



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

**Caratterizzazione del comportamento a fatica di
componenti in lega di alluminio (Scalmalloy ®)
ottenuti tramite Additive Manufacturing: valutazione
degli effetti dovuti a differenti stati superficiali**

Presentata da:
Alessandro Bagnarelli

Relatrice:
Prof.ssa Erica Liverani

Anno accademico 2023-2024
Sessione Ottobre 2024

Sommario

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è quello di valutare il comportamento a fatica di una particolare lega di Alluminio (Al) Scandio (Sc) e Magnesio (Mg) denominata Scalmalloy®, creata appositamente per il processo dell'Additive Manufacturing. Queste prove vengono eseguite in quanto la resistenza al fenomeno della fatica è una criticità dei pezzi ottenuti con questo procedimento data la presenza di svariate difettosità (sia vicino alla superficie sia all'interno dei pezzi stessi) che favoriscono la formazione di cricche.

In particolare verranno comparati i risultati di prove di fatica a flessione rotante di 3 serie di campioni con trattamenti superficiali differenti: una serie sulla quale è stata eseguita solamente una tornitura superficiale nel tratto utile, una serie che è stata sottoposta a pallinatura e l'ultima serie prima è stata tornita e successivamente pallinata.

Indice

Sommario	i
1 Introduzione	1
1.1 L'Additive Manufacturing	1
1.1.1 Il Processo L-PBF	2
1.2 La Fatica	3
1.2.1 Fattori che influenzano la vita a fatica	4
2 Stato dell'Arte	7
2.1 Alluminio	7
2.1.1 Scalmalloy®	7
2.2 Analisi di Altri Studi	8
2.2.1 Effetto dei trattamenti termici sulla vita a fatica [14]	8
2.2.2 Effetto delle condizioni superficiali sulla vita a fatica dopo il trattamento di HIP [12]	11
3 Casi di Studio e Risultati	15
3.1 Macchinari e Metodi	15
3.1.1 Metodo Dixon	17
3.2 Risultati	17
3.2.1 Pallinatura	17
3.2.2 Tornitura	19
3.2.3 Tornitura e Pallinatura	21
3.3 Analisi microstrutturale	24
3.4 Frattografia	26
4 Conclusioni	29
Bibliografia	33

Introduzione

1.1 L'Additive Manufacturing

Il termine Additive Manufacturing (AM) è definito dalla normativa UNI EN ISO/ASTM 52900:2022 come *“il processo di unione di uno o più materiali per realizzare componenti partendo dai dati di un modello 3D, sovrapponendo uno strato dopo l'altro (layer upon layer), al contrario delle tecnologie di Subtractive Manufacturing”* [15].

Sebbene alcune di queste tecnologie abbiano radici antecedenti, l'AM, nella forma in cui la conosciamo oggi, ha preso forma negli anni '80 e inizialmente fu sviluppata per la prototipazione rapida utilizzando materiali come cere e polimeri. Soltanto successivamente si sono iniziati a realizzare componenti veri e propri con materiali compositi o metalli e ad oggi l'AM è molto diffuso soprattutto in campi in cui sono richieste geometrie particolari e pesi ridotti, come ad esempio l'aviazione [10].

Il vantaggio di questa tecnologia sta nel fatto che rispetto ai metodi tradizionali, la manifattura additiva tramite stampa 3D offre il potenziale per la creazione di strutture su scala microscopica, in maniera programmabile, semplice e flessibile, consentendo una maggiore libertà creativa nelle tre dimensioni in modo da poter realizzare pezzi che con altre tecnologie di lavorazione (come ad esempio l'asportazione di truciolo) risulterebbero troppo complicate e costose oppure in altri casi addirittura non ottenibili. Tuttavia i componenti ottenuti tramite AM senza trattamenti specifici presentano porosità non trascurabili e forte anisotropia dovuta ai parametri di processo e dal design del componente stesso e ciò comporta a una riduzione delle proprietà meccaniche del componente, soprattutto quella di resistenza a fatica.

Le tecnologie per la produzione additiva di polimeri possono essere suddivise nelle seguenti categorie: fotopolimerizzazione in vasca (VP), deposizione di materiale (MJ), deposizione di legante (BJ), estrusione di materiale (ME) e fusione a letto di polvere (PBF) [16].

1.1.1 Il Processo L-PBF

I provini analizzati in seguito sono realizzati tramite una tecnologia chiamata L-PBF (*Laser Powder bed fusion*). Consiste in depositare consecutivamente degli strati di polvere del materiale desiderato uno sopra l'altro e, tra una deposizione di polvere e quella successiva, un fascio laser trasferisce calore solamente in punti specifici in modo da creare un primo strato, successivamente il processo si ripete, la piattaforma in cui è già stato depositato il primo strato si abbassa e viene steso il secondo e il processo si ripete come mostrato in Figura 1.1.

Questo processo permette di realizzare componenti con geometrie complesse e grazie alle alte velocità di raffreddamento di solito si riescono ad ottenere grani molto fini (dell'ordine dei 10^2nm fino a circa $10^2\mu\text{m}$) anche se di solito i componenti ottenuti presentano una certa anisotropia, le caratteristiche meccaniche lungo le direzioni sul piano di giacenza della polvere risultano migliori di quelle lungo la direzione di crescita in cui il materiale ha ricevuto maggiori stress termici, cosa che si ripercuote negativamente sulle proprietà meccaniche del pezzo ultimato [8].

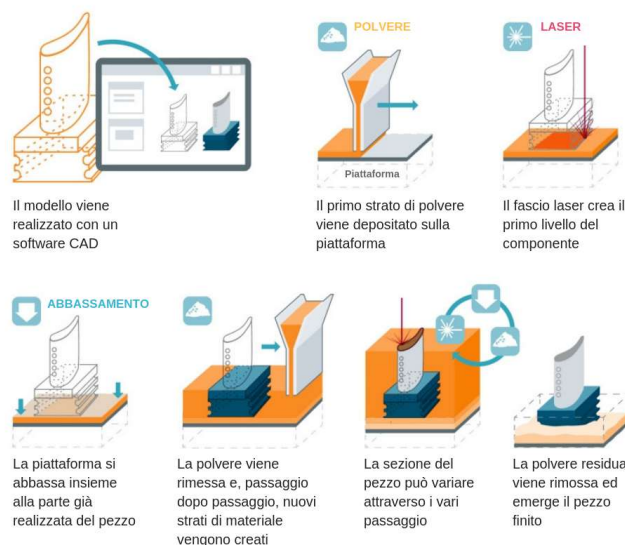


Figura 1.1. Esempio di fasi di un processo L-PBF. Immagine tratta da epaddock.it

Per quanto riguarda la resistenza a fatica, con queste tecniche non si riesce a raggiungere valori alti a causa di difetti generali e anche delle numerosissime porosità dovute sia a parametri di processo non ottimizzati sia a piccole particelle di gas che

durante la solidificazione rimangono intrappolate tra due layer creando un possibile punto di innesco per una cricca. La microstruttura molto fine può agire positivamente ritardando la nucleazione della cricca, ma allo stesso tempo favorisce la propagazione della stessa.

1.2 La Fatica

“La fatica è il processo di cambiamento strutturale permanente e localizzato che si verifica in un materiale sottoposto a condizioni che generano sollecitazioni e deformazioni fluttuanti in un determinato punto (o in più punti) e che può culminare nella formazione di cricche o nella frattura completa dopo un sufficiente numero di fluttuazioni.” [3]

Il carico che i materiali possono sopportare a fatica viene definito dipendentemente dal numero di cicli, poichè ponendo limiti diversi i carichi massimi per i quali avviene il cedimento possono variare significativamente e statisticamente la maggior parte delle rotture di pezzi meccanici avviene proprio per fatica. La vita a fatica viene rappresentata mediante un grafico detto Curva di Wholer mostrato in Fig.(1.2) in cui in ascissa è riportato il numero di cicli mentre in ordinata l'ampiezza della componente alternata di un ciclo a fatica, questa curva prende il nome dal primo che ha studiato questo fenomeno osservando le rotaie di una ferrovia,

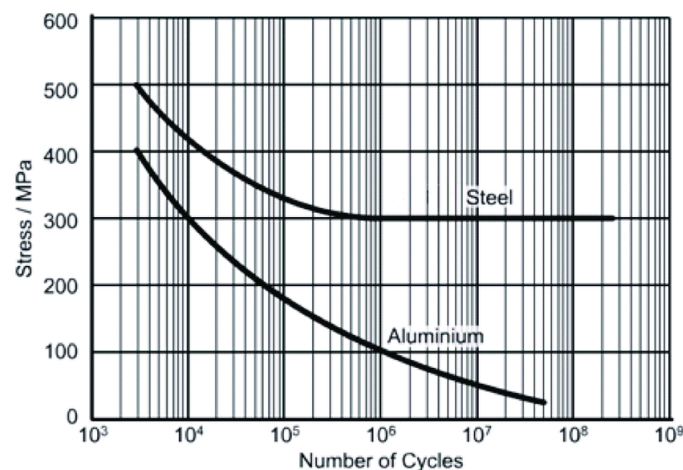


Figura 1.2. Curve di Wholer generiche per acciaio e alluminio tratta da *A Multihull Boat's Fatigue Analysis at Early Design Phase*

A differenza dell'acciaio l'alluminio non ha una σ limite di fatica al di sotto della quale il danneggiamento è considerabile nullo, infatti anche a bassi carichi ciclici risulta impossibile definire una soglia di stress al di sotto della quale il materiale sarebbe immune da danni per fatica, indipendentemente dal numero di cicli.

1.2.1 Fattori che influenzano la vita a fatica

La resistenza a fatica di un materiale non dipende solamente dal materiale stesso ma da molti altri fattori come la geometria e le dimensioni del provino, la temperatura, l'eventuale presenza di tensioni residue, trattamenti termici o superficiali.

- **Geometria e fattori di intaglio**

Con geometria si intende non solo la forma dei provini, per esempio la presenza o meno di spigoli vivi, ma anche la presenza o meno di intagli, un intaglio crea una zona di concentrazione delle tensioni che rappresenta una criticità per la formazione di cricche. Esistono diversi tipi standard di intagli che si possono realizzare e che hanno effetti più o meno rilevanti, di questi effetti deve essere tenuto conto con due fattori di intaglio, rispettivamente teorico K_t e effettivo K_e per il calcolo della sensibilità all'intaglio che determina quanto è vulnerabile alla concentrazione di sollecitazioni nei punti in cui sono presenti intagli [3]. In questo caso di studio tuttavia i provini non presentano alcun fattore di intaglio.

