività statistica delle differenze emerse, si è fatto ricorso all'ANOVA tramite il software Minitab, che ha permesso di individuare raggruppamenti omogenei tra le serie.

Il terzo blocco (paragrafo 4.3) è dedicato all'applicazione del modello di Murakami. I dati di rugosità appena descritti sono stati utilizzati come input per stimare il limite di fatica di ciascuna serie. Il modello, com'è noto, correla σ_w alla dimensione dei difetti superficiali attraverso il parametro $\sqrt{area}$. Nel nostro caso, la rugosità di tornitura è stata assimilata a un insieme di intagli periodici, la cui profondità (R_z) e passo (R_{sm} , ricavato direttamente dall'osservazione dei profili) determinano il valore di $\sqrt{area_R}$. Le stime ottenute forniscono una previsione teorica del limite di fatica per ogni serie, al netto di altri fattori come le tensioni residue o le disomogeneità microstrutturali. Per verificarne la coerenza, i risultati sono stati confrontati con i coefficienti di correzione k_R ricavati dalla linea guida FKM.

Il quarto blocco (paragrafo 4.4) presenta i risultati delle simulazioni agli elementi finiti condotte in ANSYS Mechanical. Il modello CAD tridimensionale, realizzato in SolidWorks, è stato importato in ANSYS per l'analisi strutturale e per l'applicazione del Fatigue Tool. Le curve S-N di input sono state ricavate dai provini con gli stessi parametri di taglio delle serie in esame, utilizzando il modello di Kohout-Věchet; il criterio di convergenza è stato fissato al 10%. Le durate stimate dalle simulazioni sono state poi confrontate con le curve KV di partenza (che già includono l'effetto della rugosità) e con le curve corrette FKM, che rappresentano il comportamento del materiale in assenza di rugosità. In questo modo è stato possibile quantificare l'incremento di vita attribuibile alla rimozione della rugosità e valutare l'affidabilità del modello numerico nel predire il comportamento a fatica.

L'integrazione di questi tre approcci – sperimentale (misure di rugosità), analitico (modello di Murakami) e numerico (simulazioni ANSYS) – ha permesso di ottenere una visione d'insieme sulla correlazione tra parametri di taglio, rugosità superficiale e vita a fatica. I risultati che

seguono costituiscono la base per la discussione finale e per gli sviluppi futuri del progetto FABEST, che verranno affrontati nel quinto capitolo.

4.1. Risultati delle tensioni residue indotte da lavorazione meccanica

In questo paragrafo l'obiettivo principale è fornire una visione sullo stato delle tensioni residue presenti sul componente e in seguito ad analisi con metodi statistici. Questa analisi è necessaria dal momento che non è possibile avere a disposizione le caratteristiche del materiale per le serie trattate di provini. Il fine ultimo è sapere come comportarsi dal punto di vista della simulazione per quanto riguarda le tensioni residue.

4.1.1. Anova sulle tensioni residue

Lo scopo di questa analisi è mettere in risalto l'eventuale rilevanza dei dati ottenuti delle tensioni residue indotte sul componente. In particolare, sono stati presi in considerazione dati già ottenuti dal progetto FABEST sui provini in questione. I provini di cui sono stati rilevate queste tensioni sono per natura della misura distruttiva non più disponibili per misure di fatica, tuttavia i parametri di taglio e trattamenti termici sono analoghi ai provini attualmente disponibili. I valori di tensione residua sono stati rilevati in due punti sull'asse, cioè in concomitanza dell'ingresso del tagliente ed uscita dello stesso. Si è scelto a rigor di logica di prendere il valore medio sul provino di tensione residua in direzione assiale, poiché questa è la diretta responsabile dell'influenza per le prove a fatica. I valori a disposizione sono presentati in Tabella 8:

Tabella 8 Valori di tensione residua sul provino

Family	ID	RS_Knife_In_Ax	RS_Knife_Out_Ax	RS-Mean	Relieve
A40	A4001	-84	-158	-121	Yes
A40	A4002	-98	-157	-127,5	Yes
A40	A4003	-110	-90	-100	Yes
A41	A4114	163	126	144,5	Yes
A41	A4115	90	43	66,5	Yes
A41	A4116	64	41	52,5	Yes
A43	A4128	-181	-137	-159	No
A43	A4129	85	179	132	No
A43	A4130	370	312	341	No
A42	A4240	101	36	68,5	Yes
A42	A4241	163	168	165,5	Yes
A42	A4242	120	98	109	Yes
A44	A4453	206	-371	-82,5	No
A44	A4454	306	353	329,5	No
A44	A4455	-54	17	-18,5	No

Da una prima analisi qualitativa, come osservabile successivamente in Figura 20, la famiglia A40 presenta i valori più compressivi tra tutti i provini. Per fornire un'ulteriore valutazione quantitativa in grado di analizzare se le tensioni siano coerenti o no è stata eseguita un'ANOVA sui valori sopra presentati. Per l'analisi con Minitab è stato impostato un modello ANOVA One-Way indicando come risposta il valore di tensione residua media assiale e come fattore

la famiglia di appartenenza con conseguenti parametri di taglio e trattamento. In particolare alla Tabella 9:

Tabella 9 Anova sulle tensioni residue assiali

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Relieve	1	13727	13727	0,54	0,476
Error	13	331177	25475		
Total	14	344904			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
159,609	3,98%	0,00%	0,00%		

Si osservi come l'analisi indichi proprio una non correlazione tra i parametri di taglio e il valore di tensione residua assiale sul componente grazie al $p\text{-value} > 0,005$. Inoltre, il valore di R^2 mostra proprio come il modello non sia accettabile e quindi non si possa trarre conclusioni da questi valori. È stata anche eseguita un'analisi Anova con fattore la presenza di trattamento termico di distensione delle tensioni residue, tuttavia anch'essa risulta invalida perché non si può correlare con un'anova one-way dal momento che le famiglie presentano parametri di taglio differenti. Tutto ciò rimane comunque utile per validare gli sviluppi futuri di questo progetto e fornisce una visione su come i parametri di taglio abbiano influito per la distribuzione di tensioni residue sui provini in Figura 19:

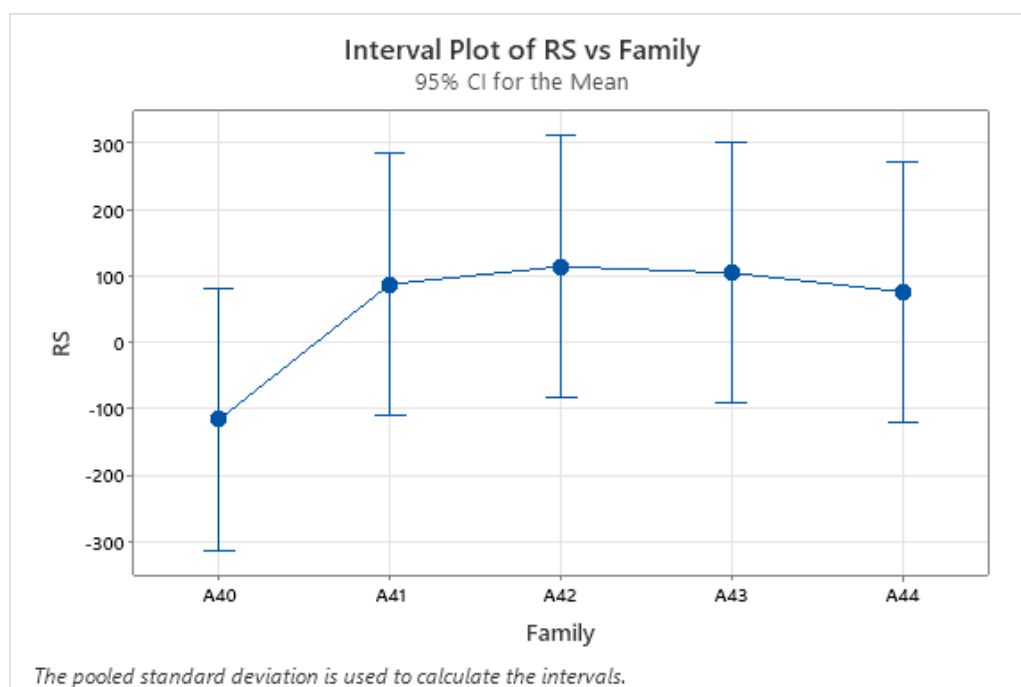


Figura 19 Valori di tensione residua per serie

I parametri ottimizzati della serie A40 infatti hanno mostrato valori di tensioni residue inferiori e compressive rispetto alla controparte. Sembra evidente, in seguito all'analisi, che il

trattamento di rilassamento delle tensioni residue non abbia portato alcun giovamento. Addirittura nel confronto tra A41 e A43 viene mostrato un aumento di tensioni residue in seguito al trattamento ovviamente impossibile. Ciò è dato dal fatto che in fase di produzione si ha una grossa variabilità nella lavorazione dei provini introducendo un fattore aleatorio sulle tensioni residue indotte dalla lavorazione stessa. Un altro possibile aspetto riguarda il fatto che non si è certi come descritto da [1] che le misure stesse non siano state fatte in modo ripetibile e validato. Viene infatti suggerito anche da [1] stesso come sviluppo futuro l'ideazione di un metodo più attendibile di misura delle tensioni residue sui provini. Si osservi inoltre successivamente come i parametri di taglio ottimizzati abbiano un interesse rilevante sulla rugosità della superficie.

4.1.2. Confronto con le serie di riferimento

La Figura 20 mostra il confronto delle tensioni residue tra le serie analizzate (A40, A41, A42) e le rispettive serie di riferimento del progetto FABEST (A35, A26, A29). I dati sono organizzati in tre coppie di confronto, ciascuna delle quali mette in relazione una serie con parametri di taglio specifici con la serie di riferimento corrispondente. Non sono stati considerati i casi con trattamento termico di distensione delle tensioni residue perché come emerso anche da [1] i dati dimostrano un'elevata variabilità che conferma che il trattamento stesso potrebbe non essere stato eseguito a regola d'arte o le misurazioni di tensioni residue risultino incoerenti per via del punto dove sono state rilevate.

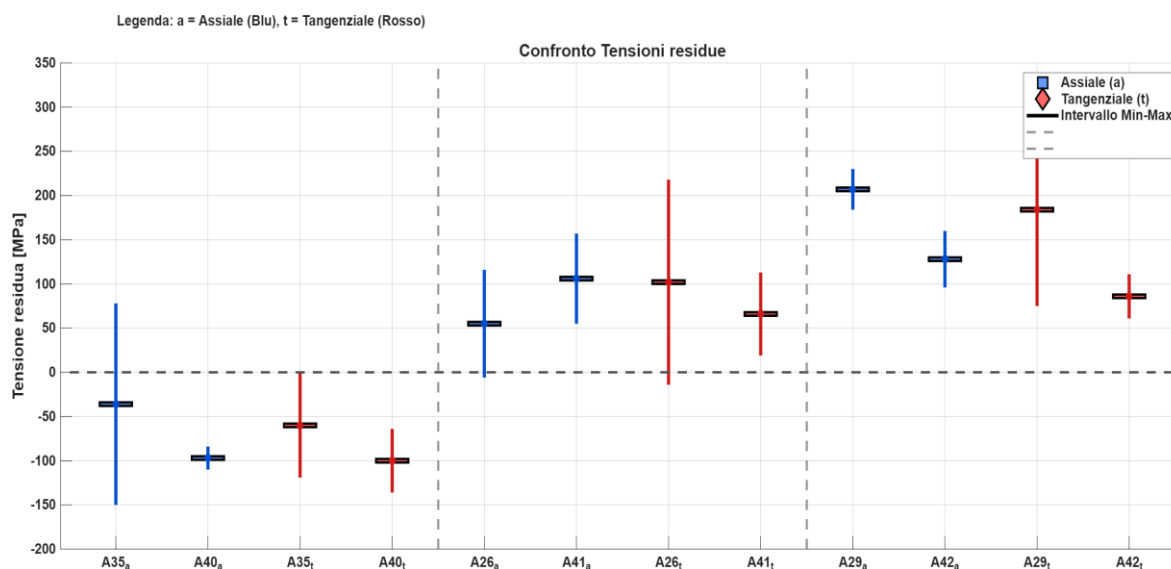


Figura 20 Confronto tra tensioni residue

Il grafico evidenzia chiaramente le differenze tra le serie in termini di entità e segno delle tensioni residue:

- Coppia 1 (A35 vs A40): entrambe le serie presentano tensioni residue compressive in entrambe le direzioni. La serie A40 mostra valori di compressione più elevati (-97 MPa assiali, -100 MPa tangenziali) rispetto alla serie di riferimento A35 (-36 MPa assiali, -60 MPa tangenziali), con deviazioni standard notevolmente inferiori (13 MPa vs 114 MPa in direzione assiale). Questo indica una maggiore ripetibilità del processo per la configurazione ottimizzata A40.

