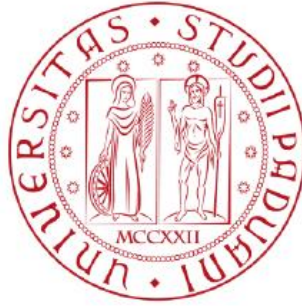


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



SCUOLA DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI  
MATERIALI

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

***FORMABILITÀ A CALDO DI LEGHE DI ALLUMINIO  
SERIE 6000 E 7000 DI INTERESSE AUTOMOTIVE***

*Relatore:* Prof.ssa Ing. Stefania Bruschi

*Correlatore:* Ing. Enrico Simonetto

*Laureanda:* ELISA DANIELA DE BONI

ANNO ACCADEMICO: 2017-2018







# INDICE

Sommario	Pag 1
Introduzione	Pag 3
<b>Capitolo 1: Leghe di Alluminio in campo Automotive</b>	<b>Pag 7</b>
<hr/>	
1.1 Alluminio in campo Automotive	Pag 7
1.2 Il telaio	Pag 11
1.3 Lo stampaggio a caldo	Pag 15
1.4 Le leghe di alluminio	Pag 16
<b>Capitolo 2: Lo Stato dell'arte</b>	<b>Pag 25</b>
<hr/>	
2.1 Studio di processi di deformazione e frattura di una lega AA6082 in condizioni di lavorazioni a caldo.	Pag 25
2.2 Formabilità e meccanismi di frattura di AA2021 in condizioni di formatura caldo	Pag 32
<b>Capitolo 3: La Formabilità di leghe</b>	<b>Pag 35</b>
<hr/>	
3.1 Fondamenti del comportamento meccanico dei materiali	Pag 35
3.2 Caratteristiche delle lamiere	Pag 44
3.3 La piegabilità	Pag 47
3.4 Anisotropia	Pag 50
3.5 Raggio minimo di piega	Pag 53
3.6 Formabilità di lamiere	Pag 55
<b>Capitolo 4: La Procedura sperimentale</b>	<b>Pag 63</b>
<hr/>	
4.1 Prove di trazione a caldo	Pag 63
4.2 Set up prova	Pag 67
4.3 Prova Nakazima	Pag 80
4.4 Analisi Frattografica	Pag 86
<b>Capitolo 5: Analisi dei Risultati</b>	<b>Pag 91</b>
<hr/>	
5.1 Analisi e interpretazione dei risultati per la lega AA6082	Pag 91
5.2 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 400°C.	Pag 93
5.3 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 300°C.	Pag 96

5.4 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 200°C.	Pag 99
5.5 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 25°C.	Pag 102
5.6 Effetto della temperatura sulla curva sforzo -deformazione	Pag 105
5.7 Anisotropia della lega AA6082	Pag 106
5.8 Deformazione a frattura della lega AA6082	Pag 110
5.9 Analisi frattografica della lega AA6082	Pag 113
5.10 Analisi dei risultati delle Prove Nakazima	Pag 118
5.11 Analisi e interpretazione dei risultati per la lega AA7xxx	Pag 123
5.12 Anisotropia della lega AA7xxx	Pag 131
5.13 Deformazione a frattura della lega AA7xxx	Pag 132
5.14 Analisi frattografica della lega AA7xxx	Pag 134
5.15 Confronto leghe	Pag 135
<b>Capitolo 6: Conclusioni</b>	<b>Pag 143</b>
<b>Bibliografica</b>	<b>Pag 147</b>

---

# Abstract

The demand for aluminum alloys has increased in recent years in response to a growing need for lightweight structural metals. For example, using aluminum alloys (rather than steels) for reducing automobile weight is currently of great interest, primarily for lower CO<sub>2</sub> emission and reduced fossil fuel consumption, per vehicle, but also for improving vehicle performance. Further reasons for increasing use of aluminum alloys in vehicles include their high strength to weight ratio and good recyclability, which are especially peculiar features considering recent regulations aimed at reducing the negative impact automobiles have on the environment.

As important light-weight structure material, aluminum alloy has been widely used in automotive and aerospace industries, in which the manufacturing of parts with high strength and good dimensional accuracy has been the main task. Aluminum alloys are extensively used as a structural material in the aircraft industry because of its good combination of strength and fatigue resistance. However, complex shaped components, particularly those made from sheet, are extremely difficult to form by traditional cold forming due to its low ductility at room temperature. A possible solution of this problem is to form sheet work pieces at elevated temperature. In hot stamping processes, the material is heated to the Solution Heat Treatment (SHT) temperature to enable the precipitates to be dissolved within the primary  $\alpha$ -Al matrix. Generally, for 6xxx series aluminum alloys, it is known that the ductility of the material is obtained from the SHT (T4 condition), and the strength is obtained from the aging process (T6 condition). Thus, it is beneficial to complete the forming stage prior to age hardening in order to benefit from the gained ductility following the SHT. The temperature at which SHT is performed is an important parameter, since it leads to significant changes in the microstructure of the alloy, and if optimized may lead to an improved capacity to tolerate extensive plastic deformation without cracking, i.e. to an improved formability of the material.

The aim of this work is studying and analyzing the formability of aluminum alloy AA6082-T6 in hot forming condition. The material is analyzed in different conditions of temperature and strain rate to value the best condition for hot forming.





# Sommario

L'industria Automotive, con la continua domanda di maggior prestazioni richiede l'evoluzione dei processi e dei materiali applicati.

Uno dei materiali più utilizzati nell'industria Automotive è l'alluminio. Grazie alla leggerezza e alle loro buone proprietà meccaniche, l'alluminio e le sue leghe rappresentano i perfetti sostituti agli acciai alto legati utilizzati nella produzione di parti di telaio delle automobili.

La ricerca di un materiale alternativo all'acciaio in grado di ridurre il peso dell'auto e che abbia proprietà meccaniche confrontabili con l'acciaio ha portato allo studio e analisi di trattamenti termici su leghe di alluminio in grado di ottimizzare le prestazioni meccaniche delle leghe. In parallelo allo studio di trattamenti si sono sviluppati anche tecniche di produzione di pezzi integrati con un sistema di riscaldamento per poter eseguire processi di formatura a caldo. I processi a caldo permettono di ottenere maggiori deformazioni e maggiore duttilità applicando minime forze, senza incorrere in rotture e ottenendo forme finali più precise, riducendo il ritorno elastico. Il lavoro presentato è una commissione di lavoro del gruppo *Fiat-Chrysler Automotive FCA* e dell'azienda francese *Constellium*, il lavoro è incentrato sullo studio di processo di formatura a caldo mediante prove di trazione e prove Nakazima per leghe di alluminio di classe 6000 e 7000. Il materiale viene testato per ricavarne le proprietà meccaniche al variare della temperatura e della velocità di deformazione.



# Introduzione

La necessità di ridurre i costi e l'emissione di CO<sub>2</sub> nei confronti dell'impatto ambientale è la chiave per il miglioramento tecnologico nel campo automobilistico. L'aumento dell'efficienza è possibile grazie alla riduzione del peso e all'uso di tecnologie ottimizzate in campo. La domanda di utilizzo di leghe di alluminio è aumentata negli ultimi anni come risposta alla necessità di utilizzare leghe metalliche leggere strutturali. Le leghe di alluminio sono di notevole interesse in campo *Automotive*, perché permettono la riduzione del peso delle auto, con conseguente riduzione di emissione di CO<sub>2</sub>, riduzione dei costi del carburante e aumento delle performance. L'interesse principale dell'aumento di impiego delle leghe di Alluminio è il rapporto sforzo/peso e la buona riciclabilità. In genere un telaio di un'auto costituisce un quarto del peso totale. Se il telaio fosse progettato con leghe leggere sarebbe possibile una riduzione del 40% della massa e un aumento del 32% dell'efficienza. Attualmente solo il 9% del peso di un'auto è progettata in lega di alluminio di cui la maggioranza è di fonderia. La necessità di ridurre il peso, ha permesso la ricerca e l'uso di lamiere di alluminio per la progettazione di pannelli e paraurti. La difficoltà di utilizzare le lamiere di alluminio in campo *Automotive* è principalmente dovuta alla loro limitata formabilità a temperatura ambiente, in particolare per le classi di leghe di alluminio più prestanti (6000, 7000), che potrebbero sostituire le componenti progettate in acciaio alto resistenziale.

La possibilità di sostituire l'acciaio alto resistenziale con una lega di alluminio porta alla necessità di dover rivalutare la stessa progettazione del telaio. Una lamiera di acciaio alto resistenziale potrebbe essere sostituita con un sistema di assemblaggio in lega di alluminio in grado di garantire simili prestazioni meccaniche; occorre valutare che il progetto sia possibile e che il fenomeno di ritorno elastico e lo *stress relaxation*, che avviene durante il processo di invecchiamento artificiale non alterino i limiti di tolleranza geometrici. Una tecnica che permette di superare le difficoltà legate alla limitata formabilità è quella del *superplastic forming* (SPF), che però è conveniente solo per limitate produzioni, come le auto di elevata performance. SPF permette quindi di superare l'ostacolo del limite di formabilità perché il pezzo viene formato a bassi valori di velocità di deformazione e ad elevata temperatura. La velocità di produzione è però limitata perché dipende dalla complessità del pezzo. Questa tecnica è costosa poiché richiede l'uso lamine che abbiano una microstruttura con grana fine. Sebbene SPF abbia un impatto significativo sui settori

di nicchia, non è adatto a settori di produzione di massa come quello dell'automobile. Un'altra soluzione valutata per superare il problema della formabilità è stata la *warm forming*. Con questa tecnica è possibile incrementare la duttilità delle leghe di alluminio lavorando ad alta temperatura e mantenendo anche lo stampo caldo. L'intervallo di temperature impiegata con questa tecnica è tra i 150-300°C. Al di sopra di 300°C avviene il deterioramento della microstruttura, che può essere prevenuto con la modifica delle proprietà termiche del processo. Il guadagno che si avrebbe in formabilità attraverso l'incremento della Temperatura di processo non è però sufficiente in confronto all'aumento della complessità del processo di riscaldamento dell'intero sistema. Si ha quindi che la *warm forming* è raramente usata in campo tecnologico.

La ricerca dell'industria meccanica è quindi orientata verso la possibilità di sviluppare materiali innovativi e con processi industriali che consentano di raggiungere la riduzione del peso e l'aumento dell'efficienza di un'auto a basso costo. Una procedura che sembra rispondere a queste richieste di mercato è quella di eseguire un trattamento termico sulla lega di alluminio. Nei processi di stampaggio a caldo, il materiale è sottoposto a solubilizzazione per permettere ai precipitati di dissolversi nella matrice di  $\alpha$ -Al. In generale per le leghe 6xxx la duttilità delle leghe deriva da una condizione T4 (tempra e invecchiamento), mentre la resistenza da T6 (tempra e invecchiamento artificiale). Il processo di formatura avviene prima dell'invecchiamento artificiale per avere la possibilità di sfruttare la duttilità garantita dalla solubilizzazione. La temperatura di solubilizzazione è un parametro rilevante, perché è legata alle variazioni microstrutturali della lega. L'ottimizzazione di questo parametro permette di incrementare la formabilità della lega e quindi anche la deformazione plastica senza arrivare subito a rottura. I motivi principali per i quali si esegue la solubilizzazione sulle leghe 6xxx sono:

- Ottenere una distribuzione uniforme degli elementi presenti in soluzione solida;
- Dissolvere composti con bassa temperatura di fusione come  $Mg_2Si$  e particelle di silicio che causano incrudimento durante il processo di deformazione
- Trasformare la fase  $\beta$ -AlFeSi in  $\alpha$ -AlFeMnSi per avere migliore formabilità.

Lo studio della formabilità delle leghe di alluminio è stato eseguito attraverso una campagna di prove di trazione e prove Nakazima. In entrambi le tipologie di prove è stato valutato sia l'effetto della Temperatura di esercizio sia della velocità di deformazione.

# Obiettivo della tesi

Il presente lavoro di tesi consiste nel valutare la formabilità di una lega di alluminio AA6082 e di una lega di classe AA7xxx attraverso prove di trazione a caldo e prove di formabilità di lamiera in temperatura.

L'obiettivo principale è analizzare e caratterizzare le leghe di Alluminio al fine di verificare se sia adatta a sostituire l'acciaio alto resistenziale impiegato nello stampaggio a caldo per realizzare parti della scocca dell'auto.

Il lavoro si colloca nell'ambito di un Programma di ricerca che coinvolge l'Università degli Studi di Padova, il gruppo di ricerca del centro *Fiat-Chrysler Automotive (FCA)* e dell'azienda francese *Constellium*

## Articolazione del lavoro di tesi

Il presente lavoro di tesi è stato articolato nel modo seguente:

- Capitolo 1 descrive le tecniche di applicazioni di leghe di alluminio in campo Automotive e fornisce le caratteristiche delle due leghe analizzate.
- Capitolo 2 fornisce una panoramica di articoli accademici che analizzano il comportamento a caldo di leghe di alluminio;
- Capitolo 3 fornisce i concetti teorici utilizzati nello sviluppo del lavoro seguente;
- Capitolo 4 descrive la procedura sperimentale adottata;
- Capitolo 5 fornisce i risultati dei test condotti;
- Capitolo 6 descrive le conclusioni della tesi.



# Capitolo 1

## Leghe di alluminio in campo Automotive

### Introduzione

Il primo capitolo descrive le caratteristiche dei materiali impiegati nello sviluppo di questo lavoro. La prima lega utilizzata è una lega di Alluminio AA6082-T6, oggetto di questo lavoro di tesi. Per questo materiale sono state eseguite le prove sia di trazione per lo stampaggio a caldo, sia per l'analisi di formabilità. Il secondo materiale utilizzato come confronto e riferimento per la valutazione e analisi delle prove è una lega di Alluminio AA7xxx, con la quale sono state svolte solamente prove di trazione a caldo in direzione 0° per lo stampaggio a caldo. In seguito, il capitolo prosegue con la descrizione dello stampaggio a caldo e delle prove Nakazima.

### 1.1 Alluminio in campo Automotive

L'industria dell'automobile valuta con interesse l'impiego dell'alluminio, come risorsa preziosa per la realizzazione di parti di veicoli. [1] Le ragioni di questo interesse possono essere ricondotte a:

- Riduzione dei consumi: date le proprietà fisiche della lega, essa permette di realizzare vetture meno pesanti e dai consumi ridotti.
- Miglioramento delle prestazioni: le leghe si distinguono per le loro proprietà meccaniche e per la loro lavorabilità. L'impiego di alluminio risulta migliorare l'aerodinamica del veicolo e la sicurezza grazie all'elevata capacità di assorbire urti.
- Riciclabilità. L'alluminio è riciclabile. Il recupero della lega può essere introdotto nella produzione di altri telai, o parti secondarie della carrozzeria.
- Estetica. La qualità superficiale delle leghe di alluminio dona un aspetto più elegante e raffinato alla vettura.

Il primo impiego di leghe di alluminio nell'automobile risale al 1897 per la costruzione del carter del motore della *Clark*. L'alluminio è stato poi impiegato per la trasmissione

e per il cofano della *Ford model T* e per la carrozzeria della *Rolls Royce “Silver Ghost”* negli anni Trenta. Dagli anni Cinquanta in poi, l’impiego dell’alluminio è cresciuto in modo lento, ma costante. Un incremento significativo si registra a partire dagli anni Settanta, quando le crisi petrolifere e la crescente attenzione all’ambiente hanno imposto di rendere i veicoli più ecologici ed efficienti. Negli anni Ottanta si è aggravato il problema della presenza nell’aria di smog e di prodotti tossici, si è manifestato il problema delle piogge acide e si sono intraviste le prime conseguenze dell’effetto serra, dovuto alla massiccia immissione di anidride carbonica nell’atmosfera. All’esigenza del risparmio energetico si è unita perciò quella della salvaguardia ambientale e del riciclaggio dei prodotti consumati. Dai tempi della crisi fino ai tempi odierni, la presenza dell’alluminio nei veicoli è cresciuta costantemente grazie alla continua ricerca di un compromesso tra tecnologia, sostenibilità economica e ambientale. In parallelo allo sviluppo di ridurre l’impatto ambientale, le industrie automobilistiche hanno sviluppato accessori e equipaggiamenti per il confort e la sicurezza dei guidatori. L’aumento degli accessori e quindi l’aumento del peso dell’auto rende necessario l’incremento di potenza dei motori e dell’impianto frenante, ma anche del consumo del carburante e delle emissioni di CO<sub>2</sub>. L’impiego di Alluminio nella realizzazione di componenti permette di minimizzare l’aumento di peso e di aumentare la sostenibilità ambientale dell’auto. [2] Gli impieghi con i nuovi obiettivi vincolanti per le emissioni di CO<sub>2</sub> imposti dalla commissione europea, le case automobilistiche dovranno garantire che le loro auto non emettano, mediamente, più di 130 grammi di CO<sub>2</sub> per chilometro. Entro il 2021 il limite dovrebbe scendere ulteriormente a 95 grammi per chilometro, con limiti di emissione calcolati in base alla massa di una vettura. Per rientrare nei limiti imposti, case automobilistiche, tra cui *Mercedes Benz, Audi, Volkswagen, Peugeot* prevedono di aumentare la quota di alluminio in diverse componenti, dalle porte ai motori. Oltre a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> questi cambiamenti permetteranno anche di ridurre la quantità di materiale inviato alle discariche in un’ottica di economia circolare. L’introduzione dell’alluminio nell’automobile è resa possibile da diversi fattori:

- Miglioramento dei processi di lavorazione e riduzione dei costi del materiale;
- Sviluppo di leghe avanzate;
- Maggiore conoscenza sulle proprietà di lavorabilità;
- Maggiore conoscenza dei criteri di progettazione per i componenti sotto lo stato di sollecitazione;



- Estensione dell'utilizzo a nuove applicazioni

Attualmente nelle costruzioni automobilistiche vi sono dei settori ben precisi in cui l'uso dell'alluminio è radicato e consolidato:

- Nei gruppi operativi: testata motore, collettore di aspirazione, scatola cambio, carcassa, alternatore e calotte del motorino di avviamento, coppa dell'olio, parte per l'aspirazione di turbocompressori.
- Nel telaio: cerchioni, scatole dello sterzo, barre di protezione laterali.
- Nel sistema di raffreddamento: radiatore, pompa acqua e raccordi per manicotti.
- Nei componenti del climatizzatore: condensatore, evaporatore, carcassa del compressore.

L'impiego di alluminio nella carrozzeria permette un ammortamento energetico nella fabbricazione della vettura. [3] Se si confronta la stessa auto realizzata in un caso in acciaio e nell'altro in alluminio primario si osserva che a livello di costo energetico, la vettura in acciaio è prodotta con 127 GJ, mentre quella in alluminio con 152-163 GJ. Occorre però ricordare che la vettura in alluminio pesa circa 200 Kg e di conseguenza consuma meno carburante. Si perviene ad un punto di pareggio energetico fra le due soluzioni fra 85000 Km. Oltre questa percorrenza il bilancio energetico della carrozzeria in alluminio diventa positivo rispetto a quello dell'auto in acciaio. Lo stesso confronto può essere fatto valutando la quantità di CO<sub>2</sub> emessa durante tutto il ciclo produttivo dell'autovettura e poi durante il suo uso sia per un'auto convenzionale sia per una in alluminio. Durante la produzione dell'alluminio si hanno emissioni di CO<sub>2</sub> più elevate rispetto all'acciaio, ma l'ammortamento è assicurato attorno ai 90000 km, a causa del minor consumo dell'autovettura e quindi di una minore emissione di prodotti di combustione.

La riduzione del peso delle scocche sta determinando significativi cambiamenti nei processi applicati nei reparti di carrozzeria e verniciatura. [4] Scocche sempre meno pesanti, realizzate con leghe di acciaio e metalli più leggeri come l'alluminio, richiedono un approccio diverso per quanto riguarda il trattamento superficiale. I nuovi processi offrono alle case automobilistiche non solo l'opportunità di utilizzare strutture metalliche più leggere, ma anche di impiegare materiali più semplici rispetto alle precedenti generazioni di prodotti per il trattamento. La nuova Giulia (figura.1) presenta una scocca più leggera del 13% rispetto a una struttura comparabile interamente in acciaio. Questo risultato è stato ottenuto utilizzando metalli leggeri accanto a nuovi materiali di processo e nuove

tecnologie applicative. Al fine di ottenere una riduzione del peso e un incremento delle prestazioni, FCA utilizza alluminio in ragione del 45% della superficie della scocca. La casa automobilistica ha adottato un pacchetto acustico altamente innovativo per migliorare il comfort nell'abitacolo, conseguendo al contempo un'ulteriore riduzione del peso.



FIGURA 1.AFA GIULIA

## 1.2 Il telaio

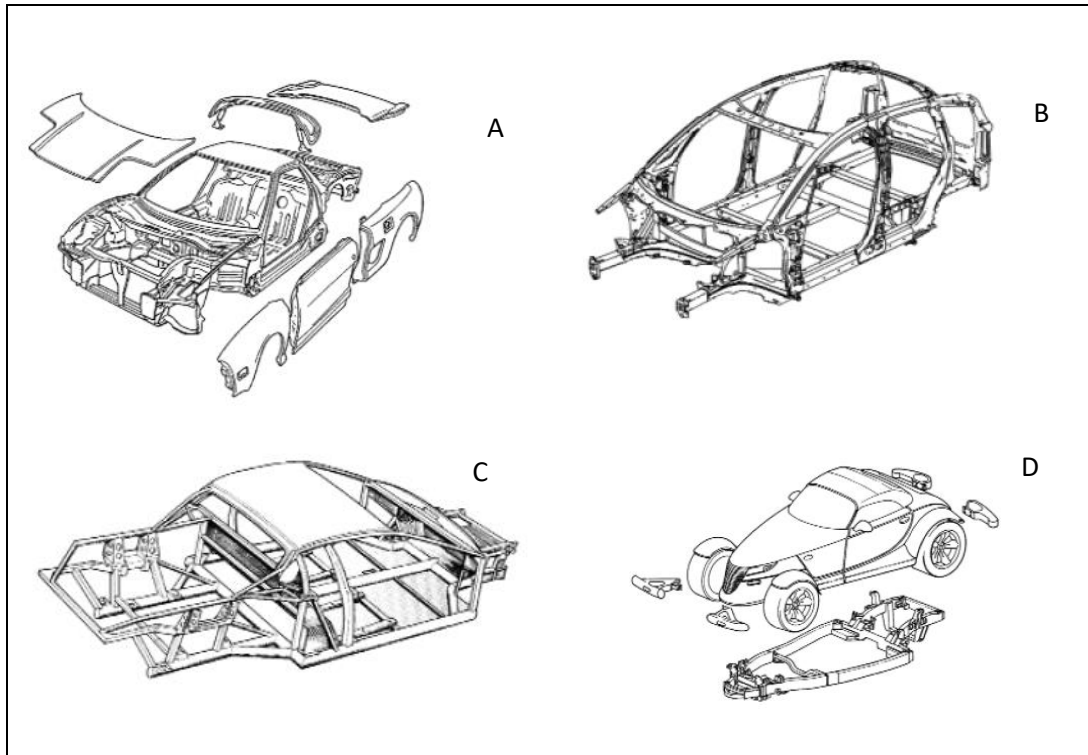
Per poter trattare l'argomento telaio è opportuno darne una definizione preliminare. Si intende per telaio quell'insieme di elementi il cui compito è di sostenere i carichi statici e dinamici, conferire rigidità al veicolo, proteggere i passeggeri in caso di urto e fornire

supporto a tutti gli elementi della vettura: motore, organi meccanici, sistemi ausiliari, passeggeri e merce trasportata.

La carrozzeria può essere più o meno integrata con il telaio, a seconda delle diverse tipologie costruttive. A questo proposito si riporta di seguito una breve descrizione delle architetture strutturali più diffuse, e di come esse possano beneficiare dell'uso dell'alluminio:

- **Scocca portante (*unibody*)** La scocca portante in lamiera stampata, o monoscocca, è da decenni la soluzione più adottata per le vetture di serie, ed attualmente viene scelta nel 95% delle vetture prodotte a livello mondiale. Telaio e carrozzeria costituiscono un'unica struttura 'a guscio', composta da pannelli stampati (mediamente circa 300) uniti tra loro con saldature a punti (mediamente da 3.000 a 5.000) eseguite in automatico da robot. I vantaggi principali sono la grande adattabilità a volumi produttivi molto elevati e le ottime prestazioni in termini di rigidità, comportamento a crash e sfruttamento dei volumi. Il principale limite di questa architettura costruttiva è dato, oltre che dagli elevati volumi produttivi necessari ad ammortizzare gli imponenti investimenti richiesti per la realizzazione delle linee produttive, dall'intrinseca pesantezza dell'insieme. L'adozione di lamiere in alluminio in alternativa a quelle in acciaio rappresenta una soluzione a questo problema, garantendo risparmi di peso nell'ordine del 40%.
- **Space frame;** si intende una architettura costruttiva costituita da una 'gabbia' di profilati connessi tra loro mediante nodi rigidi. Rispetto ai telai tubolari la struttura è composta da un numero molto inferiore di elementi aventi però maggiori dimensioni. A livello funzionale, rispetto alla scocca portante, tutti i pannelli esterni (fissi e mobili) danno un contributo strutturale secondario, anche se l'integrazione fra telaio e carrozzeria può differire a seconda delle specifiche applicazioni. Lo space-frame si presta molto bene ad essere realizzato con leghe di alluminio, potendosi sfruttare con vantaggio molte tecnologie specifiche delle leghe leggere: la pressocolata (per i nodi di connessione), l'estrusione e la piegatura (per i profilati), lo stampaggio (per la carrozzeria e i pannelli strutturali). Lo space-frame presenta buone caratteristiche di rigidità e comportamento all'urto, che ne fanno una valida alternativa alla scocca portante per la produzione di veicoli caratterizzati da regimi produttivi di medio livello.

- Telaio a traliccio tubolare (*tubular chassis*); È costituito da un traliccio di tubi a sezione circolare o rettangolare (per semplificare le connessioni), saldati tra loro. La carrozzeria è costituita da pannelli fissati al telaio che non hanno compiti strutturali. Garantisce elevate prestazioni e ottimi rapporti rigidezza/peso, superati solamente dalle scocche in fibra di carbonio. L'applicazione di questa soluzione a vetture di serie è tuttavia fortemente ostacolata dall'aumento dei costi e dei tempi di costruzione e di assemblaggio, impossibili da automatizzare efficacemente. Un altro svantaggio è l'ingombro della struttura, soprattutto nella zona delle fiancate, dove i longheroni laterali obbligano ad innalzare la soglia inferiore delle portiere a tutto svantaggio dell'accessibilità. È impiegato per vetture sportive con bassi volumi produttivi, ma attualmente viene talvolta scartato in favore di soluzioni alternative, come gli space-frame ibridi in lega di alluminio e compositi.
- Telaio a longheroni (*body on frame*) È stato il primo schema costruttivo impiegato nella produzione di autoveicoli, ed è costituito da una struttura piana a forma di 'scala a pioli' (*ladder chassis*) composta da due elementi longitudinali -*longheroni* - connessi da membri trasversali - *traverse* - che forniscono resistenza alle forze laterali e conferiscono rigidità torsionale all'insieme. I punti di connessione fra traverse e longheroni sono generalmente rinforzati con piastre nodali saldate. La carrozzeria può essere connessa al telaio mediante tasselli elastici, che aumentano l'isolamento dell'abitacolo da rumore e vibrazioni e contribuiscono alla rigidezza della vettura. A fronte della semplicità costruttiva e della versatilità (diverse carrozzerie possono essere montate sulla stessa struttura di base), il telaio a longheroni non viene normalmente impiegato per vetture di serie, a causa della bassa rigidezza dovuta alla bidimensionalità della struttura (a parità di rigidezza il peso è superiore del 10- 15% rispetto alla scocca portante) e per l'assemblaggio complesso e poco adatto l'automazione industriale.



**FIGURA 2**RAPPRESENTAZIONE DI TELAI: A SCocca PORTANTE IN LAMIERA DI ALLUMINIO (HONDA NSX, 1981); B) SPACE-FRAME IN ALLUMINIO (AUDI A2, 2000);C) TELAIO TUBOLARE IN ACCIAIO (FERRARI TESTAROSSA, 1984; D) CARROZZERIA SU TELAIO A LONGHERONI E TRAVERSE (PLYMOUTH PROVLER, 1997)

### 1.2.1 La progettazione del telaio

Per sfruttare al meglio la leggerezza e le prestazioni delle leghe leggere occorre pensare i processi progettuali e produttivi in funzione delle caratteristiche peculiari dei materiali impiegati. Sotto questo aspetto talvolta si genera confusione, valutando le qualità dell'alluminio nel contesto industriale proprio dell'acciaio: i risultati appaiono meno brillanti se all'alluminio si applicano tecnologie che sono nate e si sono evolute intorno all'acciaio senza adattare ai nuovi materiali.

L'impegno richiesto per la conversione degli impianti produttivi comporta alcuni investimenti, ma è ripagato dalle caratteristiche finali del prodotto in termini di leggerezza, prestazioni, rispetto per l'ambiente e immagine di alta tecnologia. Alcune proprietà dell'alluminio pongono dei quesiti progettuali a cui è possibile dare risposta adottando specifiche soluzioni ed accorgimenti. Nel caso della progettazione di telai automobilistici, è fondamentale ottenere elevati valori di resistenza e rigidità. La prima garantisce il corretto supporto dei carichi e la sicurezza dei passeggeri in caso di incidente; la seconda è essenziale per un soddisfacente comportamento dinamico della vettura, che con una struttura troppo flessibile andrebbe incontro a pericolose oscillazioni e a difficoltà nel

controllo dell'assetto. È interessante notare come la rigidità sia il vincolo più restrittivo per l'80% dei componenti strutturali di un'automobile.

I telai in lega leggera sono composti principalmente da componenti estrusi, presso colati e in lamiera stampata. L'estrusione viene impiegata per la realizzazione di tutti gli elementi strutturali a sviluppo rettilineo o curvilineo, e comporta costi di produzione piuttosto limitati. È possibile ottenere in modo relativamente semplice sezioni chiuse di notevole complessità, eliminando la necessità di profilati scatolati realizzati mediante la piegatura e giunzione di lamiere stampate. Un notevole beneficio progettuale è rappresentato dalla possibilità di ottimizzare la geometria e gli spessori in funzione delle sollecitazioni effettive e di integrare elementi aggiuntivi come nervature e scanalature per accoppiamenti. Per ottenere profilati con rigidità e resistenza equivalenti a quelle raggiungibili con l'acciaio, se ne aumentano le dimensioni complessive e si ottimizza la forma in modo da dare rigidità massima in relazione al tipo di sollecitazione prevalente sul componente. Per ottenere profilati curvi o con sezione variabile si possono effettuare, successivamente all'estrusione, lavorazioni di piegatura o idroformatura.

Poiché le esigenze di rigidità sono le più vincolanti, l'adozione di leghe con resistenza meccanica di livello medio non è penalizzante: si preferiscono quindi le leghe alluminio-magnesio-silicio (serie 6xxx) per la loro formabilità, lavorabilità e saldabilità, oltre che per la possibilità di eseguire trattamenti termici, talvolta integrati direttamente nel processo di estrusione. Sono realizzati mediante presso colata i nodi strutturali di connessione: la possibilità di ottenere forme estremamente complesse lascia ampio spazio alla libertà dei progettisti, mentre le nuove tecnologie di presso colata consentono di realizzare pezzi con ottime caratteristiche meccaniche e spessori sempre più ridotti. Si impiega infine lo stampaggio per la realizzazione dei pannelli in lamiera, che possono integrare una struttura di tipo *space-frame* o essere utilizzati per la costruzione di un'intera scocca portante. Per questo tipo di componenti le case automobilistiche possono beneficiare del know-how acquisito con lo stampaggio delle scocche in acciaio, introducendo opportune modifiche al processo produttivo.

### 1.3 Lo stampaggio a caldo

Lo stampaggio a caldo è un processo di formatura, che consiste nel riscaldare la lamiera per rammorirla e poi di procedere con la lavorazione, attraverso l'uso di un punzone, che impartisce la forma desiderata. la lamiera viene scaldata in forno e poi trasferita immediata alla pressa per essere stampata.

Il vantaggio di questo processo è vario: riduzione del ritorno elastico, pezzi di forma finita, tolleranze dimensionali stretta, elevata velocità di produzione, capacità della macchina inferiore, rispetto alla lavorazione a freddo. Questo ultimo vantaggio è molto importante a livello economico ed è dovuto al fatto che il materiale, se lavorato a caldo, presenta un'ottima duttilità ed è lavorabile a tensioni di flusso inferiori, perché ha modulo elastico inferiore rispetto allo stato ambiente. L'effetto della temperatura sul materiale consente di adottare pressioni inferiori e migliora la formabilità del materiale.

