

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA Sede di Forlì

Corso di Laurea in INGEGNERIA MECCANICA Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Tecnologia Meccanica (c.i.)

**Studio del comportamento a fatica di acciaio AISI 420 prodotto via
SLM (Selective Laser Melting)**

CANDIDATO

Sarah Merighi

RELATORE

Lorenzo Donati

CORRELATORE

Erica Liverani

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	ADDITIVE MANUFACTURING	2
2.1	Tipologie di processo.....	2
2.1.1	<i>FDM</i>	2
2.1.2	<i>Processi per fotopolimerizzazione</i>	3
2.1.3	<i>I materiali metallici</i>	3
2.2	Selective Laser Melting	3
3	COMPORAMENTO A FATICA DI ACCIAI SLM	5
3.1	Fattori di influenza.....	5
3.1.1	<i>Orientamento di stampa</i>	5
3.1.2	<i>Effetto dei trattamenti termici</i>	6
3.1.3	<i>Effetto della finitura superficiale</i>	6
4	PROVE DI FATICA A FLESSIONE ROTANTE	8
5	PROVE DI FATICA A FLESSIONE ROTANTE SU AISI 420 (SLM)	9
5.1	I materiali	9
5.1.1	<i>AISI 420</i>	9
5.1.2	<i>16CrNi4</i>	10
5.2	Risultati delle prove di fatica su AISI 420 (SLM).....	11
5.3	Confronto con 16CrNi4	14
5.4	Le superfici di rottura AISI 420	17
5.4.1	<i>AISI 420 as-built</i>	17
5.4.2	<i>AISI 420 trattato termicamente</i>	18
5.5	Le superfici di rottura 16CrNi4	18
6	PROVE DI DENSITÀ	20
7	ANALISI MICROSTRUTTURALE	24
7.1	Procedimento.....	24
7.2	Micrografie.....	24
8	CONCLUSIONI	26

9	BIBLIOGRAFIA	27
---	---------------------------	----

INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

Figura 1: schema di una macchina LBM (sinistra) e dei processi di funzionamento (destra).	3
Figura 2: comportamento a fatica di campioni orizzontali e verticali di acciaio 630 SLM negli stati as-built (AB) e trattato termicamente (HT). (A) stress-life; (B) strain-life. (3)	5
Figura 3:comportamento a fatica dell'acciaio SLM 300 M dopo trattamento termico e sottoposto a differenti carichi. (2)	6
Figura 4: schema prova di fatica a flessione rotante (sinistra) ed esempio di diagramma S-N (destra)	8
Figura 5 : curva di fatica AISI 420 SLM as-built	13
Figura 6: curva di fatica AISI 420 SLM trattato termicamente	13
Figura 7: curva di fatica 16CrNi4	16
Figura 8 : superficie di rottura provino n° 3 AISI 420 AM as-built	17
Figura 9 : superficie di rottura provino n° 1 AISI 420 AM as-built	17
Figura 10 : superficie di rottura provino n° 7 AISI 420 trattato termicamente.....	18
Figura 11: superficie di rottura provino n° 6 AISI 420 trattato termicamente	18
Figura 12: superficie di rottura provino n° 7 16CrNi4.....	18
Figura 13 : superficie di rottura provino n°13 16CrNi4.....	19
Figura 14: superficie di rottura provino n°14 16CrNi4.....	19
Figura 15 : immagine ad alto contrasto della sezione del provino per l'analisi di densità per via informatica	20
Figura 16: densità AISI 420 SLM as-built	22
Figura 17: densità AISI 420 SLM trattato termicamente	22
Figura 18: ingrandimento 10x sezione trasversale AISI 420 SLM as-built	24
Figura 19: ingrandimento 5x sezione orizzontale AISI 420 SLM as-built.....	24
Figura 20: ingrandimento 50x sezione orizzontale AISI 420 SLM trattato termicamente.....	25
Figura 21: ingrandimento 10x sezione trasversale AISI 420 SLM trattato termicamente	25
Figura 22 : ingrandimento 20x sezione 16CrNi4.....	25
Tabella 1: confronto proprietà meccaniche a fatica di acciai SLM aventi differenti condizioni superficiali (1).....	7
Tabella 2: tavella caratteristiche meccaniche del 16CrNi4	10
Tabella 3: risultati prove di fatica su AISI 420 SLM as-built	11
Tabella 4: risultati prove di fatica AISI 420 SLM trattato termicamente.....	12
Tabella 5: risultati prove di fatica 16CrNi4.....	15
Tabella 6: risultati prove di densità con bilancia idrostatica su AISI 420 as-built.....	21

Tabella 7: risultati prove di densità con bilancia idrostatica su AISI 420 trattato termicamente	21
Tabella 8: risultati analisi di densità al computer su AISI 420 as-built.....	22
Tabella 9: risultati analisi di densità al computer su AISI 420 trattato termicamente	22

INTRODUZIONE

I processi additivi, additive manufacturing, rappresentano oggi una tecnologia produttiva in continua evoluzione ed innovazione. Grazie all'apporto delle nuove tecnologie è possibile trovare processi additivi applicati sui più vari materiali. La flessibilità di progettazione consentitaci da questi processi i quali offrono grandi vantaggi, è comunque accompagnata da difficoltà tecnologiche e problematiche uniche.

L'ambito nel quale questa tesi si pone è quello dell'applicazione dei processi additivi nel campo degli acciai, nello specifico quello del Selective Laser Melting (SLM), un processo a letto di polvere che sfrutta un raggio laser per la fusione selettiva degli strati del materiale depositato. Questa metodologia di produzione crea microstrutture uniche, completamente diverse da quelle normalmente ottenibili con le tecnologie tradizionali, ne conseguono quindi altrettanto differenti comportamenti meccanici; in particolare, si prenderà in considerazione come la variazione dei parametri produttivi rappresenti un importante fattore di influenza e di come la presenza di trattamenti termici porti ad ulteriori evidenti diversità.

Il lavoro svolto ha l'obiettivo di valutare il comportamento a fatica di un acciaio, AISI 420, prodotto con il metodo SLM sia nel suo stato trattato termicamente, sia in quello previo trattamento. Per richiesta dell'azienda fornitrice dei provini si è inoltre operato un ulteriore confronto con un acciaio prodotto tradizionalmente, 16CrNi4, del quale si vuole valutare un eventuale sostituzione. Sono state quindi effettuate prove di fatica a flessione rotante al fine di costruire le curve di fatica di tutti i materiali studiati e valutate allo stereoscopio le superfici di rottura dei provini. A seguito sono state eseguite prove di densità, sia utilizzando una bilancia idrostatica che effettuando una analisi per via informatica, sui campioni disponibili. In fine sono state effettuate delle micrografie per osservare la microstruttura dei materiali studiati.

1 ADDITIVE MANUFACTURING

I processi additivi, o additive manufacturing, hanno assunto un ruolo di particolare rilievo nell'ambito delle nuove tecnologie di produzione. Essi si contrappongono ai convenzionali processi per sottrazione basandosi invece sulla costruzione strato per strato del prodotto finale. L'applicazione principale di questi processi era inizialmente limitata alla creazione di modelli e prototipi con l'obiettivo di facilitare la visualizzazione del modello da parte del progettista, questo a causa delle numerose limitazioni tecnologiche del processo e della tendenza a creare strutture porose. Con le più recenti innovazioni si è resa possibile la realizzazione di prodotti più affidabili e funzionali.

I componenti realizzati con questi processi possono essere prodotti partendo unicamente da un loro modello 3D CAD. Il modello verrà poi discretizzato in un file contenente solo le informazioni della geometria grazie ad un'approssimazione delle superfici la cui risoluzione è definita dal progettista. Si procede poi ad una virtuale divisione per strati il cui spessore è legato alle specifiche del processo. Le più comuni tecnologie additive sfruttano materiali in polvere od in filo che vengono poi fusi in maniera selettiva da una fonte di calore, questi raffreddandosi solidificano andando così a formare strato per strato il prodotto finale. La fonte di calore è generalmente un laser od un fascio di elettroni.

I processi additivi, nonostante le difficoltà di gestione e valutazione dei parametri produttivi, presentano rilevanti vantaggi quali una significativa libertà di progettazione nelle forme e un'elevata velocità di realizzazione del prodotto finito anche senza particolari necessità di ulteriori lavorazioni.

1.1 Tipologie di processo

Esistono molteplici processi di tipo additivo che coinvolgono vari materiali plastici, metallici e resine. La classificazione dei processi è basata sia sulla tipologia del meccanismo di legamento tra gli strati sia sulla natura e lo stato del materiale usato.

1.1.1 FDM

Processo significativo nel campo dei materiali polimerici è il Fused Deposition Modeling (FDM). Il materiale polimerico, generalmente in forma di filo viene liquefatto in una camera calda per poi fuoriuscire da un ugello allo stato semi-solido. Parametro di controllo per lo spessore del filo di materiale uscente, che va mantenuto costante, è il rapporto tra la velocità di flusso e quella di movimentazione. Per questo motivo il controllo della portata tenderà a risultare complesso ed il controllo dei gradienti di temperatura sarà fondamentale per limitare eventuali deformazioni del prodotto finito.

