



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Analisi della risposta a creep di una lega di alluminio prodotta
per additive manufacturing e trattata termicamente**

*Creep response analysis of an aluminium alloy produced by
additive manufacturing and heat treated*

Relatore:

Prof. Stefano Spigarelli

Tesi di laurea di:

Chiara Flamini

Correlatore:

Dott. Ing. Chiara Paoletti

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	3
ADDITIVE MANUFACTURING	3
LEGA ALSi10MG	7
CREEP ED EQUAZIONI COSTITUTIVE	10
PROCEDURE SPERIMENTALI	13
RISULTATI	15
CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA	33

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi di laurea è valutare la risposta a creep di una lega di alluminio prodotta per additive manufacturing e trattata termicamente dopo la stampa.

Prima di analizzare i dati ottenuti sperimentalmente in laboratorio è opportuno introdurre la tecnica di produzione e la composizione chimica della lega di alluminio oggetto di questo studio, in quanto questi fattori ne definiscono le proprietà e influiscono anche sulla risposta a creep.

Additive manufacturing

L'additive manufacturing (AM) di leghe metalliche è una tecnologia emergente che permette di produrre componenti ingegneristici con forme complesse e personalizzate introducendo proprietà interessanti per innumerevoli applicazioni.

Si tratta di una vera e propria rivoluzione poiché la produzione non avviene tramite la convenzionale asportazione di materiale dal pieno, bensì consiste nella stratificazione progressiva del materiale al fine di ottenere un oggetto tridimensionale.

L'oggetto 3D da realizzare viene inizialmente digitalizzato in un file CAD (*Computer Aided Design*) che può essere ottenuto modellando direttamente l'oggetto con appositi software, effettuando una scansione 3D di un oggetto esistente o effettuando il download del file da siti dedicati.

Per poter essere letto dalla macchina, il disegno dell'oggetto deve essere in formato STL (*Standard Tassellation Language*) ovvero un modello che approssima le superfici del prototipo CAD con una serie di triangoli più o meno grandi in base al livello di accuratezza richiesto.

La fase successiva è definita "*sliding*" e consiste nella divisione del pezzo nei vari strati. La scelta dello spessore degli strati è di fondamentale importanza poiché questo parametro è legato al livello di accuratezza richiesto e di conseguenza influenza i tempi e i costi di produzione: maggiore è l'accuratezza richiesta, minore è lo spessore del singolo strato da depositare, e di conseguenza si hanno tempi di lavorazione lunghi e costi elevati.

Terminata la procedura di ottimizzazione topologica del componente a livello del software si procede alla stampa vera e propria.

Una volta stampato, il pezzo può essere sottoposto a lavorazioni di finitura superficiale e ad altri trattamenti volti a migliorarne le proprietà meccaniche, ma prima di tutto è necessario procedere alla rimozione dei supporti di stampa.

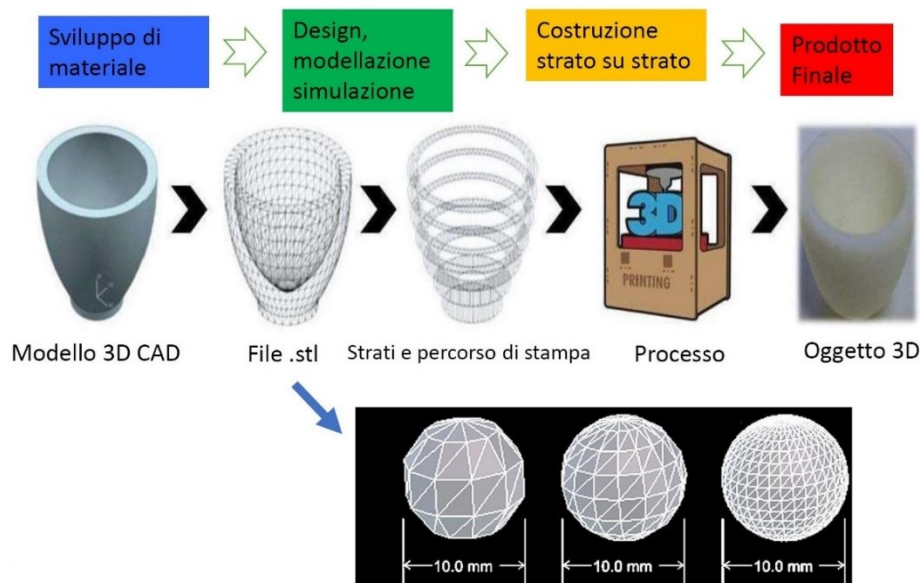


Figura 1 Sequenza produzione additiva

I principali processi di stampa 3D di leghe metalliche sono normalizzati e classificati dall'ASTM International (*American Society for Testing and Materials*) come segue:

- Binder Jetting
- Direct Energy Deposition
- Powder Bed Fusion

Il funzionamento di base è simile per tutti i processi, ma ognuno presenta delle peculiarità.

Nella tecnologia **Binder Jetting** viene depositato, strato dopo strato, un collante per cementare il materiale polverizzato; il principio è quello di proiettare un getto di legante su uno strato in polvere per solidificarlo sul posto grazie a una reazione chimica o termica. Nella prima fase del processo di realizzazione viene distribuito un sottile strato di polvere sulla piattaforma di costruzione; una volta completata l'applicazione

uniforme dello strato di polvere, quest'ultimo viene inumidito mediante un fluido legante che incolla le particelle di polvere. Infine la piattaforma si abbassa di una misura pari allo spessore di uno strato e il processo può iniziare nuovamente. Il processo si ripete fino al completamento della stampa dell'ultimo strato del modello 3D.

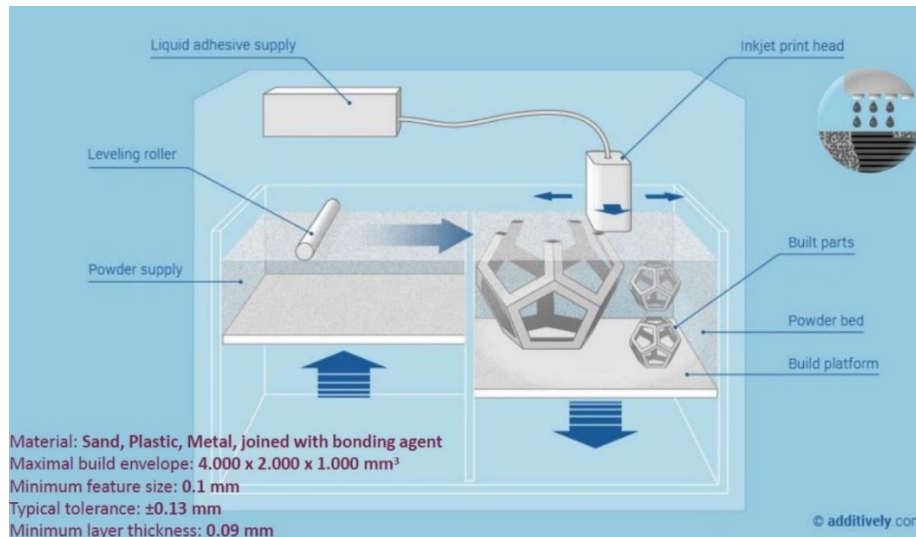


Figura 2 Schema Binder Jetting

Con la tecnologia **Direct Energy Deposition** si creano strutture fondendo il materiale metallico tramite una fonte di calore concentrata (laser, fascio di elettroni o arco) mentre questo viene depositato in un punto preciso; a ciascun passaggio della testa di deposizione, dalla quale esce il laser beam e il materiale sotto forma di polvere nebulizzata in un gas, tramite un ugello montato su un braccio a più assi, si crea una traccia di materiale che solidifica rapidamente.

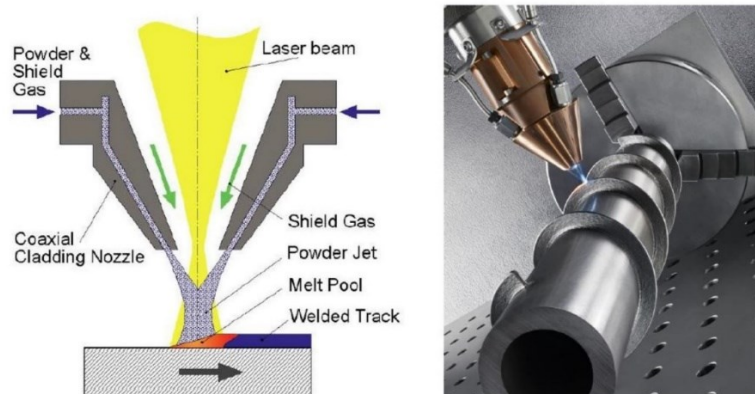


Figura 3 Schema Direct Energy Deposition

La tecnologia **Powder Bed Fusion** è quella utilizzata per la produzione della lega di alluminio oggetto di questo studio. Viene sfruttata energia termica, che può essere rappresentata da un laser o un fascio di elettroni, per fondere punti specifici su uno strato omogeneo di polvere metallica dello spessore pari a quello del singolo layer di stampa. L'energia termica prodotta da una sorgente laser fonde la polvere che raffreddandosi si solidifica. Dopo la fusione di un livello, la piattaforma si abbassa, viene depositato un nuovo strato di polvere metallica e il procedimento si ripete fino al completamento dell'ultimo strato.

In questo processo di stampa, le sollecitazioni termiche ricoprono un ruolo determinante e sono causate dai rapidissimi fenomeni di riscaldamento e raffreddamento. Per ogni strato stampato, gli strati inferiori adiacenti subiscono uno stress termico non trascurabile in quanto vengono riscaldati e raffreddati nuovamente; l'espansione e il ritiro continui, limitati da strati già solidificati, causano delle tensioni residue.

Questi stress dipendono direttamente dall'area della sezione trasversale fusa, dal materiale e dalle modalità di dispersione del calore. È bene quindi scegliere correttamente la disposizione del manufatto da realizzare sul vassoio di stampa in modo da minimizzare le aree trasversali e di conseguenza le deformazioni termiche. Spesso la deformazione può essere evitata semplicemente calibrando opportunamente la macchina, garantendo un'adeguata adesione superficiale tra la parte e il piano di stampa, evitando grandi superfici piate e aggiungendo bordi arrotondati ai modelli 3D o variando la temperatura di preriscaldamento della piastra di stampa [1].