- **Tensioni residue**

Le tensioni residue nei componenti ottenuti tramite stampa 3D sono generalmente elevate a causa del rapido raffreddamento durante il processo di stampa.

Tuttavia è necessario fare una distinzione tra le tensioni residue di compressione e quelle di trazione, infatti se da un lato le prime non sono un problema, anzi in certi casi aiutano il materiale poichè le sollecitazioni esterne prima devono vincere le tensioni residue e successivamente la tensione di snervamento del materiale prima di poterlo deformare plasticamente, dall'altro lato le tensioni residue di trazione sono un problema grave specie per quanto riguarda la fatica in quanto andranno a sommarsi alle tensioni riducendo notevolmente la vita a fatica del pezzo in questione [3]. Per questo motivo di solito dopo la stampa vengono eseguiti dei trattamenti termici di ricottura o di distensione per ridurre al minimo la presenza di eventuali tensioni residue.

Un altro trattamento impiegato è l'HIP (Hot Isostatic Pressure), che sfrutta la permanenza in un ambiente ad alte temperature e pressioni per un periodo prolungato al fine di ridurre i difetti interni e migliorare le proprietà meccaniche del materiale. Tuttavia, l'HIP è un processo costoso con cicli lunghi, e ciò lo rende di difficile l'applicazione su larga scala.[7]

I benefici sono elevati poichè riducendo notevolmente la presenza di porosità interne aumenta in maniera significativa la resistenza a fatica del materiale.

In Figura 1.3 sono mostrati gli effetti di questo trattamento che riduce di più di un ordine di grandezza il volume delle porosità, non elimina quelle esterne che però possono essere rimosse con un processo di asportazione di truciolo.

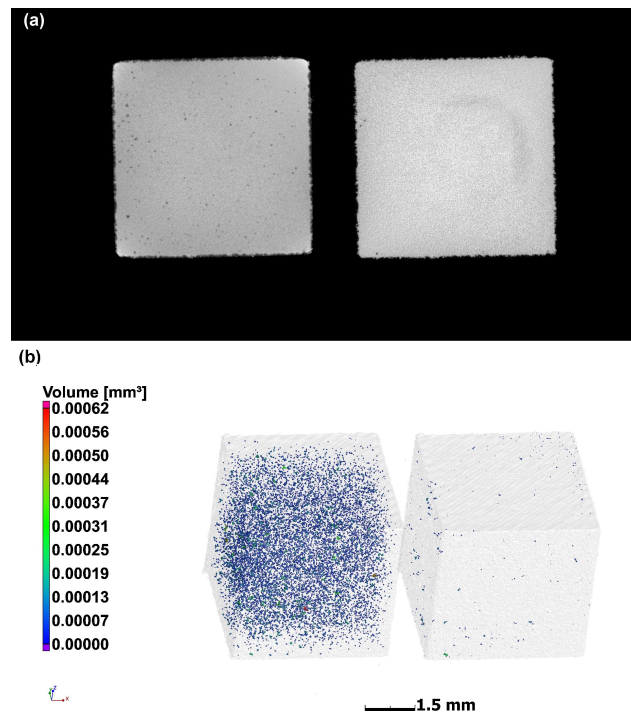


Figura 1.3. Effetti di un trattamento di HIP [7]

- **Stato superficiale**

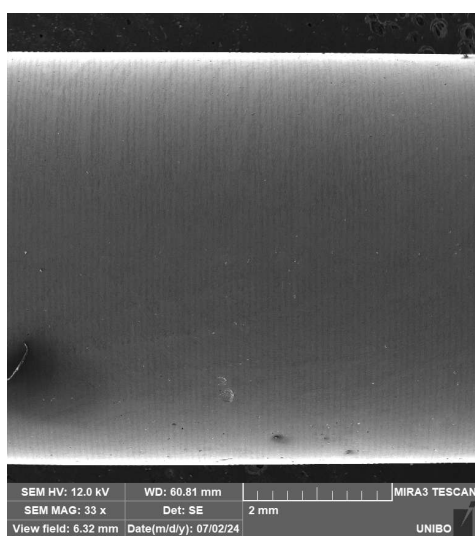
Le cricche spesso si originano da difetti e imperfezioni presenti sulla superficie esterna di un pezzo o poco più in profondità.

Siccome in ambito di Additive Manufacturing la superficie di un pezzo in condizioni AB¹ presenta molti difetti la vita a fatica non è particolarmente

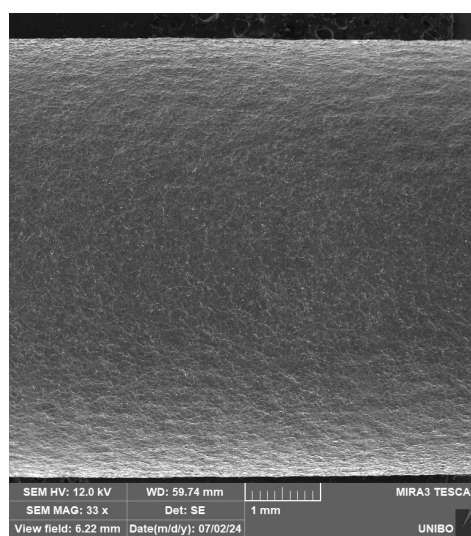
¹As Built, ovvero nelle condizioni post stampa senza ulteriori trattamenti

elevata.

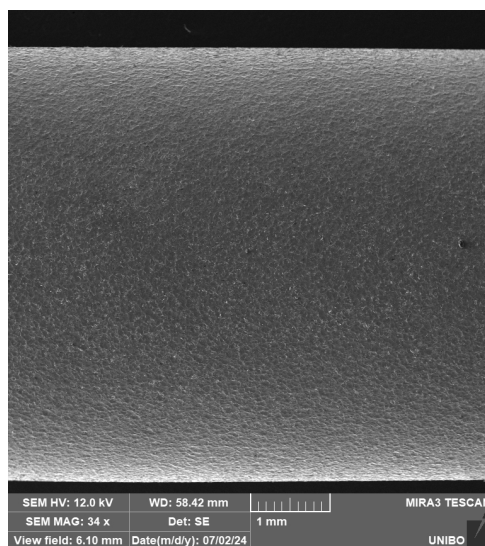
Nei provini presi in considerazione sono state svolte 3 tipologie di lavorazioni sulla superficie e successivamente eseguite prove a fatica per poi comparare i risultati, le superfici, mostrate in Figura (1.4) e analizzate con un microscopio elettronico a scansione mettono in evidenza le differenze tra le superfici dopo le 3 lavorazioni.



(a) Superficie dopo la sola Tornitura



(b) Superficie dopo la sola Pallinatura



(c) Superficie dopo Tornitura e Pallinatura

Figura 1.4. Viste del tratto utile al SEM di 3 provini differenti

2

Stato dell'Arte

2.1 Alluminio

L'alluminio si presta bene all'utilizzo nel campo dell'aviazione data la necessità dei componenti di essere leggeri.

L'alluminio puro è molto duttile e presenta una densità di 2700 kg/m^3 , molto inferiore a quella dell'acciaio che è 7500 kg/m^3 . Presenta una notevole deformabilità plastica, caratteristica che lo rende particolarmente adatto a numerosi processi industriali inoltre è un materiale autopassivante, ovvero capace di formare spontaneamente uno strato stabile di ossido sulla superficie, che protegge il metallo sottostante dalla corrosione causata dall'ossigeno. Tuttavia le prestazioni meccaniche dell'alluminio puro non sono elevatissime e uno dei modi per aumentarle è tramite l'aggiunta di elementi di lega sotto forma di precipitazioni, tra i più comuni sono presenti: rame, manganese, silicio, magnesio. Per ottenere un effetto omogeneo vengono effettuati trattamenti termici di solubilizzazione, tempra e invecchiamento.[11]

Le leghe di Alluminio possono essere ottenute anche tramite processi AM, per questo caso di studio nello specifico è stata utilizzata la metodologia L-PBF e al lega presa in esame è chiamata Scalmalloy® che comprende come elementi leganti Scandio, Magnesio e Zirconio.

2.1.1 Scalmalloy®

La Scalmalloy ® è una lega alluminio-scandio per Additive Manufacturing brevettata da *Apworks GmbH* ed è principalmente usata nell'ambito dell'aviazione, la composizione della polvere utilizzata nel processo L-PBF per ottenere questa lega è mostrata nella Tabella 2.1.

La lega ottenuta presenta proprietà meccaniche notevoli se comparate con quelle dell'alluminio puro e non troppo inferiori rispetto a una lega ottenuta tradizionalmente come la 7075 più comunemente conosciuta come Ergal [1].

	Mg	Sc	Mn	Zr	Si	Fe	Zn	Ti	Cu	V	O
Min %	4.20	0.60	0.30	0.20	0	0	0	0	0	0	0
Max %	5.10	0.80	0.80	0.50	0.40	0.40	0.25	0.15	0.10	0.10	0.05

Tabella 2.1. Composizione della lega Scalmalloy® [13]

		Alluminio puro (99%)	Scalmalloy	Ergal
	Densità [kg/m ³]	2700	2670	2880
Tensione di Snervamento Rp0.2	[MPa]	33	480	500
Tensione di Rottura Rm	[MPa]	70-90	520	550
Allungamento	[%]	35-40	13	9

Tabella 2.2. Comparazione principali proprietà meccaniche tra alluminio base, lega Scalmalloy® e Ergal

2.2 Analisi di Altri Studi

In questa sezione, saranno esaminati i principali risultati ottenuti da studi simili in modo da porre una base di comparazione con quello che sarà poi approfondito. In particolare verranno presi in considerazione due articoli, uno di W. Schneller, M. Leitner, S. Leuders et al. nel loro studio *"Fatigue strength estimation methodology of additively manufactured metallic bulk material"* (2021) [14] che dopo un'introduzione sul processo si focalizza sugli effetti che i trattamenti termici hanno sulla vita a fatica. L'altro articolo confronta la resistenza a fatica di provini con diversi stati superficiali dopo l'esecuzione di un trattamento definito HIP (Hot Isostatic Pressure), scritto da M. Raab e M. Bambach *"Fatigue properties of Scalmalloy® processed by laser powder bed fusion in as-built, chemically and conventionally machined surface condition"* (2023) [12].