1.1.2 Processi per fotopolimerizzazione

Le resine polimeriche si presentano come una classe di materiali varia nelle proprietà e possibilità di applicazione anche nel campo dei processi additivi. I processi per fotopolimerizzazione sfruttano tipologie di resine allo stato liquido sensibili alle radiazioni, generalmente su lunghezze d'onda UV. I pezzi realizzati con queste tecnologie necessiteranno di essere ripuliti dalla resina liquida residua e dagli elementi di supporto. Molte resine possono risultare tossiche per l'uomo, tuttavia esistono specifiche resine atossiche spesso usate anche nel campo medico e dentistico.

1.1.3 I materiali metallici

Di particolare interesse in campo ingegneristico sono i processi additivi relativi ai materiali metallici, tra questi ricordiamo: Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), e Direct Laser Deposition (DLD). I materiali tipici utilizzati sono acciai, leghe di alluminio, titanio e leghe di titanio, superleghe a base di nichel e CoCr (4). I metalli, e nello specifico gli acciai, risultano particolarmente sensibili ai parametri di produzione e tenderanno a creare microstrutture uniche con particolari proprietà fisiche. Questa sensibilità tenderà a rendere difficile il controllo delle proprietà del prodotto finale come verrà approfondito nel capitolo seguente.

1.2 Selective Laser Melting

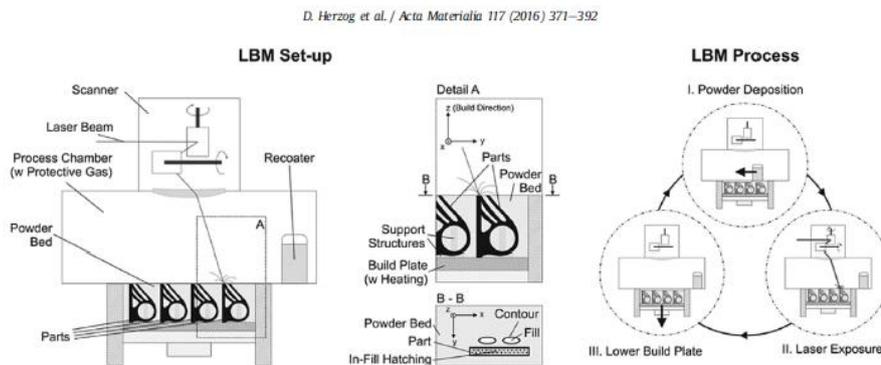


Figura 1: schema di una macchina LBM (sinistra) e dei processi di funzionamento (destra).

Selective Laser Melting (SLM) è un processo additivo a letto di polvere (figura 1). La polvere di metallo viene depositata in sottili strati di spessore compreso tra i 20 μm e 100 μm su un'area di lavoro che può variare tra i 50 mm x 50 mm e gli 800 mm x 400 mm (4). Una riserva vicino all'area di lavoro, o una tramoggia, provvedono a fornire la polvere metallica mentre un apposito sistema di livellamento garantisce una sua uniforme distribuzione. Un raggio laser di potenza P_L compresa tra i 20 W e un 1 kW viene poi diretto con una velocità di scansione v_s fino a 15 m/s sullo strato di polvere depositato. Generalmente le sorgenti laser utilizzate sono in fibra ed emettono in modo continuo una radiazione avente lunghezza d'onda di 1060 nm – 1080 nm nel vicino infrarosso. La polvere metallica viene quindi esposta selettivamente al raggio laser sul piano x-y così da eccedere la temperatura di fusione e fondere completamente la polvere. In

generare la sequenza dei passaggi del laser segue uno schema in cui le tracce di fusione si sovrappongono di un valore h_s . Il volume di energia $E_v \propto P_L \cdot h_s \cdot D_s$ fornito allo strato di polvere tende non solo a fondere il materiale esposto, ma anche a scaldare per conduzione il materiale circostante. Dopo l'esposizione del primo strato al laser il piano viene abbassato lungo l'asse z, viene quindi depositato un nuovo strato di polvere e ripetuto il processo. Alla fine del processo la polvere non fusa potrà essere rimossa e riutilizzata nei processi successivi. Il prodotto finale sarà generalmente fissato al piano con delle strutture di supporto, queste sono necessarie al fine della dissipazione del calore ed al sostegno delle parti sospese del pezzo per evitarne la deformazione. Queste strutture verranno poi rimosse alla fine del processo. Sempre al fine di evitare distorsioni nel pezzo e ridurre le tensioni residue si riscalda il piano di costruzione così da limitare i gradienti di temperatura. L'ambiente in cui si andrà a costruire il pezzo è una camera chiusa la cui atmosfera viene mantenuta controllata così da mantenere i livelli di ossigeno sotto lo 0.1%, vi vengono inoltre inseriti elementi protettivi delle pozze di fusione quali nitrogeno ed argon. I fumi ed i prodotti secondari di scarto vengono rimossi dall'ambiente grazie ad un flusso di gas inerte.

2 COMPORTAMENTO A FATICA DI ACCIAI SLM

La produzione di pezzi in acciaio via SLM è caratterizzata da molteplici benefici, tuttavia prevedere e controllare le caratteristiche del prodotto finale può risultare arduo, soprattutto per quanto riguarda il comportamento a fatica. È stato studiato come l'orientamento di stampa, la qualità superficiale ed i trattamenti termici post-produzione siano i parametri più efficaci per il controllo del comportamento a fatica. Altri studi hanno anche evidenziato che la densità energetica del SLM, le condizioni di esercizio, ed i carichi caratteristici sono influenti sulla vita a fatica di questi acciai.

2.1 Fattori di influenza

2.1.1 Orientamento di stampa

L'orientamento di stampa del pezzo risulta particolarmente influente sulle proprietà meccaniche, sia statiche che dinamiche. Ovvero la direzione di applicazione del carico rispetto a quella di costruzione degli strati è un fattore determinante sulla vita a fatica di questi acciai. Gli acciai aventi direzione di costruzione normale all'asse di carico tendono ad avere migliori risultati a fatica rispetto a quelli aventi l'asse di carico parallelo a quello di costruzione. In generale risulta evidente come indipendentemente dall'orientamento di costruzione gli acciai SLM abbiano caratteristiche a fatica inferiori a quelle degli stessi acciai prodotti tradizionalmente. L'orientamento di stampa è da tenere in considerazione in quanto è determinante sulla distribuzione, direzione e grandezza dei difetti di produzione. In figura 2 possiamo vedere un esempio del suo impatto sul comportamento a fatica dell'acciaio 630 SLM.

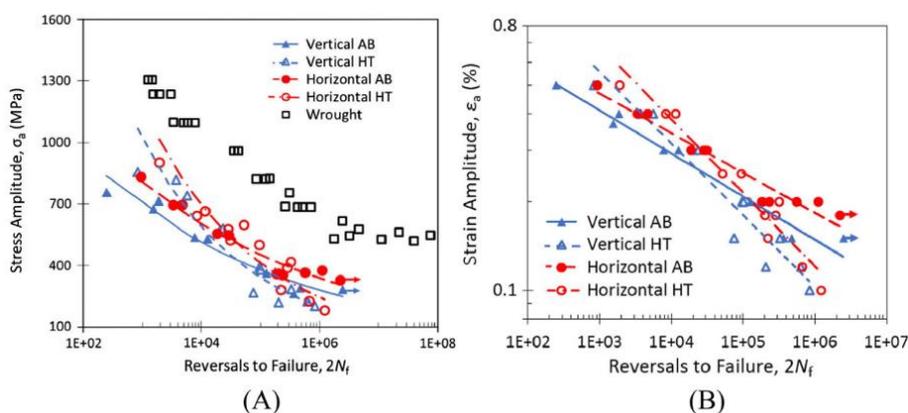


Figura 2: comportamento a fatica di campioni orizzontali e verticali di acciaio 630 SLM negli stati as-built (AB) e trattato termicamente (HT). (A) stress-life; (B) strain-life. (3)

Questa differenza è causata dalle diverse velocità e modalità di raffreddamento degli strati, alle quali si associano anche diversi livelli di tensione residua. Gli acciai SLM costruiti orizzontalmente sperimentano raffreddamenti maggiori e velocità di solidificazione più alte. Si

ottiene così una maggiore distribuzione e minore grandezza delle porosità rispetto agli esemplari costruiti verticalmente, i quali avranno quindi minore resistenza a fatica. Si avranno nelle due configurazioni differenti microstrutture alle quali si associa una, seppur minimale, differenza di accrescimento della cricca (1).

In generale la migliore performance a fatica degli esemplari costruiti orizzontalmente è quindi da associarsi a tre fattori: la diversa grandezza e distribuzione dei difetti, i differenti livelli di tensioni residue, e la direzione di costruzione degli strati rispetto a quella del carico.