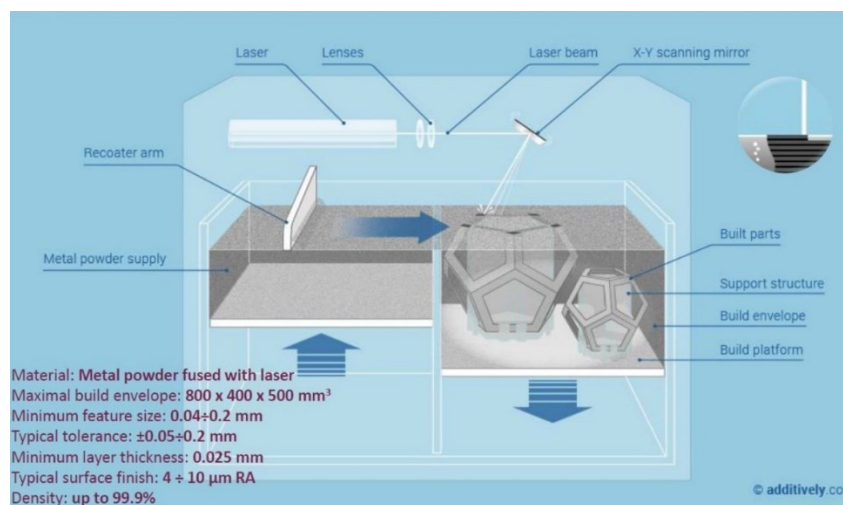


Figura 4 Schema Powder Bed Fusion

Lega AlSi10Mg

Le tecniche di additive manufacturing si prestano a processare differenti materiali quali il titanio, l'acciaio inossidabile, il nichel e le leghe di alluminio.

Nei processi a fusione laser, le polveri di alluminio presentano però vari problemi.

I processi additivi basati sulla fusione laser dipendono dalla capacità di distribuire un sottile strato di polvere sulla piattaforma di lavoro, questo risulta difficoltoso poiché le polveri di alluminio sono leggere e con una scarsa fluidità. Inoltre la potenza del laser richiesta per la fusione è molto alta a causa dell'elevata riflettività dell'alluminio e della sua conducibilità termica, che consente una rapida dissipazione del calore dalla traccia. Un ulteriore ostacolo è rappresentato dall'ossidazione, a cui si può ovviare garantendo un'atmosfera inerte nella camera di stampa, che insieme alla viscosità dell'alluminio fuso contribuisce ad incrementarne la porosità [2]. Nonostante ciò, l'alluminio è di grande interesse per il processo Powder Bed Fusion grazie al suo peso ridotto, alle buone proprietà meccaniche e ai costi relativamente contenuti.

Una serie di leghe di alluminio molto comuni contengono convenzionalmente Silicio come elemento principale e una piccola parte di Magnesio al fine di rendere la lega trattabile termicamente. Una delle leghe appartenenti alla famiglia Al-Si è l'AlSi10Mg, che attualmente è la lega di alluminio più utilizzata nei processi di additive manufacturing poiché garantisce buone proprietà meccaniche, espansioni termiche limitate e resistenza a corrosione rilevante. Questo è legato alla rapida solidificazione della lega che porta all'ottenimento di una microstruttura molto fine [3, 4]. Inoltre durante la deposizione strato per strato, la lega subisce un trattamento autotemperante; infatti la melting pool (o pozza fusa), circondata dagli strati sottostanti già solidificati, si raffredda molto rapidamente. Un problema che si riscontra nelle parti ottenute per additive manufacturing è l'anisotropia che può essere ridotta o rimossa ottimizzando il processo di stampa e sottoponendo le parti ad un trattamento T6. Di contro però i trattamenti termici possono aumentare la porosità, riducendo le proprietà meccaniche e aumentando il volume del componente con possibile superamento dei limiti di tolleranza.

Ne consegue che i parametri del trattamento termico devono essere scelti accuratamente per garantire le proprietà richieste.

La composizione eutettica della lega AlSi10Mg corrisponde all'11,7% in peso di Si ad una temperatura di 577 °C.

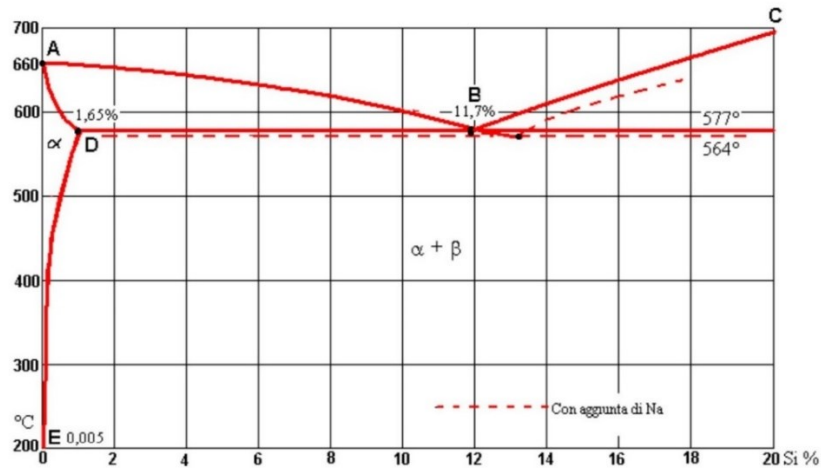


Figura 5 Diagramma Alluminio-Silicio

Il rafforzamento di questa lega è possibile aggiungendo elementi alliganti quali Mg e Cu, che rendono la lega Al-Si temprabile.

Durante i processi PBF, l'interazione tra il raggio laser e le polveri genera ampi gradienti di temperatura, con elevate velocità di riscaldamento e raffreddamento. Si ottiene un buon affinamento nella fase eutettica del Silicio e alla fine si rilevano elevati valori di durezza e resistenza. La frazione di Silicio presente nella lega, trovandosi in prossimità della zona eutettica Al-Si, rende possibile la formazione di una microstruttura a grani fini del Silicio che migliora la saldabilità della lega, rendendola adatta ad essere formata per processi di additive manufacturing.

Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
% in peso	Equilibrio	9-11	≤ 0,55	≤ 0,05	≤ 0,45	0,2-0,45	≤ 0,10	≤ 0,15

Tabella 1 Composizione AlSi10Mg

Riassumendo è possibile affermare che la lega AlSi10Mg prodotta per additive manufacturing presenta una microstruttura fine con celle di dimensioni submicroniche ed elevati valori di durezza. Le sue proprietà meccaniche risultano migliori rispetto ad altre leghe di alluminio di simile composizione. Trovando il giusto compromesso tra i parametri di processo è possibile ottenere parti a porosità ridotta e densità del 99,8%.

CREEP ED EQUAZIONI COSTITUTIVE

Il creep, o scorrimento viscoso, è un fenomeno costituito da un accumulo progressivo di deformazione plastica in un materiale sottoposto ad una sollecitazione, inferiore allo snervamento, ad elevata temperatura. Per far sì che il fenomeno del creep sia attivo è necessario che la temperatura abbia un valore superiore ad un limite identificabile nel 30-50% della temperatura assoluta di fusione.

Il fenomeno del creep viene studiato effettuando prove a carico costante; questa procedura non è totalmente accurata, in quanto la tensione effettiva nel corso della prova tende ad aumentare a causa della riduzione di sezione trasversale legata all'allungamento del campione, detta strizione. Trascurando questa inesattezza, i dati così ottenuti sono particolarmente utili poiché nella maggior parte dei casi pratici è il carico sul componente a mantenersi costante, non la tensione.

La macchina per effettuare una prova di creep deve avere le seguenti caratteristiche:

- Essere in grado di mantenere la tensione applicata (o il carico) costante per tempi di prova molto lunghi
- Avere a disposizione un forno con cui scaldare il campione per tutta la durata della prova
- Consentire un controllo stretto delle oscillazioni della temperatura e garantire la costanza della temperatura stessa lungo il tratto utile del campione
- Consentire la misura dell'allungamento del campione

La tecnica attualmente più utilizzata per analizzare il comportamento a creep di un materiale metallico è del tipo *creep-rupture*, in cui l'allungamento viene misurato con continuità grazie a trasduttori di spostamento montati sul campione.

Riportando i dati registrati durante la prova su un grafico deformazione-tempo si nota come, dopo una deformazione istantanea ϵ_0 , la deformazione aumenta monotonicamente con il tempo fino alla rottura.

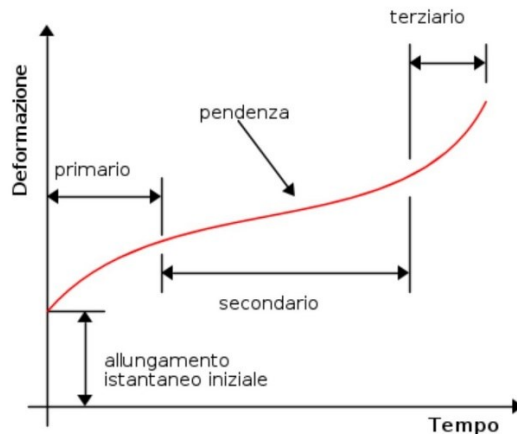


Figura 6 Tipico andamento di una curva di creep

La curva di creep può essere suddivisa in tre diversi stadi:

- Un primario, durante il quale la velocità di deformazione diminuisce con il tempo; in questa fase iniziale la deformazione è ostacolata dalla moltiplicazione delle dislocazioni.
- Un secondario, detto anche stadio stazionario poiché la velocità di deformazione assume un valore costante; in queste condizioni i fenomeni di rafforzamento e di addolcimento si bilanciano.
- Un terziario, durante il quale la velocità di deformazione aumenta con il tempo, portando infine alla rottura; nell'ultimo stadio si creano delle cricche e dei microvuoti che facilitano la formazione della strizione e dunque portano a rottura il provino [5].

Un parametro fondamentale per valutare la risposta a creep è la velocità di deformazione minima, che corrisponde alla velocità di deformazione che si ha nel secondario ($\dot{\epsilon}_{ss}$).

La velocità di deformazione nel secondario viene normalmente descritta tramite una relazione (detta equazione di Norton) del tipo:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = B\sigma^n \quad (1)$$

dove B e n sono costanti adimensionali del materiale e dipendono dalla temperatura. Questa relazione è un'equazione fenomenologica nella quale il valore assunto dalla costante n può essere correlato a vari meccanismi di creep, in particolare alle molteplici possibilità di movimento delle dislocazioni e scorrimenti dei bordi di grano.

La velocità di deformazione nel secondario può essere anche correlata alla variazione della temperatura a σ costante secondo una relazione del tipo:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = C \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

PROCEDURE SPERIMENTALI

I provini oggetto di questo studio sono stati prodotti per additive manufacturing e non presentavano allo stato as-built un buon grado di finitura superficiale, ciò avrebbe potuto influenzare la risposta a creep durante la prova. I campioni sono quindi stati lucidati meccanicamente mediante carte abrasive a granulometrie medie crescenti (600, 1200, 2500).