Per sfruttare pienamente le potenzialità dello stampaggio a caldo, garantendo anche l'economicità della produzione di geometrie complesse si devono considerare i seguenti aspetti:

- Temperatura di processo e distribuzione di temperatura adeguata sul pezzo;
- Integrazione del processo di stampaggio a caldo con la catena di produzione;
- Stima del tempo di produzione, calcolato in riferimento alla temperatura del processo;
- Qualificazione di simulazione a elementi finiti per una corretta progettazione;
- Garanzia per la sostenibilità economica
- Garanzia per la sicurezza in ambiente lavorativo;

Per una corretta progettazione si devono considerare pure la fornitura del materiale e le condizioni di processo adeguate. il riscaldamento deve essere integrato al sistema e le temperature richieste devono essere raggiunte rapidamente. *Neugebauer et al.* in [6] descrivono le caratteristiche peculiari del processo. Esistono diverse possibilità di tecnologie di stampaggio:

- Riscaldamento del pezzo esterno allo stampo, stampaggio con stampo freddo;
- Riscaldamento del pezzo esterno allo stampo, stampaggio con stampo preriscaldato;
- Riscaldamento del pezzo all'interno dello stampo con stampo caldo.

Nella prima tecnologia il primo parametro di processo fondamentale risulta essere lo scambio di calore tra lamiera e stampo; nella seconda e terza tecnologia, lo scambio di calore viene minimizzato attraverso il riscaldamento dello stampo. Lo stampo può essere preriscaldato per induzione, conduzione, microonde, convezione o irraggiamento. La scelta dipende dai limiti di costo del processo. Il secondo parametro fondamentale nella scelta della tecnologia migliore è la durata di processo. una breve durata permette di minimizzare:

- Trasferimento di calore tra stampo e lamiera;
- Attrito tra stampo e lamiera;
- Aumento di temperatura in aree localizzate;

Il terzo parametro fondamentale è la temperatura che influenza le proprietà meccaniche del materiale. L'aumento della temperatura provoca un calo della proprietà elastiche, della tensione di snervamento, della resistenza al creep. L'effetto negativo di lavorare a temperatura elevate sono il calore che viene generato, e l'aumento dell'usura degli utensili, che devono essere progettati per resistere alle condizioni di processo. in generale gli utensili si realizzano in ghise ad alto tenore di silicio, acciai inossidabili o leghe alto-resistenziali.

## **1.4 Le leghe di alluminio**

Le leghe di alluminio si dividono in due classi principali [7]:

- Leghe da fonderia;
- Leghe da lavorazione plastica.

La maggior parte delle leghe di alluminio viene utilizzata allo stato semilavorato, cioè viene realizzata per deformazione plastica. Grazie all'affinamento e all'omogeneizzazione del grano e all'incrudimento introdotto dalla lavorazione meccanica della lega laminata, viene aumentata la resistenza meccanica. Le leghe si suddividono in due grosse categorie:

- Leghe da incrudimento, non trattabili termicamente, ovvero induribili solo per deformazione plastica a freddo (stato metallurgico H);
- Leghe trattabili termicamente, cioè induribili per precipitazione di fasi coerenti e semicoerenti (stato metallurgico T).



Le leghe da incrudimento sono rinforzate attraverso la deformazione plastica a freddo e le procedure, che si effettuano mirano a ottimizzare le proprietà meccaniche. In tabella 1 sono riportati i codici che descrivono lo stato di fornitura [8]

TABELLA 1

<b>Codice</b>	<b>Trattamenti termici e meccanici</b>
<b>F</b>	Grezzo di produzione
<b>O</b>	Completa ricottura
<b>H</b>	Incrudimento per deformazione dopo ricottura

I trattamenti termici che si possono eseguire sulle leghe trattabili termicamente sono: ricottura, distensione, solubilizzazione. Nel caso di studio analizzato, le leghe di alluminio sono state sottoposte a un ciclo termico, che prevede un trattamento di solubilizzazione. La solubilizzazione viene condotta ad una temperatura superiore a quella corrispondente al limite di solubilità della percentuale di soluto in esame all'interno dell'alluminio per un tempo sufficiente a garantirne l'omogeneizzazione. In generale dopo il mantenimento ad alta temperatura per favorire la solubilizzazione degli elementi in lega, il trattamento prevede un raffreddamento rapido, che permette di portare lo stato del materiale solubilizzato a temperature inferiori. In alcuni casi, al fine di aumentare la resistenza meccanica, possono essere eseguite dei trattamenti termomeccanici specifici. In tabella (2) sono riportati gli stati fisici d'impiego delle leghe da trattamento termico con i relativi codici usati per la designazione [8]:

TABELLA 2

<b>Codice</b>	<b>Trattamenti termici e meccanici</b>
<b>T1</b>	Ricottura ed invecchiamento naturale
<b>T2</b>	Ricottura, incrudimento e invecchiamento naturale
<b>T3</b>	Tempra di soluzione, incrudimento e invecchiamento naturale
<b>T4</b>	Tempra di soluzione e invecchiamento naturale
<b>T5</b>	Ricottura e invecchiamento artificiale.
<b>T6</b>	Tempra di soluzione e invecchiamento artificiale
<b>T7</b>	Tempra di soluzione e stabilizzazione
<b>T8</b>	Tempra di soluzione, incrudimento e invecchiamento artificiale
<b>T9</b>	Tempra di soluzione, invecchiamento artificiale e incrudimento
<b>T10</b>	Ricottura, incrudimento e invecchiamento artificiale

Le leghe da lavorazione plastica vengono designate con una sigla, composta da 4 cifre, seguite da una lettera che indicano rispettivamente

- Prima cifra indica la classe della lega;
- Seconda cifra indica la modificazione rispetto alla lega originale della classe
- Terza e quarta cifra sono indicativi della composizione della lega o della purezza dell'alluminio se la lega appartiene alla classe 1000.

Le principali leghe di alluminio sono:

- Serie 1000: si tratta di Alluminio industrialmente puro, almeno al 99%. Queste leghe sono note per l'eccellente resistenza a corrosione, conducibilità termica e elettrica.
- Serie 2000 o *Avional*: la lega è composta da alluminio, rame con piccole percentuali di magnesio e manganese. Dopo il trattamento termico, hanno ottime prestazioni meccaniche confrontabili con quelle tipiche di acciaio al carbonio l'indurimento avviene per precipitazione. Il sistema Al-Cu possiede un eutettico AL-AlCu<sub>2</sub> a 548°C.
- Serie 3000: il principale elemento in lega è in Manganese, che migliora la resistenza meccanica e riduce la sensibilità alla corrosione intergranulare. Le leghe AL-Mn presentano un eutettico a 658°C e per una composizione del 2% in -Manganese, la fase intermetallica che si separa è MnAl<sub>6</sub>.
- Serie 4000 (*leghe da fonderia*): il principale elemento in lega è il Silicio, che rende la lega meno viscosa e riduce il coefficiente di dilatazione e una buona resistenza a usura. A 577°C e con l'11.7% (w%) di Silicio, il sistema Al-Si forma un eutettico
- Serie 5000 o *Peraluman*: il principale elemento è il Magnesio, che conferisce buona resistenza a corrosione, a caldo e migliora la duttilità e la lavorabilità. Il magnesio presenta una buona solubilità nell'alluminio, motivo per il quale non si formano precipitazioni apprezzabili. Le proprietà meccaniche sono migliorabili mediante lavorazioni a freddo e non tramite trattamento termico.
- Serie 6000 o *Anticorodal*: i principali elementi in lega sono Silicio e Magnesio. Sono leghe da trattamento termico e sono dotate di prestazioni meccaniche intermedie, inferiori alla classe 2000. Presentano una buona formabilità, lavorabilità, truciolabilità e saldabilità. Trovano applicazione in campo

architettonico e *automotive* nella realizzazione di telai motociclistici e ciclistici. Hanno una buona resistenza meccanica, sensibilità relativamente bassa alla tempra e buona resistenza a corrosione. L'indurimento avviene soprattutto per precipitazione del composto  $Mg_2Si$ .

- Serie 7000 o *Ergal*: il principale elemento in lega è lo Zinco, elemento con maggior solubilità nell'alluminio. Il sistema Al-Zn forma un eutettico ad una concentrazione del 95% (w%) di Zn a  $382^{\circ}C$ . in genere le leghe binarie di Al-Zn non sono utilizzate e ad esse sono preferite le leghe Al-Zn-Mg, che possono essere trattate termicamente. Questa classe di leghe assumono valori di resistenza meccanica a trazione maggiori rispetto alle altre classi. Lo Zinco aumenta la resistenza e la durezza e favorisce l'auto temprabilità della lega- sono soggette a tenso-corrosione presentano una scarsa saldabilità per fusione. Queste leghe sono impiegate in campo aeronautico e per parti di mezzi di trasporto molto sollecitate.
- Serie 8000: questa serie raggruppa una famiglia di leghe, in quanto le composizioni sono molto varie e non catalogabili come in precedenza. A questa serie appartengono leghe destinate alla produzione di conduttori elettrici, fogli sottili da imballaggio e per tecnologie in campo aeronautico.

In figura 3 viene riportato uno schema illustrativo delle classi e della relativa composizione.

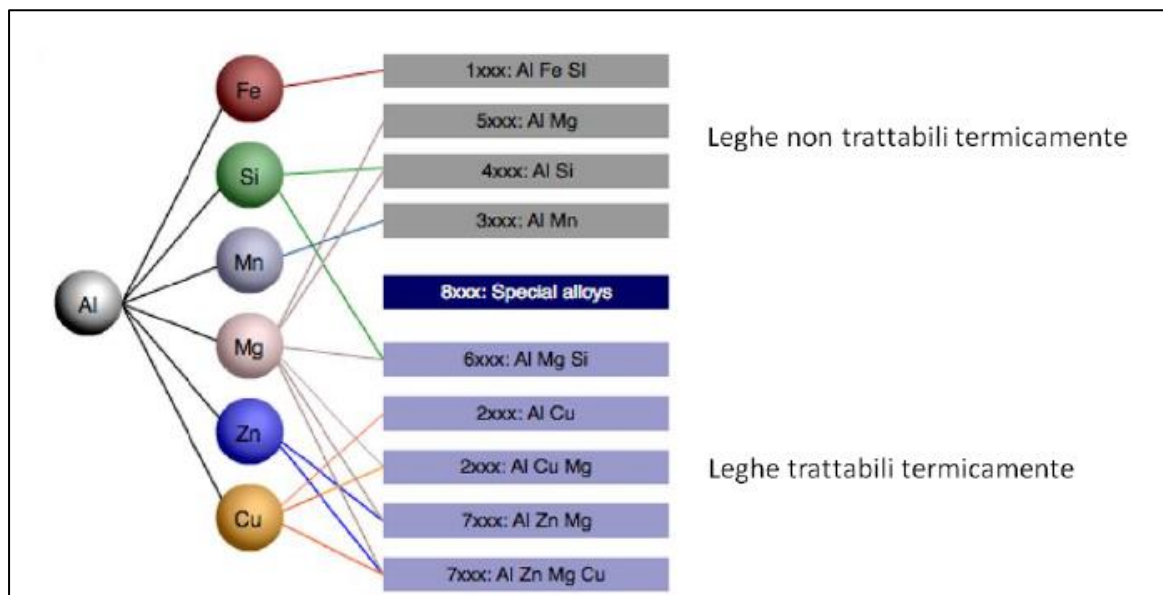


FIGURA 3 SCHEMA RIASSUNTIVO DELLE SERIE DI LEGHE DI ALLUMINIO [9]

In sintesi, la serie 1000, 3000, 4000, 5000 sono leghe da incrudimento. È possibile eseguire trattamenti termici di ricottura per ridurre o annullare parzialmente gli effetti della

deformazione plastica a freddo. plastica e realizzare gli stati fisici intermedi tra il ricotto, che ha la minima resistenza meccanica e la massima plasticità, e l'incrudito, che ha la massima resistenza meccanica e la minima plasticità. In tabella 3 e 4 sono riportati esempi di impiego di leghe di alluminio [8]

TABELLA 3 ESEMPI DI IMPIEGO GENERALE DI LEGHE DI ALLUMINIO

<b>Leghe</b>	<b>Principali applicazioni</b>
1050	Tubi per scambiatori di calore
3003	Radiatore, raffreddatori aria condizionata
6005A	Parti di space frame, sedili e sospensioni
6008	Space-frame
6014	Space-frame
6060	Supporti motore, parti molto deformate
6061	Guide sedili, paraurti, parti ABS, sub frame
6063	Parti di space-frame e sub-frame, struttura anti crash
6082	Barre laterali antimpatto, telaio portiere, space-frame, sub-frame
6106	Parti di space- frame e di strutture anti crash
7003	Paraurti

TABELLA 4 ESEMPI DI IMPIEGO DI LEGHE DI ALLUMINIO NELLE AUTOMOBILI

<b>Leghe</b>	<b>Principali applicazioni</b>
1050	Ripari calore, alette per scambiatori calore
3003	Scambiatori di calore
5005	Ripari calore, parti strutturali
5052	Chassis, parti strutturali
5454	Ruote
5754	Chassis, assali, pannellaria interna
5182	Parti strutturali, pannellaria interna
5083	Parti strutturali
6016	Scocca, pannellaria esterna
6181A	Scocca, pannellaria interna
6111	Scocca, pannellaria esterna

#### 1.4.1 Leghe AA6082

La lega AA6082 è la più resistente tra le leghe della classe 6000 ed è impiegata per costruzioni automobilistiche e ferroviarie. [10]AA6082 è una lega relativamente nuova che ha permesso di sostituire le leghe 6061 in molte applicazioni. L'aggiunta di una elevata quantità di manganese permette il controllo della microstruttura, che la rende più resistente rispetto alle altre leghe di classe Al6000. in tabella 6 sono riportate le proprietà meccaniche, mentre in tabella 6 la composizione chimica della lega e:

**TABELLA 5 PROPRIETÀ MECCANICHE DI AA6082**

<i>Resistenza a trazione</i>	[MPa]	340
<i>Durezza Vickers</i>	[HV]	100
<i>Allungamento</i>	[%]	11
<i>Densità</i>	[Kg/m <sup>3</sup> ]	2700
<i>Temperatura di -Fusione</i>	[°C]	555
<i>Modulo di Elasticità</i>	[GPa]	70
<i>Resistività Elettrica</i>	[Ohm.m]	0.038*10 <sup>-6</sup>
<i>Conducibilità termica</i>	[W/m.K]	180
<i>Coefficiente di espansione termica</i>	[K <sup>-1</sup> ]	24*10 <sup>-6</sup>

**TABELLA 6 COMPOSIZIONE DI LEGA AA602**

<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>
0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1

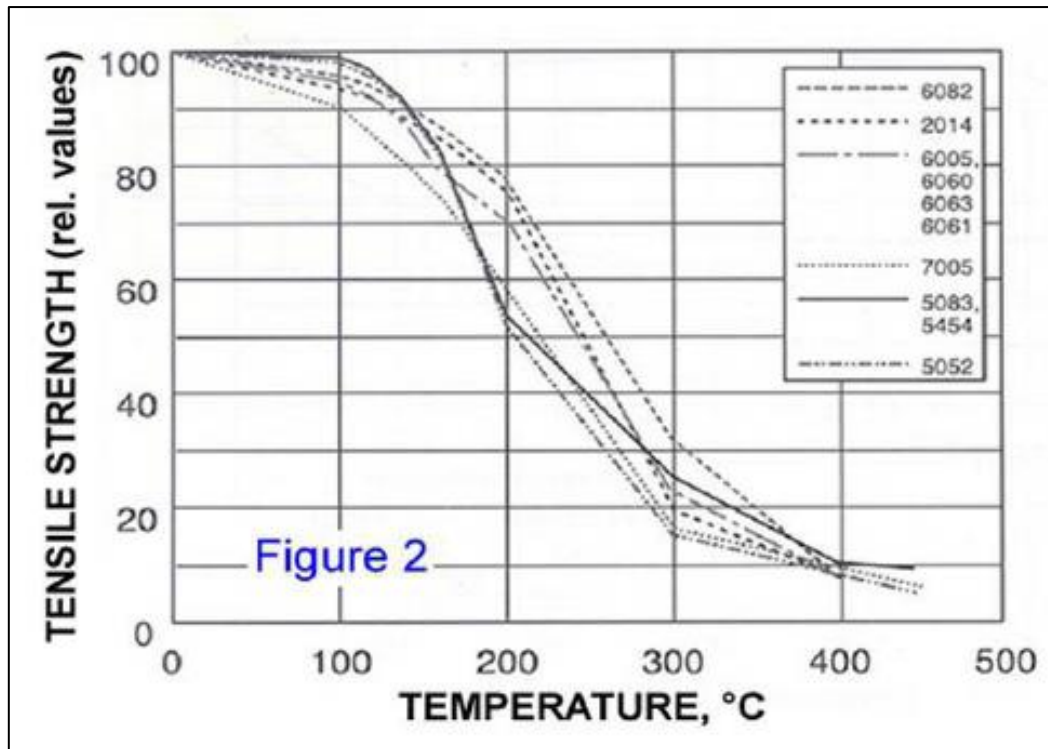
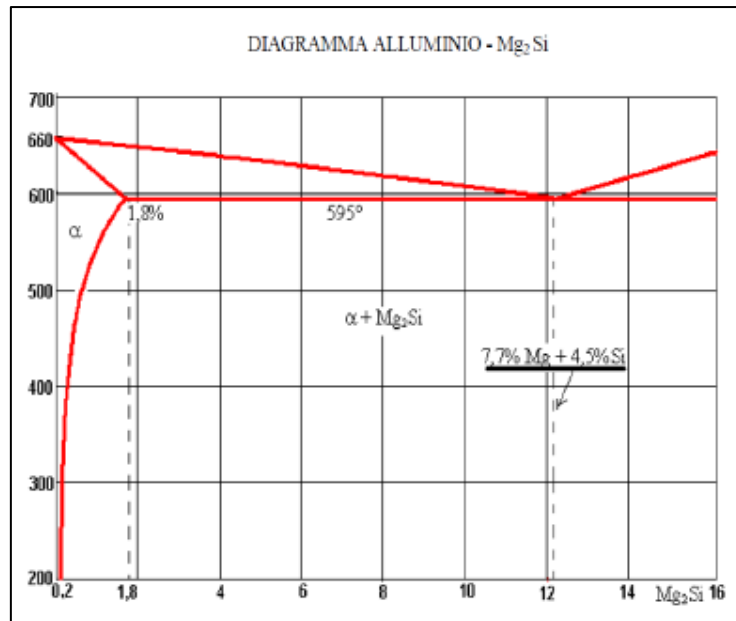


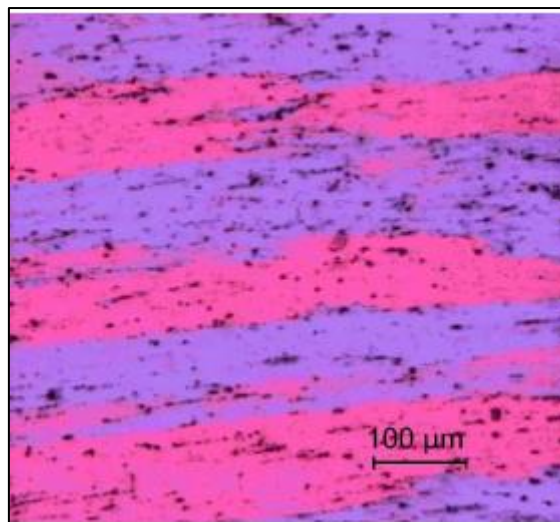
FIGURA 4 COMPORTAMENTO DELLO SFORZO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA PER DIVERSE LEGHE DI ALLUMINIO [10]

Come ricordato in precedenza, le leghe 6000 sono composte da Alluminio, Silicio e Magnesio. Magnesio e Silicio si legano e formano il *Siliciuro di Magnesio* ( $Mg_2Si$ ), che a sua volta si combina con l'alluminio e forma un eutettico a  $595^\circ C$  e al 12.2 % (w%) di  $Mg_2Si$ . A questa temperatura la solubilità di  $Mg_2Si$  è intorno all'1.8%. dopo invecchiamento, la precipitazione di  $Mg_2Si$  nella soluzione di Alluminio causa una maggiore resistenza meccanica senza alterare la duttilità. I precipitati di Magnesio si collocano intorno ai bordi grano e provocano una maggiore tendenza a rottura intergranulare e a corrosione.



**FIGURA 5 DIAGRAMMA DI FASE DI AA6082 [10]**

La lega utilizzata è di tipo T6, ovvero ha subito una solubilizzazione a 550°C seguita da tempra in aria e invecchiamento a 175°C per otto ore. Si osserva come gli elementi in lega in eccesso nella soluzione solida dopo la tempra formano precipitati che si distribuiscono in modo omogeneo e possono avere forma aciculare o lamellare. In figura 6 viene riportata la microstruttura della lega:



**FIGURA 6 MICROSTRUTTURA LEGA AA6082 [10]**





# Capitolo 2

## Lo stato dell'arte

Questo capitolo offre una panoramica circa la letteratura esistente e d'interesse per il lavoro di tesi. In seguito, verranno descritti tre articoli accademici che descrivono l'argomento di tesi, Altri articoli accademici sono stati utilizzati per un ulteriore approfondimento

### **2.1 Studio di processi di deformazione e frattura di una lega AA6082 in condizioni di lavorazioni a caldo.**

In generale le leghe di alluminio di classe 6xxx sono lavorate a freddo allo stato T4, condizione alla quale la duttilità, misurata in riferimento alla deformazione a frattura, raggiunge al massimo il valore di  $\epsilon=0.2$ . occorre ricordare che allo stato T4 la deformazione a frattura misurata è ancora significativamente inferiore alle condizioni d'imbutitura per una lamiera di acciaio [2,3]

Per convertire una lamiera di acciaio in alluminio si deve cambiare metodo di progettazione: per avere le stesse proprietà di una lamiera in acciaio, occorre progettare un laminato in alluminio per ridurre al minimo l'effetto negativo del ritorno elastico e il fenomeno di stress relaxation che accade durante il processo di invecchiamento artificiale. Entrambi in fenomeni possono alterare le tolleranze dimensionali imposte. Per evitare queste problematiche, legate ai limiti di formabilità del materiale, nelle applicazioni di élite, come quello delle auto di elevata performance, si è ricorso a processi di formatura in campo superplastico, in condizioni di bassa deformazione e ad elevata temperatura. Con questo processo occorre circa un'ora per riprodurre la componente. Tale tempo è indicativo in quanto aumenta con il livello di complessità del pezzo e della profondità richiesta per l'imbutitura. Un altro fattore che rende critico il processo di formatura in campo superplastico è lo stato microstrutturale poiché è richiesto una grana molto fine.

Un altro processo di formatura a freddo è l'idroformatura, accettabile solo per poche produzioni. questa tecnica garantisce una migliore qualità superficiale e una maggiore formabilità. A differenza della realizzazione di tubi attraverso l'idroformatura, la

realizzazione di lamiere risulta essere più complicata perché il sistema necessita di un sistema di membrane in gomma per impedire la fuoriuscita di fluido e le cadute di pressione. Il problema implica un calo della ripetibilità del processo.

Un altro processo di formatura valutata è quella a caldo, in cui si è osservato l'aumento della duttilità in funzione dell'elevata temperatura per molte classi di alluminio. Molto spesso anche lo stampo viene scaldato per garantire una condizione di omogeneità per la temperatura in tutto il pezzo. In generale la temperatura di processo rientra nell'intervallo (150-300) °C. Si è osservato che temperature superiori ai 300°C provocano un peggioramento della microstruttura [4]. Il guadagno in formabilità con l'aumento della temperatura è modesto, se comparato alla complessità sistema di riscaldamento del pezzo e dello stampo. Questo è il motivo per il quale la formatura a caldo è un processo poco usato a livello industriale. La formatura a caldo non necessita di un particolare condizioni di fornitura della lega e i tempi di processo sono confrontabili con quelli delle lavorazioni a freddo.

Nei processi di formatura a caldo, il materiale viene scaldato fino alla temperatura di trattamento (SHT), temperatura alla quale i precipitati vengono dissolti nella matrice di  $\alpha$ -Al. (alcune fasi intermetalliche non vengono disciolte durante il trattamento). In generale, per la serie 6xxx la duttilità si ricava a partire dallo stato T4, mentre la resistenza dal trattamento di invecchiamento T6 [5]. Per questo motivo è conveniente prima con l'indurimento per poi beneficiare dell'incremento di duttilità, dovuto al trattamento termico (SHT) la temperatura di processo è un importante parametro poiché determina i cambiamenti microstrutturali della lega. Con l'ottimizzazione della temperatura è possibile aumentare la deformazione plastica senza arrivare a rottura. Le principali ragioni per eseguire il trattamento SHT sulle leghe 6xxx sono [5]:

- ottenere una distribuzione omogenea degli elementi alliganti in soluzione;
- dissolvere il composto basso fondente  $Mg_2Si$  e particelle di silicio che causano indurimento della matrice durante la deformazione;
- trasformare la fase  $\beta AlFeSi$  in  $\alpha AlFeMnSi$ , che conferisce migliore formabilità;

Un esempio di ciclo di stampaggio viene riportato in figura 7. la lega di alluminio viene scaldata alla temperatura di processo e poi deformata nello stampo a freddo.

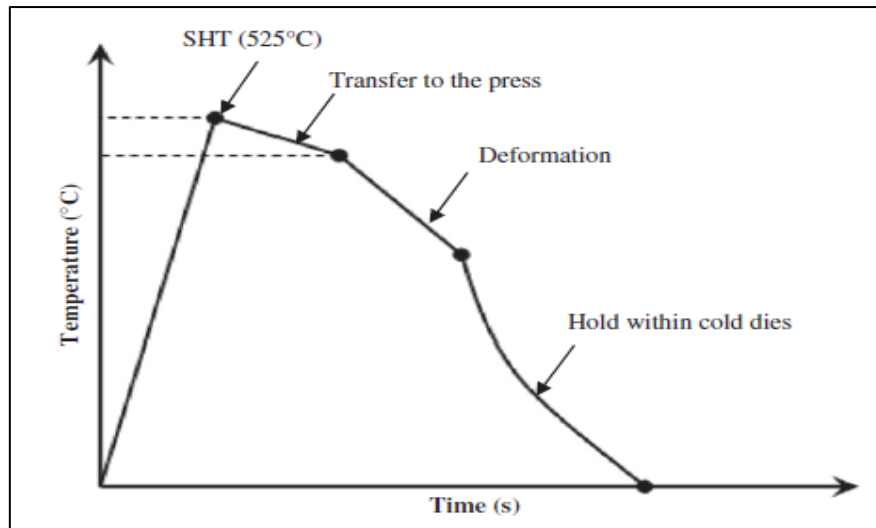


FIGURA 7 CICLO TERMICO DI PROCESSO [1]

Ci sono due motivi che giustificano la deformazione in stampo a freddo:

- favorire il rapido raffreddamento della lega e permette di evitare la nucleazione di  $\beta$  fase precipitati a bordo grano;
- evitare distorsioni termiche della parte deformata durante il raffreddamento

occorre valutare i limiti di formabilità e l'inizio del processo di frattura duttile per avere una corretta previsione del comportamento della lamiera. La deformazione a caldo avviene con la formazione di un collo di strizione localizzato, che incita la formazione di vacanze e determina anche la formabilità del materiale. Le inclusioni non metalliche e le fasi  $\beta$  giocano un ruolo fondamentale nella frattura duttile di leghe metalliche poiché promuovono la formazione di difetti e vacanze che portano a frattura.

In la lega di alluminio AA6082-T6 è fornita in lamiera di spessore 2 mm. La lega subisce un trattamento di solubilizzazione a 525°C per 30 minuti [1] per garantire la completa dissoluzione di precipitati nella matrice. In seguito, la lega subisce un trattamento di invecchiamento che consiste in un riscaldamento a 190°C per 9 ore. La figura 8 riporta i risultati di test di trazione ottenuto a diverse velocità di deformazione (0.1; 1; 10 s<sup>-1</sup>) alla temperatura di 500°C. si osserva che la tensione di flusso aumenta significativamente con l'aumento della deformazione e dimostra il comportamento viscoplastico del materiale a 500°C. la duttilità aumenta con l'aumento della velocità di deformazione, tendenza che di solito si manifesta in maniera opposta per gli altri materiali. I risultati sono concordi a ricerche pubblicate da *Lassance et al* [6] e da *El-Danafey al* [7,8] per leghe AA6082. Si ipotizza che il comportamento diverso della duttilità sia causato dall'accrescimento dei

grani alle più basse velocità di deformazione. Tale effetto potrebbe influenzare la duttilità del materiale poiché una dimensioni più grandi dei grani riducono i bordi grano e la deformazione ad essa legata. La deformazione a bordo grano è un processo diffusivo controllato dalla velocità di deformazione e dalla temperatura. Di conseguenza gli effetti di accrescimento dei grani risultano più evidenti a minori velocità di deformazione.

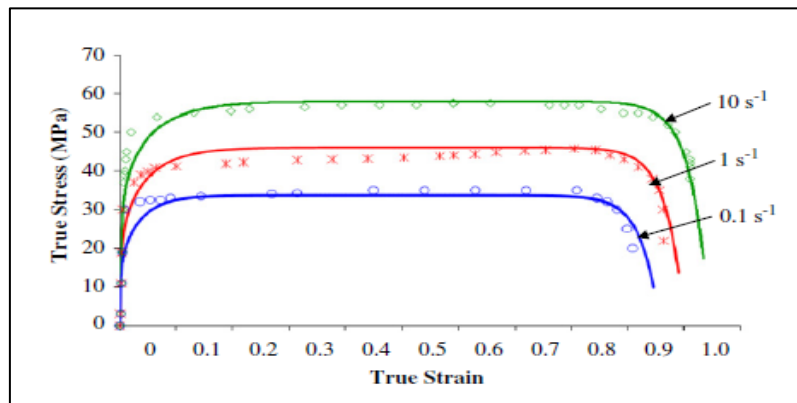


FIGURA 8 CONFRONTO CURVE DI TRAZIONE SPERIMENTALI (SIMBOLI) E SIMULATE (CURVE) PER AA6082 A 500°C PER DIVERSE VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE [1]

La Figura 9 riporta i risultati di test di trazione condotti a diverse temperatura alla velocità di deformazione di  $1 \text{ s}^{-1}$ . Si osserva che la tensione di flusso decresce con l'aumento della temperatura. Questo comportamento è comune a molti materiali meccanici ed è dovuto alla maggiore mobilità delle dislocazioni e all'aumento dei processi di diffusione, che controllano lo scorrimento dei bordi grano, la formazione di dislocazioni a scalino. In generale per leghe metalliche la duttilità cresce con l'aumento della temperatura.

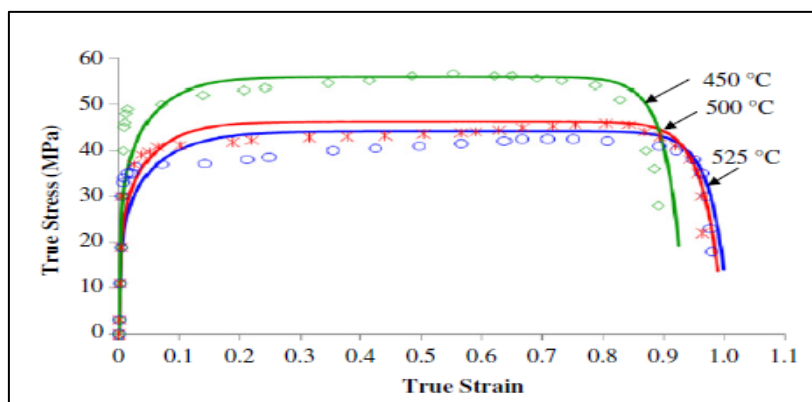


FIGURA 9 CONFRONTO CURVE DI TRAZIONE ESPERIMENTALI (SIMBOLI) E SIMULATE (CURVE) DI AA6082 A  $1 \text{ s}^{-1}$  PER DIVERSE TEMPERATURA [1]

Nel caso delle leghe di alluminio questa condizione non sempre si verifica. In figura 9 la curva descritta a 525°C non segue il comportamento atteso; i risultati legati alla duttilità delle prove condotte a 525°C e a 500°C sono equivalenti. Nella curva di sforzo-deformazione, la mancanza di incremento di duttilità è legata alla strizione marcata che agli stadi finali di rottura descrive uno stato biassiale di deformazione e rende più difficoltosa la stima del diametro dell'area di strizione. Un aumento della duttilità implica un aumento della formabilità.