2.2.1 Effetto dei trattamenti termici sulla vita a fatica [14]

Nell'articolo vengono analizzate tre leghe, AlSi10Mg, Scalmalloy® e 17.4PH, le prime due di alluminio mentre la terza è un acciaio inossidabile, tutti i campioni sono stati

realizzati con una tolleranza di 1mm per poter rimuovere lo strato più esterno in modo da evitare effetti legati allo stato superficiale. In Tabella 2.3 sono mostrati i diversi parametri di processo dei trattamenti eseguiti per rimuovere eventuali tensioni residue e difettologie interne; le condizioni base si riferiscono allo stato del campione prima di effettuare qualsiasi trattamento termico.

Condizione	Sigla	AlSi10Mg	Scalmalloy	17.4PH
Condizioni Base	BC	Nessuno	Nessuno	Nessuno
Trattamento Termico	HT	>300 °C/2 h	>300 °C/4 h	1050°C/0.5 h + 600 °C/4h
HIP	HIP	>500 °C/2 h 100 MPa +>160 °C/7 h	>300 °C/4 h/ >100 MPa	1050 °C/0.5 h/150 MPa + 600 °C/4 h/150 MPa

Tabella 2.3. Parametri di processo dei vari trattamenti termici [14]

Successivamente sono stati eseguiti test di durezza Vickers, dai quali emerge che, in media, il trattamento termico comporta una riduzione della durezza di circa il 13% per AlSi10Mg rispetto alla condizione di base (BC), mentre per Scalmalloy® si osserva un incremento del 30%. Questo fenomeno è attribuibile alla presenza di precipitazioni di altri elementi nella lega Scalmalloy® che durante il trattamento termico subiscono un indurimento. Il trattamento di HIP ha prodotto un leggero aumento della durezza in tutte e tre le leghe analizzate.

Per quanto riguarda i test di fatica, sono stati condotti con il classico rapporto di carico $R=-1$ che implica un ciclo simmetrico in cui $\sigma_m = 0$ mentre $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$. Il numero di cicli per i quali si considera la vita a fatica infinita è fissato a 1×10^7 e i risultati sono riportati nei grafici di Figura 2.1 e nella Tabella 2.4, dove con N_t è indicato il numero di cicli a cui si trova il punto di ginocchio della curva S-N ovvero il punto in cui la pendenza della retta che approssima al meglio i punti ottenuti cambia pendenza.

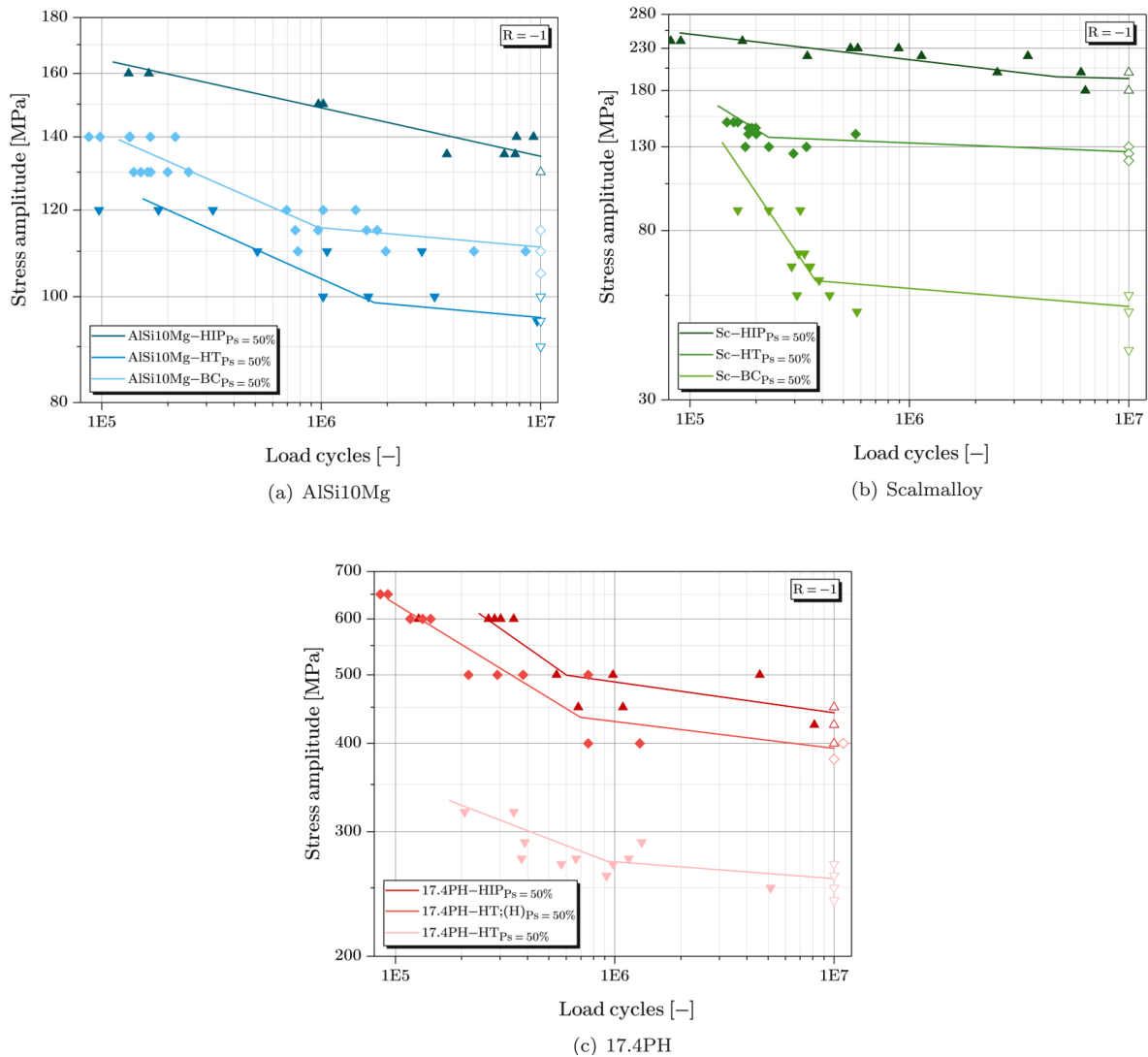


Figura 2.1. Grafici della vita a fatica di 3 leghe dopo 3 tipi di trattamento diversi [14]

Dai dati è evidente un aumento della vita a fatica grazie al trattamento HIP: +21% per AlSi10Mg e +374% per Scalmalloy®, dovuto alla riduzione della porosità e di difetti dai quali si possono generare cricche. Anche per la lega 17.4PH si osserva un incremento del 72% con HIP rispetto al trattamento termico (HT). Il trattamento termico ha migliorato le prestazioni di Scalmalloy® (+245%), mentre AlSi10Mg ha registrato una riduzione del 14%.

Campioni	σ_f (50%) [MPa]	Nt [-]
AlSi10Mg-BC	111.0	969 917
AlSi10Mg-HT	95.7	1 744 425
AlSi10Mg-HIP	134.4	–
Sc-BC	51.6	373 688
Sc-HT	126.4	227 715
Sc-HIP	193.1	4 668 846
17.4PH-HT	257.6	918 887
17.4PH-HT;(H)	393.6	697 145
17.4PH-HIP	442.0	603 193

Tabella 2.4. Risultati prove fatica [14]

2.2.2 Effetto delle condizioni superficiali sulla vita a fatica dopo il trattamento di HIP [12]

Questo secondo studio si concentra sulla lega Scalmalloy® e sulla stima della vita a fatica di provini in 4 stati superficiali differenti, due grezzi mentre altri due lavorati uno alle macchine utensili e l'ultimo chimicamente.

Queste lavorazioni hanno lo scopo di eliminare più difetti possibili dalla superficie esterna, che nelle prove di fatica è la zona in cui più facilmente si innescano cricche che portano successivamente alla rottura del pezzo.

Per quanto riguarda le due superfici non lavorate, la differenza fra una e l'altra consiste nella strategia con la quale il laser si muove lungo i contorni esterni del pezzo, nel caso di questo studio verranno prese in considerazione la condizione AH e AB, la seconda presenta una rugosità superficiale minore, in una scala di rugosità si avrà AH>AB>CM>MM come si può notare anche dagli ingrandimenti in Figura 2.2 ottenuti al SEM.

Per ciò che concerne i difetti interni e le tensioni residue, i campioni oggetto di questo articolo sono stati trattati non solo termicamente ma hanno anche subito un processo HIP in modo da eliminare quasi completamente le rotture a causa di difetti interni, focalizzando l'attenzione solo sullo stato della superficie esterna. Per la precisione il trattamento termico prevedeva il riscaldamento fino a 325 °C per un tempo di 2 ore in aria, una combinazione di ricottura e invecchiamento mentre

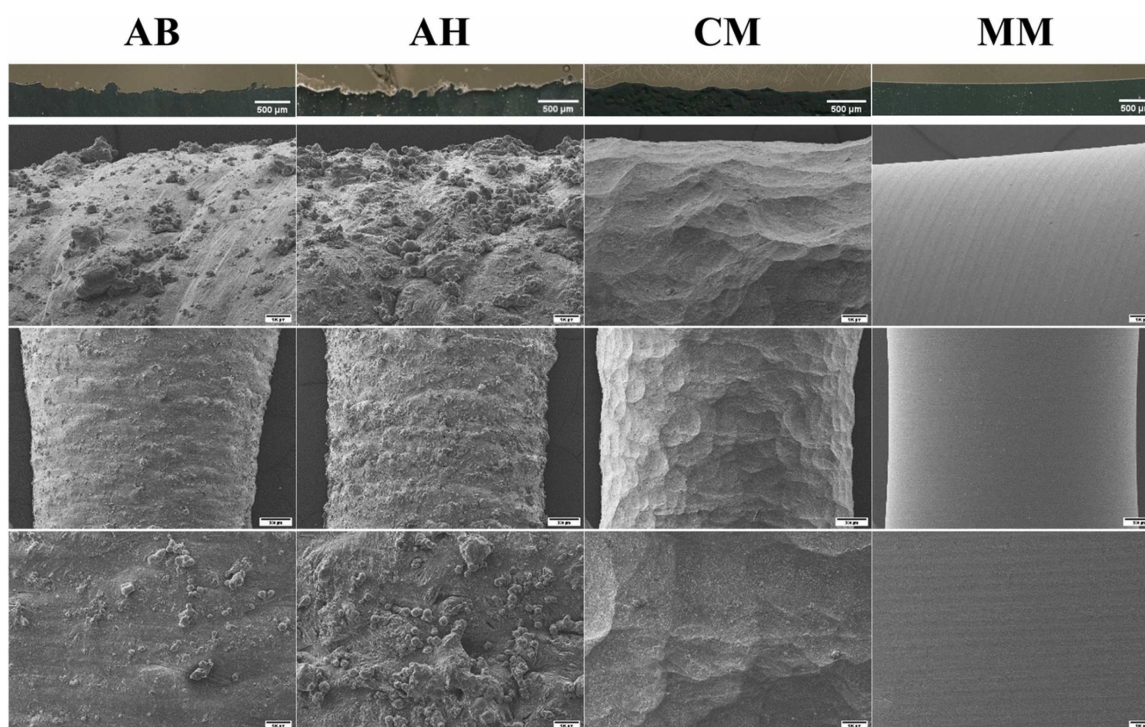


Figura 2.2. Finiture superficiali dei 4 tipi di campioni utilizzati [12]

la pressatura isostatica a caldo è stata effettuata sempre a 325°C per 2h con una pressione di 1000 bar.