Dopo aver lucidato il campione è si misura la sezione trasversale nel tratto utile in modo da conoscere esattamente la sezione resistente e poter stabilire con esattezza il peso da caricare sulla macchina per imporre la tensione desiderata. Per ottenere una buona approssimazione del valore della sezione trasversale sono state effettuate tre misurazioni: una circa a metà del tratto utile e due alle estremità di questo. A questo punto il campione viene montato sugli afferraggi, viene chiuso all'interno di un forno a muffola e vengono accese le resistenze del forno per portarlo a temperatura.

La prova ha inizio solo quando la temperatura si è stabilizzata al valore fissato per il test.



Figura 7 Campione di AlSi10Mg



Figura 8 Forni di creep



Figura 9 Carico

Durante la prova, un sistema di acquisizione consente il controllo e il monitoraggio in tempo reale della prova stessa.

Si imposta un tempo di campionamento breve per avere dei dati fitti relativamente a ciò che succede nelle prime fasi di carico, che sono quelle più significative.

Se la prova è a carico costante, il campione viene lasciato in prova fino a rottura o finché non raggiunge il terziario.

La prova può anche essere effettuata in condizioni di carico variabile. In questo caso, quando si è certi di essere nel secondario, si interviene modificando il valore dei pesi da applicare per imporre il nuovo carico.

Quando la prova è terminata si spegne il forno, si lascia raffreddare il campione a temperatura ambiente all'aria e si prendono le curve da analizzare.



Figura 10 Campione portato a rottura

RISULTATI

Per analizzare la risposta a creep di una lega AlSi10Mg sono state effettuate prove a carico costante alle temperature di 150, 175 e 200 °C e due prove a carico variabile alla temperatura di 175 °C.

Al fine di ricavare le equazioni costitutive, sono stati riportati su dei grafici ϵ -t i dati sperimentali ottenuti dalle prove di creep.