Un altro test utilizzato per valutare la formabilità del materiale è la prova Nakazima. In questo test un punzone semisferico di diametro 80 mm perfora una lamiera quadrata in condizioni di puro stiramento. Per primo, il campione viene scaldato alla temperatura di solubilizzazione di 525°C e poi trasferito in uno stampo che blocca la lamiera per impedirne lo spostamento durante il test. Il trasferimento avviene in pochi secondi e in questo intervallo il campione si raffredda leggermente. Un altro calo di temperatura avviene quando il provino viene messo in contatto con lo stampo freddo. Il raffreddamento è localizzato. La conducibilità dell'alluminio è 170 W/mK, ma la forma della lamiera, caratterizzata da un'elevata area superficiale e uno spessore ridotto induce alla localizzazione del raffreddamento ai contatti con lo stampo. Si ha che la prova viene condotta a 450°C anziché 525°C. Il controllo della temperatura avviene per mezzo di una termocoppia saldata alla lamiera. Il processo di stiramento della lamiera inizia con l'applicazione di una pressione di 3 MPa da parte del punzone, che perfora il campione in condizioni di puro stiramento. Un lubrificante viene applicato per ridurre l'attrito del punzone e permettere di stirare il materiale in condizioni uniformi.

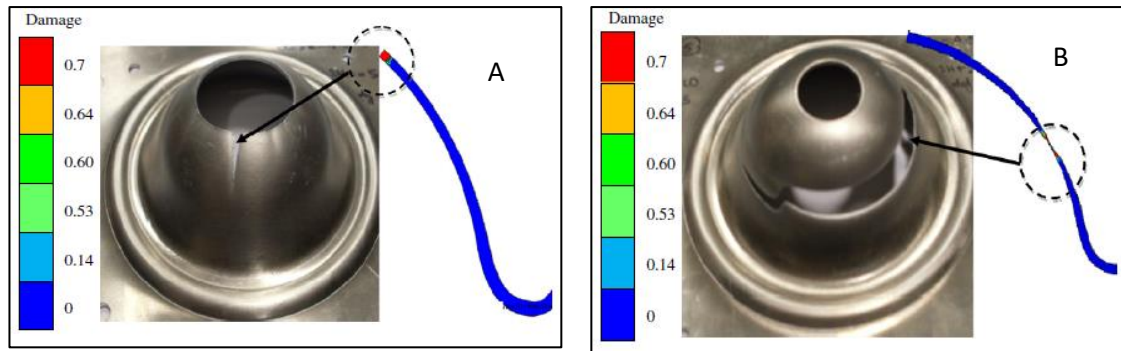
Due tipi di test sono stati condotti:

- studio e analisi della frattura in condizioni di velocità di deformazione alta e bassa.
- Analisi della variazione di spessore normalizzato ( $t/t_0$ ) nella parte deformata.

Nel primo test la prova avviene fino a frattura, nel secondo invece il test viene valutato fino a un valore preimpostato di deformazione, prima che avvenga frattura.

I due test eseguiti hanno riportato due metodi di frattura:

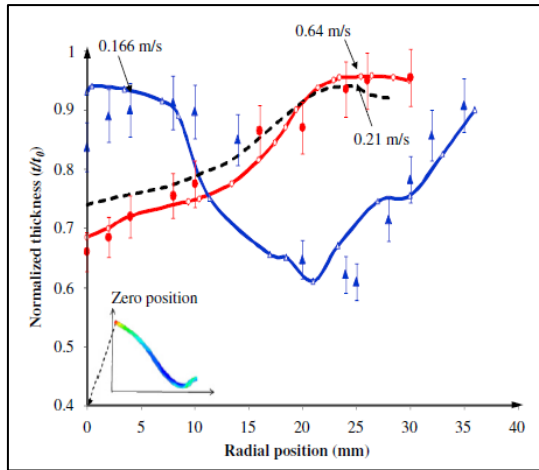
- Strizione in direzione circonferenziale;
- Strizione in direzione radiale



**FIGURA 10 RISULTATI SPERIMENTALI E SIMULATIVI DESCRIVONO I PARAMETRI DI DANNO PER AA802: A) FRATTURA IN DIREZIONE RADIALE; B) FRATTURA IN DIREZIONE CIRCONFERENZIALE [1]**

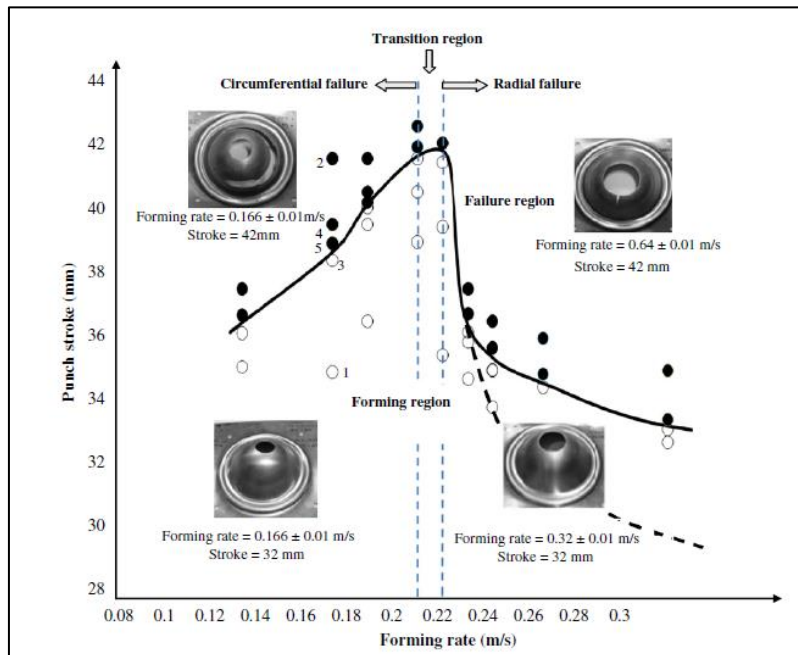
I due tipi di frattura dipendono dalla velocità di deformazione:

- In condizioni di bassa velocità di deformazione, la strizione avviene in direzione circonferenziale, in cui ho la formazione del collo di strizione a metà altezza della coppa che si forma. Il tempo di test (valutato dall'istante in cui avviene il primo contatto tra punzone e lamiera fino a frattura) è maggiore per la bassa velocità di deformazione impostata. Le parti di lamiera che hanno mostrato più resistenza durante il test sono quelle non a contatto con il punzone, che non sono state soggette al calo di temperatura. La maggior parte dello stiramento avviene nelle parti prive di contatto con lo stampo e il punzone perché sono le parti più calde e quindi sono dotate di maggior duttilità e minor tensioni di flusso.
- Un'elevata velocità di deformazione porta a una frattura in direzione radiale la riduzione di spessore è massima in prossimità del foro centrale. La riduzione avviene in modo localizzato ed è sede di frattura del pezzo. In condizioni opposte alla bassa velocità di deformazione, la regione centrale del campione ha minor tempo di contatto con il punzone ed è quindi quella soggetta a minor riduzione di temperatura. Ne consegue che questa zona presenta maggior duttilità e minor tensione di flusso.



**FIGURA 11 CONFRONTO TRA DISTRIBUZIONE DI SPESSORE NORMALIZZATO SIMULATO E SPERIMENTALE PER UNA CORSA DEL PUNZONE DI 32 MM**

Occorre osservare che se la temperatura fosse uniforme e costante durante tutto il processo di deformazione, la deformazione in prossimità della zona centrale sarebbe maggiore, in quanto corrisponderebbe alla zona preferenziale di frattura. la condizione di non uniformità in temperatura viene evidenziata da una bassa velocità di deformazione. All'aumentare della velocità di deformazione la deformazione può avvenire a temperatura maggiori, alle quali il materiale presenta una microstruttura stabile ed elevata duttilità, ma è abbastanza resistente come dimostrato dai test.



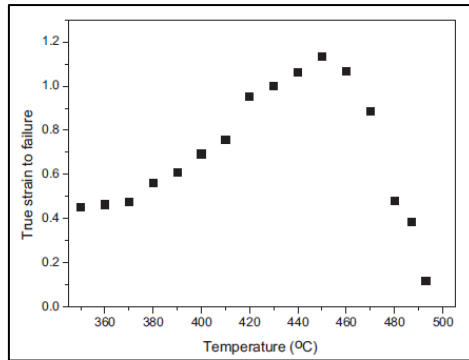
**FIGURA 12 FINESTRA DI FORMABILITÀ A CALDO DETERMINATA SPERIMENTALE PER AA6082**

## **2.2 Formabilità e meccanismi di frattura di AA2021 in condizioni di formatura a caldo [9]**

La lega Al2024 è molto usata come materiale strutturale in campo aeronautico perché presenta una buona combinazione di resistenza statica e resistenza a fatica. I processi di formatura a freddo risultano essere difficoltosi a causa della scarsa duttilità della lega a temperatura ambiente. Una possibile soluzione per migliorare le condizioni di stampaggio è quella di eseguire il processo a temperature elevate. Recentemente si è sviluppata la tecnica HFQ (hot forming and cold die quenching), che consiste nello scaldare la lamiera fino alla temperatura di solubilizzazione (SHT), a cui la duttilità dovrebbe essere massima e poi raffreddare e deformare contemporaneamente il pezzo utilizzando uno stampo a freddo. Dopo formatura il pezzo rimane nello stampo per favorire il veloce raffreddamento fino a 100°C. il raffreddamento veloce permette di riportare la microstruttura di soluzione solida super satura (SSSS) a temperature più basse. Se la lega è trattabile termicamente, può subire successivamente il trattamento di invecchiamento superficiale per incrementare la resistenza. Le condizioni ottimali di processo sono state valutate tramite prove di trazione a caldo nell'intervallo di temperatura di (350-493) °C. si osserva che la duttilità aumenta gradualmente con la temperatura fino a 450°C e poi subisce un rapido calo a temperature maggiori. Le superfici di frattura e sezioni longitudinali sono state esaminate tramite microscopio a scansione elettronica (SEM). si è osservato che la frattura può avvenire con tre diversi meccanismi, che dipendono dalla temperatura e che il brusco calo di duttilità a temperature elevate è causato dall'accrescimento dei grani e dal rammollimento della matrice attorno a inclusioni.

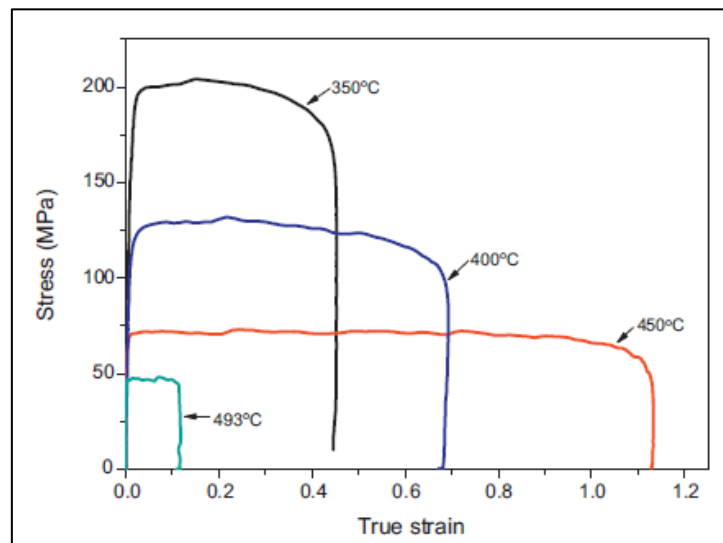
I test di trazione a caldo sono stati condotti con il simulatore termo meccanico Greeble 3800. Il campione viene fissato con due griffe, di elevata conducibilità, raffreddate con acqua per consentire elevate velocità di raffreddamento. La temperatura è controllata da una termocoppia saldata al campione. A causa della possibilità di surriscaldare il campione, i campioni vengono prima preriscaldati fino alla temperatura di 25°C inferiore a quella di processo con velocità di riscaldamento di 50°C/s e poi da tale temperatura a quella effettiva con una velocità di 5 °C/s. il test di trazione avviene appena il riscaldamento viene completato e la velocità di deformazione è pari a  $1s^{-2}$ , parametro rappresentativo dei processi di formatura a caldo. Sono stati condotti test a 350°C e a 450°C per verificare la ripetibilità e i risultati ottenuti sulla formabilità del materiale.





**FIGURA 13** RISULTATI DI DUTTILITÀ PER AA2024 A DIVERSE TEMPERATURE

La figura 13 descrive la relazione esistente tra deformazione a frattura e temperatura per la lega Al2024. La massima deformazione avviene a 450°C e assume il valore di 1.1, al quale corrisponde un allungamento del 200 %. L'elevata formabilità della lega è dovuta all'aumento della mobilità atomica e delle dislocazioni. A 493°C, la duttilità cala bruscamente. Questo step è caratteristico del materiale. In generale, la duttilità alla temperatura di solubilizzazione dovrebbe aumentare con l'aumento dei precipitati in matrice. A basse temperature la presenza di precipitati in soluzione diminuisce e quindi anche la possibilità di formazione di vuoti, che incrementa la duttilità dovrebbe diminuire. Nei test di trazione condotti la fusione di precipitati e delle inclusioni sembra la causa della caduta di duttilità a temperature superiori a 450°C. In figura 14 sono riportate le curve di flusso del materiale a diverse temperature.



**FIGURA 14** CURVE DI TRAZIONE DI AA2024 A DIVERSE TEMPERATURE



# Capitolo 3

## La Formabilità del materiale

In questo capitolo verranno discussi i parametri indicativi per lo studio della formabilità del materiale

### 3.1 Fondamenti del comportamento meccanico dei materiali

In questo paragrafo verranno discussi gli aspetti fondamentali del comportamento meccanico dei materiali durante la deformazione plastica

La prova è usata per determinare le caratteristiche meccaniche di un materiale è quella mono assiale di trazione. Da questo test è possibile determinare proprietà meccaniche come la resistenza meccanica, la duttilità, la tenacità e il modulo elastico.

Il test prevede la preparazione di un campione come mostrato in figura. In generale il provino è di forma cilindrica, ma possono anche essere piatti o tubolari. Il provino è preparato secondo normativa ASTM, ma potrebbe seguire altre specifiche disponibili sul mercato. I provini utilizzati per le prove sono piatti a forma di osso di cane, ricavati da tubi di alluminio di classe 6000 (e nel secondo caso 7000). Il test può essere eseguito a diverse temperature e velocità di deformazione per poter valutare le caratteristiche del materiale nelle condizioni di interesse.

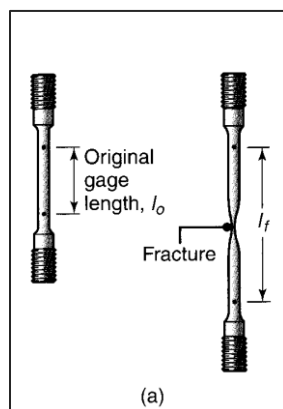


FIGURA 15 CAMPIONE STANDARD PER PROVE DI TRAZIONE, CHE DIMOSTRA LA LUNGHEZZA INIZIALE E FINALE

Il provino viene inserito e serrato tra le due ganasce della macchina a trazione. Quando la macchina è in azione, il campione viene tirato con una forza ortogonale alla propria sezione, mediante il movimento di una o di entrambe le ganasce. La macchina può agire secondo diverse modalità di controllo, come quella di spostamento o di carico o di deformazione. Durante la prova la macchina acquisisce i dati relativi al test, come il tempo, la corsa del pistone e la forza applicata. Attraverso la rielaborazione dei dati registrati è possibile risalire alle curve caratterizzanti il comportamento del materiale testato.

Il diagramma riporta in ordinata il carico  $F$  e in ascissa il valore dello spostamento. L'andamento è abbastanza caratteristico, ma può variare con il materiale. [1] Il materiale può influenzare parametri come l'eventuale gradino dello snervamento, la diminuzione della forza applicata all'aumentare della deformazione; tale diminuzione è dovuta alla strizione del provino ed al conseguente aumento dello sforzo effettivo sulla sezione ristretta senza aumento del carico esterno applicato Poiché la curva Forza-corsa è sensibile alle caratteristiche geometriche del campione, in particolare dalla sua sezione iniziale, questa viene rielaborata in termini di sforzo e tensione ingegneristica e reale.

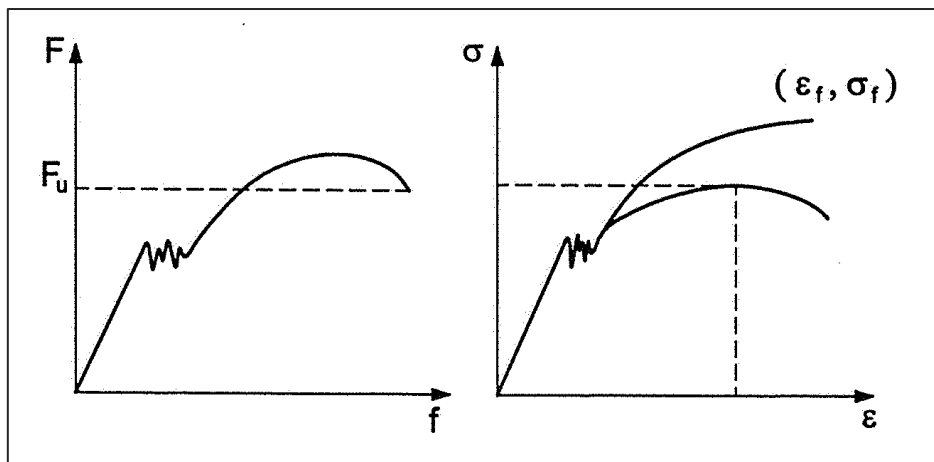


FIGURA 16 DIAGRAMMA DI SFORZO E DEFORMAZIONE

### 3.1.1 Curva di trazione con sforzo e deformazione ingegneristica

Per passare al diagramma sforzo-deformazione, da quello del carico e spostamento, occorre fare riferimento al valore unitario di tensione e deformazione [2].

Solitamente si divide il carico  $P$  per la sezione ristretta iniziale del provino ( $A_0$ ) e lo spostamento per la lunghezza iniziale del tratto di misura del provino ( $l_0$ ). La tensione ingegneristica, o tensione nominale, è definita come il rapporto tra la forza applicata e l'area iniziale del campione:

$$\sigma_{ing} = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ing} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \quad (3.2)$$

Tali grandezze sono dette ingegneristiche perché non sono le effettive tensioni e deformazioni locali, ma sono delle stime riferite alle grandezze iniziali. Sono quindi corrispondenti al sigma e deformazioni reali solo nel caso di piccole deformazioni, per cui A e L non variano di molto. La curva ingegneristica non descrive l'effettivo stato tensionale locale, tranne che per piccole deformazioni.

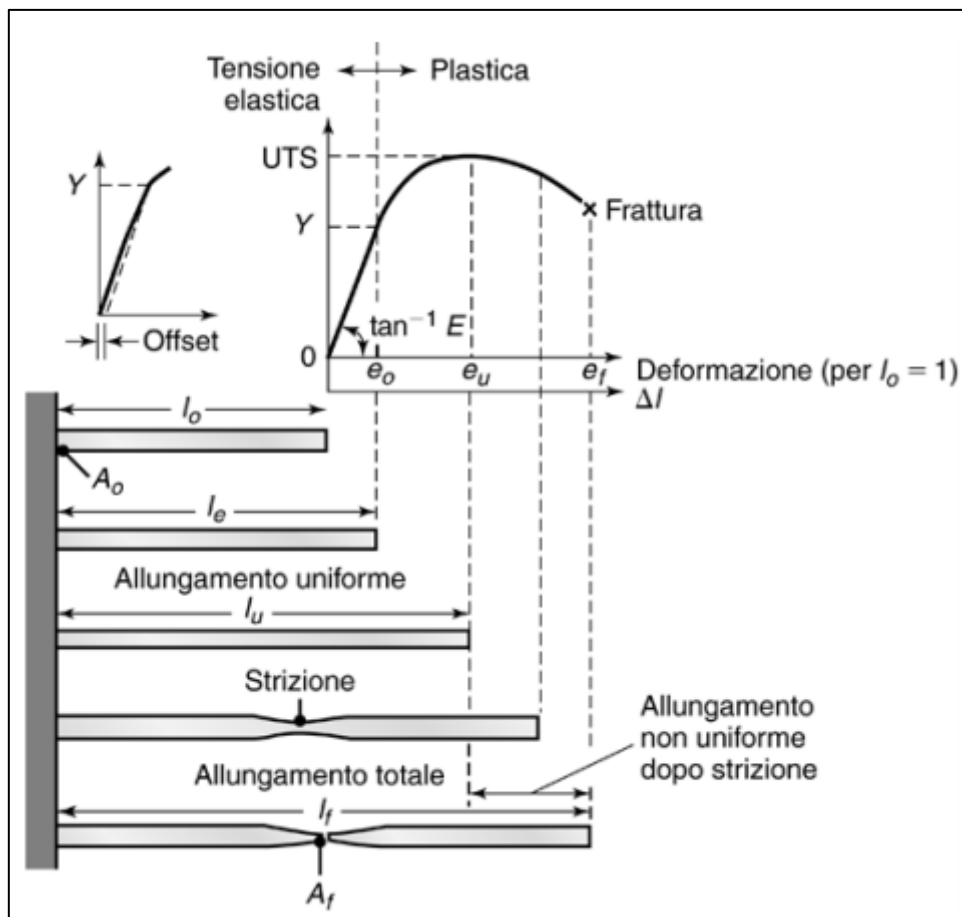


FIGURA 17 RAPPRESENTAZIONE DI ALLUNGAMENTO DEL PROVINO E DELLA CURVA DI TRAZIONE INGEGNERISTICA

Nella fase iniziale di applicazione di una forza, il provino si deforma proporzionalmente all'aumentare del carico fino al valore del carico limite di proporzionalità; questo intervallo definisce il campo di comportamento elastico del materiale.

Il materiale continuerà a deformarsi elasticamente sebbene in maniera non strettamente lineare fino alla tensione di snervamento  $Y$ . Il modulo di elasticità  $E$  è definito attraverso la legge di Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ing}} \quad (3.3)$$

L'allungamento del provino è accompagnato dalla sua contrazione laterale. Il rapporto tra la deformazione laterale e la deformazione longitudinale prende il nome di coefficiente di Poisson. Al crescere della forza applicata, il provino inizia a snervare e subisce una deformazione plastica permanente. Nel campo plastico la relazione tra sforzo e deformazione non è più lineare. Il raggiungimento della condizione di snervamento è una condizione necessaria nei processi di formatura dei metalli per poter attribuire la forma desiderata. Dopo lo snervamento all'aumentare del carico di applicazione, aumenta l'allungamento e diminuisce la sezione del campione.

La tensione massima raggiunta è chiamata resistenza ultima a trazione (UTS) del materiale. Tale parametro è una misura diretta della resistenza globale del materiale. Superato tale valore il provino subisce strizione e l'allungamento non è più uniforme e si forma il collo di strizione, dovuto alla riduzione di sezione. All'avanzare della prova il valore della tensione ingegneristica cala fino alla rottura finale del provino nella zona di strizione. La tensione alla quale avviene la rottura si chiama tensione di rottura.

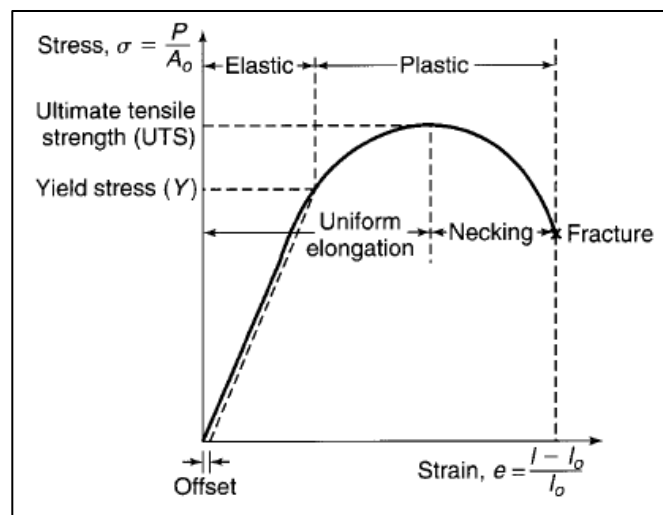


FIGURA 18 CURVA INGEGNERISTICA

### 3.1.2 Curva di trazione nominale

La curva di trazione rappresentata attraverso lo sforzo e deformazioni reali, è necessaria per descrivere il comportamento plastico del materiale, campo dove le grandezze

ingegneristiche perdono significato, in quanto le deformazioni non possono considerarsi piccole. Si considerano quindi le grandezze vere descritte attraverso l'area vera  $A$  sottoposta a carico:

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

La stima della deformazione reale deriva dalla considerazione per cui la prova di trazione si può assumere come somma di prove di trazioni incrementali, dove per ogni incremento il campione ha una lunghezza maggiore rispetto alle prove precedente. Si ha:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i-1}}{l_{i-1}} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{tot} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (3.7)$$

Per valori piccoli di deformazione ingegneristica si ha che:

$$\ln(1 + e) = \varepsilon \quad (3.8)$$

$$e = \varepsilon \quad (3.9)$$

Durante la prova di trazione il volume del provino resta costante. La deformazione reale nell'intervallo di allungamento uniforme può quindi essere espressa come:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = 2\ln\left(\frac{d_0}{d}\right) \quad (3.10)$$

Quando lo snervamento ha inizio, la deformazione reale può essere calcolata tramite la riduzione di sezione del provino. Si ottiene che la deformazione maggiore avviene nella regione prossima a strizione.

La curva di trazione tipica, descritta attraverso sforzo e deformazione reale viene riportata in figura 19 ed è descritta dalla legge di Hollomon:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (3.11)$$

L'equazione può essere riscritta come:

$$\log(\sigma) = \log K + n \log(\varepsilon) \quad (3.12)$$

Tale curva è riportata in figura (). La pendenza della retta indica con il parametro  $n$  è il coefficiente di incrudimento, mentre il parametro  $K$  è denominato come fattore di resistenza  $K$  è la tensione reale alla quale corrisponde una deformazione reale unitaria. I valori di  $k$  e  $n$  sono caratteristici del materiale.

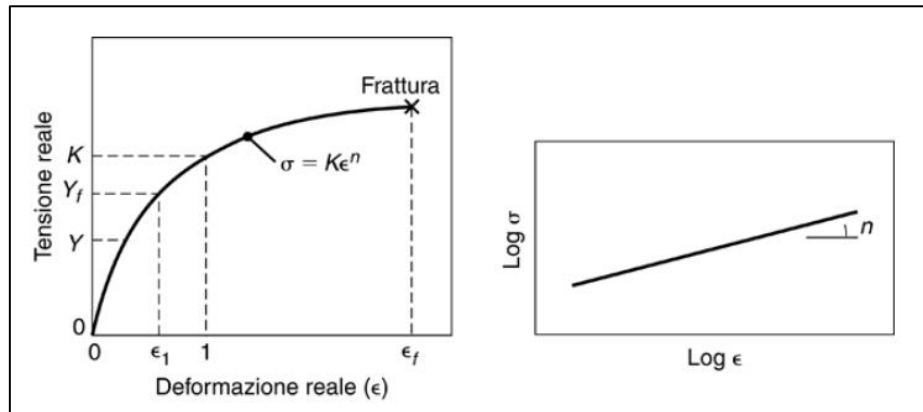


FIGURA 19 CURVA DI TRAZIONE INGEGNERISTICA

In figura 19 il parametro  $Y_f$  indica la tensione di flusso necessario per avere una determinata deformazione plastica  $\epsilon_1$ . Materiali che descrivono un comportamento incrudente sono caratterizzati dal fatto che all'aumentare della tensione di flusso, cresce la deformazione reale. Il risultato è una curva monotona crescente fino al raggiungimento della frattura.

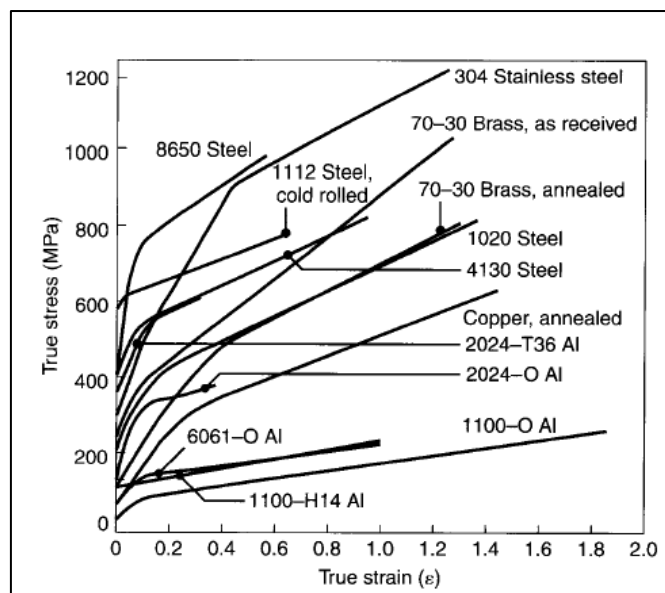


FIGURA 20 CURVE DI TRAZIONE REALI PER MATERIALI METALLICI A TEMPERATURA AMBIENTE

In figura 20 le due curve di trazione ingegneristica e reale sono riportate nello stesso diagramma per evidenziare le differenze sostanziali. Si osserva il diverso andamento delle curve. La curva ingegneristica non evidenzia il comportamento incrudente del materiale.



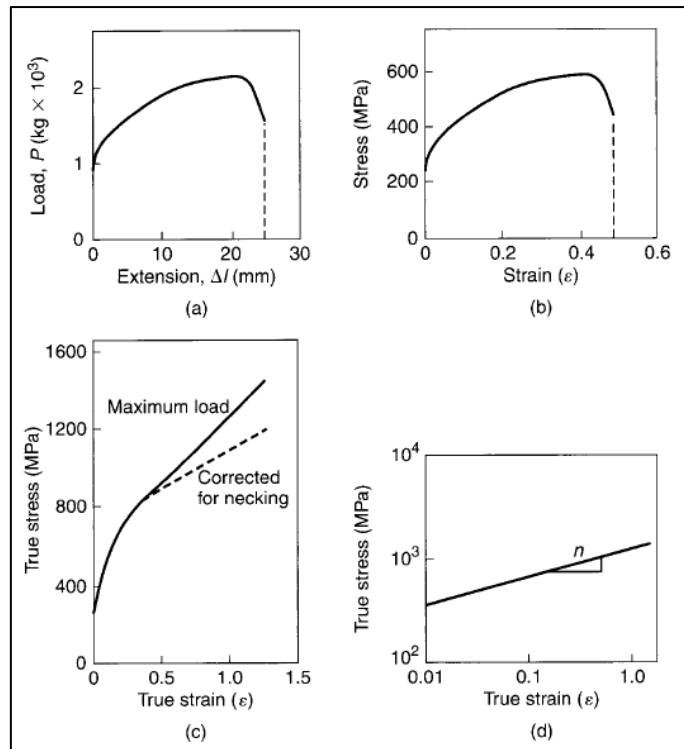


FIGURA 21 CURVE DI FORZA CORSA, INGEGNERISTICHE E REALI DI CAMPIONI DI ACCIAIO INOX

### 3.1.3 Effetti della temperatura

In generale l'incremento della temperatura causa:

- una riduzione del modulo elastico, del valore della tensione di snervamento e dell'UTS e del coefficiente di incrudimento  $n$ ;
- un aumento di duttilità e tenacità e del coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione.

In figura 22 sono riportati gli andamenti di diverse proprietà del materiale in funzione della temperatura.

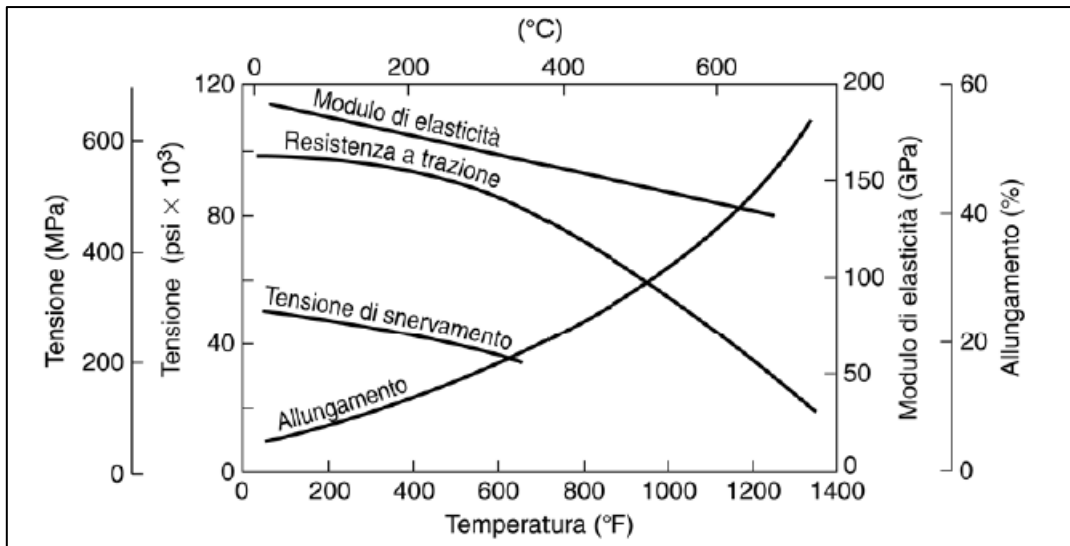


FIGURA 22 ANDAMENTO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA

### 3.1.4 Effetti velocità di deformazione

un componente può essere deformato a velocità differenti a seconda delle esigenze di produzione. La velocità di deformazione indica la velocità con la quale viene applicata una determinata deformazione ad un campione di materiale. Per poter simulare il processo anche la prova di trazione può essere eseguita a diverse velocità di deformazione.

