



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Risposta a creep del cordone di saldatura ottenuto per FSW  
di Titanio Puro

Creep response of the weld bead obtained for Pure Titanium  
FSW

Relatore: Prof.  
**Stefano Spigarelli**

Tesi di Laurea di:  
**Marta Ciccanti**

A.A. 2022/2023



# SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE</b>	5
<b>CAPITOLO 1- IL TITANIO</b>	5
1.1 GENERALITÀ SUL TITANIO	5
1.2 GRADI DI PUREZZA DEL TITANIO	6
1.3 LEGHE DI TITANIO	7
1.4 APPLICAZIONI	8
<b>CAPITOLO 2- IL PROCESSO DI FSW</b>	9
2.1 GENERALITÀ SUL PROCESSO	9
2.2 PARAMETRI DI PROCESSO	10
2.3 APPLICAZIONI	11
<b>CAPITOLO 3- IL CREEP</b>	12
3.1 GENERALITÀ SUL CREEP	12
3.2 TIPOLOGIE DI PROVE	13
3.3 IL MACCHINARIO DI PROVA	14
3.4 LA CURVA DI CREEP	15
3.5 ROTTURA PER CREEP	16
3.5.1 TEMPO A ROTTURA	17
3.6 METODI PER AUMENTARE LA RESISTENZA A CREEP	18
3.7 CREEP NEI METALLI PURI	19
<b>CAPITOLO 4- MATERIALI E PROCEDURE</b>	20
4.1 LUCIDATURA PROVINI	20
4.2 PROVA DI CREEP	21
4.3 ANALISI DUREZZA	22
<b>5. RISULTATI SPERIMENTALI</b>	23
5.1 CURVE DI CREEP	23
5.1.1 GRAFICI RELATIVI ALLE DIVERSE PROVE DI CREEP	23
5.2 ANALISI DI DUREZZA	35
<b>6- CONCLUSIONI</b>	37
<b>7- BIBLIOGRAFIA</b>	39



# INTRODUZIONE

Negli ultimi anni i processi di lavorazione sono cambiati e si sono innovati notevolmente. In particolare, da qualche decennio a questa parte hanno raggiunto livelli di modernizzazione mai visti prima.

Ciò si può affermare anche grazie all'invenzione di un particolare tipo di saldatura che renderà e ha già reso le lavorazioni più veloci e con una conseguente riduzione di costi e manifattura.

In questa tesi, quindi, sarà approfondita la trattazione di questo nuovo tipo di saldatura, in particolare sul titanio puro, e di come si comporta se sottoposta a sollecitazione ad alta temperatura (o creep).

## CAPITOLO 1- IL TITANIO

### 1.1 GENERALITÀ SUL TITANIO

Il titanio è l'elemento chimico della tavola periodica degli elementi che ha numero atomico 22 e simbolo Ti. [1]

Si riconosce grazie al suo particolare colore bianco metallico e lucido. Ha come proprietà la leggerezza, la duttilità e la resistenza alla corrosione.

Inoltre è un materiale polimorfo, cioè presenta due forme cristalline:

- Titanio  $\alpha$ : con reticolo esagonale compatto (EC) e stabile fino a 880°C
- Titanio  $\beta$ : con reticolo cubico a corpo centrato (CCC), stabile fra gli 880°C e la Tf.



Figura 1.1: Titanio metallico [1]

È un metallo che in natura non si trova allo stato puro, bensì sempre legato ad altri materiali. La scoperta del Titanio risale al 1790, quando lo studioso inglese William Gregor riuscì a individuarlo all'interno di un particolare minerale presente nelle rocce di origine lavica, ma non riuscì a isolarlo. A questo proposito, nel 1795, il chimico Heinrich Klaproth riuscì a isolarlo dai minerali di rutilio e dimostrò che si trattava dello stesso materiale individuato da Gregor 5 anni prima. [2]

## 1.2 GRADI DI PUREZZA DEL TITANIO

Il titanio puro utilizzato nella stragrande maggioranza dei campi, è il cosiddetto “titanio commercialmente puro”, ovvero con un grado di purezza del 99% e quell'1% rimanente varia in base a 4 gradi, i quali differiscono per resistenza e durabilità. In particolare, la prima aumenta e la seconda diminuisce all'alzarsi del grado.

I 4 gradi sono:

**Titanio di grado 1 (Ti 35A):** è uno dei gradi più morbidi e duttili che presenta la massima formabilità. Ha un'eccellente proprietà di resistenza alla corrosione, un'eccellente saldabilità ed è utilizzato in un'ampia varietà di applicazioni. Viene utilizzato principalmente nelle industrie marine e chimiche, ma è utilizzato anche per fabbricare anodi per applicazioni di protezione catodica. [3]

**Titanio di grado 2** (Ti 40A): leggermente più resistente del grado 1, ma ugualmente resistente alla corrosione per la maggior parte delle applicazioni. Se non è legato ha il miglior rapporto resistenza/peso di qualsiasi materiale resistente alla corrosione. Questo è uno dei gradi più comuni ed è utilizzato per scambiatori di calore, tubi del condensatore, impianti di sbiancamento nell'industria della carta e tubazioni dell'acqua per installazioni petrolifere offshore. Può essere utilizzato per parti che richiedono resistenza fino a 200°C e resistenza all'ossidazione fino a 320°C. [4]

**Titanio di grado 3** (Ti 55A): offre proprietà meccaniche leggermente superiori rispetto al grado 2, pur mostrando duttilità e formabilità simili. Solitamente viene utilizzato dove la resistenza alla corrosione è un importante fattore di progettazione. Può essere utilizzato per parti che richiedono stessa resistenza e resistenza all'ossidazione del titanio di grado 2. [5]

**Titanio di grado 4** (75A): è il titanio puro non legato con la resistenza più alta e con alto contenuto di ossigeno. Combina un'eccellente resistenza alla corrosione con una buona formabilità e saldabilità. Viene utilizzato principalmente nei tubi idraulici e, solitamente, viene scelto per la sua resistenza alla corrosione in una varietà di apparecchiature di processo chimico, ma anche per applicazioni marine e aeronautiche. [6]

### 1.3 LEGHE DI TITANIO

Come già detto, il titanio naturalmente si trova legato ad altri materiali e questa unione forma diverse leghe.

In particolare, le leghe più importanti sono:

-**Leghe  $\alpha$** : hanno una buona saldabilità e mantengono le medesime caratteristiche meccaniche anche a elevate temperature di esercizio, grazie all'elevato contenuto di alluminio. L'unico problema è che non possono essere sottoposte a nessun trattamento termico;

-**Leghe  $\beta$** : hanno una saldabilità molto limitata o nulla ma garantiscono le migliori proprietà meccaniche. Vengono impiegate nelle costruzioni di bulloni, molle e parti fortemente sollecitate;

-**Leghe  $\alpha+\beta$** : sono le leghe più utilizzate in quanto presentano elevate caratteristiche meccaniche e sono anche largamente usate nella produzione di parti per aerei. [7]

## 1.4 APPLICAZIONI

Il titanio è ampiamente utilizzato in diversi settori, sia puro che come lega.

In particolare, viene impiegato nel settore aeronautico, con la costruzione di motori a reazione e cellule aeronautiche; in campo automobilistico, con la realizzazione di parti mobili; nel campo delle bici da corsa, con la creazione di telai; nel campo biomedico, per gli impianti ortopedici, in quanto non reagisce all'interno del corpo. Inoltre, ha anche ampi usi in architettura, desalinizzazione e lavorazione di idrocarburi. I prodotti realizzati in titanio puro in queste applicazioni richiedono un'elevata lavorabilità che le leghe non possono fornire.



Figura 1.2: telaio in titanio di una bici da corsa

# CAPITOLO 2- IL PROCESSO DI FSW

## 2.1 GENERALITÀ SUL PROCESSO

Il processo Friction Stir Welding (FSW) venne brevettato nel 1991 in Inghilterra dal The Welding Institute (TWI) come una tecnica di giunzione allo stato solido ed è stata inizialmente applicata alle leghe di alluminio. [8]

Tale tecnologia ha mostrato molte potenzialità, in quanto, nel materiale da saldare, non viene raggiunta la temperatura di fusione classica raggiunta, invece, negli altri tipi di saldature, ma si arriva solo al 75/80% di questa. In questo modo si possono evitare difetti come porosità, inclusioni di gas e formazione di cricche da solidificazione. Inoltre, la FSW, permette di ottenere giunzioni con caratteristiche meccaniche più elevate e garantisce un considerevole aumento della vita a fatica del giunto, aspetto che risulta particolarmente significativo data la scarsa resistenza alle vibrazioni delle altre tipologie di giunzione. [9]

È una tecnica che viene apprezzata per precisione di lavorazione, duttilità di impiego per la giunzione ibrida di leghe diverse e, inoltre, permette un miglioramento della resistenza meccanica. Può essere definita una “green technology” per la sua efficienza energetica e il rispetto dell’ambiente, dal momento che non necessita dell’utilizzo di gas di assistenza e non produce, di conseguenza, fumi potenzialmente nocivi. Infine, permette di ridurre costi e tempi di manifattura, in quanto consente di ottenere giunti saldati senza la necessità di introdurre degli organi di collegamento. [10]

La giunzione dei due pezzi avviene attraverso un particolare utensile che penetra in parte nel materiale, genera calore per attrito ruotando ed effettua un’azione di rimescolamento, creando così una continuità metallica simile a quella ottenuta con i classici procedimenti per fusione. La temperatura raggiunta non permette di portare a fusione il materiale ma solo di ottenerne uno stato viscoso-plastico. [9]

L’utensile, utilizzato per la giunzione dei due pezzi, è costituito tipicamente da:

- una spalla rotante a sezione circolare, che garantisce il contenimento del materiale plasticizzato;
- un pin (o perno) cilindrico o conico, scanalato o meno, responsabile del rimescolamento del materiale in lavorazione.

La mancanza di materiale fuso lungo il giunto, migliora le caratteristiche meccaniche, ma risulta essere un problema per la durata della vita utile dell'utensile.

Infatti, quest'ultimo è soggetto all'azione di carichi e temperature elevate, in special modo per la giunzione di metalli particolarmente duri, quali acciai e leghe di titanio.

I materiali saldati tramite Friction Stir Welding presentano delle zone con microstruttura e proprietà diverse fra loro:

- il nugget, la zona termo-meccanicamente alterata;
- la zona termicamente alterata;
- il metallo base. [11]

## 2.2 PARAMETRI DI PROCESSO

I parametri di processo nel FSW hanno una valenza generale indipendentemente dal tipo di materiale che si va a trattare e sono: [8]

- **la geometria dell'utensile**: aspetto che condiziona notevolmente la riuscita ottimale del processo;
- **la velocità di rotazione dell'utensile attorno al proprio asse**: genera un mescolamento del materiale, prima attorno al pin rotante e poi intorno alla spalla (shoulder). Più la velocità è elevata e più si alza la temperatura, a causa dell'attrito;
- **la velocità di avanzamento dell'utensile, o velocità di saldatura**: fa muovere il materiale precedentemente mescolato dalla parte anteriore alla parte posteriore del pin. Ciò consente la generazione di due tipologie differenti di giunti: giunti "caldi" (velocità di avanzamento dell'utensile relativamente basse, così il calore generato per attrito può diffondersi completamente nella parte di materiale non ancora saldata) e giunti "freddi" (velocità di saldatura piuttosto elevata e calore generato per attrito non basta per plasticizzare completamente il pezzo);
- **l'affondamento, o profondità di immersione, dell'utensile nel materiale da saldare (target depth)**: è legata all'altezza dell'utensile e non può essere né insufficiente, perché sennò la rotazione della spalla non riesce a muovere il materiale mescolato; e non può essere neanche eccessiva perché altrimenti si genererebbe un cordone di saldatura con un eccessivo bordo laterale;
- **la forza assiale esercitata dalla macchina sull'utensile**: può essere di tipo dipendente o indipendente in base alla macchina utilizzata per eseguire il processo;
- **l'angolo di inclinazione dell'utensile (tilt angle)**: la giusta inclinazione verso la direzione opposta a quella di avanzamento comporta un maggior apporto di calore, una maggiore facilità di avanzamento e una maggior azione di contenimento della spalla.

