



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA MECCANICA

Analisi del comportamento a creep di una lega di Titanio

Analysis of the creep behaviour of a Titanium alloy

Relatore: Chiar.mo
Prof. Spigarelli Stefano

Tesi di Laurea di:
Franchi Davide

Correlatore: Chiar.ma
Prof.ssa Paoletti Chiara

A.A. 2020 / 2021



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA MECCANICA

Analisi del comportamento a creep di una lega di Titanio

Analysis of the creep behaviour of a Titanium alloy

Relatore: Chiar.mo
Prof. Spigarelli Stefano

Tesi di Laurea di:
Franchi Davide

Correlatore: Chiar.ma
Prof.ssa Paoletti Chiara

A.A. 2020 / 2021

Sommario

INTRODUZIONE	6
1. INTRODUZIONE AL MATERIALE	7
1.1 PROCESSO DI KROLL	8
2. LA MICROSTRUTTURA	10
3. ADDITIVE MANUFACTURING	14
3.1 Storia dell'Additive Manufacturing	16
3.2 LE TECNOLOGIE ADDITIVE	17
3.3 IL CICLO DELL'ADDITIVE MANUFACTURING	19
3.4 Powder bed fusion cenni storici	20
3.5 IL PROCESSO DI STAMPA	21
3.6. AMBIENTE E MANIPOLAZIONE DELLE POLVERI	23
3.6.1 Controllo della temperatura	23
3.6.2 Materiali	24
3.6.3 Considerazioni sull'utilizzo	26
3.6.4 Meccanica	26
3.6.5 Termodinamica	27
3.6.6 Metallurgia	28
3.6.7 Geometria e dettagli	29
3.6.8. Considerazioni economiche	29
3.7. VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'AM	30
4. CREEP	32
4.1. I TRATTAMENTI PER RIDURRE LA DEFORMAZIONE DA CREEP	34
4.2. PROVA DI VALUTAZIONE DEL CREEP A CALDO PER UN MATERIALE METALLICO	34
5. ATTIVITÀ SPERIMENTALE	35
5.1. PROCEDURE	35
5.1.1. FABBRICAZIONE DEI PROVINI	35
5.2. PROVA DI CREEP	35
5.3. PROVA DI ROCKWELL	36
5.3.1. Scale di Rockwell	37
6. RISULTATI	40
6.1. PROVE DI DUREZZA (SCALA C)	40
6.2. PROVA DI CREEP	42
7. CONCLUSIONI	49
8. BIBLIOGRAFIA	50

Introduzione

Questo elaborato ha lo scopo di indagare la configurazione microstrutturale e il comportamento meccanico di provini di Ti-6Al-4V, realizzati tramite Additive Manufacturing in particolare tramite il processo di Powder Bed Fusion (PBF), e sottoposti a trattamenti termici prima del test di creep. Lo studio dell'Additive Manufacturing è molto in voga al momento visto anche l'interesse e le opportunità garantite da esso. Viste le ottime proprietà meccaniche delle leghe di titanio, esso viene usato in molteplici campi, dall'altro lato però esso presenta notevoli problematiche quali:

- Alte temperature di taglio all'estremità dell'utensile;
- Elevata reattività chimica con l'utensile;
- Basso modulo elastico.

che potrebbero portare ad avere problemi significativi con la lavorabilità del materiale.

Nonostante ciò, grazie all'evoluzione delle tecnologie e delle metodologie di lavorazione come l'Additive Manufacturing il titanio ha trovato largo impiego in molti settori strutturali quali i settori aerospaziale e navale e in campo medico nella realizzazione di protesi; questo poiché nonostante i problemi di lavorabilità del materiale, riesce a ricoprire impieghi molto importanti e a garantire una grande sicurezza.

1. Introduzione al materiale

Il Titanio fu scoperto nel 1791 dal mineralista William Gregor, il quale ha identificato la sua presenza nell'Ilmenite (minerale comune in rocce ignee o rocce metamorfiche) [1] ma entrò a far parte dell'industria solo dopo la Seconda Guerra Mondiale. Nel 1795, il chimico tedesco Heinrich Klaproth [2] lo isolò dai minerali di rutilio e lo battezzò con il nome dei "titani" della mitologia greca. Il titanio metallico puro (99,9%) venne preparato per la prima volta nel 1910 dall'ingegnere neozelandese Matthew Albert Hunter tramite riscaldamento di $TiCl_4$ con del sodio a 700-800°C. Il Titanio per lungo tempo fu usato solo all'interno dei laboratori a causa dell'alta temperatura di fusione (1668°C) insieme ad una elevata reattività con l'ossigeno che rendevano i processi di lavorazione molto difficili anche considerando le alte temperature di taglio che usuravano frequentemente gli utensili utilizzati richiedendone la sostituzione.

Solo nel 1946 grazie all'ingegnere William Justin Kroll il titanio metallico iniziò ad essere usato all'infuori dei laboratori, egli dimostrò che il titanio poteva essere prodotto commercialmente tramite riduzione del tetracloruro di titanio con il magnesio, questo processo prende il nome di "Processo di Kroll".

Nonostante questo, il titanio non prese mai troppo piede fino a quando non si sono presentate nuove alternative per la lavorazione del materiale, come la metallurgia delle polveri o i processi additivi; con lo sviluppo di nuove tecniche produttive,

l'uso del Titanio, e delle sue leghe, si è diffuso in svariati settori.

Negli ultimi anni attraverso lo studio del materiale si è notato come il Ti-6Al-4V fosse la lega che riuscisse a combinare le migliori performance, riducendo i problemi di lavorabilità tipici delle leghe di Titanio; grazie a queste caratteristiche esso ha avuto un grande impiego commerciale rispetto alle altre leghe.

Possiamo ritrovare diversi vantaggi quali la trattabilità al calore, oltre a ciò, abbiamo un'eccellente combinazione di resistenza alla corrosione, saldatura e fabbricazione, stessa rigidità e proprietà termiche del titanio puro ad eccezione della conducibilità termica che è inferiore di circa il 60%.

Densità	4,42 g/cm ³	0.16 lb/in ³
Punto di Fusione	1650°C	3000°F
Coefficiente di Espansione	9,0 μm/m °C (20 – 100°C)	5,0 x 10 ⁻⁶ in/in °F (70 – 212°F)
Modulo di Rigidità	40 – 44 kN/mm ²	5800 – 6380 ksi
Modulo di Elasticità	105 – 120 kN/mm ²	15230 – 17405 ksi

Tab. 1: Principali caratteristiche meccaniche del Ti.

1.1 Processo di Kroll

Il processo di Kroll consiste nel prendere il minerale raffinato, nel nostro caso rutilio o ilmenite che viene ridotto in un reattore a 1000 °C. La miscela, in seguito, viene trattata con cloro gassoso arrivando ad ottenere tetracloruro di titanio;

questo viene inviato in un reattore dove viene ridotto con magnesio o sodio liquidi a 800 - 850 °C in atmosfera di Argon:



Nel processo vengono a crearsi delle complicazioni dalla riduzione parziale del titanio che forma TiCl_2 e TiCl_3

Tramite metodi elettrolitici è possibile riciclare il cloruro di magnesio in magnesio. Il titanio ricavato lo si trova sottoforma di spugna porosa che viene purificata tramite distillazione sottovuoto e fusione in un forno elettrico ad arco. Spesso per garantire l'uniformità del prodotto, rimuovere materiali nocivi e inclusioni i lingotti ottenuti vengono rifusi sempre sottovuoto.

Questo processo risulta molto costoso, quasi sei volte quello dell'acciaio inossidabile.

2. La microstruttura

In generale ogni materiale è caratterizzato da una propria struttura cristallina e da una microstruttura determinata dalle lavorazioni effettuate. Il titanio presenta più di una forma cristallina:

1. Fase α ; struttura cristallina esagonale compatta (hcp), stabile ($<883^{\circ}\text{C}$) Fig. 1 (a);
2. fase β ; struttura cubica a corpo centrato (bcc), che troviamo alle alte temperature ($>882^{\circ}\text{C}$) Fig.1 (b).

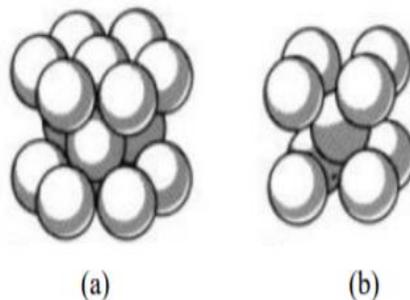


Fig. 1: Strutture cristalline elementari della fase α (a) e β (b)

La temperatura di transizione da fase α a fase β è detta β -transus ed è circa pari a 883°C ; essa è fortemente influenzata dalla presenza di stabilizzanti (Fig. 2) e la conoscenza di essa è molto importante poiché volendo seguire trattamenti termici sul materiale darà informazione sul comportamento della lega a livello microstrutturale. In base a come agiscono sul diagramma di stato gli alliganti del titanio vengono divisi in due categorie: α -stabilizzanti e β -stabilizzanti.

- α -stabilizzanti come alluminio, ossigeno o azoto. Essi permettono di espandere la fase α a temperature più alte, aumentano la resistenza al creep e migliorano la saldabilità.

- β -stabilizzanti come molibdeno, vanadio, manganese o cromo. Stabilizzano la fase β a temperature più basse; aumentano la densità del materiale, migliorano la lavorabilità e riducendo la deformabilità aumentano la resistenza meccanica.

In funzione della fase stabile a temperatura ambiente, le leghe di titanio si suddividono in: α , α - β e β .

- Le leghe α , tramite la struttura esagonale del reticolo cristallino hanno una buona resistenza alla deformazione plastica e resistenza al creep, bassa duttilità, proprietà meccaniche e fisiche anisotrope.

Sono leghe che non subiscono dei grandi cambiamenti dopo essere state trattate termicamente, motivo principale per cui presentano un'ottima saldabilità

- Le leghe α - β a temperatura ambiente; presentano entrambe le fasi stabili a temperatura ambiente. Grazie alla presenza della fase β a seguito di trattamenti di solubilizzazione e a seguire da invecchiamento, riusciamo ad ottenere una significativa parte di martensite e alfa aciculare.

- Le leghe β sono caratterizzate da alta temprabilità, ottima forgiabilità e possono essere indurite fino a raggiungere alti livelli di resistenza meccanica. Rispetto alle leghe α - β , le leghe β presentano maggiore densità, resistenza al creep e duttilità più bassa. Nonostante la bassa duttilità, è possibile ottenere una resistenza dopo invecchiamento maggiore di una lega α - β a parità di resistenza a snervamento.