I test di fatica sono stati eseguiti a temperatura ambiente in una macchina per prove di fatica assiali con rapporto di carico $R = 0,1$ secondo la norma DIN EN 6072 è stato utilizzata una cella di carico da 24 kN, operante a una frequenza di 143–150 Hz.

Il run-out è stato fissato a 3×10^7 cicli e sono stati realizzati provini di 3 dimensioni differenti ciascuna con 13 campioni per ogni stato superficiale, per la precisione le aree delle sezioni nel tratto utile per la prova sono 12,5 mm² (A), 25 mm² (B) and 50 mm² (C). I risultati generali senza differenziazione riguardo le dimensioni sono riportati in Figura 2.3 e in Tabella 2.5, come da aspettative i campioni con le superfici as built e as hatched hanno una vita a fatica sensibilmente inferiore rispetto ai campioni con superfici lavorate.

Una cosa interessante è il fatto che pur essendo valori inferiori, i dati dei campioni AB e AH presentano una dispersione inferiore rispetto a quelli dei CM e MM, questo perchè le rotture e le cricche nei primi avvengono spesso a causa di irregolarità

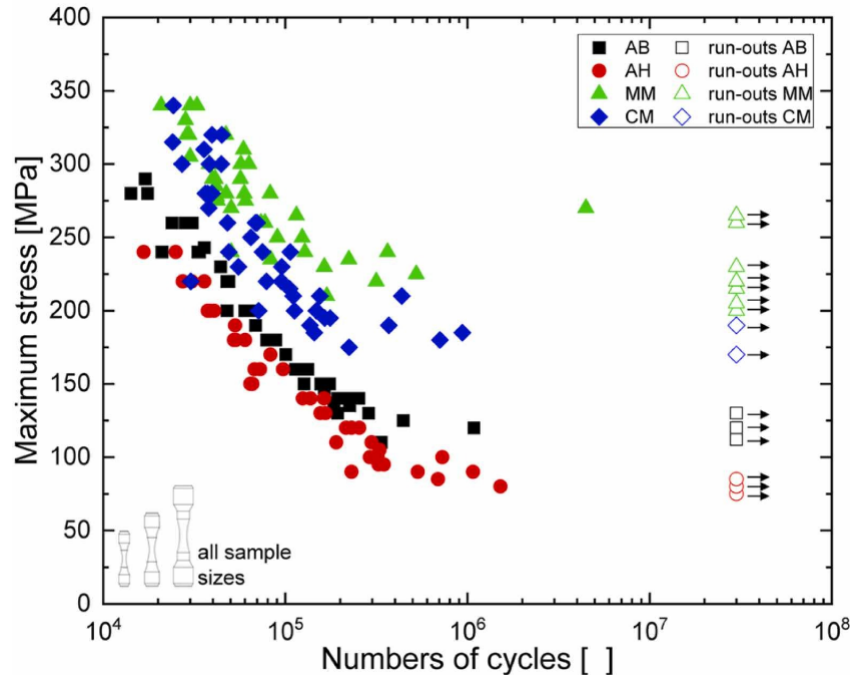


Figura 2.3. Curve S-N non considerando le dimensioni dei provini [12]

	<i>AH</i>	<i>AB</i>	<i>CM</i>	<i>MM</i>
Dimensione A	80 MPa	120 MPa	170 MPa	215 MPa
Dimensione B	85 MPa	130 MPa	170 MPa	265 MPa
Dimensione C	85 MPa	112 MPa	190 MPa	230 MPa

Tabella 2.5. Resistenza a fatica considerando il run-out a 3×10^7 [12]

presenti sulla superficie mentre nei CM e MM la superficie è molto più liscia ed è meno probabile che la frattura si origini qui, è più probabile che si origini a partire da cavità subsuperficiali dovute a porosità da gas, impurità e inclusioni, tutti fenomeni molto comuni nei componenti ottenuti tramite Additive Manufacturing.

Uno dei motivi per cui la resistenza a fatica dei campioni MM è così elevata, oltre alla bassa rugosità superficiale, è il fatto che durante l'asportazione di truciolo il pezzo accumula tensioni residue di compressione. Per evitare questo effetto si sarebbe dovuto eseguire il trattamento di HIP dopo la lavorazione ma il risultato ottenuto sarebbe stato inferiore in questo caso.

Casi di Studio e Risultati

3.1 Macchinari e Metodi

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di valutare quanto un trattamento superficiale come la pallinatura possa incidere più o meno positivamente per quanto riguarda la resistenza a fatica e successivamente valutare l'eventuale sovrapposizione di effetti con anche la tornitura classica.

A differenza degli articoli citati e analizzati che hanno utilizzato macchine per prove di fatica assiali, le prove di fatica realizzate in questo studio saranno prove di fatica a flessione rotante chiamata macchina di Moore. Il macchinario utilizzato consente di sottoporre il campione a pura flessione, tramite un potenziometro si regola la velocità di rotazione e tramite dei pesi calibrati posti su un supporto si stabilisce il carico da applicare al provino.

Lo schema di carico e il diagramma delle sollecitazioni sono riportati in Figura 3.1, dalla Figura 3.1a partendo da destra si ha il primo cuscinetto di supporto e successivamente un secondo cuscinetto in modo da scaricare il tratto utile dal taglio che altrimenti avrebbe un andamento lineare decrescente partendo dal punto in cui è massimo, passando per lo 0 nel punto di applicazione della forza per arrivare al punto in cui è minimo, falsando così il risultato.

La macchina dispone di un timer e un contagiri, quando viene fatta partire la prova ogni giro del provino corrisponde a un ciclo, il contatore si ferma quando il provino si rompe.

I campioni presi in analisi sono tutti trattati termicamente per rimuovere le tensioni residue ma a differenza degli articoli analizzati non è stato eseguito il trattamento di HIP, successivamente sono stati divisi in 3 gruppi tutti da 15 campioni che hanno subito lavorazioni meccaniche differenti, rispettivamente solo tornitura meccanica, solo pallinatura e una combinazione delle due in sequenza.

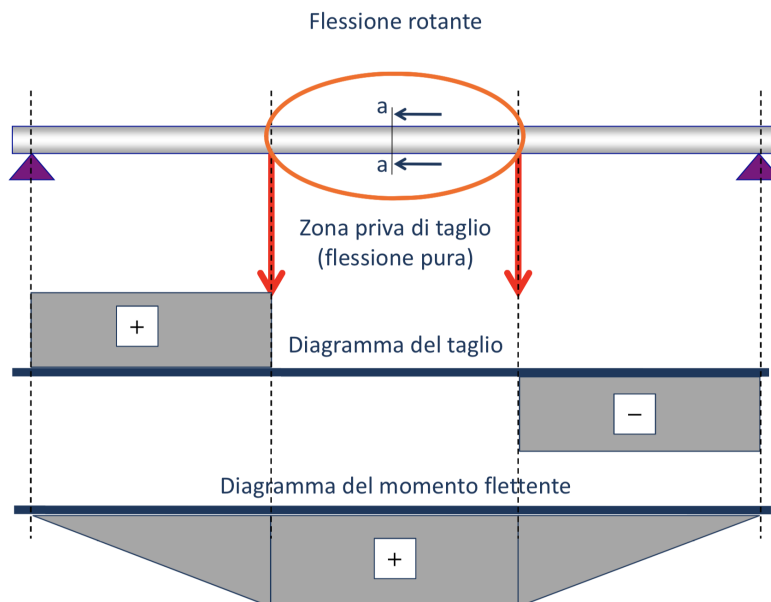
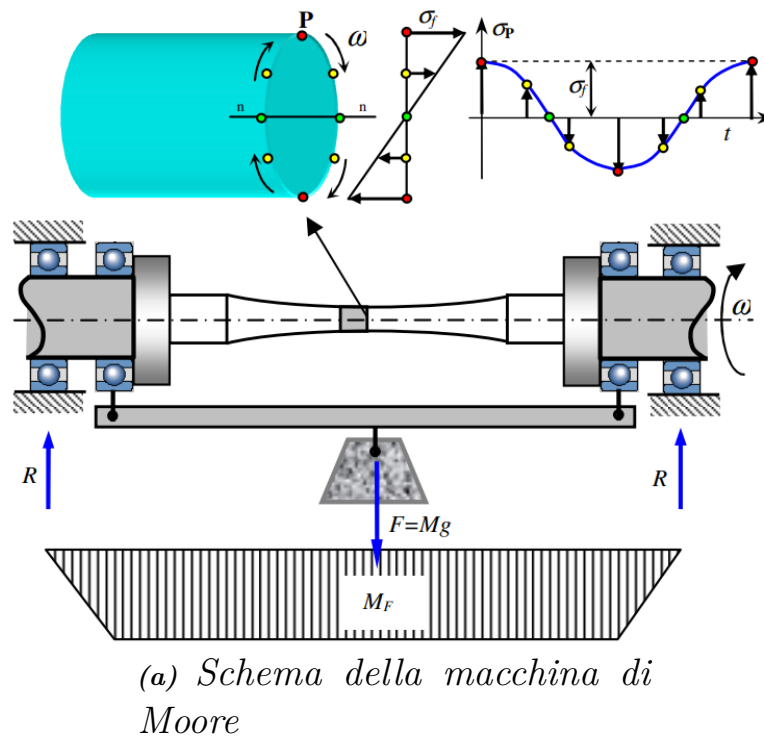


Figura 3.1. Macchina di Moore per la prova di fatica a flessione rotante

3.1.1 Metodo Dixon

Il metodo Dixon è un processo statistico utilizzato generalmente per la definizione del limite di fatica di un pezzo.[6]

Un metodo simile e più famoso è il più classico Staircase tuttavia Dixon è preferibile in quanto più rapido, infatti la prova per essere considerata valida ha bisogno di un numero minore dei 15 provini minimi dello Staircase. Dopo aver stabilito i cicli di run-out è buona norma stimare il limite di fatica del materiale utilizzato in modo da utilizzare il metodo Dixon nell'intorno di questo valore, solitamente si parte da quando si ha il primo "cambio" di comportamento, ovvero se dopo una serie di provini rotti ho il primo che supera i cicli di run-out oppure viceversa se alzando progressivamente il carico dopo una serie di provini che superano il run-out ho la prima rottura, successivamente si stabilisce un passo in MPa e si esegue la prima prova, se il provino sopravvive alla prova il successivo viene testato ad una tensione $\sigma + \Delta\sigma$, se invece si rompe ad una $\sigma - \Delta\sigma$ e si prosegue allo stesso modo.