Questi parametri di processo esercitano effetti significativi sulla conformazione del flusso di materiale e sulla distribuzione di temperatura, e sono differenti per ogni tipo di materiale che vogliamo utilizzare.

## 2.3 APPLICAZIONI

Come già detto, la FSW è adatta per la giunzione di leghe di alluminio, titanio, magnesio, acciaio e metalli dissimili altrimenti difficilmente saldabili con altre tecniche. Per questo motivo è una delle tecniche di giunzione più utilizzate nel campo dell'industria aeronautica, in quanto permette di superare tutti i problemi collegati alle trasformazioni di fase dei processi di giunzione allo stato fuso. [12]

I campi di applicazione della saldatura per FSW sono numerosi, tra cui abbiamo quello automobilistico, navale e ferroviario.

La prima azienda ad utilizzare questa tecnica fu l'azienda giapponese HITACHI nello sviluppo dei "treni-proiettile".

Grande utilizzo lo vediamo, anche, nel campo automobilistico per aziende come Audi o Tesla; ma è stato utilizzato da Elon Musk anche nella progettazione dello Space X.

E' una tecnologia già sviluppata e utilizzata all'estero, ma in Italia è poco conosciuta a causa della scarsa fiducia, da parte degli imprenditori, nelle innovazioni.

L'unica azienda italiana ad aver accolto questa innovazione è stata "Fpt Industrie", che produce macchine alesatrici e fresatrici a controllo numerico.

Questa azienda ha avuto il primato di inventare la "StirRob", ovvero la prima soluzione robotizzata dedicata alla FSW. E' stata una grande innovazione, in quanto ha ridotto i costi e i tempi di lavorazione nel campo, perché tutto il lavoro è stato affidato a dei robot già programmati che, a differenza del lavoro umano, difficilmente sbagliano.



Figura 2.1: cordone di saldatura

# CAPITOLO 3- IL CREEP

## 3.1 GENERALITÀ SUL CREEP

Negli ultimi 40 anni abbiamo visto il graduale passaggio dalla conduzione di prove di creep “tradizionali” (in cui il dato più importante era il tempo di rottura e, al massimo, il campione veniva misurato periodicamente, a volte interrompendo la prova), a quelle più recenti, in cui la deformazione è registrata in modo continuo.

Il termine creep, indica una deformazione di carattere permanente, che aumenta nel tempo quando un materiale viene sottoposto ad un carico costante ad elevata temperatura. Inoltre, questo è un fenomeno tipico di tutti i metalli, purché la temperatura abbia un valore superiore ad un limite identificabile nel 30-50% della temperatura assoluta di fusione ( $T_f$ ). [13]

La classica relazione,  $\varepsilon=f(\sigma)$ , che vedeva la deformazione in funzione della sola tensione non è più sufficiente a spiegare il fenomeno molto più complesso del creep, ma si ha bisogno di relazioni che tengano conto degli effetti termici e del tempo di applicazione delle sollecitazioni che innescano il fenomeno dello scorrimento viscoso:  $\varepsilon=f(\sigma, T, t)$ . [13]

Il creep è solitamente fonte di preoccupazione per ingegneri e metallurgisti nella valutazione di componenti che operano in condizioni di temperatura e stress elevato.

### 3.2 TIPOLOGIE DI PROVE

In genere 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. Nonostante questo problema, i dati così ottenuti sono particolarmente utili, in quanto in molti dei casi pratici è il carico sul componente a mantenersi costante in esercizio, e non la tensione. [14]

Esistono diversi tipi di prove di creep:

1- **Prove del tipo stress-rupture**: utilizza macchinari che non prevedono l'uso di sistemi di misura dell'allungamento; quindi, gli unici dati rilevati sono la deformazione a rottura e quanto tempo impiega per giungere a rottura. La maggior parte dei dati ricavati fino agli anni '80 è di questo tipo, ma ormai è una prova superata in quanto non fornisce indicazioni sulla deformazione da creep;

2- **Prove di creep interrotte**: prove di questo tipo vengono interrotte prima della rottura ad intervalli più o meno regolari. In passato, queste interruzioni avevano lo scopo di misurare la lunghezza del campione, che veniva scaricato, raffreddato, smontato, misurato, rimontato, riscaldato e ricaricato. Una procedura di questo tipo permetteva di ricavare informazioni sulla deformazione da creep, sia pure di qualità notevolmente inferiore rispetto a quelle ottenute da prove continue moderne, ma come nel caso precedente molti dati sono stati ricavati con questa procedura;

3- **Prove del tipo creep-rupture**: sono ormai le prove più diffuse e sono caratterizzate da un monitoraggio continuo dell'allungamento del campione. I dati ottenuti da questa tipologia di prova permettono di ricavare informazioni sulla forma della curva da creep e sull'andamento della velocità di deformazione. [13]

Oltre a questo tipo di prove, una ulteriore classificazione delle metodologie di prova considera:

1- Il tipo di sollecitazione (trazione o compressione)

2- Il modo di applicazione del carico (prove del tipo a sollecitazione o a carico costante) [15]

Oppure si possono anche fare prove a lungo termine (più di 50.000 ore), a medio termine (tra le 10.000 e le 20.000 ore) o a breve termine (tra le 1.000 e le 5.000 ore). A scopi scientifici vengono solitamente utilizzate le prove a breve termine, in quanto le prove a lungo termine sono troppo costose a livello di investimento.

### 3.3 IL MACCHINARIO DI PROVA

La macchina più comunemente utilizzata per le prove di creep è la macchina a carico costante. Questa è costituita da una piattaforma di carico, dispositivi di fissaggio, forno e sensori per il monitoraggio dell'allungamento del campione e la misurazione della temperatura in forno per tutta la durata della prova.

- La piattaforma di carico: genera la tensione desiderata tramite l'applicazione di pesi;
- Le prese: utilizzate per mantenere il materiale utilizzato in una determinata posizione.

Molto importante perché, se il provino non fosse perfettamente allineato, la macchina fornirebbe letture non corrette;

- Il forno: riscalda e mantiene la temperatura desiderata per tutta la durata della prova.

Inoltre l'utilizzo di una atmosfera inerte è importante quando il materiale presenta un'elevata risposta all'ossidazione e la dimensione del campione è molto piccola;

- I sensori: inviano i dati di temperatura e allungamento del campione alla macchina a intervalli regolari e prestabiliti. La misura della temperatura viene effettuata tramite termocoppie mentre la misura dell'allungamento viene per lo più effettuata tramite LVDT (Linear Variable Differential Transducer). [13]

### 3.4 LA CURVA DI CREEP

Dalla registrazione dei dati durante la prova di creep, è possibile ricavare la curva deformazione-tempo.

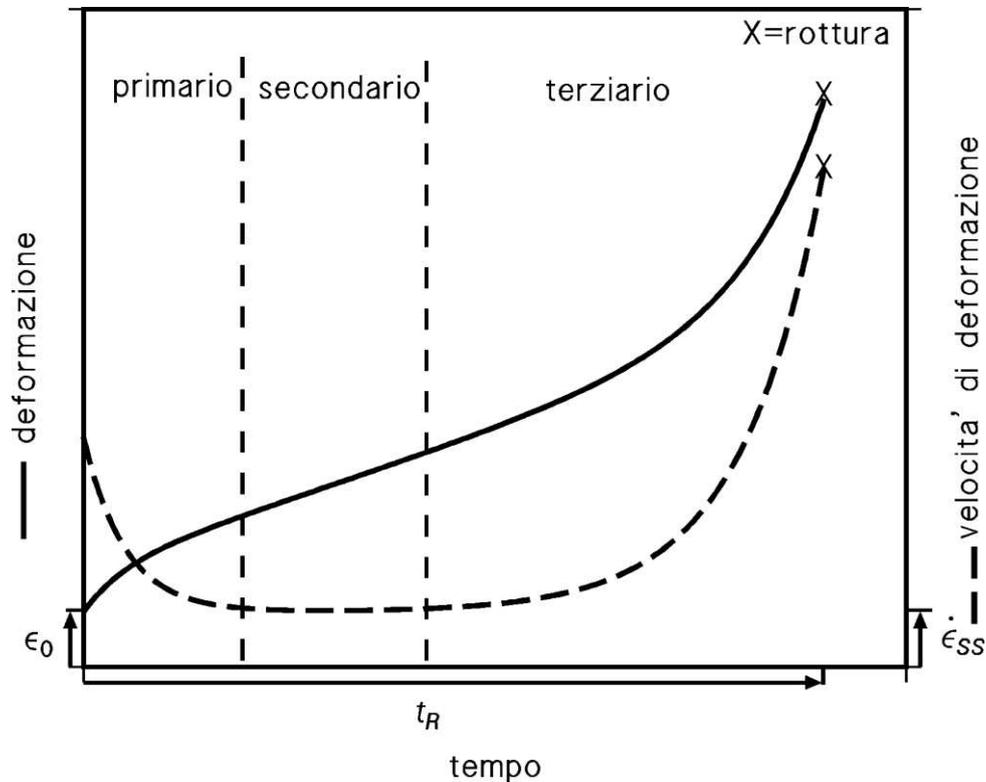


Figura 3.1: Curva tipica di creep: la linea continua mostra la deformazione in funzione del tempo, mentre la linea tratteggiata mette in relazione la velocità di deformazione con il tempo.

Dopo una deformazione istantanea  $\epsilon_0$ , questa deformazione aumenta in modo monotono fino ad arrivare a rottura  $\epsilon_R$ . Ciò viene descritto dalla seguente formula:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon(\sigma, T, t) \quad (1)$$

Solitamente, il grafico che esce fuori da una qualsiasi prova di creep, presenta tre diversi stadi:

- primario: in questa fase si ha un aumento della deformazione ( $\epsilon$ ) e una diminuzione della velocità di deformazione ( $\dot{\epsilon}$ ), cioè il materiale diventa sempre più difficile da deformare con il passare del tempo a causa dell'incrudimento (moltiplicazione delle dislocazioni);
- secondario: si stabilisce un equilibrio tra i fenomeni di rafforzamento (incrudimento) e addolcimento (ripristino). Viene detto anche stadio stazionario e in questa fase la deformazione procede a velocità costante ( $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{SS}$ ).