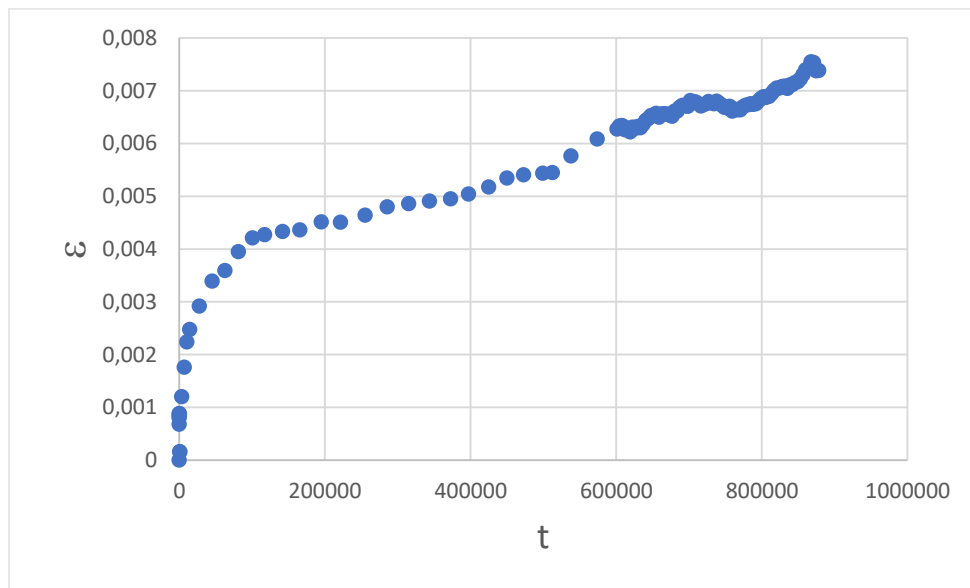


Figura 11 Grafico deformazione-tempo a 150 °C e 150 MPa

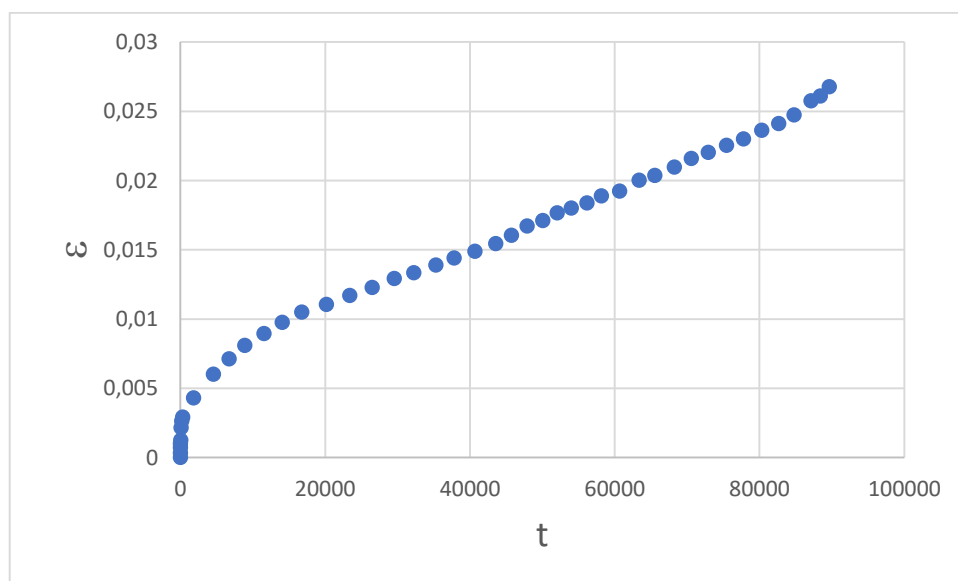


Figura 12 Grafico deformazione-tempo a 150 °C e 190 MPa

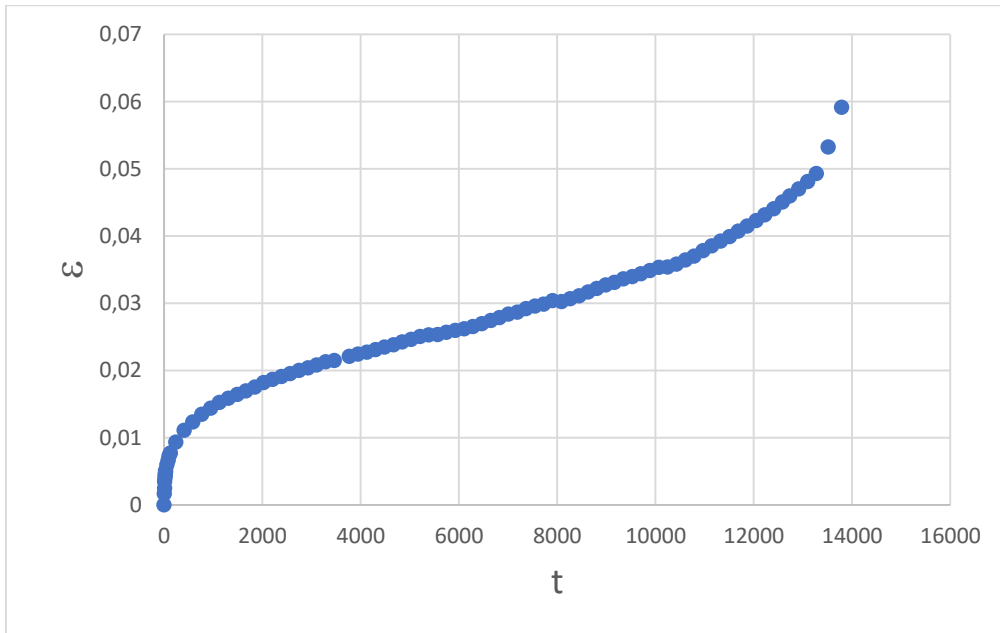


Figura 13 Grafico deformazione-tempo a 150 °C e 200 MPa

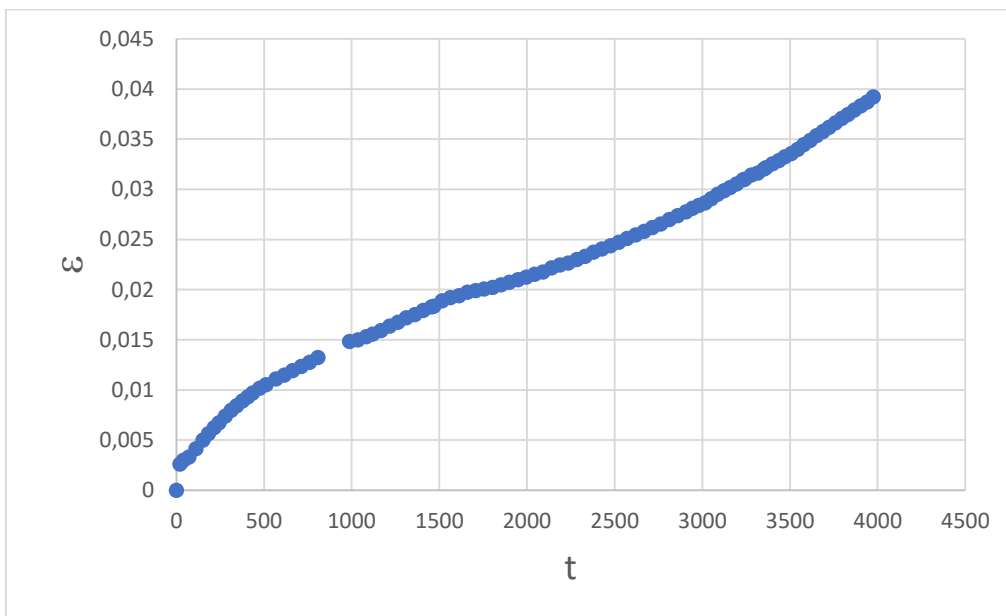


Figura 14 Grafico deformazione-tempo a 150 °C e 210 MPa

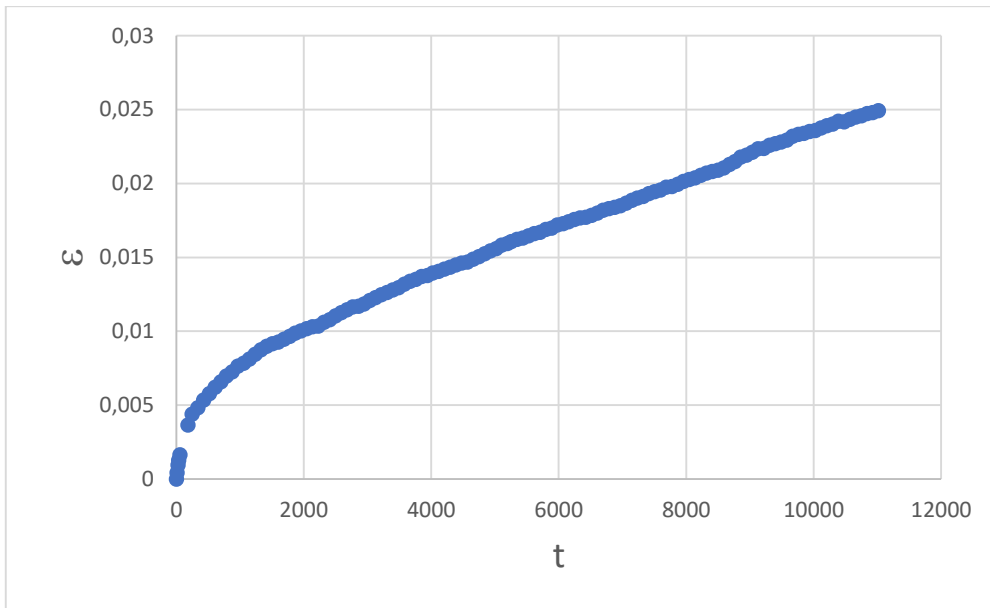


Figura 15 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e 180 MPa

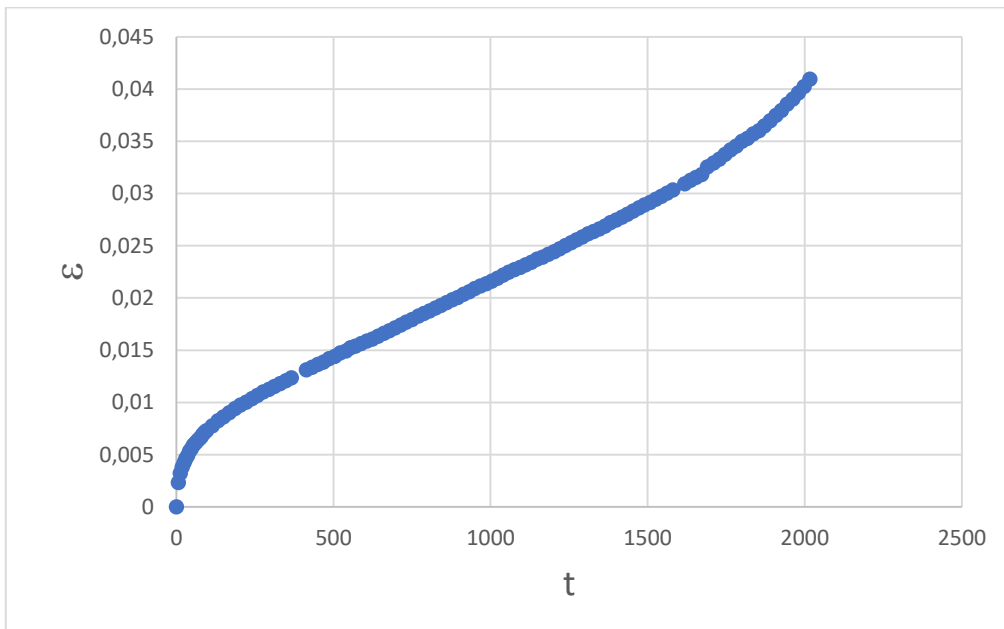


Figura 16 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e 200 MPa

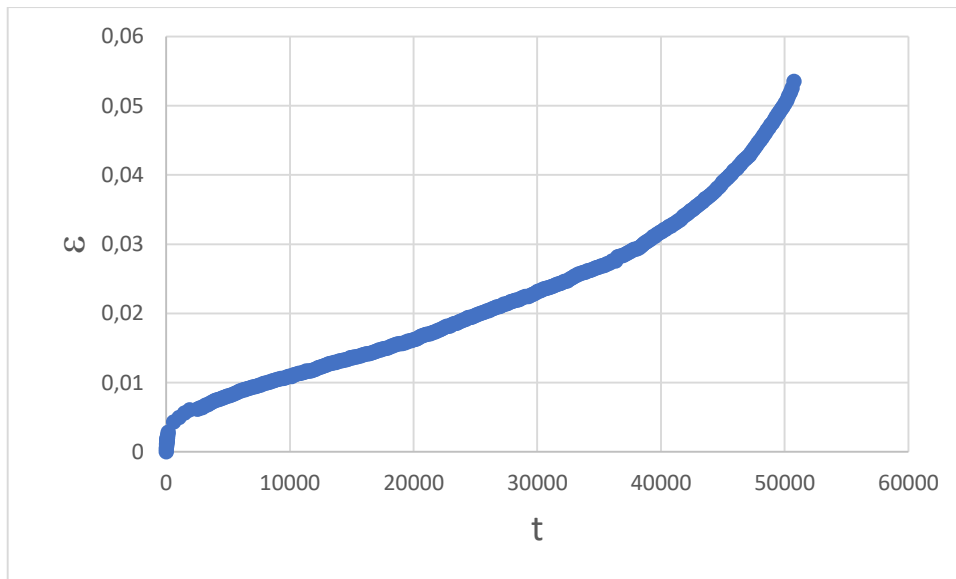


Figura 17 Grafico deformazione-tempo a 225 °C e 127 MPa

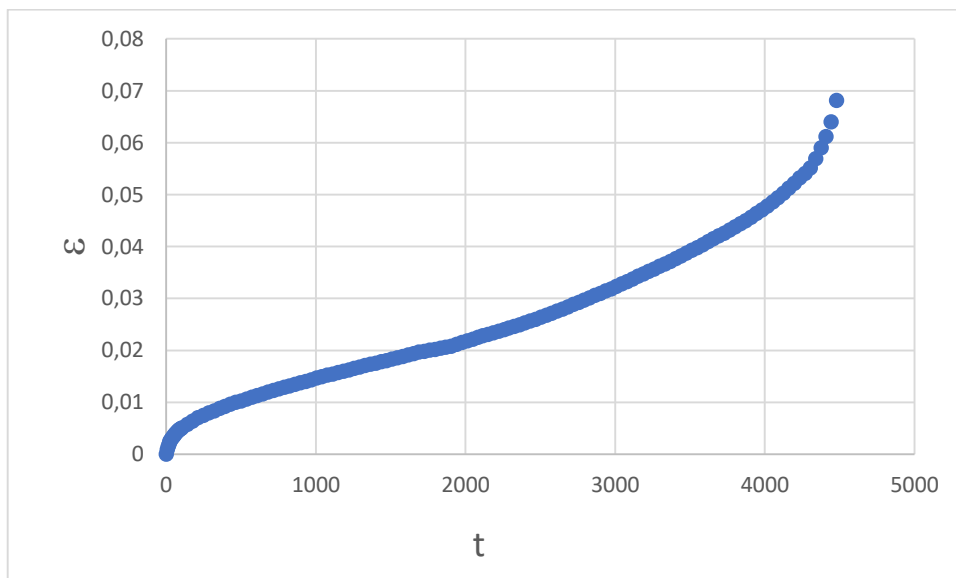


Figura 18 Grafico deformazione-tempo a 225 °C e 147 MPa

I grafici fin qui riportati sono relativi alle prove di creep a carico costante.

Le curve ottenute sono in linea con quelle canoniche: infatti in tutte le curve è possibile individuare il primario e il secondario, mentre il terziario è stato raggiunto solo nelle prove a rottura.

Al fine di ricavare le equazioni costitutive, i dati da analizzare sono quelli relativi al secondario ed è per questo motivo che gran parte delle prove sono state interrotte senza portare il campione a rottura.

Nel caso delle prove a carico variabile invece i grafici ϵ - t ottenuti sono i seguenti:

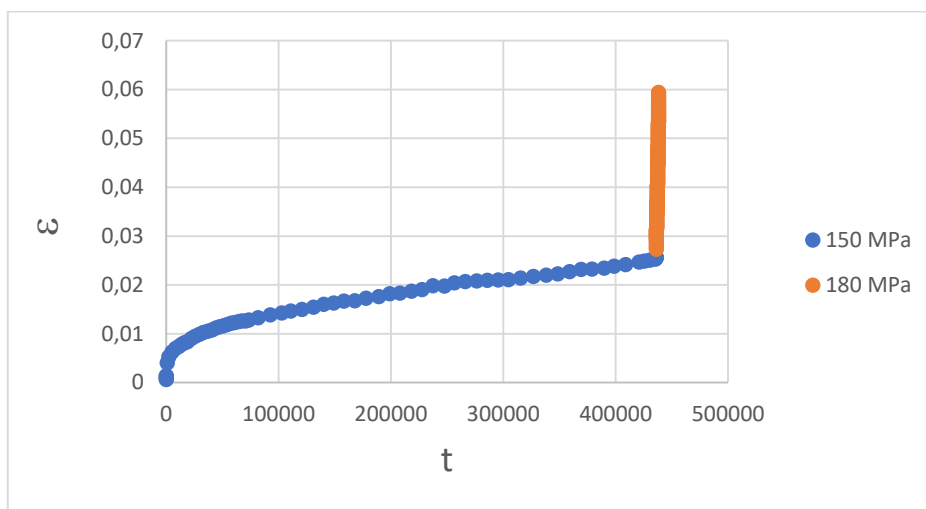


Figura 19 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e carico variabile

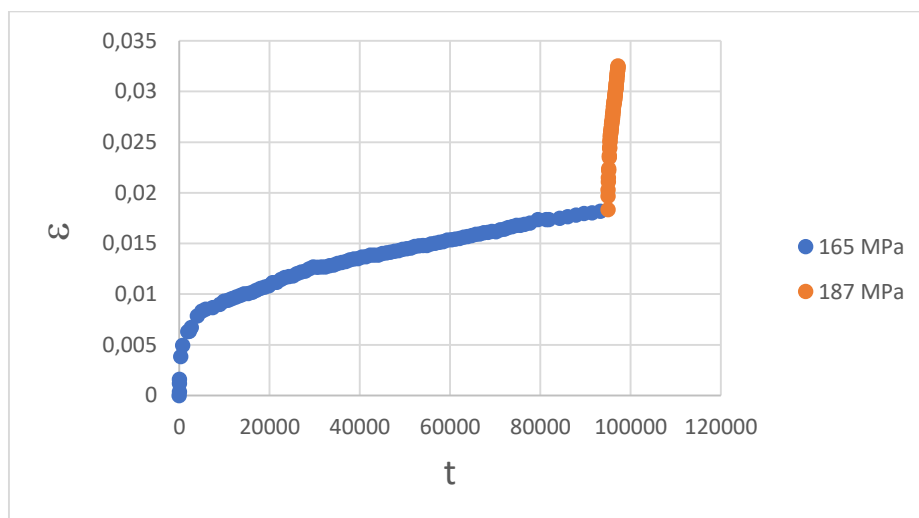


Figura 20 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e carico variabile

Visti nella loro interezza, i grafici ϵ -t delle prove a carico variabile si discostano dalle curve di creep canoniche, possono però essere divisi e considerati come curve ottenute da prove a carico costante.