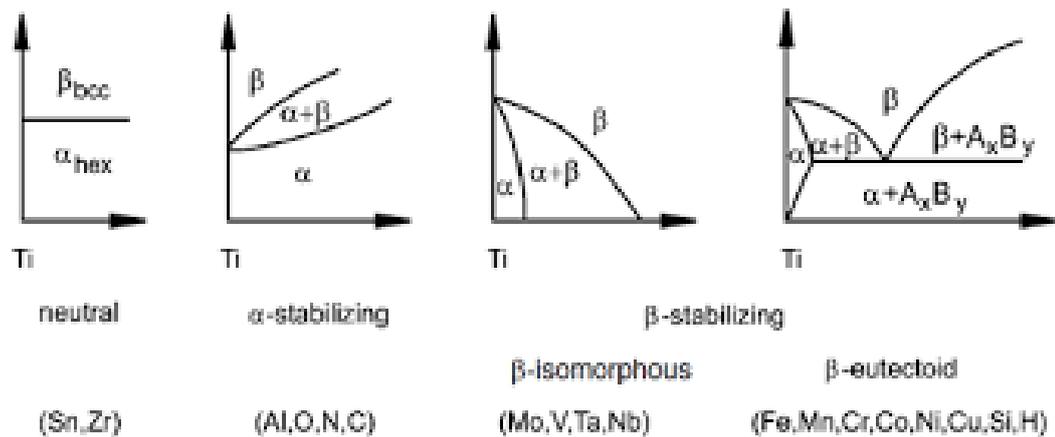


Fig. 2: Diagramma di stato degli effetti degli elementi stabilizzanti su una lega [3]

Possiamo notare variazioni nella morfologia della fase α e della fase β dipendenti dai trattamenti termici del materiale, dalla composizione chimica e dalla velocità di raffreddamento. Possono formarsi due diverse strutture: equiassiche o lamellare. Le strutture equiassiche conferiscono le seguenti caratteristiche

1. Alta duttilità e formabilità;
2. Incremento della resistenza alla corrosione;
3. Incremento della resistenza meccanica;
4. Migliori proprietà di fatica a bassi cicli.

Le strutture lamellari conferiscono:

1. Migliori proprietà al creep;
2. Incremento della tenacità;
3. Abbassamento della resistenza meccanica;
4. Migliore resistenza alla corrosione;

Gli alliganti che si andranno ad analizzare in questo lavoro di tesi sono l'Alluminio e il Vanadio. L'alluminio va a stabilizzare la fase α innalzando la temperatura di β -transus; il vanadio invece va ad abbassare la temperatura di trasformazione $\alpha+\beta$, rendendo la fase β stabile alle basse temperature.

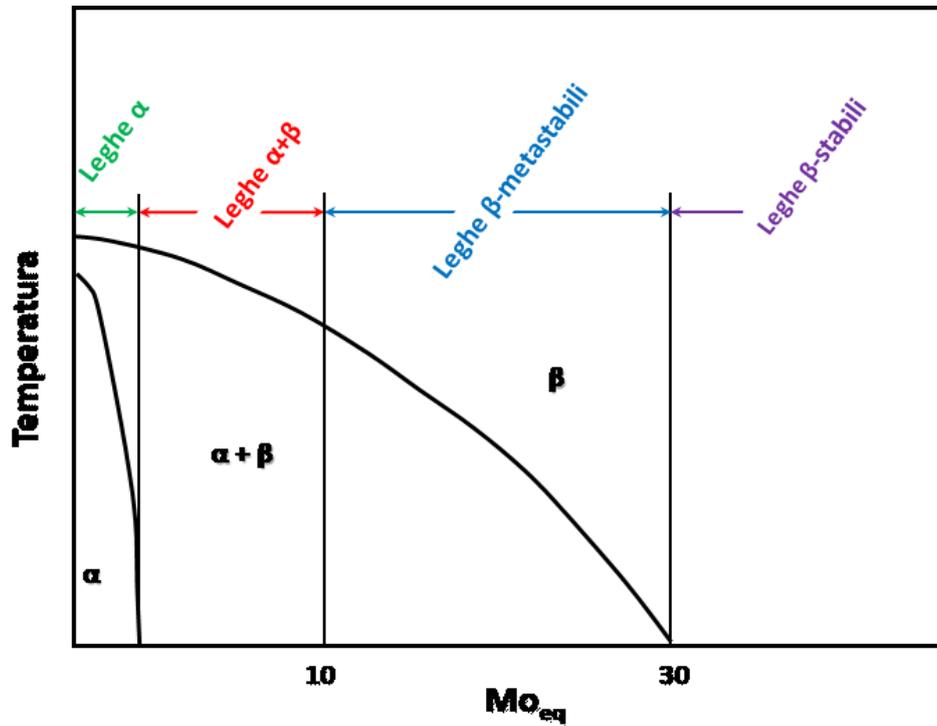


Fig. 3: Struttura di diverse leghe di titanio in funzione del tenore di elementi β -stabilizzanti, espresso come Molibdeno equivalente.

3. Additive manufacturing

Quando si parla di additive manufacturing si intende un metodo di produzione che, attraverso varie tecniche permette di ottenere prodotti dall' "addizione" di vari strati di materiale, un cambio di rotta rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali, le quali partendo dal "pieno" e mediante processi come fresatura e tornitura si arrivava al prodotto finale.

L'AM è una novità per la produzione manifatturiera soprattutto per la grande combinazione tra computer e impianti produttivi.

Il processo parte alle base da un modello CAD 3D gestito da un software che divide il modello in più strati e che guiderà la stampante per la realizzazione del pezzo finale.

Il processo in sé non è una novità assoluta bensì con sempre più tecnologie a disposizione si è riusciti ad abbattere i costi di produzione delle macchine così da rendere possibile un'effettiva catena di produzione attraverso questi strumenti.

Vari processi sono stati introdotti per la commercializzazione dei prodotti nel mercato da parte delle industrie. Ci sono due modi per classificarli, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ma possono anche essere classificati anche in base allo stato dei materiali di partenza (Fig. 4 e Fig. 5).

Process Type	Brief description	Related Technologies	Materials
Powder Bed Fusion	Thermal energy selectively fuses regions of a powder bed	Electron Beam Melting (EBM), Selective Laser Sintering (SLS), Selective heat sintering (SHS), and Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Metals, Polymers
Directed Energy Deposition	Focused thermal energy is used to fuse materials by melting as the material is being deposited	Laser Metal Deposition (LMD)	Metals
Material Extrusion	Material is selectively dispensed through a nozzle or orifice	Fused Deposition Melting (FDM)	Various: typically polymer based
Vat Photopolymerization	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated or UV polymerization	Stereolithography (SLA), digital light processing (DLP)	Photopolymers
Binder Jetting	A liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials, and then product is baked in an oven for final curing.	Powder bed and inkjet head (PBH), plaster-based 3D printing (PP)	Various: Polymers, sand, metals, other
Material Jetting	Droplets of build material are selectively deposited	Multijet Modeling (MJM)	Polymers, waxes
Sheet Lamination	Sheets of material are bonded to form an object	Laminated object manufacturing (LOM), ultrasonic consolidation (UC)	Paper, Metals

Fig. 4: Tabella classificazione per tipo di AM utilizzato [4]

State of Starting Material	Process	Material Preparation	Layer Creation Technique	Phase Change	Typical Materials	Applications
Liquid	SLA	Liquid Resin in a Vat	Light Scanning/Light Projection	Photo-polymerization	UV Curable Resin, Ceramic Suspension	Prototypes, Casting Patterns, Soft Tooling
	MJM	Liquid Polymer in Jet	Ink-Jet Printing	Cooling&Photo-polymerization		Prototypes, Casting Patterns,
	RFP	Liquid Droplet in Nozzle	On Demand Droplet Deposition	Solidification by Freezing	Water	Prototypes, Casting Patterns,
Element/Paste	FDM	Filament Melted in Nozzle	Continuous Extrusion and Deposition	Solidification by Cooling	Thermoplastic, Waxes	Prototypes, Casting Patterns,
	Robo-casting	Paste in Nozzle	Continuous Extrusion	-	Ceramic Paste	Functional Parts
	FEF	Paste in Nozzle	Continuous Extrusion	Solidification by Freezing	Ceramic Paste	Functional Parts

Fig 5: Tabella classificazione per materiale di partenza [4]

3.1 Storia dell'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing nacque più di 30 anni fa come metodo per creare modelli o prototipi in modo costoso ma molto immediato.

Il primo brevetto risale al 1984 un anno dopo che Chuck Hull riesce a creare nel 1983 il primo oggetto stampato in 3D "inventando" la Stereolitografia (SLA) processo sul quale si baserà la società che aprirà nel 1986 "3D systems".



Fig. 6: Il primo pezzo prodotto da Chuck Hull tramite SLA [5]

La ricerca fece un grande passo avanti grazie allo sviluppo della prototipazione rapida, garantita da questo processo tramite la lavorazione di materiali plastici che sfrutta la fotopolimerizzazione di una resina tramite raggi UV, i prototipi che prima richiedevano macchine specifiche per la produzione, venivano prodotti molto più velocemente così da poter essere ottimizzati e ottimizzare i lavorati.

Negli anni successivi, ci fu molta ricerca su queste nuove tecnologie così da migliorare sempre più i vari processi di lavorazione.

Tra il 1990 e il 2000 questo processo viene implementato sulla produzione di anime per fonderia (Rapid Casting) e gli inserti per stampi (Rapid Tooling).

Dopo il 2000 si ha un forte sviluppo della tecnologia con l'introduzione di nuovi materiali lavorabili.

Solo dopo il 2007 sono state introdotte macchine capaci di lavorare in atmosfera controllata, usando gas inerti come Ar o He in modo da evitare l'ossidazione della lega metallica durante la fusione e la solidificazione.

3.2 Le tecnologie additive

Negli ultimi anni il motore di sviluppo delle tecnologie additive è stata la possibilità di una personalizzazione molto ampia e la disponibilità di una vasta gamma di materiali.

La classificazione dei processi additivi può essere fatta:

- in funzione del materiale di partenza come metallo, polimeri o ceramiche;
- in base allo stato del materiale di partenza: polvere, solido e liquido;
- in base al tipo di AM utilizzato.

Gli utilizzi sono molteplici e differiscono in base al tipo di lavorazione.

Ad oggi queste lavorazioni vengono utilizzate per la prototipazione ma con Industria 4.0 molte fabbriche e lavorazioni industriali stanno evolvendo le proprie strutture per introdurre l'AM in ogni ciclo di lavorazione.

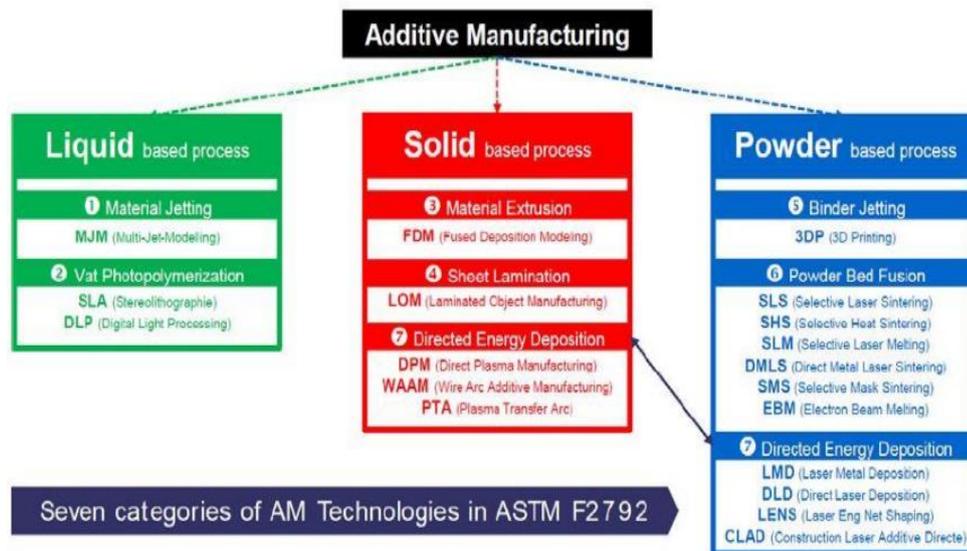


Fig. 7: Tipi di AM per materiale utilizzato. [6]

Le tecniche a polveri, ad oggi sono le più utilizzate per costi ed efficacia delle lavorazioni.