In alcuni casi questo stadio può essere veramente breve e ridursi a un punto;

- terziario: la deformazione aumenta rapidamente arrivando velocemente alla rottura. In questa fase il materiale comincia a danneggiarsi in maniera parecchio spiccata a causa del manifestarsi di una serie di fenomeni, come la cavitazione e la loro crescita, la formazione di cricche e infine la formazione della strizione. Tutti questi meccanismi portano ad un aumento della tensione effettiva e quindi ad un processo degenerativo e alla rottura. [13]

### 3.5 ROTTURA PER CREEP

La rottura di un provino di metallo sottoposto a creep può essere di diverso genere: o a causa del fenomeno della strizione, che ha come conseguenza una rottura simile a quella che si verifica nei materiali tenaci e duttili a temperatura ambiente; oppure si può verificare la rottura intergranulare senza che si manifesti la strizione, per cui è molto importante monitorare con continuità l'accumularsi del danno. Questo fenomeno è uno dei più tipici nel creep ed è dovuto allo slittamento del bordo del grano che crea delle microcavità posizionate sul bordo di grano in direzione perpendicolare a quella di carico. L'unione di queste microcavità porta alla formazione di cricche macroscopiche, le quali conducono a rotture di tipo intergranulare.

Il fenomeno può essere ridotto andando a limitare lo scorrimento dei grani, ma tale soluzione potrebbe risultare controproducente. quindi la soluzione ottimale sarebbe quella di favorire la formazione di una catena semi-continua di particelle, in maniera tale da ridurre gli effetti indesiderati. [15]

### 3.5.1 TEMPO A ROTTURA

Il valore più importante, dal punto di vista ingegneristico, per quanto riguarda il creep è il tempo a rottura. Questo valore può essere immediatamente collegato alla velocità di deformazione mediante questa relazione:

$$\dot{\epsilon}_{SS} \cdot t_R = C_R \quad (2)$$

Dove  $C_R$  è denominata costante di Monkman-Grant.

Questi valori sono sempre presenti nei grafici. Il problema sorge quando questi valori non sono presenti, per questo motivo sono stati studiati altri metodi, anche chiamati approcci parametrici.

[13]

Tra i più importanti approcci, troviamo il parametro di Larson-Miller (LMP), dove il tempo a rottura è espresso in funzione della tensione e della temperatura attraverso la seguente relazione:

$$t_R = B_0 \cdot \exp[Q(\sigma)/RT] \quad (3)$$

dove  $B_0$  è una costante.

Operando il logaritmo su entrambi i membri della relazione precedente:

$$\log t_R = \log B_0 + Q(\sigma)/RT \cdot \log e \quad (4)$$

E dopo alcuni semplici passaggi:

$$LMP = Q(\sigma)/2,3R = T(CLM \log t_R) \quad (5)$$

Dove il termine CLM è una costante e per la maggior parte dei metalli è pari a 20. [13]

Il parametro di Larson-Miller, benché usato con maggiore frequenza, non è l'unico parametro disponibile; si può citare Dorn-Orr-Sherby (DOSP), che ha come espressione:

$$DOSP = \log t_R - Q/2,3R \quad (6)$$

[15]

### 3.6 METODI PER AUMENTARE LA RESISTENZA A CREEP

Si possono dare alcune indicazioni, seguendo le quali, si possono sviluppare materiali con resistenza a creep più elevata rispetto ai metalli puri da soluzione solida. [15]

In particolare, nel caso del creep da dislocazioni, si può ridurre la mobilità delle dislocazioni introducendo ostacoli al loro moto e allo stesso tempo scegliere un materiale con punto di fusione elevato. [13]

Tenendo a mente i classici metodi di rafforzamento a temperatura ambiente (affinamento del grano, incrudimento e precipitazione di particelle di seconde fasi), si possono dare indicazioni di carattere molto generale riguardo l'argomento: [13]

–una riduzione della dimensione del grano è vantaggiosa a temperatura ambiente, perché aumenta la resistenza, ma può essere controproducente ad alta temperatura, in regime di creep;

–l'incrudimento è un metodo valido a bassa temperatura per aumentare la resistenza, ma non è applicabile ai materiali resistenti al creep, in quanto la struttura incrudita ripristina (o addirittura ricristallizza) molto facilmente;

–la precipitazione di particelle è il solo metodo che produca un innalzamento della resistenza meccanica rilevante sia a temperatura ambiente che a temperature relativamente elevate.

Nondimeno, la prolungata esposizione ad elevata temperatura causa l'accrescimento competitivo o addirittura, se la temperatura è eccessivamente elevata, la dissoluzione dei precipitati.

### 3.7 CREEP NEI METALLI PURI

La relazione fondamentale che descrive al meglio il creep nei metalli puri è la seguente:

$$\dot{\epsilon}_{SS} = A_0 D G b / k T (b/d)^p (\sigma/G)^n \quad (7)$$

in cui  $D$  è il coefficiente di autodiffusione per i metalli puri (cioè l'energia di attivazione per la diffusione delle vacanze),  $d$  è la dimensione del grano,  $b$  è la lunghezza del vettore di Burgers,  $k$  è la costante di Boltzmann,  $G$  è il modulo di taglio e  $A_0$  costante del materiale (il vettore di Burgers è utilizzato per fare in modo che  $A_0$  sia adimensionale).

Lo scorrimento delle dislocazioni, nei metalli puri, è un meccanismo relativamente rapido, ed è quindi il salto a rappresentare la fase lenta: si ha in queste condizioni il creep controllato dal climb, che è anche detto creep controllato dal ripristino (climb-controlled o recovery-controlled creep).

[13]

## CAPITOLO 4- MATERIALI E PROCEDURE

Nel presente paragrafo, vengono descritte le diverse procedure svolte per l'esecuzione delle prove sui campioni di cp\_Ti, ottenuti per Friction Stir Welding (saldatura per attrito).

Le prove di creep sono state effettuate alla temperatura di 550°C con diversi tipi di carico: 40, 90, 100, 120, 130 e 170 MPa; i campioni sono stati testati a rottura, tranne in alcuni casi in cui il test è stato interrotto all'inizio del terziario.

### 4.1 LUCIDATURA PROVINI

Prima di procedere alla prova di creep i campioni al termine del trattamento termico hanno subito una fase di finitura superficiale. I campioni, al termine del processo di FSW, presentano una superficie poco regolare, se non adeguatamente lavorata, potrebbe influenzare le prestazioni del campione nella prova di creep.



Figure 4.1: A sinistra provino appena estratto dal cordone di saldatura ; a destra provino lucidato per ottenere una finitura superficiale adeguata prima di subire la prova di creep.

## 4.2 PROVA DI CREEP

Nel momento in cui il campione ha raggiunto la finitura superficiale adeguata alla prova di creep, si procede alla misurazione del campione prima di procedere alla prova.

Al termine della misurazione del campione, si procede al suo inserimento all'interno della macchina.

Una volta inserito il campione, si procede alla chiusura della macchina riportando il forno a muffola in posizione e si procede con l'applicazione del carico per la prova.

A questo punto si avvia la prova di creep, in particolare nella presente trattazione sono state e seguite le seguenti prove:

Campione	<b>550 °C</b>
<b>A</b>	40 MPa
<b>B</b>	90 MPa
<b>C</b>	100 MPa
<b>D</b>	120 MPa
<b>E</b>	130 MPa
<b>F</b>	170 MPa

Tab. 4.1: tabella della prova di creep

Durante la prova di creep sono presenti delle termocoppie, che permettono di monitorare costantemente la temperatura all'interno del forno, che circonda il campione durante la prova.

Inoltre, grazie alla presenza di sensori LVDT è possibile avere una misura costante dell'allungamento del campione durante la prova, tutti questi dati poi vengono raccolti all'interno del foglio di calcolo di Excel ed elaborati, i dati elaborati sono riportati nel Capito 5 della presente trattazione.

La prova termina con la rottura del campione o in alcune delle prove eseguite, l'analisi viene interrotta quando il campione è giunto nello stadio terziario del creep.

### 4.3 ANALISI DUREZZA

In seguito, si può procedere allo studio della durezza; questa fase risulta essere molto importante in quanto permette di quantificare l'evoluzione delle proprietà meccaniche dovuta all'esposizione ad alta temperatura. Per tale studio sono state effettuate misurazioni di durezza Brinell sulla testa del provino. La durezza Brinell, in questo caso è indicata con il simbolo HB, in quanto è stata utilizzata per tale prova una sfera d'acciaio. La prova consiste nell'imprimere una sfera d'acciaio avente diametro D, con carico F, nel pezzo da esaminare e misurare il diametro d dell'impronta lasciata sulla superficie, dopo che il carico è stato rimosso. La durezza Brinell (HB) è un valore uguale a un quoziente del carico di prova F dell'impronta (espresso in kgf) per l'area (in mm<sup>2</sup>), considerata come una calotta sferica, con diametro sfera D.

HB 30 in gergo pratico corrisponde a un rapporto tra F e D<sup>2</sup> pari a 30.

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

(8)

Nel capitolo successivo verranno analizzati i valori di durezza ottenuti nella prova.

## 5. RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguente capitolo, vengono analizzati i dati ottenuti nelle varie operazioni svolte sui campioni di titanio, con relativo confronto con lo stesso campione analizzato in diverse condizioni.

### 5.1 CURVE DI CREEP

Le prove di creep oggetto di studio della presente tesi sono state svolte in condizioni di carico differenti ma alla stessa temperatura. In particolare, le prove sono state condotte a 550°C e con i seguenti carichi: 40 MPa, 90 MPa, 100 MPa, 120 MPa, 130 MPa e 170 MPa.

Dai test sui campioni si sono ricavate le curve di creep riportate di seguito; queste sono state ottenute a partire dai dati registrati dal computer, il quale monitora la prova di creep mediante la presenza dei sensori LVDT al fine di registrare l'allungamento subito dal campione durante la prova in un determinato intervallo di tempo.

Nota la lunghezza iniziale del campione  $l_0$  si è poi determinata la deformazione vera mediante la relazione seguente:  $\varepsilon = \ln(1 + \Delta l_0)$

In cui la variazione di lunghezza, corrisponde all'allungamento del campione registrato dal sensore presente sulla macchina.

#### 5.1.1 GRAFICI RELATIVI ALLE DIVERSE PROVE DI CREEP

Dalle prove di creep svolte sui diversi campioni, analizzando i dati raccolti, è possibile determinare le relative curve di creep (deformazione/tempo, velocità di deformazione/tempo, velocità di deformazione/deformazione).

Per determinare la velocità si vanno a isolare i punti della curva di creep appartenenti al tratto secondario; in tale tratto si ha una condizione di stazionarietà, in quanto la velocità di deformazione assume un valore costante,  $\dot{\varepsilon} = \varepsilon \dot{s}$ .

Tale condizione è dovuta al bilanciamento di fenomeni di rafforzamento (moltiplicazione ed interazione delle dislocazioni) ed addolcimento (ripristino).

Il procedimento definito viene ripetuto per le diverse prove di creep nei diversi carichi. Di seguito vengono riportati i grafici relativi ai diversi carichi.