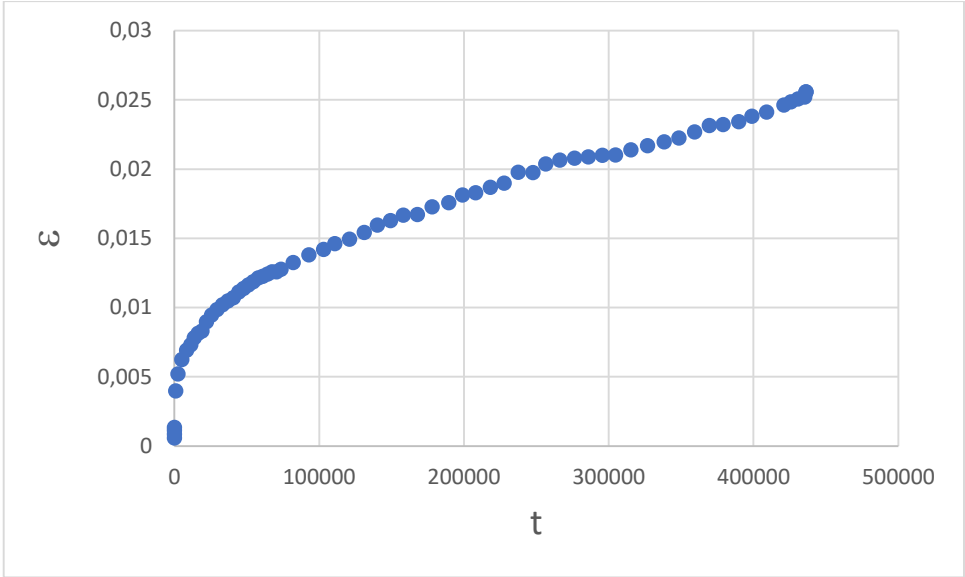


Figura 21 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e 150 MPa da prova a carico variabile

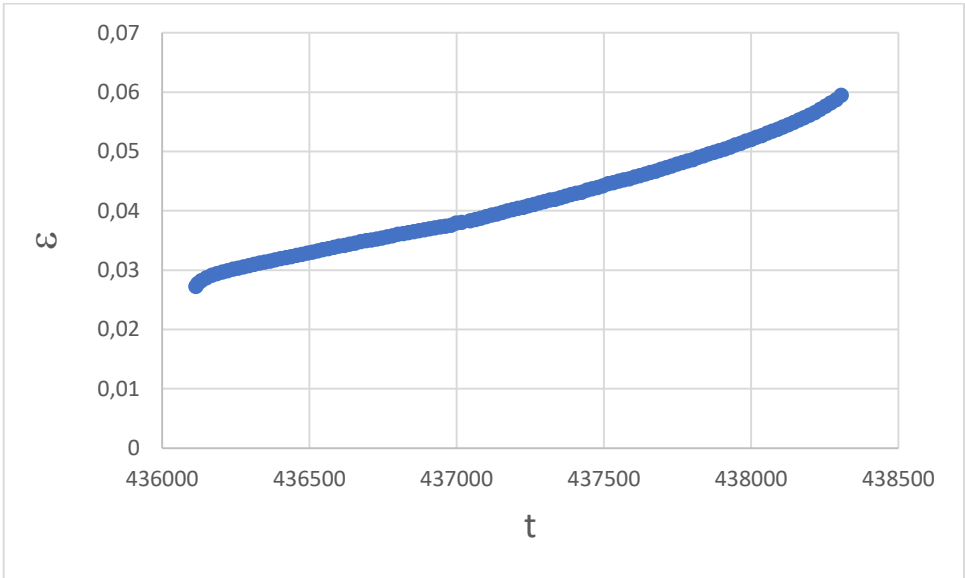


Figura 22 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e 180 MPa da prova a carico variabile

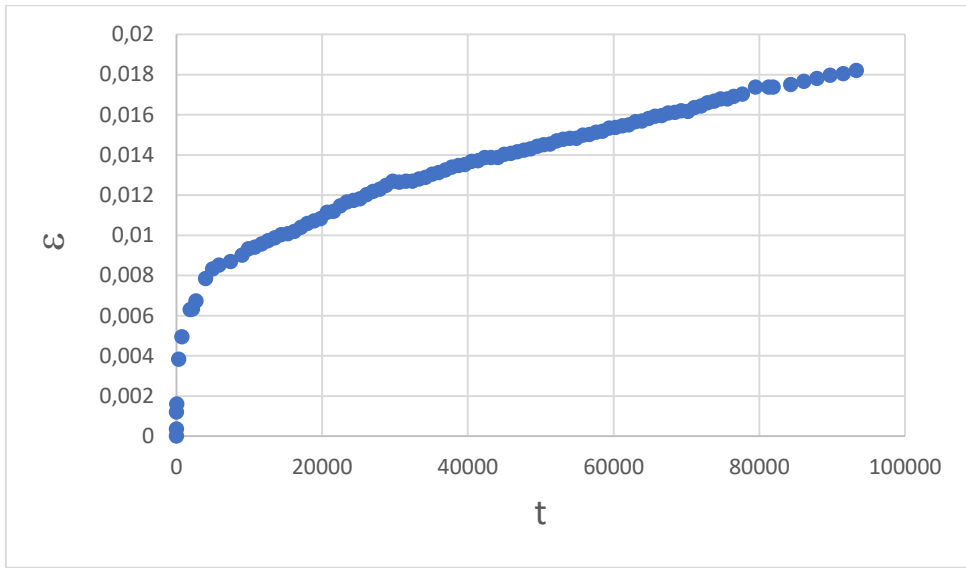


Figura 23 Grafico deformazione-tempo a 175 °C e 165 MPa da prova a carico variabile

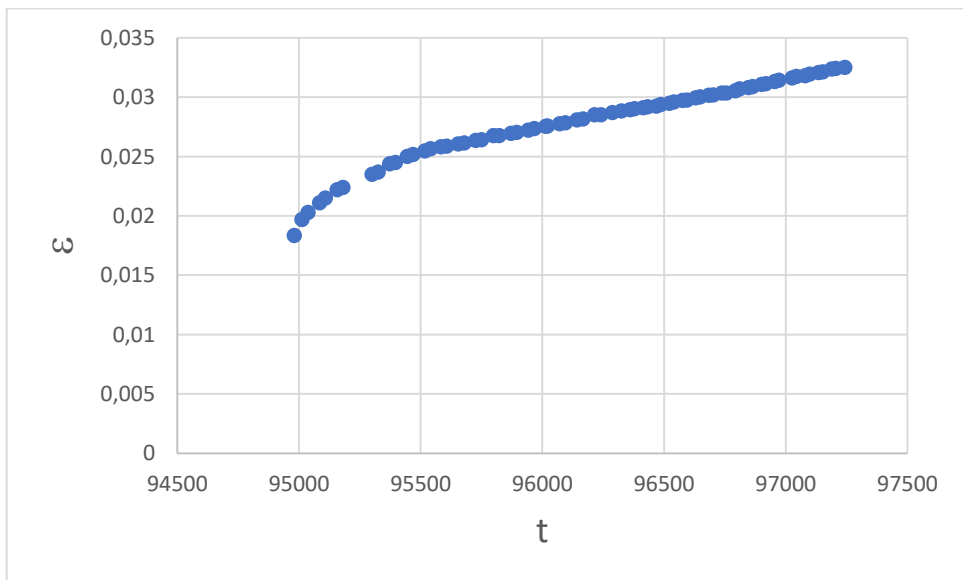


Figura 24 Grafico Deformazione-tempo a 175 °C e 187 MPa da prova a carico variabile

In ogni curva è stato isolato il secondario ed è stata tracciata la linea di tendenza in modo da ottenere la pendenza, ovvero la velocità di deformazione minima $\dot{\epsilon}_{ss}$, evidenziata in rosso nei grafici seguenti.