Esistono due tipi di lavorazioni tramite polveri metalliche: PBF (Powder Bed Fusion), LDT (Laser Deposition Technology). Le prime, sfruttando una sorgente laser (SLM) o un fascio di elettroni (EBM), fondono man mano strati differenti di materiali fino ad ottenere il prodotto finito. La deposizione diretta, invece, fonde la polvere depositata tramite un ugello. Questa tecnologia oltre ad essere utilizzata per creare nuovi

componenti, risulta adatta per la riparazione di componenti rotti o con cricche.

I due processi presentano delle profonde differenze sia a livello microstrutturale che di difetti del componente finale. Inoltre, con i processi di PBF si ha la possibilità di realizzare geometrie molto complesse ma di dimensioni limitate a causa dei limiti imposti dalle macchine per la realizzazione.

Con la deposizione diretta invece è possibile costruire componenti di grandi dimensioni ma di limitata complessità geometrica. Inoltre, il diverso processo di fusione e di velocità di raffreddamento, influenzano la microstruttura e i difetti del componente finale.

3.3 Il ciclo dell'additive manufacturing

Per la produzione di un oggetto tramite additive manufacturing c'è un iter da seguire:

1. Tramite software deve essere realizzato un modello CAD del disegno del componente da realizzare tramite software;
2. Tramite un software andiamo a convertire il modello CAD in un modello STL. Va eseguita un'operazione di "slicing" che va a sezionare il pezzo con piani paralleli fra loro e normali all'asse "z" della macchina, questa operazione è necessaria poiché la macchina ha bisogno di conoscere la proiezione ortogonale di tutte le sezioni del componente;
3. Andiamo ad analizzare come si comporta il materiale in fase di crescita per evitare la presenza di tensioni che superano la tensione di rottura e che porterebbero a cricche;

4. Andiamo a decidere il SET UP della macchina per trovare i migliori parametri per la realizzazione del prodotto;
5. Andiamo a rimuovere il pezzo finito, e se necessario andiamo a fare dei trattamenti per ridurre le tensioni residue e migliorare il prodotto finito
6. Infine, avviene il lavoro di POST PROCESSING dove andiamo a migliorare la finitura superficiale del prodotto.

A livello microstrutturale, l'AM permette di creare strutture con grani molto fini, che potrebbero portare a poca duttilità. Per questo motivo, in alcuni casi, dovranno essere effettuati dei trattamenti termici per ottenere le proprietà meccaniche richieste.

Infine, verranno eseguiti trattamenti estetici come pitture e lucidature che apporteranno anche a migliorie per quanto riguarda l'utilizzo del pezzo.

3.4 Powder bed fusion cenni storici

Il PBF fu inventato oltre 20 anni fa da un'azienda tedesca EOS e fu il primo processo AM con l'utilizzo di metallo. Ai tempi veniva chiamato DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Da allora molte aziende hanno iniziato a creare delle proprie stampanti con il proprio nome SLM/DMLM/EBM, questo spinse l'ASTM (American Society for Testing and Materials) a creare una macrocategoria che li raggruppasse tutti, ovvero il Powder Bed Fusion.

La definizione di PBF data dall'ASTM è: "Il materiale in polvere viene solidificato selettivamente fondendolo insieme utilizzando una fonte di calore come un laser o un fascio di elettroni."

3.5 Il processo di stampa

Nel PBF vengono utilizzate diverse fonti di calore che variano in potenza e risoluzione. La potenza dei laser utilizzati è di 200-500watt mentre i fasci di elettroni sono di 1000-6000watt. Il processo E-PBF ad alta potenza può fondere il metallo più velocemente ma a risoluzioni inferiori. La risoluzione del PBF è una funzione diretta del diametro del raggio, spessore dello strato e delle particelle più grandi presenti nella polvere metallica. L-PBF ha una dimensione dello spot del fascio di 20-100 micron mentre E-PBF è tipicamente di 100-200micron. Lo spessore dello strato è solitamente in questo stesso intervallo e sia lo spessore dello strato che la dimensione del punto sono approssimativamente proporzionali alla dimensione delle particelle più grandi.

Questi parametri di risoluzione determinano le dimensioni minime delle caratteristiche stampate e la rugosità superficiale L-PBF Ra = 5-10 micron, E-PBF Ra = 20-25 micron

La velocità è una caratteristica fondamentale per stabilire i costi di produzione e l'efficienza di un processo AM. I sistemi PBF sono lenti, poiché la loro velocità di stampa è limitata dalla fase di ricopertura e dalla velocità alla quale lo strato di polvere può essere fuso dall'alto verso il basso. Se viene applicato troppo calore, l'esterno brucerà prima che l'interno sia cotto. Nel PBF, se la densità di energia del raggio è troppo alta la polvere viene vaporizzata invece che fusa. I sistemi L-

PBF stampano la maggior parte dei materiali a velocità di 10-50cc/h, mentre E-PBF stampa a 50-90cc/h (altamente dipendente dal materiale).

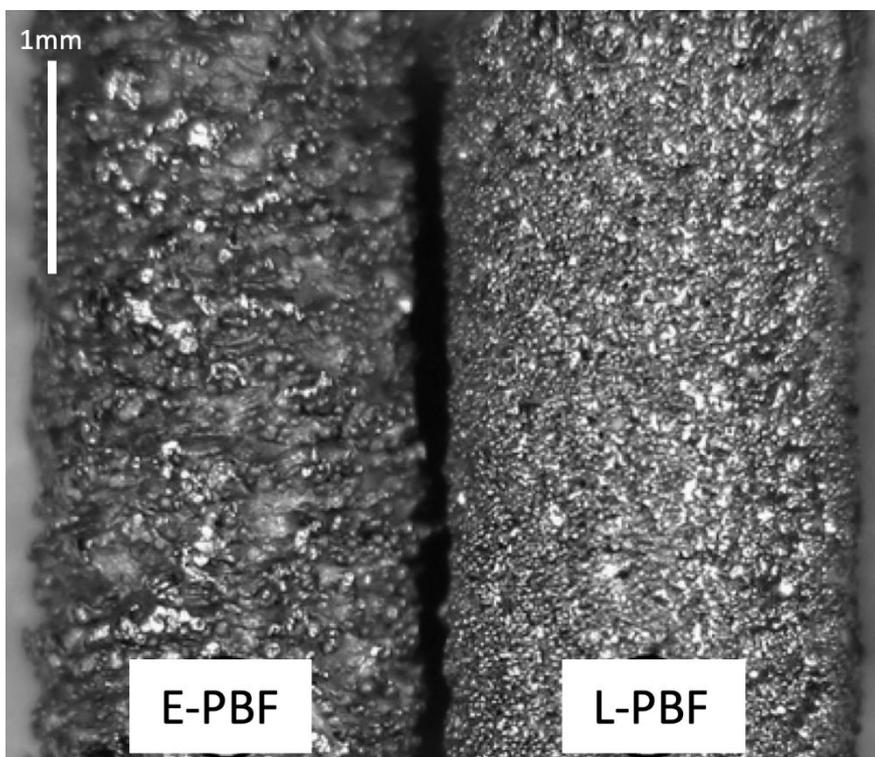


Fig. 8: Differenza di prodotto finito tra E-PBF e L-PBF. [7]

Le recenti stampanti L-PBF cercano di aumentare la velocità di stampa utilizzando più laser (fino a 4). Ciò può ridurre in modo incrementale il tempo per stampare ogni strato, ma non accelera la lenta fase di ricopertura. L'aggiunta di laser aumenta sia il costo di mantenimento che di produzione della macchina, e la complessità della macchina stessa. [8] [9]

3.6. Ambiente e manipolazione delle polveri

Nel PBF le polveri hanno un'importanza particolare per quanto riguardata la qualità e la sicurezza del prodotto stampato.

Vista la loro elevata area superficiale le polveri metalliche sono sensibili all'ambiente di lavorazione.

Per questo vanno maneggiate, conservate e stampate con attenzione e conoscenza. La stampabilità e le proprietà finali possono essere influenzate dalla permeazione di umidità, ossigeno e altri elementi presenti nell'aria, creando elevati rischi. L'infiammabilità e il potenziale di inalazione costituiscono un altro grande problema circa il loro utilizzo. Per gestire questi rischi, i produttori devono costruire e mantenere costose infrastrutture, attrezzature di sicurezza e procedure accurate. A causa degli elevati carichi termici i sistemi PBF devono essere utilizzati in ambiente con gas inerte o sottovuoto così da prevenire altri rischi.

3.6.1 Controllo della temperatura

Il controllo della temperatura è un altro aspetto fondamentale delle lavorazioni PBF. Per evitare la distorsione e le tensioni residue (causate dalla differenza di temperatura nei diversi punti della nostra struttura) si ha bisogno di uno stretto controllo da parte dell'operatore. Un modo per controllare la temperatura è riscaldare la camera di costruzione:

- i sistemi L-PBF utilizzano il riscaldamento resistivo per riscaldare il letto di stampa;

- i sistemi E-PBF riscaldano la struttura scansionando completamente ogni strato con l'e-beam prima della stampa.

L-PBF funziona a temperature del letto di 200-500°C; E-PBF tra i 500 e i 1000°C. La temperatura specifica dipende dal materiale da stampare. In L-PBF, il metallo fuso si raffredda rapidamente, producendo grani di piccole dimensioni e materiale più duro e fragile, ciò aumenta il potenziale di distorsione della parte e le tensioni residue.

Nei sistemi PBF visti gli elevati carichi termici e i lunghi tempi di stampa si ha la necessità di un raffreddamento attivo per mantenere sotto controllo le temperature del sistema.

Il surriscaldamento del laser, del raggio elettronico o dei sistemi di controllo potrebbe insorgere senza la mancanza di un monitoraggio continuo mettendo a rischio tutto il processo.

3.6.2 Materiali



Fig. 9: Esempio di polvere metallica utilizzata nel PBF. [9]

Nei processi di PBF sono richiesti dei requisiti specifici alle polveri metalliche, quindi, la quantità utilizzabile è molto limitata. I sistemi laser e E-beam utilizzano entrambi polveri fini. La dimensione delle particelle richiesta per L-PBF varia tra 15-60 micron, il che fa aumentare i costi del materiale. E-PBF utilizza particelle più grandi, tra i 45 e i 105 micron. Queste polveri di particelle più grandi sono anche costose ma molto più economiche di quelle usate nel L-PBF. Le polveri metalliche utilizzate sono prodotte a filo, quindi hanno un costo molto elevato.