Infine per calcolare la sigma limite di fatica per la quale si ha il 50% di possibilità di sopravvivenza si avrà:

$$\sigma_{50\%} = \sigma_0 + \Delta\sigma \times k \quad (3.1)$$

Dove σ_0 è il valore minimo della serie presa in considerazione, $\Delta\sigma$ corrisponde al passo scelto e k è un fattore ricavabile da tabelle.

3.2 Risultati

Avendo a disposizione 14 campioni per ogni serie, inizialmente sono state eseguite prove con un valore relativamente basso di sigma per poi incrementare fino ad arrivare a un punto in cui si ottiene sicuramente una rottura, si è ripetuto il test a quel carico in modo da avere un dato statisticamente più affidabile e successivamente è stato applicato il metodo Dixon.

3.2.1 Pallinatura

I risultati sono mostrati in Figura 3.1, essendo la prima prova che è stata eseguita il primo valore è stato preso volutamente basso mentre il secondo volutamente alto in modo da creare un intervallo in cui muoversi con i successivi valori. Tutti i

campioni che hanno superato i 2×10^6 cicli sono considerati come non rotti a quel carico. Guardando il numero di cicli raggiunti con un carico di 150MPa come carico successivo è stato preso un valore intermedio tra i primi due e dopo che anche questo campione ha raggiunto il run-out è stato considerato un valore intermedio tra 125 MPa e 150MPa¹. Le ripetizioni allo stesso carico sono state fatte per ridurre al minimo la casualità della prova, dato che non essendo stato eseguito il trattamento HIP i campioni presentano numerose difettosità interne che sicuramente influenzano la prova in negativo.

Campione	Carico [MPa]	Cicli	Eccentricità in macchina [mm]
1	100,4	10 649 531	0,3
2	150,5	144 940	0,1
3	150,5	137 369	0,4
4	150,4	6 080 253	0,4
5	124,6	3 887 002	0,15
6	137,6	260 531	0,3
7	137,6	281 312	0,15
8	131,1	5 090 262	0,55
9	134,3	5 293 375	0,1
10	137,6	264 147	0,1
11	134,3	4 666 292	0,32
12	137,6	189 057	0,33
13	134,3	5 082 080	0,25
14	137,6	119 047	0,5

Tabella 3.1. Dati dei campioni solamente Pallinati

I campioni evidenziati dal 10 al 14 sono quelli considerati per il metodo Dixon, infatti partendo da un carico di 131 MPa si è scelto uno step di 3 MPa e dopo due non rotture c'è il cambio di tendenza con la rottura a 137 MPa, la serie parte da questo campione e si avrà una sequenza del tipo X-O-X-O-X con la prima parte O-O.

¹i carichi non sono precisi al decimo poichè in macchina il minimo peso inseribile è 0,5kg quindi è possibile applicare un numero discreto di carichi

SAMPLE SIZE N	Second part of series	k FOR TEST SERIES WHOSE FIRST PART IS				STANDARD ERROR OF P_{50}
		○	○○	○○○	○○○○	
2	X	-.500	-.388	-.378	-.377	.88σ
3	X○	.842	.890	.894	.894	.76σ
	XX	-.178	.000	.026	.028	
4	X○○	.299	.314	.315	.315	.67σ
	XOX	-.500	-.439	-.432	-.432	
	XXO	1.000	1.122	1.139	1.140	
5	XXX	.194	.449	.500	.506	.61σ
	X○○○	-.157	-.154	-.154	-.154	
	X○○○X	-.878	-.861	-.860	-.860	
	X○○○X	.701	.737	.741	.741	
	X○○○X	.084	.169	.181	.182	
	X○○○X	.305	.372	.380	.381	
	X○○○X	-.305	-.169	-.144	-.142	
6	XXXX	1.288	1.500	1.544	1.549	.56σ
	XXXX	.555	.897	.985	1.000	
	X○○○○	-.547	-.547	-.547	-.547	
	X○○○○X	-1.250	-1.247	-1.246	-1.246	
	X○○○○X	.372	.380	.381	.381	
	X○○○○X	-.169	-.144	-.142	-.142	
	X○○○○X	.022	.039	.040	.040	
	X○○○○X	-.500	-.458	-.453	-.453	
	X○○○○X	1.169	1.237	1.247	1.248	
	X○○○○X	.611	.732	.756	.758	
	X○○○○X	-.296	-.266	-.263	-.263	
	X○○○○X	-.831	-.763	-.753	-.752	
	X○○○○X	.831	.935	.952	.954	
	X○○○○X	.296	.463	.500	.504	
	X○○○○X	.500	.648	.678	.681	
X○○○○X	-.043	.187	.244	.252		
X○○○○X	1.603	1.917	2.000	2.014		
X○○○○X	.893	1.329	1.465	1.496		
		X	XX	XXX	XXXX	Second part of series
		-k FOR SERIES WHOSE FIRST PART IS				

Figura 3.2. Tabella per il coefficiente k

Dalla Tabella 3.2 si ricava $k=-0.458$ e applicando la 3.1 si ha che: $\sigma_{50\%} = 135,63$ MPa che rappresenta il valore di carico per il quale si ha la probabilità del 50% che un campione superi i 2×10^6 di cicli senza rompersi.

3.2.2 Tornitura

In questa seconda prova per avere un punto in comune da comparare con la prova precedente si è scelto di partire testando i campioni a 137 MPa dato che ci si aspettava un valore di resistenza a fatica inferiore. Successivamente è stato stabilito un passo di

9 MPa e sono stati rotti alcuni provini, un dato interessante è il numero di cicli a cui i provini dal 1 al 7 si rompono, infatti pur riducendo il carico le rotture avvengono circa allo stesso numero di cicli. Questo fenomeno è probabilmente dovuto al fatto che i test sono stati svolti su provini che non sono stati sottoposti al trattamento di HIP quindi le cricche partono internamente dato che la superficie essendo tornita è quasi esente da imperfezioni rispetto agli altri stati superficiali.

Campione	Carico [MPa]	Cicli	Eccentricità in macchina [mm]
1	137,7	120 181	0,4
2	137,1	133 176	0,5
3	137,9	70 550	0,55
4	130,4	123 063	0,3
5	131,3	125 664	0,2
6	121,7	144 584	0,1
7	115,5	163 393	0,35
8	104,1	242 589	0,15
9	85,2	15 613 601	0,2
10	95,7	14 594 230	0,35
11	104,4	612 805	0,5
12	95,7	1 120 901	0,265
13	86,5	4 096 412	0,15
14	94,4	2 086 441	0,45

Tabella 3.2. Dati dei campioni solamente torniti

In questo caso la sequenza di provini presa in considerazione per i calcoli con Dixon parte da un carico di 85 MPa e arriva ad un carico massimo di 104 MPa ed è del tipo O-O-X-X-O con i due provini antecedenti il cambio di tendenza del tipo X-X non considerando i campioni prima perchè non rispettano il passo fissato di 9 MPa. Il campione nr. 13 non è stato considerato in quanto nonostante il provino si fosse rotto la macchina non si è fermata in automatico rendendo il dato non utilizzabile in quanto incerto, il successivo provino invece ha superato il run-out e la prova è stata fermata manualmente. Utilizzando la 3.1 con un $k=0,763$ ricavato dalla 3.2 questa

volta si ottiene $\sigma_{50\%} = 92,87$ MPa, significativamente inferiore rispetto a quella dei provini solamente pallinati.

3.2.3 Tornitura e Pallinatura

In questo caso i campioni a disposizione sono solamente 13 poichè si è deciso di preservare e sezionare l'ultimo per un'analisi al microscopio elettronico. Come ordine di esecuzione delle lavorazioni, prima è stata eseguita la tornitura cilindrica su tutto il campione e successivamente solo sul tratto utile è stata eseguita la pallinatura, se l'ordine di esecuzione fosse stato inverso la tornitura avrebbe eliminato gli effetti della pallinatura in quanto quest'ultima ha effetti solo nei primi 0,5 mm del materiale e in alcuni casi può raggiungere poco più di 1mm di profondità. Prima di procedere con Dixon sono state eseguite 3 prove con un carico ripetuto da 150 MPa in modo da confrontare i dati con gli altri due test e come mostrato in Tabella 3.3 i valori sono simili a quelli dei provini solo pallinati, in particolare con lo stesso carico il numero medio di cicli medio raggiunto prima della rottura è maggiore ma dello stesso ordine di grandezza.

Campione	Carico S (reale)	Cicli	Eccentricità in macchina [mm]
1	150,5	139 328	0,3
2	150,5	618 814	0,25
3	150,5	414 862	0,2
4	137,6	4 765 011	0,1
5	140,8	297 427	0,32
6	137,6	8 966 605	0,2
7	140,8	19 945 354	0,4
8	144,1	485 750	0,05
9	140,8	3 493 648	0,4
10	160,2	156 635	0,25
11	160,2	293 461	0,08
12	160,2	1 665 275	0,1
13	160,2	66 109	0,15

Tabella 3.3. Dati dei campioni torniti e pallinati

In questo caso Dixon è stato applicato con un passo di 3 MPa e applicando la 3.1 alla sequenza di provini evidenziata con un $k=0.372$ risulta che $\sigma_{50\%} = 138,70$ MPa, di poco superiore al risultato ottenuto con la sola pallinatura.