2.1.2 Effetto dei trattamenti termici

Ogni trattamento termico ha un particolare effetto sul comportamento a fatica a seconda della tipologia di acciaio SLM e delle sue caratteristiche specifiche. Ad ogni acciaio si deve associare il trattamento termico più adatto in quanto ha diretto effetto sulla sua vita a fatica. Si è notato per esempio come trattamenti termici di distensione avevano un effetto positivo sugli acciai H13 SLM temprati ed invece non ne avevano alcuno sull'acciaio, sempre SLM, 316L (1).

Alcune leghe non sono particolarmente influenzate dai trattamenti termici, risulta quindi importante scegliere i parametri ottimali del SLM così da avere le migliori proprietà meccaniche ottenibili. La giusta calibrazione della potenza del laser è fondamentale per limitare la presenza di difetti. È necessario ottimizzare la densità di energia al fine di ottenere un prodotto finale di buona qualità, questo si ottiene generalmente modificando la potenza del laser e/o lo spessore dello strato depositato. In figura 3 riportiamo un esempio dell'influenza del trattamento termico sul comportamento a fatica dell'acciaio SLM 300 M (2).

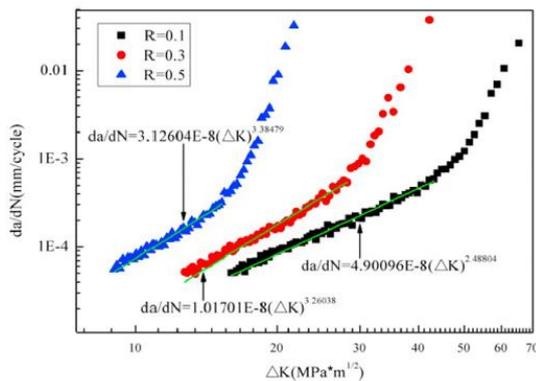


Figura 3:comportamento a fatica dell'acciaio SLM 300 M dopo trattamento termico e sottoposto a differenti carichi. (2)

2.1.3 Effetto della finitura superficiale

La superficie esterna è la più comune collocazione della cricca iniziale nei materiali metallici. La qualità superficiale risulta quindi particolarmente influente sul limite di fatica degli acciai convenzionali. La rugosità superficiale è particolarmente dannosa nel caso degli acciai SLM, nei

quali a causa della loro costruzione per strati risulta maggiore rispetto a quella ottenuta da produzioni convenzionali. Questo risulta in più frequenti e maggiori tensioni localizzate che causa inferiori limiti di fatica. Per migliorare il limite di fatica degli acciai SLM è possibile lavorarne la superficie al fine di ottenere migliori finiture superficiali. Le tradizionali lavorazioni come la tornitura producono tensioni residue di compressione e rimuovono i difetti superficiali. Hanno anche la tendenza a comprimere i difetti vicini alla superficie via deformazione plastica, riducendone così l'impatto negativo sulle proprietà meccaniche. Va notato tuttavia che le lavorazioni a macchina, rilasciando le tensioni residue di compressione del substrato, possono comportare un maggior facilità di inizio della cricca e una sua maggiore velocità di accrescimento (1). In tabella 1 presentiamo il confronto delle proprietà meccaniche a fatica di alcuni acciai SLM al variare delle loro condizioni superficiali.

Tabella 1: confronto proprietà meccaniche a fatica di acciai SLM aventi differenti condizioni superficiali (1).

Material	Approximate fatigue endurance	R	Surface condition	R _a (μm)
S316L	130 MPa ^{*1}	-1	As-built	13.29
S316L	170 MPa ^{*1}	-1	Vibratory finished	1.74
S316L	240 MPa ^{*1}	-1	Turned	1.08
S316L	200 MPa ^{*2}	0.1	As-built	10.0
S316L	256 MPa ^{*2}	0.1	Machined	0.4
S316L	269 MPa ^{*2}	0.1	Polished	0.1
S316L	108 MPa ^{*1}	-1	As-built	-
S316L	267 MPa ^{*1}	-1	Turned	-
630	492 MPa ^{*2}	0	Machined	0.2
630	219 MPa ^{*2}	0	As-built	13.7
Marlock	345 MPa ^{**1}	-1	As-built	2.587
Marlock	500 MPa ^{**1}	-1	Polished	0.198

* At 10⁶ cycles.

** At 6 × 10⁴ cycles.

¹ S-N curve is plotted according to σ_a values.

² S-N curve is plotted according to σ_{max} values.

3 PROVE DI FATICA A FLESSIONE ROTANTE

Le prove di fatica hanno in generale l'obiettivo di caratterizzare le proprietà intrinseche di un materiale in relazione a sollecitazioni cicliche e sono svolte in condizioni di controllo dei carichi. I risultati tenderanno ad avere una certa dispersione ed è per questo necessario svolgere un numero adeguato di prove al fine di ottenere una buona ripetibilità.

Le prove di fatica a flessione rotante sono svolte su provini nominalmente identici, i quali sono sottoposti al test fino a rottura o fino al raggiungimento di un predeterminato numero di cicli, 10^7 o 10^8 cicli. Il carico può essere posizionato in un unico punto, in due punti, od in quattro. I provini possono essere cilindrici o a clessidra.

Prima dell'inizio della prova i singoli provini devono essere controllati per evidenziare eventuali difetti dimensionali e superficiali che potrebbero influenzare il risultato delle prove. Altro fattore di influenza può essere rappresentato dalla temperatura, i cui valori devono essere controllati e mantenuti quanto più costanti possibile.

Detto S lo sforzo richiesto dal test viene calcolata la forza F da applicare, così da poter valutare la massa in chilogrammi da caricare nella macchina utilizzata.

$$S = \frac{M}{W} = F \cdot L \cdot \frac{32}{\pi d^3} \qquad F = \frac{S \cdot \pi \cdot d^3}{32 \cdot L}$$

Le prove sono svolte ad una frequenza, scelta sulla base del materiale analizzato e della macchina utilizzata, compresa tra i 15 e i 200 Hz. I risultati delle prove verranno tabulati e poi rappresentati graficamente sul diagramma S-N (figura 2), con N numero di cicli. Una curva best-fit viene poi tracciata sul grafico, così da poter rappresentare con sufficiente approssimazione l'andamento della curva di fatica del materiale considerato.

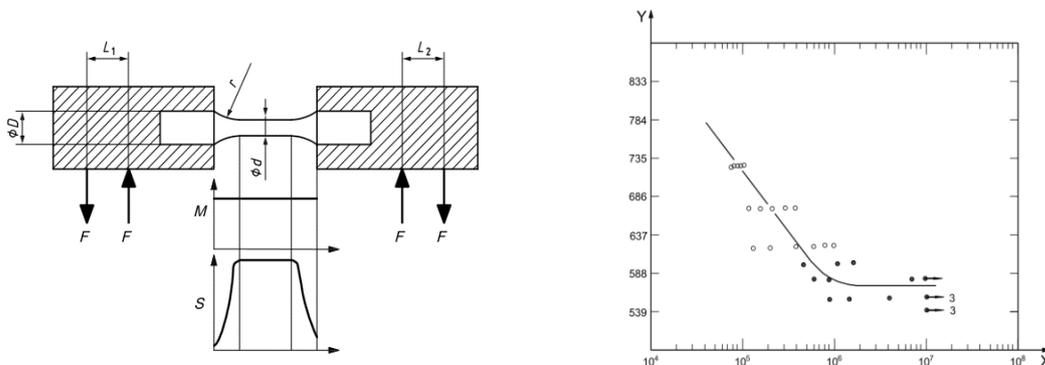


Figura 4: schema prova di fatica a flessione rotante (sinistra) ed esempio di diagramma S-N (destra)

4 PROVE DI FATICA A FLESSIONE ROTANTE SU AISI 420 (SLM)

Si è voluto qui indagare il comportamento a fatica dell'acciaio AISI 420 prodotto via SLM e trattato termicamente e confrontarlo con quello dello stesso acciaio previo trattamento. Si vuole quindi studiare l'eventuale miglioramento, ottenuto grazie al trattamento, del comportamento a fatica di questo materiale. Si è quindi deciso, su richiesta dell'azienda fornitrice dei provini, di confrontare i risultati con quelli relativi all'acciaio 16CrNi4. La prova scelta per il confronto è la prova di fatica a flessione rotante.

La configurazione utilizzata è quella a quattro punti presentata in figura 1. Le prove sono state svolte su provini cilindrici di diametro 6 mm. La prova risulta superata per un numero di cicli superiore a 10^7 . Il braccio L della forza F è di 140 mm. La prova è svolta a 3600 rpm.

4.1 I materiali

4.1.1 AISI 420

L'AISI 420 tradizionale è un acciaio martensitico avente caratteristiche meccaniche particolari che lo rendono particolarmente versatile. Allo stato temprato e disteso con superfici lucidate a specchio presenta buona resistenza alla corrosione in ambienti mediamente aggressivi non clorurati. È quindi utilizzato per la produzione di strumenti chirurgici e odontoiatrici, coltelleria, molle.