	L-PBF	E-PBF
Titanium (Ti6Al4V, grades 2, 5)	✓	✓
Titanium Aluminide		✓
Cobalt Chrome (CoCr, CoCrMo, CoCrW)	✓	✓
Tool Steel (Maraging)	✓	
Stainless Steel (17-4, 15-5, 316L)	✓	
Inconel (625, 718, HX)	✓	✓
Aluminum (AlSi10Mg casting grade)	✓	
Copper (CuSn10, Bronze)	✓	✓
Tungsten	✓	
Precious Metals (Gold, Silver, Platinum)	✓	

Fig. 10: Differenza di materiali utilizzabili tra L-PBF e E-PBF.

[9]

Nonostante le richieste specifiche nei confronti dei metalli da parte del PBF la scelta è abbastanza ampia e in via di sviluppo, sempre più materiali vengono testati per la compatibilità per nuovi utilizzi. [8] [9]

3.6.3 Considerazioni sull'utilizzo

Uno dei maggiori vantaggi del PBF è la costruzione di strutture complesse e un prodotto finito con una finitura migliore rispetto ai processi tradizionali. Quest'ottimizzazione avviene anche attraverso minuziosi controlli e studio, non è sufficiente conoscere il processo per saper lavorare con il PBF.

Le regole di costruzione sono racchiuse in 3 elementi chiave:

1. Meccanica: controllo e spostamenti di materia prima, energia e l'oggetto in sé.
2. Termodinamica: fondamentale il controllo del flusso di calore in entrata e in dispersione.
3. Metallurgia: La relazione tra il processo di stampa, la chimica e la struttura cristallina del metallo che produce.

3.6.4 Meccanica

Uno dei principali vincoli di progettazione meccanica di PBF deriva dal processo di ricoprimento.

La ricopertura potrebbe impartire forze significative che potrebbero danneggiare le parti e causare il fallimento di una costruzione. Questo è indicato come "urto di ricopertura" ed è una considerazione importante nell'orientamento della parte e nella progettazione dei supporti.

Un altro elemento di progettazione sono le strutture di supporto necessarie per costruire qualsiasi superficie maggiore di 45 gradi rispetto alla verticale. I supporti forniscono punti di inizio per fare crescere superfici a sbalzo e

hanno anche vantaggi termodinamici quali la dissipazione del calore. [8] [9]

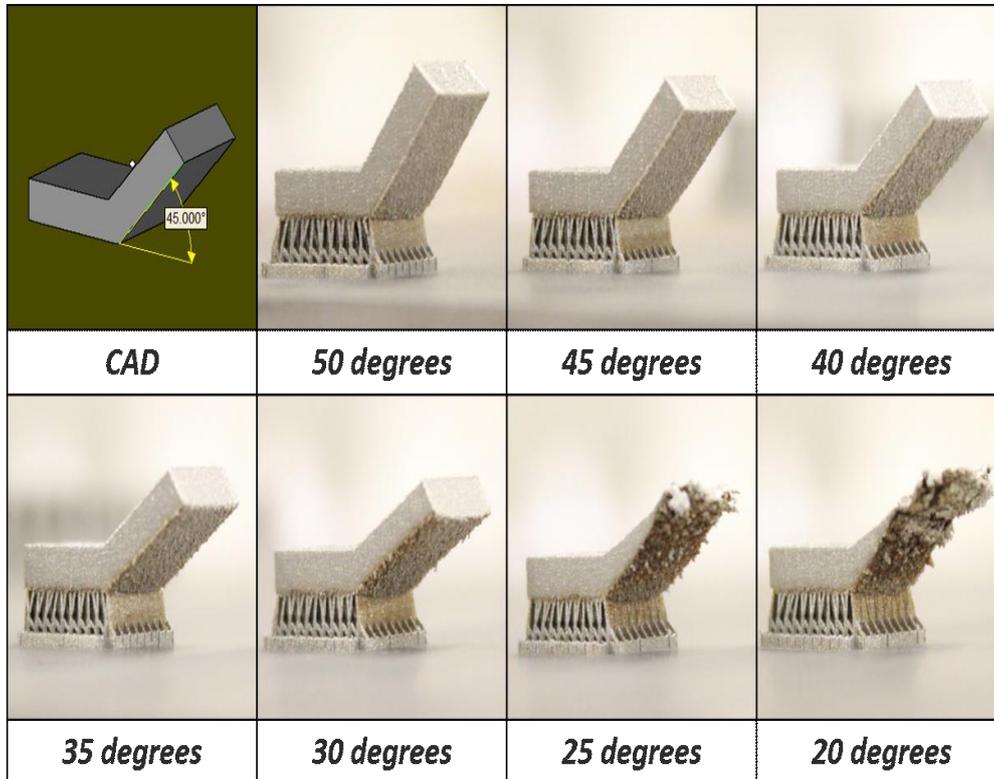


Fig. 10: Differenze di angolazione ed effetti di quest'ultima. [10]

3.6.5 Termodinamica

Durante il processo di PBF vengono applicati carichi termici molto importanti e irregolari che provocano notevoli sollecitazioni termiche residue all'interno delle parti. Queste sollecitazioni termiche, se non considerate in fase di progettazione e arginate, provocano deformazioni, fessurazioni e/o delaminazione di una parte.

Molte tra le regole di progettazione del PBF tentano di limitare gli effetti delle sollecitazioni termiche vincolando i rapporti di forma (rapporto geometrici tra le parti) e gli spessori delle pareti, aggiungendo raggi sugli angoli acuti e ottimizzando l'orientamento della parte all'interno del costruito.

Le sollecitazioni termiche non possono essere evitate del tutto, quindi sono sempre necessari supporti robusti per ancorare determinate caratteristiche alla piastra. I supporti fungono anche da dissipatori di calore per allontanare l'energia ed evitare bruciature dove l'energia del laser penetra nella polvere sotto lo strato da stampare.

Questo fenomeno anche detto di "Burn through" è mostrato anche nell'immagine precedente sulla superficie inclinata di 30 gradi verso il basso. [8] [9]

3.6.6 Metallurgia

La metallurgia è fondamentale per i processi di produzione dei metalli a causa del suo grande impatto sulle prestazioni del materiale finale. Gli elevati carichi termici ciclici nel PBF possono causare strutture a grani anisotropi che degradano le prestazioni del materiale. Il processo del PBF è suscettibile anche a fenomeni di porosità causati in parte da una densità di impacchettamento non ottimale e da schizzi di particelle durante il processo di stampa.

Per evitare questi problemi ed aumentare l'efficienza del prodotto finale, le stampanti devono essere calibrate in modo molto preciso e i parametri di stampa ottimizzati durante l'iterazione. [8] [9]

3.6.7 Geometria e dettagli

Il PBF è particolarmente utile per parti con una geometria molto complessa, dove il valore del design migliorato delle parti supera i costi elevati del PBF.

L'involucro di costruzione della maggior parte delle macchine PBF è di circa un cubo da 250mm. Alcune macchine L-PBF multi-laser recenti e più costose utilizzano un cubo da 400mm.

Dimensioni dell'involucro di costruzione X e Y più grandi aumentano il numero di parti che possono essere prodotte per costruzione, ma è difficile utilizzare l'intera altezza dell'involucro di costruzione PBF perché le parti devono essere ancorate alla piastra di costruzione.

Sebbene le singole parti possano essere prodotte con le dimensioni complete PBF, tali parti sono rare perché le sollecitazioni residue si adattano alle dimensioni della parte a causa dell'elevato costo del processo. [8] [9]

3.6.8. Considerazioni economiche

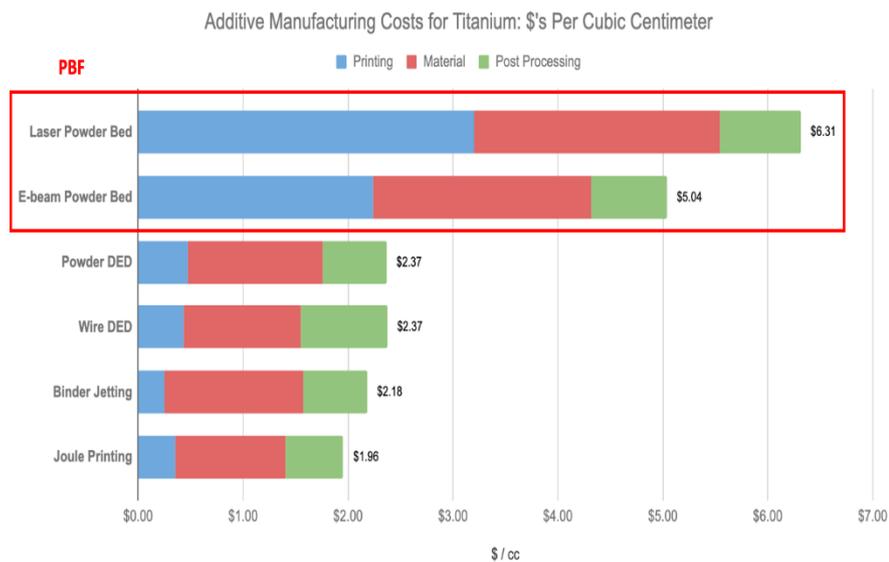


Fig. 11: Analisi dei costi delle varie lavorazioni AM. [11]

Nella produzione tecnologica si deve sempre avere un buon compromesso tra il costo dell'oggetto e la qualità finale, e il PBF è la categoria più costose per la produzione di metallo nell'AM.

Ciò è dovuto principalmente ai costi elevati delle apparecchiature e al processo lento e molto dispendioso di energie. Un altro fattore che pesa sui costi del PBF è integrare le macchine e il processo all'interno della struttura e per l'adeguamento alla sicurezza per i processi dovuti alla lavorazione delle polveri metalliche.

Il PBF è un processo di produzione ad alto costo, quindi, avrà senso solo per applicazioni di alto valore in cui può consentire miglioramenti significativi delle prestazioni. [8] [9]

3.7. Vantaggi e svantaggi dell'AM

Vantaggi

- Le fasi operative tra il modello CAD e la produzione si riducono visto che sono collegate tramite software e riusciamo ad ottimizzare il processo
- Servono meno risorse umane vista l'elevata automazione
- Maggiore complessità geometrica rispetto ai metodi tradizionali
- Produzione molto veloce per pezzi di piccole dimensioni
- Possibilità di ripristinare in modo semplice pezzi danneggiati

Svantaggi

- Il numero dei materiali utilizzabili è limitato nonostante negli anni stia aumentando esponenzialmente
- La produttività delle macchine è generalmente bassa
- Costo alto delle attrezzature e dei materiali di consumo
- Non è sempre adattabile a pezzi molto semplici o di grandi dimensioni
- Esposizione dei lavoratori a materiali pericolosi quali calore, fonti laser.

Molti di questi svantaggi si stanno mitigando negli anni grazie ai vari studi effettuati sull'AM.

4. Creep

Con il termine creep si va ad indicare una permanente deformazione che si viene a creare quando un materiale è esposto ad un'alta temperatura sotto un carico costante.