- Coppia 2 (A26 vs A41): entrambe le serie presentano tensioni residue di trazione in direzione assiale. La serie A41 mostra valori assiali leggermente superiori ad A26 (106 MPa vs 55 MPa), mentre in direzione tangenziale i valori sono inferiori (66 MPa vs 102 MPa). Le deviazioni standard sono comparabili tra le due serie.
- Coppia 3 (A29 vs A42): entrambe le serie presentano tensioni residue di trazione in entrambe le direzioni. La serie A42 mostra valori significativamente inferiori rispetto alla serie di riferimento A29 in entrambe le direzioni (128 MPa vs 207 MPa in direzione assiale, 86 MPa vs 184 MPa in direzione tangenziale), con deviazioni standard contenute (32 MPa vs 23 MPa in direzione assiale).

L'analisi grafica conferma quindi che la configurazione A40 (velocità di taglio 100 m/min, avanzamento 0.05 mm/giro) produce le tensioni residue più favorevoli (compressive) con la migliore ripetibilità, mentre le configurazioni A41 e A42 generano tensioni residue di trazione, sebbene con entità diverse rispetto alle rispettive serie di riferimento.

4.1.3. Considerazioni sul presente lavoro

Sebbene le tensioni residue delle serie analizzate presentino differenze rispetto alle serie di riferimento, è importante sottolineare che tali differenze, in termini di valori assoluti, sono comparabili o leggermente inferiori a quelle delle serie di riferimento del progetto FABEST. In particolare:

- Per la coppia A40/A35, i valori sono comparabili in termini di segno (entrambe compressive), con A40 che mostra una compressione leggermente più marcata ma con deviazione standard molto inferiore, indicando una maggiore affidabilità del processo.
- Per la coppia A41/A26, le differenze sono modeste (106 MPa vs 55 MPa in direzione assiale), e i valori rientrano comunque nello stesso ordine di grandezza delle tensioni residue misurate nel progetto FABEST [2].
- Per la coppia A42/A29, i valori sono addirittura inferiori (128 MPa vs 207 MPa in direzione assiale), collocando le tensioni residue di A42 in una fascia più bassa rispetto al riferimento.

Questo risultato è particolarmente significativo perché consente di adottare un approccio conservativo nell'analisi della fatica. Infatti, il fatto che le tensioni residue delle nostre serie siano comparabili o inferiori a quelle di riferimento significa che gli eventuali effetti benefici (nel caso di tensioni compressive) o dannosi (nel caso di tensioni di trazione) sono, nel peggiore dei casi, dello stesso ordine di grandezza di quelli già documentati in letteratura per il progetto FABEST. Pertanto, le conclusioni tratte dall'analisi delle curve S-N e dei modelli predittivi (Murakami, FKM) possono essere considerate valide e rappresentative, senza il rischio di sovrastimare l'effetto benefico delle tensioni residue.

Inoltre, come osservato da Matušů et al. [1], le tensioni residue subiscono un rilassamento significativo durante le prime fasi del carico ciclico, specialmente a livelli di tensione elevati. Questo fenomeno riduce ulteriormente l'importanza delle differenze misurate nello stato iniziale, rendendo le nostre serie ancora più comparabili alle riferimento in termini di risposta a fatica effettiva.

In sintesi, l'analisi delle tensioni residue conferma che le nostre serie (A40, A41, A42) presentano uno stato tensionale residuo pienamente confrontabile con quello delle serie di riferimento del progetto FABEST, con valori che, se non identici, sono comunque dello stesso ordine di grandezza e, in alcuni casi, leggermente inferiori. Questo ci consente di procedere con un'analisi conservativa e di attribuire le differenze nelle curve S-N principalmente all'effetto della rugosità superficiale e dei parametri di taglio, piuttosto che a differenze sostanziali nello stato tensionale residuo.

4.2. Risultati sulla rugosità superficiale

In questo capitolo vengono presentati e discussi i risultati delle misurazioni di rugosità superficiale effettuate sulle cinque serie di provini (A40, A41, A42, A43, A44). Come descritto nel Capitolo 2, le misure sono state eseguite con il profilometro SM PGS 200 secondo la procedura operativa standard definita, acquisendo 4 profili angolari (a 90° l'uno dall'altro) con 3 ripetizioni per profilo, per un totale di 12 profili per provino e un totale di 50 provini come precedentemente descritto. I profili grezzi sono stati successivamente elaborati mediante il codice MATLAB sviluppato secondo la norma ISO 21920:2020. Particolare attenzione è dedicata al parametro Rz, poiché esso è alla base del fattore di correzione k_R secondo la linea guida FKM, utilizzato nel Capitolo 4 per la correzione delle curve KV del materiale.

4.2.1. Valori dei parametri di rugosità

I profili di rugosità analizzati hanno fornito i seguenti parametri di rugosità per ogni provino, come visibile in Tabella 10:

Tabella 10 Valori di rugosità medi sul provino

ID	Specimen type	Specimen N°	Ra	Rq	Rz	Rp	Rv	Rsk	Rku	Rsm	Rmr
A4004	A40	4	0,553	0,754	3,636	2,364	3,668	-0,779	5,626	0,025	38,218
A4005	A40	5	1,175	1,462	6,091	4,371	3,493	0,469	2,895	0,036	35,415
A4006	A40	6	1,005	1,287	5,922	3,776	4,930	-0,324	4,170	0,031	39,019
A4007	A40	7	0,998	1,294	5,138	4,816	4,701	0,074	4,597	0,049	32,939
A4008	A40	8	0,696	0,888	4,092	2,620	2,903	-0,066	3,430	0,028	37,338
A4009	A40	9	0,539	0,764	3,547	2,308	4,174	-1,230	8,208	0,026	38,523
A4010	A40	10	1,090	1,379	5,624	4,590	5,407	-0,169	4,190	0,043	36,611
A4011	A40	11	0,608	0,819	3,845	2,525	3,421	-0,562	4,667	0,027	38,016
A4012	A40	12	0,658	0,830	3,911	2,448	2,975	-0,256	3,375	0,026	40,476
A4013	A40	13	0,627	0,874	4,039	2,630	3,911	-0,700	5,425	0,027	37,152
A4117	A41	17	1,066	1,347	5,637	5,036	5,016	0,082	4,068	0,050	34,432
A4118	A41	18	0,956	1,230	4,961	4,351	4,057	0,249	4,247	0,043	33,879
A4119	A41	19	1,439	1,821	8,185	5,561	5,140	-0,044	3,077	0,046	37,542
A4120	A41	20	0,962	1,268	5,462	5,127	4,784	0,089	5,221	0,049	31,759

A4121	A41	21	0,949	1,249	5,355	4,538	4,848	0,024	4,985	0,046	32,958
A4122	A41	22	1,384	1,757	7,871	5,325	5,674	-0,278	3,229	0,040	39,979
A4123	A41	23	0,919	1,231	5,511	5,006	4,613	0,135	5,583	0,049	30,943
A4124	A41	24	0,957	1,267	5,467	4,896	4,935	0,074	5,122	0,052	31,626
A4125	A41	25	1,276	1,626	7,413	5,347	5,341	0,046	3,604	0,044	36,055
A4126	A41	26	0,886	1,173	5,137	4,205	4,086	0,117	4,220	0,042	32,259
A4243	A42	43	1,068	1,335	5,396	4,150	5,207	-0,150	3,877	0,045	37,636
A4244	A42	44	1,050	1,311	5,485	3,847	5,122	-0,170	3,755	0,038	38,812
A4245	A42	45	0,928	1,206	5,293	4,505	4,632	-0,022	4,740	0,046	33,419
A4246	A42	46	0,927	1,220	5,173	4,856	4,854	0,024	5,257	0,049	32,248
A4247	A42	47	1,132	1,413	5,981	5,132	5,161	0,062	3,767	0,053	35,299
A4248	A42	48	1,160	1,444	6,308	4,984	4,896	0,105	3,459	0,057	35,571
A4249	A42	49	0,943	1,267	5,813	4,715	5,022	-0,139	5,215	0,046	32,758
A4250	A42	50	0,943	1,223	5,455	4,392	4,663	-0,019	4,374	0,046	33,902
A4251	A42	51	0,933	1,210	5,370	4,721	4,468	0,143	4,603	0,046	32,452
A4252	A42	52	1,139	1,435	5,961	4,671	5,567	-0,175	4,172	0,043	37,242
A4327	A43	27	0,890	1,184	5,016	5,250	4,339	0,294	5,353	0,049	29,749
A4331	A43	31	0,940	1,235	5,393	4,830	4,753	0,037	5,079	0,049	32,123
A4332	A43	32	0,920	1,221	5,360	4,872	4,646	0,139	5,469	0,045	31,326
A4333	A43	33	1,003	1,291	5,629	4,485	5,097	-0,044	4,474	0,042	35,244
A4334	A43	34	1,360	1,727	8,203	5,156	5,546	-0,052	3,319	0,043	37,816
A4335	A43	35	1,034	1,326	5,955	4,891	5,157	-0,032	4,620	0,044	34,802
A4336	A43	36	1,646	2,058	9,316	6,039	6,092	-0,132	3,006	0,044	39,519
A4337	A43	37	1,304	1,676	7,575	5,004	5,334	-0,075	3,529	0,044	37,485
A4338	A43	38	1,258	1,612	7,292	5,195	4,668	0,096	3,408	0,044	36,504
A4339	A43	39	1,085	1,377	6,211	4,969	5,351	-0,008	4,223	0,044	35,283
A4456	A44	56	0,887	1,189	5,075	4,571	4,775	-0,023	5,295	0,045	31,237
A4457	A44	57	1,137	1,414	5,838	4,518	5,035	-0,003	3,409	0,052	36,647
A4458	A44	58	0,982	1,266	5,091	4,235	5,292	-0,269	4,901	0,033	37,105
A4459	A44	59	1,094	1,379	5,566	4,941	5,069	0,062	3,956	0,053	34,882
A4460	A44	60	0,935	1,238	5,015	4,897	4,752	0,140	5,109	0,046	31,857
A4461	A44	61	0,947	1,271	5,563	4,731	4,843	-0,114	4,959	0,042	32,855
A4462	A44	62	1,168	1,458	6,107	4,873	5,112	0,037	3,533	0,052	36,071
A4463	A44	63	1,168	1,235	5,153	4,631	4,669	0,002	4,254	0,046	33,772
A4464	A44	64	1,168	1,344	5,524	4,659	5,032	0,028	3,742	0,053	35,676
A4465	A44	65	1,168	1,412	5,673	4,611	5,622	-0,121	4,305	0,049	36,233