Allo stato bonificato viene invece utilizzato per la produzione di alberi, ingranaggi, valvole, utensili manuali e parti meccaniche.

Nel caso in analisi valuteremo le proprietà a fatica dello stesso acciaio prodotto via Selective Laser Melting nella sua forma trattata e non.

I provini sono stati stampati con orientamento in direzione verticale, ovvero con un'inclinazione di 90° .

Il trattamento effettuato sui provini è di bonifica. È stata effettuata una tempra con salita a 780°C in 45 minuti con una velocità di salita di 10°C al minuto ed una successiva salita a 1050°C per 60 minuti sempre con velocità di 10°C al minuto, si è effettuato lo spegnimento in azoto a 5000mbar per 45 minuti, il rinvenimento è stato invece effettuato a 230°C per 2 ore.

L'AISI 420 SLM presenta nel suo stato as-built una durezza Vickers compresa tra i 490 e i 680 HV, nel suo stato trattato ha invece una durezza di 640 HV. L'AISI 420 tradizionale ricotto presenta invece una durezza Brinell di 245, corrispondente a circa 260 HV.

4.1.2 16CrNi4

Il 16CrNi4 è un acciaio da cementazione usato nell'industria automobilistica per le buone proprietà di lavorabilità allo stato ricotto ed alla facilità di trattamento termico, che sopporta senza rilevanti deformazioni. Possiede una buona temprabilità con elevata resistenza al nucleo.

In tabella 2 le caratteristiche meccaniche:

Tabella 2: tavola caratteristiche meccaniche del 16CrNi4

Stato	Saggio	Tensione di snervamento [N/mm ²]	Carico di rottura [N/mm ²]	Durezze HB	
Temprato e disteso	11	835	1080÷1470	<i>Ricotto lavorabile</i>	≤ 225
	30	590	830÷1130	<i>Ricotto isothermico</i>	145÷207
	63	540	740÷980	<i>Ricotto sferoidale</i>	≤ 207

4.2 Risultati delle prove di fatica su AISI 420 (SLM)

Di seguito si mostrano i dati risultanti dalle prove di fatica a vari carichi:

Prove a fatica acciaio as-built

Tabella 3: risultati prove di fatica su AISI 420 SLM as-built

PROVINO	CARICHI	VITA [cicli]	ECCENTRICITÀ [mm]
1	Pesi [kg]: 27,45	11.158	0,06
	Tens. [MPa]: 930		
2	Pesi [kg]: 27,45	8.267	0.03
	Tens. [MPa]: 930		
3	Pesi [kg]: 27,45	6.613	
	Tens. [MPa]: 930		
4	Pesi [kg]: 20,25	24.183	0.03
	Tens. [MPa]: 698		
5	Pesi [kg]: 20,25	16.926	0.12
	Tens. [MPa]: 698		
6	Pesi [kg]: 20,25	20.021	0.08
	Tens. [MPa]: 698		
7	Pesi [kg]: 13,05	63.868	0.04
	Tens. [MPa]: 465		
8	Pesi [kg]: 13,05	31.762	0.06
	Tens. [MPa]: 465		
9	Pesi [kg]: 13,05	82.203	0.07
	Tens. [MPa]: 465		
10	Pesi [kg]: 8,3	309.427	0.01
	Tens. [MPa]: 310		
11	Pesi [kg]: 8,3	192.777	0.04
	Tens. [MPa]: 310		
12	Pesi [kg]: 4,9	367.837	0.02
	Tens. [MPa]: 200		
13	Pesi [kg]: 4,9	335.997	0.05
	Tens. [MPa]: 200		
14	Pesi [kg]: 3,35	Run out	
	Tens. [MPa]: 150		

Prove a fatica acciaio trattato termicamente

Tabella 4: risultati prove di fatica AISI 420 SLM trattato termicamente

PROVINO	CARICHI	VITA [cicli]	ECCENTRICITÀ [mm]
1	Pesi [kg]: 32,05	6.124	0,04
	Tens. [MPa]: 1080		
2	Pesi [kg]: 20,95	53.450	0,01
	Tens. [MPa]: 720		
3	Pesi [kg]:12,6	202.572	0,02
	Tens. [MPa]: 450		
4	Pesi [kg]:9,8	Run out	
	Tens. [MPa]: 360		
5	Pesi [kg]: 12,6	9.154.362	0,01
	Tens. [MPa]: 450		
6	Pesi [kg]: 12,6	80.481	0,05
	Tens. [MPa]: 450		
7	Pesi [kg]: 20,95	17.503	0,03
	Tens. [MPa]: 720		
8	Pesi [kg]: 12,6	137.660	0,07
	Tens. [MPa]: 450		
9	Pesi [kg]: 11,05	Run out	0,06
	Tens. [MPa]: 400		
10	Pesi [kg]: 11,7	297.183	0,04
	Tens. [MPa]: 420		
11	Pesi [kg]: 11,05	227.149	0,02
	Tens. [MPa]: 400		
12	Pesi [kg]: 10,45	555.561	0,05
	Tens. [MPa]: 380		
13	Pesi [kg]:20,95	15.954	0,04
	Tens. [MPa]: 720		