La velocità di deformazione ingegneristica è definita come:

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right)}{dt} = \frac{dl}{l_0 dt} = \frac{v}{l_0} \quad (3.14)$$

quella reale:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\left(\ln \frac{l}{l_0}\right)}{dt} = \frac{dl}{l dt} = \frac{v}{l} \quad (3.15)$$

dove  $v$  è la velocità di processo. Dall'equazione (3.15) si osserva la proporzionalità diretta tra la velocità di deformazione ingegneristica e la velocità di processo, relazione che non si verifica con le variabili reali. Si ha che in tal caso per garantire la velocità di deformazione costante occorre aumentare proporzionalmente la velocità di processo impiegata in figura 23 vengono riportati gli effetti di temperatura e velocità di deformazione sulla resistenza del materiale:

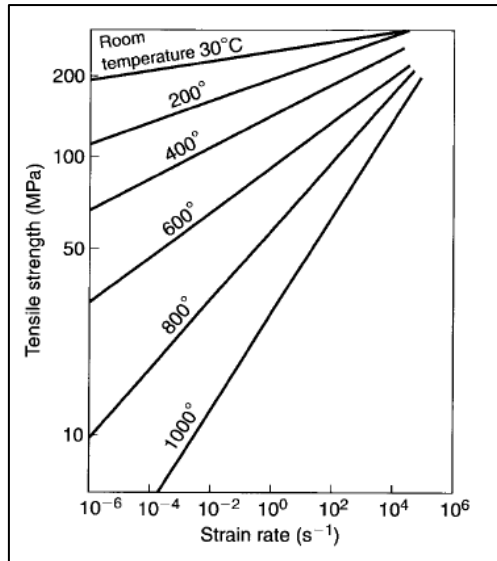


FIGURA 23 EFFETTO DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE SU UTS DI UN CAMPIONE DI ALLUMINIO

In generale all'aumentare della velocità di deformazione si ha un aumento della resistenza dei materiali e la sensibilità alla velocità di deformazione aumenta all'aumentare della temperatura. Tali osservazioni sono visibili in figura 24.

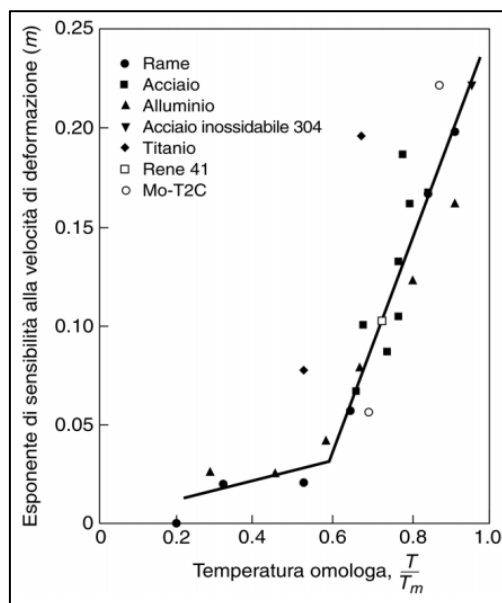


FIGURA 24 RELAZIONE TRA IL COEFFICIENTE DI SENSIBILITÀ ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE E LA TEMPERATURA OMOLOGA

Nelle lavorazioni a caldo la legge che descrive le curve di sforzo-deformazione assume la forma:

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad (3.16)$$

Dove  $C$  è il fattore di resistenza ed  $m$  è il coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione del materiale. Il coefficiente  $m$  ha una notevole influenza sulla strizione in una prova di trazione. Osservazioni sperimentali hanno dimostrato che con valori maggiori di  $m$ , il materiale può venire stirato per lunghezze maggiori prima della rottura. In generale materiali con elevati valori di  $m$  mostrano un ritardo alla strizione.

In prossimità della strizione del campione, la resistenza del materiale risulta maggiore a casa dell'incrudimento. Nella medesima zona, la velocità di deformazione è maggiore rispetto al resto del provino a seguito della maggiore velocità di allungamento del materiale. L'incremento di resistenza del materiale nella zona di collo di strizione può essere messo in relazione con il coefficiente  $m$ . Al proseguire della prova, la zona di strizione diventa più estesa il provino si allunga prima della frattura; pertanto l'allungamento totale aumenta all'aumentare del valore del coefficiente di  $m$ . In generale, l'allungamento dopo strizione aumenta all'aumentare del valore di  $m$ .

In generale, nei processi di stampaggio di lamiera si desidera operare in condizioni di allungamento uniforme. Tale richiesta coincide con l'avere a disposizione un materiale che abbia un elevato coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione.

A livello industriale, durante lo stampaggio della lamiera si punta a condurre un processo senza che il materiale strizioni, ovvero si vuole condurre il processo in allungamento uniforme. Se ciò non risulta possibile è necessario valutare tale strizione, si tratta quindi di valutare  $m$ : più  $m$  è elevata, più sarà possibile avere allungamento post strizione. Si ha infatti che maggiore è il valore del coefficiente  $m$ , maggiormente la strizione risulta essere diffusa e quindi l'allungamento dopo strizione prima della rottura.

## **3.2 Caratteristiche delle lamiere**

La formatura di lamiere è in generale condotta attraverso l'esercizio di forze di trazione nel piano della lamiera poiché forze esterne di compressione possono causare fenomeni di instabilità all'equilibrio, corrugamenti e la formazione di grinze [2]. Nei processi di laminazione si preferisce evitare la riduzione di spessore per non incorrere in fenomeni di strizione e frattura. In generale le deformazioni di lamiera avvengono per stiratura e per piegatura. I parametri che influenzano maggiormente il processo di deformazione sono:

allungamento, anisotropia, dimensione del grano, tensioni residue, ritorno elastico, raggrinzatura.

### 3.2.1 Allungamento

Si ricorda nel capitolo [prova di trazione] che un provino soggetto a una forza di trazione presenta un allungamento uniforme fino al valore di tensione ultima UTS, oltre la quale inizia la strizione. L'allungamento uniforme è quindi seguito da una seconda fase di allungamento non uniforme che arriva fino alla rottura del provino. In riferimento al processo di formatura di lamiera, ne consegue che per avere una buona formabilità del materiale deve essere in grado di presentare elevati valori di allungamento uniforme.

Per le prove di trazione, condotte a freddo, l'equazione che descrive una curva di tensione-deformazione reale del materiale è:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (3.17)$$

La deformazione alla quale inizia il fenomeno della strizione è data da:

$$\varepsilon = n \quad (3.18)$$

Si ha che un elevato valore dell'esponente di incrudimento indica un'elevata deformazione uniforme che è desiderabile nei processi di formatura.

La strizione di una lamiera si viene ad avere per un determinato angolo  $\phi$  rispetto alla direzione di applicazione delle forze di trazione come mostrato in figura 25. [2,3]

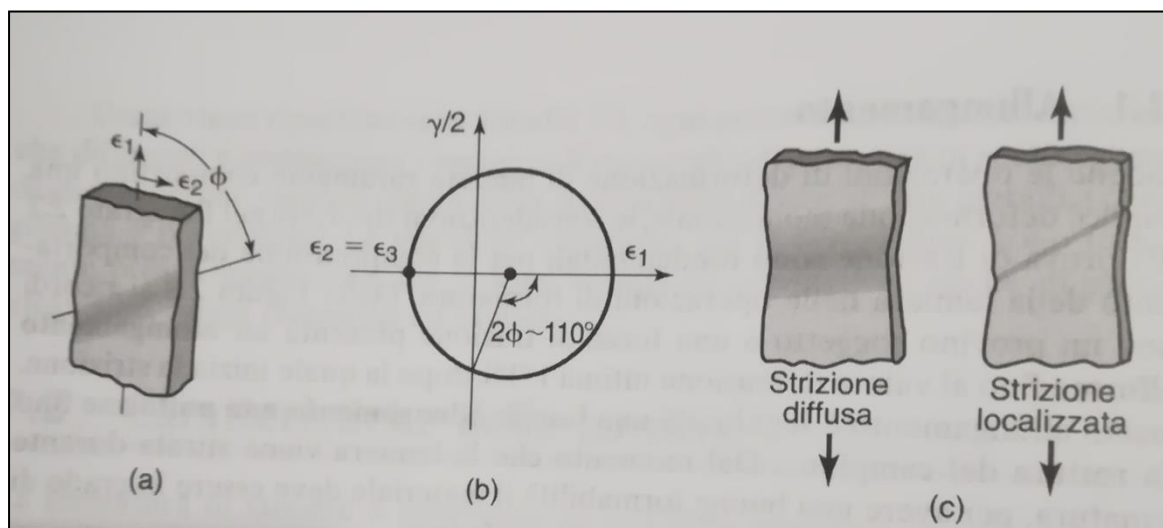


FIGURA 25 TIPOLOGIA DI STRIZIONE

Poiché in campo plastico il modulo di Poisson assume il valore di 0.5, la tensione laterale assume il valore di  $-\varepsilon_1/2$ . Questo è il caso di strizione localizzata, in deformazione piana, per il fatto che è confinata dal materiale sopra e sotto la banda strizionata.

Per materiali isotropi l'angolo  $\phi$  assume il valore di  $55^\circ$ . Durante la strizione la larghezza della banda resta costante, mentre il suo spessore diminuisce fino ad arrivare alla rottura del provino. Per materiali anisotropi l'angolo assume valori differenti, in tal caso si parla di anisotropia planare. Il parametro che influisce sul determinare il tipo di strizione è la sensibilità alla velocità di deformazione del materiale. data l'equazione della curva di tensione- deformazione reale di un materiale per le lavorazioni a caldo:

$$\sigma = C \dot{\varepsilon}^m \quad (3.19)$$

All'aumentare del parametro  $m$ , aumenta la zona di strizione diffusa. Si ha che l'allungamento totale è un fattore significativo nella formabilità del materiale. L'allungamento totale è dato dalla somma dell'allungamento uniforme, controllato dall'esponente di incrudimento e dall'allungamento non uniforme, dipendente dall'esponente di sensibilità alla velocità di deformazione.

### 3.2.2 Anisotropia

L'anisotropia o direzionalità della lamiera influisce sul processo di formatura. L'anisotropia è influenzata dal ciclo di produzione termo meccanico della lamiera e dagli eventuali trattamenti termici a cui una lamiera è sottoposta. si distinguono due tipi di anisotropia: l'anisotropia cristallografica e la fibratura meccanica.

L'anisotropia cristallografica dipende dall'orientamento preferenziale dei grani, mentre la fibratura meccanica dipende dall'allineamento di impurità, inclusioni, lacune in tutto lo spessore della lamiera durante il processo. Si parla di anisotropia planare quando essa è nel solo piano di deformazione della lamiera, mentre di anisotropia normale quando è anche nella direzione dello spessore.

### 3.2.3 Dimensione dei grani

La dimensione dei grani influenza in modo significativo le proprietà meccaniche del materiale. In generale maggiore è la dimensione del grano, minore è la resistenza meccanica, la durezza, mentre maggiore è la duttilità. La tensione di snervamento  $Y$  è la

proprietà più sensibile alle dimensioni del grano secondo l'equazione empirica di Hall-Petch:

$$Y = Y_i + kd^{-1/2} \quad (3.20)$$

Dove  $Y_i$  è la tensione di snervamento di soglia, che si oppone al moto delle dislocazioni,  $k$  è una costante che indica quanto le dislocazioni sono impilate agli ostacoli (bordi grano) e  $d$  è la dimensione di grano. L'equazione () vale solo se la Temperatura di prova è inferiore alle Temperatura di ricristallizzazione del materiale. Da normativa ASTM, grani di dimensioni da (5- 8) sono considerati fini. una dimensione di grano pari a 7 è accettabile per lamiere metalliche destinate alla produzione di automobili, elettrodomestici. Per le lamiere la dimensione dei grani è importante oltre che per l'influenza sulle proprietà meccaniche, anche per l'aspetto superficiale della parte formata. Con l'aumentare della dimensione dei grani, la superficie appare più ruvida e può dare un effetto di buccia di arancia.

### **3.2.4 Tensioni residue**

Le tensioni residue si formano quando il processo di formatura non incorre a deformazione uniforme. È un fenomeno che causa distorsioni della lamiera.

### **3.2.5 Ritorno elastico**

Il fenomeno di ritorno elastico è tipico della piegatura di lamiere e accade in generale quando il rapporto tra raggio di curvatura e spessore di lamiera è alto.

### **3.2.6 Raggrinzatura**

Nei processi di formatura possono incorrere stati di tensione di compressione, che possono provocare instabilità all'equilibrio. L'effetto di queste tensioni non desiderate sono le raggrinzature. la tendenza a formare questi difetti aumenta con la diminuzione dello spessore, l'aumento della lunghezza della lamiera non vincolata.

## **3.3 La Piegabilità**

La piegabilità è la capacità del materiale, che consente di avere un raggio minimo di piega con un valore tendente a 0 senza avere la rottura delle fibre esterne.

Questa proprietà è influenzata anche da molti fattori come le proprietà meccaniche del materiale, gli stati tensionali derivati da lavorazioni precedenti, lo stato di finitura dei bordi, la temperatura di lavorazione, la lunghezza del pezzo nella direzione di piega,

l'orientazione della piega rispetto alla direzione di laminazione. Per valutare questa proprietà occorre quindi valutare le caratteristiche e la qualità della lamiera. Per qualità di lamiera si intende due considerazioni:

- Qualità della tranciatura precedente.
- Presenza di inclusioni.
- Variazione della finitura superficiale

Nella zona di taglio ho delle tensioni di taglio molto elevate, che provocano incrudimento materiale rispetto alla zona centrale. Si ha quindi che il valore di MBR misurato nelle zone di tranciatura è maggiore rispetto al valore che MBR assume nelle zone centrali, in cui il materiale non è stato sottoposto a taglio. In genere, si considera l'MBR con valore maggiore, perché è quello più limitante. L'espressione che valutano MBR non considera la qualità della lamiera; occorre quindi valutare anche la posizione della piega rispetto alla zona di tranciatura.

Nel foglio di lamiera il materiale ha un certo grado di inclusioni, che possono essere orientate lungo la direzione di laminazione. Se la piega avviene lungo la direzione di laminazione, questa tende a scollare le inclusioni rispetto alla matrice (l'interfaccia matrice-inclusione è un punto di debolezza per la resistenza meccanica). È quindi conveniente piegare sempre a 90 ° rispetto alla direzione di laminazione; in questo modo viene a meno il problema della qualità superficiale.

In generale, MBR assume valori maggiori in una lamiera priva di inclusioni.



**FIGURA 26**RELAZIONE PIEGATURA E DIREZIONE DI LAMINAZIONE

La piegabilità diminuisce all'aumentare della rugosità dei bordi poiché su queste superfici si vanno a concentrare le maggiori tensioni. In generale è possibile modificare la piegabilità



operando direttamente sulla lamiera attraverso riscaldamento termico della zona di piegatura o per mezzo dell'esercizio di una pressione idrostatica o con l'applicazione di uno sforzo di compressione in grado di minimizzare lo stato di trazione sulle fibre esterne e posticipare l'insorgenza della frattura.

### **3.3.1 Lo Stato tensionale**

La piegabilità è influenzata anche dallo stato tensionale della lamiera. La presenza di uno stato biassiale implica la riduzione della duttilità del materiale. Lo stato tensionale deve essere valutato insieme alla lunghezza della lamiera poiché all'aumentare di quest'ultima variabile lo stato tensionale delle fibre esterne passa da mono assiale a biassiale. In generale si garantisce lo "stato piano di deformazione" se la lunghezza della lamiera è pari a 10 volte lo spessore poiché con questa condizione geometrica gli effetti legati alla biassialità si saturano.

### **3.3.2 Le Caratteristiche del materiale**

In generale, più un materiale ha proprietà meccaniche elevate, più difficile risulta la sua formatura. Questa condizione è dovuta sia all'aumento del ritorno elastico sia perché sono consentite piegature meno severe senza incorrere in rotture.

Quando il processo di formatura è condotto a freddo, non esistono fenomeni di riassetto e ricristallizzazione dinamica durante la lavorazione che riducono lo stato tensionale all'interno del materiale.

L'unico fattore che influenza la formabilità risulta essere l'incrudimento, ovvero all'aumentare della tensione di flusso, aumenta la deformazione del materiale.

Alti valori del coefficiente di incrudimento  $n$ , determinabile attraverso una prova di trazione portano ad avere una grande differenza tra la tensione di snervamento e la tensione massima a rottura, ad un più alto valore dell'allungamento uniforme e ad una riduzione della tendenza a strizione. In generale, per una buona formabilità, è richiesto un alto valore del coefficiente di incrudimento e il mantenimento di tale valore a grandi deformazioni.

La lavorazione a caldo aumenta la formabilità del materiale, riducendo anche lo stato tensionale presente sulla lamiera. Ad alte temperature è possibile ridurre l'energia di deformazione, aumentare la formabilità e modificare la microstruttura.

Avvengono principalmente due fenomeni: la ricristallizzazione dinamica e il riassetto. L'elevata temperatura permette di avere elevate velocità di diffusione e quindi garantisce la riduzione delle disomogeneità microstrutturali. con la lavorazione a caldo la struttura colonnare con grana grossa viene sostituita da una struttura finemente dispersa a grani fini

e equiassici ottenuta per ricristallizzazione. La modifica della microstruttura permette un aumento notevole della tenacità e della duttilità rispetto ad un materiale lavorato a freddo. Nel processo di lavorazioni a caldo anche la velocità di deformazione diventa un fattore incidente sulla tensione di snervamento del materiale.

### 3.3.3 La direzione di laminazione e l'anisotropia del materiale

L'orientamento dell'asse di piegatura rispetto alla direzione di laminazione influenza in modo considerevole il massimo valore di deformazione ottenibile. Durante la laminazione della lamiera, i grani cristallini, le inclusioni ed eventuali altre impurità tendono ad allungarsi rispetto alla direzione di laminazione. Questo fenomeno produce anisotropia nella lamiera, ovvero differenti proprietà meccaniche del materiale lungo le tre direzioni che caratterizzano le dimensioni del componente. Questo si traduce nel fatto che il materiale si comporterà in modo differente a seconda che venga piegato in direzione parallela o normale a quella di laminazione. In particolare, il materiale mostrerà una maggiore formabilità, e quindi la possibilità di ottenere angoli di piega più severi, se piegato con asse ortogonale alla direzione di laminazione. Nel caso di direzioni parallele, il materiale presenterà invece una maggiore tendenza alla formazione di cricche e alla conseguente rottura lungo la linea di piega.

## 3.4 Anisotropia

Si definisce anisotropia normale della lamiera (chiamata anche anisotropia plastica o rapporto di deformazione) il rapporto tra la deformazione della larghezza e dello spessore, ovvero la grandezza espressa da:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_t}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_t}\right)} \quad (3.21)$$

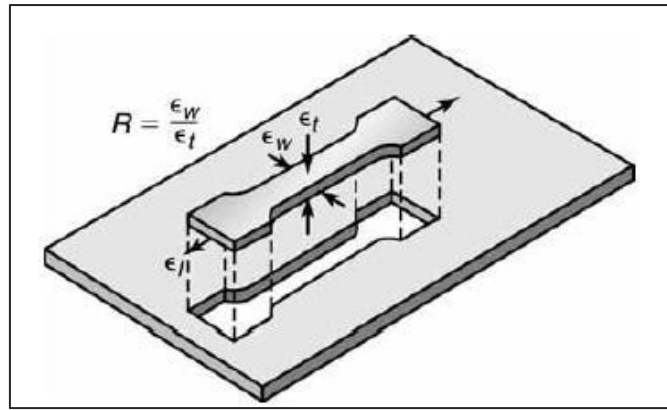


FIGURA 27 PRELIEVO DEL CAMPIONE DALLA LAMIERA

I pedici 0 e f si riferiscono rispettivamente alle dimensioni originale e finali. Un valore di R unitario indica che le due deformazioni sono uguali e dunque il materiale è definito isotropo.

Dalla figura precedente si può notare che il provino può venir tagliato secondo differenti direzioni di laminazione. Le lamiere presentano quindi un valore di R del provino a trazione che dipende dalla direzione secondo la quale il foglio è stato laminato. Si può quindi calcolare un valore medio secondo:

$$R = \frac{(R_0 + R_{45} + R_{90})}{4} \quad (3.22)$$

dove i pedici 0, 45 e 90 si riferiscono a un'orientazione (in gradi) delle prove, calcolata in funzione della direzione di laminazione della lamiera. I valori si ricavano mediante prove di trazione.

L'importanza del parametro appena definito risiede nella correlazione esistente tra questo ed il rapporto limite di imbutitura LDR.

Il parametro LDR è definito come il valore massimo del rapporto tra il diametro della lamiera iniziale e quella del punzone:

$$LDR = \frac{D_{0\ MAX}}{D_P} \quad (3.23)$$

Supposto quindi di conoscere il valore del diametro del punzone  $D_P$ , è possibile determinare il massimo valore che può avere  $D_0$  per avere un prodotto privo di difetti.

La relazione quindi tra tali parametri è data dalla figura seguente ricavata sperimentalmente. Dal grafico si osserva che per un materiale isotropo e per una deformazione ideale, il valore massimo di LDR è pari a 2,7.

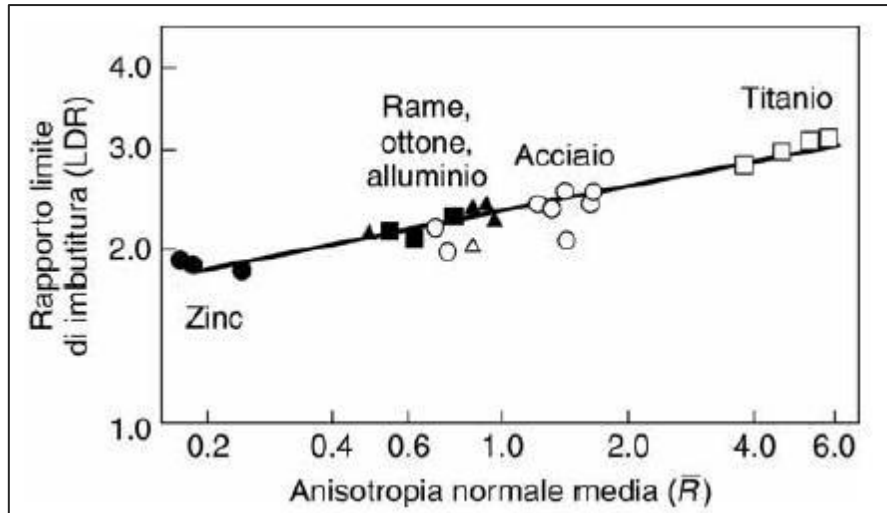


FIGURA 28 RELAZIONE RAPPORTO TRA LIMITE DI IMBUTITURA E ANISOTROPIA NORMALE MEDIA

Ulteriore parametro da determinare è l'anisotropia planare  $\Delta R$ , che risulta essere la differenza tra il valore medio di  $R$  valutato nelle direzioni a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  con quello a  $45^\circ$ .

$$\Delta R = \frac{(R_0 - 2R_{45} + R_{90})}{2} \quad (3.24)$$

L'anisotropia planare è la causa della formazione di superfici ondulate durante il processo di imbutitura. Il numero di orecchie prodotte può essere pari a quattro, sei o otto in funzione della struttura cristallografica del metallo. La loro altezza cresce al crescere del  $\Delta R$ . Se  $\Delta R = 0$ , non si ha la formazione di orecchie.

Questo fenomeno è indesiderato in quanto le orecchie devono essere tranciate separatamente e comportano uno spreco di materiale.



FIGURA 29 FORMAZIONE ORECCHIE

Si può notare come un materiale sia maggiormente imbutibile per valori di anisotropia normale media elevati e per bassi valori di anisotropia planare. In generale, tuttavia, le

lamiere le lamiere con un alto valore di anisotropia normale media presentano anche un alto valore di anisotropia planare. Inoltre, i parametri che devono essere controllati durante il processo di lavorazione di lamiera sono gli elementi in lega, gli additivi, le temperature di processo, i cicli di tempra post lavorazione, la riduzione dello spessore durante la laminazione tradizionale e in quella incrociata (biassiale) dei piatti.

### 3.5 Raggio minimo di piegatura

Il raggio di curvatura di una lamiera sottoposta ad un processo di piegatura non può essere inferiore ad un certo valore o il metallo si romperà in corrispondenza delle fibre più esterne. Il minimo raggio di piega è quindi un limite di formabilità del pezzo.

Il raggio minimo di piegatura di un componente è generalmente espresso in funzione del suo spessore e i valori sono in genere ricavati per via sperimentale.

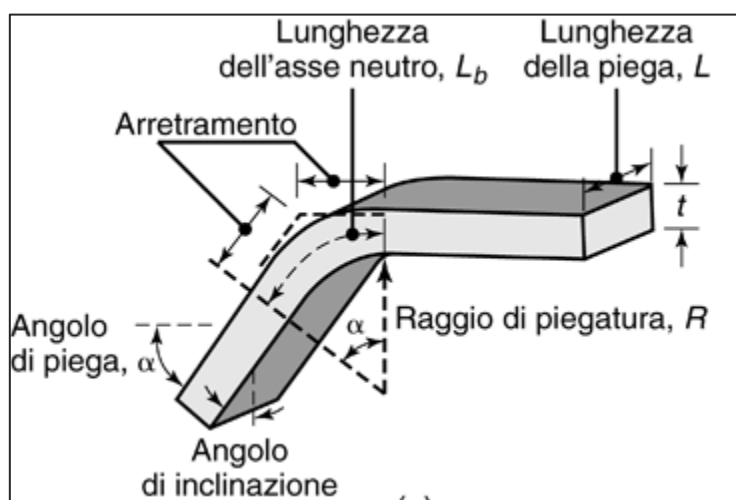


FIGURA 30 RAPPRESENTAZIONE DI UNA LAMIERA PIEGATA

Questo parametro dipende dalle proprietà del materiale, dalla lunghezza dell'asse di piegatura del pezzo e dall'orientazione di questo ultimo rispetto alla direzione di laminazione. La tabella 7 mostra i valori del raggio minimo di piegatura a temperatura ambiente per alcuni materiali, in funzione dello spessore ( $t$ ).

TABELLA 5

Materiale	Condizione del materiale	
	Tenero	Indurito
Leghe di alluminio	0	6t
Rame berillio	0	4t
Bronzo, basso contenuto di piombo	0	2t
Magnesio	5t	13t
Acciaio		
austenitico inossidabile	0.5t	6t
basso tenore di carbonio, basso legato e HSLA	0.5t	4t
Titanio	0.7t	3t
Leghe di titanio	2.6t	4t

A seconda del materiale e delle condizioni del materiale, esiste una differenza notevole per il valore del raggio minimo di piega. Un materiale incrudito è poco piegabile e presenta un valore di MBR maggiore di 0. Un materiale invece tenero, duttile assume valori di MBR intorno a 0. In generale il valore assunto per MBR si può valutare considerando o la riduzione dell'area a frattura o attraverso tabelle di questo tipo, in cui è indicato anche lo stato di fornitura.

Per valutare il parametro, si deve fare una prima considerazione sull'asse neutro. L'equazione che descrive l'asse neutro non deformato è:

$$l = \alpha(R + Kt) \quad (3.24)$$

dove  $k$  è una costante e assume il valore di:

- 0.5 se la piega è poco severa (asse neutro in mezzeria);
- 0.33 se l'asse neutro è spostato verso le fibre interne (1/3 in compressione; 2/3 in trazione)

Dall'equazione (3.24) si ottiene la deformazione ingegneristica delle fibre interne e esterne. Questa formula presuppone che l'asse neutro sia in mezzeria.

$$e_0 = e_f = \frac{1}{\left(\frac{2R}{t} + 1\right)} \quad (3.25)$$

$R/t$  identifica la geometria della lamiera. Al diminuire del rapporto geometrico, aumenta la deformazione. Questo rapporto è indicativo anche della duttilità del materiale; minore è il valore del rapporto, maggiore è la duttilità.

Dalla deformazione ingegneristica si passa alla deformazione reale attraverso:

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_F}\right) = \ln\left(\frac{100}{(100 - r)}\right) \quad (3.26)$$

dove  $r$  è la riduzione in percentuale di area a frattura nella prova a trazione.

$$\varepsilon_0 = \ln(1 + e_0) = \ln\left(1 + \frac{1}{\left(\frac{2R}{t} + 1\right)}\right) = \ln\left(\frac{R + t}{R + \frac{t}{2}}\right) \quad (3.27)$$

Si ottiene:

$$\min\left(\frac{R}{t}\right) = \frac{50}{r} - 1 \quad (3.28)$$

L'espressione che descrive la relazione tra MBR e la riduzione dell'area a frattura è congruente alla relazione che si otterrebbe procedendo per via sperimentale.

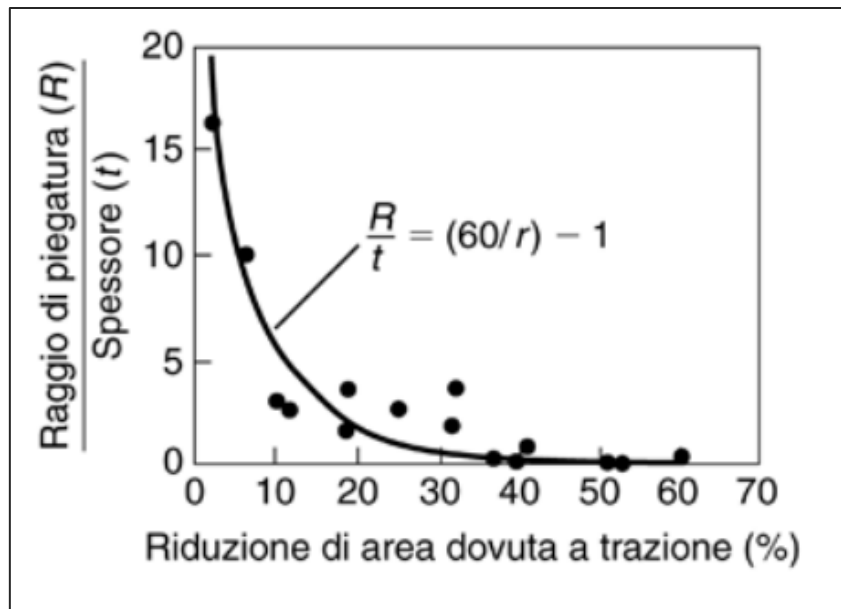


FIGURA 31 RELAZIONE TRA ANISOTROPIA E RIDUZIONE DI AREA

### 3.6 Formabilità delle lamiere

La formabilità delle lamiere è generalmente definita come l'attitudine di una lamiera a essere deformata senza la comparsa di strizioni e fratture. Essa è influenzata da tre fattori [2,3].

- Proprietà della lamiera (allungamento al limite di snervamento, anisotropia, dimensione dei grani, tensioni residue, ritorno elastico, raggrinzatura, strati di rivestimento);

- Attrito e lubrificazione delle diverse interfacce;
- Caratteristiche delle apparecchiature utensili dei punzoni e stampi delle matrici utilizzate.

Al fine di misurare la lavorabilità delle lamiere, sono state sviluppate diverse tecniche, tentando di prevedere la lavorabilità con modelli specifici per ciascuno dei diversi processi di lavorazione in relazione ai parametri di processo e alle caratteristiche del materiale, compresa la tessitura della lamiera.

### 3.6.1 Prove di formabilità

In seguito, verranno descritte le prove più importanti utilizzate per caratterizzare la formabilità delle lamiere.

- Prova di trazione mono assiale. Questa prova è descritta in [1]. permette di determinare molte proprietà dei materiali come l'allungamento a rottura, l'esponente d'incrudimento, l'anisotropia normale e planare.
- Prove di formatura di coppette. Sono prove che interessano lo stato biassiale di trazione che si viene a formare durante la formatura della lamiera. la prima prova sviluppata consiste nella deformazione di coppette. Le principali comprendono le prove di *Erichsen e Olsen* per la stiratura, *Swift e Fukui* per l'imbutitura. Nelle prove per la stiratura, un campione di lamiera è fissato su un premi-lamiera circolare mediante un carico di 1000 Kg. Durante la prova il campione viene deformato attraverso una sfera di acciaio di 20 mm di diametro con superficie lubrificata, fino a rottura o raggiungimento della forza massima. La formazione di una frattura duttile avviene sull'estradosso della lamiera. Maggiore è la distanza percorsa dalla sfera, maggiore è la lavorabilità della lamiera. Queste prove permette di valutare la capacità del materiale di essere stirato senza raggiungere a rottura. La prova descrive uno stato tensionale biassiale perfettamente bilanciato con deformazioni sulla lamiera positive e uguali tra loro. Date le condizioni di processo, la deformazione della lamiera avviene solo a spese dell'assottigliamento in quanto il flusso radiale di materiale viene completamente impedito poiché la lamiera è incastrata sul bordo esterno. inoltre, per la semplicità della prova, questa non è in grado di riprodurre lo stato tensionale reale agente sul pezzo durante il processo di stiratura [4].



