



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE
MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**RISPOSTA A CREEP A 600°C DI UN ACCIAIO INOSSIDABILE SALDATO
PER FSW**

CREEP RESPONSE AT 600°C OF A STAINLESS STEEL WELDED BY FSW

Relatore: Prof.
Stefano Spigarelli

Tesi di Laurea di:
Stefano Chiavetta

A.A. 2023/2024

INDICE

1. Introduzione.....	2
1.1. AISI 316L.....	3
1.2. Il Creep.....	6
1.3. La saldatura Friction Stir Welding (FSW).....	10
2. Procedure sperimentali	13
2.1. Prova di Creep.....	13
2.2. Preparazione del provino per prova di microdurezza...	17
2.3. Prova di microdurezza.....	20
3. Risultati sperimentali e discussione.....	22
3.1. Curve di Creep.....	22
3.2. Dipendenza della velocità minima di Creep dalla tensione di prova.....	28
3.3. Prove di durezza	32
4. Conclusioni.....	35

1.Introduzione

Negli ultimi 40 anni lo studio del comportamento dei metalli ad elevate temperature ha avuto uno sviluppo sempre più crescente, riuscendo a perfezionare sempre di più i metodi di analisi del fenomeno dello scorrimento viscoso a temperature elevate.

L'interesse verso questo fenomeno è aumentato notevolmente anche grazie agli sviluppi tecnologici e principalmente progettuali, in quest'ultimo ambito ad esempio è fondamentale essere a conoscenza del comportamento del materiale con la prova di Creep per riuscire a progettare un componente destinato ad operare sotto un certo carico ad elevate temperature. [1]

Anche i metodi di studio e analisi del fenomeno del creep sono migliorati: durante la prova i dati venivano raccolti periodicamente dovendo interrompere lo svolgimento della prova e si poneva una maggiore attenzione sul tempo di rottura mentre ora oltre ad una misurazione continua, il parametro più studiato è la velocità di deformazione.

In questo studio lo scopo è quello di caratterizzare le curve di Creep per un Acciaio inossidabile austenitico 316L ottenuto tramite FSW (Friction Stir Welding.)

1.1. AISI 316L

L'acciaio inossidabile è una lega a base di ferro e carbonio contenente elementi come cromo, nichel, molibdeno, manganese, silicio, titanio che hanno lo scopo principale di rendere l'acciaio resistente alla corrosione oltre che conferire altre caratteristiche come tenacità, duttilità e durezza.

Grazie agli elementi immessi nella lega, in particolare il Cr, questi materiali sono in grado di ricoprirsi di uno strato di ossido invisibile di spessore molto sottile ($3 \div 5 \cdot 10^{-7} mm$) per proteggere il metallo sottostante dall'azione degli agenti chimici esterni. Il Cromo presente in quantità percentuale maggiore è il principale legante e fattore di inossidabilità.

Gli acciai inossidabili hanno in generale un contenuto massimo di carbonio molto basso e un valore minimo di cromo del 12%. [2]

Oltre alle leghe inox austenitiche possiamo classificare i rimanenti acciai inossidabili come ferritici o martensitici:

- Ferritici: contengono un elevato tenore di cromo (variabile tra 11-19%) ma senza nichel, responsabile della stabilizzazione dell'austenite; la loro microstruttura cristallina ferritica è la stessa del ferro a temperatura ambiente; infatti, come il ferro hanno caratteristiche magnetiche per

temperature inferiori ai 750°C. Alcuni esempi di acciai ferritici sono 409, 430, 439, 441,444.

- Martensitici: gli acciai martensitici hanno ottime caratteristiche meccaniche e sono ben lavorabili, è l'unico acciaio inox che può essere sottoposto a tempra. Presentano una maggiore quantità di carbonio rispetto alle altre famiglie con il fine di mantenere una maggiore durezza. [3]

Nel caso in esame stiamo analizzando un acciaio AISI 316L, acciaio inossidabile austenitico composto da Cr Ni Mo (composizione chimica in fig.1), caratterizzato da un'ottima resistenza a corrosione in atmosfera, sali e acidi organici. La sua resistenza è di circa 600 MPa per i grandi diametri, ma può essere aumentata dalla lavorazione a freddo per le piccole sezioni.[4] La bassa percentuale di carbonio (<0.03%) risulta particolarmente utile per superare i problemi di corrosione intercristallina, problematica presente durante la saldatura dove si raggiungono temperature fino a 450-850°C.

316	Composizione Chimica - Valore massimo							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	Mo	Other
	0.03	2.0	1.0	16.5-18.5	8-13	0.04	2-2.25	N<0.11
	Valore Tipico							
0.02	0	0	17.2	10.1	0	2.1		

Figura 1: Composizione chimica AISI316L [3]

Queste caratteristiche rendono il 316L un acciaio utilizzato in molti ambiti come ad esempio quello navale, chimico, farmaceutico, fotografico, alimentare, scambiatori di calore, ortopedia. [5]

1.2. Il Creep

Con il termine creep intendiamo una deformazione permanente che aumenta nel tempo quando un provino viene sottoposto ad un carico costante a temperature elevate.

La temperatura di lavoro deve superare un limite minimo oltre il quale si riesce ad apprezzare il fenomeno, in maniera approssimativa si ipotizza il 30-50% della temperatura assoluta di fusione (T_F) altrimenti si fa riferimento a dei valori standard in base al tipo di metallo. In figura 2 si possono osservare le temperature di esercizio della prova di Creep dei metalli più comuni.

Alluminio	$T < 0.54T_F$
Titanio	$T < 0.30T_F$
Acciai bassolegati	$T < 0.36T_F$
Acciai inossidabili austenitici	$T < 0.49T_F$
Superleghe	$T < 0.56T_F$

Figura 2 Temperature entro il quale si verifica il Creep [1]

Il fenomeno del creep è strettamente legato alla presenza di difetti microstrutturali all'interno del metallo. Le dislocazioni fanno parte dei difetti

microstrutturali lineari, ovvero che si estendono lungo una linea a differenza dei difetti puntiformi (vacanza, difetto interstiziale o atomo sostituzionale).

Per il creep la dislocazione con maggior importanza è quella a spigolo (fig.3), è presente quando uno strato supplementare di particelle si inserisce tra strati adiacenti del reticolo causando così una compressione dove è inserito il semipiano e trazione nella parte sottostante

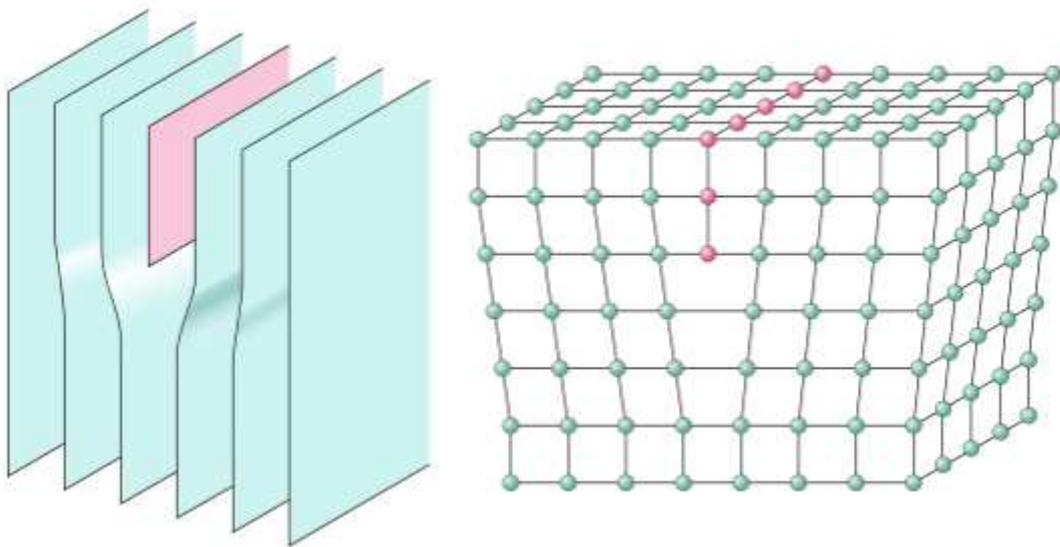


Figura 3 Dislocazione a spigolo [6]

Le dislocazioni hanno la capacità di muoversi secondo diversi tipi di moti: scorrimento (glide), scorrimento incrociato (cross slip). Questi moti possono presentarsi anche a temperature non elevate tranne che per un caso specifico

ovvero quello del “salto” (climb) che avviene solamente a temperature elevate.