Nel grafico di Figura 3.3, eseguito tramite il software Matlab, sono stati inseriti tutti i dati ottenuti e sono state simulate delle curve di tendenza in modo da osservare l'andamento in funzione dell'aumentare del numero di cicli.

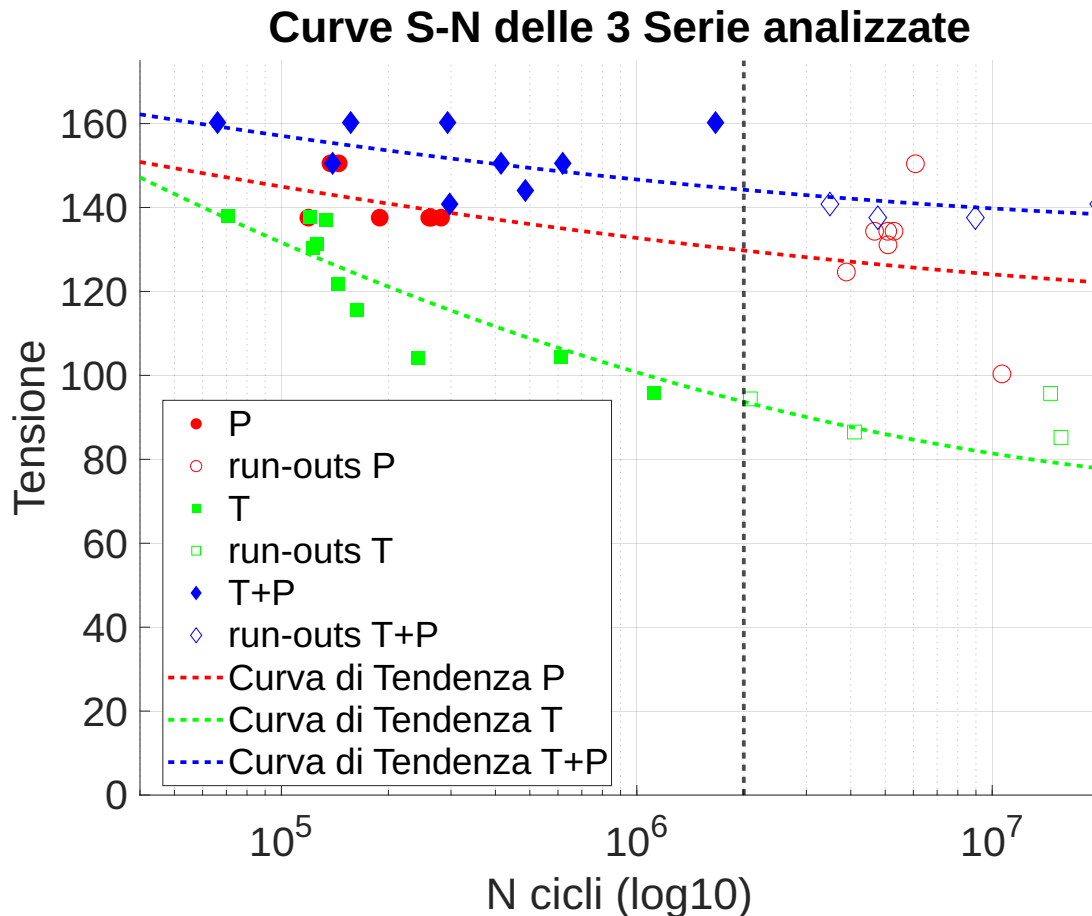


Figura 3.3. Grafico Riassuntivo delle tre serie di test

La retta verticale tratteggiata è posta al numero di cicli i run-out, ovvero 2×10^6 e i punti presenti alla destra della retta sono stati considerati come sopravvissuti a vita infinita nonostante in realtà abbiano un numero di cicli a cui la prova è stata interrotta molto differente fra loro ma questo dipende solo da quando è stata fermata la macchina per la prova di fatica.

I dati interessanti sono quelli alla sinistra della retta di run-out, le curve e la dispersione dei punti mostrano che l'effetto combinato di tornitura e pallinatura

produce un miglioramento rispetto alla sola pallinatura e alla sola tornitura, che come già menzionato probabilmente non ha prodotto l'effetto desiderato a causa delle cricche che si generavano principalmente all'interno del pezzo ed essendo l'unico dei tre trattamenti a non generare tensioni residue di compressione nel provino non riesce a compensare a sufficienza questo tipo di difetti.

La Tabella 3.4 riporta i dati² relativi alla resistenza a fatica ottenuti nel secondo studio, che include vari trattamenti superficiali applicati ai provini sottoposti a trattamento HIP. A seguire, sono riportati i valori sperimentali ottenuti tramite il metodo Dixon. Nell'ultima colonna è indicato l'incremento percentuale rispetto alla condizione con la resistenza più bassa, ovvero la condizione AH, la quale, nonostante il trattamento HIP aggiuntivo, presenta una resistenza inferiore rispetto ai campioni che hanno subito soltanto la tornitura.

Tuttavia il valore che si ottiene con la sola tornitura è ancora abbastanza basso, per ottenere miglioramenti significativi è stata eseguita una pallinatura sia in successione a una tornitura sia su provini grezzi e in entrambi i casi i risultati sono stati simili con l'applicazione combinata di tornitura e pallinatura che risulta superiore anche se di poco.

Campioni	Carico	%
AH	83,6	-
AB	120,67	44,3
CM	176,67	111,3
MM	236,70	183,1
T	92,87	11,08
P	135,63	62,2
T+P	138,70	66

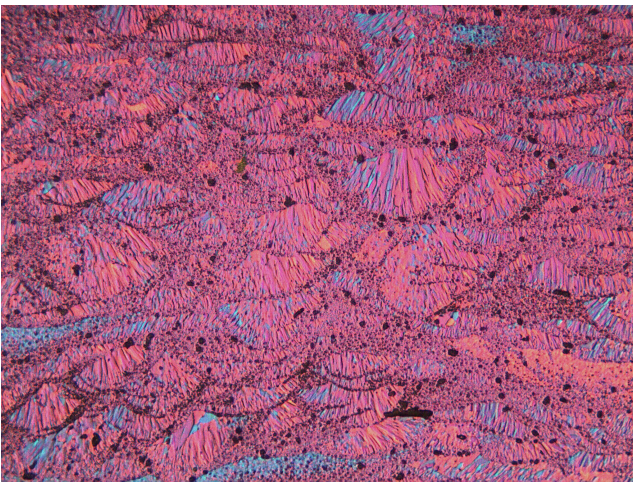
Tabella 3.4. Confronto valori di resistenza a fatica dei valori ottenuti con valori di altri studi

²Lo studio è stato eseguito su 3 dimensioni diverse di campioni, il dato riportato è la media dei risultati

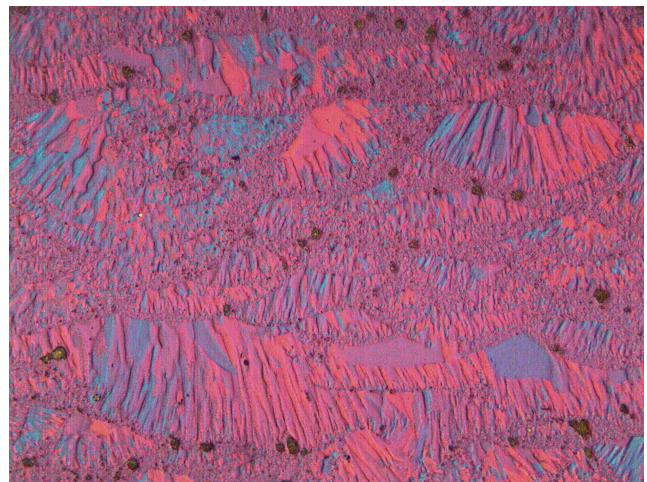
3.3 Analisi microstrutturale

Il processo di LPBF, essendo un procedimento layer-by-layer comporta la deposizione e la fusione di uno strato di polvere metallica sopra al precedente, può essere quindi descritto come una sequenza di microsaldature tra i vari strati, generando pozze di fusione simili a quelle delle tradizionali saldature. Analizzando un provino sezionato lungo il suo tratto utile e, dopo aver levigato la superficie con carta abrasiva a diversa granulometria ed eseguito un attacco chimico sulla superficie, osservandolo al microscopio elettronico a un ingrandimento di 10x (Figura 3.4a), è possibile distinguere chiaramente le pozze di fusione, la struttura dei grani e i relativi bordi. Un ingrandimento maggiore a 20x (Figura 3.4b) permette di osservare meglio questi particolari.

Dall'immagine si può notare che l'interno di un pezzo realizzato tramite questa tecnologia è pieno di micro-difetti dovuti a effetti come il ritiro del materiale durante la solidificazione o eventuali shock termici, infatti la maggior parte si concentra lungo i bordi delle pozze. Questi micro-difetti sono le criticità che limitano la resistenza a fatica dei pezzi in quanto punti di origine per cricche.