Il creep si manifesta al di sopra della temperatura di scorrimento (T_s), coincidente indicativamente con la temperatura di ricristallizzazione e approssimabile, in media, alla metà della temperatura di fusione misurata in Kelvin.

Si possono distinguere tre fasi principali quando il processo avviene a $T > T_s$ e sollecitazione costante:

- Prima fase: all'applicazione del carico si ha la deformazione elasto-plastica, che aumenta con velocità decrescente favorita dalla mobilità delle dislocazioni più favorevoli;
- Seconda fase: si stabilisce un equilibrio tra l'incrudimento e la ricristallizzazione: la deformazione prosegue a velocità quasi costante e bassa relativamente a quella presente nella fase successiva;
- Terza fase: la deformazione aumenta rapidamente, arrivando velocemente alla rottura, a causa delle microcricche appuntite e microvuoti tondeggianti e soprattutto dello scorrimento dei giunti dei grani.

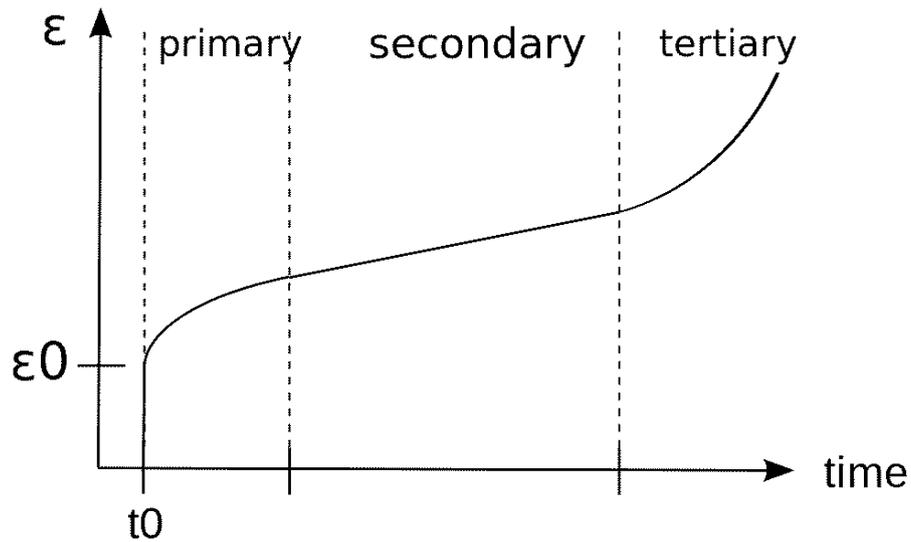


Fig. 12: Grafico dell'andamento a creep di un materiale. [12]

In caso $T < T_s$, lo sforzo costante induce una deformazione istantanea elastico/plastica: non vi è infatti abbastanza energia per aumentare la mobilità delle dislocazioni, quindi, ad un certo punto la deformazione arresta. [1]

Il meccanismo che origina lo scorrimento viscoso è dovuto ad una competizione continua tra processi di incrudimento e di restaurazione strutturale del materiale, che regolano il moto delle dislocazioni.

Nel primo stadio prevale l'incrudimento e quindi la velocità di deformazione diminuisce nel tempo, nel secondo stadio i due processi si bilanciano e la deformazione prosegue in quanto il rilassamento strutturale riduce il tasso di incrudimento. Infine, nel terzo stadio avviene la rottura del materiale, in seguito ad uno scorrimento tra grani.

Il creep è quindi un fenomeno termicamente attivato e la velocità di deformazione può essere descritta dalla legge di Arrhenius.

4.1. I trattamenti per ridurre la deformazione da creep

Esistono diversi modi per aumentare la resistenza a creep:

- Trattamenti come ricottura, normalizzazione, solidificazione direzionale;
- Deformazioni plastiche preventive che ostacolano le dislocazioni e la precipitazione di particelle

4.2. Prova di valutazione del creep a caldo per un materiale metallico

La prova di creep serve a valutare e determinare gli effetti della temperatura e della sollecitazione imposta al materiale metallico sulla velocità di creep.

Per ogni curva di creep si misura la velocità minima di creep che si trova nella seconda fase e viene indicata con $\dot{\epsilon}_{ss}$.

Un valore che è usato comunemente per valutare la resistenza a creep ad una determinata temperatura è lo sforzo nominale che produce come effetto una velocità minima di creep pari a $10^{-5}\%/h$ [1]

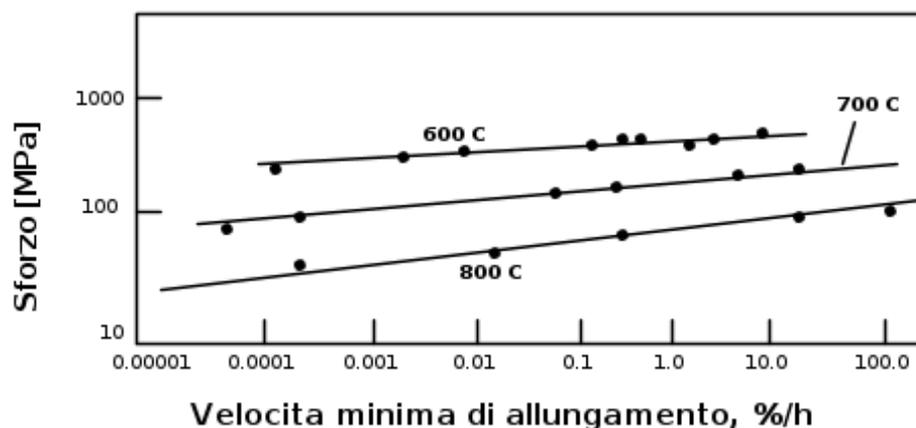


Fig. 13: Grafico dello sforzo in rapporto alla velocità minima di allungamento. [13]

5. Attività sperimentale

5.1. Procedure

Con questo lavoro si è andato a valutare la curva di creep di provini identici a temperatura e stress variabili tra prova e prova e valutarne tramite la prova di durezza di Rockwell l'HRC, per poi andare a valutare i grafici della deformazione in relazione alla forza applicata.

5.1.1. Fabbricazione dei provini

I provini sono stati creati tramite l'utilizzo della tecnologia Additive Manufacturing nello specifico tramite la tecnica del Powder Bed Fusion

Materiale dei provini: Ti-6Al-4V

Lunghezza provini: 25,7mm

5.2. Prova di creep

I provini sono stati inseriti all'interno del forno di creep a temperatura e stress differenti per valutarne le risposte.

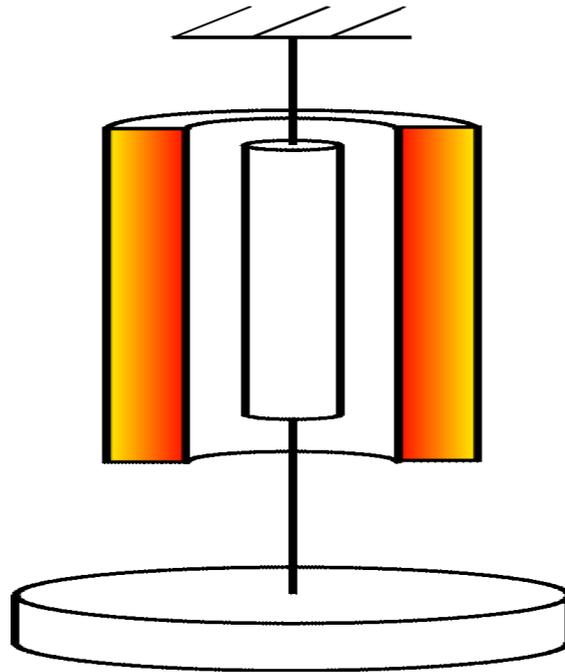


Fig 14: Esempio di forno di creep

5.3. Prova di Rockwell

In seguito alla prova di creep abbiamo valutato se tale stress e temperatura applicati ne avessero fatto variare la durezza tramite la prova di Rockwell.

La prova di Rockwell è una prova di durezza che si realizza con penetratori di forma conica o sferica. La durezza è determinata in base alla deformazione elasto-plastica del materiale in esame.

La procedura consiste nel collocare il penetratore sulla superficie del pezzo di cui misurare la durezza, applicando una forza iniziale (precarico) e quindi applicando una forza addizionale per un intervallo di tempo definito ($4 \pm 2s$ per la norma ISO). Quando il penetratore raggiunge la penetrazione massima si rimuove la forza addizionale lasciando il precarico

che agisce ancora sul pezzo. La misura della profondità raggiunta è correlata con la misura di durezza. [14]

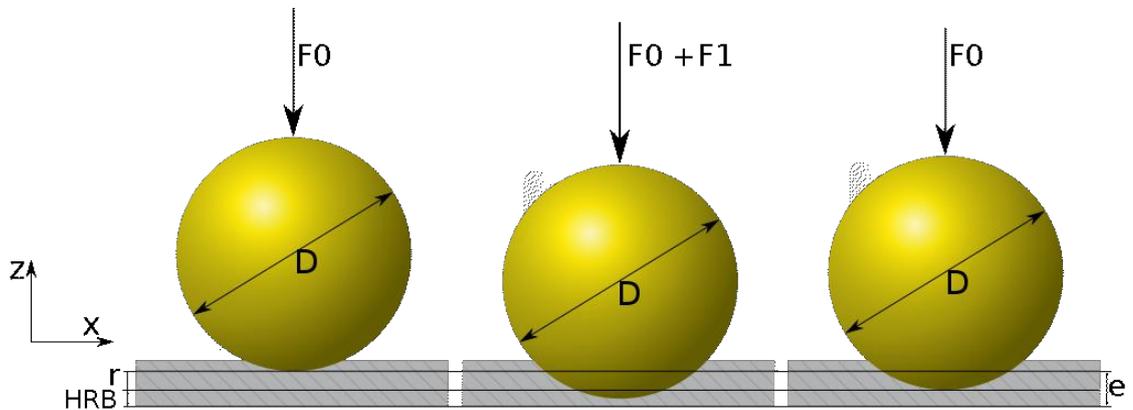


Fig. 15: Esempio di carichi, prove di Rockwell. [15]

La misurazione può essere effettuata con metodi diversi (scale), contrassegnati da diverse sigle in funzione della norma e del materiale penetratore e delle forze di pre-carico e carico applicate. Le due scale maggiormente utilizzate sono:

- HRC (Hardness Rockwell Cone) : il penetratore è un cono di diamante con un angolo di apertura pari a 120° e raggio di raccordo di 0.2mm. Questo metodo è utilizzato per materiali molto duri con valore di durezza Brinell $HB > 200$
- HRB (Hardness Rockwell Ball): il penetratore è una sfera di metallo duro (carburo di tungsteno) del diametro di $1/16''$ (1,59mm); è utilizzata per materiali non eccessivamente duri, con valore di durezza Brinell $HB < 200$. [14]

5.3.1. Scale di Rockwell

Scale A, C e D

Il penetratore è un cono di diamante con angolo di apertura pari a 120°. Il carico iniziale utile è di 98,0664 N. Il carico aggiuntivo per la scala A è di 490,3325 N, per la scala C è di 1472,931 N e per la scala D è di 882,5985 N. Il procedimento maggiormente utilizzato è quello secondo la scala C.