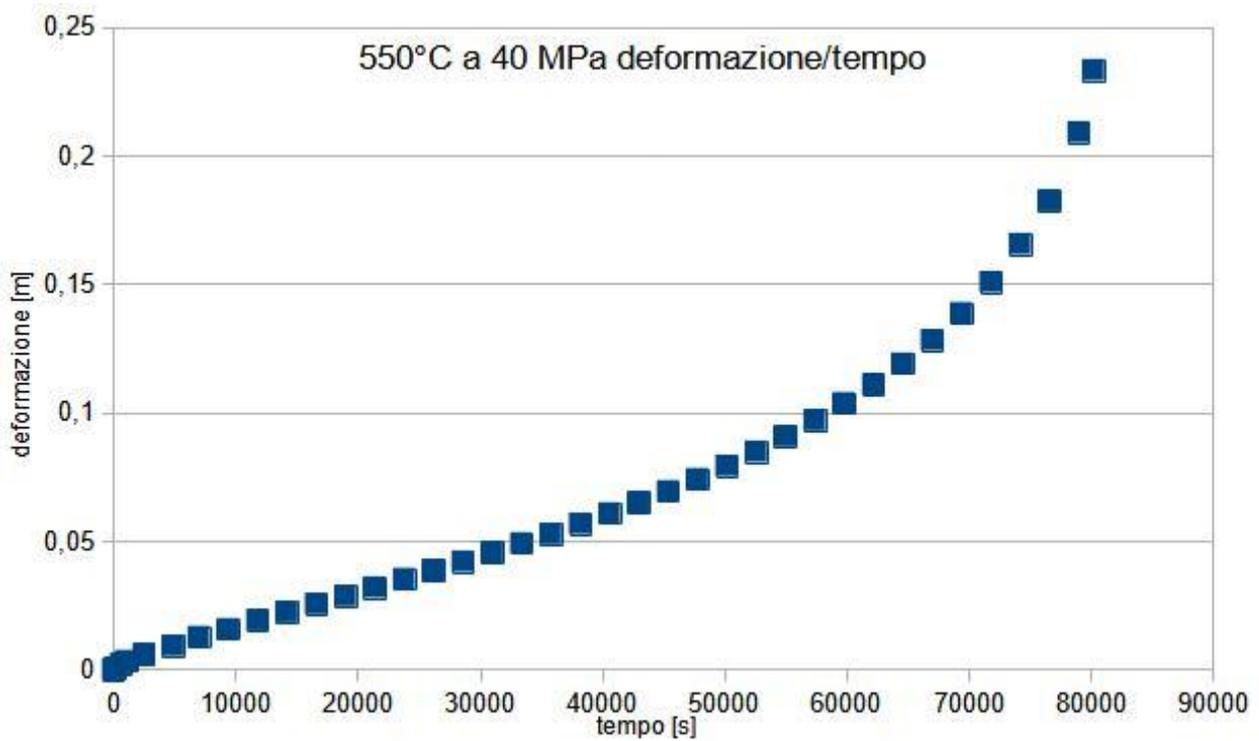


Figura 5.1: Curva di creep a 40 MPa a 550°C

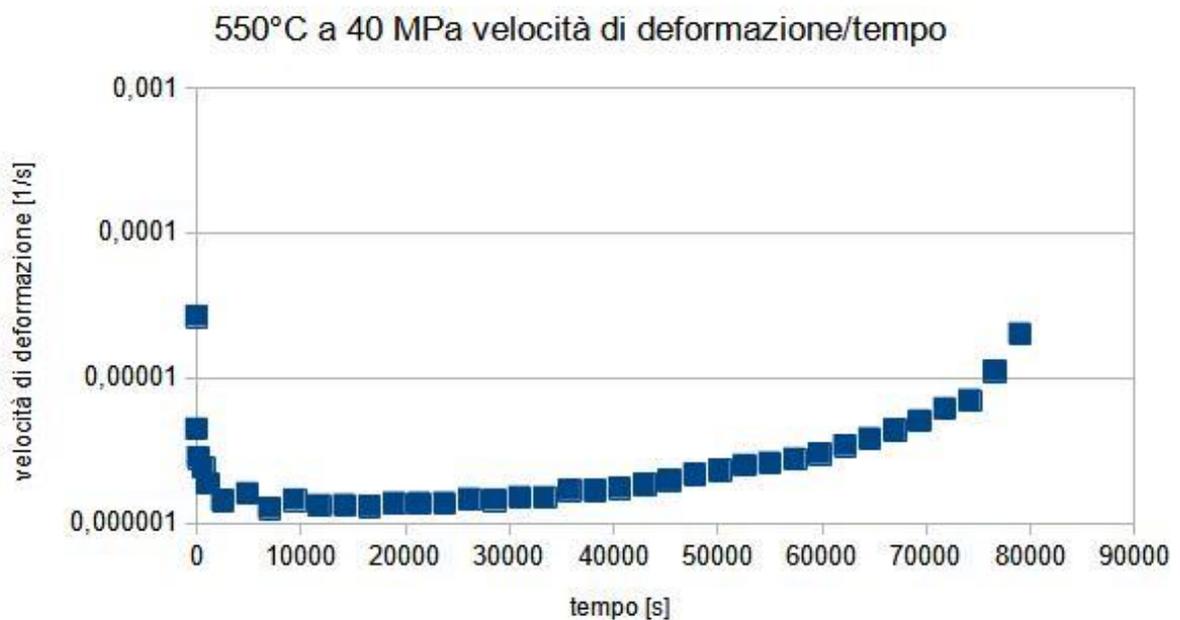


Figura 5.2: Curva di creep a 40 MPa a 550°C

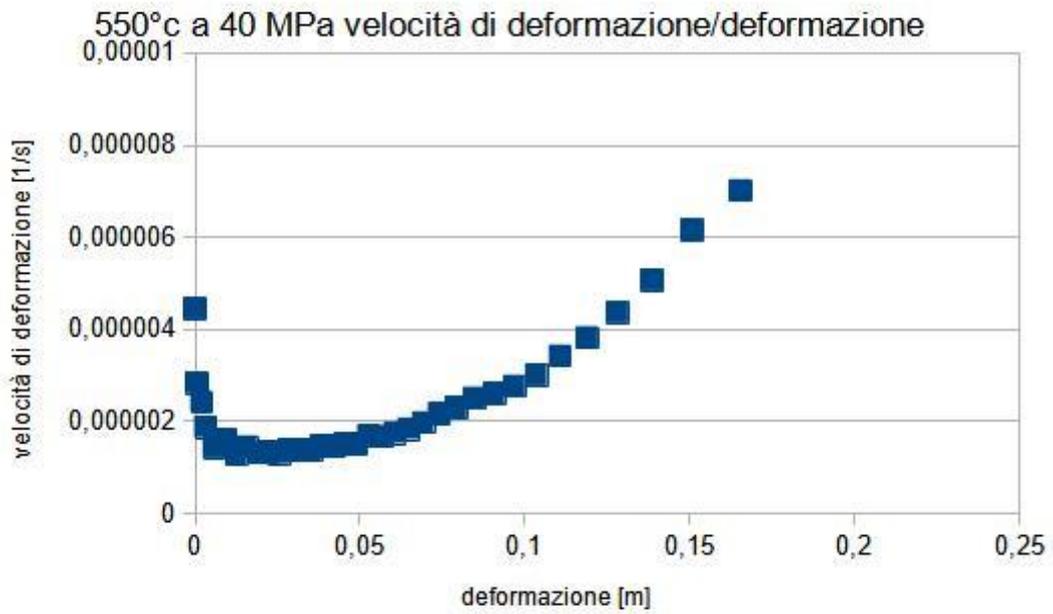


Figura 5.3: Curva di creep a 40 MPa a 550°C

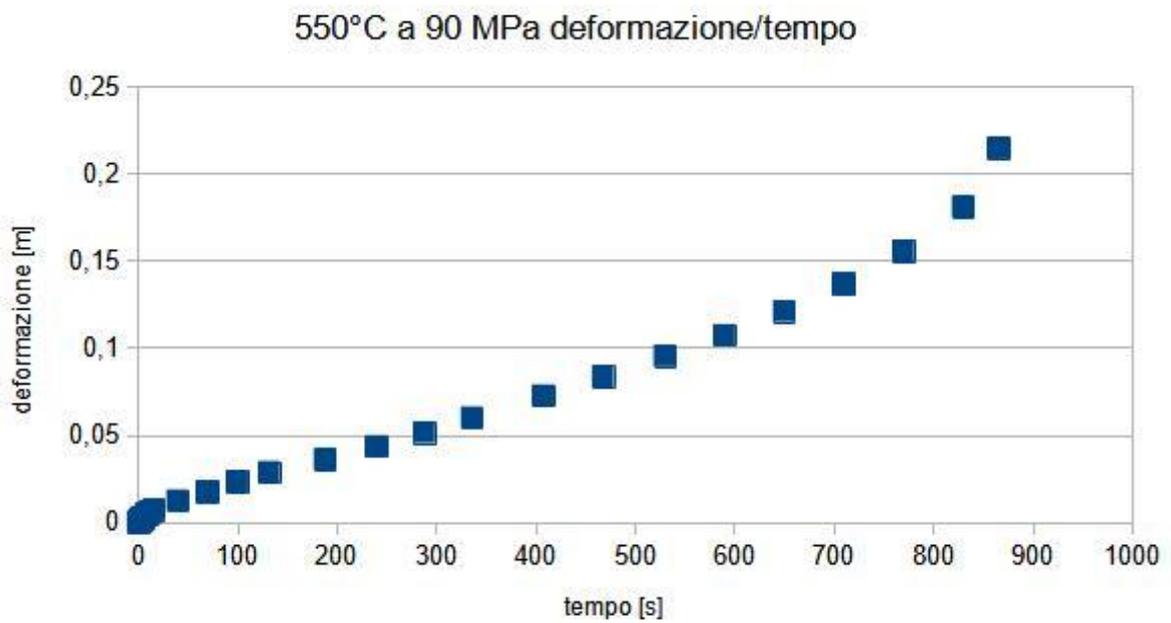


Figura 5.4: Curva di creep a 90 MPa a 550°C

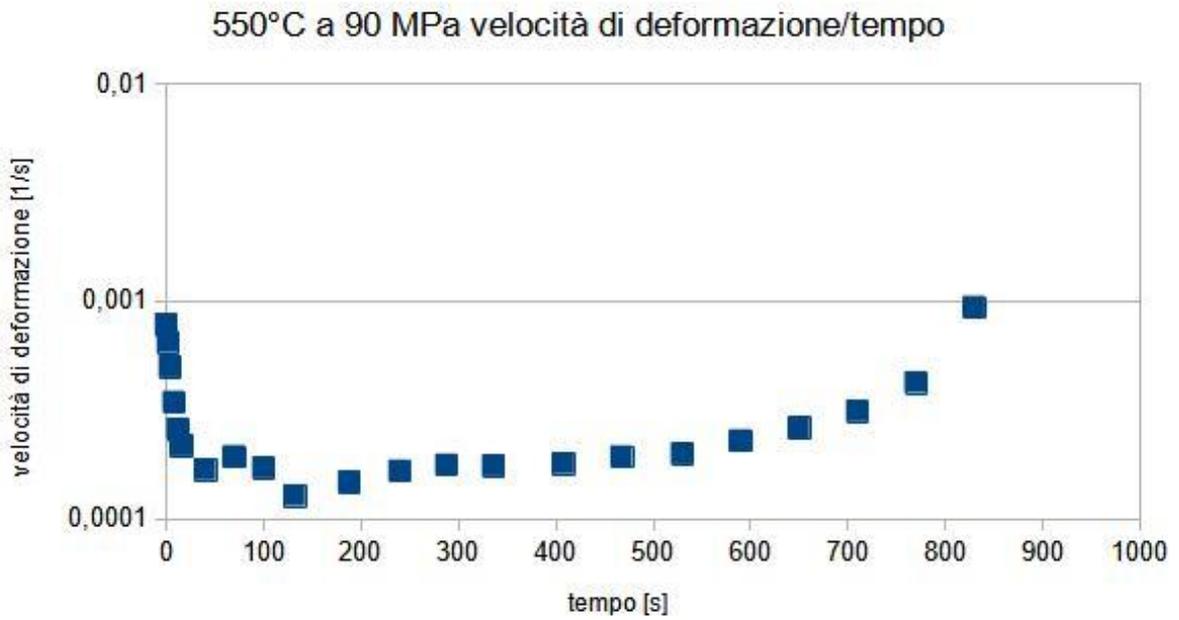


Figura 5.5: Curva di creep a 90 MPa a 550°C

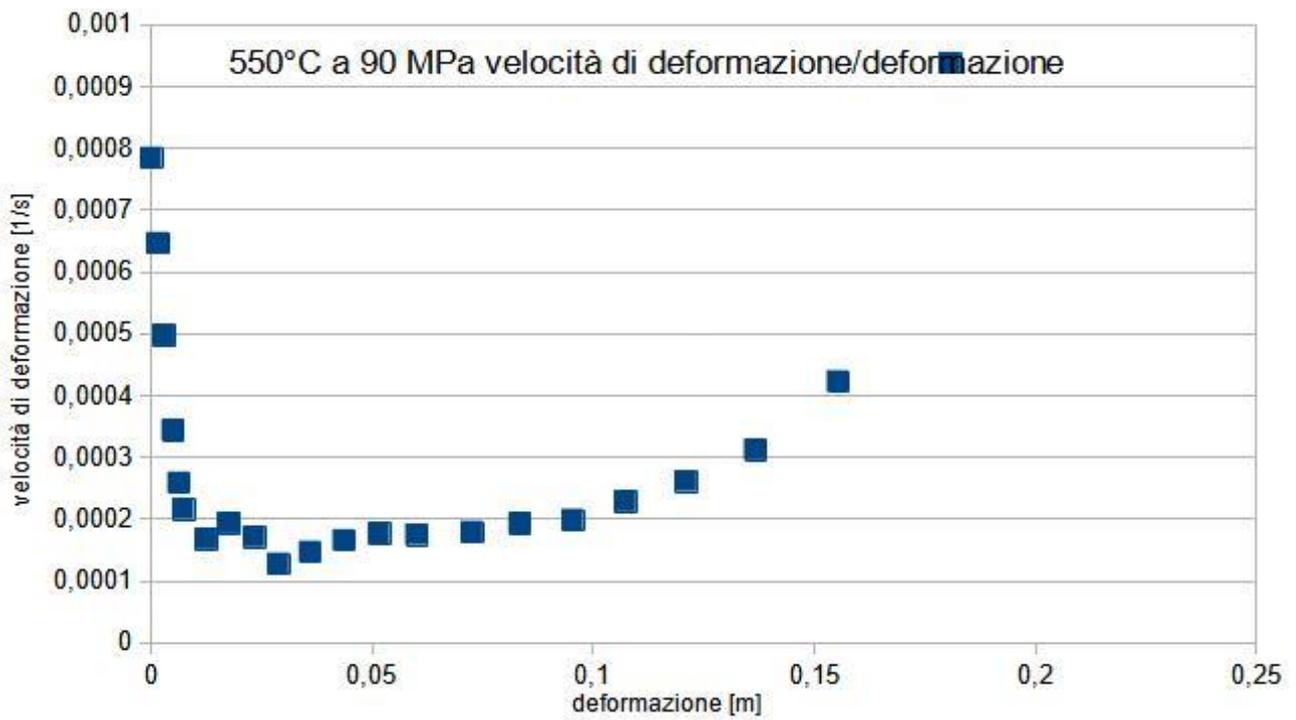


Figura 5.6: Curva di creep a 90 MPa a 550°C

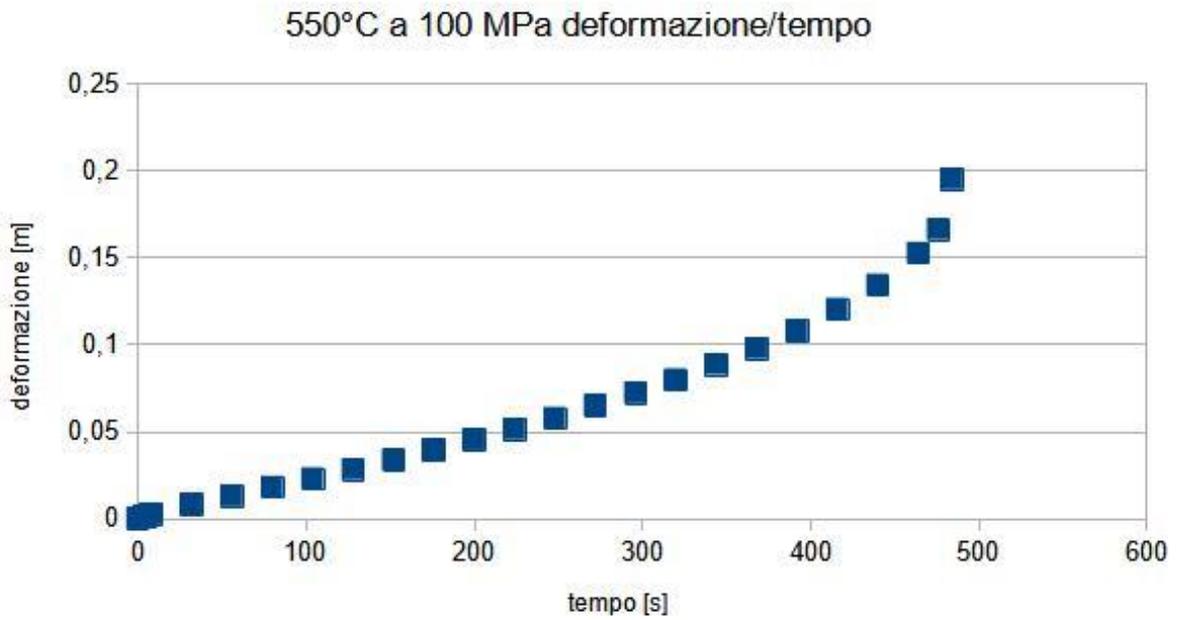


Figura 5.7: Curva di creep a 100 MPa a 550°C