Il climb è caratterizzato dal passaggio di una parte o di un'intera dislocazione a spigolo dal suo piano di scorrimento ad un piano parallelo combinando il movimento di scorrimento ad un salto. Questo movimento causerà un riarrangiamento delle dislocazioni e l'annullamento di dislocazioni di segno opposto (per convenzione la dislocazione positiva viene rappresentata con \perp mentre quella negativa è \top) appartenenti inizialmente a piani di scorrimento paralleli (fig 4)



Figura 4: Movimento di dislocazioni a spigolo ad alta temperatura, scorrimenti (orizzontali) e salti (verticali) fino ad incontrare dislocazioni di segno opposto annullandosi [1]

La rottura per Creep può avvenire per una serie di motivi, ad esempio con l'aumentare della deformazione ha inizio la strizione (riduzione localizzata della sezione) che porta ad una frattura del materiale, oppure con la presenza di fenomeni di cavitazione.

Nel caso specifico del Creep, il tipo di rottura tipico è quello dello slittamento del bordo di grano (grain boundary sliding) senza apprezzabili fenomeni di strizione. Come possiamo vedere in fig. 5 sotto l'azione di sollecitazione di trazione i grani scorrono l'uno rispetto all'altro lasciando microcavità localizzate alla direzione della tensione. [1]

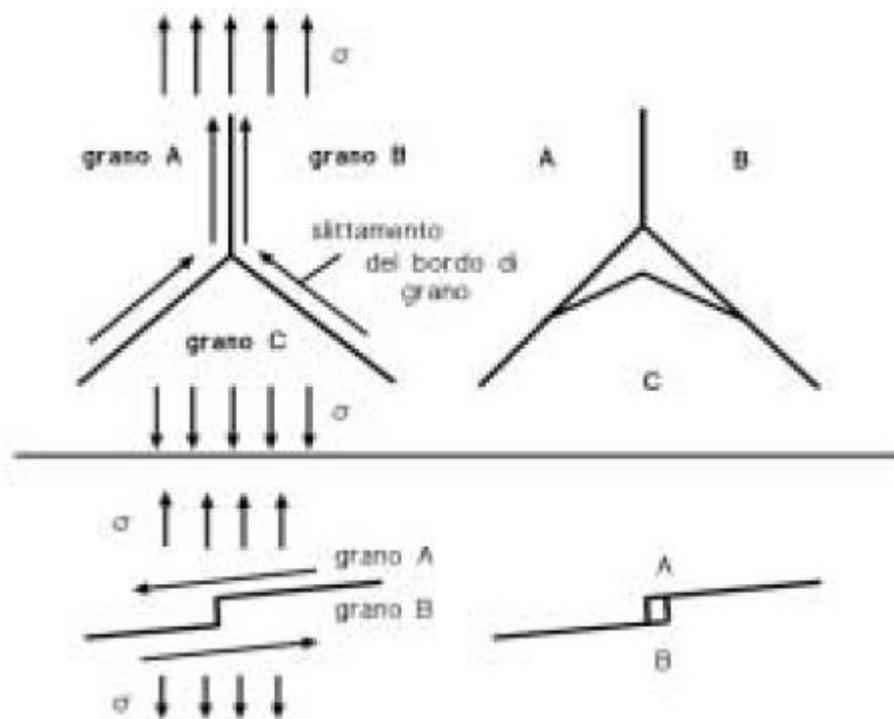


Figura 5: Meccanismi di danneggiamento intergranulare dovuto a slittamento dei bordi di grano [1]

1.3. La saldatura FSW

La saldatura friction stir welding è stata sviluppata nel 1991 al The Welding Institute di Cambridge ed è un metodo di saldatura allo stato solido che permette la giunzione di un'ampia gamma di geometrie e materiali

Il principio di funzionamento di questo processo è il rimescolamento allo stato solido del materiale provocato dall'azione meccanica di un utensile rotante che viene fatto avanzare sulla linea di giunzione dei due lembi da saldare (fig.6). L' attrito generato tra utensile e pezzo provoca il riscaldamento del materiale da saldare fino al raggiungimento di una condizione di elevata duttilità andando così a mescolare il materiale dei due pezzi da saldare.

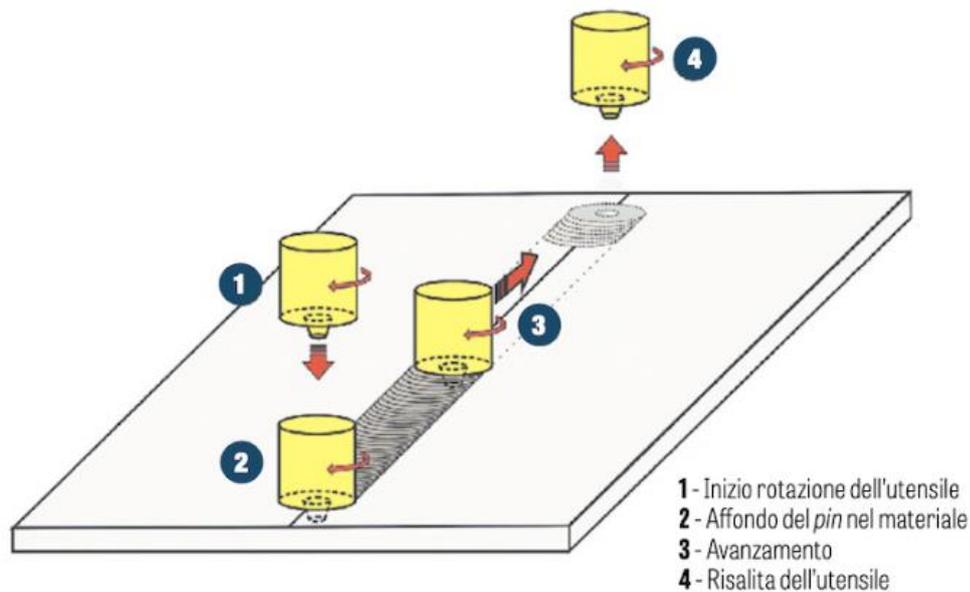


Figura 6. Principio di funzionamento Friction Stir Welding [7]

Dato che il materiale è rimescolato allo stato solido, viene classificata come saldatura a freddo, visto che elimina i tipici difetti legati ai processi tradizionali di saldatura come ritiri, cricche, solubilità del gas.

Inoltre, la tecnologia FSW rientra nella categoria green technology in quanto non necessita di gas per il funzionamento, e anche per la sua elevata efficienza energetica.