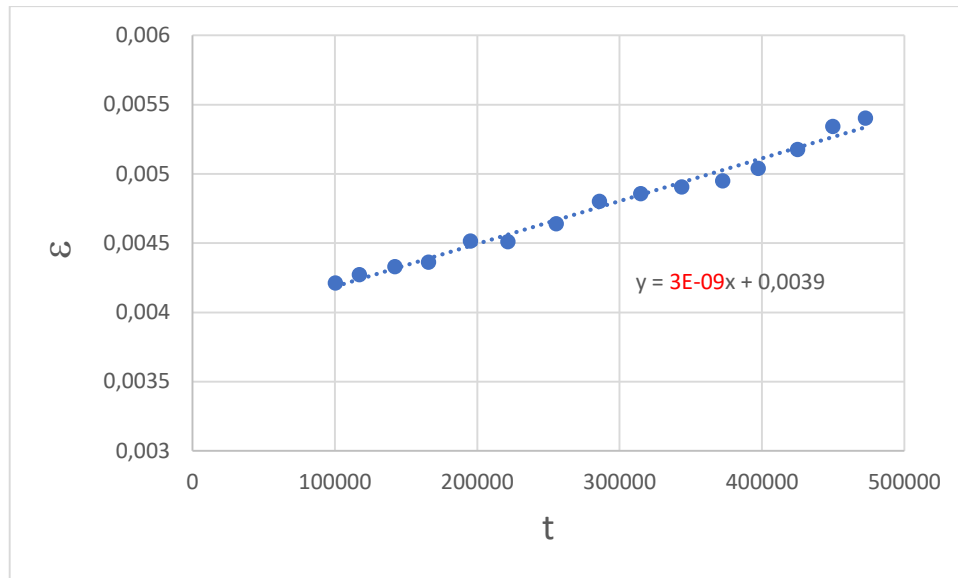


Figura 25 Velocità di deformazione minima a 150 °C e 150 MPa

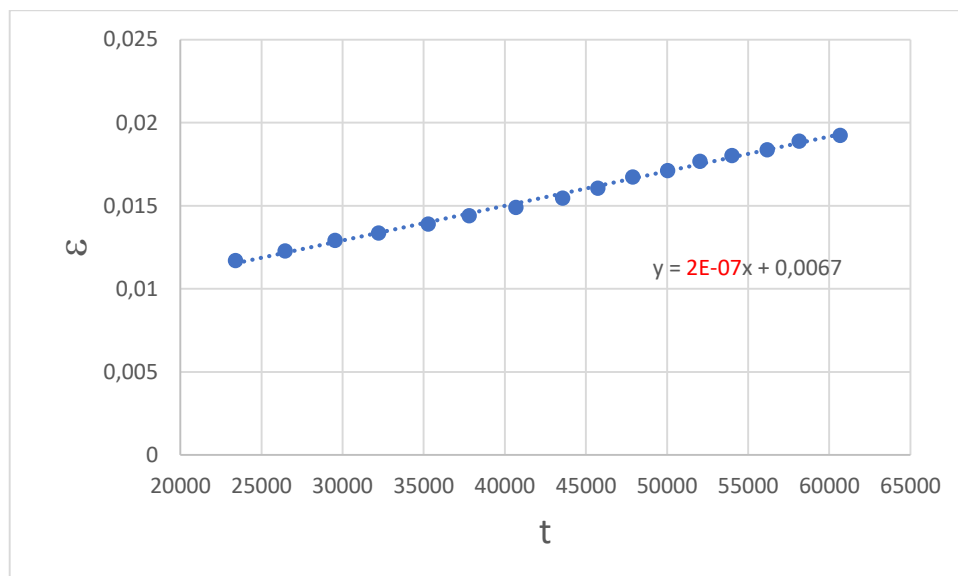


Figura 26 Velocità di deformazione minima a 150 °C e 190 MPa

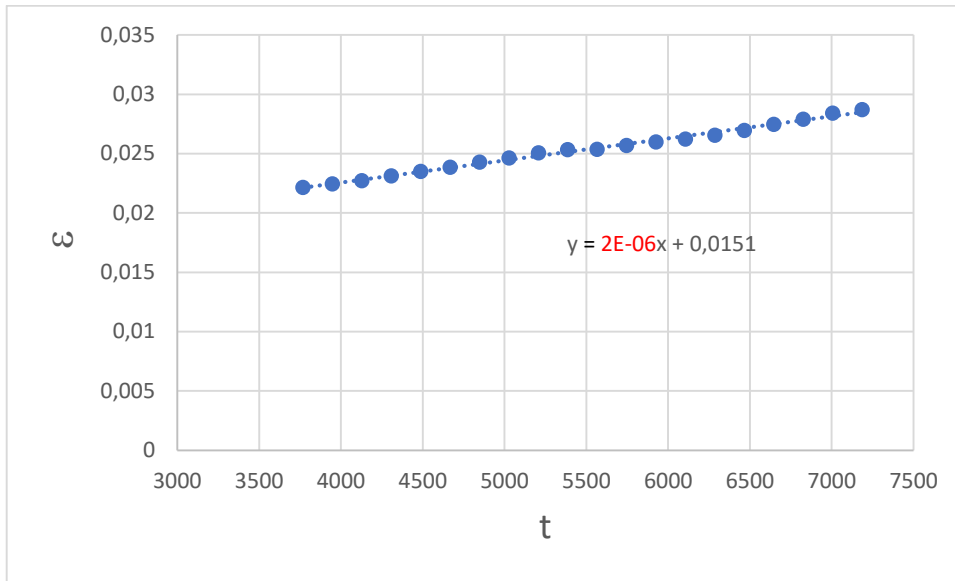


Figura 27 Velocità di deformazione minima a 150 °C e 200 MPa

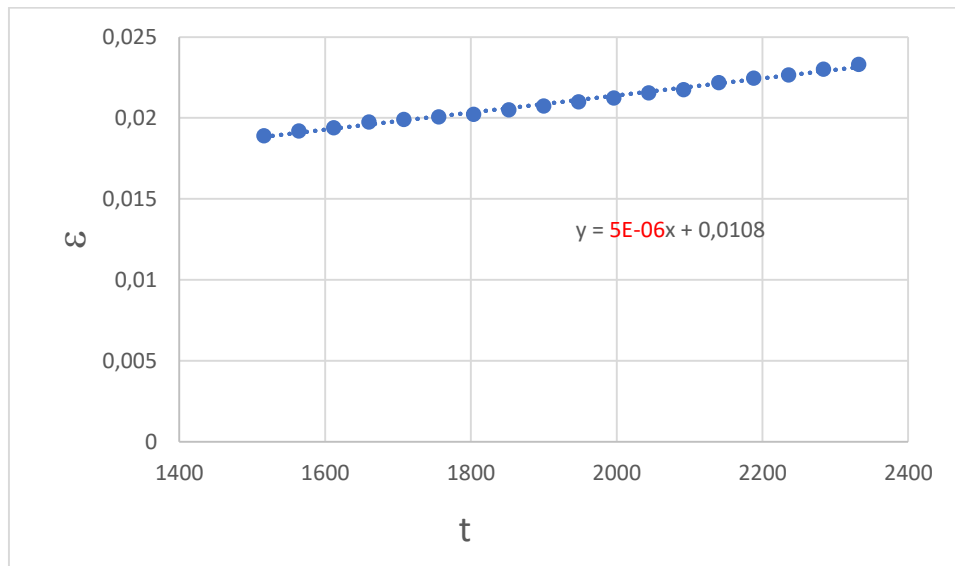


Figura 28 Velocità di deformazione minima a 150 °C e 210 MPa

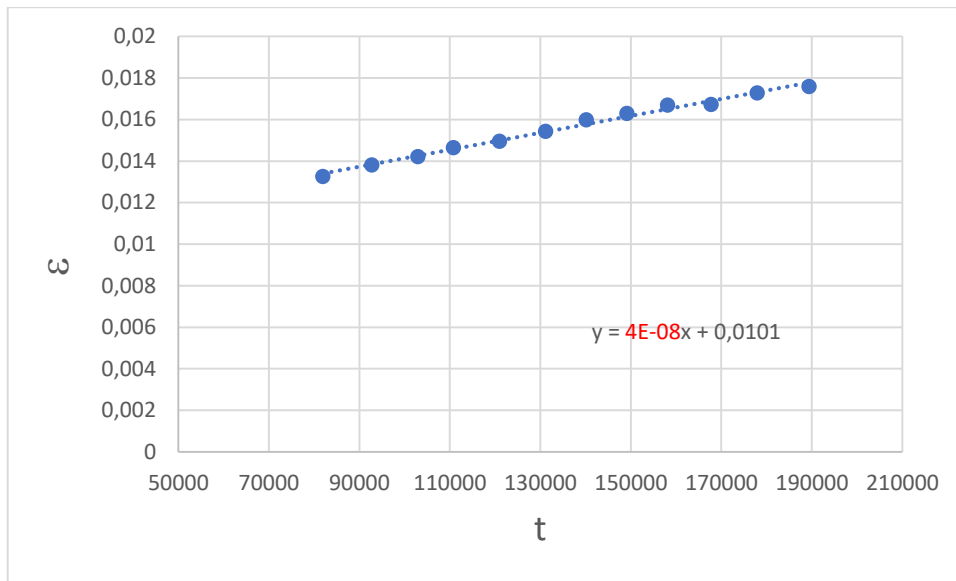


Figura 29 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 150 MPa (prova a carico variabile)

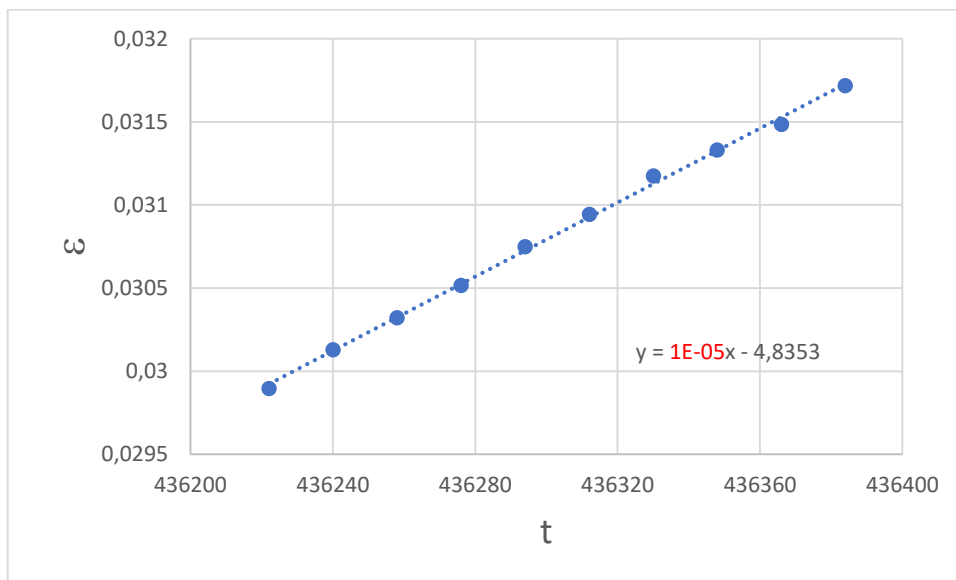


Figura 30 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 180 MPa (prova a carico variabile)

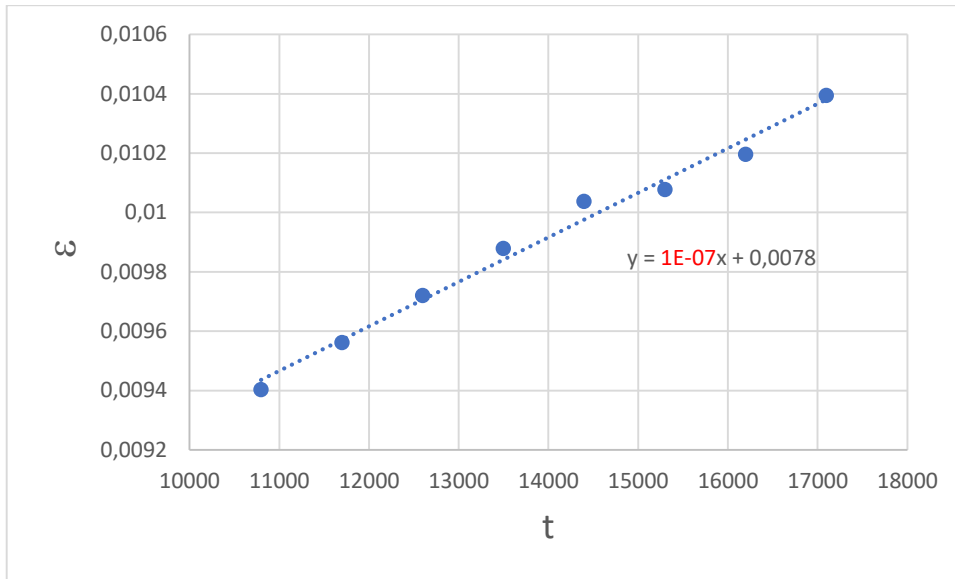


Figura 31 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 165 MPa (prova a carico variabile)