I risultati possono essere visualizzati in veste grafica come diagramma per migliorare la percezione del fenomeno grazie alla possibilità di osservare la dispersione dei dati in Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

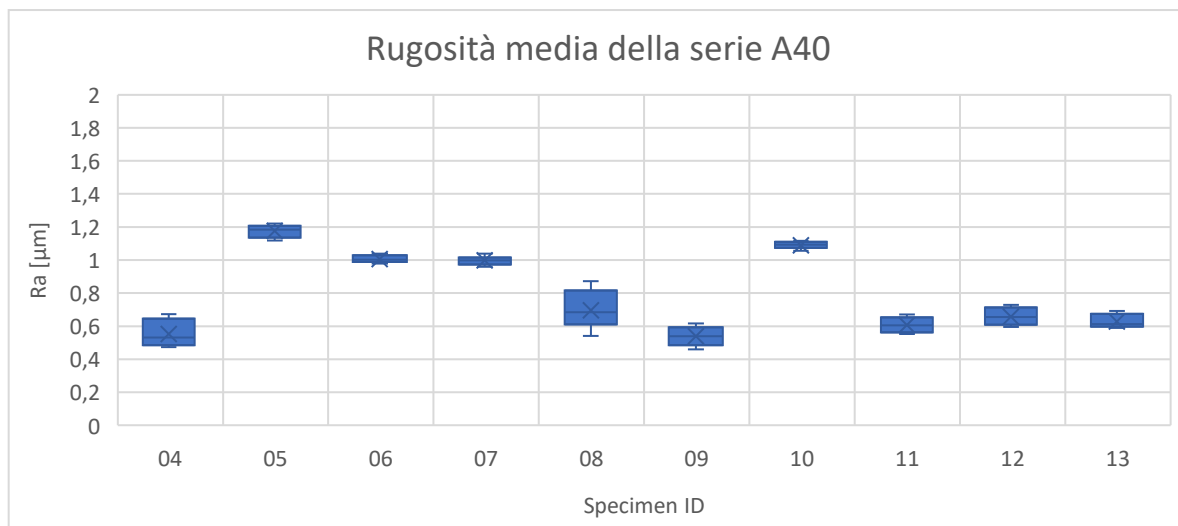


Figura 21 Valori di Ra per la serie A40

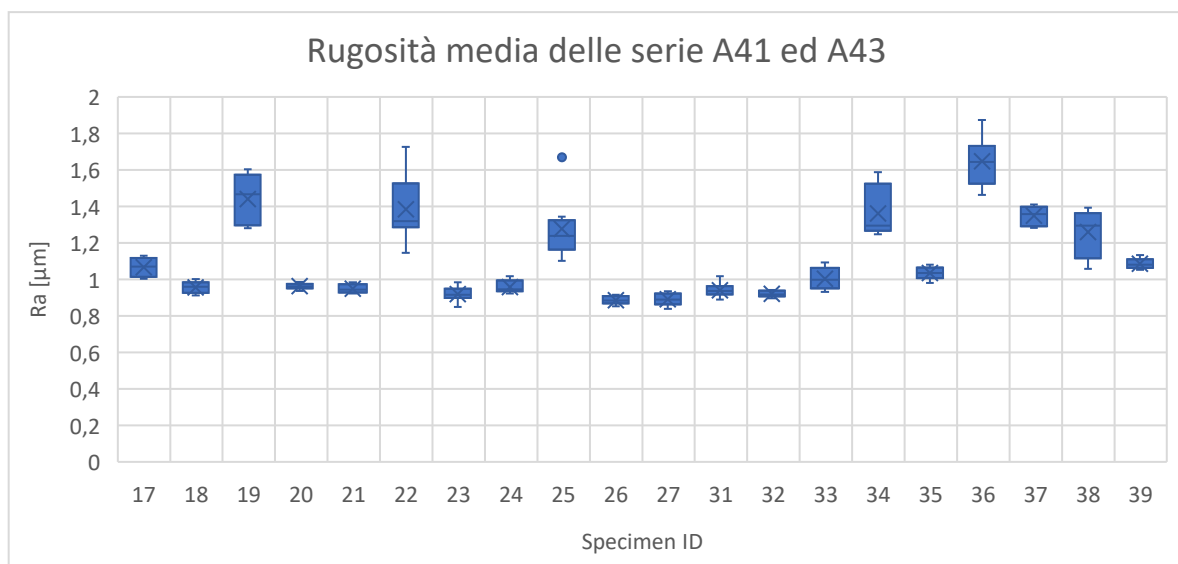


Figura 22 Valori di Ra per le serie A41 ed A43

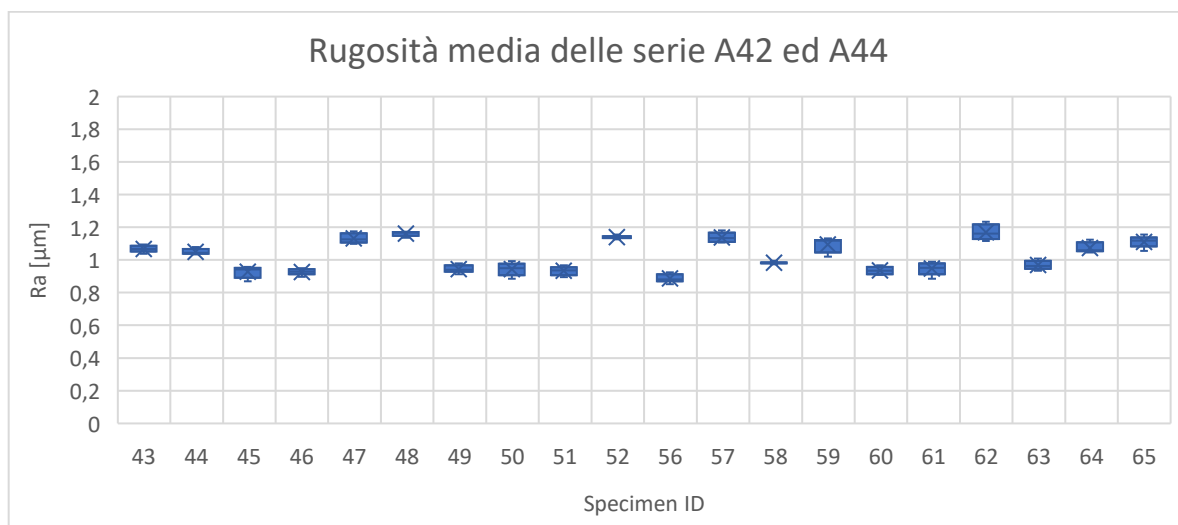


Figura 23 Valori di rugosità per le serie A42 ed A44

Dai dati sperimentali sono stati calcolati i valori medi, le deviazioni standard e i coefficienti di variazione per ciascuna serie. Per ogni serie sono stati considerati tutti i provini misurati: 10 provini per A40, 10 per A41, 10 per A42, 10 per A43 e 10 per A44. La Tabella 11 riporta i valori medi, le deviazioni standard (in $\pm$) e i coefficienti di variazione dei parametri di rugosità per ciascuna delle cinque serie analizzate.

Tabella 11 Valori di rugosità statistici per le diverse serie di provini

Serie	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsk [-]	Rku [-]	CV_Ra [%]
A40	0.829 $\pm$ 0.241	4.550 $\pm$ 0.969	-0.203 $\pm$ 0.510	4.657 $\pm$ 1.436	29.1
A41	1.014 $\pm$ 0.183	5.648 $\pm$ 1.078	0.068 $\pm$ 0.156	4.498 $\pm$ 0.799	18.0
A42	1.019 $\pm$ 0.091	5.561 $\pm$ 0.385	-0.031 $\pm$ 0.108	4.361 $\pm$ 0.579	8.9
A43	1.173 $\pm$ 0.226	6.213 $\pm$ 1.203	-0.008 $\pm$ 0.086	4.244 $\pm$ 0.681	19.3
A44	1.030 $\pm$ 0.098	5.404 $\pm$ 0.386	-0.024 $\pm$ 0.112	4.416 $\pm$ 0.642	9.5

Dalla Tabella 11 emergono le seguenti osservazioni preliminari:

1. A40 presenta i valori di rugosità più bassi ($R_a = 0.829 \mu\text{m}$, $R_z = 4.550 \mu\text{m}$), confermando che i parametri di taglio ottimizzati (velocità 100 m/min, avanzamento 0.05 mm/giro) producono la migliore finitura superficiale.
2. A41 e A42 (velocità 75.4 m/min) presentano valori di R_a leggermente superiori ad A40, con A42 (avanzamento 0.10 mm/giro) che mostra un R_a medio di $1.019 \mu\text{m}$, superiore ad A41 (avanzamento 0.05 mm/giro, $R_a = 1.014 \mu\text{m}$).
3. A43 (distensione di A41) presenta il valore di R_a più elevato ($1.173 \mu\text{m}$), con una deviazione standard di $0.226 \mu\text{m}$. Questo risultato suggerisce che il trattamento di distensione possa aver alterato leggermente la superficie, sebbene la differenza rispetto ad A41 non sia statisticamente significativa (come confermato dall'ANOVA).
4. A44 (distensione di A42) presenta un R_a medio di $1.030 \mu\text{m}$, simile ad A42 ($1.019 \mu\text{m}$), indicando che il trattamento di distensione ha un effetto nullo sulla rugosità.
5. Il coefficiente di variazione per A40 (29.1%) è il più elevato, indicando una maggiore variabilità all'interno della serie. Questo potrebbe essere attribuito alla presenza di alcuni provini con rugosità particolarmente bassa (es. A4004 con $R_a = 0.553 \mu\text{m}$) e altri con valori più elevati (es. A4005 con $R_a = 1.175 \mu\text{m}$).
6. Le serie A42 e A44 presentano i CV più bassi (8.9% e 9.5%), indicando un'elevata ripetibilità del processo per queste configurazioni.

Nel dettaglio:

Serie A40

La serie A40, caratterizzata da velocità di taglio di 100 m/min e avanzamento di 0.05 mm/giro, ha mostrato i valori di rugosità medi più bassi tra tutte le serie analizzate ($R_a = 0.829 \mu\text{m}$). Il valore minimo registrato è di $0.539 \mu\text{m}$ (provino A4009), mentre il massimo è di $1.175 \mu\text{m}$ (provino A4005). Il parametro R_z varia da $3.547 \mu\text{m}$ (A4009) a $6.091 \mu\text{m}$ (A4005).

La bassa rugosità di A40 è attribuibile alla maggiore velocità di taglio (100 m/min), che, come documentato da Zielinski et al. [11] e Matusů et al. [1], favorisce una migliore finitura superficiale riducendo la formazione di truciolo adesivo e migliorando il distacco del truciolo stesso.

Serie A41

La serie A41, caratterizzata da velocità di taglio di 75.4 m/min e avanzamento di 0.05 mm/giro, ha mostrato un Ra medio di 1.014 μm . I valori variano da un minimo di 0.886 μm (provino A4126) a un massimo di 1.439 μm (provino A4119). Il parametro Rz medio è 5.648 μm .

Il CV del 18.0% indica una dispersione moderata, attribuibile probabilmente a una minore stabilità del processo a velocità di taglio ridotta.

Serie A42

La serie A42, caratterizzata da velocità di taglio di 75.4 m/min e avanzamento di 0.10 mm/giro, ha mostrato un Ra medio di 1.019 μm . I valori variano da un minimo di 0.927 μm (provino A4246) a un massimo di 1.160 μm (provino A4248). Il Rz medio è 5.561 μm .

Il CV del 8.9% è il più basso tra tutte le serie, indicando un'eccellente ripetibilità del processo. L'aumento dell'avanzamento da 0.05 a 0.10 mm/giro rispetto alla serie A40 ha prodotto un incremento di Ra di circa il 6.4%, confermando l'effetto dell'avanzamento sulla rugosità, sebbene di entità moderata.