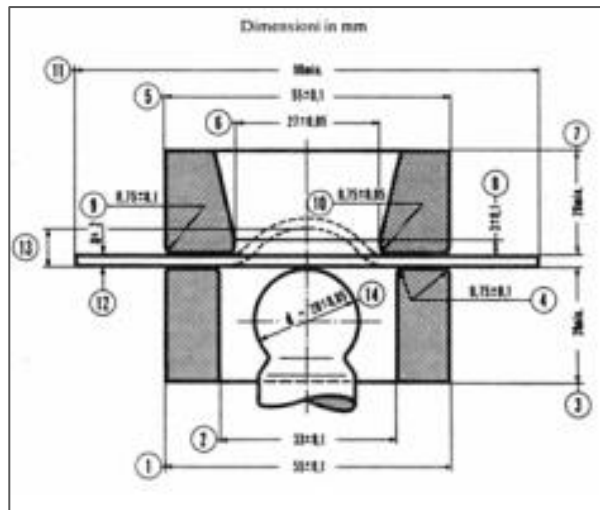


FIGURA 32 PROVA ERICHSEN

- Prova di espansione (Bulge test). La prova di espansione viene utilizzata per simulare le operazioni di formatura di lamiera. Un provino circolare di lamiera, bloccato lungo il perimetro a una matrice viene espanso mediante l'azione di una pressione idrostatica, che simula l'azione del punzone. Il processo consiste in una stiratura biassiale pura, priva di attrito. Il limite di espansione è indicato dall'altezza raggiunta prima della rottura e descrive la formabilità e la qualità della lamiera. Questa prova permette di ottenere curve di trazione reali per carichi biassiali senza l'influenza dell'attrito presente all'interfaccia tra punzone e lamiera. [5]

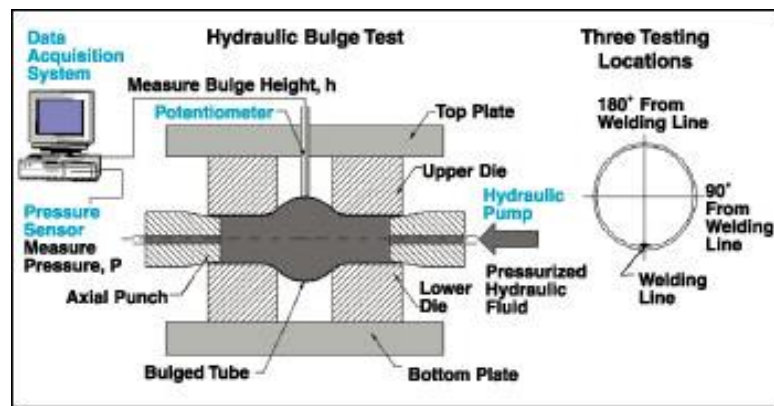


FIGURA 33 BULGE TEST

- Prova dell'altezza limite (LDH). In queste prove si misura la corsa massima raggiunta dal punzone alla rottura della lamiera o la forza massima raggiunta dal punzone. Durante la prova il premi-lamiera impedisce lo scorrimento della lamiera i parametri misurati da questa prova sono indici della capacità del materiale di stirarsi senza rompersi. In generale si è verificato che per valori elevati di LDH, si

ottengono valori di  $n$  e  $m$  elevati, così come ad elevati valori di allungamento a rottura della lamiera.

- Diagrammi del limite di formabilità (FLD)

### 3.6.2 Diagramma limite di formabilità

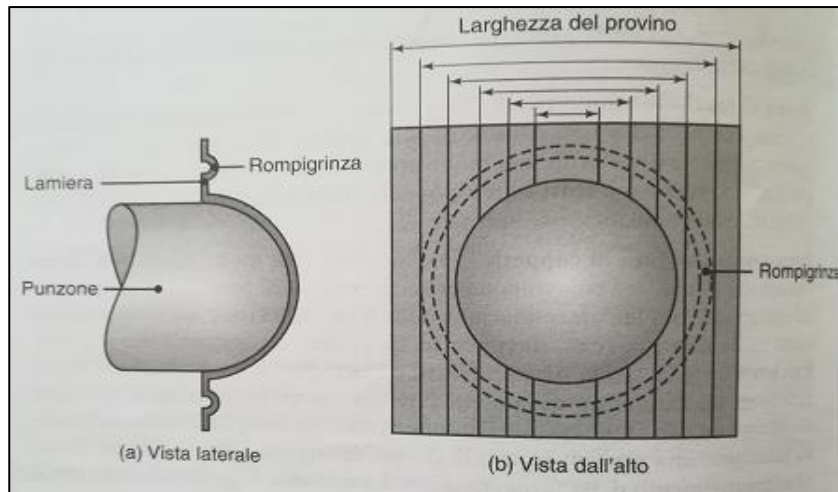
La lamiera viene verniciata con un pattern. Il pattern è un reticolo circolare di pallini, di dimensioni che possono variare dal 2.5-5 mm di diametro. Il reticolo viene depositato sulla superficie o usando agenti chimici o per fotoincisione. Per migliorare la precisione della misura, le dimensioni del reticolo e delle linee realizzate sulla lamiera devono essere minime. Questa procedura si basa sul fatto di avere a disposizione un pattern deterministico sulla lamiera. Studi più recenti utilizzano un pattern stocastico, in cui nella pratica si spruzza una spray che deposita delle gocce di vernice sulla lamiera.



**FIGURA 34 PATTERN STOCASTICO**

La macchina è caratterizzata dall'aver due telecamere che mediante approccio stereoscopico determinano lo spostamento dei punti nella zona di frattura questa procedura è più accurata in quanto le dimensioni delle gocce depositate è inferiore ai 2 mm.

Nella pratica la lamiera viene bloccata con un premi-lamiera che esercita una forza di chiusura tale da impedire lo scorrimento della lamiera. La lamiera viene poi perforata con l'uso di un punzone normale alla superficie e a seconda della geometria della lamiera (in particolare della larghezza) la prova riproduce i diversi stati di deformazione che permettono di descrivere la curva di formabilità del materiale. Per ogni prova si misura la deformazione del reticolo nel punto in cui avviene la rottura della lamiera. Le misure possono essere realizzate o con strumenti manuali o attraverso sistemi visivi.



**FIGURA 35 PROVA NAKAZIMA**

A causa della presenza di lubrificante, che influisce sull'esito della prova, occorre riportate le caratteristiche di questo parametro in ogni prova in modo da avere una condizioni di analisi oggettiva per descrivere la curva di formabilità- la prova può anche essere eseguita in assenza di lubrificante. L'analisi principale della prova consiste nel valutare la deformazione maggiore e minore attraverso la deformazione del reticolo foto inciso.

L'asse maggiore dell'ellisse rappresenta la deformazione maggiore riportata nel diagramma di formabilità e il valore assunto rappresenta l'entità della stiratura. La deformazione riportata è quella ingegneristica nella specifica direzione. Analogamente la d'asse minore dell'ellisse rappresenta l'entità della stiratura (deformazione minore positiva) o contrazione (deformazione maggiore negativa) nella direzione trasversale. Si osserva che la deformazione maggiore è sempre positiva dal momento che la deformazione maggiore è sempre positiva, dal momento che la deformazione della lamiera avviene per una condizione di stiratura.



**FIGURA 36 SCHEMA DEFORMAZIONE DI STIRATURA**

Per descrivere la curva di formabilità vengono preparati dei campioni di lamiera di diversa larghezza in modo tale da descrivere i diversi percorsi di deformazioni che la lamiera può subire nei processi di lavorazione. Ad esempio, se si utilizza un provino, il cui lato sia maggiore del diametro del punzone con testa emisferica, la deformazione che viene descritta dalla prova è una trazione biassiale bilanciata dal momento che la deformazione maggiore è uguale alla deformazione minore. Nella pratica è come se il sistema fosse soggetto ad una pressione idrostatica che causa una deformazione omogenea su tutta la lamiera. Con la diminuzione di una delle dimensioni della lamiera è possibile descrivere lo stato di tensione tipico di una prova di trazione mono assiale.

Per valutare la deformazione della lamiera, si valuta la deformazione subita dai cerchi del pattern in prossimità della zona di frattura.

Ad esempio, nel caso del provino per la trazione biassiale bilanciata in cui la lamiera è quadrata, il cerchio del pattern subirà un'espansione omogenea. Come risultato i cerchi subiscono una deformazione omogenea, che comporta ad avere un cerchio di diametro maggiore rispetto a quello iniziale. La deformazione è tale che:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (3.29)$$

la deformazione reale si ricava attraverso l'espressione:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{D_1}{D_0}\right) \quad (3.30)$$

In seguito, si utilizza un campione con larghezza leggermente ridotta per poter descrivere un altro stato di deformazione. Con la diversa geometria, lo stato di trazione biassiale bilanciato non è più riproducibile poiché il diametro del punzone è maggiore o minore rispetto alla larghezza della lamiera. I cerchi del pattern si trasformano in ellissi per effetto della deformazione. Se la larghezza della lamiera è confrontabile con il diametro del punzone allora lo stato tensionale che viene descritto mantiene ancora deformazione maggiore positiva e deformazione minore positiva; in tal caso i cerchi del pattern subiscono un'espansione del cerchio nelle due direzioni, ma con un cambio di geometria che da circolare passa a ellittica. Si ha quindi:

$$\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{D_1}{D_0}\right) > 0 \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{D_2}{D_0}\right) > 0 \quad (3.33)$$

Con la riduzione ulteriore della larghezza del provino si ottiene che i cerchi del pattern si trasformano in ellissi che sono caratterizzate dall'aver diametro finale nella direzione trasversale pari al diametro iniziale del cerchio del pattern. Questa configurazione descrive lo stato di tensione tipico della deformazione piana tale che:

$$\varepsilon_2 = 0 \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{D_2}{D_0}\right) = \ln\left(\frac{D_0}{D_0}\right) = 0 \quad (3.35)$$

Con la riduzione ulteriore della larghezza della lamiera si passa a descrivere lo stato tensionale tipico della trazione mono assiale, caratterizzato dall'aver deformazione maggiore positiva e deformazione minore negativa. In questo caso i cerchi subiscono una trasformazione ad ellissi caratterizzate con:

$$D_1 > D_0 \quad (3.36)$$

$$D_2 < D_0 \quad (3.37)$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{D_1}{D_0}\right) > 0 \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{D_2}{D_0}\right) < 0 \quad (3.39)$$

Si ottiene la seguente curva:

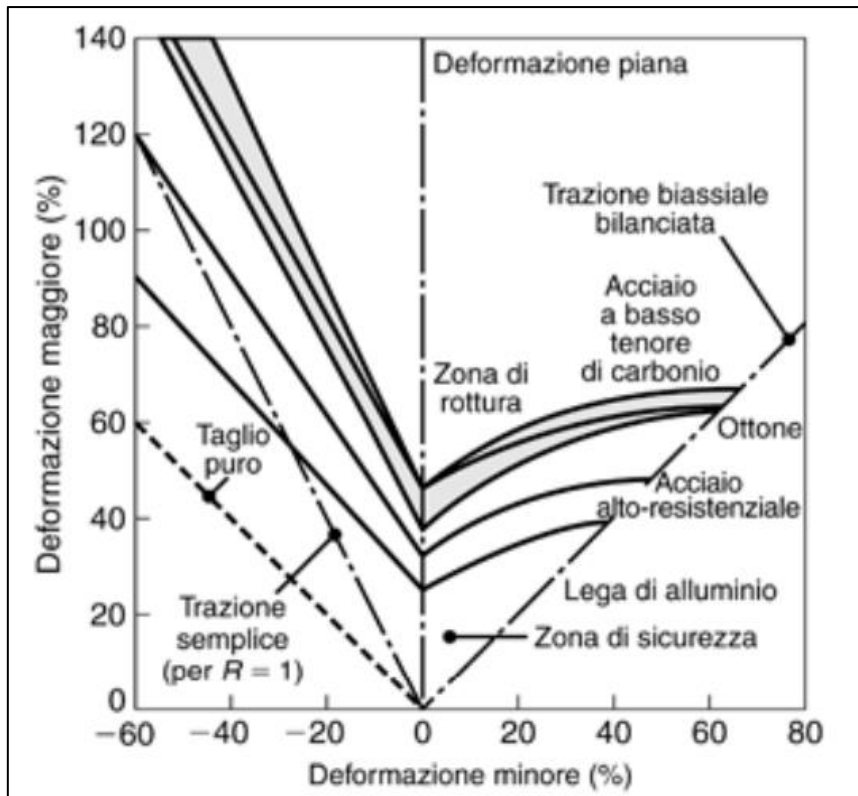


FIGURA 37 DIAGRAMMA DI FORMABILITÀ

Si nota che questa figura include vari percorsi di deformazione, mostrati come linee rette:

- Il percorso deformativo a destra rappresenta la prova di trazione biassiale bilanciata;
- Il percorso deformativo verticale al centro del diagramma rappresenta la condizione di stato di deformazione piana, per il fatto che la deformazione planare minore è nulla.;
- Il percorso deformativo di trazione semplice, in cui si ha una pendenza con un rapporto 2:1, per il fatto che il modulo di Poisson in campo plastico ha un valore pari a 0.5
- Il percorso deformativo corrispondente alla sollecitazione di taglio ha una pendenza negativa di 45° per la tipologia di deformazione che avviene riportata in figura 37.

# Capitolo 4

## La procedura sperimentale

### 4.1 Le prove di trazione a caldo

#### 4.1.1 Apparato sperimentale

Le prove di trazione a caldo sono state eseguite con la seguente apparecchiatura:

- Macchina per prove di trazione, pressa idraulica *MTS\_322* da 50 kN, attrezzata con una cella di carico da 35 kN posta sulla testa statica della pressa. Tale configurazione viene adottata al fine di preservare le prove da effetti dinamici dovuti al test stesso.
- Computer e software per il controllo e la programmazione della pressa *MTS\_322*.
- Generatore per il riscaldamento localizzato del provino da testare. Il generatore è collegato alla pressa attraverso un collegamento di cavi, che terminano con delle piastrine in rame, poste a contatto con le ganasce che bloccano il provino. Le piastrine in rame sono isolate con del teflon per favorire il passaggio di corrente al provino e impedire la dispersione di corrente verso terra. Il passaggio di corrente genera calore per effetto joule e riscalda il provino da testare.
- Pirometro per la rilevazione della temperatura.
- Computer e software *LabView* per il controllo del ciclo di riscaldamento del provino.
- Sistema ottico di acquisizione composto da una fotocamera ad alta frequenza Pike per il monitoraggio ed il campionamento dei fotogrammi del provino sottoposto a trazione durante la prova
- Sistema di raffreddamento in aria forzata. Il sistema è caratterizzato da un ugello che ha la funzione di investire il provino con aria per garantire le condizioni di raffreddamento della prova. L'aria è espulsa con una pressione pari a
- Computer e software *Labview* per il controllo dell'aria forzata e per l'acquisizione delle immagini da analizzare per lo studio della deformazione.

- Software *Aramis GOM* per l'elaborazione dei fotogrammi del provino rilevati durante la deformazione a trazione. Il programma valuta l'evoluzione del singolo marker individuato grazie ad una distribuzione casuale di punti ad elevato contrasto disposti sulla superficie del campione e quindi determinarne la deformazione

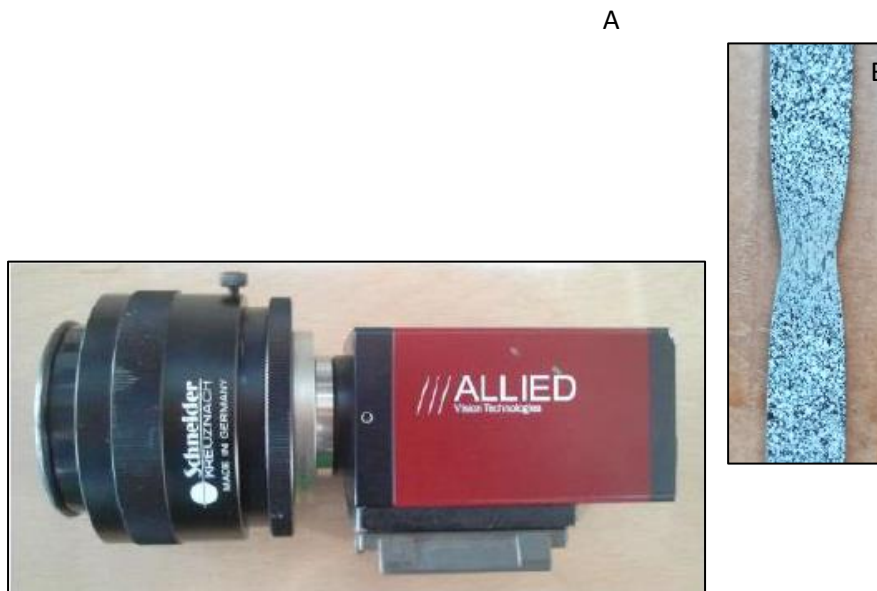


FIGURA 38 A)TELECAMERA AD ALTA FREQUENZA ADOTTATA PER MONITORARE LA DEFORMAZIONE DURANTE LA PROVA DI TRAZIONE. B) ESEMPIO DELLA DISTRIBUZIONE STOCASTICA DI PUNTI SULLA SUPERFICIE DEL CAMPIONE IN DUE DIVERSI MOMENTI DELLA PROVA A TRAZIONE

#### 4.1.2 Procedura sperimentale

Le prove di trazione sono state eseguite su campioni in lega di alluminio AA6082 e Al7000, per diverse condizioni di temperatura e velocità di deformazione. Le prove sono descritte al capitolo 3. Come anticipato dall'esposizione dell'apparato sperimentale adottato, per la valutazione della deformazione subita dal provino durante il test di trazione si è usato il software *Aramis GOM*, che monitora l'evoluzione in termini di spostamento e geometria di un punto presente sulla superficie del campione determinandone così la deformazione.

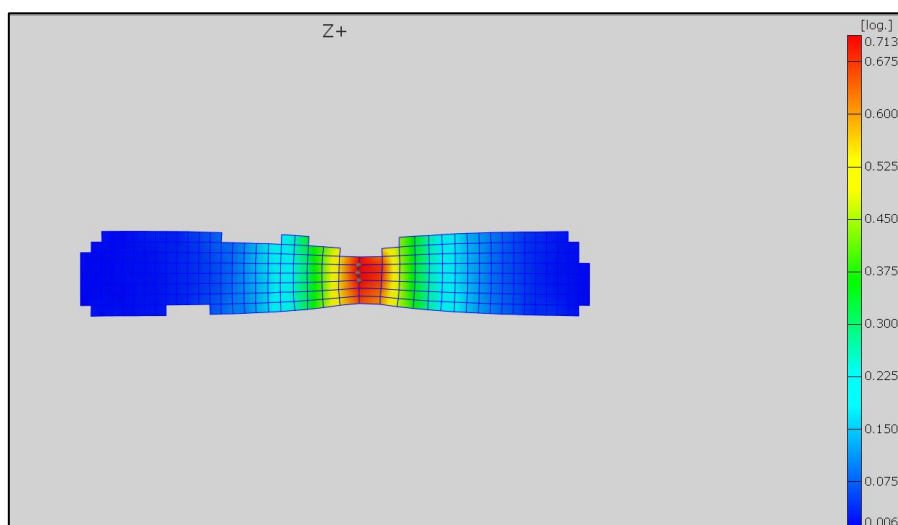
L'adozione di tale software impone quindi una preparazione del campione da sottoporre alla prova di trazione tesa a realizzare sulla superficie un pattern di carattere casuale ad elevato contrasto. Questo viene conseguito mediante l'uso di vernice spray nera e bianca resistente alle alte temperature che viene applicata in modo alternato sull'area interessata [1].





**FIGURA 39 FOTO CAMPIONE DI ALLUMINIO AA6082 PRIMA E DOPO LA PROVA DI TRAZIONE**

Occorre porre attenzione alla deposizione del pattern, in quanto ha molta influenza sull'analisi della deformazione. La presenza di eccessi e di un orientamento dei punti può alterare e impedire l'analisi della prova con il software di *Aramis GOM*. Il pattern consiste in uno strato di vernice che forma punti bianchi e neri su tutto il provino. La funzione del pattern è descritta nel paragrafo seguente (4.2). I punti devono essere in netto contrasto per permettere l'analisi di deformazione.



**FIGURA 40 IMMAGINE DI ANALISI DI DEFORMAZIONE CON ARAMIS GOM**

La collocazione del provino avviene con la pinzatura del campione sulla parte superiore. La pressione di chiusura del punzone è stabilita in base al materiale da testare. Nel caso dell'alluminio la pressione è stata impostata a 10 MPa. Il provino deve essere chiuso in modo tale che sia perfettamente dritto per evitare fenomeni di piegamento, che alterano la prova. La testa inferiore della macchina viene controllata in modo manuale al fine che sia allineata con la direzione trasversale della superficie per evitare fenomeni di torsione durante il test. La chiusura delle griffe inferiori non è immediata. Prima che avvenga, occorre impostare la macchina in controllo di carico per impedire il rischio di provocare

deformazioni plastiche nel campione dovute all'inerzia di moto dato dalla massa elevata delle teste della pressa. Si applica inoltre un precarico di trazione prima della chiusura della griffa inferiore con lo scopo di attenuare il movimento verso l'alto del pistone della testa inferiore della macchina che condurrebbe ad un inevitabile carico di pressione nel campione.

Al termine della prova di trazione si ottengono i seguenti dati:

- Dal software della macchina per la MTS 322 si ottiene un file Excel che contiene i dati di corsa, tempo e forza rilevata dalla cella di carico presente sulla macchina MTS,
- Dal primo software di *Labview* si ottiene una sequenza di fotogrammi acquisiti dalla fotocamera;
- Dal secondo software di *Labview* si ottiene un file Excel che contiene dati relativi a tempo e temperatura registrati durante il ciclo termico.

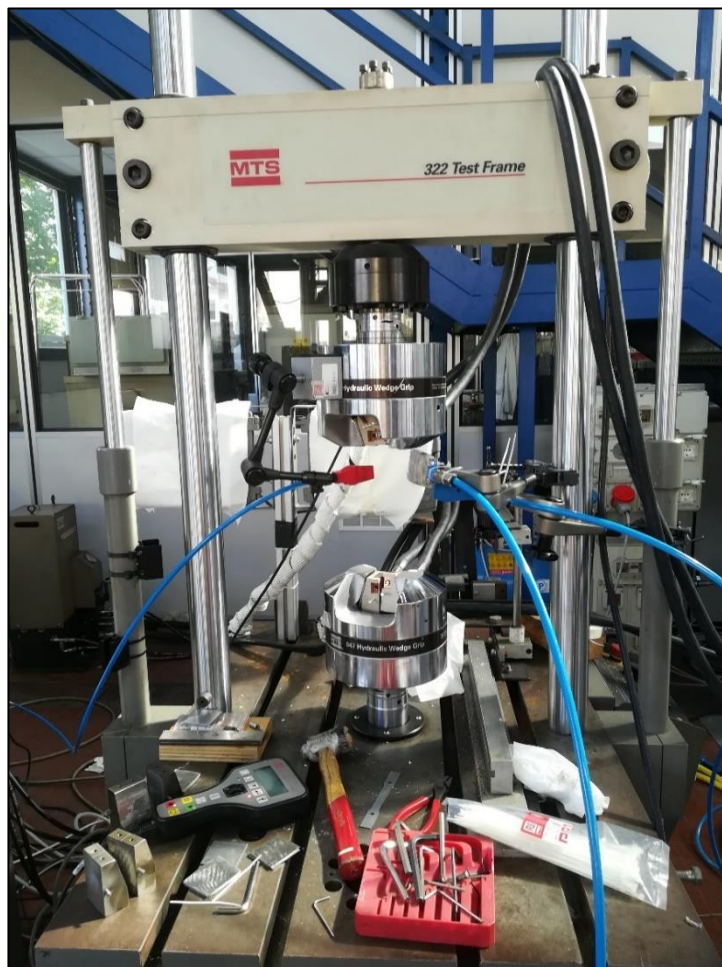


FIGURA 41 MACCHINA MTS

I fotogrammi ottenuti vengono utilizzati come base per l'analisi in termini di deformazione per mezzo del software *Aramis GOM*. Occorre ricordare che la prova di trazione è caratterizzata da una deformazione solo nel piano ortogonale alla direzione del fascio ottico, in seguito è sufficiente l'ausilio di un'unica fotocamera e dunque un settaggio bidimensionale del programma per la rilevazione della deformazione. Il programma crea un mesh su tutti i fotogrammi raccolti e attraverso essa valuta l'evoluzione di ogni singolo marker individuato grazie alla distribuzione stocastica di punti bianche e neri sulla superficie del campione, calcolandone lo spostamento e la deformazione. Al termine dell'analisi il software fornisce il valore della deformazione per ogni singolo punto della mesh ad ogni fotogramma. Per l'analisi della deformazione vengono considerati i dati della deformazione al fotogramma corrispondente all'istante prima della frattura. Il valore assunto dalla deformazione è un valore della media della deformazione registrata dai singoli marker.

## **4.2 Set up prova**

### **4.2.1 La macchina di trazione**

Il programma per condurre la prova di trazione è fornito dalla casa produttrice della pressa MTS\_322 e consente di impostare la procedura di test desiderata. Il software di controllo della macchina MTS funziona in parallelo al software Labview utilizzato in un secondo computer per l'acquisizione delle immagini e in un terzo computer per il controllo del ciclo termico. I tre programmi non sono comunicanti tra loro. I tempi della prova di trazione e i tempi di acquisizione delle immagini sono stati tarati al variare delle condizioni di prova.

Il software del controllo della prova di trazione permette di regolare la velocità di spostamento della testa inferiore per la deformazione di trazione e quindi la velocità di deformazione da riprodurre per la prova. In funzione della velocità di deformazione è necessario impostare un'adatta frequenza di acquisizione dei dati di tempo, corsa e forza letti dalla cella di carico presente per ottimizzare l'analisi. La frequenza massima che è possibile impostare è di 6144 Hz.

Il secondo software utilizzato è stato sviluppato in ambiente *Labview* e controlla l'acquisizione dei fotogrammi della prova. La frequenza e il numero delle immagini viene impostata in funzione della velocità di deformazione e dei tempi di prova.

### **4.2.2 Il sistema di riscaldamento**

Il pirometro è un sensore di temperatura ad infrarossi, che determina la temperatura per metodo indiretto. La costituzione basilare di un sensore di tal tipo è realizzata da una lente che direziona l'energia infrarossa (IR) su un ricevitore la cui funzione è di convertire l'energia infrarossa in un segnale elettrico. Tale segnale viene visualizzato in termini di temperatura dopo essere stato compensato per via delle variazioni di temperatura ambiente. Questa configurazione permette la misura della temperatura a distanza senza contatto con l'oggetto da misurare. Per tale motivo, il termometro a infrarossi è utile nel misurare la temperatura in circostanze dove termocoppie o altre tipologie di sensori a contatto non possono essere utilizzati o non fornirebbero dati accurati. Tipici casi di impiego di tale strumentazione si incontrano qual ora l'oggetto da misurare sia in movimento, o circondato da un campo elettromagnetico come nelle applicazioni di riscaldamento ad induzione, sottovuoto o ad una specifica atmosfera controllata, o, ancora, in applicazioni dove è richiesta una risposta rapida. Nel caso sperimentale, la scelta di utilizzare il pirometro anziché una termocoppia è dovuta principalmente a due motivi:

- Controllo più efficiente della temperatura. La differenza tra temperatura reale e temperatura registrata è inferiore ai 10°C.
- Sistema più facile da utilizzare. L'applicazione di termocoppie a provini di alluminio risulta essere difficoltosa data la conducibilità dell'alluminio.

Prima di procedere con la prova, il pirometro deve essere opportunamente tarato.

Il pirometro è un dispositivo in grado di rilevare la temperatura in superficie di un oggetto mediante l'utilizzo di due fasci laser, convergenti sul punto. La tecnica di rilevazione si basa sull'emissività del materiale. La emissività di un materiale (di solito indicata con  $\epsilon$ ) è la frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura. È una misura della capacità di un materiale di irraggiare energia. Un vero corpo nero avrebbe un  $\epsilon = 1$ , mentre qualunque oggetto reale ha  $0 < \epsilon < 1$  (corpo grigio). L'emissività dipende da fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, la lunghezza d'onda e la finitura superficiale del corpo osservato. In generale i metalli hanno emissività piuttosto bassa e crescente con la temperatura, mentre i non metalli (in cui vanno inclusi anche gli ossidi metallici) hanno emissività relativamente elevata e decrescente al crescere della temperatura. Una rugosità elevata e senza direzioni preferenziali aumenta l'emissività e la rende meno sensibile a variazioni di angolo di emissione.

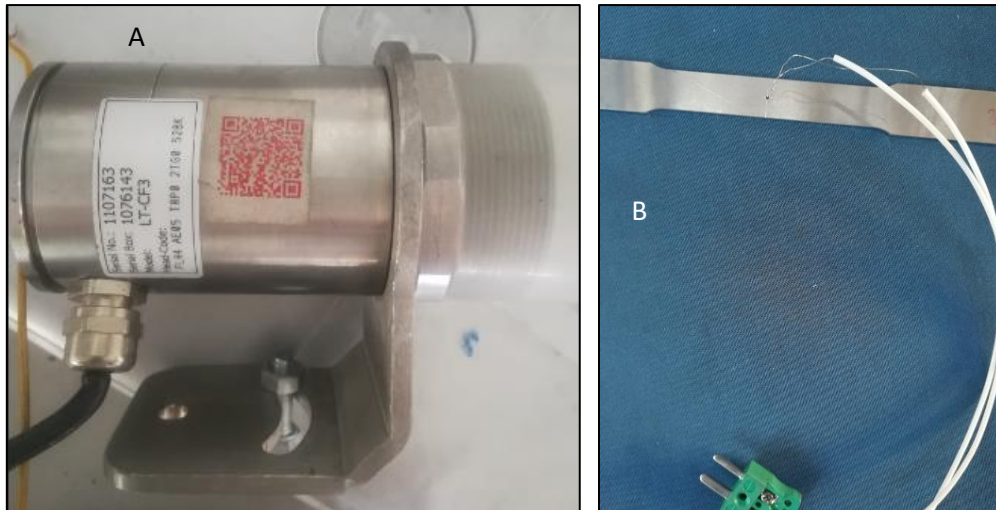


FIGURA 42 A) PIROMETRO IMPIEGATO PER LE PROVE DI TRAZIONE; B) TERMOCOPPIA SALDATA AL PROVINO

La taratura viene eseguita con l'uso di una termocoppia saldata a punto sul provino e il pirometro. Nel caso della taratura, il provino viene verniciato di nero per avere una misura più efficiente della temperatura. In particolare, per le leghe 7000 la taratura è stata eseguita sia con l'uso della termocoppia, sia con l'uso di una termo-camera, la cui misura si è basata sull'emissività del provino. Il provino viene riscaldato manualmente con il generatore fino alla temperatura massima del ciclo termico a cui sarà soggetto e poi raffreddato in aria. Durante il raffreddamento i valori di potenziale e temperatura della termocoppia vengono registrati con un video. Il valore della temperatura del pirometro non viene considerato.

La legge che lega potenziale e Temperatura è di tipo lineare. I dati vengono quindi elaborati attraverso interpolazione lineare per ottenere l'equazione della retta di taratura. I valori del coefficiente angolare e dell'intercetta sono poi inseriti nel programma e restituiscono il valore del fondo scala corretto per il pirometro. Una volta eseguita la taratura si può procedere con il ciclo termico. In figura 41 viene riportato un esempio di raffreddamento da 520 a 400 °C in aria, ottenuto una volta tarato il sistema.