Curva di fatica acciaio as-built

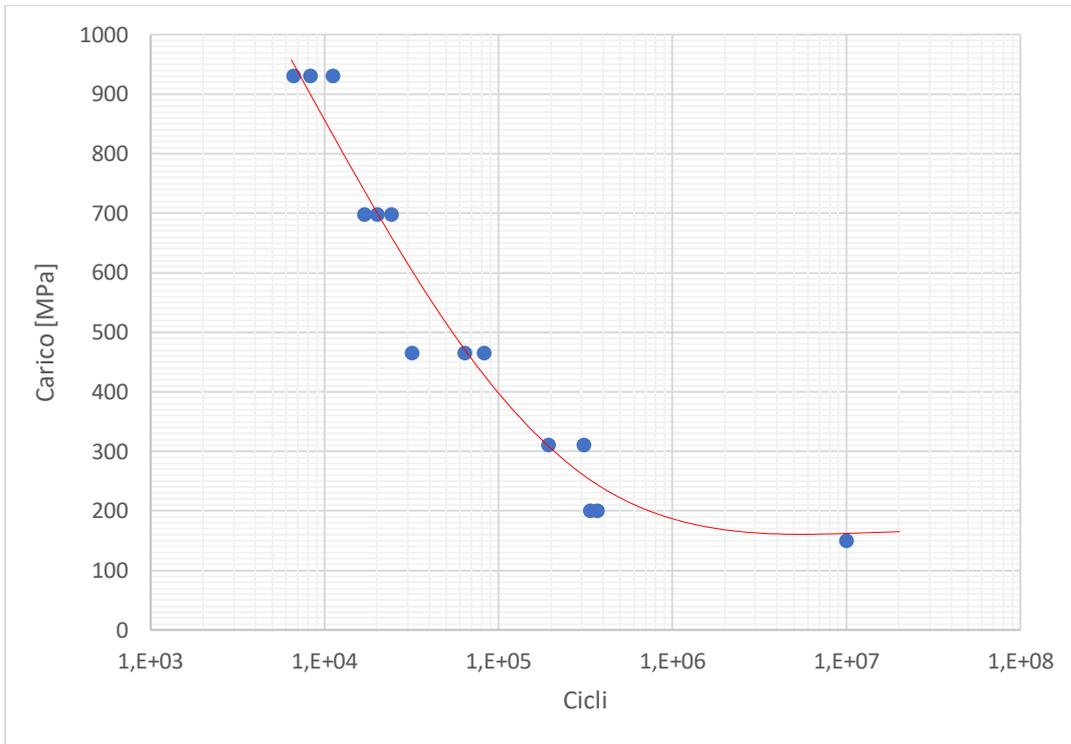


Figura 5 : curva di fatica AISI 420 SLM as-built

Curva di fatica acciaio trattato termicamente

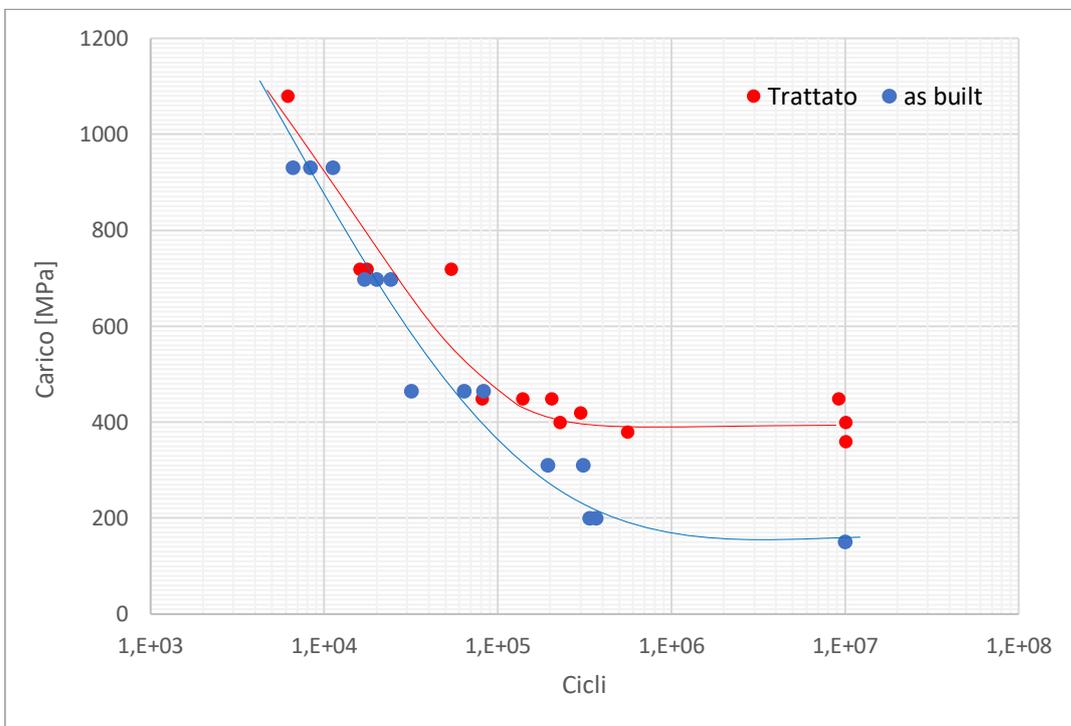


Figura 6: curva di fatica AISI 420 SLM trattato termicamente

Si è scelto di svolgere le prove seguendo la traccia data dalla normativa ISO 1143, si sono quindi svolte diverse prove a vari livelli di carico cercando di tracciare, con quanta più precisione possibile consentita dal numero di provini disponibili, la curva di fatica.

L'acciaio non trattato ha dimostrato avere un limite di fatica situato su carichi particolarmente bassi, quello trattato termicamente, come si può notare dai grafici, ha un limite decisamente situato più in alto. Le prove hanno dimostrato una certa ripetibilità, ne consegue una buona costanza nella qualità dei provini che risultano quindi avere tutte caratteristiche simili. Nel caso dell'acciaio trattato termicamente avvicinandosi al limite di fatica è stato più difficile ottenere una buona ripetibilità dei risultati, si suppone tuttavia dai dati ottenuti che il limite di fatica sia situato tra i 360 e i 400MPa, contro i soli 150MPa dell'acciaio non trattato.

Si ipotizza quindi che le tensioni residue presenti maggiormente nell'acciaio non trattato siano responsabili dei più scarsi risultati a fatica.

4.3 Confronto con 16CrNi4

L'azienda fornitrice dei provini era interessata nel confrontare il comportamento a fatica dell'AISI 420 SML con quello di un tradizionale acciaio da barre per vagliare la possibilità di un eventuale sostituzione di componenti prodotti tradizionalmente in 16CrNi4 con componenti prodotti via SLM in AISI 420. Si sono quindi effettuate prove di fatica a flessione rotante sui provini di 16CrNi4.

Prove a fatica acciaio 16CrNi4

Tabella 5: risultati prove di fatica 16CrNi4

PROVINO	CARICHI	VITA [cicli]	ECCENTRICITÀ [mm]
1	Pesi [kg]: 18,8	Run out	0,09
	Tens. [MPa]: 650		
2	Pesi [kg]: 25,9	Run out	
	Tens. [MPa]: 880		
3	Pesi [kg]: 30,5	53.788	0.03
	Tens. [MPa]: 1030		
4	Pesi [kg]: 30,5	257.460	0.05
	Tens. [MPa]: 1030		
5	Pesi [kg]: 30,5	145.145	0.03
	Tens. [MPa]: 1030		
6	Pesi [kg]: 28,2	768.382	0.04
	Tens. [MPa]: 955		
7	Pesi [kg]: 28,2	277.107	0.05
	Tens. [MPa]: 955		
8	Pesi [kg]: 28,2	35.955	0.04
	Tens. [MPa]: 955		
9	Pesi [kg]: 26,35	3.167.063	0.04
	Tens. [MPa]: 895		
10	Pesi [kg]: 25,9	1.386.148	0.03
	Tens. [MPa]: 880		
11	Pesi [kg]: 25,40	111.884	0.04
	Tens. [MPa]: 865		
12	Pesi [kg]: 24,95	Run out	0.04
	Tens. [MPa]: 850		
13 ¹	Pesi [kg]: 25,40	76.748	0.06
	Tens. [MPa]: 865		
14 ²	Pesi [kg]: 24,95	7.361.676	0.03
	Tens. [MPa]: 850		

¹ Il provino 13 presentava una differenza di diametro di - 0.02 su un lato ed una riga nel punto di rottura.

² Il provino 14 presentava varie righe e si è rotto su uno dei difetti.

Curva di fatica 16CrNi4

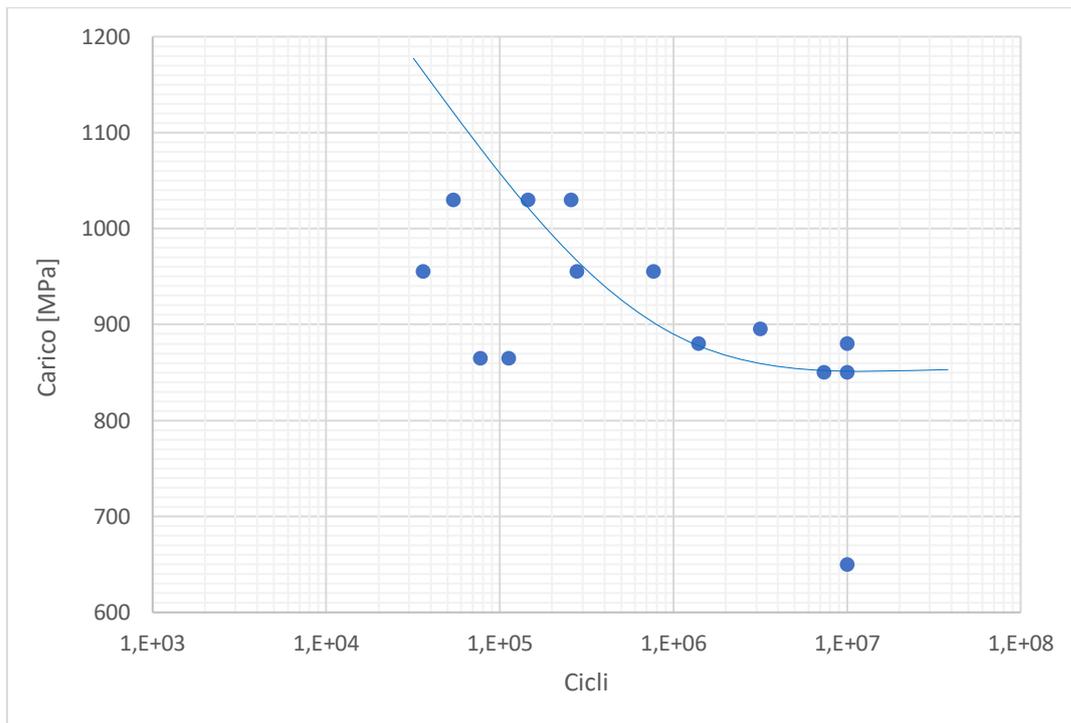


Figura 7: curva di fatica 16CrNi4

Come risulta evidente dai dati che l'acciaio tradizionale sopporta carichi a fatica molto maggiori rispetto all'acciaio SLM considerato. Il limite di fatica si mostra infatti situato attorno ai 850MPa contro i 360-400 MPa dell'AISI 420 trattato termicamente. Va notato come i provini dell'acciaio tradizionale abbiamo mostrato una minore costanza nelle caratteristiche meccaniche causa le maggiori imperfezioni presenti nei provini. Alcuni dei provini risultavano evidentemente dotati di difetti in superficie altri, hanno invece mostrato visibili difetti nelle foto allo stereoscopio.

4.4 Le superfici di rottura AISI 420

Si sono dopo ogni prova effettuate le foto con stereoscopio delle superfici di rottura per poter analizzare l'andamento della rottura stessa e verificare l'eventuale presenza di difetti evidenti nel provino.