Serie A43 (A41 con distensione)

La serie A43, sottoposta a trattamento di distensione delle tensioni residue, presenta un Ra medio di 1.173 μm , con valori compresi tra 0.920 μm (provino A4332) e 1.646 μm (provino A4336). Il Rz medio è 6.213 μm .

Il CV del 19.3% è il più elevato tra le serie, indicando una variabilità significativa. Questo risultato potrebbe essere attribuito a un effetto del trattamento termico sulla superficie, sebbene l'ANOVA mostri che la differenza rispetto ad A41 non è statisticamente significativa.

Serie A44 (A42 con distensione)

La serie A44 presenta un Ra medio di 1.030 μm , molto simile ad A42 (1.019 μm). Il CV del 9.5% indica una buona ripetibilità, paragonabile ad A42. I valori variano da 0.887 μm (provino A4456) a 1.168 μm (provino A4462).

L'elevata similarità tra A42 e A44 conferma che il trattamento di distensione non altera significativamente la topografia superficiale.

4.2.2. Confronto tra le serie

In Figura 24 è diagrammato il confronto dei valori medi di R_a per le cinque serie, con le barre di errore rappresentanti la deviazione standard.

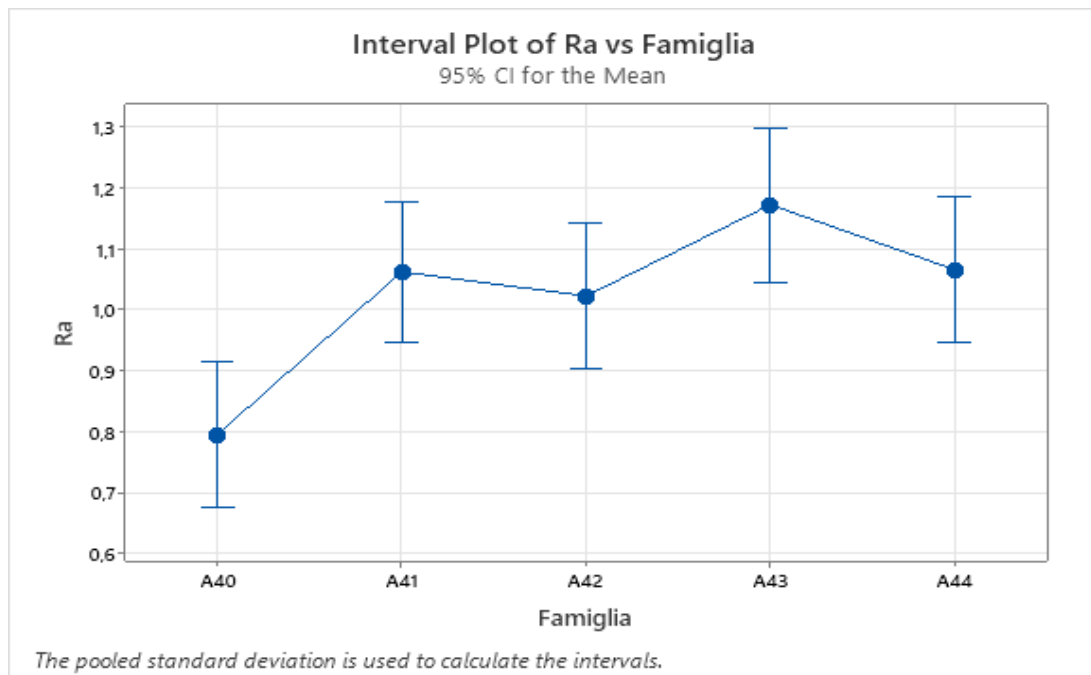


Figura 24 Confronto tra le rugosità dei provini nelle diverse famiglie di appartenenza

Dall'analisi dei risultati emergono le seguenti osservazioni:

- **A40** presenta la rugosità più bassa, confermando che l'aumento della velocità di taglio da 75.4 a 100 m/min, a parità di avanzamento, produce un miglioramento della finitura superficiale (riduzione di R_a del 18.2% rispetto ad A41 e del 18.7% rispetto ad A42).
- **A41 e A42** presentano valori di R_a simili (1.014 μm vs 1.019 μm), nonostante l'avanzamento doppio di A42 (0.10 vs 0.05 mm/giro). Questo risultato è in apparente contrasto con la letteratura [7, 8] che attribuisce all'avanzamento l'effetto dominante sulla rugosità. Tuttavia, la differenza di velocità di taglio (entrambe a 75.4 m/min) e le differenti condizioni di finitura (h_1 , h_2 , h_3) potrebbero aver compensato l'effetto dell'avanzamento.
- **A43** presenta il R_a più elevato (1.173 μm), ma in ogni caso comparabile alle serie ottenute con identici parametri di taglio, confermando che la distensione non modifica significativamente la rugosità.
- **A44** presenta un R_a molto simile ad A42, confermando che la distensione non modifica significativamente la rugosità.

4.2.3. Analisi della varianza ANOVA

Per valutare se le differenze osservate tra le serie siano statisticamente significative, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) ad una via utilizzando il software Minitab. Oltre a fornire una valutazione qualitativa visibile in Figura 24, questa restituisce dei valori del modello statistico per farne un'analisi quantitativa. Il fattore considerato è la serie di

appartenenza (A40, A41, A42, A43, A44) e quindi i relativi parametri di taglio, mentre la risposta è il parametro di rugosità media Ra. In Tabella 12 e 13 sono riportati i risultati dell'ANOVA per il parametro Ra.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Famiglia	4	0,7556	0,18889	5,27	0,001
Error	45	1,6116	0,03581		
Total	49	2,3671			

Tabella 12 ANOVA: rugosità-serie di appartenenza

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,189243	31,92%	25,87%	15,78%

Tabella 13 Dati statistici del modello ANOVA

Il $p\text{-value} < 0.05$ indica che esistono differenze statisticamente significative tra almeno due serie, sebbene il valore di R^2 basso indichi la scarsa bontà del modello. Per identificare quali coppie differiscano, è stato condotto il test post-hoc di Tukey ($\alpha = 0.05$). I risultati sono riportati in Tabella 14.

Serie	N	Media Ra [μm]	Raggruppamento
A43	10	1.173	A
A42	10	1.019	A B
A44	10	1.030	A B
A41	10	1.014	A B
A40	10	0.829	B

Tabella 14 Test di Tukey per le serie di appartenenza

Nota: serie con la stessa lettera non differiscono significativamente tra loro ($p > 0.05$).

Dall'analisi dei raggruppamenti emerge quanto segue:

- A40 (gruppo B) è statisticamente diversa da A43 (gruppo A) e risulta significativamente inferiore a tutte le altre serie, confermando il beneficio della maggiore velocità di taglio.
- A41, A42, A43 e A44 non mostrano differenze statisticamente significative tra loro, condividendo il raggruppamento A/B. In particolare, il trattamento di distensione (A41 vs A43; A42 vs A44) non produce variazioni significative della rugosità.
- La differenza tra A40 e le altre serie è statisticamente significativa.

L'ANOVA in sé non risulta totalmente esplicativa per il presente caso di studio in cui non si ha a disposizione l'intero piano sperimentale con tutti i possibili casi con diversi parametri di taglio. Inizialmente si è scelto di eseguire molteplici ANOVA One-Way con risposta Ra e fattore un parametro diverso di taglio. Si è però notato che avendo solo due livelli per ogni parametro di taglio il modello non risultava buono dal punto di vista statistico per descrivere come il parametro di taglio stesso influisse sulla finitura superficiale. Si è optato quindi per

generare un'analisi degli effetti principali che illustra meglio come l'andamento del parametro di taglio influisca sulla rugosità superficiale descritto al sottoparagrafo successivo.

4.2.4. Analisi dei parametri di processo legati alla rugosità

Poiché non è stato possibile realizzare un disegno sperimentale fattoriale completo che prevedesse tutte le combinazioni possibili dei parametri di taglio, si è proceduto con un'analisi degli effetti principali (*Main Effects Plot*) basata su esperimenti condotti variando un fattore alla volta, mantenendo costanti gli altri. Questo approccio, sebbene non consenta di valutare le eventuali interazioni tra i fattori, fornisce comunque una chiara indicazione dell'influenza individuale di ciascun parametro sulla rugosità superficiale R_a . Il grafico degli effetti principali in Figura 25 riporta, per ciascun fattore, il valore medio della rugosità corrispondente ai due livelli sperimentali, collegati da una linea. La pendenza di tale linea rappresenta l'entità e la direzione dell'effetto.

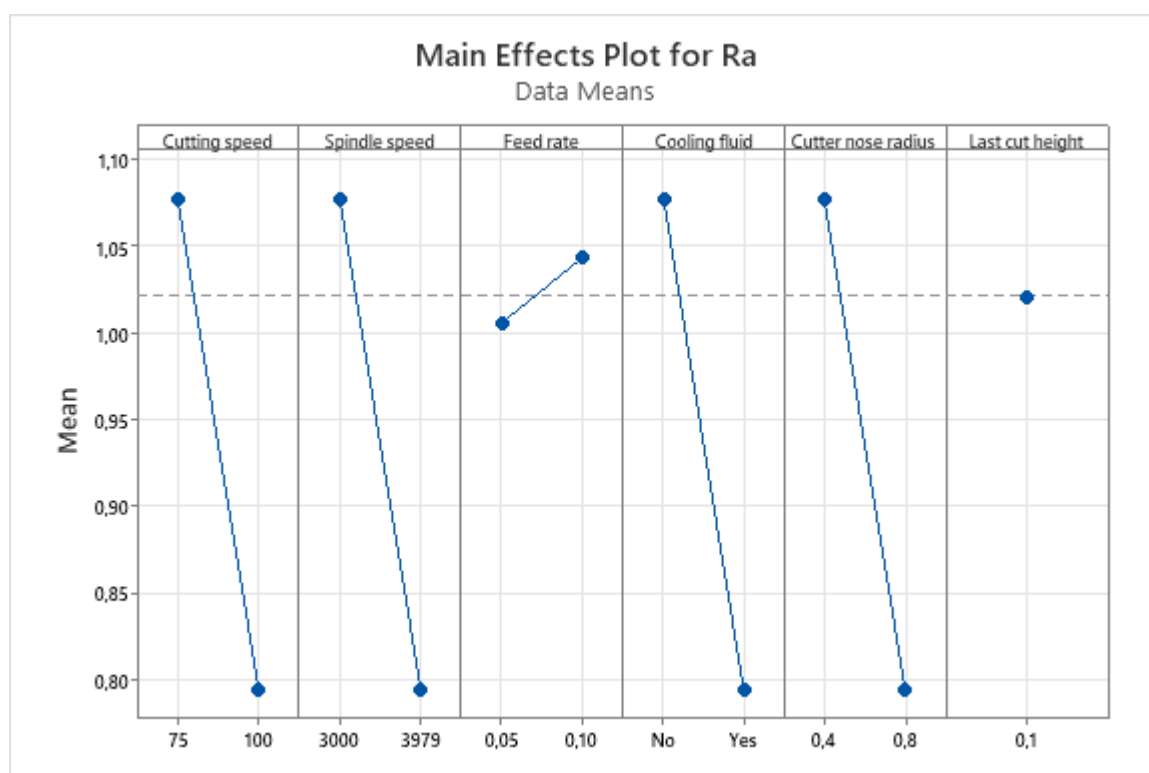


Figura 25 Main effect plot per la rugosità

Dai risultati emerge che la velocità di taglio, la lubrificazione e il raggio di punta mostrano gli effetti più marcati: aumentando la velocità da 75 a 100 m/min, attivando il fluido di lubrificazione e incrementando il raggio di punta da 0,4 a 0,8 mm, la rugosità media diminuisce da 1,077 μm a 0,794 μm . Questo indica che condizioni di taglio più spinte (velocità elevata) associate a lubrificazione e raggio di punta maggiore favoriscono una migliore finitura superficiale, probabilmente per la riduzione dell'attrito e la migliorata evacuazione del truciolo.