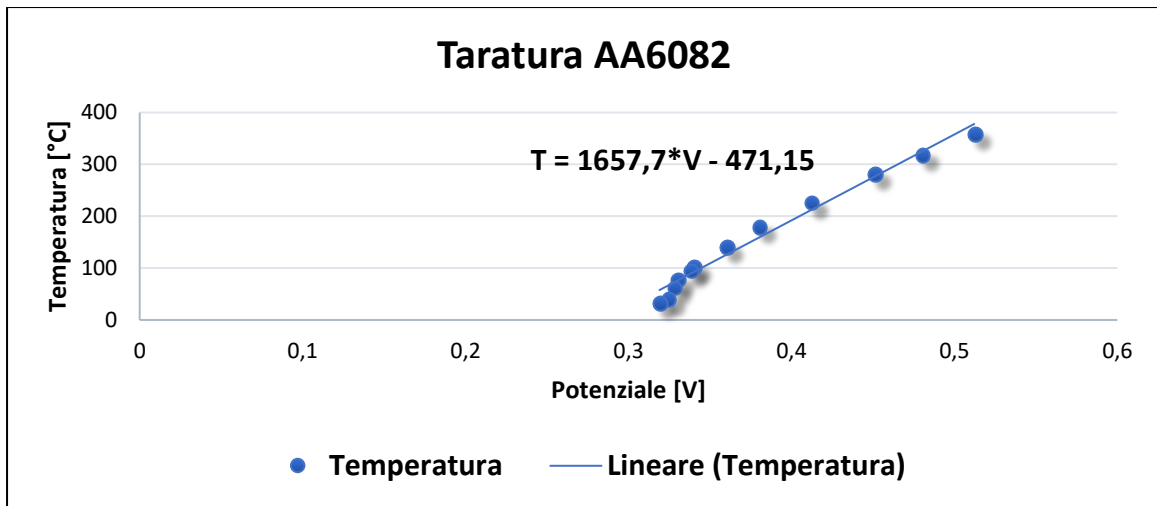


FIGURA 43 TARATURA DI AA6082 VALUTATO SUL SALTO TERMICO DA 525 A 50 °C ATTRAVERSO TERMOCOPPIA

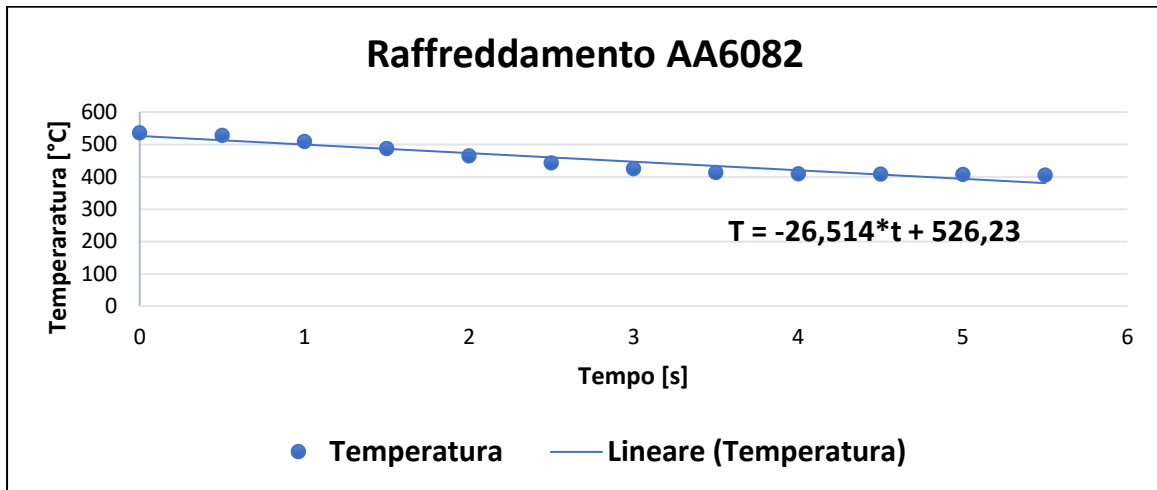


FIGURA 44 RAFFREDDAMENTO DA 500 A 50°C PER LA TARATURA

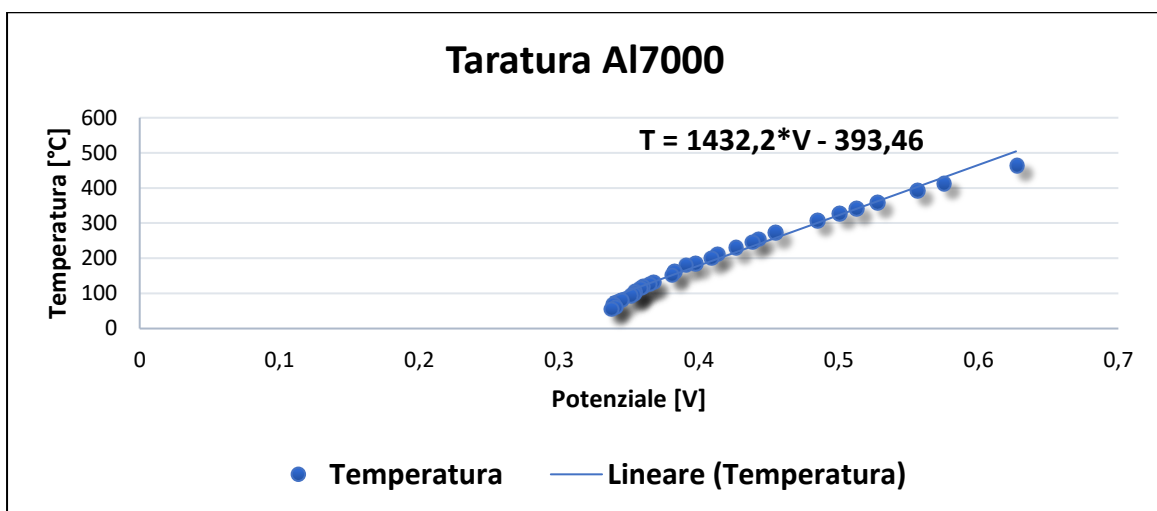
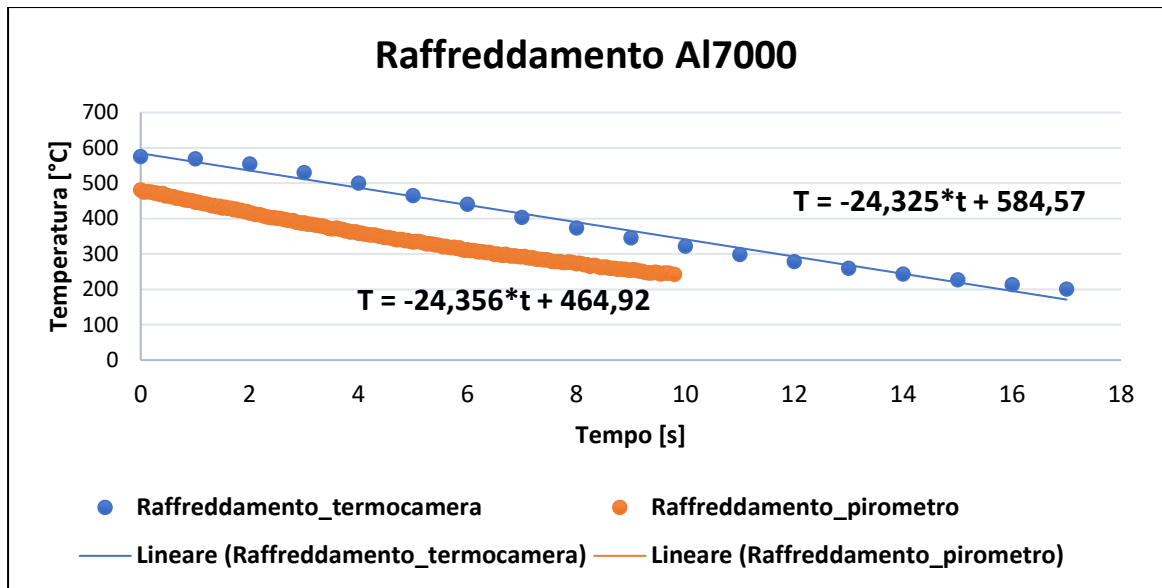


FIGURA 45 TARATURA DI AL7000 IN UN SALTO TERMICO DIA 480 A 100°C ATTRAVERSO TERMOCOPPIA



**FIGURA 46 RAFFREDDAMENTO DA 480 A 100°C PER LA TARATURA SIA TRAMITE TERMOCOPPIA SIA TERMO CAMERA**

Una volta che il pirometro è stato tarato, è possibile eseguire il ciclo termico. L'impostazione del ciclo avviene sul secondo software sviluppato in *Labview*, che permette di impostare i parametri di tempo e temperatura desiderati per la prova. Il programma funziona sia in manuale sia in remoto. La funzione manuale viene utilizzata per eseguire la taratura della strumentazione, mentre il controllo in remoto è quello tipicamente usato per le prove. Il software controlla la corrente emessa dal generatore attraverso la temperatura rilevata dal pirometro. Se la temperatura registrata dal pirometro non è quella preimpostata da monitor, il software emette un segnale di potenziale al generatore che in tal caso fornisce più corrente al provino fino a ottenere la temperatura desiderata. Durante l'esecuzione della prova il generatore riscalda il provino per effetto Joule rispettando tempi e temperature preimpostate. L'impostazione del ciclo termico viene fatta prima che avvenga la prova e funziona separatamente alla macchina di trazione. Nel caso delle prove i due programmi sono stati utilizzati in riferimento al tempo di raffreddamento e mantenimento secondario del ciclo termico impiegato.

#### **4.2.3 Ciclo termico per AA6082**

Il ciclo termico prevede il riscaldamento fino alla temperatura di solubilizzazione pari a 525 °C, mantenimento per 60 secondi e successivo raffreddamento. Il riscaldamento avviene tramite l'utilizzo del generatore collegato agli estremi del provino. La velocità di riscaldamento fino a 525°C è pari a 5°C/s. la temperatura viene rilevata sul campione con l'uso del pirometro durante il corso dell'intera prova.

Per le prove di trazione effettuate a 400°C il raffreddamento avviene solamente in aria calma. Le altre prove invece avvengono in aria calma fino a 400°C e in aria forzata con una velocità di raffreddamento di 75/80 °C/s fino alla temperatura di prova. Le prove sono state fatte a 400, 300, 200, 25 °C. Il campione viene mantenuto alla temperatura di esercizio fino al termine della prova. In figura (47) il picco di temperatura finale corrisponde alla frattura del provino. Se si osserva la curva descritta dal ciclo termico, sono presenti molti picchi secondari di temperatura; tali picchi corrispondono all'impulso di corrente emesso dal generatore per far convergere la temperatura reale del provino con quella impostata nel ciclo termico.

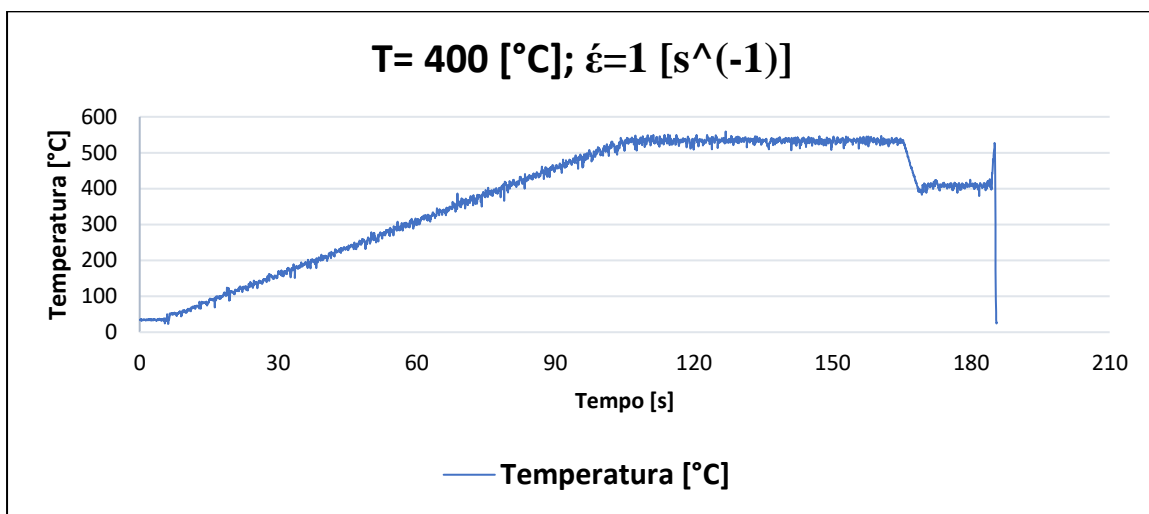


FIGURA 47 CICLO TERMICO CON PIROMETRO, PROVE A VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE 1 S<sup>(-1)</sup> A 400°C

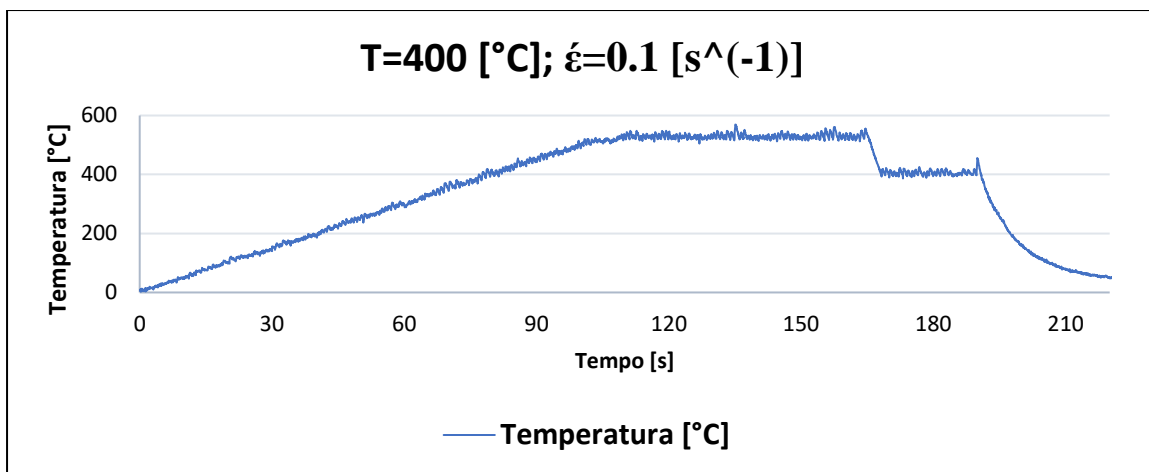


FIGURA 48 CICLO TERMICO CON PIROMETRO, PROVE A VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE 0.1 S<sup>(-1)</sup> A 400°C



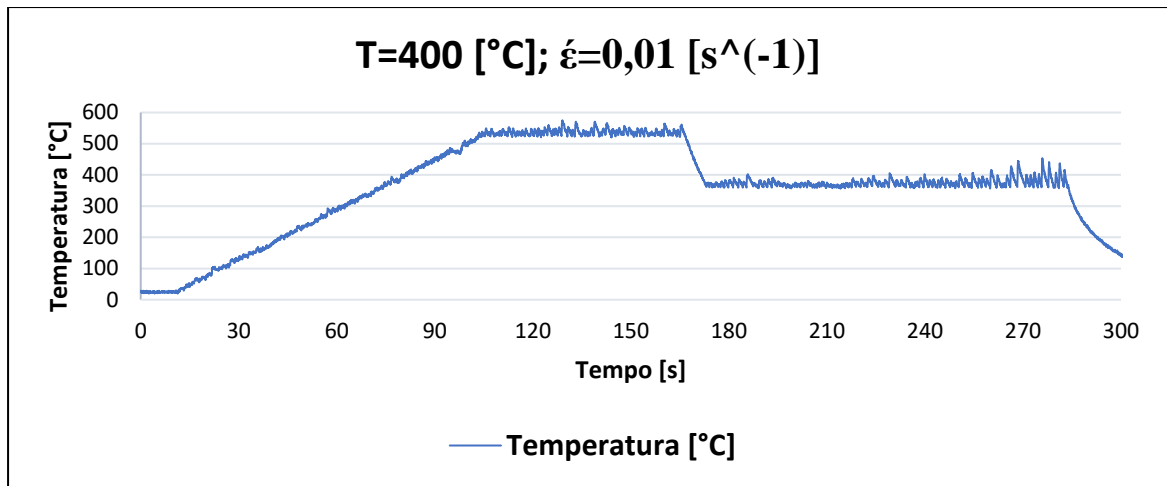


FIGURA 49 CICLO TERMICO CON PIROMETRO, PROVE A VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE 0.01 S<sup>-1</sup> A 400°C

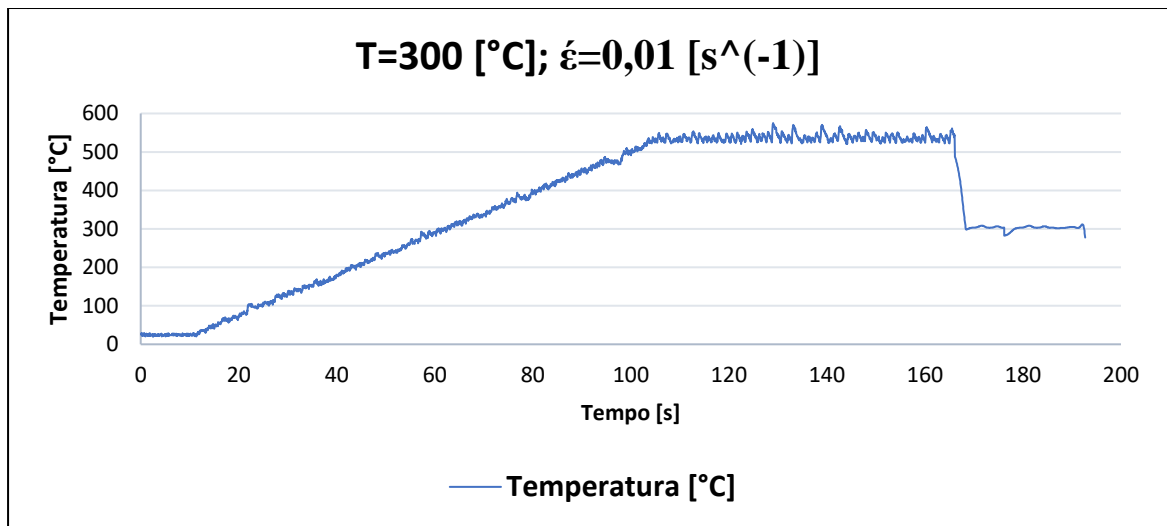


FIGURA 50 CICLO TERMICO CON PIROMETRO, PROVE A VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE 0.01 S<sup>-1</sup> A 300°C

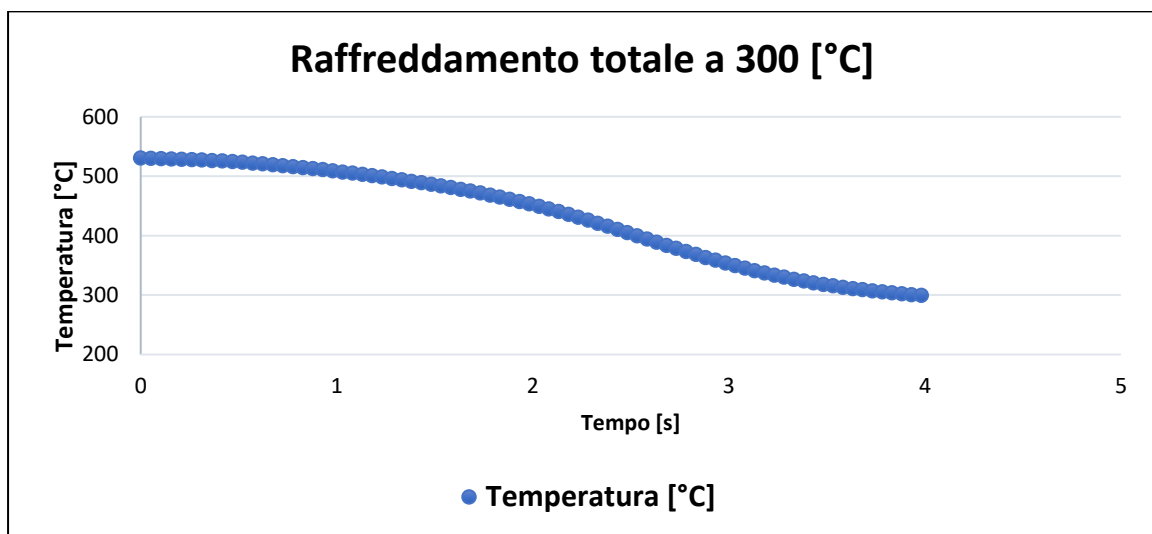


FIGURA 51 RAFFREDDAMENTO TOTALE DA 525 A 300 °C

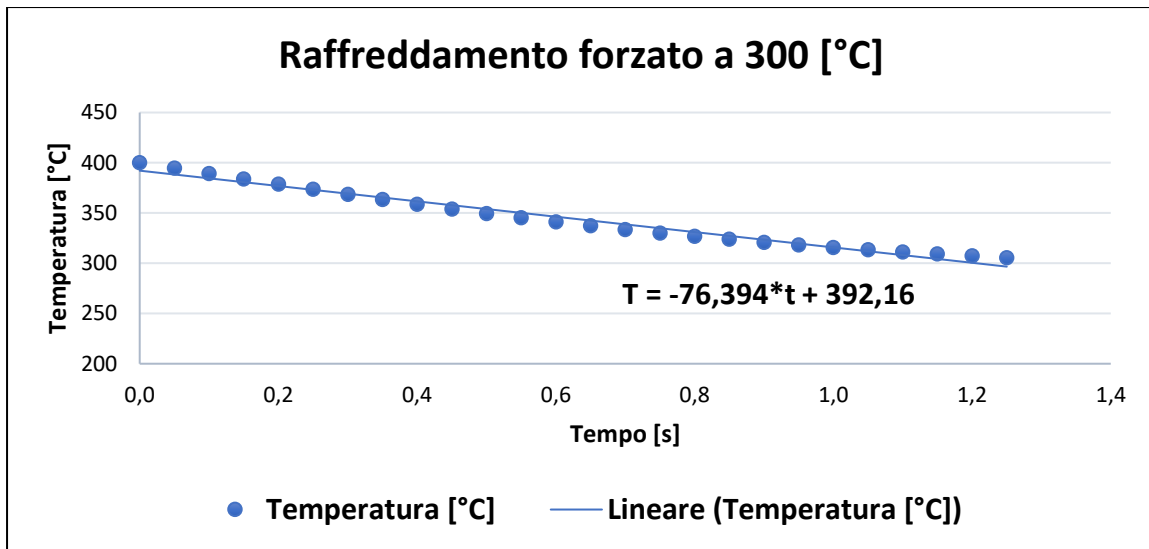


FIGURA 52 RAFFREDDAMENTO FORZATO DA 400 A 300 °C

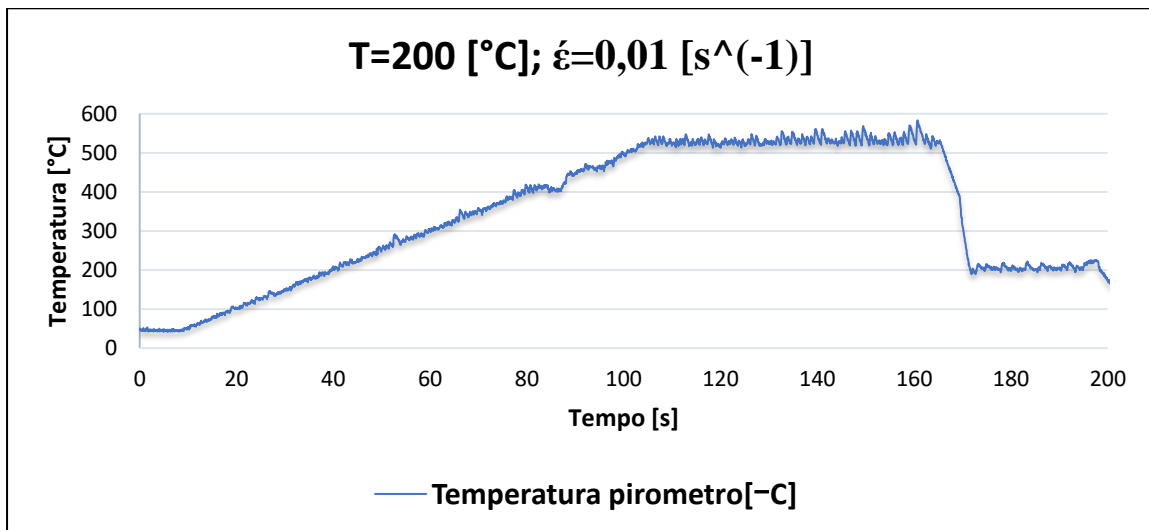


FIGURA 53 CICLO TERMICO CON PIROMETRO A VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 s<sup>-1</sup> A 200°C

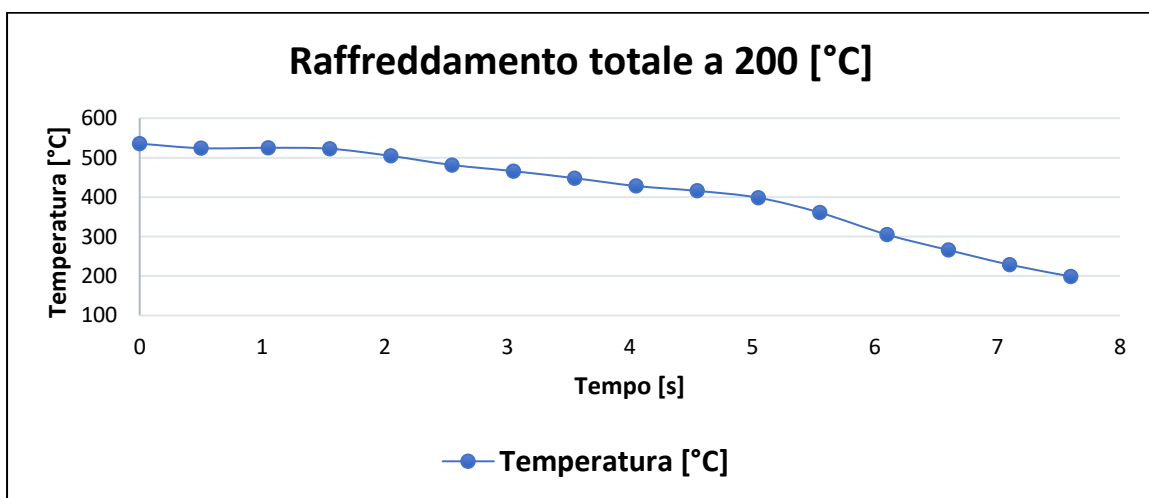


FIGURA 54 RAFFREDDAMENTO TOTALE A 200°C

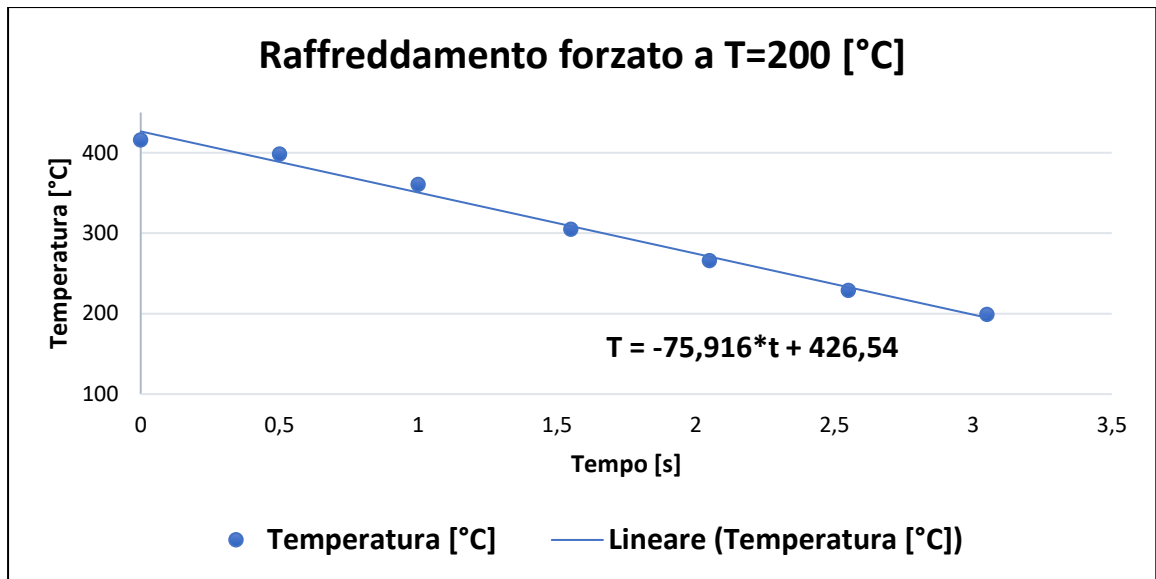


FIGURA 55 RAFFREDDAMENTO FORZATO DA 400 A 200°C

Per le prove condotte a 25 °C il raffreddamento forzato è stato adattato alla prova. A livello pratico non è stato possibile garantire le condizioni di raffreddamento fino a 25 °C poiché al di sotto di 100°C, il salto termico che il materiale subiva era fortemente ridotto e la sensibilità alla variazione di temperatura era minima. Si è scelto quindi di imporre il raffreddamento forzato fino alla temperatura di 100°C, e in seguito aspettare che il provino si sia raffreddato fino a temperatura ambiente prima di essere tirato.

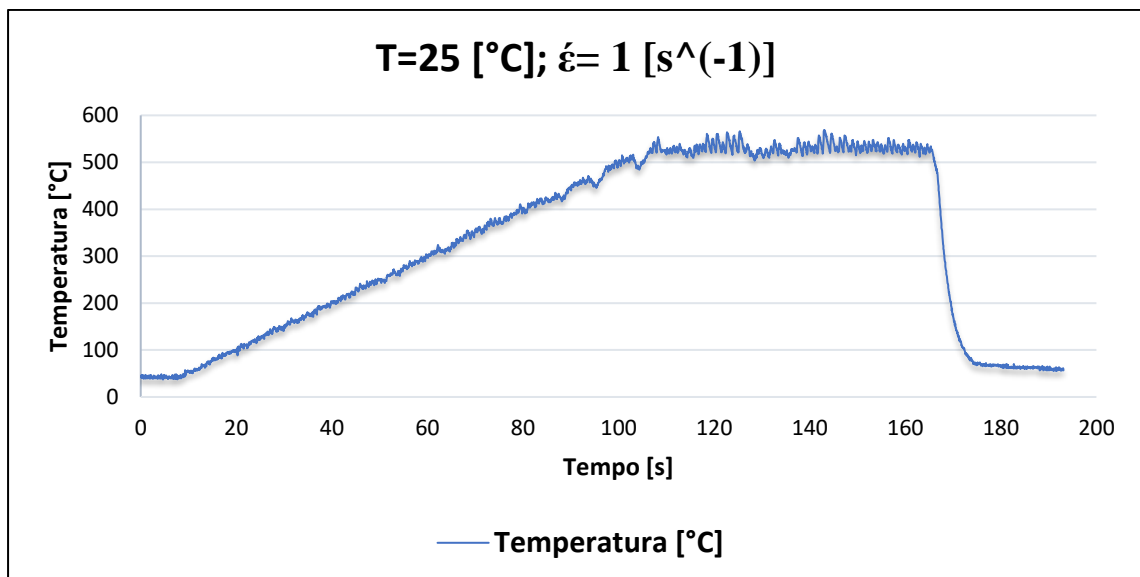


FIGURA 56 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 s<sup>-1</sup> A 25°C

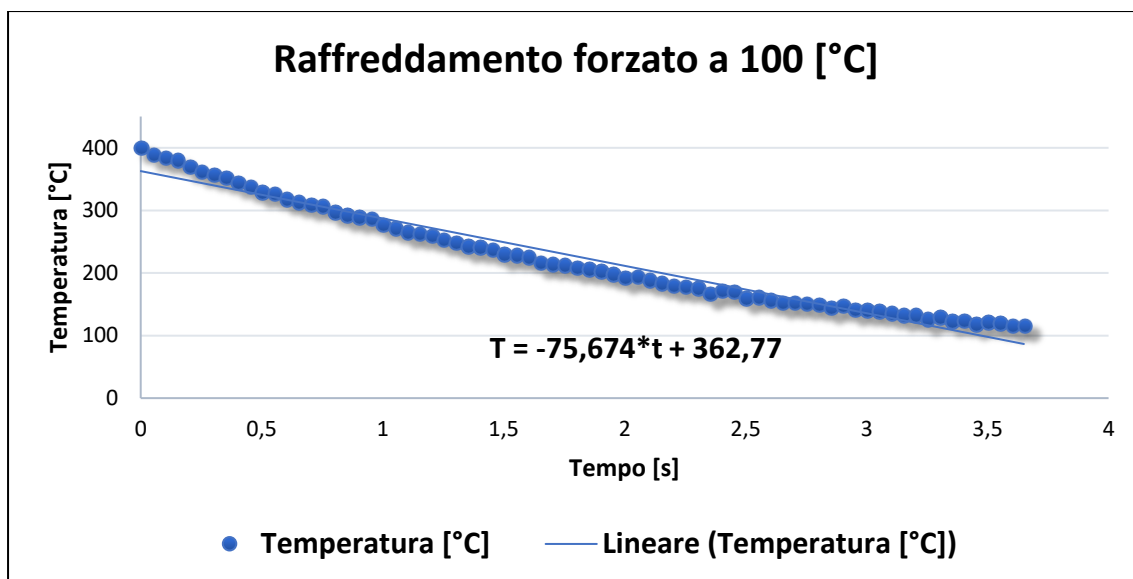


FIGURA 57 RAFFREDDAMENTO FORZATO DA 400 A 100°C

#### 4.2.4 Piano sperimentale per la lega AA6082

Per valutare la formabilità della lega di alluminio AA6082 è stata fatta una campagna di prove a trazione a diverse velocità di deformazione e a diverse temperature di prova. I campioni subiscono un ciclo termico in cui avviene la solubilizzazione della lega con successivo raffreddamento fino alla Temperature di prova. In seguito, la tabella della campagna prove. Tale schema è stato ripetuto per tutte e tre le direzioni di laminazione 0°, 45°,90°. La ripetibilità delle prove è pari a 2.