4.4.1 AISI 420 as-built

Le superfici di rottura risultano irregolari, mostrano difetti e porosità evidenti (figura 10). In alcuni provini si può notare chiaramente una griglia sulla superficie di rottura (figura 9). Questa, la cui visibilità è dovuta evidentemente ad una scelta errata dei parametri di produzione, è identificativa del percorso seguito dal laser nella fusione della polvere. L'errata scelta dei parametri di produzione crea maggiori irregolarità e tensioni residue nella struttura del materiale

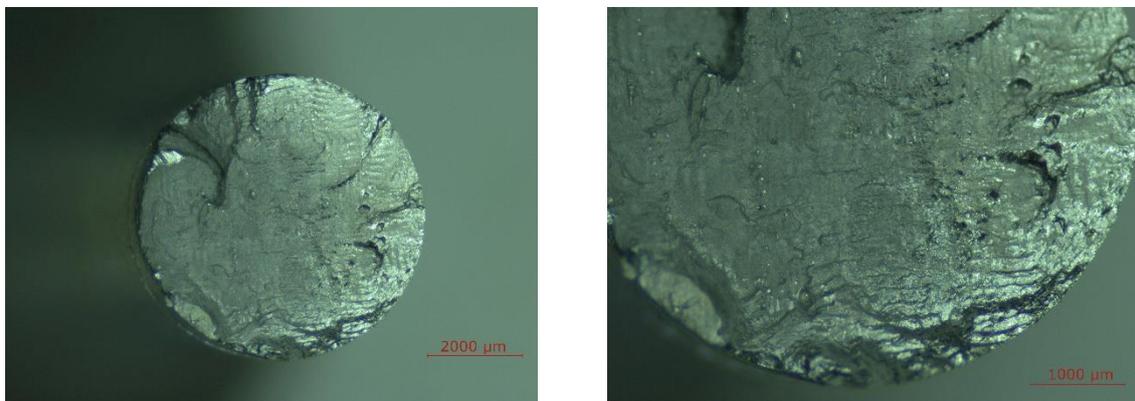


Figura 9 : superficie di rottura provino n° 1 AISI 420 AM as-built

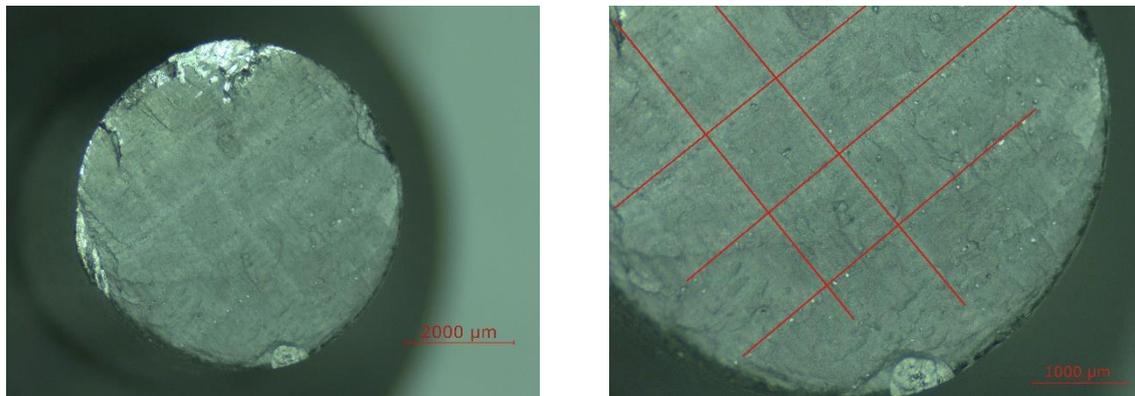


Figura 8 : superficie di rottura provino n° 3 AISI 420 AM as-built

portando quindi ad un abbassamento del limite di fatica ed una scarsa ripetibilità delle prove. A seguito del trattamento questa traccia non risulta più visibile e coerentemente si è avuto un innalzamento del limite di fatica. I migliori risultati dell'acciaio trattato sono infatti giustificati dalla diminuzione delle tensioni residue e dei difetti.

4.4.2 AISI 420 trattato termicamente

Le superfici di rottura dimostrano avere tutte un aspetto similare e non sono visibili particolari difetti o porosità. Quasi tutte le rotture si mostrano nette e ben definite come si può notare in foto. Evidenziata in rosso è l'origine della cricca che ha portato a rottura il provino (figura 10),



Figura 10 : superficie di rottura provino n° 7 AISI 420 trattato termicamente

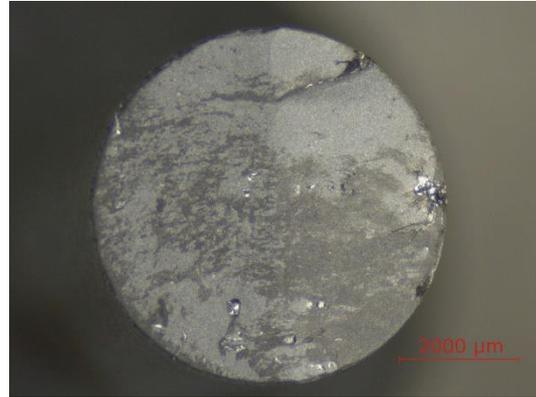


Figura 11: superficie di rottura provino n° 6 AISI 420 trattato termicamente

contornata da un tratteggio troviamo l'area di propagazione della cricca.

Il provino n° 6 presenta chiaramente numerosi difetti e porosità (figura 11) come si poteva supporre dal risultato della prova. Il provino si è rotto infatti prematuramente rispetto agli altri campioni sottoposti allo stesso carico di 450 MPa.

4.5 Le superfici di rottura 16CrNi4

Alcuni dei provini risultavano evidentemente dotati di difetti in superficie altri, hanno invece mostrato visibili difetti solo nelle foto allo stereoscopio. In figura 12 è possibile notare

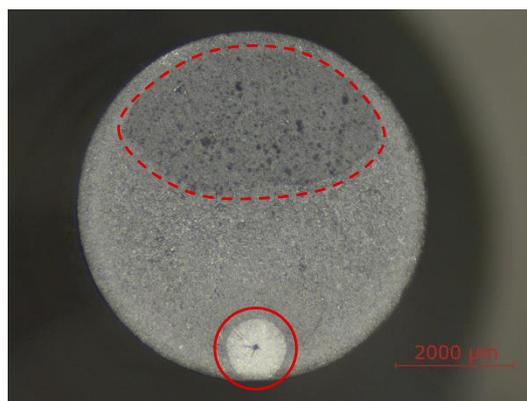
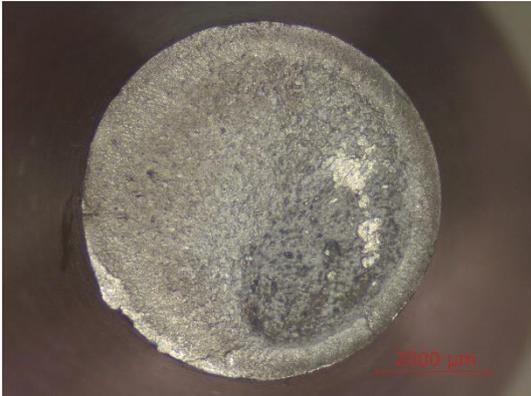


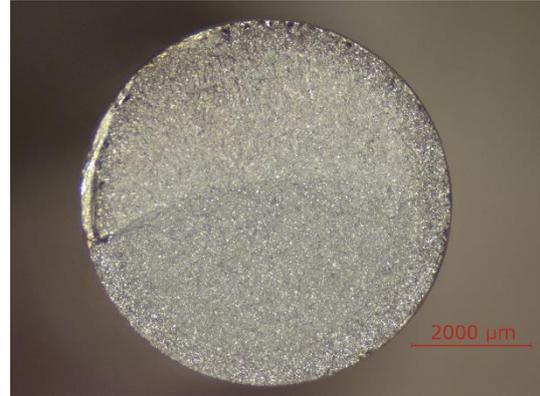
Figura 12: superficie di rottura provino n° 7 16CrNi4

chiaramente l'origine della cricca, cerchiata in rosso in basso, e la zona di rottura di schianto evidenziata con un tratteggio in alto. In questo esempio, identificativo della maggioranza dei

provini analizzati, l'innesco è sub-superficiale ed è probabilmente originato da un'inclusione non metallica.



*Figura 13 : superficie di rottura provino n°13
16CrNi4*



*Figura 14: superficie di rottura provino n°14
16CrNi4*

I provini 13 e 14 riportavano visibili difetti superficiali e variazioni di diametro, come riportato nella tabella 5. Dalle foto risulta chiara la differenza rispetto alle superfici di rottura degli altri provini. In particolare, nel provino numero 13 la conformazione della superficie di rottura mostra chiaramente come la presenza di un intaglio superficiale sia la causa alla base della rottura. La presenza di un intaglio porta infatti ad inneschi multipli.

5 PROVE DI DENSITÀ

La presenza di porosità ed imperfezioni nella struttura dei provini sono fattori condizionanti del loro comportamento meccanico, soprattutto a fatica. Si è quindi ritenuto importante studiare e confrontare i valori di densità dei provini SLM testati.

Le misure di densità sono state prima effettuate utilizzando una bilancia idrostatica, la quale sfrutta il principio di Archimede, e poi confrontate con quelle ottenute da un'analisi per via informatica delle foto di varie sezioni di alcuni dei provini.