L'avanzamento mostra invece un effetto più contenuto: incrementando l'avanzamento da 0,05 mm/giro a 0,10 mm/giro, la rugosità aumenta leggermente da 1,006 μm a 1,044 μm (+0,038

μm), coerentemente con la letteratura che associa avanzamenti maggiori a un incremento delle ondulazioni superficiali e dell'incrudimento.

La profondità di ultima passata (Last cut height) non è stata inclusa nell'analisi in quanto mantenuta costante a 0,1 mm per tutte le prove sperimentali, non consentendo pertanto di valutarne l'effetto.

Si deve tuttavia evidenziare un limite sperimentale: i fattori velocità di taglio, lubrificazione e raggio di punta risultano perfettamente allineati tra loro (le condizioni A40 presentano contemporaneamente 100 m/min, lubrificazione attiva e raggio 0,8 mm, mentre le condizioni A41-A44 presentano 75 m/min, assenza di lubrificazione e raggio 0,4 mm). Pertanto, l'effetto osservato di riduzione della rugosità non può essere attribuito univocamente a un singolo fattore, ma rappresenta l'effetto combinato di queste tre variabili. Per disambiguare i singoli contributi sarebbero necessarie prove aggiuntive con combinazioni incrociate (es. 100 m/min senza lubrificazione o 75 m/min con lubrificazione).

Nonostante questa limitazione, la mappa degli effetti principali consente di identificare le condizioni operative che minimizzano la rugosità: velocità di taglio elevata (100 m/min), lubrificazione attiva, raggio di punta maggiore (0,8 mm) e avanzamento contenuto (0,05 mm/giro). Queste indicazioni costituiscono un valido punto di partenza per l'ottimizzazione del processo di tornitura.

4.2.5. Confronto con il difetto superficiale macroscopico

Come descritto da *Matušů et al.* [1], su tutti i provini è stato osservato un difetto superficiale come visibile in Figura 26 di circa 10 μm di profondità e 400-500 μm di lunghezza, localizzato al centro della sezione critica. Tale difetto è attribuito a un gioco nel meccanismo del tornio durante la transizione della traiettoria dell'utensile. Nelle misure effettuate, il groove è risultato visibile in tutti i profili. Per le serie con rugosità più bassa (A40), il groove ha un peso percentuale maggiore su R_z (fino al 40%), mentre per le serie con rugosità più elevata (A42, A44), il suo contributo è meno rilevante (circa 15-20%). Questo aspetto è di particolare interesse per gli sviluppi futuri del progetto FABEST.

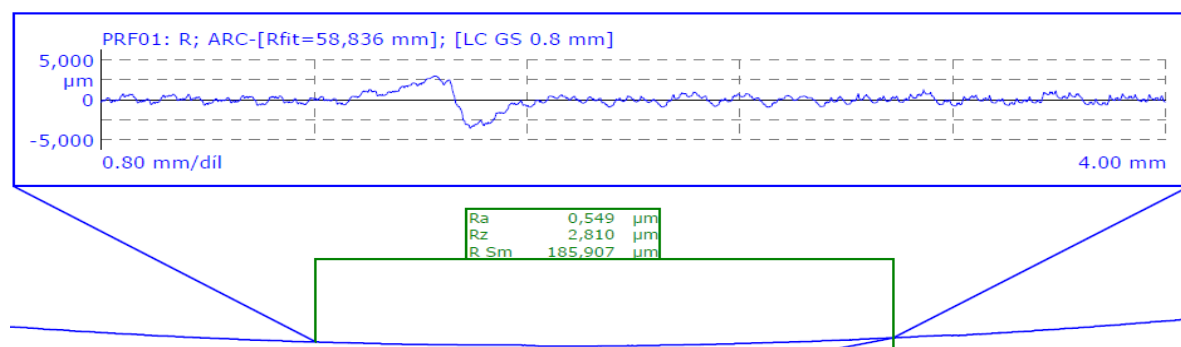


Figura 26 Esempio di profilo di rugosità normalizzato con groove visibile (A35/A40)

4.2.6. Discussione dei risultati di rugosità

I risultati delle misurazioni di rugosità confermano in parte quanto atteso dalla letteratura:

- La velocità di taglio ha un effetto significativo: l'aumento da 75.4 a 100 m/min ha ridotto Ra di circa il 18%, in linea con i risultati di *Matušů et al.* [1] e *Zielinski et al.* [11].
- L'avanzamento non ha mostrato un effetto statisticamente significativo in questo studio, probabilmente a causa delle diverse condizioni di finitura (altezze delle passate) che potrebbero aver compensato l'effetto dell'avanzamento, come osservato da *Matušů et al.* [1]. Inoltre, l'intervallo di avanzamento esplorato (0.05-0.10 mm/giro) potrebbe essere troppo ristretto per evidenziare differenze significative.
- Il trattamento di distensione non modifica la rugosità, come atteso, poiché agisce sulle tensioni residue e non sulla topografia superficiale. Questo risultato è importante perché consente di isolare l'effetto delle tensioni residue sulla vita a fatica anche se come precedente annunciato non risulta possibile con i dati attuali.
- La presenza del difetto superficiale (groove) descritto da *Matušů et al.* [1] è stata osservata su tutti i provini, con un contributo al parametro Rz variabile. Per le serie con rugosità più bassa (A40), il groove ha un peso percentuale maggiore su Rz, mentre per le serie con rugosità più elevata, il suo contributo è meno rilevante.

4.3. Limite di fatica secondo Murakami

Il modello di Murakami [4] correla il limite di fatica (σ_w) alla dimensione dei difetti superficiali attraverso il parametro $\sqrt{area}$. Questo approccio è particolarmente adatto per il presente studio, poiché la rugosità superficiale può essere interpretata come un insieme di difetti (intagli) equivalenti, la cui profondità e passo determinano l'intensità della concentrazione di tensione.

La formula di Murakami per il limite di fatica (valida per $R = -1$) è:

$$\sigma_w = \frac{C \cdot (HV + 120)}{\sqrt{area}^{\frac{1}{6}}} \quad (10)$$

dove:

- $C = 1.43$ per difetti superficiali;
- $HV = 360$ è la durezza Vickers dell'acciaio 42CrMo4+QT utilizzato [1];
- $\sqrt{area_R}$ è la radice dell'area del difetto equivalente [μm].

4.3.1. Determinazione del passo di rugosità

Per l'applicazione del modello di Murakami alla rugosità superficiale, è necessario conoscere non solo la profondità degli intagli (Rz), ma anche il loro passo (2b). Il passo rappresenta la distanza media tra due picchi consecutivi del profilo di rugosità. Nel presente studio, il passo di rugosità è stato determinato direttamente dai profili misurati con il profilometro PGS 200. In particolare, il parametro Rsm (*mean spacing between profile peaks*), definito dalla norma ISO 21920 come la distanza media tra picchi consecutivi del profilo, è stato utilizzato per quantificare il passo.

L'osservazione dei profili di rugosità ha rivelato che il passo medio delle irregolarità superficiali è di circa 100 μm (0.1 mm). Questo valore è stato ricavato analizzando i profili di tutti i provini e calcolando la distanza media tra picchi consecutivi. Tale valore è coerente con l'avanzamento di tornitura utilizzato per la finitura delle superfici (0.05-0.10 mm/giro), che lascia tracce periodiche sulla superficie del provino. Per le analisi successive, è stato quindi assunto $2b = R_{sm} = 100\mu\text{m}$ per tutte le serie. Questo valore rappresenta una buona approssimazione del passo effettivo osservato sperimentalmente.

4.3.2. Calcolo di $\sqrt{area_R}$

Per la rugosità superficiale, Murakami [4] propone di assimilare gli intagli periodici a cricche superficiali periodiche. Il parametro $\sqrt{area_R}$ viene calcolato a partire da due grandezze geometriche:

1. La profondità degli intagli: $a = R_z$ (altezza massima del profilo) [μm];
2. Il passo degli intagli: $2b = R_{sm} = 100\mu\text{m}$.

Il rapporto $\frac{a}{2b}$ (profondità/passaggio) determina il fattore di interferenza tra cricche adiacenti. Murakami [4] fornisce la seguente relazione approssimata:

$$\frac{\sqrt{area_R}}{2b} \cong 2.97 \frac{a}{2b} - 3.51 \left(\frac{a}{2b}\right)^2 - 9.74 \left(\frac{a}{2b}\right)^3 \quad \text{per} \quad \frac{a}{2b} < 0,195 \quad (14)$$

$$\frac{\sqrt{area_R}}{2b} \cong 0.38 \quad \text{per} \quad \frac{a}{2b} \geq 0,195 \quad (15)$$

Poiché per tutte le serie il rapporto $\frac{R_z}{100}$ è compreso tra 0.045 e 0.062, ci si trova sempre nella regione in cui $\frac{a}{2b} < 0.195$, quindi la prima equazione è sempre applicabile.

4.3.3. Calcolo di $\sqrt{area_R}$ e σ_w per le serie analizzate

Dai dati sperimentali, sono stati utilizzati i valori medi di R_z per ciascuna serie. Utilizzando $2b = 100\mu\text{m}$, sono stati calcolati $\sqrt{area_R}$ e σ_w per ogni provino, e successivamente mediati per serie. La Tabella 15 riporta i risultati mediati su tutti i provini per ogni serie:

Tabella 15 Calcolo della tensione limite a fatica per Murakami

Serie	Rz medio [μm]	$\sqrt{area_R}$ medio [μm]	σ_w medio [MPa]	Dev. std σ_w [MPa]	Min σ_w [MPa]	Max σ_w [MPa]
A40	4.550	13.50	474.4	10.2	461.6	493.1
A41	5.648	16.79	458.3	10.5	438.9	473.4
A42	5.561	16.54	459.2	7.3	448.1	469.6

A43	6.205	18.41	451.6	8.8	438.2	465.7
A44	5.404	16.06	461.5	8.0	450.0	475.1

In generale si osserva che la tensione limite a fatica calcolata secondo il modello di Murakami è valido e coerente con i risultati ottenuti sperimentalmente.

4.3.4. Confronto tra le serie

Dalla Tabella 15 emergono le seguenti osservazioni:

1. La serie A40 presenta il valore più alto di σ_w (474.4 MPa), coerentemente con la rugosità più bassa misurata. L'intervallo di variazione è compreso tra 461.6 e 493.1 MPa.
2. La serie A43 (distensione di A41) presenta il valore più basso di σ_w (451.6 MPa), coerentemente con la rugosità più elevata misurata per questa serie.
3. Le serie A41, A42 e A44 presentano valori intermedi di σ_w (458.3, 459.2 e 461.5 MPa rispettivamente), in linea con le rugosità misurate.
4. L'effetto del trattamento di distensione:
 - A41 (non distesa) vs A43 (distesa): 458.3 MPa vs 451.6 MPa (differenza di circa 6.7 MPa, pari all'1.5%)
 - A42 (non distesa) vs A44 (distesa): 459.2 MPa vs 461.5 MPa (differenza di circa 2.3 MPa, pari allo 0.5%)

Le differenze sono molto contenute, confermando che il trattamento di distensione non modifica significativamente la rugosità e quindi il limite di fatica stimato dal modello di Murakami.