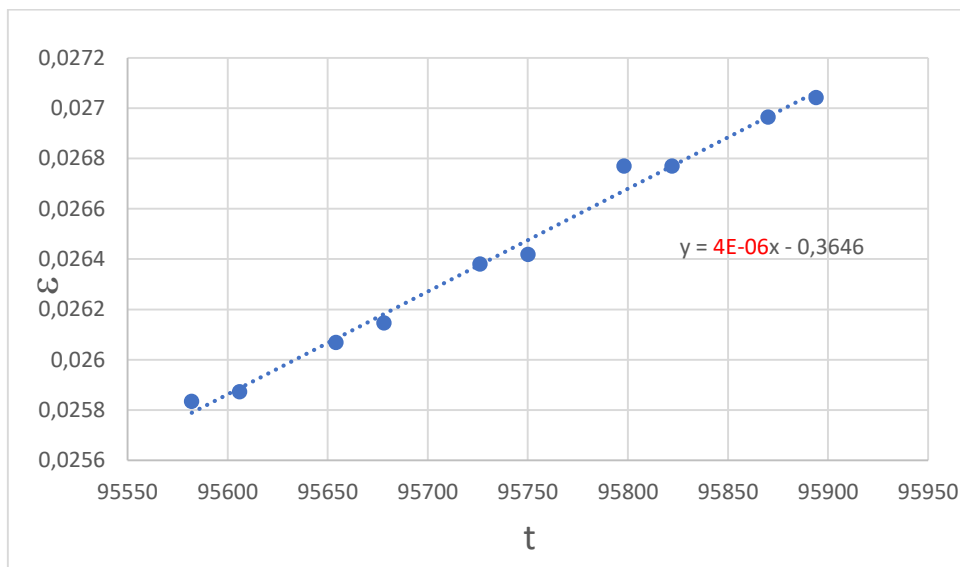


Figura 32 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 187 MPa (prova a carico variabile)

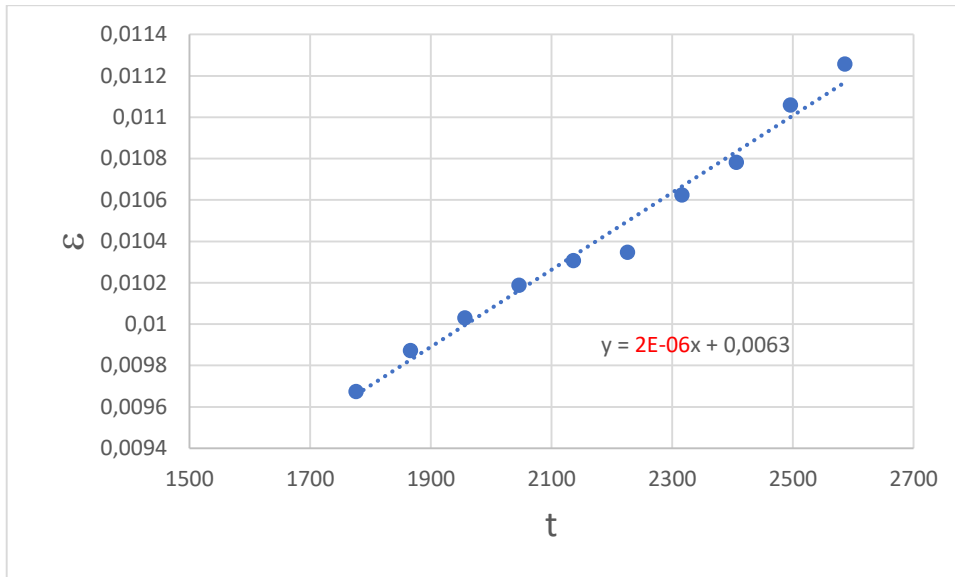


Figura 33 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 180 MPa

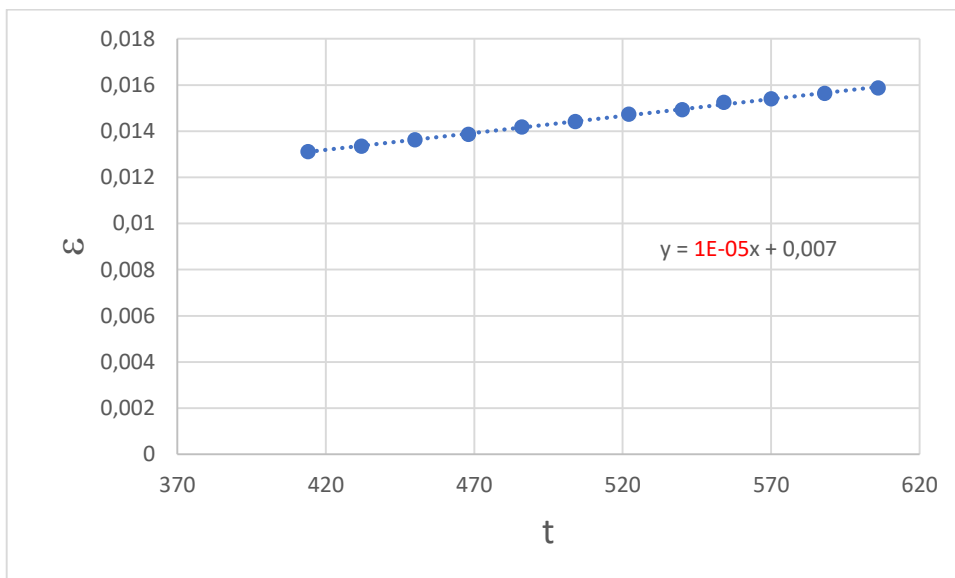


Figura 34 Velocità di deformazione minima a 175 °C e 200 MPa

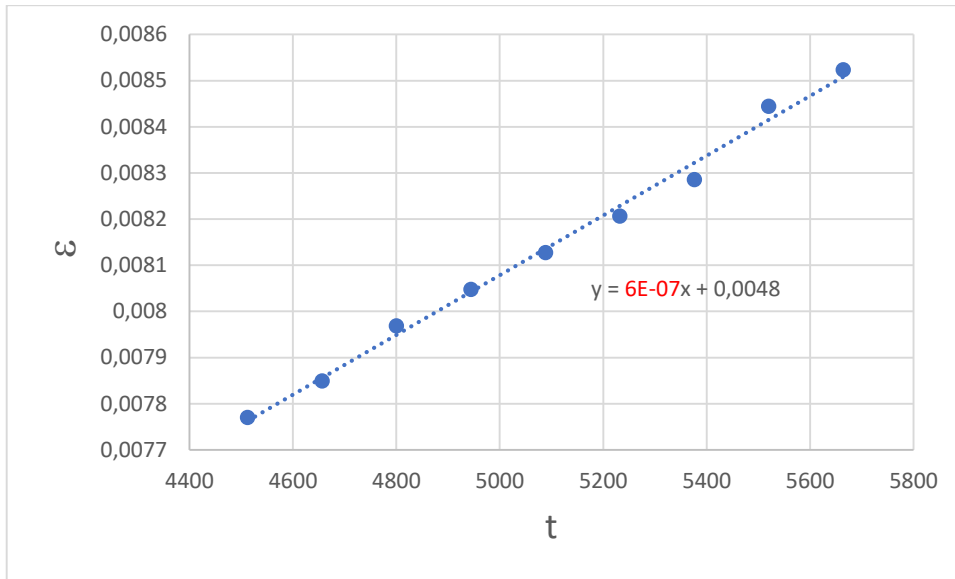


Figura 35 Velocità di deformazione minima a 225 °C e 127 MPa

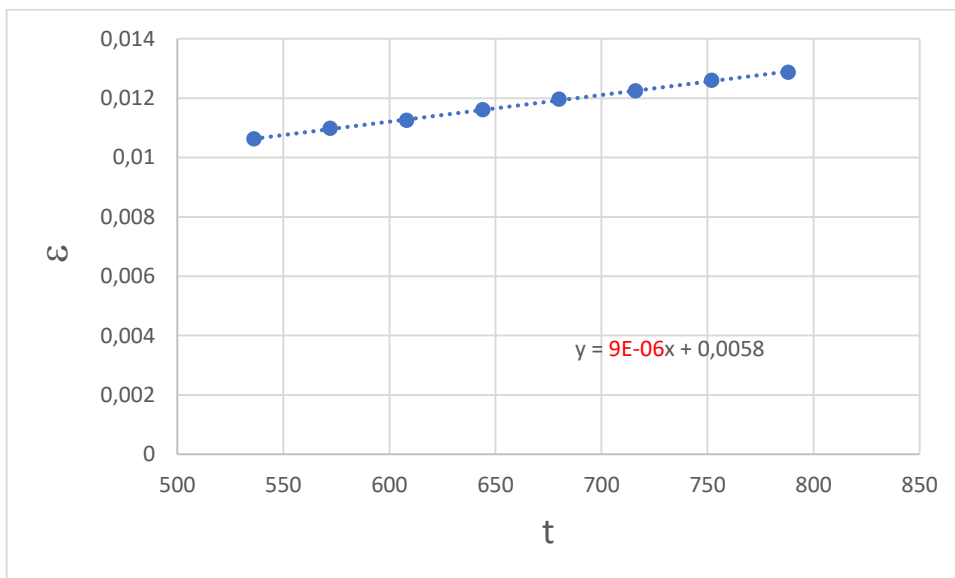


Figura 36 Velocità di deformazione minima a 225 °C e 147 MPa

I dati ottenuti sono riassunti nella Tabella 2.

T [°C]	σ [Mpa]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]
150	150	3E-09
150	190	2E-07
150	200	2E-06
150	210	5E-06
175	150	4E-08
175	165	1E-07
175	180	1E-05
175	180	2E-06
175	187	4E-06
175	200	1E-05
225	127	6E-07
225	147	9E-06

Tabella 2

I valori trovati sono stati inseriti in un grafico bilogaritmico $\dot{\epsilon}$ - σ in cui sono state tracciate anche le linee di tendenza.

Nelle successive analisi non è stato considerato il valore della velocità di deformazione minima ottenuto dalla prova di creep a carico variabile a 175°C e 180 MPa poiché non risulta in linea con i valori di $\dot{\epsilon}$ ottenuti dalle altre prove. Questo discostamento dal valore atteso può essere imputato al fatto che il campione aveva già subito una deformazione dovuta all'applicazione del carico precedente.