L'intensa deformazione plastica localizzata che subisce il materiale saldato conferisce al cuore della saldatura una microstruttura in grado di garantire un minor decadimento delle proprietà meccaniche rispetto le saldature per fusione, riducendo anche lo stato tensionale residuo dei giunti saldati [6]

L'utensile è costituito da una spalla rotante a sezione circolare che garantisce il contenimento del materiale e da un pin cilindrico responsabile del mescolamento del materiale durante la lavorazione.

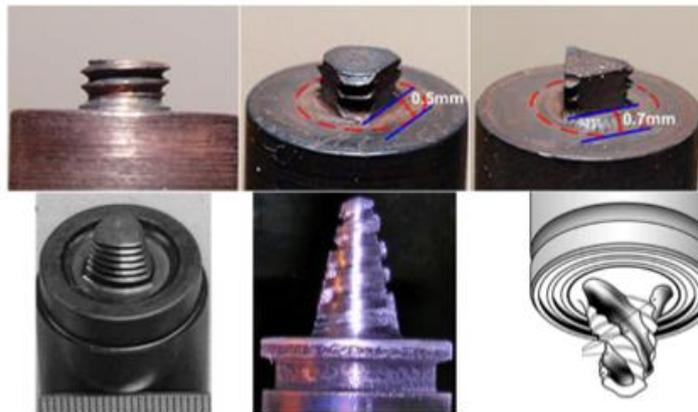


Figura 7: Esempio di utensile FSW [8]

Il processo di friction stir welding si può dividere in due categorie:

- High temperature FSW: con questa tipologia di lavorazione si trattano acciai, acciai inossidabili e leghe a base di nichel, metalli caratterizzati da un'elevata temperatura di fusione (può essere necessario raggiungere temperature di 3000°C). Gli utensili utilizzati devono quindi essere composti da una lega con tungsteno o zirconio in modo da conferire resistenza ad elevate temperature. Durante il processo di saldatura alcuni elementi della lega dell'utensile possono depositarsi sulla regione di saldatura.

- Low-temperature FSW: viene utilizzata per metalli con una bassa temperatura di fusione come leghe di alluminio; viene utilizzata in molti settori come quello aerospaziale e quello marino dato che sono caratterizzati da un'elevata resistenza alla corrosione. Inoltre il processo di saldatura riduce i difetti di porosità e distorsione della regione saldata. [9]

2.Procedure sperimentali

2.1. Prova di Creep

In figura 7 possiamo vedere uno schema del funzionamento della macchina di creep. Il sistema è composto da un forno a muffola, un sistema di leva con il peso applicato, sensori per registrare spostamento, tempo e temperatura.

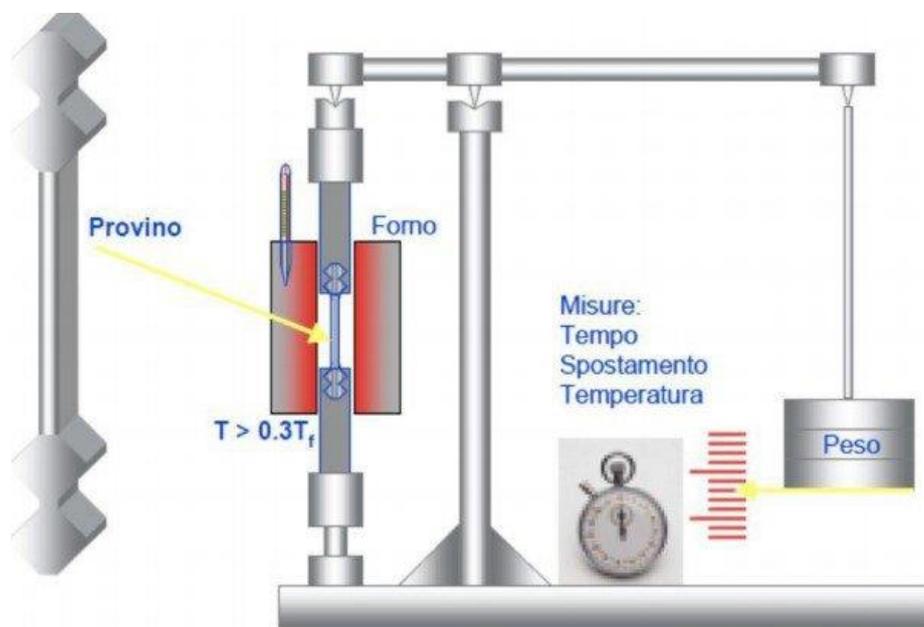


Figura 8: Schema dei componenti macchina Creep [10]

La temperatura all'interno del forno viene monitorata grazie all'utilizzo di termocoppie che ne permettono il costante monitoraggio. Il funzionamento di una termocoppia si basa sulla variazione di resistenza elettrica di un conduttore al variare della temperatura; essa comporta una variazione della corrente elettrica che attraversa il filo venendo poi tradotta in variazione di

temperatura. In questo modo siamo in grado di misurare la variazione di temperatura.

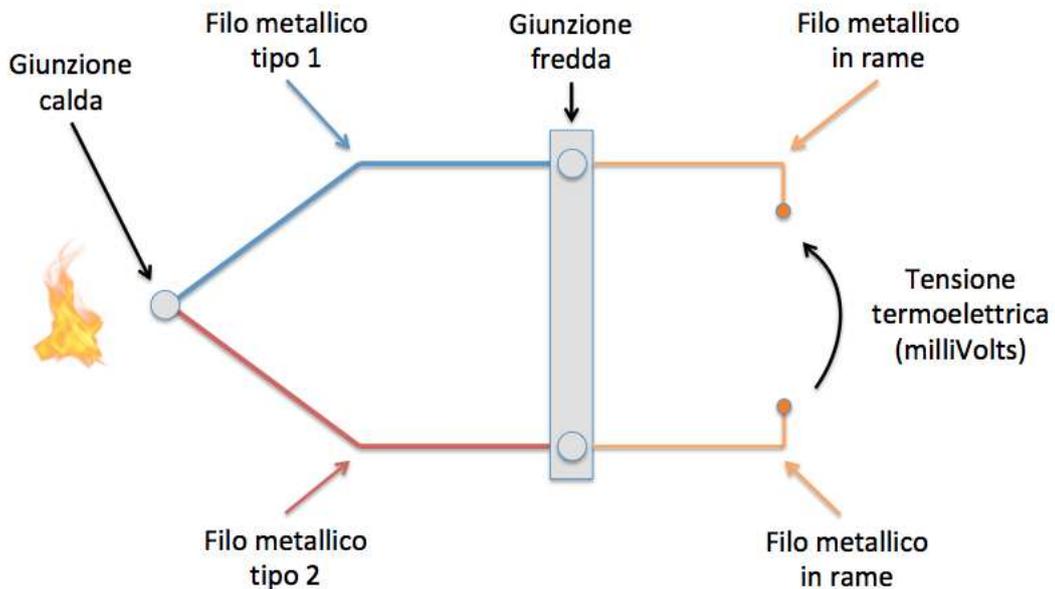


Figura 9: Principio di funzionamento termocoppia [11]

Il parametro fondamentale da registrare è la deformazione del provino, che viene monitorato e campionato tramite un LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) ovvero un trasduttore di spostamento induttivo lineare, composto da un cilindro nel quale è presente un albero (iron core in fig.10) in grado di spostarsi verticalmente al suo interno, mentre intorno il cilindro sono presenti delle bobine che generano un campo magnetico quando attraversate da corrente. Lo spostamento dell'albero comporterà una variazione di corrente indotta da delle bobine (primary coil e secondary coil in fig.10) presenti sul cilindro, questa variazione di corrente in uscita verrà poi

trasdotta in spostamento lineare. L'albero interno dell'LVDT è solidale al provino riuscendo così a registrare lo spostamento e quindi la deformazione esatta del provino durante la durata della prova. [12]