TABELLA 6 PIANO SPERIMENTALE

Strain Rate	Temperatura			
$[s^{-1}]$	$[°C]$			
$\dot{\epsilon} = 1$	25	200	300	400
$\dot{\epsilon} = 0.1$	25	200	300	400
$\dot{\epsilon} = 0.01$	25	200	300	400

#### 4.2.5 Ciclo termico per alluminio 7000

Il ciclo termico per l'alluminio 7000 prevede un riscaldamento con velocità pari a 5 °C/s fino alla temperatura di solubilizzazione di 480°C. il campione viene mantenuto a questa temperatura per 10 minuti e successivamente raffreddato fino alla temperatura di esercizio alla quale avviene la prova di trazione a caldo.

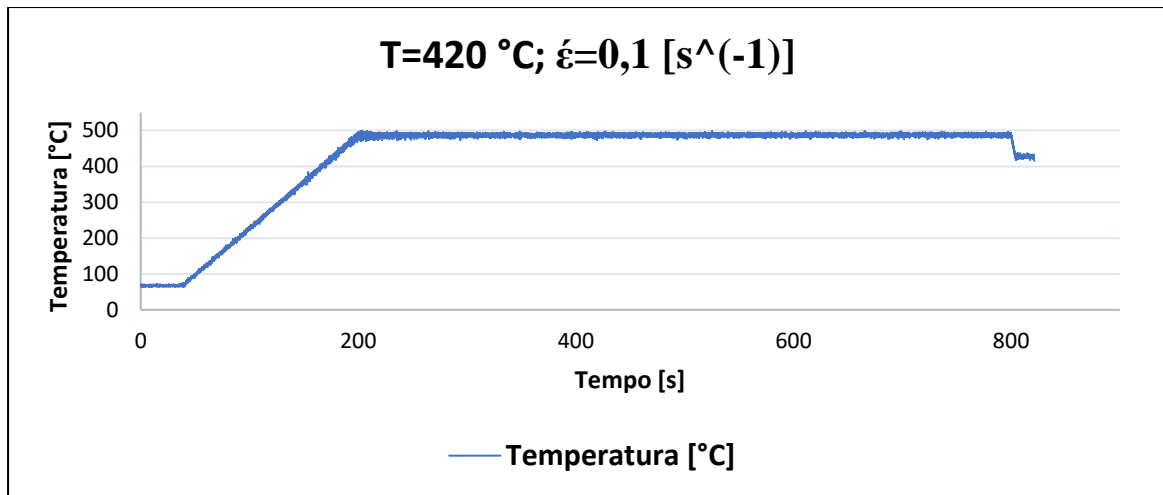


FIGURA 58 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.1 S<sup>-1</sup> A 420°C

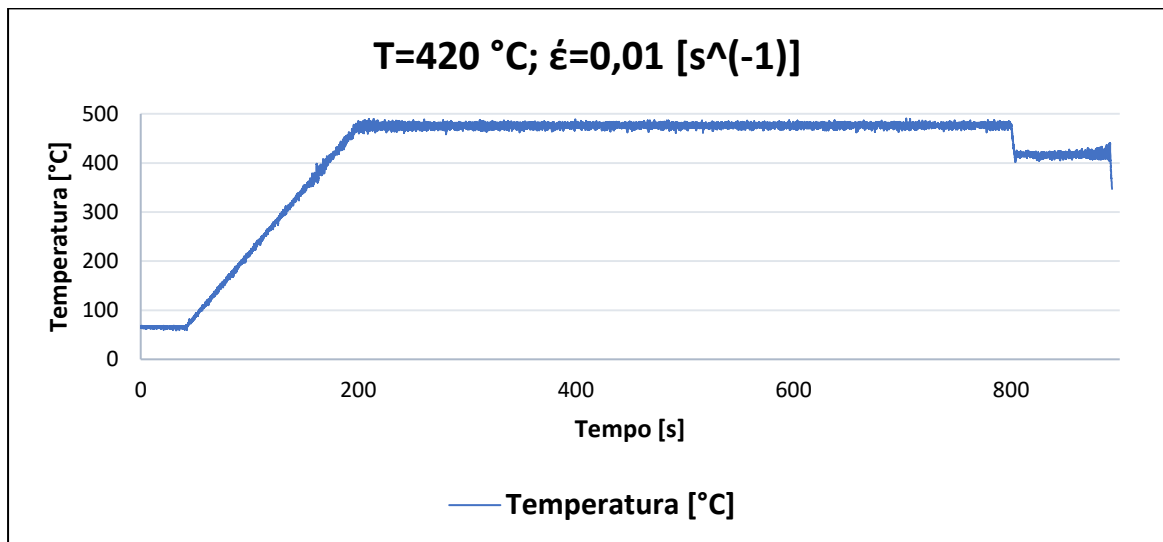


FIGURA 59 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> A 420°C

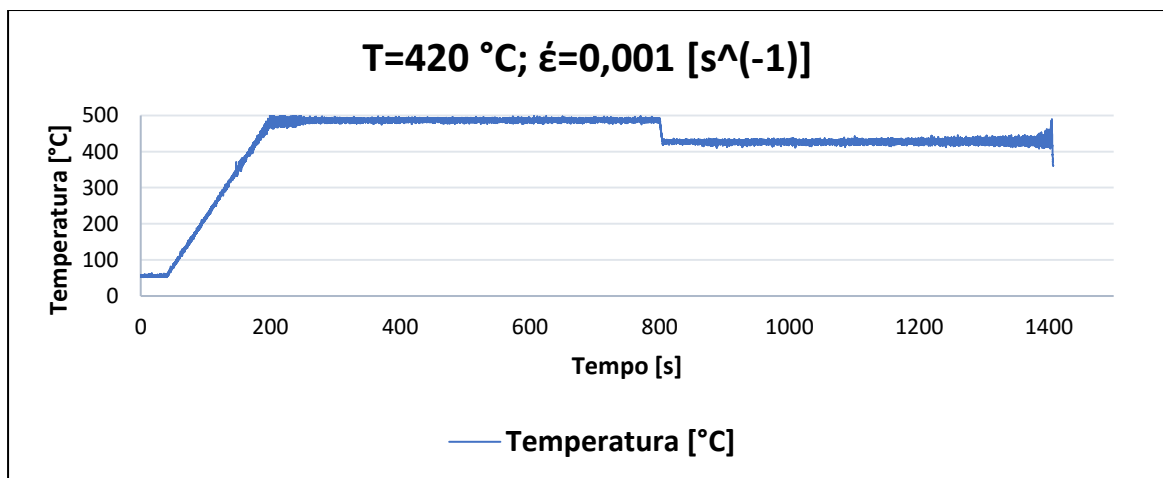


FIGURA 60 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.001 S<sup>-1</sup> A 420°C

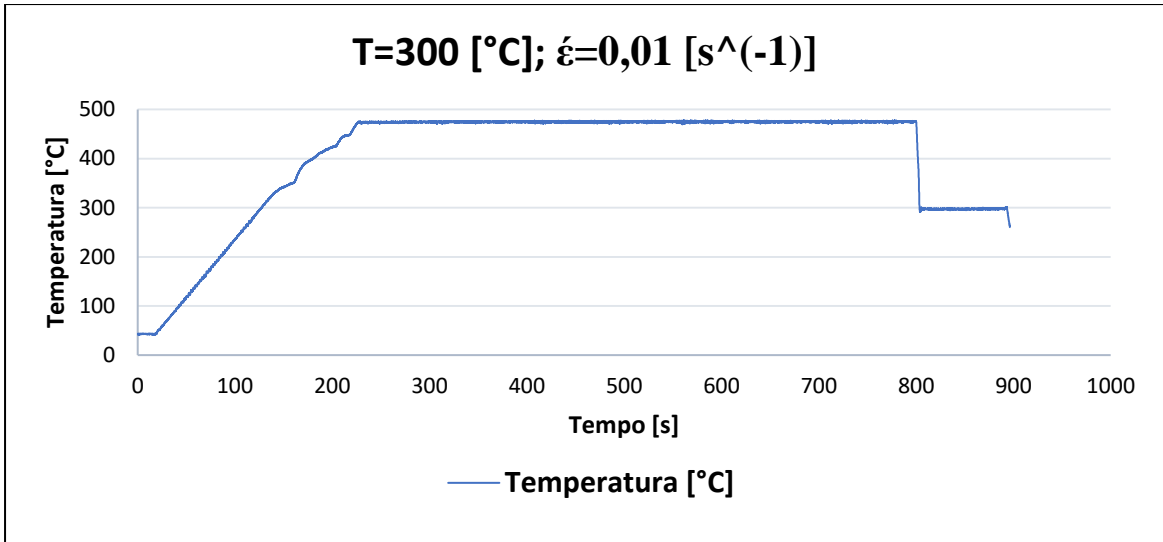


FIGURA 61 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> A 300°C

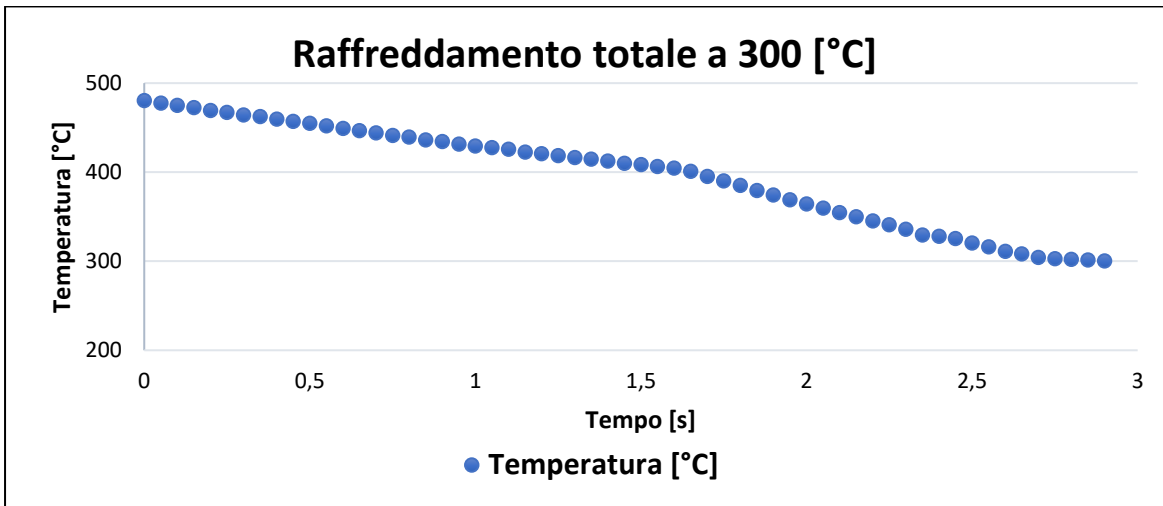


FIGURA 62 RAFFREDDAMENTO TOTALE DA 480 A 300 °C

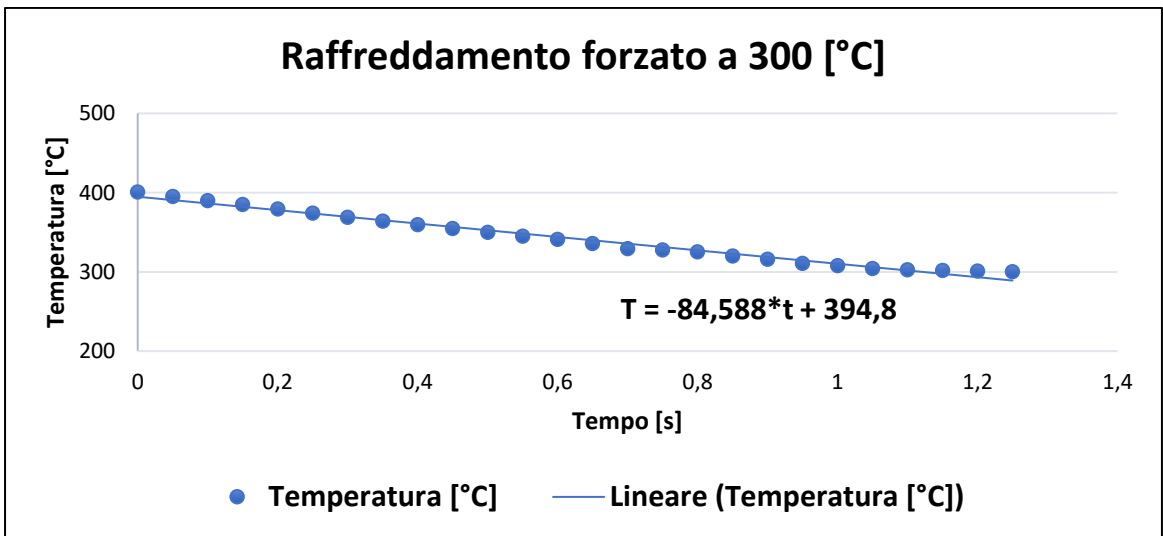


FIGURA 63 RAFFREDDAMENTO FORZATO DA 400 A 300°C

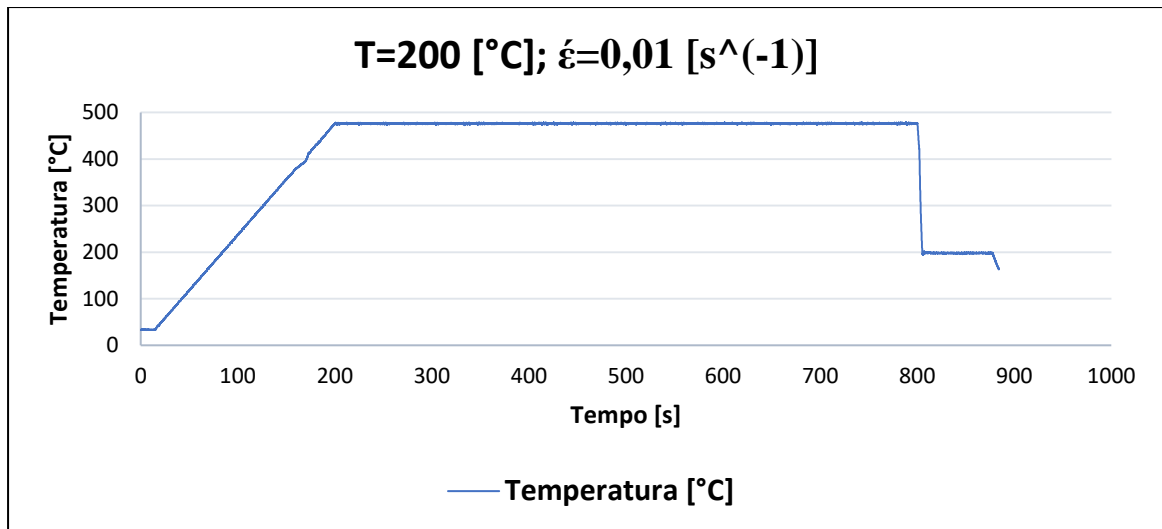


FIGURA 64 CICLO TERMICO CON PIROMETRO ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> A 200°C

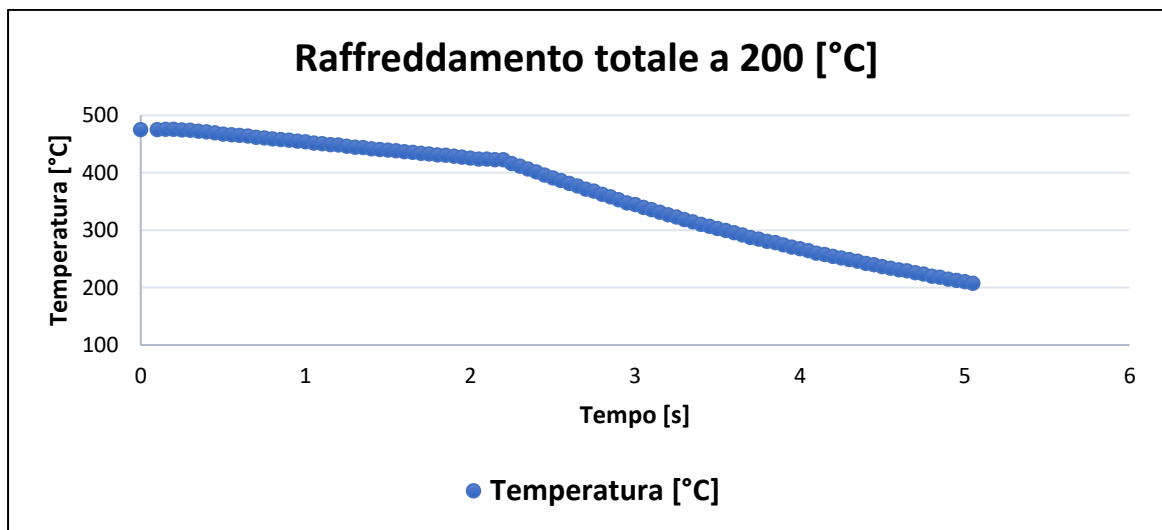


FIGURA 65 RAFFREDDAMENTO TOTALE DA 480 A 200 °C

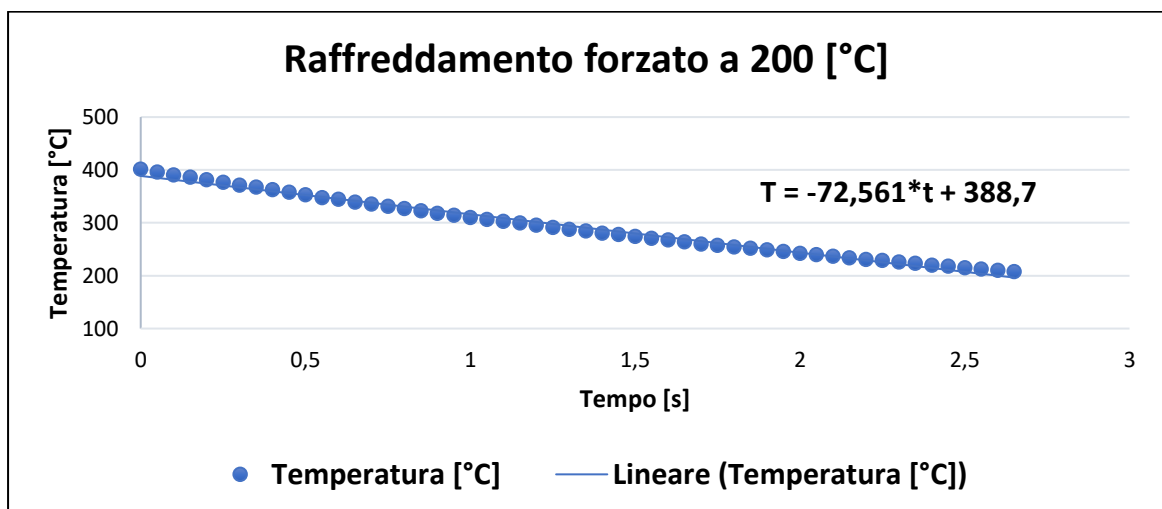


FIGURA 66 RAFFREDDAMENTO FORZATO DA 400 A 200 °C

#### 4.2.6 Piano sperimentale per la lega Al7000

Per valutare la formabilità della lega di alluminio 7000 è stata fatta una campagna di prove a trazione a diverse velocità di deformazione e a diverse temperature di prova. I campioni subiscono un ciclo termico in cui avviene la solubilizzazione della lega con successivo raffreddamento fino alla Temperature di prova. In seguito, la tabella della campagna prove. La ripetibilità delle prove è pari a 2.

TABELLA 7 PIANO SPERIMENTALE

Strain Rate	Temperatura		
$[s^{-1}]$	$[^{\circ}C]$		
$\dot{\epsilon} = 0.1$	200	300	480
$\dot{\epsilon} = 0.01$	200	300	480
$\dot{\epsilon} = 0.001$	200	300	480

### 4.3 Prove Nakazima

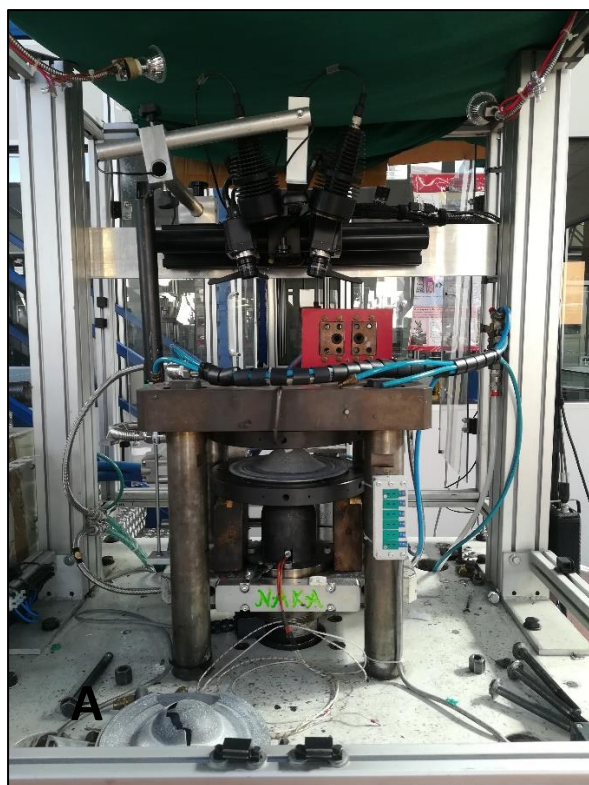
#### 4.3.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale della macchina Nakazima è formato da:

- Macchina Nakazima, dotata di stampo, premi-lamiera, punzone;
- Sistema ottico di *Aramis GOM*;
- Computer e software *LabView* per il controllo del ciclo termico;
- Computer e Software *Aramis* per l'analisi di deformazione.

La macchina Nakazima è dotata di un punzone semisferico. La lamiera che deve essere sottoposta è bloccata da un premi-lamiera che hanno la funzione di non permettere lo scorrimento del campione durante il corso della prova. Il campione viene chiuso tra lo stampo e il premi-lamiera attraverso 6 viti [2].





**FIGURA 67: A) MACCHINA NAKAZIMA; B) PUNZONE DELLA MACCHINA NAKAZIMA IMPIEGATO NELLE PROVE**

Il punzone è dotato di una cartuccia riscaldante che serve per il controllo della temperatura durante la prova. Prima che il campione sia sottoposto al ciclo termico, il punzone viene preriscaldato e poi mantenuto alla temperatura di  $350^{\circ}\text{C}$  per garantire che la deformazione del campione avvenga in condizione isoterme. La lamiera viene quindi riscaldata attraverso la testa dell'induttore, la cui forma e geometria dipende dalla geometria della lamiera utilizzata. Tale adattamento della testa dell'induttore permette di ottimizzare il riscaldamento del campione. La testa dell'induttore è realizzata in rame. Per le lamiere che hanno la larghezza di 125 mm e 210 mm si utilizza una testa circolare, mentre per le restanti larghezze si utilizzano teste di forma rettangolare, di dimensione varia. La condizione necessaria per garantire che il riscaldamento sia ottimizzato è che la larghezza della testa dell'induttore abbia dimensioni confrontabili con la larghezza della lamiera.

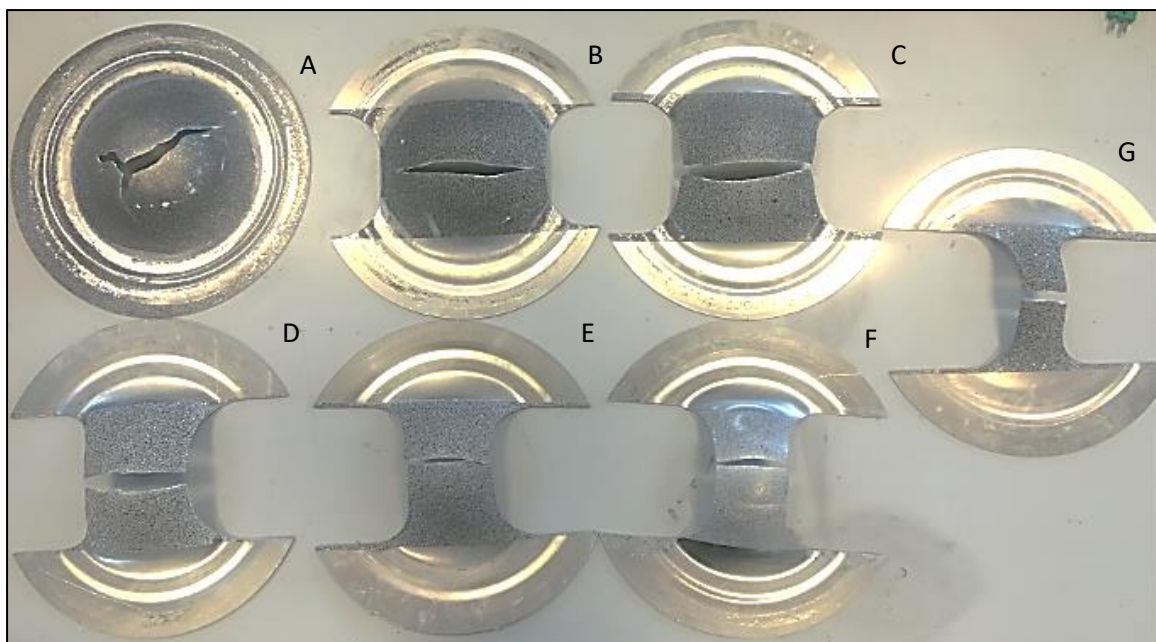


FIGURA 68 FOTO DI CAMPIONI CHE HANNO SUBITO LA PROVA NAKAZIMA: A)210 CM; B)125 CM; c)100 CM D) 75 CM E)60 CM F)50 CM G)30 CM

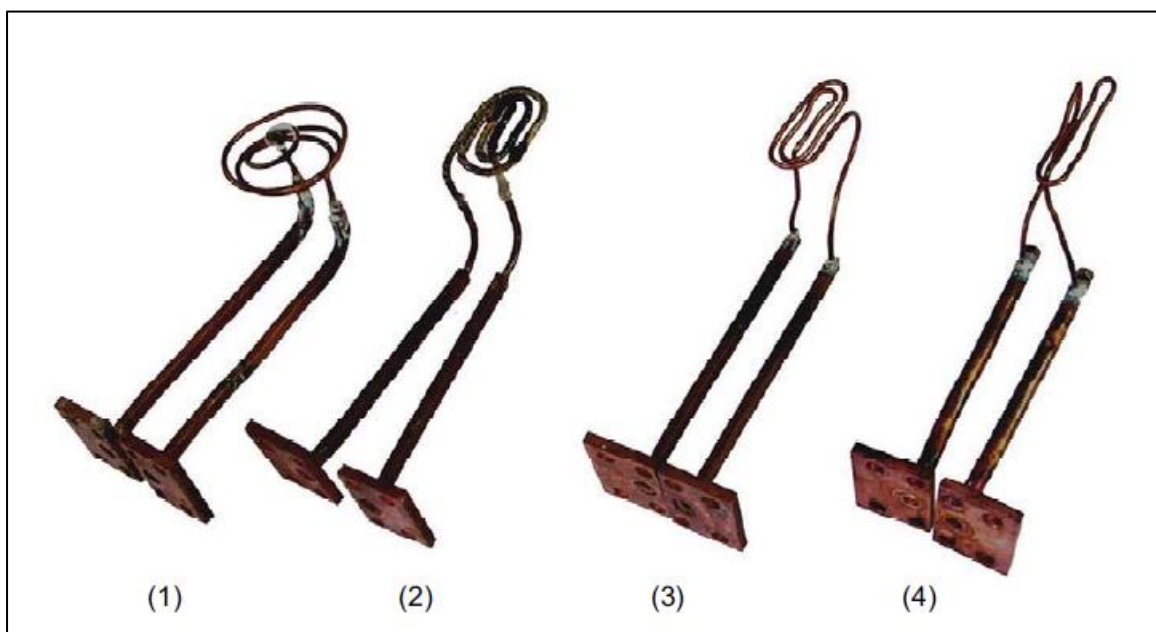


FIGURA 69 IMMAGINE RAPPRESENTATIVA DI TESTE DI INDUTTORE USATE NELLA PROVA NAKAZIMA

TABELLA 8 ASSOCIAZIONE FORMA DELLA TESTA DELL'INDUTTORE CON LA GEOMETRIA LAMIERA

Tipo induttore	1	2	3	4
Geometria	210	100	60	30
[mm]	125	75	50	

Un sistema pneumatico controlla lo spostamento della testa dell'induttore durante la deformazione e garantisce che la lamiera e la testa dell'induttore sia posti alla distanza ottimale per il riscaldamento. Prima che avvenga la deformazione della lamiera, l'induttore viene spento e rimosso durante il raffreddamento. La temperatura della lamiera viene monitorata attraverso l'applicazione di una termocoppia tipo K, attaccata al campione per mezzo di un punto di saldatura. Prima di procedere con la campagna prove, è stata condotta un ciclo termico monitorato da due termocoppie applicate in due posizioni sulla lamiera:

- In centro alla larghezza della lamiera;
- In prossimità del bordo della lamiera.

Dall'andamento della temperatura registrata dalle due termocoppie, si è osservato che la posizione ottimale della termocoppia è in prossimità del centro, poiché questa zona è quella che risente maggiormente il riscaldamento. L'impostazione del ciclo termico e il controllo del sistema pneumatico che regola lo spostamento dell'induttore è gestito da un software sviluppato in ambiente *Labview*. Il profilo di temperatura è misurato attraverso la termocoppia e viene elaborato attraverso il controllo del PID per correggere la potenza fornita dall'induttore per garantire il ciclo termico imposto per il test.

Quando avviene la deformazione il punzone strappa anche la termocoppia applicata al campione; di conseguenza non è possibile avere una misura diretta della temperatura della lamiera durante la deformazione.

La deformazione della lamiera viene acquisita dal sistema ottico *di Aramis GOM* presente sulla parte superiore della macchina *Nakazima*. Il sistema ottico è dotato di due fotocamere equipaggiate da una propria luce per realizzare i fotogrammi. Le fotocamere sono dotate di filtri che permettono di ridurre i riflessi della luce sulla lamiera. Se i riflessi non sono ridotti al minimo, causano alterazioni ai risultati di *Aramis*, rendendoli invalidi. Entrambe le fotocamere forniscono fotogrammi, che permettono di analizzare la deformazione della lamiera a livello tridimensionale.

Le lamiere prima di essere inserite nella macchina, sono verniciate con dello spray nero e bianco, resistente ad alte temperature, per poter realizzare il pattern stocastico necessario all'analisi con il software *Aramis*.

#### **4.3.2 Ottimizzazione del riscaldamento**

Lamiere di diversa geometria sono necessarie per descrivere tutte le possibili deformazioni di una lamiera e quindi ottenere una completa curva di formabilità del materiale. Nella figura () sono riportati i diversi campioni, con il pattern stocastico nella zona d'interesse alla deformazione. L'efficienza del riscaldamento dipende da tre fattori:

- Forma e geometria della testa dell'induttore, che deve garantire un profilo di temperatura omogeneo su tutta la superficie;
- La distanza tra la testa dell'induttore e il campione. L'effetto del riscaldamento è inversamente proporzionale al quadrato della distanza identificata.
- I coefficienti del PID che controllano il sistema di potenza fornita dall'induttore.

### **4.3.3 Ciclo termico**

Solo la lega di alluminio AA6082 è stata utilizzata per le prove Nakazima. Il ciclo termico utilizzato è simile a quello impostato per le prove di trazione. Il campione subisce una solubilizzazione per un minuto a 525°C e successivamente viene raffreddato fino a 350°C, temperatura alla quale avviene la prova Nakazima. Il raffreddamento avviene in aria, senza alcuna condizione forzata. Nel caso delle prove Nakazima non si è considerato di eseguire le prove con l'ausilio di aria forzata da 400°C a 350°C poiché si è osservato che il getto d'aria impiegato era poco influente sul raffreddamento del campione. Il grafico (70) rappresenta il confronto tra un raffreddamento in aria semplice e un raffreddamento in aria forzata. Sebbene il gradiente termico della condizione forzata sia 4 volte quello della condizione in aria ferma, il tempo di raffreddamento risulta essere poco sensibile alla variazione di condizione dell'aria. Per l'aria forzata il tempo necessario per compiere il salto termico di 50 °C è di 0.75 s, mentre per quello ottenuto in condizioni di aria ferma è pari a 3 s. si ha quindi che la differenza tra le due condizioni è di circa 2 s. Poiché tale differenza è un valore relativamente piccolo, si è preferito considerare solo il raffreddamento in aria ferma per tutte le prove.