L'analisi per via informatica è stata effettuata partendo da fotografie allo stereoscopio delle sezioni orizzontali e verticali del provino. Si è scelto, al fine di meglio valutare la densità media, di analizzare una sezione verticale della base, una orizzontale della base ed una orizzontale della sezione utile. Le fotografie sono poi state modificate per via informatica allo scopo di ottenere immagini ad alto contrasto in bianco e nero per poter far risaltare le porosità ed analizzare la densità utilizzando il programma ImageJ

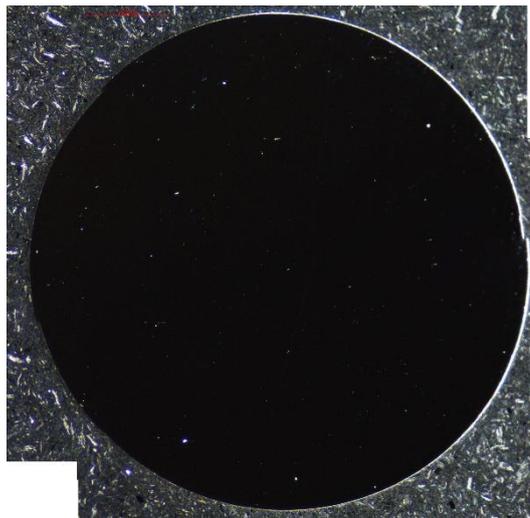


Figura 15 : immagine ad alto contrasto della sezione del provino per l'analisi di densità per via informatica

Si è valutata la densità partendo da un valore di riferimento generico per gli acciai di 7.8 kg/dm^3 . Dalle misurazioni è poi emerso risultare più corretto utilizzare il valore, di poco inferiore, 7.7 kg/dm^3 per quanto riguarda i provini trattati termicamente. A supporto di questa scelta si è trovato che l'acciaio AISI 420 tradizionale è riportato avere un valore di densità di 7.7 kg/dm^3 .

. A seguito nelle tabelle 6 e 7 i valori ottenuti dalle prove di densità con bilancia idrostatica e nelle tabelle 8 e 9 quelli relativi all'analisi per via informatica.

Provini as build

Tabella 6: risultati prove di densità con bilancia idrostatica su AISI 420 as-built

Provino		Densità [kg/dm ³]	Discostamento %
1	A	7,7470	99,3205
	B	7,7045	98,7756
2	A	7,7213	98,9910
	B	7,6830	98,5000
4	A	7,6879	98,5628
	B	7,6946	98,6487
5	A	7,7293	99,0936
	B	7,7070	98,8077
6	A	7,7212	98,9897
	B	7,6926	98,6231
8	A	7,7357	99,1756
	B	7,7632	99,5282
9	A	7,7112	98,8615
	B	7,6675	98,3013
10	A	7,7245	99,0321
	B	7,6620	98,2308
11	A	7,7181	98,9500
	B	7,6896	98,5846
13	A	7,7322	99,1308
	B	7,7234	99,0179
VALORE DI RIFERIMENTO [kg/dm ³]			7,8

Provini trattati

Tabella 7: risultati prove di densità con bilancia idrostatica su AISI 420 trattato termicamente

Provino		Densità [kg/dm ³]	Discostamento %
1	A	7,6806	99,7481
	B	7,6602	99,4831
2	A	7,6793	99,7312
	B	7,6612	99,4961
3	A	7,6697	99,6065
	B	7,6684	99,5896
4	A	7,6543	99,4065
	B		
5	A	7,6736	99,6571
	B	7,6695	99,6039
6	A	7,6682	99,5870
	B	7,6630	99,5195
7	A	7,6786	99,7221
	B	7,6591	99,4688
8	A	7,6798	99,7377
	B	7,6787	99,7234
10	A	7,6833	99,7831
	B	7,6535	99,3961
11	A	7,6833	99,7831
	B	7,6440	99,2727
12	A	7,6810	99,7532
	B	7,6620	99,5065
13	A	7,6788	99,7247
	B	7,6663	99,5623
VALORE DI RIFERIMENTO [kg/dm ³]			7,7

Rappresentazione grafica della dispersione dei valori di densità ottenuti con la bilancia

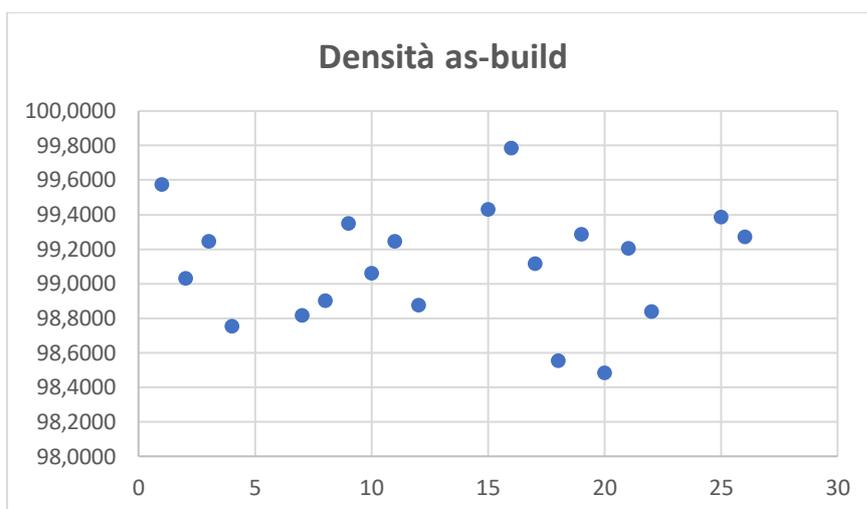


Figura 16: densità AISI 420 SLM as-built

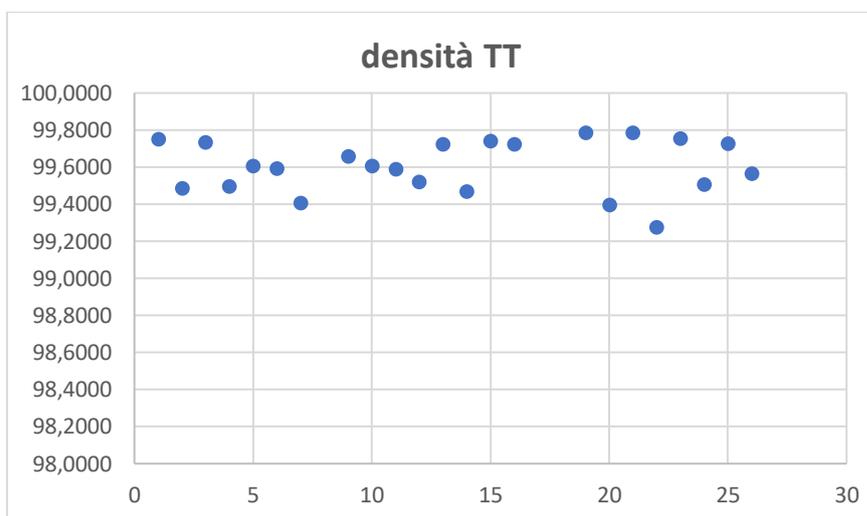


Figura 17: densità AISI 420 SLM trattato termicamente

Valori ottenuti dall'analisi al computer

Tabella 8: risultati analisi di densità al computer su AISI 420 as-built

as build (13)	porosità%	densità%
1	0,172	99,828
2	0,232	99,768
3	0,165	99,835
media	0,189667	99,81033

Tabella 9: risultati analisi di densità al computer su AISI 420 trattato termicamente

TT (10)	porosità%	densità%
1	0,08	99,92
2	0,22	99,78
3	0,106	99,894
media	0,135333	99,86467

I risultati ottenuti per via informatica risultano più ottimisti rispetto a quelli ottenuti sulla bilancia, questo, come la dispersione dei risultati delle varie prove, può essere attribuito alle rispettive imprecisioni dei due metodi di misura.

Notiamo in generale una diminuzione delle porosità percentuali ed una minor dispersione dei valori di densità nell'acciaio trattato rispetto a quello non trattato.

6 ANALISI MICROSTRUTTURALE

6.1 Procedimento

Scelto un provino a campione per ognuna delle tipologie di acciaio studiate si è passati al loro sezionamento così da ottenere: una sezione verticale della base, una orizzontale del base ed una orizzontale della sezione utile.

Le sezioni dei provini sono state inglobate nella resina attraverso apposito apparecchio. Si è quindi proceduto alla lucidatura a specchio delle superfici dei provini inglobati così da poter eliminare ogni imperfezione superficiale e poter analizzare con miglior accuratezza la microstruttura degli acciai considerati.

Al fine di differenziare ed evidenziare i differenti costituenti strutturali degli acciai si è eseguito sulle superfici speculari delle provette degli attacchi con appositi reagenti. Le superfici sono state immerse nei mezzi reattivi per un tempo sufficiente ad avere un attacco uniforme e poco profondo, avvenuto l'attacco si è proceduto al lavaggio in acqua e poi in alcool dei provini. I campioni sono poi stati asciugati con un getto d'aria per evitare di rovinare le superfici appena trattate.