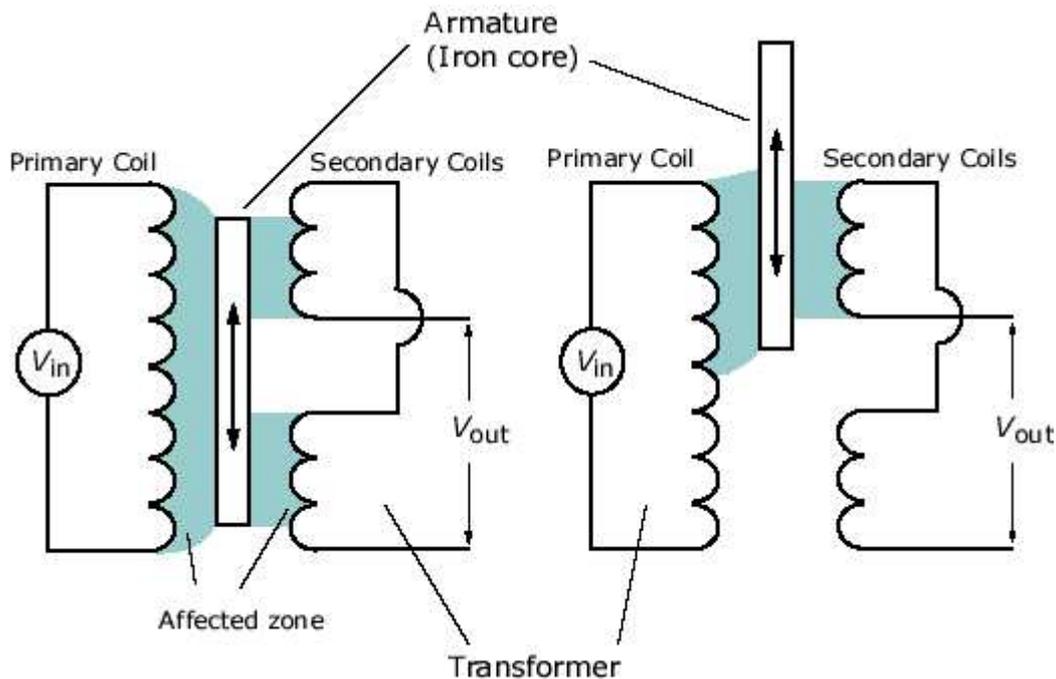


Figura 10: Principio di funzionamento LVDT [13]

Durante la prova il provino subirà una deformazione che comporterà una successiva inclinazione dell'asta della leva dal lato del peso, questo causerà una variazione del carico effettivo applicato al provino. Per ovviare a questo problema è presente un sistema di regolazione (a sinistra in fig.12) che verrà azionato dall'asta quando l'allungamento sarà tale da comportare una variazione del carico reale applicato sul provino. Un motore elettrico collegato ad un albero filettato sposterà la catena di carico in basso fin quando

il sistema di regolazione non verrà disattivato e la forza reale applicata sul provino sarà pari a quella imposta per la prova.



Figura 11: Macchina di prova



Figura 12: Sistema di leva macchina Creep

La prova ha fine quando avremo ottenuto una deformazione sufficiente per ottenere le curve di Creep o fino ad ottenere la rottura del provino

2.2. Preparazione del provino per prova di microdurezza

Una volta terminata la prova di Creep possiamo analizzare il provino. Per riuscire a maneggiare e analizzare il provino è necessario rimuovere le teste di serraggio (estremità del provino con sezione maggiore per permettere l'incastro del provino all'interno del forno) e inglobare solo il tratto utile del provino.

Per l'inglobamento del provino utilizziamo una macchina inglobatrice Struers Labopress 1 dove andremo a posizionare il tratto utile. La macchina riscalderà la resina fino a raggiungere 150°C, applicando una pressione costante, in modo da iniziare il processo di compattazione della resina termoindurente.

Trascorso il tempo necessario per l'indurimento della resina possiamo raffreddare il provino inglobato con l'acqua grazie allo scambio termico che avviene in un circuito interno alla macchina. Ora il provino è pronto per essere maneggiato ed analizzato.



Figura 13: Inglobatrice Struers Labopress 1

Prima di poter effettuare la prova di microdurezza è necessario levigare il provino utilizzando una macchina levigatrice con carta abrasiva fino a ottenere una superficie lucida a specchio.



Figura 14: Provino inglobato e lucidato

In questo stato il campione è pronto per essere analizzato tramite prova di microdurezza Vickers.

In figura 14 il campione è stato già sottoposto alla prova di microdurezza; infatti, possiamo notare sulla parte centrale una serie di impronte sulla parte centrale del provino causate dal penetratore della prova Vickers.

2.3. Prova di microdurezza

La prova di microdurezza Vickers consiste nel misurare la profondità di penetrazione di un penetratore piramidale a base quadrata con un angolo al vertice di 136° sulla superficie da analizzare, in base alla profondità raggiunta possiamo calcolare la microdurezza utilizzando questa relazione dove F è la forza applicata e d è l'impronta media lasciata dal penetratore. [14]

$$HV = 0,1891 \left(\frac{F}{d^2} \right)$$

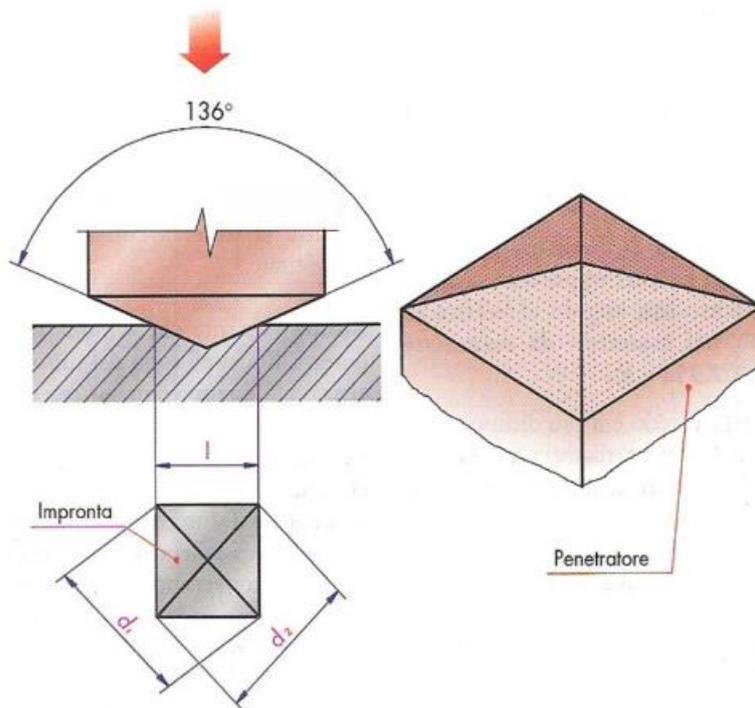


Figura 15: Penetratore prova Vickers [15]

Una volta posizionato il provino inglobato su un supporto possiamo procedere per una durata di 10 secondi utilizzando in questo caso 200gf e successivamente osservare e misurare (con il microscopio ottico integrato nella macchina di microdurezza) le diagonali riportando in un foglio di calcolo i valori misurati in modo da ottenere automaticamente i valori di durezza HV del tratto utile.