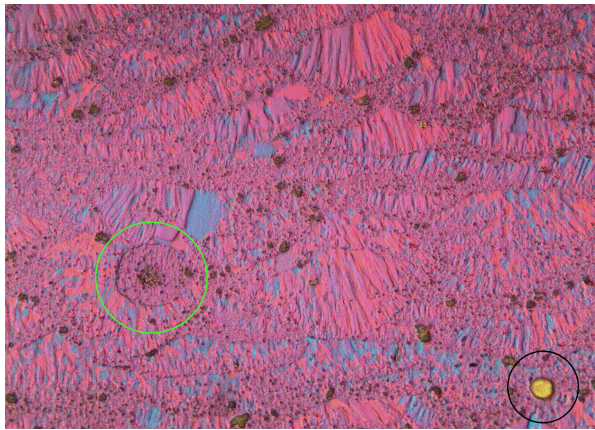
(a) Ingrandimento 10x



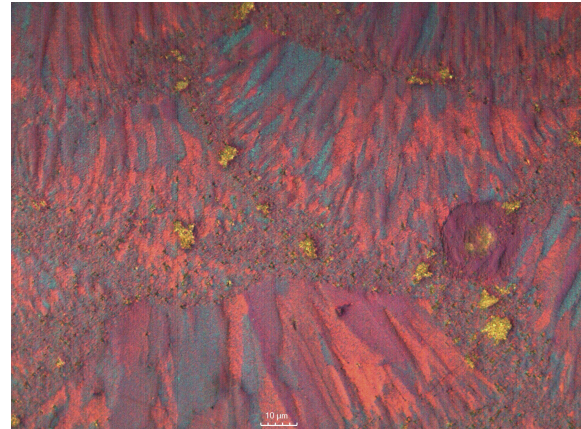
(b) Ingrandimento 20x

Figura 3.4. Fotografie al microscopio ottico della sezione longitudinale del tratto utile di un campione

In Figura 3.5a è riportata un'altra porzione del tratto utile che presenta due imperfezioni più grandi delle altre, quella evidenziata in nero è una porosità da gas



(a) Ingrandimento 20x della porosità e dell'inclusione

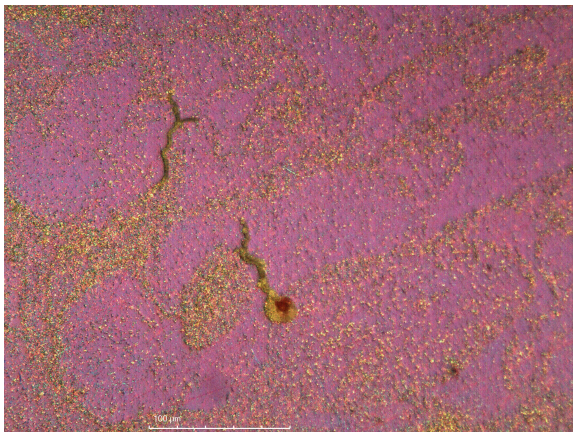


(b) Ingrandimento 50x dell'inclusione

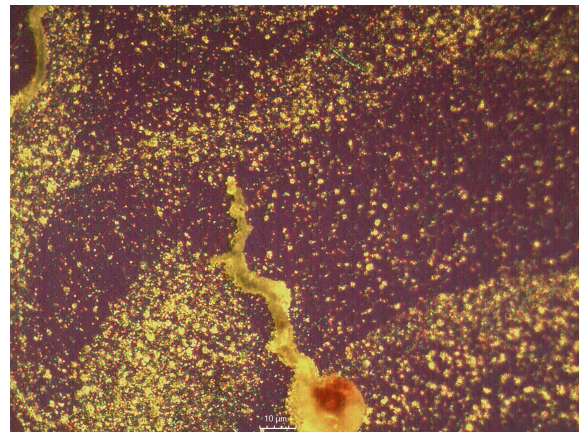
Figura 3.5. Fotografie al microscopio ottico della sezione longitudinale del tratto utile di un campione

che è rimasto all'interno del pezzo durante la fase di solidificazione, si può vedere un ulteriore ingrandimento nella 3.5b

Osservando invece una sezione trasversale dello stesso campione nel tratto utile sono state trovate delle cricche interne delle dimensioni poco inferiori a $100\ \mu\text{m}$, una delle quali sembra essere originata da una porosità data la forma circolare di una delle due estremità mentre l'altra potrebbe essere dovuta a tensioni residue durante la fase di raffreddamento del campione.



(a) Ingrandimento 20x



(b) Ingrandimento 50x

Figura 3.6. Fotografie al microscopio ottico della sezione trasversale

3.4 Frattografia

La frattografia analizza il modo in cui un campione si è rotto, osservando la superficie fratturata per identificare le cause primarie, tenendo conto di vari fattori come il materiale e il metodo di fabbricazione. Nelle fratture da fatica, le crepe si propagano lentamente sotto stress ripetuti e la superficie è generalmente liscia con segni caratteristici, come linee di spiaggia o concoidali, che indicano l'origine e la direzione della frattura. A livello microscopico, sono presenti striature che sono verticali rispetto alla direzione in cui procede la cricca, sono comuni su leghe di alluminio e rame, ma rare su leghe ferrose [5]. In Figura 3.7 sono mostrati i principali tipi di rottura a fatica per torsione, compressione e flessione.

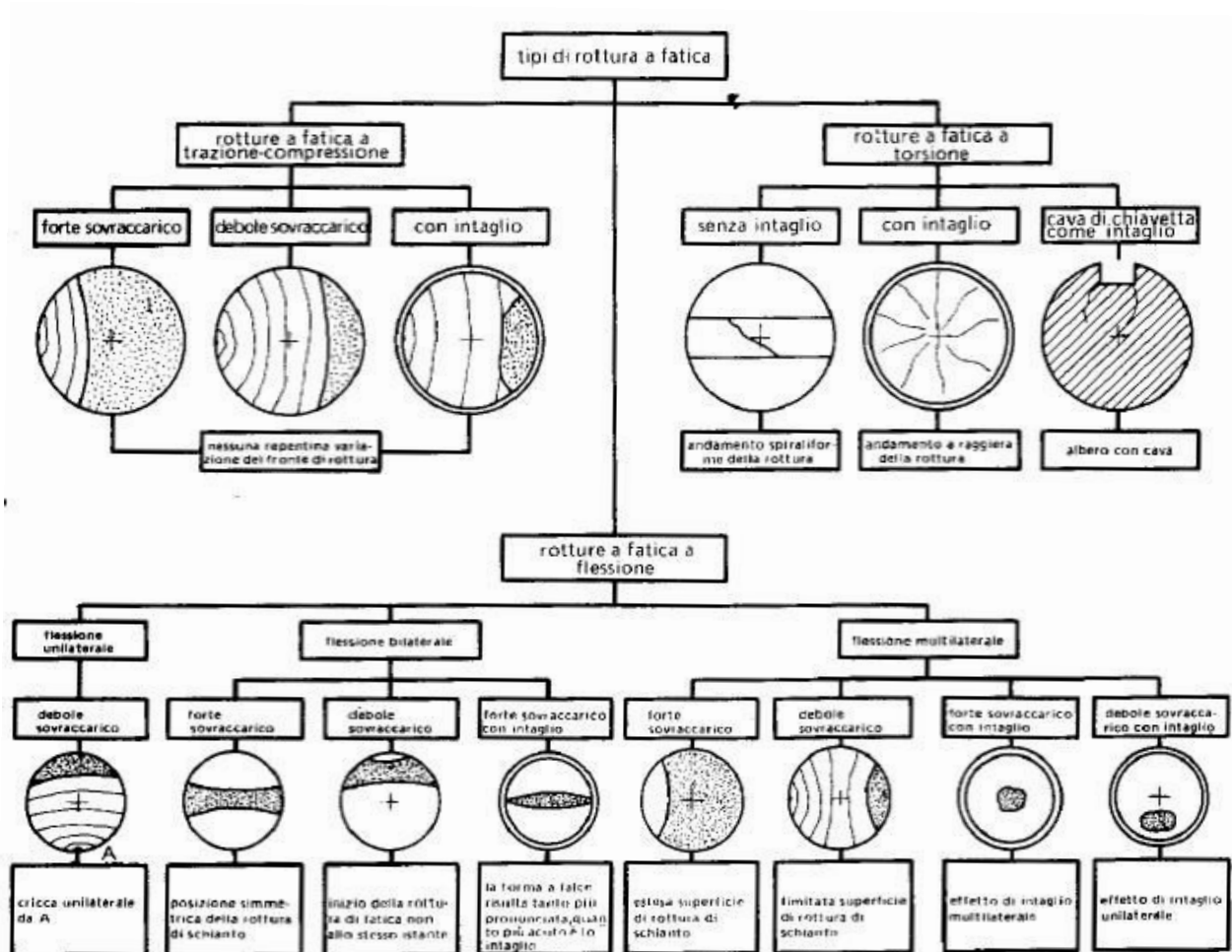
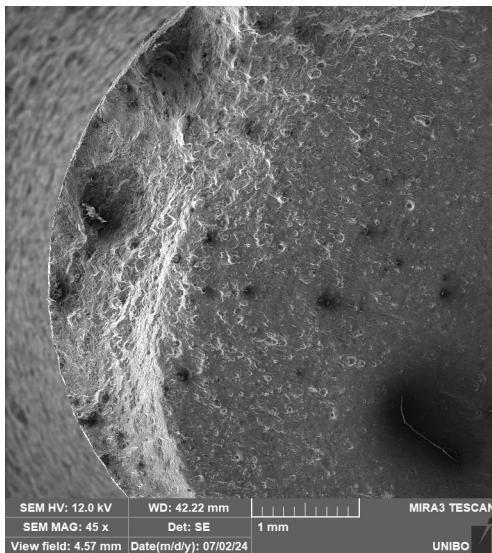


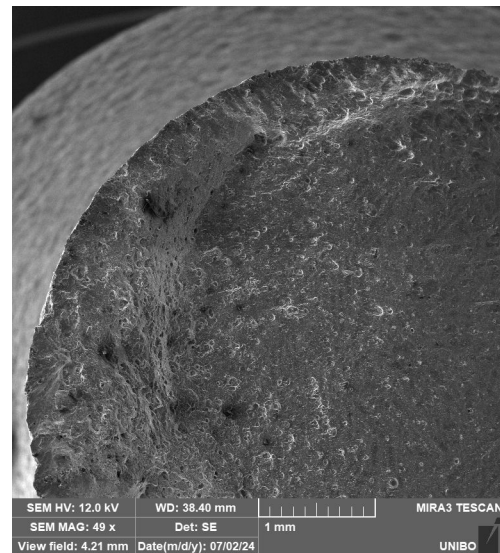
Figura 3.7. Schema di vari tipi di rottura a fatica

Si è osservata la superficie di frattura di 3 campioni rotti, uno per tipologia mediante microscopio elettronico a scansione (SEM) per poter determinare il meccanismo di rottura dei componenti, analizzando la superficie di frattura di entrambe le metà dei campioni.