Durezza di Rockwell = $100 - h/0,002$ mm.

Dove "h" è la profondità di penetrazione residuale del penetratore in millimetri. [14]

Scale B, E- H e K

Queste scale sono adatte per materiali più dolci come acciai medio-duri o ottone. Come penetratore viene usato una sfera di metallo duro (W), mentre prima della variazione della normativa nel 2006 era ammesso usare anche sfere di acciaio (S). Per questo motivo è stata ampliata anche la scala di durezza di 30 gradi. Per le scale B, F e G la sfera ha un diametro di 1,5875 mm; per le scale E, H e K 3,175 mm. Il carico iniziale corrisponde sempre a 98,0665 N, mentre il carico aggiuntivo si articola come segue: scala B ed E: 882,5985 N; scala F e H: 490,3325 N; scala G e K: 1472,931 N. La scala più frequente è la B. [14]

Durezza di Rockwell= $130-h/0,002$ m

Scale N e T

Per la scala N viene utilizzato un penetratore a diamante conico con angolo di apertura di 120°; per la scala T una sfera di metallo duro (W) con diametro 1,5875 mm. Comune ai due procedimenti è il carico iniziale di 29,41995 N e il fatto che vengono normati in tre diverse variazioni di carico, espresso attraverso un numero: 15 sta per 117,6798 N; 30 sta per 264,77955 N; 45 sta per 411,8793 N.

Le abbreviazioni saranno dunque ad esempio: HR15N o HR45T

Durezza di Rockwell = $100 - h/0,001 \text{ mm}$ [14]

6. Risultati

6.1. Prove di durezza (scala C)

Su ogni testa sono state eseguite più misurazioni così da avere un risultato più veritiero, e possiamo notare inoltre che:

- Il provino numero 9 è andato in compressione portando inoltre degli scarsi risultati nel test di durezza;
- I provini 11,12 e 13 sono stati portati a rottura.

Gradi	MPa	CL/VL	#	Testa 1	Testa 2	Testa 3	Testa 4
600	150	CL	1	37,5	37,75	37,75	37,25
600	220	CL	2	38	38	38,5	37,25
600	150 to 204	VL	3	38,5	37,5	37,5	37,5
500	250to624to647	VL	4	38,75	38,75	39,25	38,75
650	100	CL	5	38	37	37	37,25
500	500	CL	6	38,25	38,75	38,75	39,5
500	350	CL	7	38,75	38,75	38,75	38,5
650	65to304	VL	8	38,25	39,25	38,5	38,5
625/650	30	CL	9	35,75	35,5	36	35,25
600	100	CL	10	37,25	39	38,25	37,5
600	300	CL	11	38,5	38,5	39,5	38,75
500	450	CL	12	40,5	39,5	40,5	39,5
500	160	CL	13	40	40,75	40	40,25

La testa numero 1 e la numero 2 sono la stessa testa ma lati opposti, 1 e 3 sono teste diverse ma stesso lato.

6.2. Prova di creep

Le seguenti figure mostrano l'andamento qualitativo delle curve di creep.

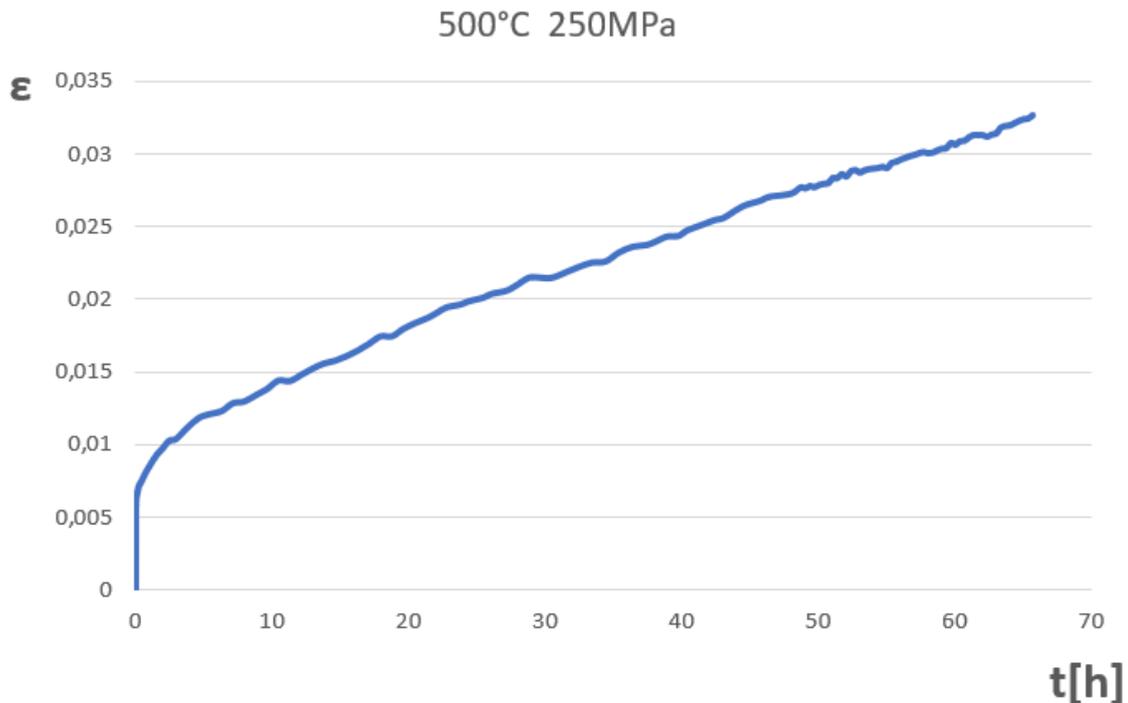


Fig 16: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 500°C con una pressione di 250 Mpa costante.

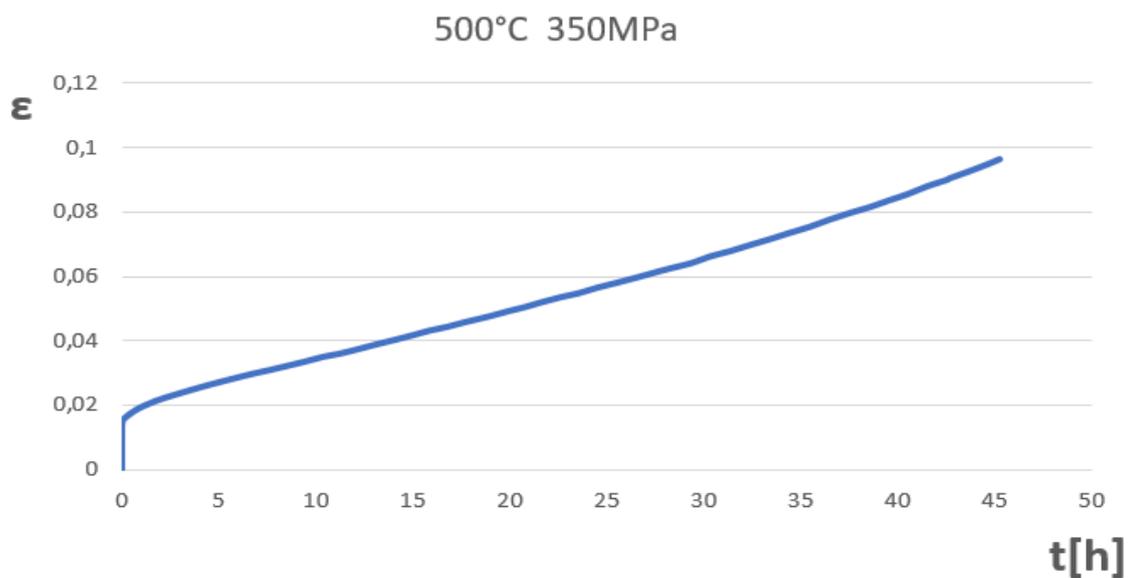


Fig 17: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 500°C con una pressione di 350 Mpa costante.

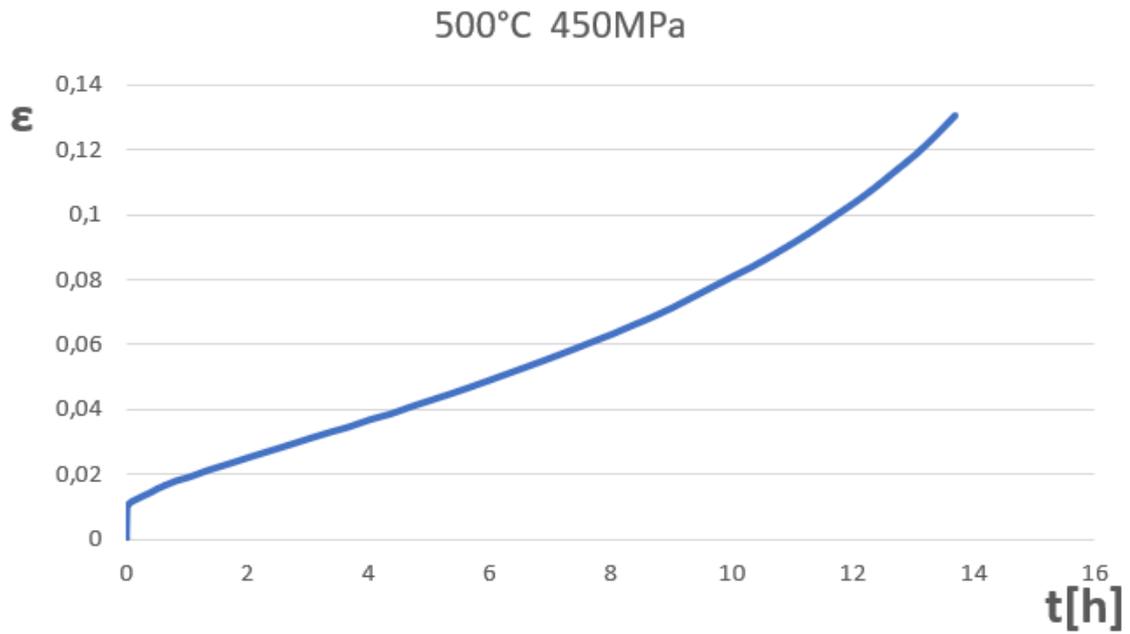


Fig 18: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 500°C con una pressione di 450 Mpa costante.