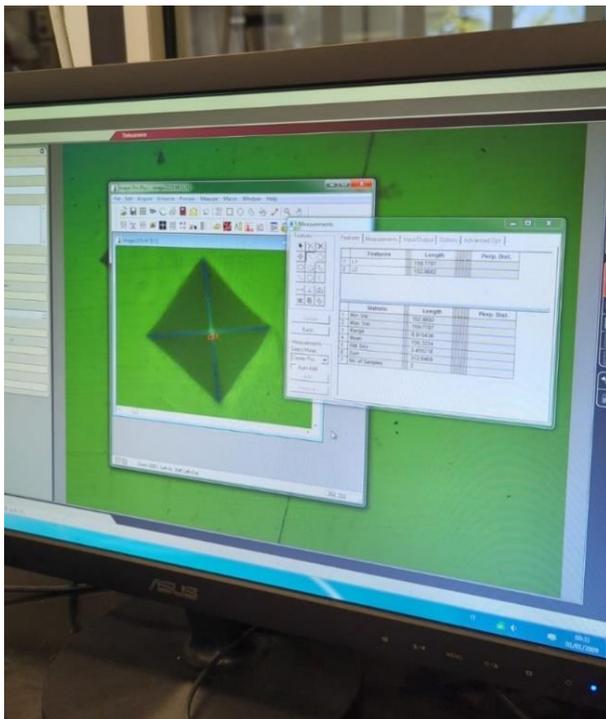


Figura 16: Impronta microdurezza Vickers



Figura 17: Macchina di microdurezza Remet HX-1000

3. Risultati sperimentali e discussione

3.1. Curve di creep

Terminata la prova possiamo analizzare i dati, come prima cosa conoscendo la lunghezza iniziale del provino possiamo calcolare la deformazione:

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

Successivamente possiamo calcolare la velocità di deformazione

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}$$

In questo modo possiamo generare la curva deformazione-tempo, la curva è caratterizzata da una deformazione istantanea ε_0 nei primi istanti della prova e successivamente possiamo dividere la curva in tre stadi:

- Stadio primario dove la velocità di deformazione $\dot{\varepsilon}$ diminuisce con il tempo; la deformazione in questo stadio diventa sempre più difficile a causa della moltiplicazione delle dislocazioni;
- Stadio stazionario: in questa fase la $\dot{\varepsilon}$ assume un valore costante e in questa condizione c'è un bilanciamento tra i fenomeni di rafforzamento (moltiplicazione ed interazione tra dislocazioni) e di addolcimento

(ripristino) con una microstruttura composta da sottograni di dimensioni costanti. Questa fase è analoga allo stadio stazionario di una curva tensione-deformazione utilizzando una velocità di deformazione costante; in entrambi i casi ad una data temperatura si hanno valori costanti della sollecitazione che corrispondono a velocità di deformazione costanti.

- Stadio terziario: la $\dot{\epsilon}$ aumenta con il tempo arrivando alla rottura, questo aumento e la successiva rottura sono dovuti ad una serie di fenomeni quali cavitazione cricche e strizione provocando una diminuzione della sezione resistente e quindi un aumento della tensione effettiva causando così la rottura del provino. [16]

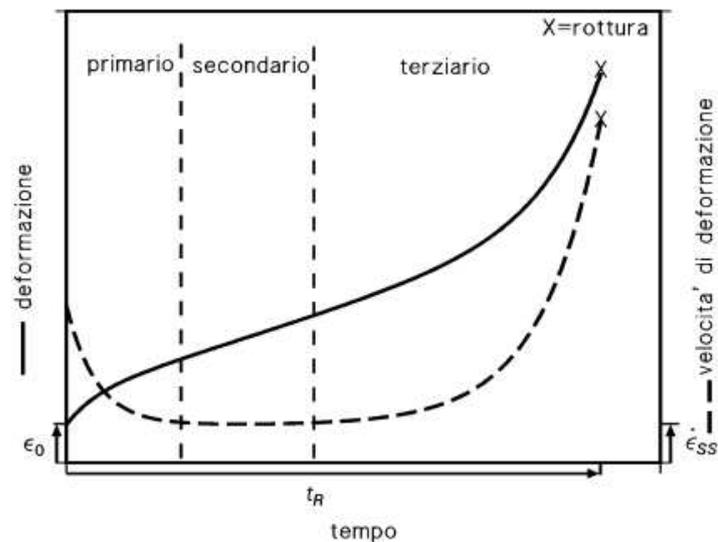


Figura 18: Andamento tipico curva deformazione e velocità di deformazione di Creep [1]

In questo caso studio sono state effettuate tre prove a 600°C, la prima prova con un carico variabile da 300 MPa e poi a 330 MPa, la seconda prova a 350MPa e la terza prova a 375MPa. I dati sono stati raccolti automaticamente durante lo svolgimento della prova in un foglio di calcolo Excel di questo tipo:

Sigma [MPa]	Tempo [s]	Allungamento [mm]	Deformazione	Velocità di def.
300	0	0,000	0,000	
300	6	0,006	0,000	6,7E-06
300	84	0,014	0,001	1,9E-06
300	326	0,021	0,001	1,2E-06
300	626	0,030	0,001	4,9E-07
300	6326	0,094	0,004	3,1E-07
300	16826	0,157	0,006	1,7E-07
300	40826	0,241	0,010	9,3E-08
300	112826	0,380	0,015	7,0E-08

Figura 19: Dati raccolti ed elaborati dopo la prova di Creep

Successivamente i dati di tutte le tre prove sono stati plottati in grafici a dispersione:

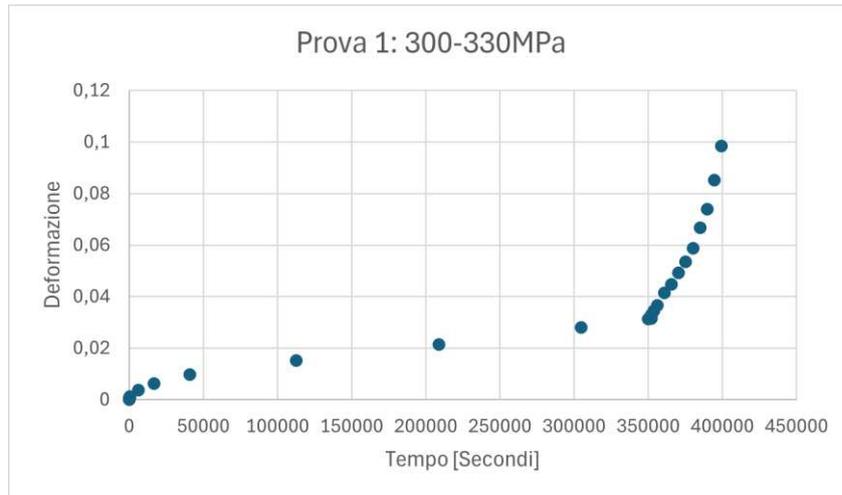


Figura 20: Diagramma deformazione-tempo prova 1

Durante la prima prova è stato necessario aumentare il carico applicato al provino, si vede chiaramente in fig.20 il punto sul diagramma quando la curva cambia rapidamente inclinazione a 35000 secondi circa (4 giorni).