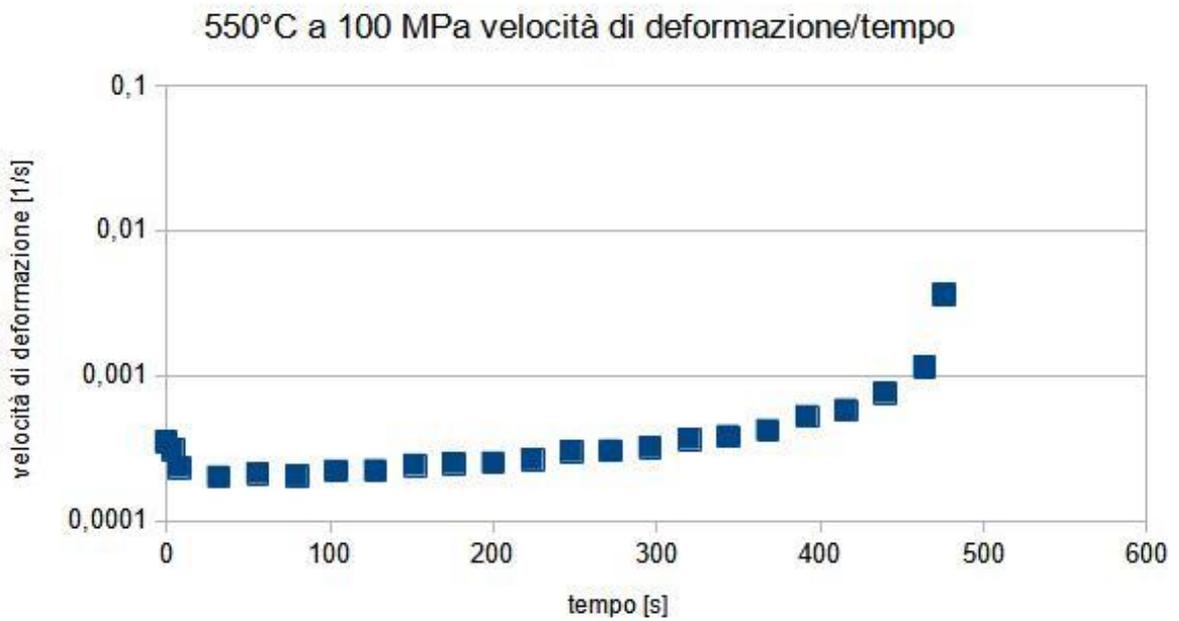


Figura 5.8: Curva di creep a 100 MPa a 550°C

550°C a 100 MPa velocità di deformazione/deformazione

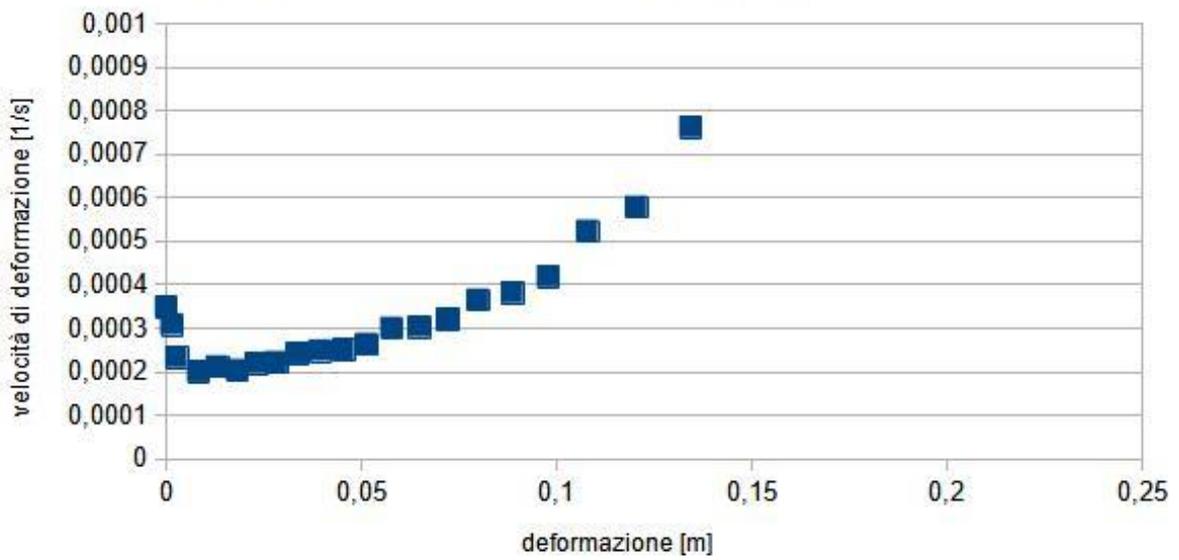


Figura 5.9: Curva di creep a 100 MPa a 550°C

550°C a 120 MPa deformazione/tempo

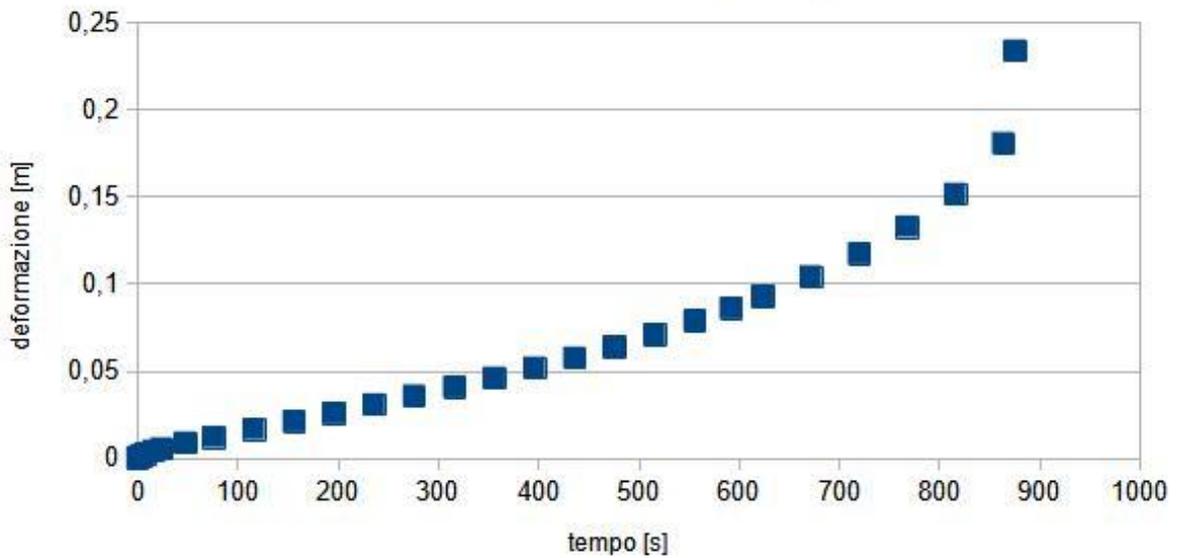


Figura 5.10: Curva di creep a 120 MPa a 550°C

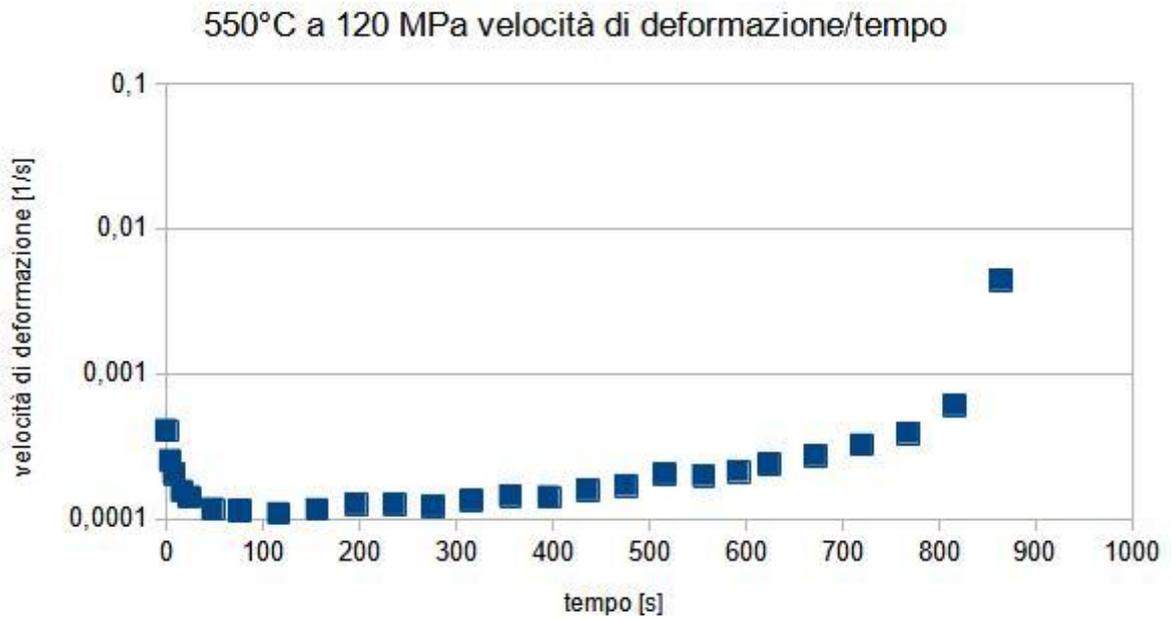


Figura 5.11: Curva di creep a 120 MPa a 550°C

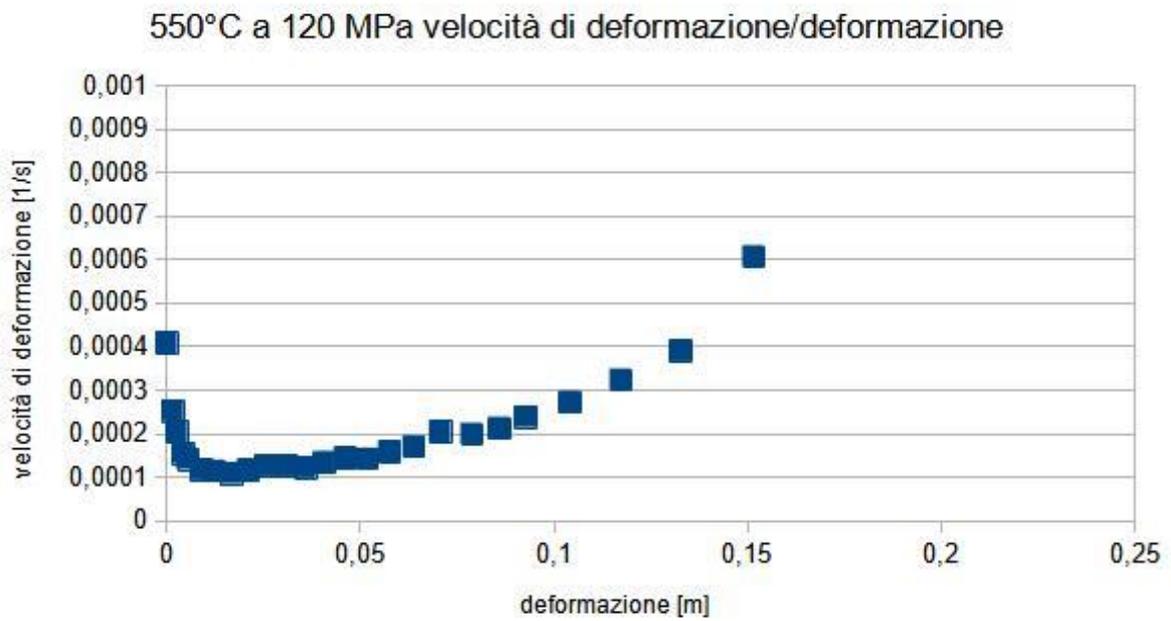


Figura 5.12: Curva di creep a 120 MPa a 550°C

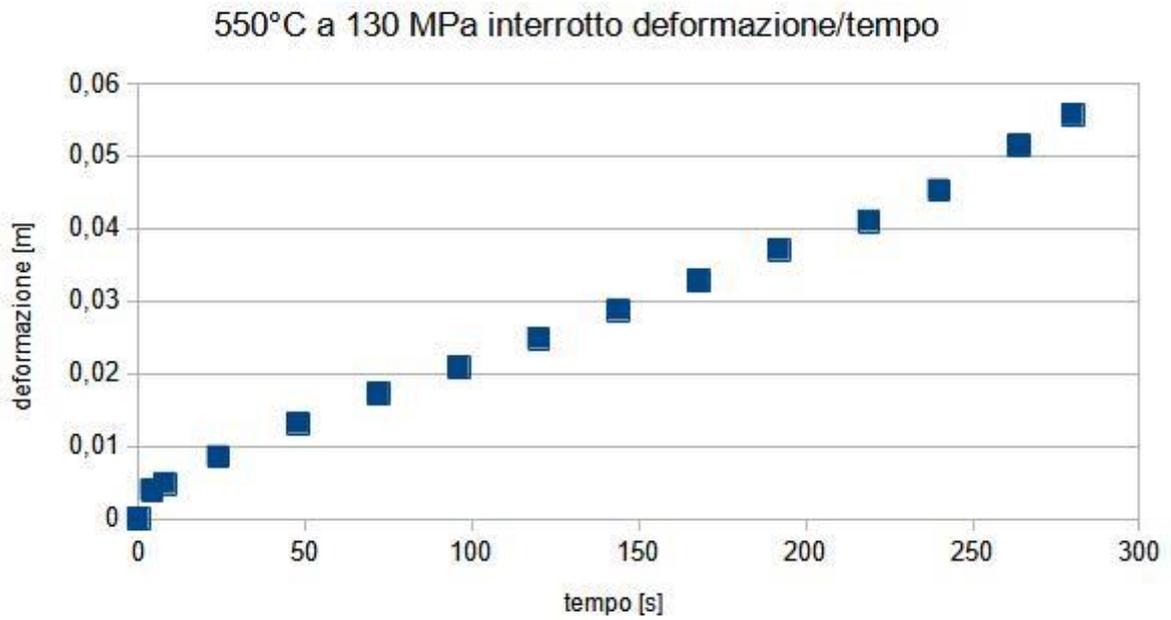