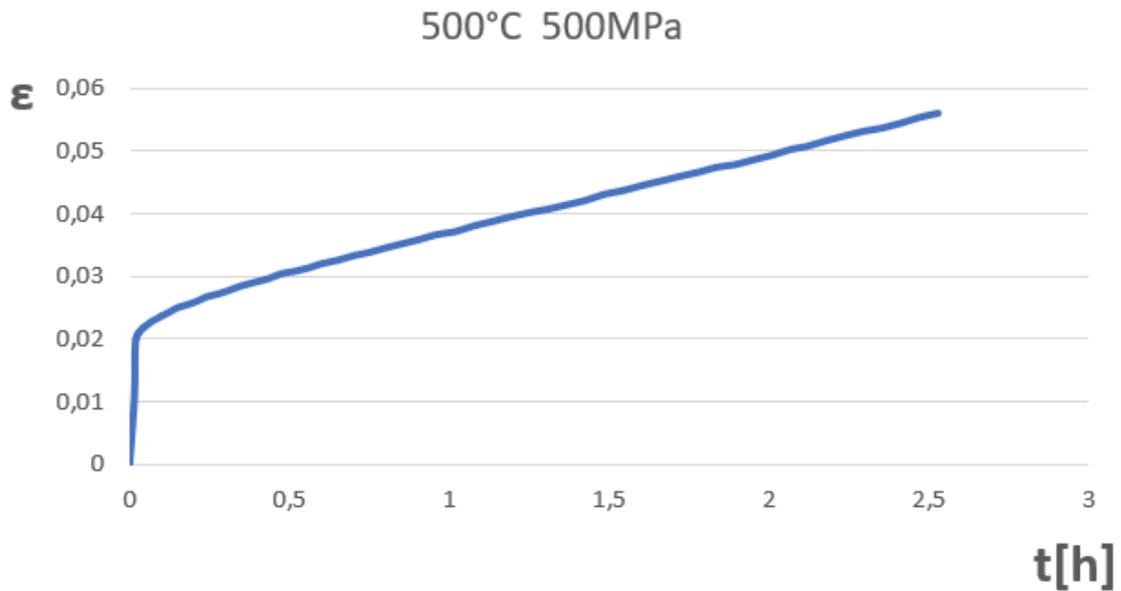


Fig 19: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 500°C con una pressione di 500 Mpa costante.

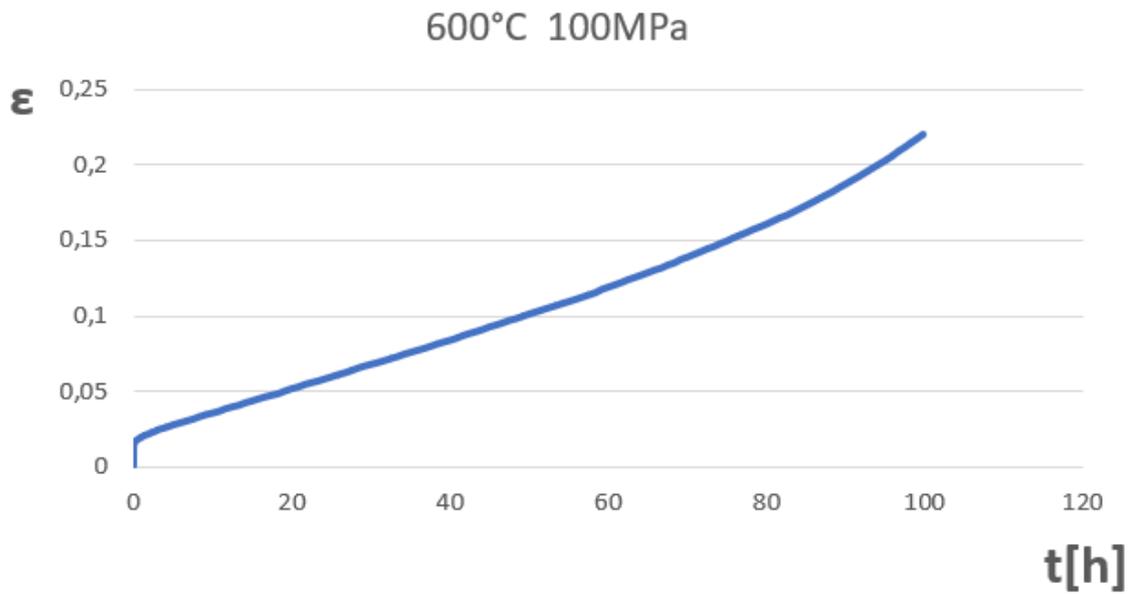


Fig 20: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 600°C con una pressione di 100 Mpa costante.

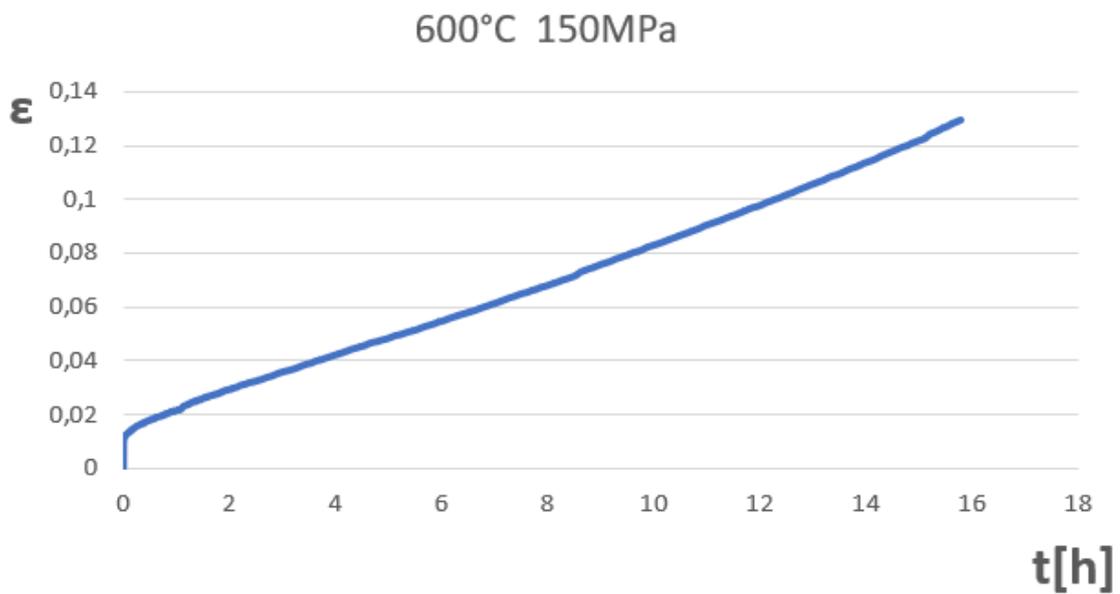


Fig 21: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 600°C con una pressione di 150 Mpa costante.

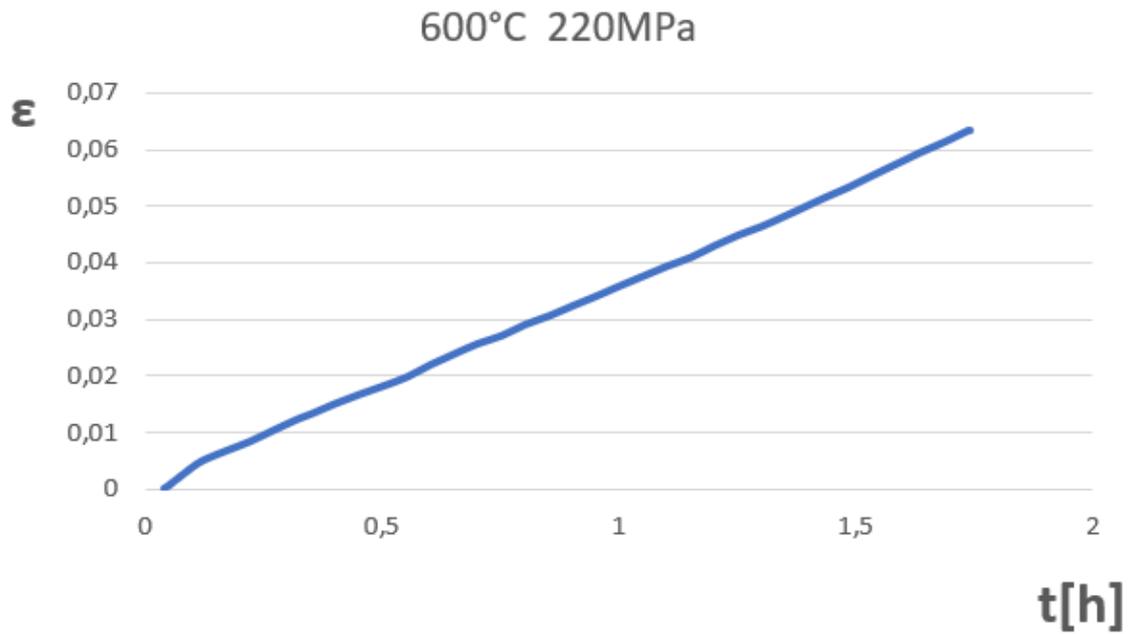


Fig 22: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 600°C con una pressione di 220 Mpa costante.

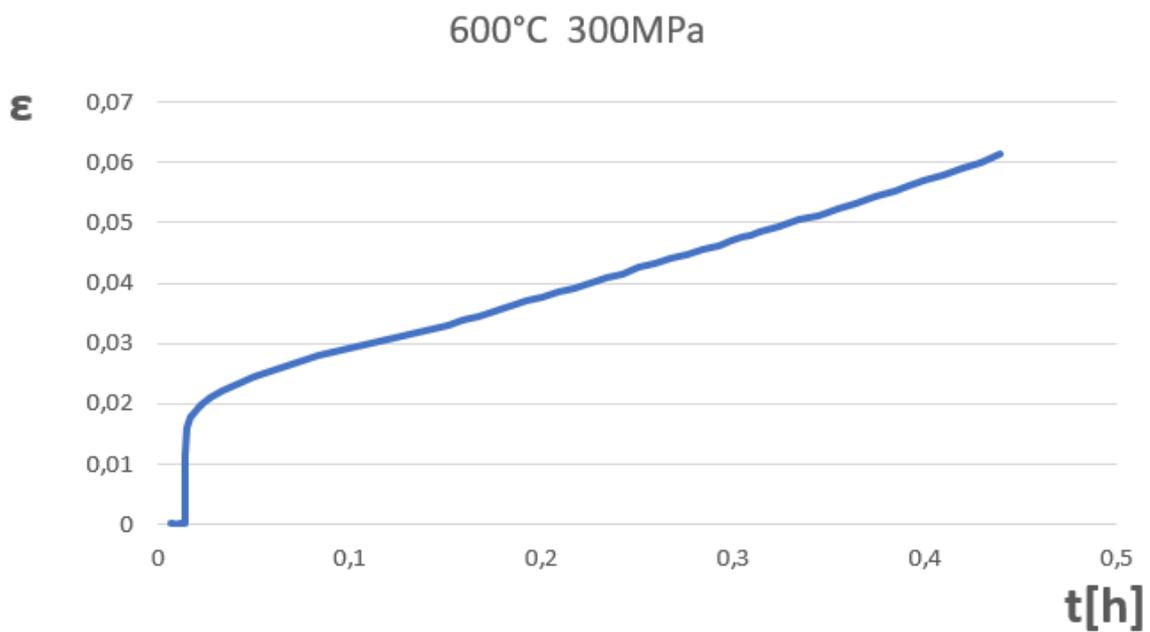


Fig 23: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 600°C con una pressione di 300 Mpa costante.