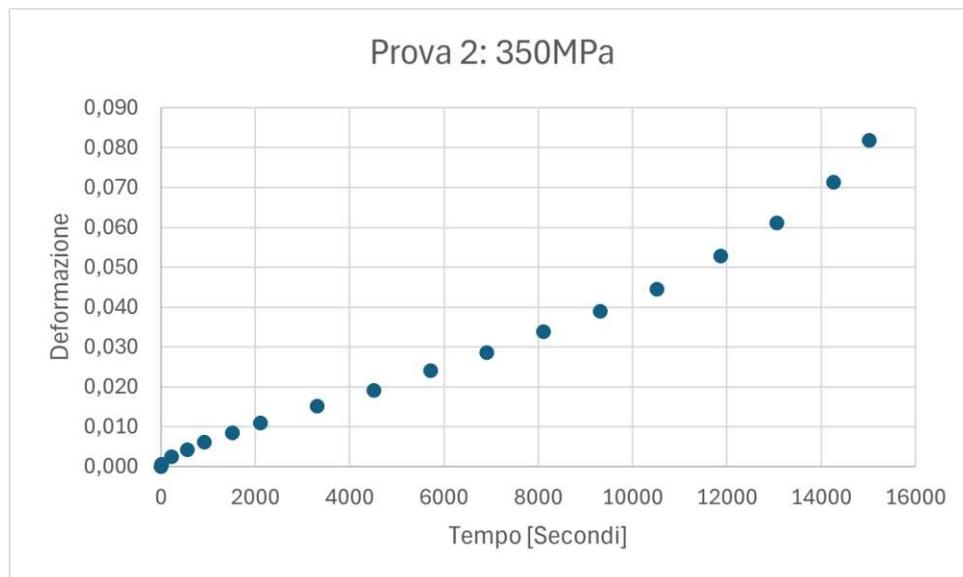


Figura 21: Diagramma deformazione-tempo prova 2

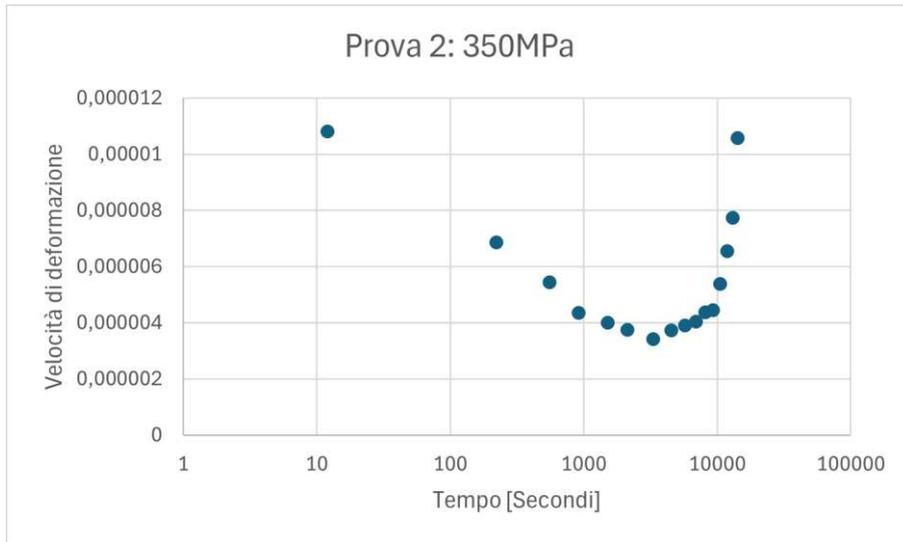


Figura 24: Diagramma velocità di deformazione-tempo prova 2

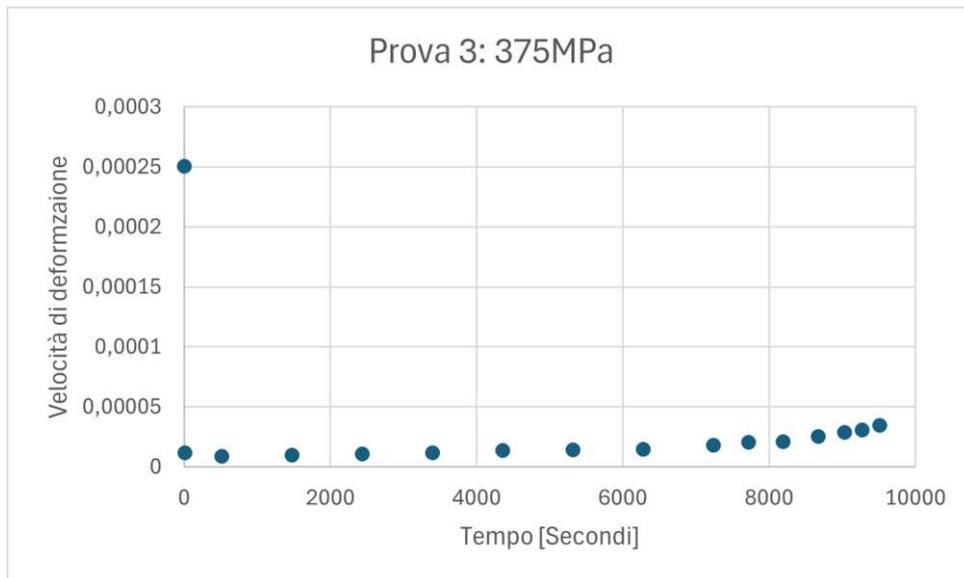


Figura 25: Diagramma velocità di deformazione-tempo prova 3

3.2. Dipendenza della velocità minima di creep dalla tensione di prova

Il parametro di maggior interesse che possiamo ottenere dalla curva di creep è la velocità di deformazione che si può esprimere come:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \left(\frac{b}{d} \right) \sigma^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right)$$

Dove d è la dimensione del grano, b il vettore di Burgers parametro caratterizzante dell'orientamento e intensità della dislocazione, A parametro del materiale, Q energia di attivazione del creep, n pari a 4-5 per i metalli puri. Per valutare la dipendenza della velocità di deformazione dalla tensione ad una data temperatura si fa riferimento alla legge di Norton (power law) [1]

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A(T) \cdot \sigma^n$$

Per arrivare alla legge di Norton possiamo utilizzare il grafico velocità di deformazione-deformazione per ricavare i valori minimi della velocità di deformazione

Il parametro di nostro interesse è l'esponente n , che va a caratterizzare la pendenza della curva nel settore secondario.

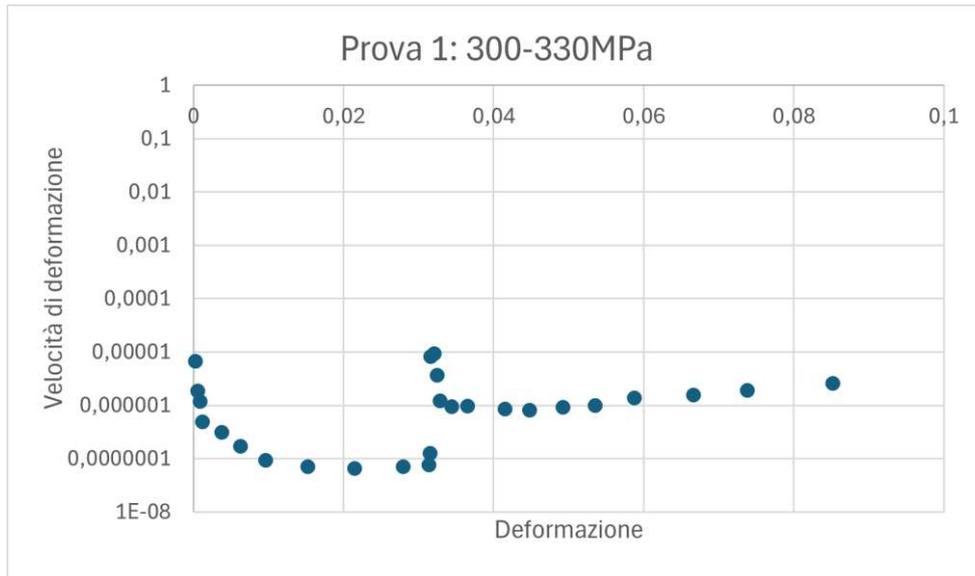


Figura 26: Diagramma velocità di deformazione-deformazione prova 1

Per la prima prova sono stati presi i valori minimi della velocità di deformazione prima e dopo l'aumento del carico, considerandole come due prove separate.