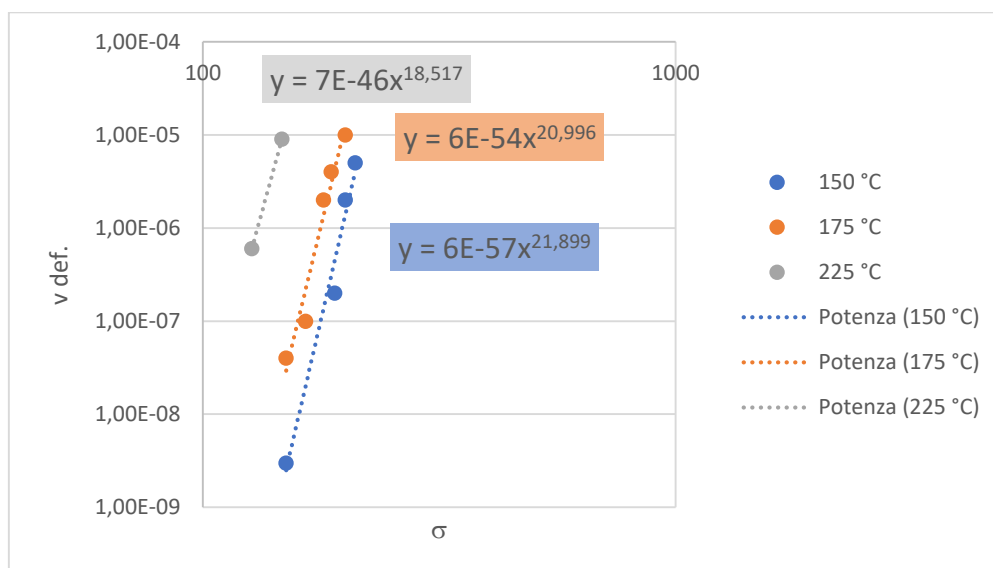


Figura 37 Grafico $\dot{\epsilon}$ - σ

Dalle equazioni visualizzate sul grafico $\dot{\epsilon}$ - σ , per analogia con l'equazione (1), è possibile ricavare i valori di B e n alle varie temperature (Tabella 3).

T [°C]	n	B
150	22	6E-57
175	21	6E-54
225	19	7E-46

Tabella 3

Successivamente è stata calcolata l'energia di attivazione Q [kJ/mol] che rappresenta l'energia minima richiesta affinché il processo possa avere luogo.

Per calcolare Q sono stati considerati i valori della velocità di deformazione minima alle temperature di 150, 175 e 225 °C e allo stesso carico di prova. Il carico considerato è 150 MPa per le prove a 150 e 175 °C e 147 MPa, che può essere approssimato a 150 MPa, per la prova a 225 °C.

T [°C]	T [K]	1/T [1/K]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]
150	423	0,002364	3E-09
175	448	0,002232	4E-08
225	498	0,002008	9E-06

Tabella 4

I dati della Tabella 4 sono stati riportati in un grafico semilogaritmico $\dot{\epsilon}$ -1/T e sono stati interpolati con una curva esponenziale.

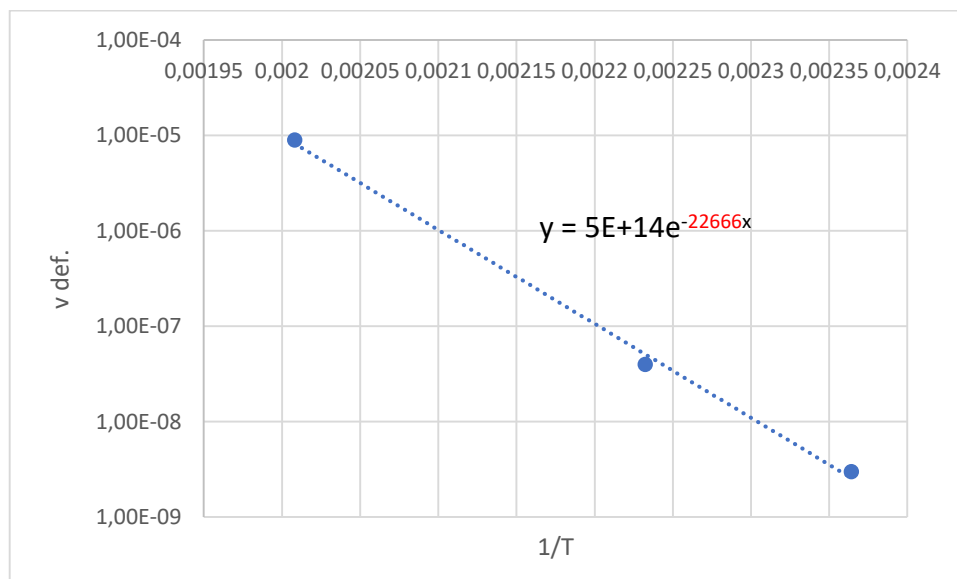


Figura 38 Grafico $\dot{\epsilon}$ -1/T

Notando l'analogia con l'equazione (2) è stata calcolata l'energia di attivazione moltiplicando l'esponente evidenziato in rosso in Figura 38 per la costante universale dei gas ($R=8,314 \times 10^{-3}$ kJ/molK). Il valore dell'energia di attivazione così ottenuto è $Q=188$ kJ/mol.

Dopo aver calcolato Q è stato possibile calcolare il parametro di Zener-Hollomon ($Z=\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$) che rappresenta gli effetti combinati della velocità di deformazione e della temperatura.

T [°C]	σ [Mpa]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]	Zener-Hollomon
150	150	3E-09	4,9E+14
150	190	2E-07	3,3E+16
150	200	2E-06	3,3E+17
150	210	5E-06	8,2E+17
175	150	4E-08	3,3E+14
175	165	1E-07	8,3E+14
175	180	2E-06	1,7E+16
175	187	4E-06	3,3E+16
175	200	1E-05	8,3E+16
225	127	6E-07	3,1E+13
225	147	9E-06	4,7E+14

Tabella 5

I dati della Tabella 5 sono stati riportati in un grafico $Z-\sigma$ bilogaritmico e sono stati interpolati con delle curve di potenza.

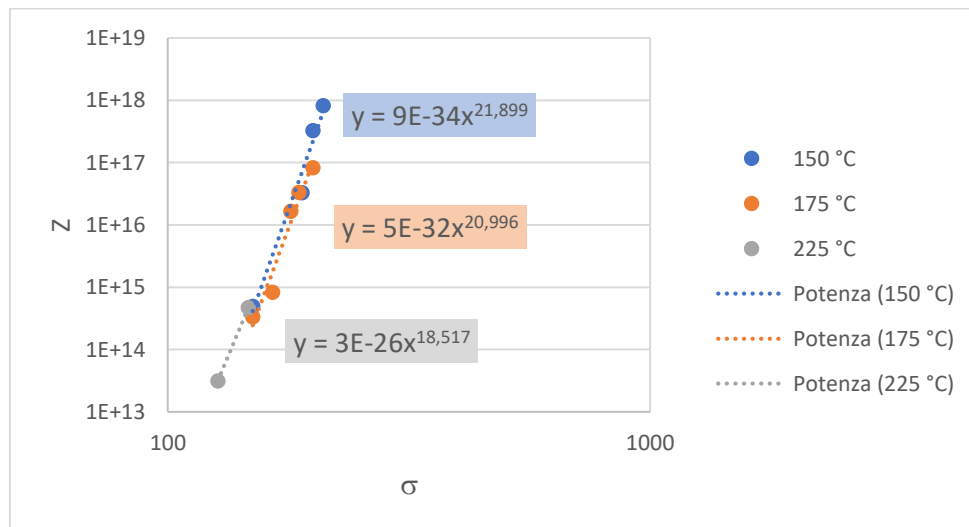


Figura 39 Grafico $Z-\sigma$

Dall'analisi delle equazioni ottenute dal grafico $Z-\sigma$ risulta che gli esponenti coincidono con i valori di n riportati in Tabella 4 e ricavati dall'analogia con l'equazione (1). Riportando i dati della Tabella 5 in un ulteriore grafico $Z-\sigma$ senza dividere i set di dati per temperatura è quindi possibile trovare un valore di n medio, evidenziato in rosso nel grafico di Figura 40.

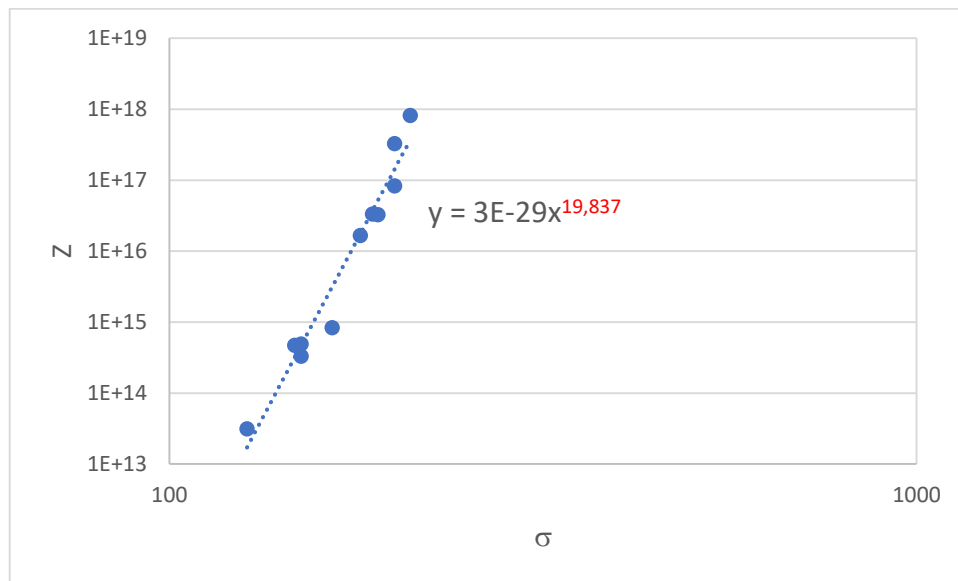


Figura 40 Grafico $Z-\sigma$

CONCLUSIONI

La risposta a creep di una lega AlSi10Mg è stata analizzata effettuando delle prove a carico costante alle temperature di 150, 175 e 225 °C e delle prove a carico variabile alla temperatura di 175 °C.

La dipendenza della velocità di deformazione minima dal carico applicato è descritta dall'equazione di Norton con n che va da 22 a 19 con l'aumentare della temperatura da 150 a 225 °C.

L'energia di attivazione del creep è $Q=188$ kJ/mol. I valori ottenuti in questa lega sono quelli tipici dei materiali simili prodotti attraverso tecnologie tradizionali, e sono indicativi del creep controllato dal climb in una lega rinforzata da particelle (Si).

BIBLIOGRAFIA

1. Trevisan F., Calignano F., Lorusso M., Pakkanen J., Aversa A., Ambrosio E.P., Lombardi M., Fino P., Manfredi D.; On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure and mechanical properties
2. Zhang J., Song B., Wei Q., Bourell D., Shi Y.; A review of selective laser melting of aluminium alloys: processing, microstructure, properties and developing trends
3. Paoletti C., Santecchia E., Cabibbo M., Cerri E., Spigarelli S.; Modelling the creep behavior of an AlSi10Mg alloy produced by additive manufacturing
4. Kempen K., Thijs L., Van Humbeeck J., Kruth J.P.; Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting
5. Spigarelli S., Metallurgia meccanica, Società Editrice Esculapio, cap 8