In Figura 3.8 sono riportate le due metà di un campione e si nota sulla destra la zona di innesco della cricca che si propaga verso sinistra, tuttavia non è chiaro l'esatto punto di origine ma si tratta di rottura a fatica a flessione con una flessione di tipo multilaterale caratterizzata da debole sovraccarico data la ridotta area della superficie di rottura di schianto. Spostandoci sulla destra della seconda metà del



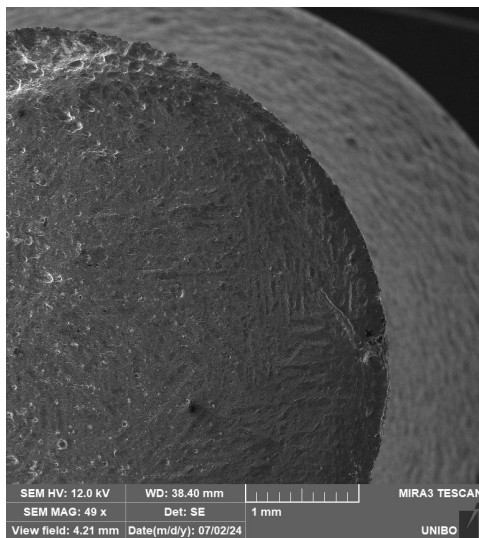
(a) Prima metà della superficie di frattura, 45x



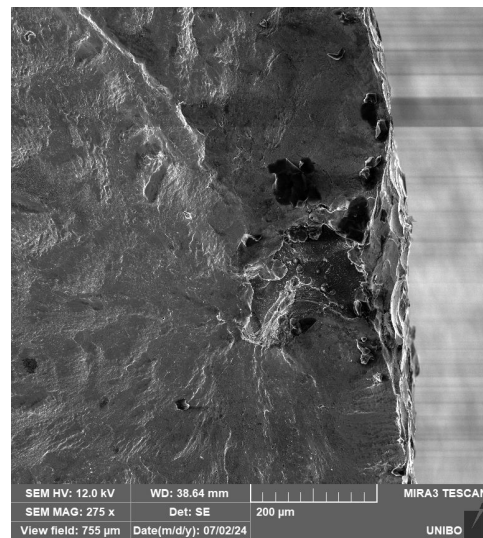
(b) Seconda metà della superficie di frattura, 49x

Figura 3.8. Ingrandimenti di un campione della serie sottoposta solo a pallinatura

campione si notano delle linee perfettamente a 90 gradi, queste con alta probabilità non sono derivate dalla frattura ma dalla strategia di movimento a scacchiera del laser in fase di stampa, tuttavia sull'estrema destra è presente una cricca che parte dalla superficie, si nota meglio nella 3.9b con un ingrandimento maggiore. Le rotture negli altri campioni sono abbastanza simili tuttavia analizzando gli altri campioni ci sono alcuni dettagli che si riescono a notare meglio. Nella Figura 3.10a è stato fotografato il punto da cui la cricca principale si è formata e successivamente espansa, da quella zona sulla superficie partono diverse linee di diramazione che si espandono tridimensionalmente generando anche cavità visibili nell'ingrandimento.



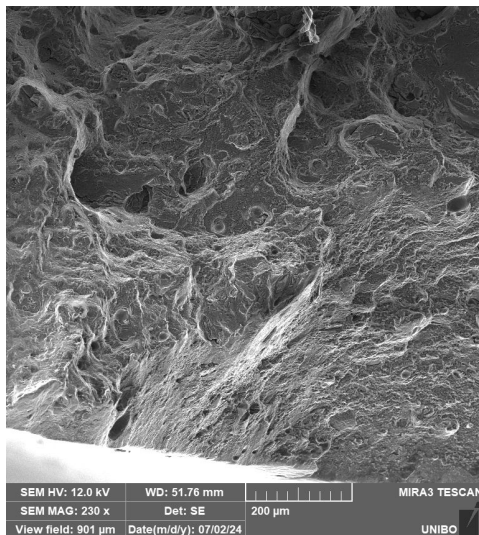
(a) Ingrandimento 49x



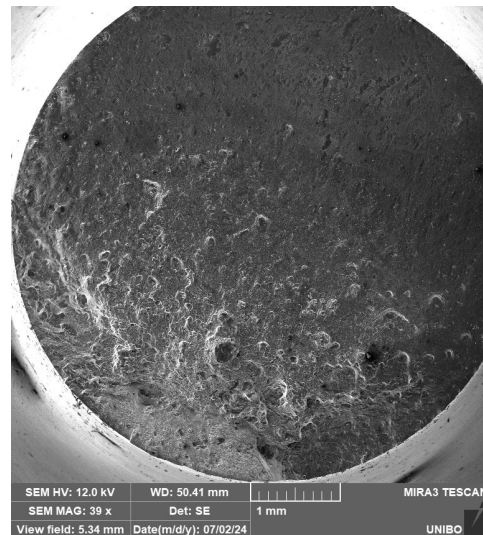
(b) Ingrandimento 275x

Figura 3.9. Ingrandimenti di un campione della serie sottoposta solo a pallinatura

La foto 3.10b mostra la seconda metà dello stesso provino ed è significativa per il fatto che si nota l'espansione e la propagazione della frattura, il provino infatti presenta una variazione graduale di colore dal punto in cui si è generata la cricca che si espande e si dirama fino a circa metà, da qui in poi è avvenuto il distacco diretto del materiale.



(a) Ingrandimento 230x della prima metà di un campione



(b) Ingrandimento 39x della seconda metà

Figura 3.10

4

Conclusioni

In questa tesi sono stati analizzati i meccanismi di resistenza a fatica di componenti realizzati mediante Additive Manufacturing, con un focus particolare sullo stato superficiale dei pezzi.

Le condizioni della superficie di un componente sono importanti, poiché se da un lato i difetti interni possono essere corretti solo con trattamenti come la Hot Isostatic Pressing (HIP), dall'altro la superficie esterna può essere lavorata attraverso diverse tecniche, come la tornitura, la pallinatura, la fresatura chimica, o combinazioni di queste.

La tornitura e la fresatura chimica hanno lo scopo di rendere la superficie esterna il più liscia possibile, eliminando discontinuità che potrebbero fungere da punti di innesco per cricche.

Al contrario, la pallinatura, pur non garantendo una superficie particolarmente liscia (con una rugosità media Ra che può variare tra 1 e 10 μm), induce tensioni residue di compressione sulla superficie. Questo effetto migliora la resistenza a fatica, prolungando la vita a fatica del componente.

In conclusione, lo studio ha dimostrato che, se le esigenze di resistenza a fatica non sono estremamente elevate, è possibile evitare trattamenti costosi lavorando solamente la superficie. Tuttavia, per miglioramenti significativi delle proprietà meccaniche, è necessario ricorrere a trattamenti aggiuntivi.

Ringraziamenti

Il primo pensiero va alla mia famiglia, se ce l'ho fatta è anche grazie a loro che mi hanno supportato durante questo percorso.

Un grande e sentito ringraziamento va alla mia relatrice Erica Liverani che mi ha seguito, con disponibilità, pazienza e gentilezza, dalla scelta dell'argomento all'esecuzione alle numerose prove in laboratorio, un grazie va anche a tutto il team del laboratorio, soprattutto a Paolo Proli che si è sempre mostrato disponibile ad aiutare e ha dato preziosi consigli.

Ringrazio anche tutti i compagni di corso che ho conosciuto in questi 3 anni, con le quali ho condiviso oltre che tante partite a carte durante le pause pranzo, sessioni di studio, momenti di gioia per un esame difficile superato, momenti di sfogo e tristezza, momenti di stanchezza dopo giornate intere di lezione da mattina a sera che senza qualche battuta con loro sarebbero state infinite.

Infine ma non per importanza ringrazio tutti i miei amici, quelli di una vita che ci sono sempre stati, quelli che in momenti in cui ero giù mi bastava uscire con loro a bere una birra che mi tiravano su di morale.

Bibliografia

- [1] APWorks, *Material Scalmalloy Datasheet*, Documento, <https://www.apworks.de/scalmalloy> [Online; accessed 2024], 2024.
- [2] S. Biamino e D. Ugues, «E. Bassini, A. Sivo, G. Marchese, P. Martelli, F. Calignano», it, 2021.
- [3] F. Campbell, *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics* (Ingenieria e ingegneria civil). ASM International, 2012, ISBN: 9781615039760. indirizzo: <https://books.google.it/books?id=rE5K9zBrprAC>.
- [4] F. Company, *Fastener Fatigue*, Documento, <https://www.fastenal.com/fast/services-and-solutions/engineering/fatigue> [Online; accessed 2024], 2024.
- [5] K. CORPORATION, *Modelli di frattura su superfici metalliche e soluzioni per problemi nell'analisi dei guasti metallurgici*, Documento, <https://www.keyence.it/ss/products/microscope/vhx-casestudy/automobile/fracture-surface.jsp> [Online; accessed 2024], 2024.
- [6] L. C. W. Dixon, «Applied mathematics of science & engineering», 1971.
- [7] A. du Plessis e E. Macdonald, «Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure», *Additive Manufacturing*, vol. 34, p. 101 191, 2020, ISSN: 2214-8604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101191>. indirizzo: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420305637>.
- [8] W. Ji, R. Zhou, P. Vivegananthan et al., «Recent progress in gradient-structured metals and alloys», *Progress in Materials Science*, vol. 140, p. 101 194, 2023, ISSN: 0079-6425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101194>. indirizzo: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642523001263>.

- [9] F. Kabakcioglu e E. Bayraktarkatal, «A Multihull Boat's Fatigue Analysis at Early Design Phase», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, p. 560, apr. 2022. DOI: 10.3390/jmse10050560.
- [10] M. Korpela, N. Riikonen, H. Piili et al., «Additive Manufacturing—Past, Present, and the Future», in *Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0: Automation, Adaption and Manufacturing in Finland and Beyond*, M. Collan e K.-E. Michelsen, cur. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 17–41, ISBN: 978-3-030-46103-4. DOI: 10.1007/978-3-030-46103-4_2. indirizzo: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46103-4_2.
- [11] MatWeb, *Aluminum Datasheet*, Documento, <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=AMEAL00> [Online; accessed 2024], 2024.
- [12] M. Raab e M. Bambach, «Fatigue properties of Scalmalloy® processed by laser powder bed fusion in as-built, chemically and conventionally machined surface condition», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 311, p. 117811, 2023, ISSN: 0924-0136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117811>. indirizzo: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013622003223>.
- [13] *SCALMALLOY®*, v 04-21, Carpenter Additive®, CRS Holdings Inc, 2021.
- [14] W. Schneller, M. Leitner, S. Leuders et al., «Fatigue strength estimation methodology of additively manufactured metallic bulk material», en *Additive Manufacturing*, vol. 39, p. 101688, mar. 2021, ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101688. indirizzo: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860420310605> (visitato il giorno 30/05/2024).
- [15] *UNI EN ISO/ASTM 52900:2022, Additive manufacturing - Principi generali - Terminologia*, norma UNI, 2022.
- [16] Y. Yan, Y. Jiang, E. L. L. Ng et al., «Progress and opportunities in additive manufacturing of electrically conductive polymer composites», *Materials Today Advances*, vol. 17, p. 100333, 2023, ISSN: 2590-0498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2022.100333>. indirizzo: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590049822001291>.