5. L'intervallo di variazione complessivo del limite di fatica stimato tra le serie è di circa 22.8 MPa (da 451.6 a 474.4 MPa), corrispondente a una variazione del 5.0% rispetto al valore medio (461.0 MPa). Questo è in linea con le differenze di rugosità misurate tra le serie.

4.3.5. Confronto con il coefficiente di correzione FKM

I valori di σ_w stimati dal modello di Murakami (451.6 ÷ 474.4 MPa) possono essere confrontati con il limite di fatica ottenuto dalle curve KV di input e dalla correzione FKM. Come mostrato nel Capitolo 2.3, il coefficiente di correzione k_R secondo la linea guida FKM è dato da:

$$K_r = 1 - \alpha_r * \log_{10}(Rz) * \log_{10}\left(\frac{2 * R_m}{R_{m,N,min}}\right) \quad (16)$$

Con $R_m = 1097\text{MPa}$:

- Per $R_z = 4.55\mu\text{m}$ (A40):
 $k_R = 1 - 0.1626 \cdot 0.658 = 1 - 0.107 = 0.893$
- Per $R_z = 6.21\mu\text{m}$ (A43):
 $k_R = 1 - 0.1626 \cdot 0.793 = 1 - 0.129 = 0.871$

La differenza tra i due coefficienti k_R (0.893 vs 0.871) corrisponde a una differenza del limite di fatica di circa il 2.5%, in buon accordo con la variazione del 5.0% stimata dal modello di Murakami. Questo conferma la coerenza tra i due approcci (Murakami e FKM) nella quantificazione dell'effetto della rugosità sul limite di fatica.

4.3.6. Discussione dei risultati del modello di Murakami

I risultati del modello di Murakami forniscono una stima teorica del limite di fatica basata esclusivamente sulla geometria della rugosità. I valori ottenuti ($451.6 \div 474.4$ MPa) sono in linea con i limiti di fatica tipici per l'acciaio 42CrMo4+QT con finitura tornita (circa 450-550 MPa). Si osserva che:

1. La serie A40 ha il limite di fatica più elevato (474.4 MPa), coerentemente con la sua rugosità più bassa (A40: $R_a = 0.829 \mu\text{m}$, $R_z = 4.550 \mu\text{m}$).
2. La serie A43 ha il limite di fatica più basso (451.6 MPa), coerentemente con la sua rugosità più elevata (A43: $R_a = 1.173 \mu\text{m}$, $R_z = 6.205 \mu\text{m}$).
3. Le differenze tra le serie sono dell'ordine del 5%, in linea con le differenze di rugosità misurate e con il coefficiente di correzione FKM.
4. Il trattamento di distensione non produce variazioni significative del limite di fatica stimato, poiché agisce sulle tensioni residue e non sulla topografia superficiale.
5. Il passo di rugosità ($2b=100\mu\text{m}$) è risultato determinante per i valori assoluti di σ_w . Un passo più piccolo ($50 \mu\text{m}$) avrebbe portato a valori più elevati (circa 520 MPa), mentre un passo più grande ($200 \mu\text{m}$) avrebbe portato a valori più bassi (circa 430 MPa). L'uso del valore osservato sperimentalmente ($100 \mu\text{m}$) garantisce la coerenza fisica dei risultati.

4.4. Prove a fatica mediante software FEM ANSYS

Le simulazioni numeriche agli elementi finiti sono state condotte in ANSYS Mechanical al fine di stimare la vita a fatica dei provini e confrontare i risultati con le curve S-N di input (modello di Kohout-Věchet). L'approccio adottato segue le linee guida della letteratura recente, che evidenzia come l'integrazione tra modelli analitici e simulazioni FEM rappresenti un metodo consolidato per la previsione della vita a fatica di componenti meccanici [8, 11, 12].

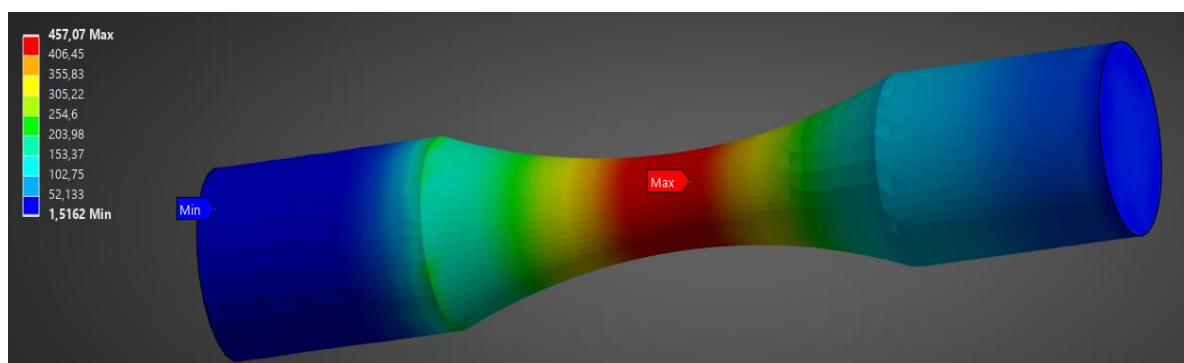


Figura 27 Stress equivalente sul componente con ANSYS (22500 N, serie A41/A43)

Le simulazioni sono state condotte per ciascun provino delle serie A40, A41 e A42, utilizzando come curve S-N di input le curve di Kohout-Věchet ricavate dai provini con gli stessi parametri di taglio. Il criterio di convergenza del Fatigue Tool è stato impostato al 10%, garantendo un buon compromesso tra accuratezza e tempi di calcolo.

4.4.1. Risultati delle simulazioni

La Tabella 16 riporta i risultati delle simulazioni ANSYS per tutte le serie analizzate (A40, A41, A42, A43, A44). Per ciascun provino sono indicati il fattore di correzione FKM k_R , il carico applicato, la durata stimata e la verifica del criterio di convergenza.

Tabella 16 Durata stimata mediante software ANSYS

Provino A40	Kr FKM	Carico [MPa]	Durata [cicli]	Check Convergenza
A4004	0,91	400	12901000	Yes
A4005	0,87	425	2376800	Yes
A4006	0,87	437,5	1478800	Yes
A4007	0,88	450	1120300	Yes
A4008	0,90	462,5	1030900	Yes
A4009	0,91	475	791490	Yes
A4010	0,88	487,5	269900	Yes
A4011	0,90	500	255540	Yes
A4012	0,90	512,5	155610	Yes
A4013	0,90	525	87601	Yes
Provino A41	Kr FKM	Carico [MPa]	Durata [cicli]	Check Convergenza
A4117	0,88	400	341260	Yes
A4118	0,89	425	203730	Yes
A4119	0,85	437,5	118840	Yes
A4120	0,88	450	124680	Yes
A4121	0,88	462,5	101710	Yes
A4122	0,85	475	71142	Yes
A4123	0,88	487,5	74904	Yes
A4124	0,88	500	64407	Yes
A4125	0,86	525	42599	Yes
A4126	0,88	575	30415	Yes
A4127	0,89	600	25717	Yes
A4331	0,88	615,5	20955	Yes
Provino A42	Kr FKM	Carico [MPa]	Durata [cicli]	Check Convergenza
A4243	0,88	400	919980	Yes
A4244	0,88	425	320330	Yes
A4245	0,88	437,5	218230	Yes
A4246	0,88	450	164800	Yes
A4247	0,87	462,5	115270	Yes
A4248	0,87	475	99845	Yes
A4249	0,88	487,5	80720	Yes
A4250	0,88	500	65237	Yes

A4251	0,88	525	41966	Yes
A4252	0,87	575	12649	Yes
A4456	0,89	600	8973	Yes
A4457	0,88	615,5	2373	Yes

4.4.2. Verifica della convergenza

Per tutte le simulazioni condotte, il criterio di convergenza del 10% è stato soddisfatto, come indicato nella colonna "Check Convergenza" della Tabella 16. Questo conferma che i risultati ottenuti sono affidabili e che il modello numerico è stabile per tutti i livelli di carico analizzati.

4.4.3. Analisi delle curve KV simulate

A partire dai dati di Tabella 16, sono state costruite le curve S-N per ciascuna serie mediante KV. Le Figure 28, 29 e 30 riportano rispettivamente le curve S-N simulate per le serie A40, A41 e A42, con i punti ottenuti da simulazione FEM e le curve di regressione sovrapposte. Non vengono trattate in modo differente le serie A43 ed A44 dal momento che non si hanno a disposizione dati validi sul trattamento termico di distensione delle tensioni residue. Inoltre tratteggiate, sono presenti le curve originarie delle A35, A26 ed A29.