Per i provini di AISI 420, trattati e non, si è utilizzato un attacco vilella (acqua regia glicerinata), la cui composizione è: acido nitrico 10 ml (concentrato d 1,4), acido cloridrico 30 ml (d 1,19), glicerina 30 ml. Questo tipo di attacco permette di evidenziare la microstruttura negli acciai resistenti alla corrosione ed al calore e nelle leghe NI-Cr, rendendolo quindi indicato per l'acciaio preso in analisi.

Per i provini di 16CrNi4 si è utilizzato un attacco a base di acido nitrico (nital), la cui composizione è: acido nitrico 4 ml (concentrato d 1,4), Alcool etilico 100 ml (al 95 %). Questo attacco è infatti indicato per evidenziare i contorni dei grani negli acciai non legati.

6.2 Micrografie

I provini a seguito dell'attacco sono stati fotografati al microscopio per poterne osservare le microstrutture.

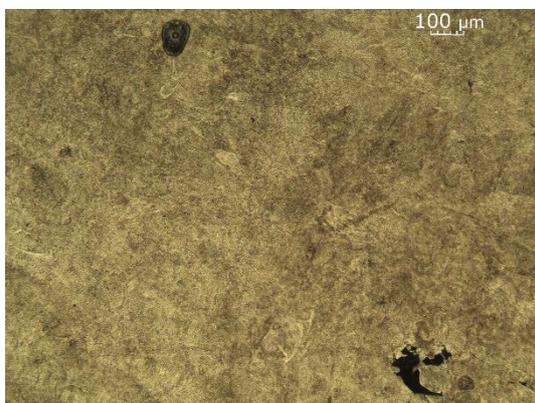


Figura 19: ingrandimento 5x sezione orizzontale AISI 420 SLM as-built

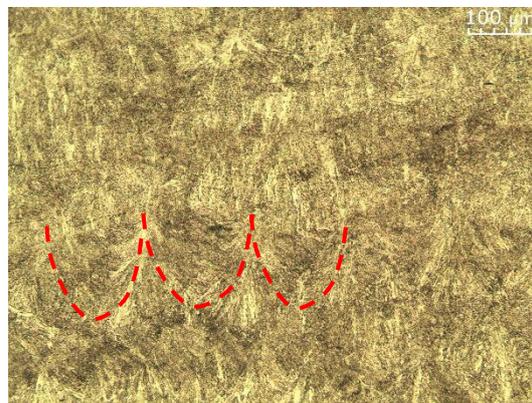


Figura 18: ingrandimento 10x sezione trasversale AISI 420 SLM as-built

Dalle immagini ottenute per l'AISI 420 non trattato notiamo chiaramente alcune porosità ed inclusioni nel materiale (figura 19). Dalla figura 18 possiamo invece vedere evidenziati con un tratteggio in rosso i pozzetti di fusione, i quali non risulteranno più visibili dopo il trattamento termico (figura 21).

Dalle micrografie dei provini trattati termicamente è possibile vedere chiaramente la particolare forma assunta dai grani post trattamento, evidenziata in rosso in figura 20.



Figura 20: ingrandimento 50x sezione orizzontale AISI 420 SLM trattato termicamente

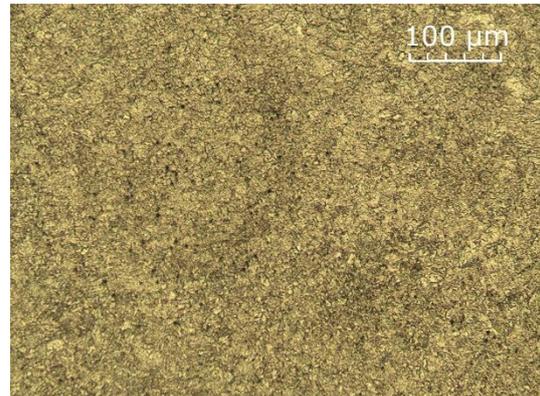


Figura 21: ingrandimento 10x sezione trasversale AISI 420 SLM trattato termicamente

A titolo di confronto osserviamo la micrografia ottenuta sul 16CrNi4 (figura 22), acciaio prodotto tradizionalmente. Risultano evidenti le differenze microstrutturali, possiamo infatti notare come i grani appaiono più grandi ed evidenti rispetto a quelli dell'acciaio SLM.

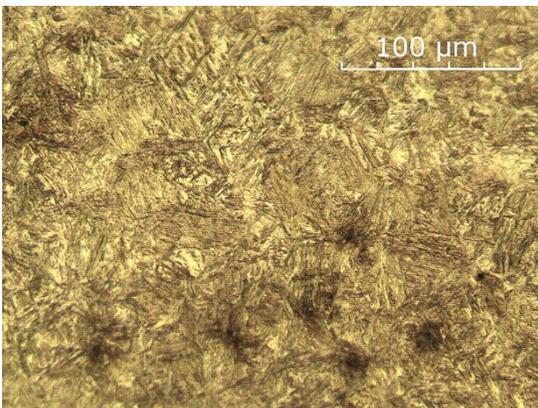


Figura 22 : ingrandimento 20x sezione 16CrNi4

7 CONCLUSIONI

Gli acciai realizzati in additive manufacturing presentano generalmente proprietà meccaniche a fatica inferiori alle loro controparti realizzate tradizionalmente. Il comportamento a fatica è fortemente influenzato dalla presenza di imperfezioni, tensioni residue nel materiale e dall'applicazione di trattamenti termici. Nel caso degli acciai SLM si è visto come anche l'orientamento di stampa e la densità energetica del SLM siano ulteriori fattori di influenza sulla vita a fatica. Nello svolgimento di questa tesi si è voluto indagare sull'effetto generato del trattamento termico sul comportamento a fatica dell'AISI 420 SLM.

Le prove effettuate collocano il suo limite di fatica tra i 360 MPa e i 400 MPa quando trattato termicamente ed a 150 MPa quando non trattato, questo ci mostra un chiaro effetto positivo del trattamento sulla vita a fatica. I trattamenti termici portano generalmente ad un infragilimento penalizzando di conseguenza il comportamento a fatica. Nel caso degli acciai SLM le tensioni residue dovute al processo produttivo sembrano avere una maggiore influenza negativa sulla vita a fatica, il loro probabile rilassamento a seguito del trattamento termico porta quindi ad un miglioramento.

Analizzando le superfici di rottura del as-built si è potuta notare la presenza di una traccia a griglia identificativa del passaggio del laser. Questo porta a pensare ad un'errata scelta dei parametri produttivi, la quale ha certamente penalizzato la vita a fatica dei campioni. Per quanto concerne le prove di densità non si rilevano particolari differenze di densità percentuale tra l'acciaio termicamente trattato e quello non trattato.

Le prove di fatica effettuate sui provini di 16CrNi4 realizzati tradizionalmente collocano il suo limite di fatica intorno ai 850 MPa, un risultato decisamente migliore rispetto a quello ottenuto dall'AISI 420.

Non è quindi possibile considerare l'AISI 420 (SLM) come un materiale sostitutivo al 16CrNi4 per quanto riguarda il comportamento a fatica. Risulta quindi consigliabile effettuare una scelta di differenti parametri produttivi o valutare l'uso di altri materiali qualora sia d'interesse la vita a fatica.

8 BIBLIOGRAFIA

- 1) ***Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting.*** (Shahriar Afkhamia, Mohammad Dabiria, S. Habib Alavib, Timo Björka, Antti Salminen) *International Journal of Fatigue* 122 (2019) 72–83
- 2) ***Effect of microstructure on the fatigue crack growth behavior of laser solid formed 300M steel***
(Fenggang Liu, Xin Lin, HaiouYang, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Fencheng Liu, Weidong Huang) *Materials Science and Engineering: A*, volume 695 (2017) 258-264
- 3) ***Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel.*** (Yadollahi A, Shamsaei N, Thompson SM, Elwany A, Bian L.) *International Journal of Fatigue* 94 (2017) 218–35
- 4) ***Additive manufacturing of metals*** (Dirk Herzog, Vanessa Seyda, Eric Wycisk, Claus Emmelmann) *Acta Materialia* 117 (2016) 371-392
- 5) ***Dynamical fatigue behavior of additive manufactured products for a fundamental life cycle approach.*** (Uhlmann E, Fleck C, Gerlitzky G, Faltin F.) *Procedia CIRP*, Kamakura. (2017)
- 6) ***On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting.*** (Riemer A, Leuders S, Thöne M, Richard HA, Tröster T, Niendorf T.) *Eng Fract Mech* 120 (2014) 15–25
- 7) ***Crack initiation mechanisms and fatigue lifetime of AISI 420 steel under constant and variable amplitude loading.*** (Zettl, Bernhard) (2007)