Figura 5.13: Curva di creep a 130 MPa a 550°C

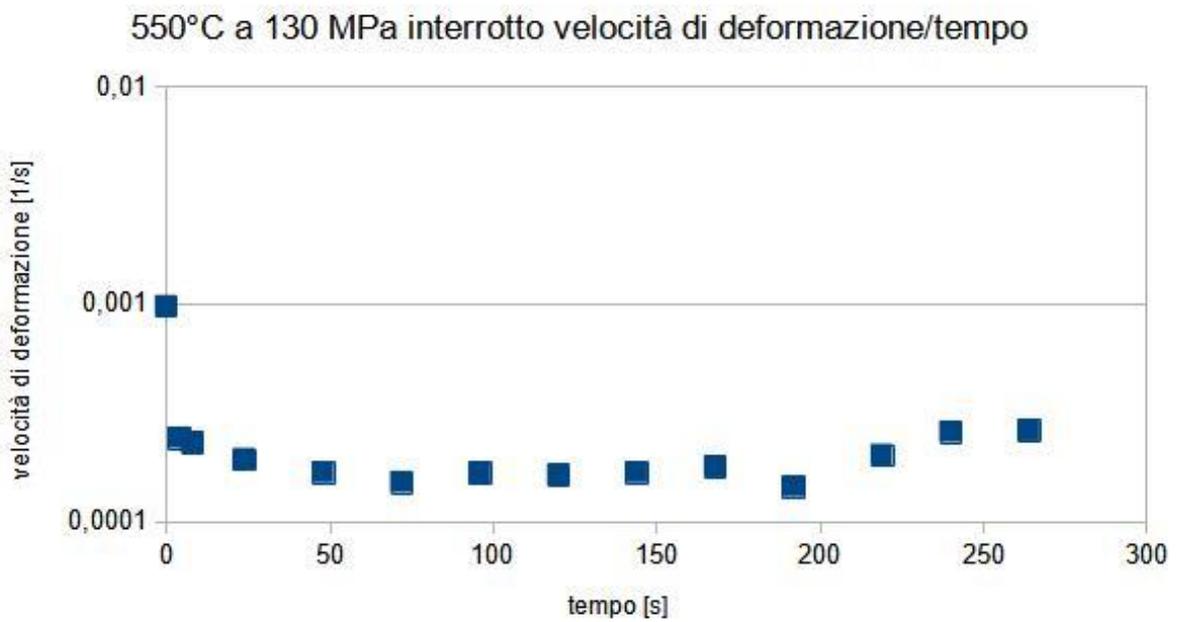


Figura 5.14: Curva di creep a 130 MPa a 550°C

550°C a 130 MPa interrotto velocità di deformazione/deformazione

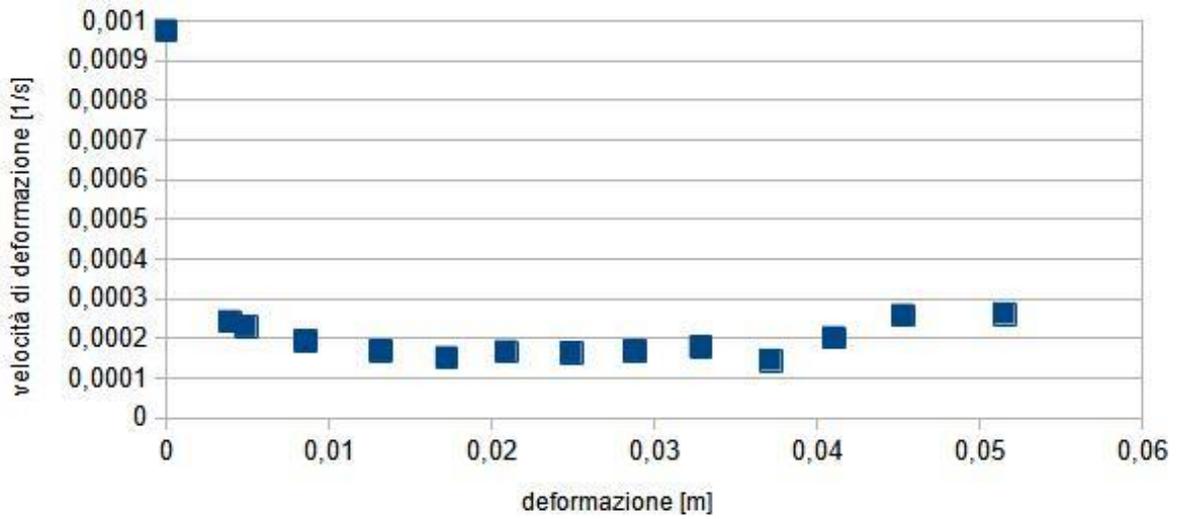


Figura 5.15: Curva di creep a 130 MPa a 550°C

550°C a 170 MPa deformazione/tempo

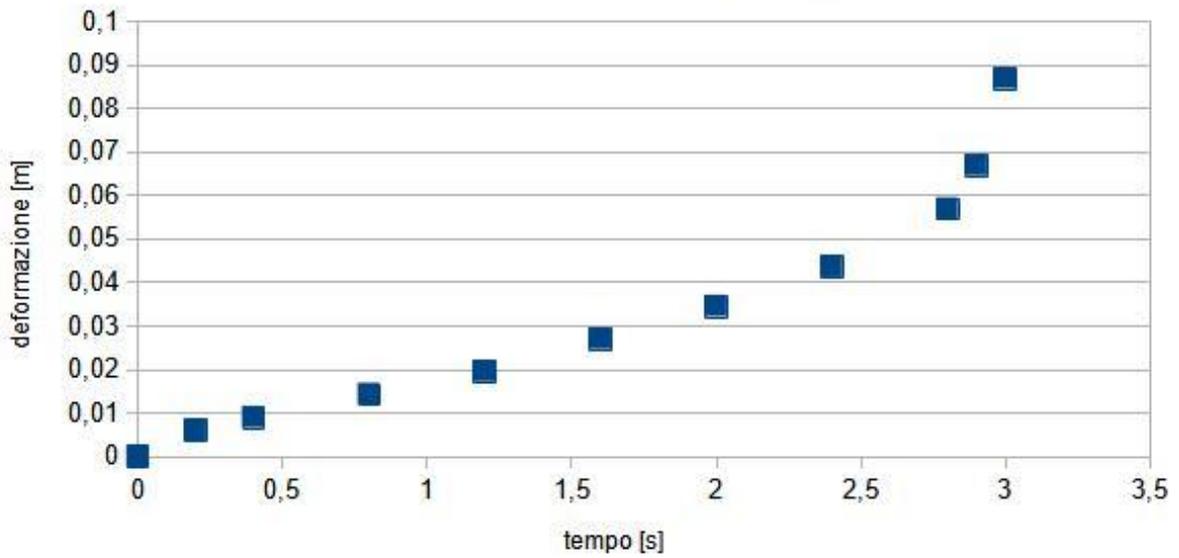


Figura 5.16: Curva di creep a 170 MPa a 550°C

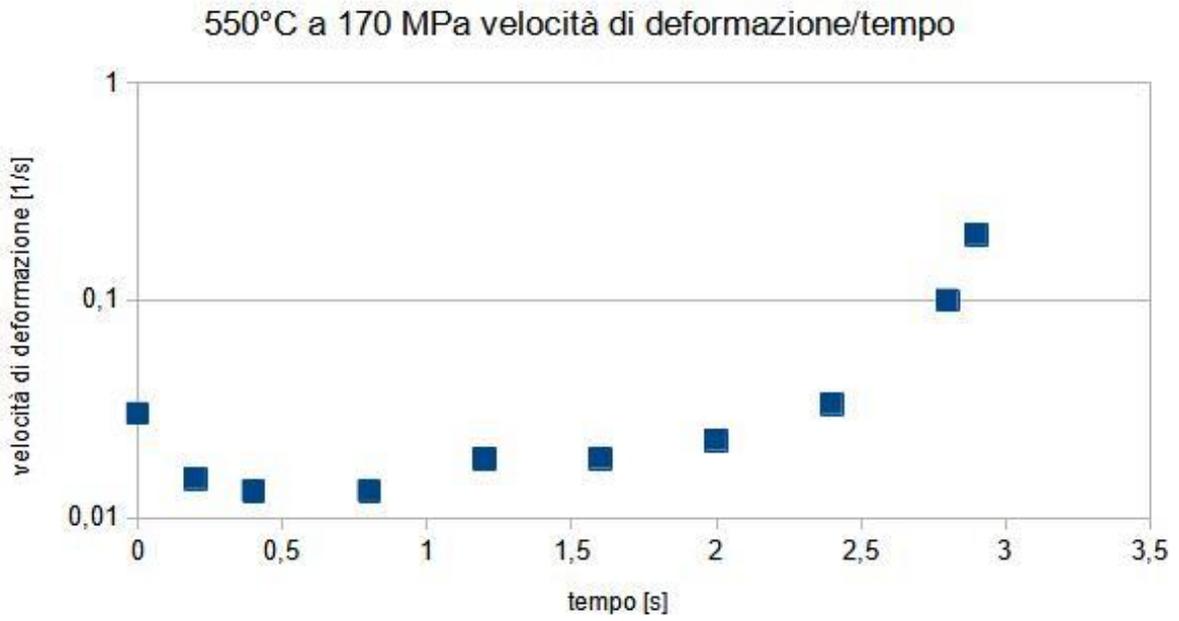


Figura 5.17: Curva di creep a 170 MPa a 550°C

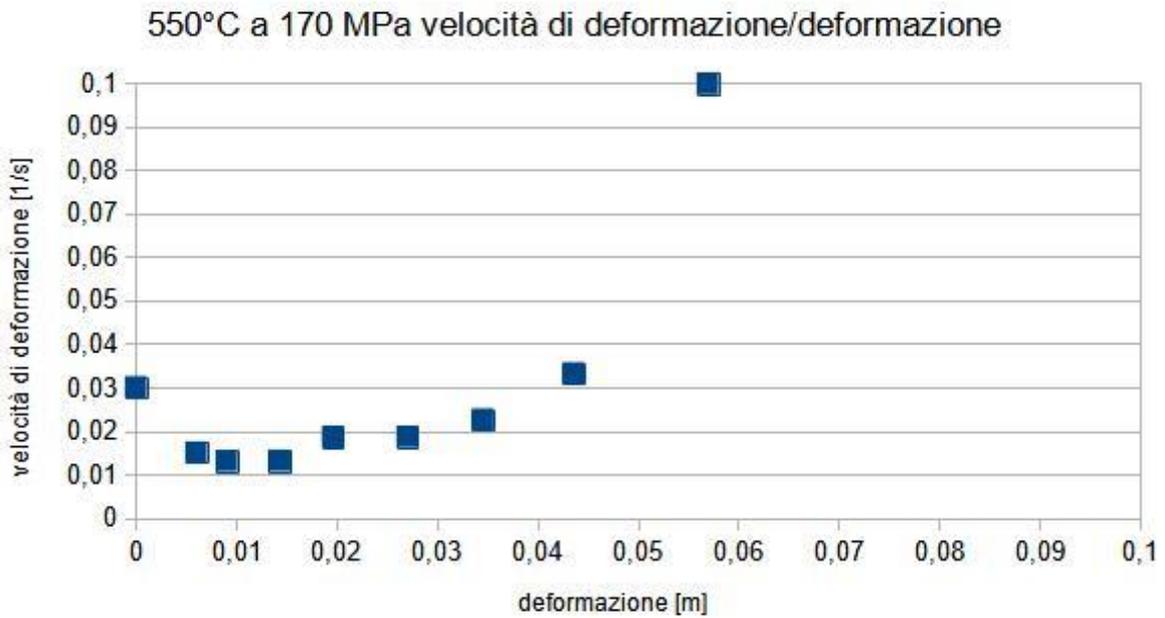


Figura 5.18: Curva di creep a 170 MPa a 550°C