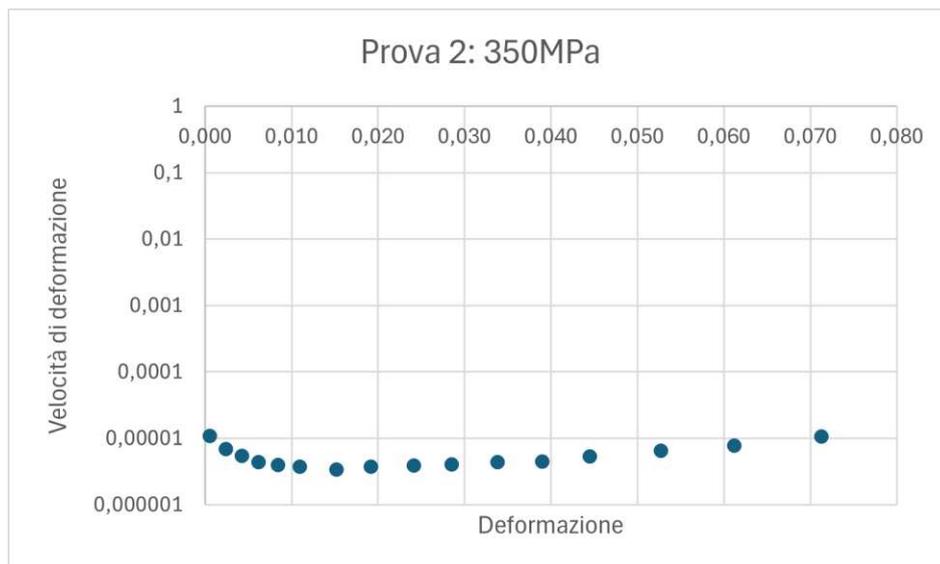


Figura 27: Diagramma velocità di deformazione-deformazione prova 2

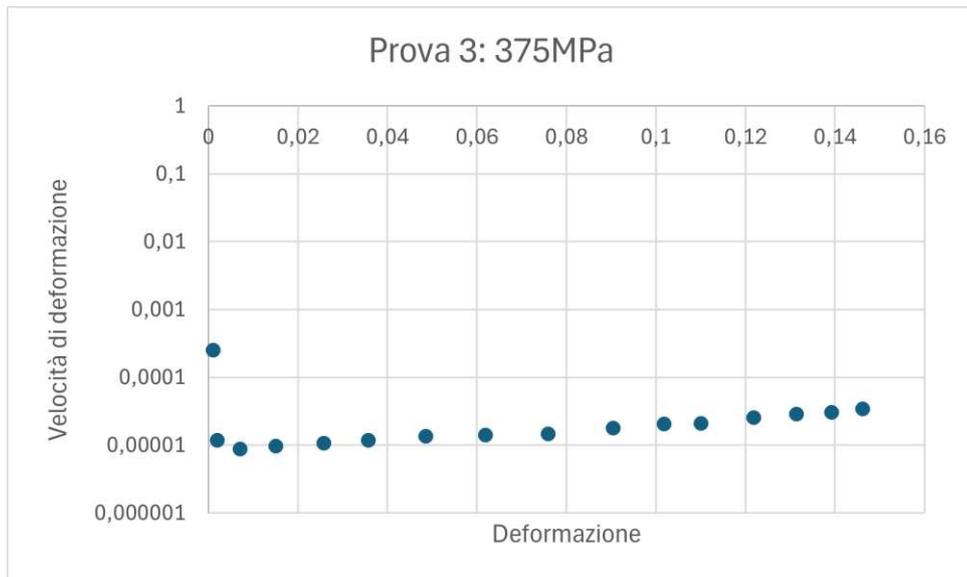


Figura 28: Diagramma velocità di deformazione-deformazione prova 3

Possiamo ora trovare i valori minimi di velocità di deformazione per ogni prova con la sua relativa tensione di prova.

Tensione MPa	Velocità minime
300	6,6E-08
330	8,1E-07
350	3,4E-06
375	8,9E-06

Figura 29: Valori minimi di velocità di deformazione

Interpolando questi valori in un grafico bilogarithmico possiamo ricavare la legge di potenza.

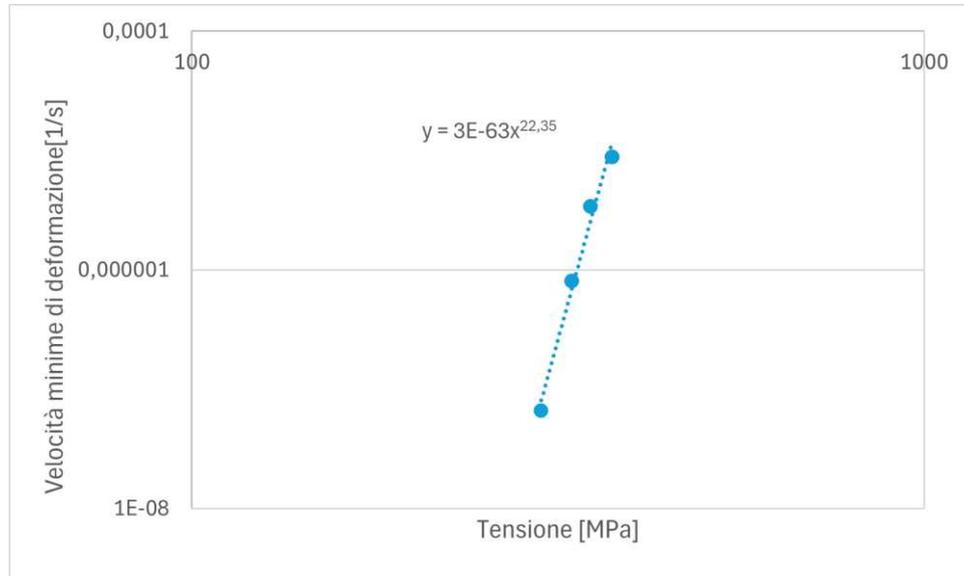


Figura 30: Diagramma velocità minime di deformazione in funzione con la tensione con equazione della retta

$$\dot{\varepsilon}_{min} = 3E - 63X^{22,35}$$

L'equazione rappresentata sul diagramma è la legge di potenza, in questo caso l'esponente di sollecitazione n è pari a 22,35

3.3. Prove di durezza

Per analizzare lo stato di microdurezza superficiale è stata eseguita una prova di microdurezza lungo il tratto utile del provino sottoposto a 350MPa 600°C.

Sono state effettuate 32 misure ogni 0.5mm dal tratto iniziale a quello finale del tratto utile (senza considerare le due teste decapitate di circa 5mm)

ottenendo così questi valori di media delle diagonali e la relativa durezza

Vickers.