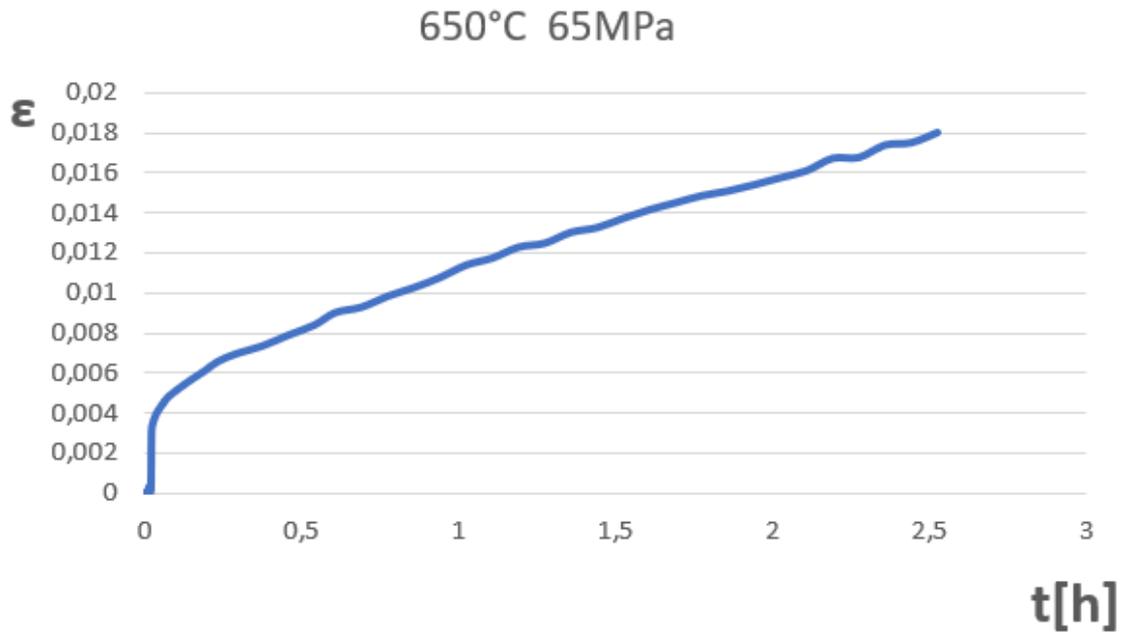


Fig 24: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 650°C con una pressione di 65 Mpa costante.

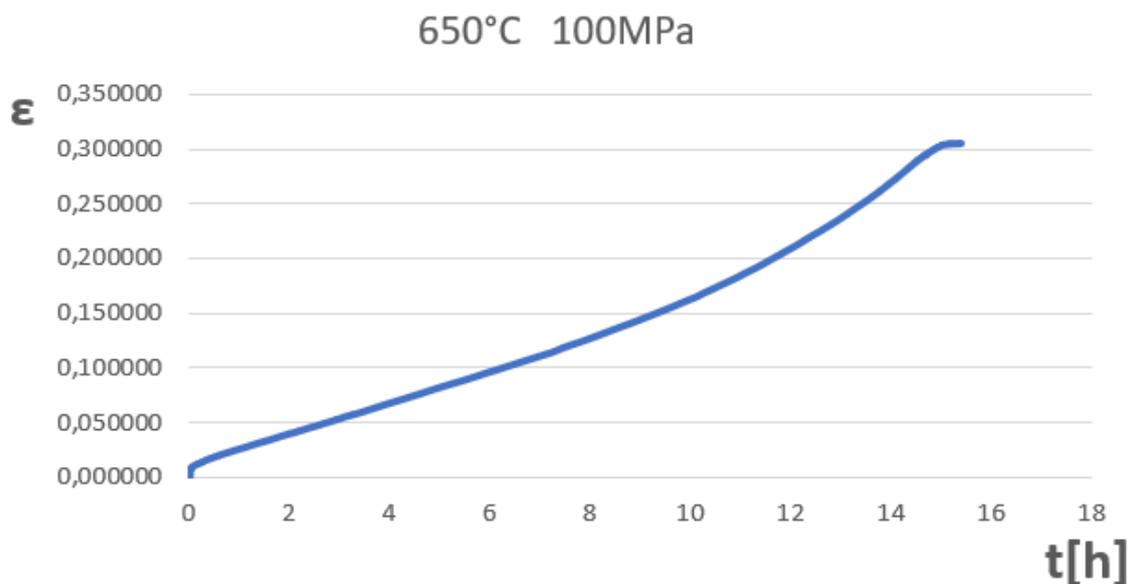


Fig 25: andamento qualitativo di una curva di creep con prova svolta a 650°C con una pressione di 100 Mpa costante.

Dalle curve di creep, tramite interpolazione lineare dei dati relativi alla porzione della curva che manifestava la pendenza minima, si è ricavato il valore minimo della velocità di deformazione.

Tabella T/Sigma/Epsilon

T	sigma	Epsilon[1/h]
500	250	0,0002
500	350	0,0016
500	450	0,006
500	500	0,0127
600	100	0,0017
600	150	0,0062
600	220	0,034
600	300	0,1173
650	65	0,0046
650	100	0,00138

Tabella riassuntiva delle varie velocità di deformazione in funzione della temperatura e stress applicato.

La Figura successiva mostra l'andamento della velocità minima di deformazione in funzione della sollecitazione di prova, su scala bilogarithmica. I dati si allineano su retta la cui pendenza è l'esponente di Norton, che varia in questo caso da circa 6 a circa 3, man mano che la temperatura si innalza.

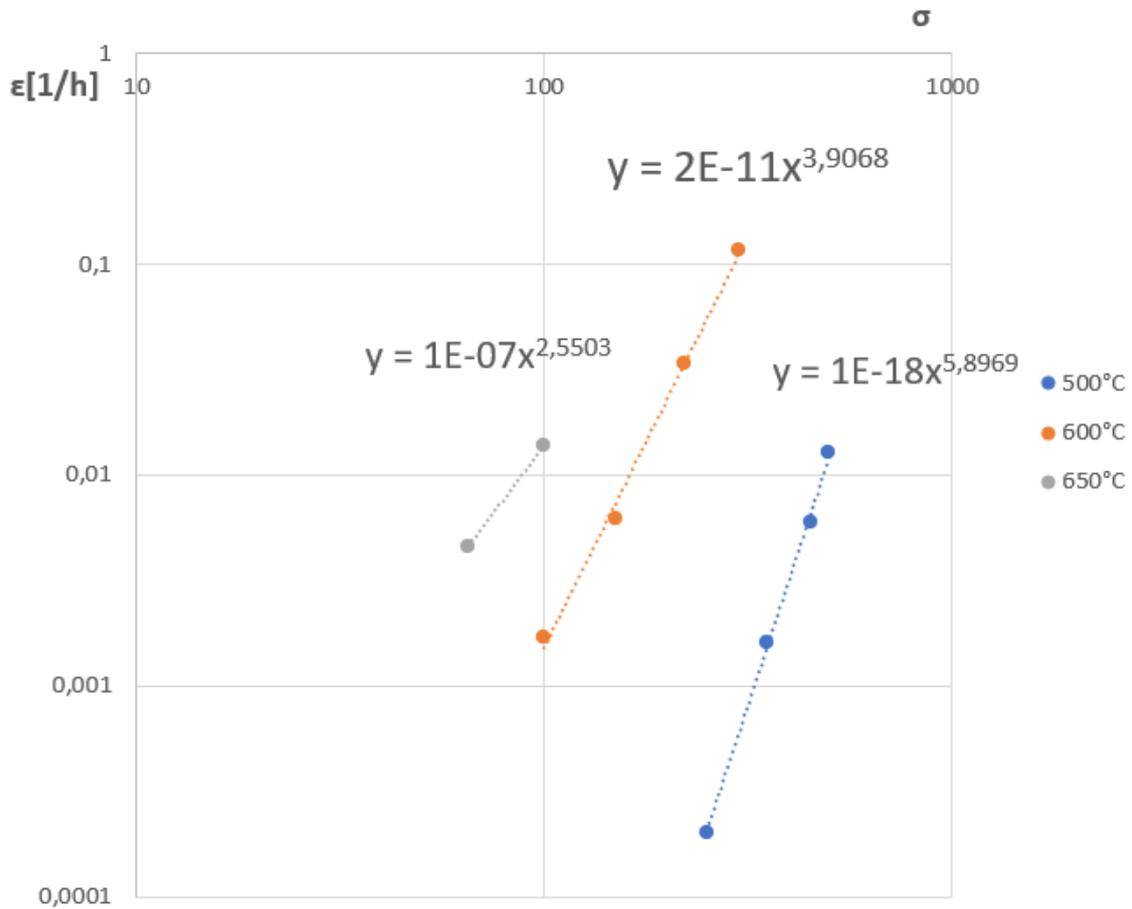


Fig 26: andamento della velocità minima di deformazione in funzione della sollecitazione di prova su scala bilogarithmica.

7. Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha analizzato la lega Ti-6Al-4V i cui provini sono stati realizzati tramite Powder Bed Fusion.

Lo scopo dello studio è stato quello di valutare la deformazione da creep e la durezza in base alle temperature e stress applicati.

Si è potuto notare attraverso le prove di Rockwell come i provini sottoposti ad una temperatura di 500°C mantengono una durezza più elevata rispetto alle controparti testate a 600 e 650°C.

Si è altresì potuto notare tramite la prova di creep e le successive rielaborazioni dei dati come la σ applicata abbia un ruolo molto importante sulla velocità di deformazione, con esponente della legge di Norton che varia da circa 6 a 500°C a circa 3 a 650°C.

8. Bibliografia

- [1] Encyclopædia Britannica Inc., Titanium, 2006.
- [2] D. R. Lide, Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press; 86th edition, 2005.
- [3] S. V. Sajadifar, «Thermo-mechanical behavior of severely deformed titanium,» 2017.
- [4] stratasys.com.
- [5] «3dsystems,» [Online]. Available: <https://it.3dsystems.com/our-story>.
- [6] V. C. A. T. a. W. M. Y. Cadoret, «Additive Manufacturing in Thales,» Paris, 2015.
- [7] O. H. D. M.-L. David Ruppert, in *Osseointegration of coarse and fine texture implants*, researchgate.net, 2017.
- [8] J. Peels, «3DPrint,» [Online]. Available: www.3DPrint.com.
- [9] J. Barnes, *Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing*, The Barnes Group Advisors.
- [10] E. Utley, «blogs.solidworks.com,» 2017. [Online]. Available: <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/06/introduction-designing-metal-3d-printing.html>.
- [11] «digitalalloys,» [Online]. Available: <https://www.digitalalloys.com/blog/economics-metal-additive-manufacturing/>.
- [12] T. L. Franklin, «https://it.wikipedia.org/wiki/Scorrimento_viscoso,» 2018. [Online].
- [13] «<https://www.electroyou.it/asdf/wiki/i-materiali-compositi>,» 2011. [Online].
- [14] R. Chinn, Hardness, Bearings, and the Rockwells.
- [15] Djhé, «https://it.wikipedia.org/wiki/Scala_di_Rockwell,» 2018. [Online].
- [16] Encyclopædia Britannica Inc., 2006.
- [17] Encyclopædia Britannica inc., Titanium, 2006.
- [19] Encyclopædia Britannica Inc., Titanium, 2006.
- [21] S. Spigarelli, «Il comportamento dei metalli ad alta temperatura,» *La metallurgia italiana*, 2004.