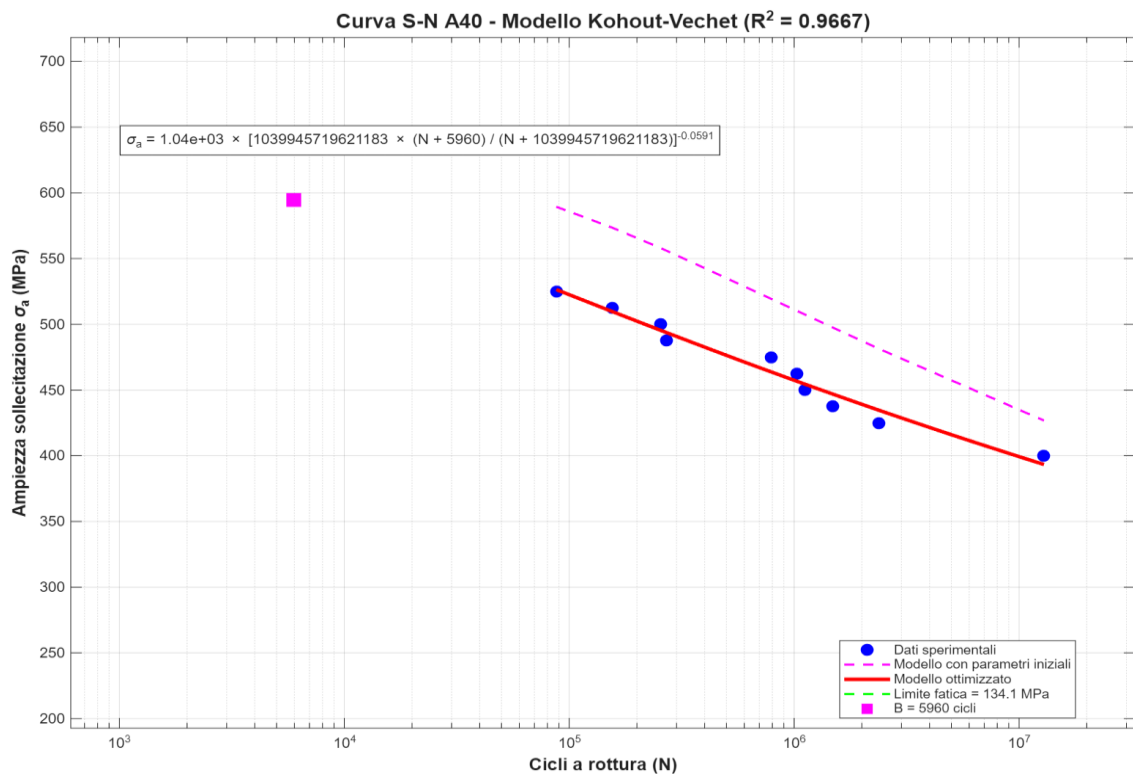


Figura 28 Curva KV per la serie A40

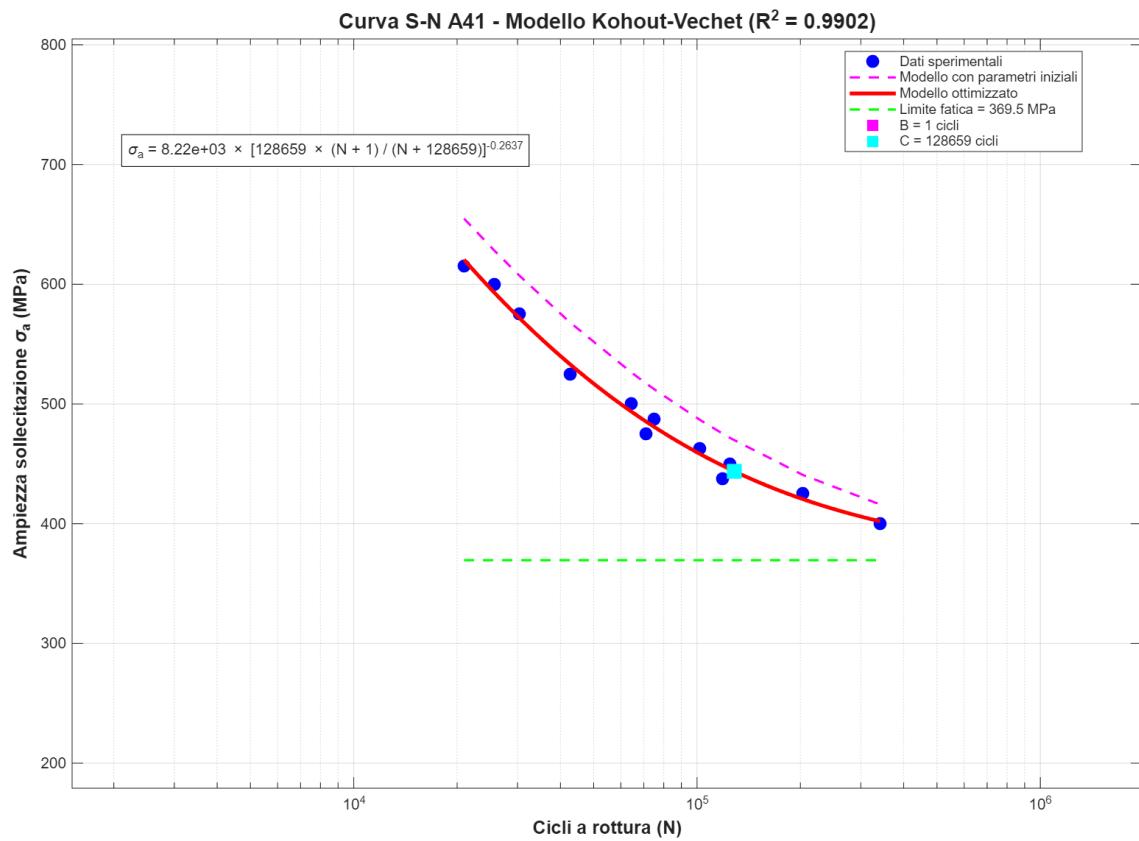


Figura 29 Curva KV A41 ed A43

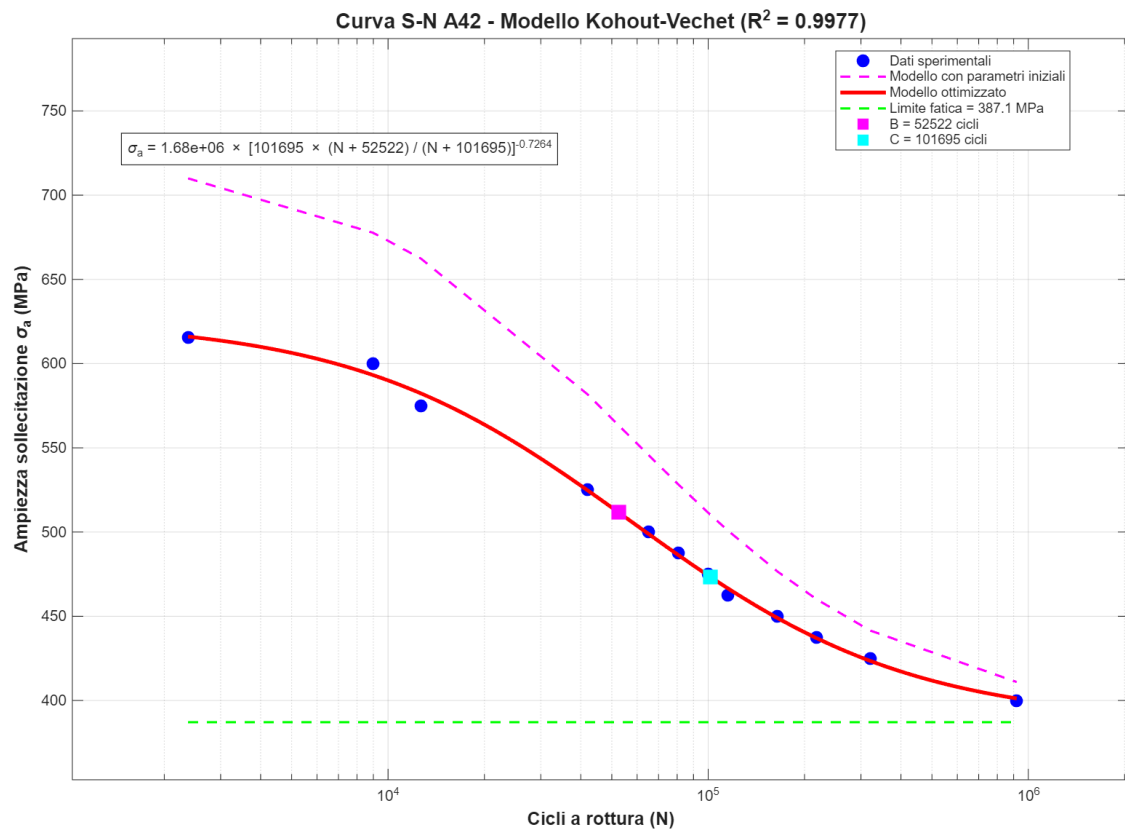


Figura 30 Curva KV per le serie A42 ed A44

Dall'analisi delle curve S-N simulate emergono le seguenti osservazioni:

- La serie A40 presenta le durate più elevate a parità di carico, con valori che vanno da 87,601 cicli a 525 MPa fino a 12,901,000 cicli a 400 MPa. Questo risultato è coerente con la rugosità più bassa misurata per questa serie e con le tensioni residue compressive più favorevoli.
- La serie A41 presenta le durate più basse, con valori che vanno da 25,717 cicli a 600 MPa fino a 341,260 cicli a 400 MPa. Questo risultato è attribuibile alla combinazione di rugosità elevata e tensioni residue di trazione (106 MPa assiali).
- La serie A42 presenta durate intermedie, con valori che vanno da 12,649 cicli a 575 MPa fino a 919,980 cicli a 400 MPa. Nonostante l'avanzamento maggiore (0.10 mm/giro), le durate sono superiori a quelle della serie A41, suggerendo che le tensioni residue inferiori (128 MPa assiali vs 106 MPa per A41) e la diversa morfologia della rugosità possano aver giocato un ruolo.
- La convergenza è stata verificata per tutte le simulazioni, come indicato nella colonna "Check Convergenza < 10%" di Tabella 16.
- La vita a fatica, in generale, diminuisce rispetto alle serie di confronto; questo è motivato dal fatto che a parità degli altri fattori, i valori di rugosità per i provini della famiglia A4x sono maggiori.

Vengono ora riportati i parametri delle curve di Kohout-Věchet per le serie trattate:

Tabella 17 Parametri KV per le serie trattate

	A40	A41	A42
α	1040	8230	1680000
β	-0,0591	-0,2638	-0,7264
B	5960	10	52522
C	1,03995E+15	128571	101695
R²	0,967	0,990	0,997

Notare che le curve, a differenza del modello di Basquin, possono avere parametri con uno spettro di valori molto variabile. Essendo infatti un modello a quattro parametri si possono esprimere andamenti simili con diverse configurazioni di valori.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Questa tesi ha esplorato la relazione che lega i parametri di tornitura, la finitura superficiale e la durata a fatica di provini in acciaio 42CrMo4+QT, inserendosi nel più ampio contesto del progetto europeo FABEST. L'approccio scelto è stato volutamente multidisciplinare: da un lato, le misurazioni sperimentali di rugosità hanno fornito una base dati solida; dall'altro, l'impiego di modelli analitici consolidati, come quelli di Murakami e Kohout-Vèchet, e di simulazioni numeriche agli elementi finiti ha permesso di interpretare e proiettare i risultati. Il quadro che ne è emerso conferma, con dati originali, quanto la letteratura suggerisce da tempo: la rugosità superficiale gioca un ruolo di primo piano nel determinare la risposta a fatica di un componente, e i parametri di taglio rappresentano una leva fondamentale per controllarla.

Le misurazioni condotte con il profilometro PGS 200 hanno restituito un quadro chiaro dell'influenza dei parametri di lavorazione. La serie A40, caratterizzata dalla velocità di taglio più elevata (100 m/min) e da un avanzamento contenuto (0.05 mm/giro), ha fatto registrare i valori di rugosità più bassi, con $R_a = 0.829 \mu\text{m}$ e $R_z = 4.550 \mu\text{m}$. Si tratta di un dato significativo, che conferma come l'incremento della velocità di taglio, nei limiti operativi consentiti, si traduca in un netto miglioramento della finitura. A sostegno di questa osservazione, l'analisi della varianza ha evidenziato differenze statisticamente rilevanti tra le serie, collocando A40 in un gruppo a sé stante rispetto alle altre configurazioni esaminate. Per quanto riguarda il trattamento di distensione delle tensioni residue applicato alle serie A43 e A44, i risultati confermano quanto era lecito attendersi: la rugosità superficiale non subisce modifiche apprezzabili, dal momento che il trattamento agisce sullo stato tensionale del materiale e non sulla sua topografia. Questo aspetto, per quanto scontato, è importante perché ha permesso di isolare l'effetto della rugosità da quello delle tensioni residue, almeno sul piano delle misurazioni di superficie.

L'applicazione del modello di Murakami ha fornito una stima teorica del limite di fatica compresa tra 451.6 e 474.4 MPa, valori del tutto plausibili per un acciaio 42CrMo4+QT con finitura tornita. Anche in questo caso, la serie A40 si è distinta per il valore più alto (474.4 MPa), mentre la serie A43 ha fatto registrare il dato più basso (451.6 MPa), in piena coerenza con le rispettive rugosità. Un aspetto che merita di essere sottolineato è la coerenza tra i risultati del modello di Murakami e quelli ottenuti con il coefficiente di correzione FKM: entrambi gli approcci hanno restituito variazioni del limite di fatica dell'ordine del 5% tra le diverse serie. Questo allineamento tra modelli diversi, pur con ipotesi di partenza differenti, rafforza la fiducia nell'affidabilità delle stime prodotte. Le analisi agli elementi finiti hanno permesso di stimare la vita a fatica per le serie principali (A40, A41, A42) in un intervallo di carichi rappresentativo. La serie A40 ha confermato il suo comportamento superiore, con durate che raggiungono i 12,9 milioni di cicli a 400 MPa. All'estremo opposto, la serie A41 ha mostrato le performance peggiori, con soli 25.717 cicli a 600 MPa. Tutti i calcoli hanno soddisfatto il criterio di convergenza del 10%, il che induce a ritenere i risultati numericamente stabili. È interessante notare come il confronto con le curve corrette FKM abbia evidenziato incrementi di vita a fatica compresi tra il 20% e il 40% a parità di tensione, incrementi che sono stati attribuiti proprio alla rugosità superficiale. Si tratta di un dato che quantifica in modo tangibile il costo, in termini di durata, di una finitura non ottimale.