Nei grafici con carico a 130 MPa, si può osservare che la prova viene interrotta, in quanto il provino non riesce a supportare questo carico, quindi arriva a rottura.

Ora si possono unire tutte le curve relative alla velocità di deformazione/deformazione dei relativi carichi in un unico grafico, come vediamo in figura 5.19:

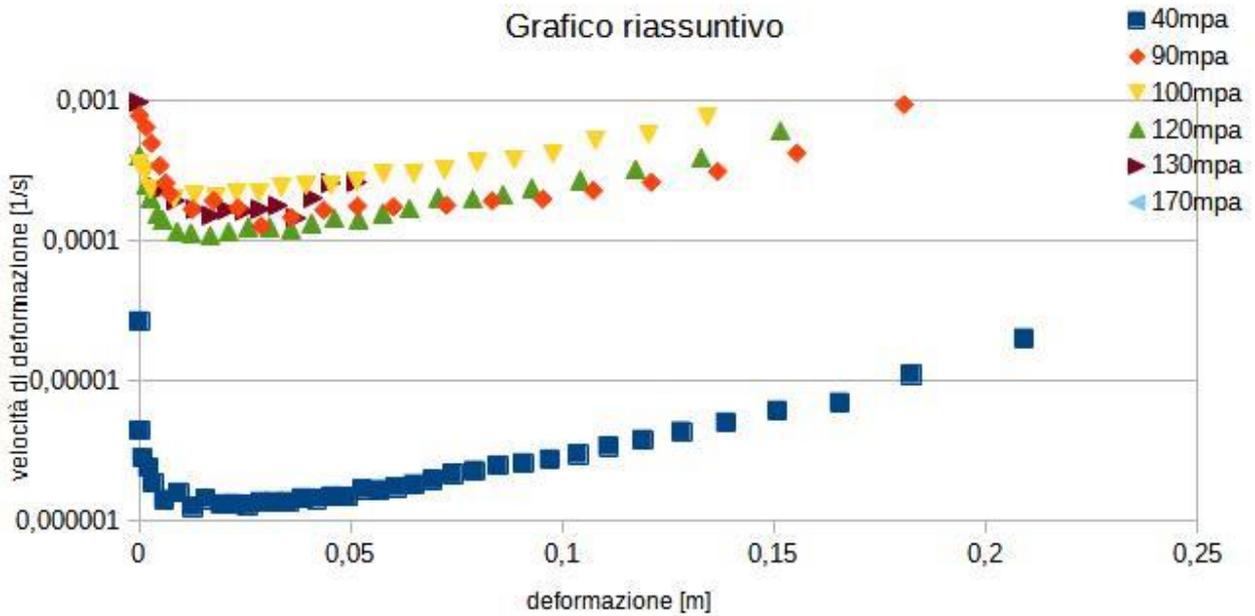


Figura 5.19: grafico riassuntivo velocità di deformazione/deformazione

A questo punto si può fare il grafico tensione/velocità minima di deformazione e si trova l'equazione della retta che "interpola" tutti i dati.