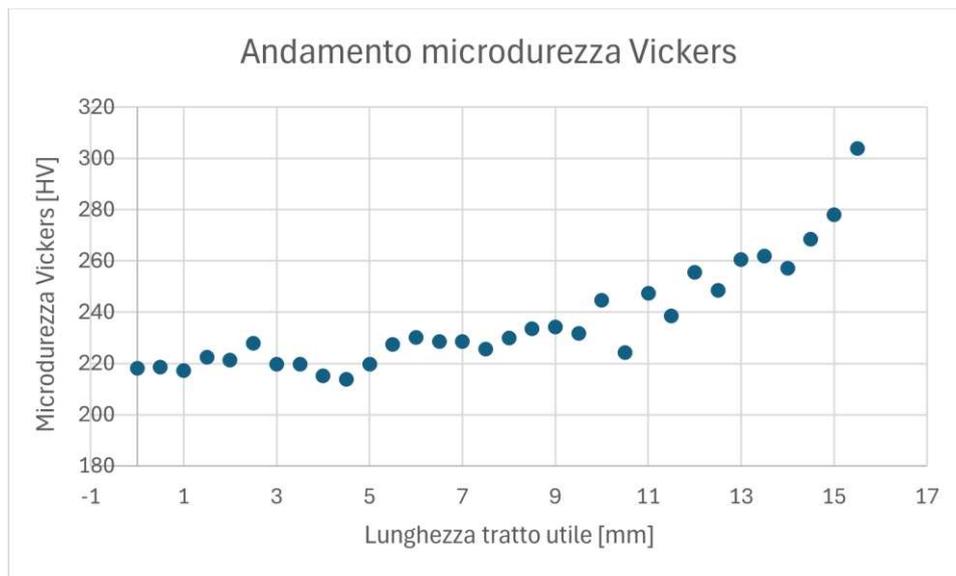


Figura 31: Andamento dei valori di microdurezza Vickers lungo il tratto utile del provino

Possiamo notare come avvicinandosi verso la parte finale del campione iniziando dal punto centrale del provino i valori medi delle diagonali impresse

dal penetratore sul provino diminuiscono, causando un aumento della microdurezza superficiale.

È stata effettuata infine una prova di durezza Rockwell sulle teste del provino, la differenza principale tra questa prova e la prova Vickers sta nell'ordine di grandezza oltre che nella forma del penetratore: viene effettuata con un penetratore di tipo B sferico di 1,5875 mm, quindi con dimensioni molto più grandi; infatti, per leggere i valori non è necessario un microscopio ma possiamo leggere una scala graduata posta sulla macchina. Il penetratore di tipo B viene utilizzato per valori da 20HRB a 100HRB con un precarico di prova totale di 980,7N, nelle indicazioni di durezza deve essere riportata anche la lettera S in quanto è stato utilizzato un penetratore sferico [14]

Sono state effettuate tre prove di durezza con carico $k_p = 100$ in punti differenti della stessa testa ottenendo i seguenti risultati:

Prova	HRB
1	84
2	84
3	86

Figura 32: valori durezza Rockwell

Possiamo ora convertire i valori di durezza Vickers in durezza Brinell utilizzando la norma ASTM A370-03a [17], il valore medio della durezza

Vickers lungo il tratto utile è di 236HV, che corrispondono approssimativamente a 100HRB. Paragonando questo valore con il valore di durezza Rockwell misurato sulla testa possiamo notare come la durezza del tratto utile è maggiore rispetto alla durezza della testa, coerentemente a quello che potremmo aspettarci, vista la deformazione accumulata in questa parte del campione.

4. Conclusioni

Con questo studio è stato possibile analizzare il comportamento di tre provini AISI316L prodotti tramite friction stir welding sottoposti a prova di creep a 600°C a diverse tensioni di prova 300, 330, 350, 370 MPa

Dall'elaborazione dati è stata ricavata la velocità minima di deformazione del secondario della curva di creep per ognuna delle prove, parametro fondamentale per conoscere la risposta a creep del provino.

In questo modo grazie al grafico bilogarithmico velocità di deformazione minima-tensione, possiamo ricavare la legge di potenza (formula di Norton)

$$\dot{\varepsilon}_{min} = 3E - 63X^{22,35}$$

I dati sperimentali quindi si collocano su scala bilogarithmica su una retta di pendenza pari a 22,35, valore piuttosto elevato, ma relativamente simile a quello di acciai simili testati in questo intervallo di condizioni sperimentali.

Sono state effettuate prove di durezza Rockwell e microdurezza Vickers, il valore medio di microdurezza Vickers lungo il tratto utile è di HV=237, mentre invece il valore medio di durezza Rockwell della testa del provino è di HRB=85, che complessivamente, una volta convertita in HV, è più bassa. Tale dato è coerente con il fatto che nel tratto utile si sono accumulate dislocazioni per effetto della deformazione.

Bibliografia

- [1] Spigarelli, S., Il comportamento dei metalli ad alta temperatura, “Comportamento dei materiali ad alta temperatura: lo scorrimento viscoso (creep)”, Milano, 21 ottobre 2003
- [2] Acciai inox austenitici da: <https://www.steelmaster.it/acciai-inossidabili-austenitici>
- [3] L'acciaio inox – da: <https://www.sidermariotti.it/acciaio-inox/>
- [4] Il grado 1.4404 o 316L ASTM F899 da: <https://www.stainless.eu/it/prodotti/acciai-inossidabili/316l/>
- [5] Acciaio AISI 316 - AISI 316 L da: <https://www.steelmaster.it/aisi316316l/>
- [6] Gruppo Mineralogico Paleontologico Euganeo – Difetti dei cristalli da: <https://www.gmpe.it/node/129>
- [7] Friction Stir Welding: la saldatura proiettata verso il futuro – da: <https://www.meccanicaneews.com/2022/07/06/friction-stir-welding-la-saldatura-proiettata-verso-il-futuro/>
- [8] N. Bhardwaj, G. Narayanan Recent developments in friction stir welding and resulting industrial practices – da: ReserchGate - https://www.researchgate.net/publication/333880469_Recent_developments_in_friction_stir_welding_and_resulting_industrial_practices
- [9] Tools & Tool Holders, Mazak MegaStir – da: <https://megastir.com/tools-toolholders/>

- [10] F. Fabbretti, Prova di trazione UNIFE – da:
<https://sb5fef15427338d25.jimcontent.com/download/version/1569271524/module/9901965521/name/01%20-%20TRAZIONE.pdf>
- [11] Termocoppia – da: <https://masterblob.com/termocoppie-guida-pratica>
- [12] DwyerOmega, LVDT. da: <https://it.omega.com/prodinfo/lvdt.html>
- [13] S. Umar, U. Muhammad - Sensitivity Determination of Linear Variable Differential Transducer (LVDT) in Fluid Level Detection Techniques
da:ReserchGate
https://www.researchgate.net/publication/325153671_Sensitivity_Determination_of_Linear_Variable_Differential_Transducer_LVDT_in_Fluid_Level_Detection_Techniques
- [14] S. Spigarelli, Appunti del corso di Metallurgia UNIVPM
- [15] Prove di durezza - da: https://www.slideserve.com/betty_james/prove-di-durezza
- [16] Scorrimento Viscoso UNIRoma2- da: https://didattica-2000.archived.uniroma2.it/CM1/deposito/Scorrimento_viscoso.pdf
- [17] Tabella di conversione ASTMA370-03a – da:
<https://www.bettinelliacciai.com/wp-content/uploads/TABELLA-DI-CONVERSIONE-DUREZZE.pdf>