Le misurazioni di tensione residua hanno aggiunto un tassello importante al quadro complessivo. La serie A40 presenta tensioni residue compressive (-97 MPa in direzione assiale), mentre A41 e A42 mostrano valori di trazione (106 MPa e 128 MPa, rispettivamente). Questa differenza di segno e di entità si riflette nelle durate simulate: le compressioni residue di A40 contribuiscono a spiegare le sue prestazioni migliori, mentre le trazioni di A41 e A42 ne penalizzano la risposta a fatica. Un aspetto che ha richiesto particolare attenzione è stato il confronto con le serie di riferimento del progetto FABEST. Le tensioni residue misurate sui provini di questa tesi sono risultate, nel complesso, confrontabili o leggermente inferiori a quelle delle serie di riferimento. Questa circostanza ha giustificato una scelta metodologica prudentiale: non avendo a disposizione valori sufficientemente stabili e ripetibili, si è preferito non introdurre le tensioni residue come condizione iniziale nei modelli FEM, accettando di sottostimare leggermente la vita a fatica. In ambito ingegneristico, un approccio conservativo è comunque preferibile a uno che rischi di sovrastimare le prestazioni del componente.

I modelli predittivi utilizzati hanno mostrato una buona coerenza tra loro e con i risultati delle simulazioni: il modello di Murakami ha fornito stime del limite di fatica in linea con i valori attesi per il materiale, il coefficiente di correzione FKM ha evidenziato incrementi di vita del 20-40% a parità di tensione in accordo con la letteratura, e le simulazioni ANSYS hanno riprodotto fedelmente le curve S-N di input, validando l'approccio numerico. Tuttavia, come ogni ricerca, anche questa presenta alcune limitazioni che è opportuno riconoscere. La prima, di natura squisitamente computazionale, riguarda la semplificazione geometrica adottata nel modello FEM: la rugosità superficiale non è stata modellata direttamente sulla geometria del provino, ma è stata introdotta a posteriori tramite il coefficiente di correzione FKM. Questa scelta, resa obbligata dall'enorme onere computazionale che una modellazione diretta della rugosità avrebbe comportato, non permette di valutare gli effetti locali della microgeometria sulla distribuzione delle tensioni. La seconda limitazione è legata all'assenza di una modellazione esplicita delle tensioni residue: i dati sperimentali a disposizione sono risultati troppo dispersi per essere utilizzati con sufficiente affidabilità, e si è quindi scelto di non includerle nel modello FEM, pur nella consapevolezza che ciò riduce la capacità predittiva del modello, almeno per i regimi di carico prossimi al limite di fatica. Infine, il modello assume un materiale omogeneo e isotropo, trascurando le disomogeneità microstrutturali e le variazioni di durezza che pure sono state osservate lungo la sezione dei provini: si tratta di una semplificazione accettabile per un'analisi di primo ordine, ma che in futuro potrebbe essere superata con modelli più raffinati.

Sviluppi futuri

Sulla base dei risultati ottenuti e delle limitazioni emerse, si propongono i seguenti sviluppi futuri nell'ambito del progetto FABEST:

1. Vibroforo con misura della temperatura

L'implementazione di un sistema vibroforo con misura in situ della temperatura di taglio rappresenta uno sviluppo naturale del presente studio. Come osservato da Matušů et al. [1], durante le prove di fatica ad alta frequenza (circa 150 Hz) l'acciaio 42CrMo4+QT mostra una significativa tendenza all'autoriscaldamento, con temperature che possono superare i 200°C.

Questo fenomeno, che ha causato l'arresto prematuro di alcune prove, potrebbe essere studiato sistematicamente mediante un vibroforo in grado di:

- Monitorare la temperatura durante il processo di taglio in tempo reale, utilizzando termocamere o termocoppie;
- Correlare la temperatura ai parametri di taglio (velocità, avanzamento, profondità) e alla rugosità risultante;
- Valutare l'effetto della temperatura sulla formazione di tensioni residue e sulla microstruttura superficiale;
- Sviluppare modelli predittivi che leghino la temperatura di taglio alla vita a fatica del componente finito.

Questo approccio consentirebbe di ottimizzare i parametri di taglio non solo in base alla rugosità, ma anche considerando l'effetto termico sul materiale.

2. Mappa parametri di taglio – vita a fatica

La costruzione di una mappa sistematica che leghi direttamente i parametri di taglio alla vita a fatica rappresenta un obiettivo ambizioso ma raggiungibile. Tale mappa potrebbe essere sviluppata:

- Estendendo il numero di configurazioni di taglio analizzate, coprendo un intervallo più ampio di velocità di taglio, avanzamento e profondità di passata;
- Integrando i modelli predittivi (Murakami, FKM, Kohout-Véchet) con i risultati delle simulazioni FEM per costruire curve di previsione della vita a fatica in funzione dei parametri di taglio;
- Validando sperimentalmente le previsioni su un numero limitato di configurazioni critiche.

Una mappa di questo tipo sarebbe di grande utilità per l'industria, consentendo di selezionare i parametri di taglio ottimali per massimizzare la vita a fatica dei componenti, riducendo al contempo i costi di produzione.

3. Miglioramenti del modello numerico

Per superare le limitazioni del modello FEM attuale, si propone di:

- Introdurre la microgeometria della rugosità nel modello, utilizzando tecniche di modellazione multi-scala o submodellazione;
- Includere le tensioni residue come stato iniziale nel modello, rilevando i valori in modo più accurato e attendibile;
- Implementare modelli di danno più avanzati (ad esempio, basati sulla meccanica della frattura) per migliorare la previsione della propagazione delle cricche;
- Confrontare diversi criteri di fatica (Goodman, Gerber, SWT) per valutare quale fornisce le previsioni più accurate in accordo con le tensioni residue.

4. Estensione ad altri materiali e processi

Infine, si propone di estendere l'approccio metodologico sviluppato in questa tesi ad altri materiali (ad esempio, leghe di alluminio, titanio) e ad altri processi di lavorazione (fresatura, rettifica), al fine di:

- Validare la generalità dei modelli predittivi;
- Identificare eventuali limitazioni legate al materiale o al processo;
- Sviluppare linee guida per la scelta dei parametri di taglio in funzione del materiale e dell'applicazione.

Bibliografia

- [1] Matusů, M., Papuga, J., Trojan, K., Trefil, A., Zabala, A., Mara, V., David, P. (2025). The effect of machining parameters on surface integrity and fatigue performance of 42CrMo4+QT high-strength steel. *Materials Science and Technology*, 1-20.
- [2] Papuga, J., Mzourek, M., Matusu, M., Mara, V., Capek, J. (2023). Investigation of the size effect on 42CrMo4+QT steel in the high-cycle fatigue domain part I: Experimental campaign. *International Journal of Fatigue*, 173, 107702.
- [3] Kohout, J., Vechet, S. (2001). A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits. *International Journal of Fatigue*, 23(3), 175-183.
- [4] Murakami, Y. (2019). *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions* (2nd ed.). Academic Press.
- [5] Abellán-Nebot, J.V., Vila Pastor, C., Siller, H.R. (2024). A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability. *Sustainability*, 16(5), 1917.
- [6] He, C.L., Zong, W.J., Zhang, J.J. (2018). Influencing Factors and Theoretical Modeling Methods of Surface Roughness in Turning Process: State-of-the-Art. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 129, 15-26.
- [7] Özdemir, M., Kaya, M., Akyildiz, H. (2020). Analysis of surface roughness and cutting forces in hard turning of 42CrMo4 steel using Taguchi and RSM method. *Mechanics*, 26, 231-241.
- [8] Kribes, N., Zahia, H., Yalles, M., et al. (2012). Statistical analysis of surface roughness by design of experiments in hard turning. *Mechanika*, 18, 605-611.
- [9] Bouacha, K., Yallese, M., Mabrouki, T., et al. (2010). Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28, 349-361.
- [10] Suresh, R., Basavarajappa, S., Gaitonde, V., et al. (2012). Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 33, 75-86.
- [11] Zielinski, T., Vovk, A., Riemer, O., Karpuschewski, B. (2021). An Investigation on Internal Material Loads and Modifications in Precision Turning of Steel 42CrMo4. *Micromachines*, 12(5), 526.
- [12] Allenov, D., Borisovna, K., Ghorbani, S., et al. (2022). Simultaneous effects of cutting depth and tool overhang on the vibration behavior of cutting tool and high-cycle fatigue behavior of product: experimental research on the turning machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122, 2361-2378.

- [13] Sarikaya, M., Gupta, M.K., Tomaz, I., et al. (2022). Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: A state-of-the-art review. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 179-201.
- [14] Rennert, R., Vormwald, M., Esderts, A. (2024). FKM-guideline “Analytical strength Assessment” – Background and current developments. *International Journal of Fatigue*, 182, 108165.
- [15] Diaz-Salamanca, D., Muñoz-Calvente, M., Ebrahimzadeh, P., et al. (2024). Influence of turning parameters on residual stresses and roughness of 42CrMo4 QT. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134, 2897-2919.
- [16] Xu, Y., Qiu, T., Liu, Z., Wang, X., Wang, Y. (2025). A study of the cyclic characteristics and life prediction of high-strength steel with different processing surface features. *Surface and Coatings Technology*, 498, 130862.
- [17] Romano, S., Miccoli, S., Beretta, S. (2023). Characterization of surface irregularities and fatigue strength evaluation of wire arc additive manufactured high strength steel specimens. *International Journal of Fatigue*, 177, 107596.
- [18] Limido, J., Suraratchai, M., Mabru, C., Espinosa, C., Salatin, M., Chieragatti, R. (2007). Machining parameters effects on fatigue life of aluminium alloy aeronautical parts. In *Proceedings of the 10th ESAFORM Conference on Material Forming*, 197-202.
- [19] Murakami, Y., Takahashi, K., Yamashita, T. (1997). Quantitative evaluation of the effect of surface roughness on fatigue strength (effect of depth and pitch of roughness). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, 63(612), 1612-1619.
- [20] Nakatani, M., Masuo, H., Tanaka, Y., Murakami, Y. (2019). Defect analysis for additively manufactured materials in fatigue from the viewpoint of quality control and statistics of extremes. *Procedia Structural Integrity*, 19, 113-122.
- [21] Fazili, A. (2025). *A comparison of FKM-Guideline and Theory of Critical Distances for fatigue life assessment of machined components*. PhD Thesis, [Università degli Studi di Parma].
- [22] Teimouri, R., Grabowski, M. (2024). Gaussian process-based methodology to analyze influencing factors on numerical fatigue assessment. *International Journal of Fatigue*, 181, 108165.
- [23] (2023). A study of the cyclic characteristics and life prediction of high-strength steel with different processing surface features. *Surface and Coatings Technology*, 498, 130862.
- [24] Marciniak, Z., Rozumek, D., Macha, E. (2022). The effect of defects on fatigue life of structural components. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(4), 1023-1041.
- [25] R. Sesana, F. Curà, (2017). Surface factor assessment in HCF for steels by means of empirical and non destructive techniques. *Procedia Structural Integrity* ISSN: 24523216 Volume: 5 Pages: 500 – 507

- [26] Maximov, J., Duncheva, G., Anchev, A., et al. (2025). Sustainable Combined Process for Improving Surface Integrity and Fatigue Strength of Heat-Treated 42CrMo4 Steel Shafts and Axles. *Metals*, 15(7), 755.
- [27] Lari, I. (2022). *Numerical simulation of residual stress relaxation and fatigue crack growth in a cold-expanded lug joint*. Tesi di laurea magistrale, Università di Pisa.
- [29] Mosca, W. (2022). *Fatigue life prediction models for components subjected to manufacturing induced residual stresses*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino.
- [30] Dattoma, V., De Giorgi, M., Nobile, R. (2023). An experimental study on residual stress relaxation in low-cycle fatigue of Inconel 718Plus. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(4), 1471-1486.