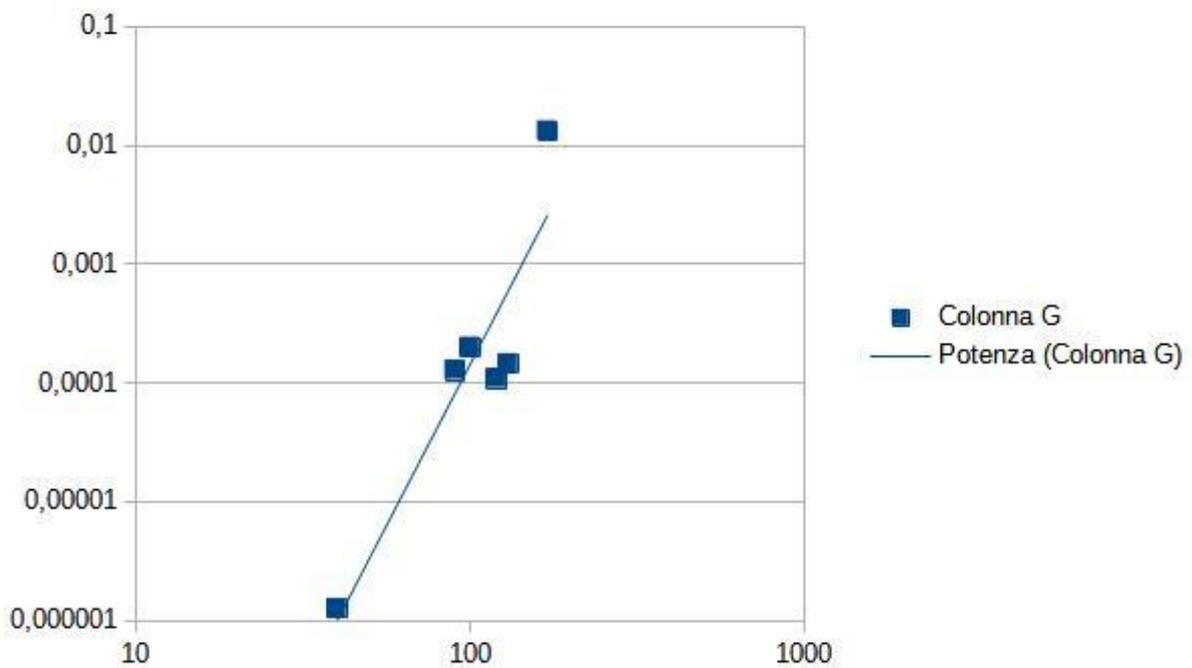


Figura 5.20: Grafico tensione/velocità minima di deformazione con n=5.4

Nel grafico riportato in Figura 5.20, si può vedere la dislocazione di numerosi dati attorno ad un unico punto.

Nel grafico riportato in Figura 5.21, viene mostrato l'andamento della velocità di deformazione del Titanio puro, in funzione del carico, a diverse temperature di prova.

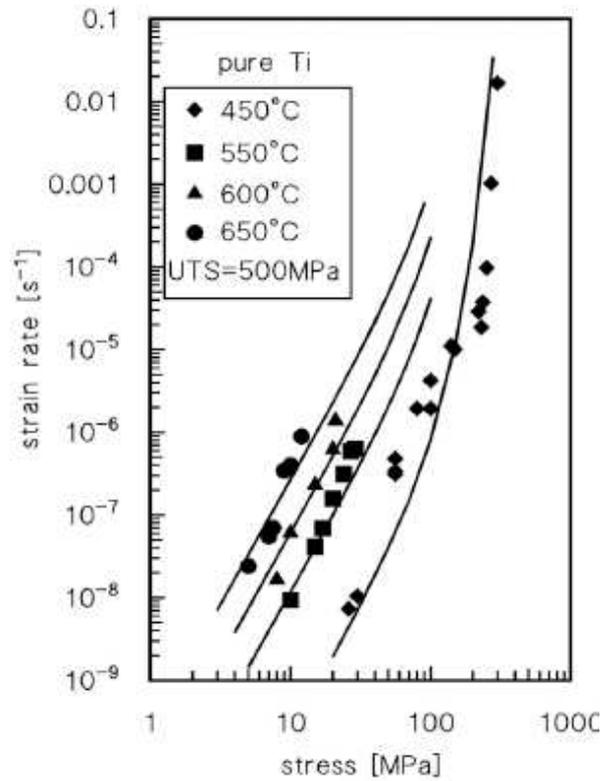


Figura 5.21: Andamento velocità di deformazione in funzione del carico, per Titanio Puro, con carico a rottura di 500 MPa [2]

## 5.2 ANALISI DI DUREZZA

A seguito dell'analisi delle curve della prova di creep, si va a fare l'analisi della durezza attraverso la prova Brinell.

Come già visto nel capitolo precedente, si studia come la testa del provino reagisce ad una prova di durezza definita HB30, cioè il rapporto tra F e D<sup>2</sup> è pari a 30 (Tab 5.1).

40	100	120	130	170	FSP
227	204	270	250	245	200
215	225	220	310	228	200
251	190	195	300	230	220
230	210	198	235	212	235
212	213	250	260	190	
220	212	230	228	215	
200	205	200	200	190	183
205	195	200	215	190	180
210	180	205	195	190	183
205	190	208	220	195	183
208	215	208	220	188	
200	210	198	195	198	

Tab. 5.1: Valori presi dalla prova di durezza

Come, appunto, si vede nel grafico la parte evidenziata in giallo rappresenta la parte più dura, ovvero la superficie lavorata attraverso la Friction Stir Welding. I dati in bianco invece sono stati presi nella parte non lavorata e quindi risulta più tenera. Si osserva dunque una sostanziale disomogeneità della durezza.

A questo punto si calcolano la media e la deviazione standard per ogni faccia (Tab.5.2 e 5.3).

227	204	270	250	245	200
215	225	220	310	228	200
251	190	195	300	230	220
230	210	198	235	212	235
212	213	250	260	190	
220	212	230	228	215	
Media: 226	Media: 209	Media: 227	Media: 264	Media: 220	Media: 214
Deviazione standard: 14	Deviazione standard: 12	Deviazione standard: 29	Deviazione standard: 34	Deviazione standard: 19	Deviazione standard: 17

Tab. 5.2: Valori con media e deviazione standard di superficie lavorata

40	100	120	130	170	FSP
200	205	200	200	190	183
205	195	200	215	190	180
210	180	205	195	190	183
205	190	208	220	195	183
208	215	208	220	188	
200	210	198	195	198	
Media: 181	Media: 185	Media: 191	Media: 196	Media: 189	Media: 146
Deviazione standard: 62	Deviazione standard: 39	Deviazione standard: 32	Deviazione standard: 31	Deviazione standard: 9	Deviazione standard: 1,5

Tab. 5.3: Valori con media e deviazione standard di superficie non lavorata

## 6- CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha analizzato il comportamento a creep del Titanio puro estrapolato dal cordone di saldatura, prodotto per FSW.

Lo scopo dello studio è stato quello di caratterizzare l'effetto del trattamento termico subito dal materiale sulla risposta a creep, in particolare sono stati analizzati i dati ottenuti dalle prove condotte sui campioni.

I carichi utilizzati per la prova di creep a 550°C, sono stati:

- 40 MPa;
- 90 MPa;
- 100 MPa;
- 120 MPa;
- 130 MPa;
- 170 MPa.

Le prove di creep sono state interrotte in corrispondenza della fase terziaria del processo di creep o condotte fino alla rottura del campione. Attraverso la presenza di sensori LVDT, posti all'interno dell'alloggiamento in cui viene inserito il campione per il test, è stato possibile registrarne l'allungamento durante tutta la prova di creep.

Dai dati raccolti dalle diverse prove, si sono costruite le curve di creep dalle quali si è determinata la velocità minima di deformazione per ciascuna prova.

Inoltre, con la costruzione della curva tensione/velocità minima di deformazione, è venuto fuori che la maggior parte dei dati si sovrappone, nonostante i carichi diversi.

La prova di durezza, invece, è stata fatta con il metodo Brinell, cioè attraverso l'utilizzo di una sfera di acciaio. Dai dati raccolti da tale prova, è risultato che la superficie saldata per FSW è più dura della superficie non lavorata. La diversità dei valori massimi di durezza dovuti alla lavorazione è presumibilmente la causa della dispersione dei dati sperimentali osservata dalle prove di creep.



## 7- BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://it.wikipedia.org/wiki/Titanio>
- [2] S. Di Menno Di Bucchianico «Tesi di Laurea Magistrale- Effetto del trattamento termico sulla risposta a creep di una lega Ti-6Al-4V prodotta per Additive Manufacturing» 2020-2021
- [3] <https://www.ulbrich.com/alloys/titanium-grade-1-uns-r50250/>
- [4] <https://www.ulbrich.com/alloys/titanium-grade-2-uns-r50400/>
- [5] <https://www.ulbrich.com/alloys/titanium-grade-3-uns-r50550/>
- [6] <https://www.ulbrich.com/alloys/titanium-grade-4-uns-r50700/>
- [7] S. Spigarelli «Slide sul titanio del corso “Metallurgia meccanica”» della magistrale
- [8] L. Fioretti, «Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica-studio di processi di friction stir welding di piastre in materiale termoplastico ottenute mediante manifattura additiva» 2019-2020
- [9] <https://www.industriaitaliana.it/friction-stir-welding-la-nuova-frontiera-della-saldatura-per-attrito/>
- [10] «La relazione tra microstrutture e proprietà meccaniche nella saldatura stir lap per attrito della lega di titanio» <https://www.sciencedirect.com/>
- [11] <https://www.meccanicanews.com/2022/07/06/friction-stir-welding-la-saldatura-proiettata-verso-il-futuro/>
- [12] Serroni, Squillace «Pannelli aeronautici rinforzati con parti estruse saldate mediante FSW: caratterizzazione meccanica»
- [13] E. Lapucci «Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria meccanica- Studio dell'effetto del trattamento termico sulla risposta a creep di una lega Ti-6Al-4V prodotta per manifattura additiva» 2021-2022
- [14] Capitolo 4 di «Appunti del corso di materiali metallici» 2001-2002
- [15] S. Spigarelli «Slide sul creep del corso “Metallurgia meccanica”» della magistrale