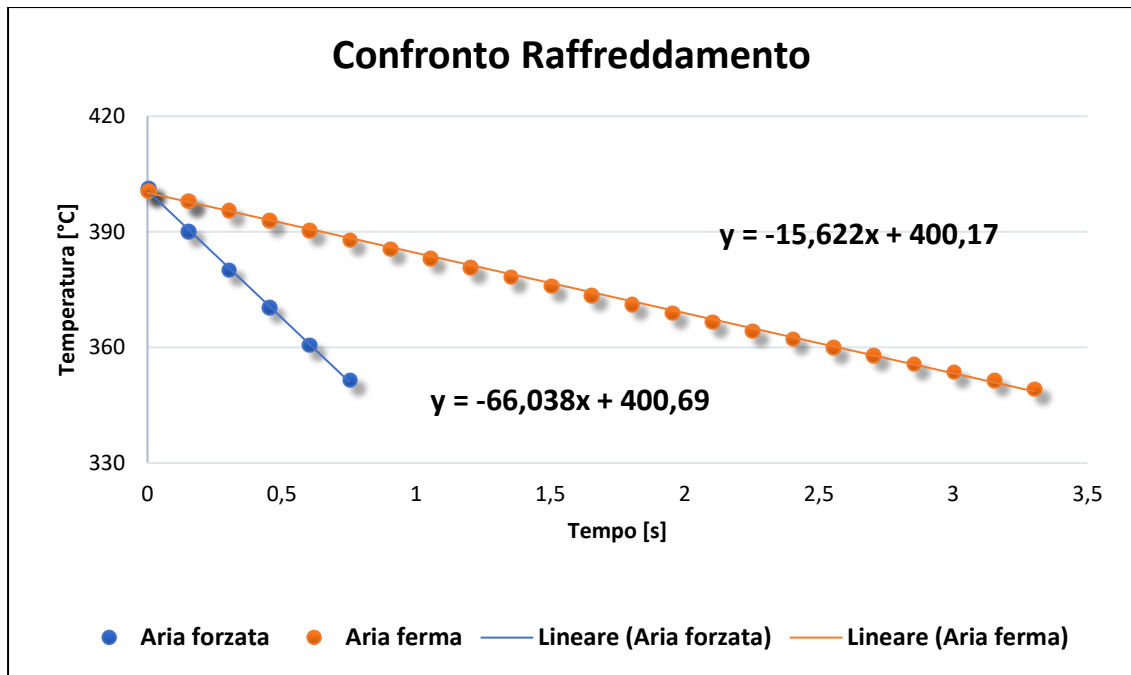


FIGURA 70 CONFRONTO TRA I RAFFREDDAMENTO FORZATO E CALMO

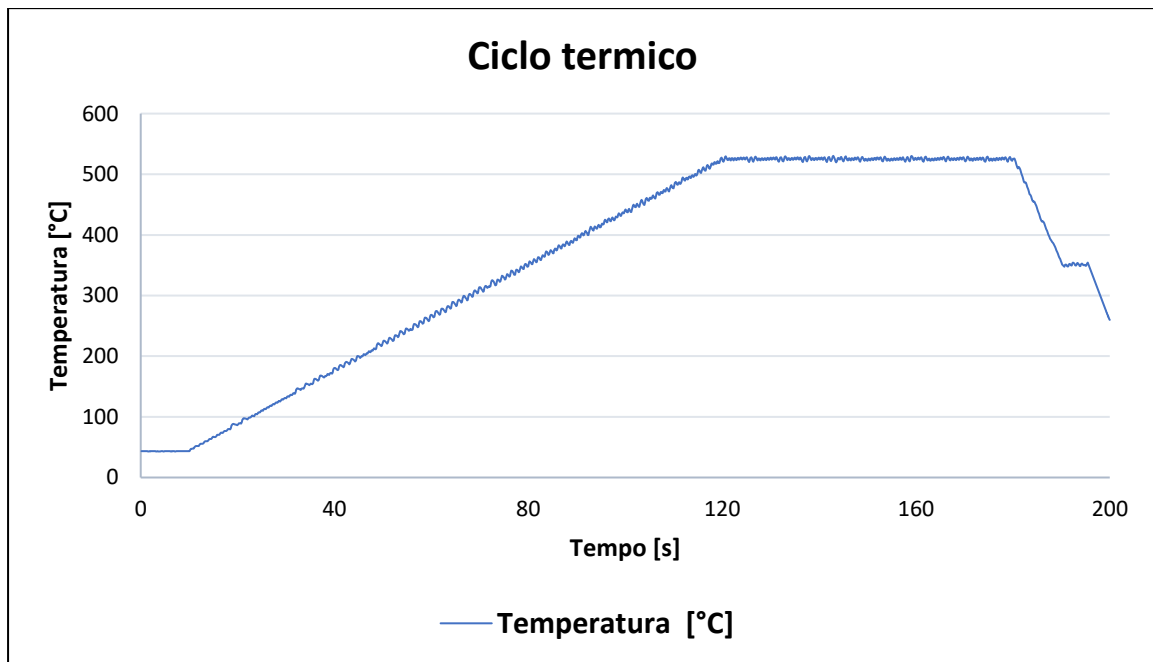


FIGURA 71 CICLO TERMICO CON TERMOCOPPIA DELLA PROVA NAKAZIMA

#### 4.3.4 Piano sperimentale

per descrivere la curva di formabilità sono state condotte le prove Nakazima con le diverse geometria. Ogni condizione di prova ha ripetibilità pari a 2. La velocità del punzone adottata in tutte le prove è di 1 mm/s.

## 4.4 Analisi frattografica

L'analisi frattografica è stata eseguita tramite la microscopia elettronica a scansione (SEM).

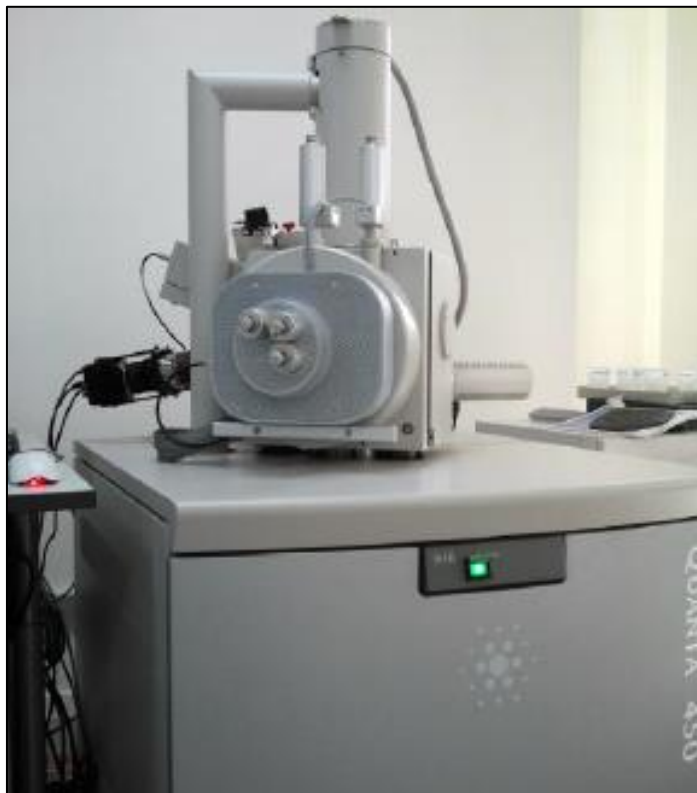


FIGURA 72 68 SEM QUANTA 450 LABORATORIO TE.SI DI ROVIGO

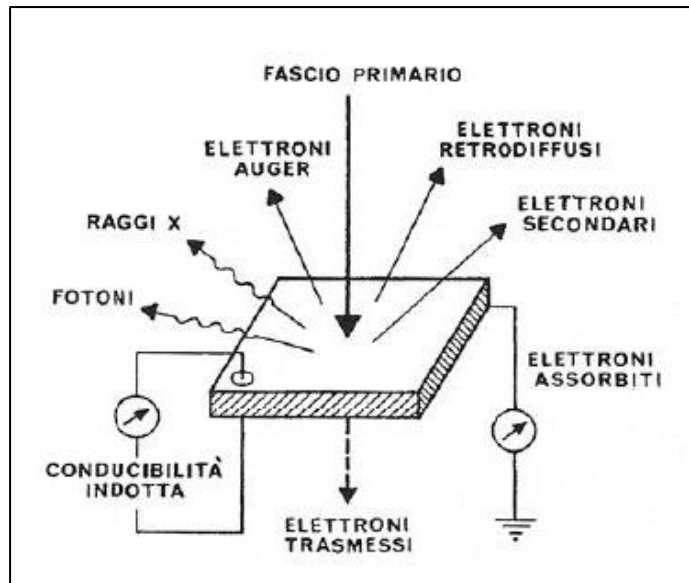
Tale tecnica permette di ottenere, da un opportuno campione, immagini tridimensionali ad alta risoluzione ( $\sim 5 \text{ nm}$ ) mediante scansione di un fascio di elettroni in una piccola area del campione in esame. Tutti gli effetti che si producono nel punto di impatto del fascio possono essere utilizzati, tramite appositi rivelatori, per produrre un contrasto e ottenere quindi l'immagine. Inoltre, l'analisi dei raggi X permette di effettuare analisi della composizione ad alta risoluzione spaziale (microanalisi). Il campione da esaminare deve essere conduttore. Nel caso in cui il campione non lo sia è possibile depositare un sottile film di oro in modo da rendere possibile la visione.

Questa strumentazione permette di caratterizzare le superfici e quindi di ottenere ad altissima risoluzione non solo la topografia 2D- 3D, ma anche la morfologia delle superfici e mediante la colonna per microanalisi è possibile compiere la valutazione quali - quantitativa della composizione della composizione elementare dalle regioni superficiali fino alle più interne su rivestimenti protettivi anticorrosione e antiusura, multistrato di materiali semiconduttori (connettori di celle fotovoltaiche, semiconduttori ad alto gap),

conduttori ionici ceramici per batterie ad alta temperatura, materiali termoelettrici, sensori chimici e fisici. Le analisi condotte in situ durante il riscaldamento dal campione permettono inoltre di verificare eventuali variazioni di morfologia e microstruttura in funzione della temperatura, analisi non possibile con il profilometro, previsto per lavorare a temperatura ambiente. Di fondamentale importanza è la caratterizzazione composizionale dei materiali mediante un sistema di microanalisi in dispersione di energia che permette l'analisi elementare qualitativa e quantitativa dei materiali, oltre alla mappatura elementare per l'analisi della distribuzione degli elementi in un materiale. Si tratta di una tecnica molto generale che trova applicazione in campo biologico sia che nella scienza dei materiali ogni qualvolta si renda necessario visualizzare strutture a forte ingrandimento (da 10X a 500.000 X). Particolarmente importante, soprattutto nel campo della scienza dei materiali, è la possibilità di effettuare un'analisi composizionale con risoluzione spaziale dell'ordine del  $\mu m$ .

#### **4.4.1 Principio di funzionamento**

La sorgente di emissione termoionica è costituita da un filamento di tungsteno di geometria a V con un raggio di curvatura di 100  $\mu m$  che viene riscaldato ad una temperatura di 2700-3000 K. Le alte temperature raggiunte dal filamento forniscono agli elettroni una energia sufficiente a superare l'energia di estrazione del materiale (emissione termoionica). Gli elettroni vengono dunque attratti verso l'anodo polarizzato con tensioni elevate, formato da un nucleo cilindrico di ferro dolce contenente un avvolgimento di spire di ferro, che si comporta come una lente elettrostatica formando un'immagine. All'anodo, il fascio viene condensato da lenti collimatrici e focalizzato attraverso obiettivi sul campione massivo, cioè di spessore sufficiente da non essere completamente attraversato dagli elettroni incidenti. Il fascio elettronico colpisce il campione, producendo raggi X, elettroni Auger, elettroni assorbiti, elettroni secondari, retro diffusi [3].



**FIGURA 693** INTERAZIONE DI UN FASCIO DI ELETTRONI CON UN SOLIDO E CONSEGUENTI EMISSIONI [4]

La figura mostra dunque quali sono tali emissioni [4], ovvero:

- Elettroni retrodiffusi: quando parte degli elettroni incidenti viene riflessa, subisce delle deviazioni a causa degli urti elastici con il campo coulombiano degli atomi del campione, ma mantiene la stessa energia del fascio iniziale: il segnale arriva più intenso all'aumentare del numero atomico  $Z$ . L'emissione proviene da circa  $0,1-1 \mu\text{m}$  di profondità dalla superficie e fornisce informazioni principalmente di composizione, oltre che morfologiche.
- Elettroni secondari: quando gli elettroni del fascio primario non riflessi perdono la loro energia trasferendola agli elettroni del solido, parte di questi ultimi sfuggerà verso l'esterno. L'emissione proviene da  $1-10 \text{ nm}$  e fornisce esclusivamente informazioni morfologiche.
- Elettroni Auger: quando gli elettroni incidenti hanno energia sufficiente per ionizzare i livelli energetici più interni degli atomi del materiale, questi possono emettere un elettrone.
- Elettroni trasmessi: è possibile solo se il campione è molto sottile, per rilevarli si utilizza il microscopio elettronico a trasmissione (TEM).
- Raggi X: un elettrone del fascio primario può interagire con la struttura atomica del campione ionizzandola e scalzando un elettrone dagli orbitali più interni, la struttura così eccitata si rilassa tornando al suo stato fondamentale tramite l'emissione di un fotone X; il segnale proviene da profondità molto elevate ( $1-10 \mu\text{m}$ ) e fornisce informazioni riguardanti la composizione del campione.



L'insieme dei possibili percorsi degli elettroni nel mezzo definisce il volume d'interazione che a parità di energia è inversamente proporzionale a  $Z$  e va a definire la risoluzione spaziale. questi elettroni sono raccolti da un detector per elettroni secondari ed uno per elettroni retro diffusi, convertiti in segnali elettrici e amplificati. questi vengono convertiti in pixel e elaborati da un sistema dotato di computer. I raggi X vengono raccolti da un rivelatore Si(Li).

In questo studio, l'analisi frattografica, sfrutta l'emissione di elettroni secondari (SE). Questi elettroni vengono rilevati da uno speciale rivelatore e convertiti in impulsi elettrici. Il fascio non è fisso, ma viene fatto scandire: viene cioè fatto passare sul campione in una zona rettangolare, riga per riga, in sequenza. Il segnale degli elettroni secondari viene mandato ad uno schermo dove viene eseguita una scansione analogica. Il risultato è un'immagine in bianco e nero che ha caratteristiche simili a quelle di una normale immagine fotografica. Per questa ragione le immagini SEM sono immediatamente intelligibili ed intuitive da comprendere [5].



# Capitolo 5

## Analisi dei risultati

### 5.1 Analisi e interpretazione dei risultati di lega AA6082

In questo capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalla rielaborazione dei dati sperimentali delle curve sforzo-deformazione reali e dell'anisotropia per i due materiali analizzati.

#### 5.1.1 Risultati delle curve di Forza Corsa.

In questo paragrafo si riportano i grafici relativi alla curva di Forza corsa del pistone della macchina di trazione alle diverse temperature e velocità di deformazione. Le curve descritte sono in riferimento alla direzione di laminazione  $0^\circ$ . Il grafico descritto a  $400^\circ\text{C}$  dimostra sensibilità alla velocità di deformazione. Si osserva che il valore massimo di forza applicato è 1200 N una velocità di deformazione di  $1 \text{ s}^{-1}$ , mentre la corsa massima supera i 15 mm per una velocità di deformazione di  $0.01 \text{ s}^{-1}$ . I grafici che descrivono l'andamento Forza- Corsa a  $300^\circ\text{C}$  e a  $200^\circ\text{C}$  mostrano invece meno sensibilità alla velocità di deformazione se si considera come riferimento la Forza. In riferimento alla corsa, si osserva invece che è ancora presente la sensibilità alla velocità di deformazione.

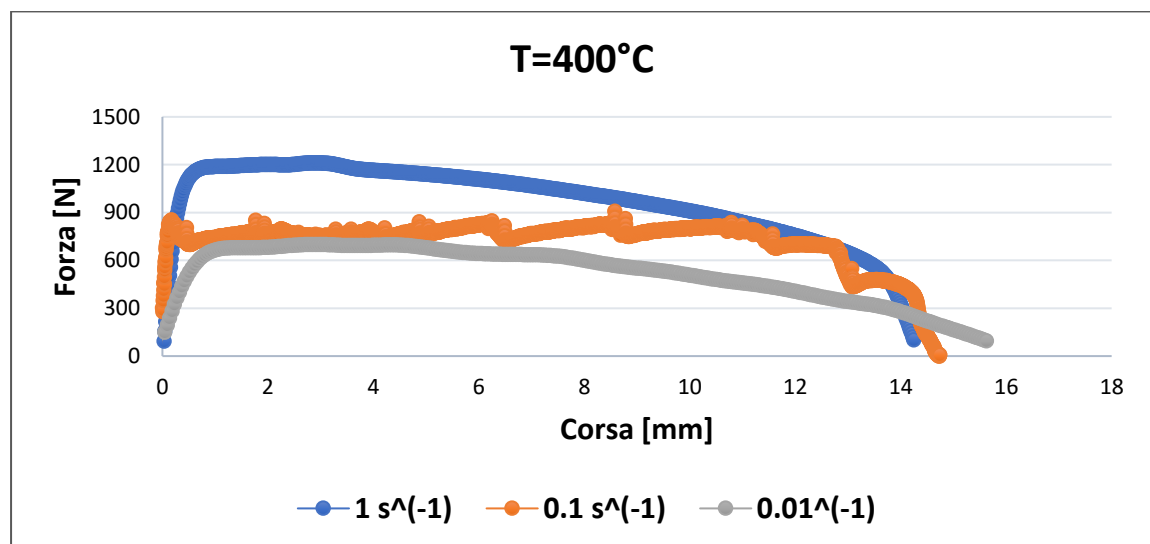


FIGURA 74: CURVE DI FORZA CORSA DELLA MACCHINA MTS A  $400^\circ\text{C}$  IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

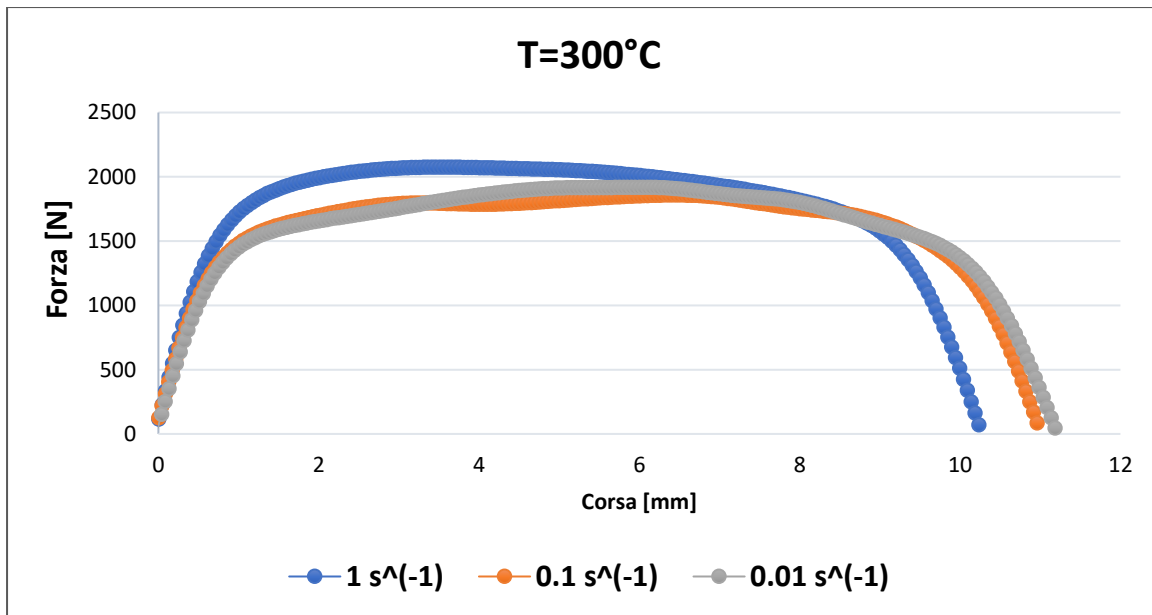


FIGURA 75 : CURVE DI FORZA CORSA DELLA MACCHINA MTS A 300°C IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

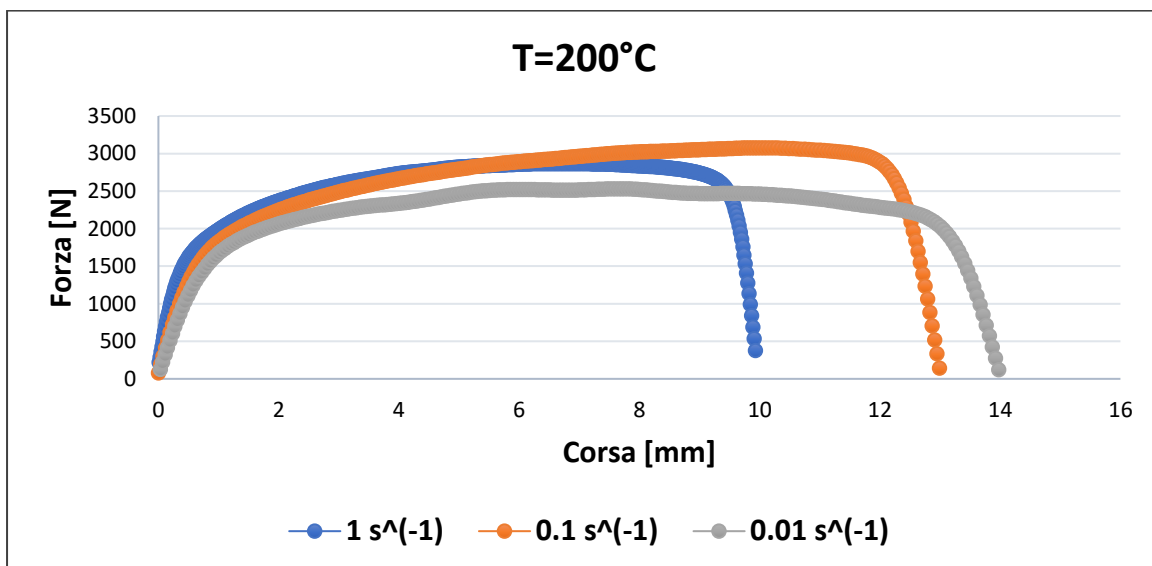


FIGURA 76 : CURVE DI FORZA CORSA DELLA MACCHINA MTS A 200°C IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

### 5.1.2 Risultati delle curve di sforzo e deformazione reali da Aramis

In seguito, sono riportati i grafici che descrivono la curva di sforzo-deformazione ottenuta dalle prove di trazione a caldo alla temperatura di 400, 300, 200, 25 °C. I grafici descrivono l'influenza della direzione di laminazione sulle curve di sforzo-deformazione e l'influenza della velocità di deformazione. La velocità di deformazione è impostata a 1, 0.1, 0.01 s<sup>-1</sup>.

## 5.2 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 400°C.

### 5.2.1 Valutazione dell'effetto della direzione di laminazione a velocità di deformazione imposta

L'andamento delle curve di sforzo-deformazione cambia con la riduzione della velocità di deformazione. L'influenza della direzione di laminazione è visibile ad ogni velocità di deformazione imposta, in particolare, per le prove a velocità di deformazione di  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (-1) l'effetto è molto visibile.

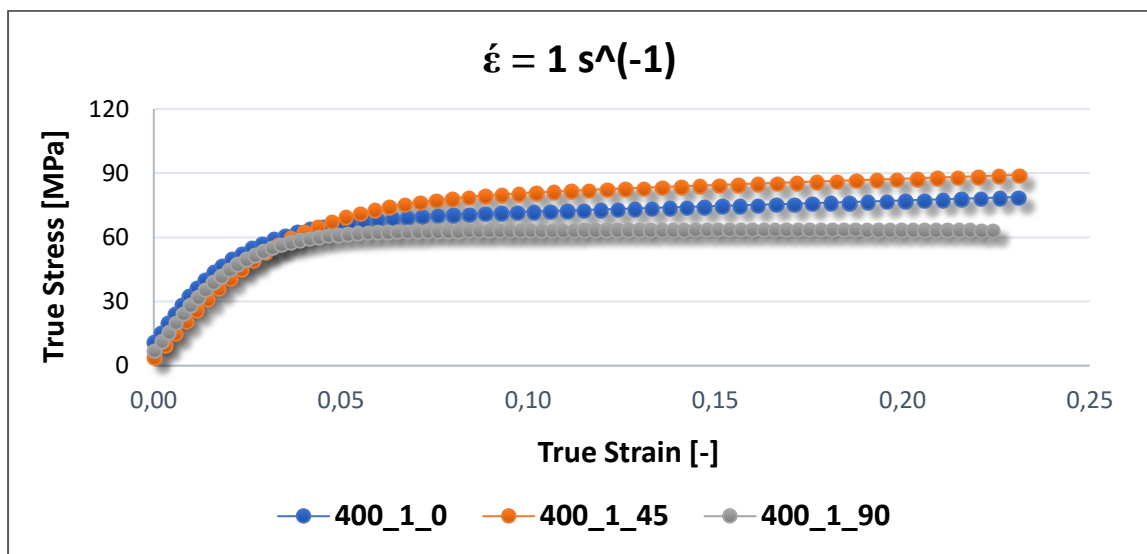


FIGURA 707: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C A  $1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE

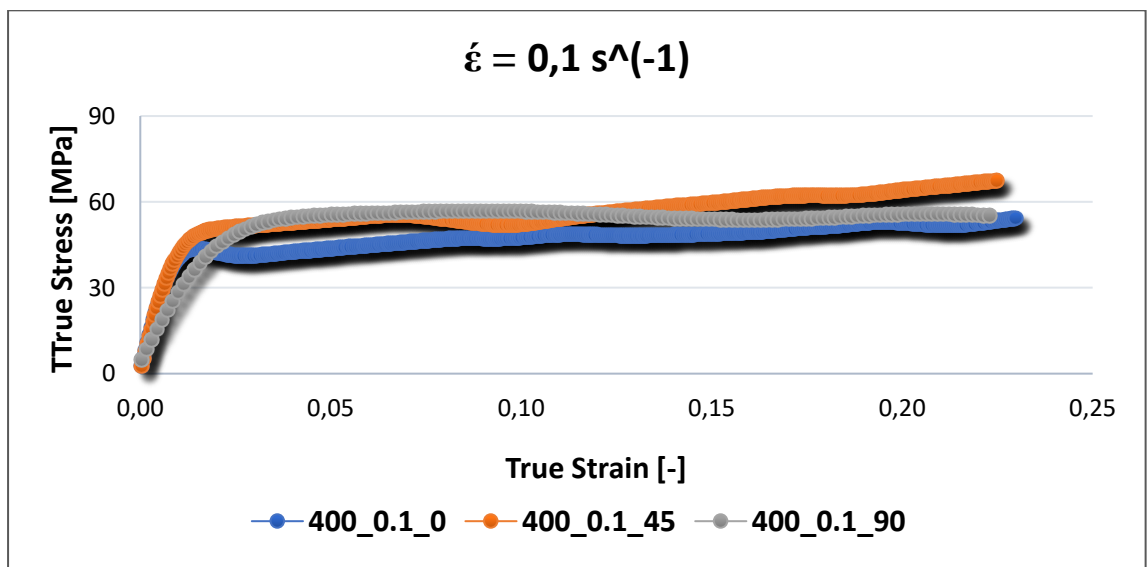


FIGURA 78 : CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C A  $0.1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE

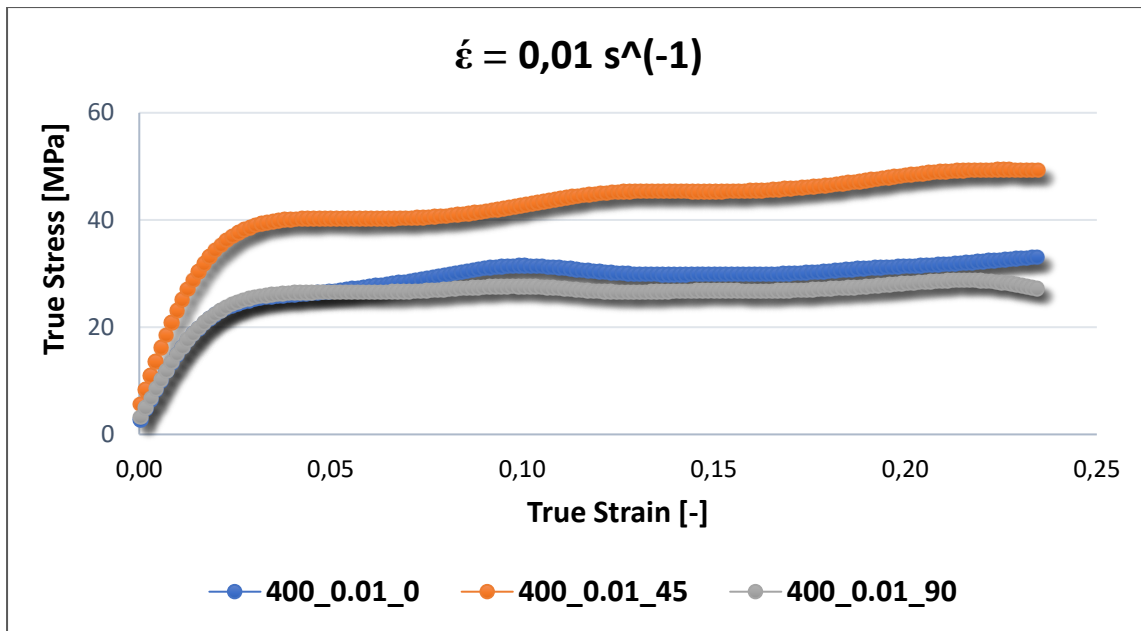


FIGURA 79 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C A 0.01 S<sup>-1</sup> IN FUNZIONE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE

**5.2.2 Valutazione dell'effetto della velocità di deformazione a direzione di laminazione imposta.**

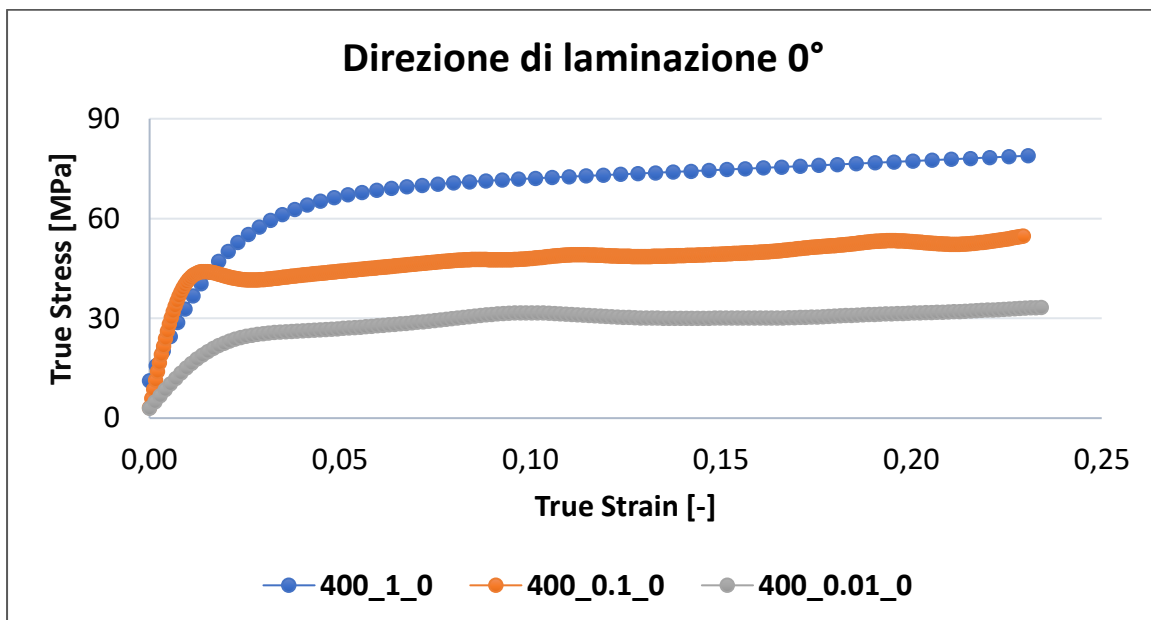


FIGURA 80 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

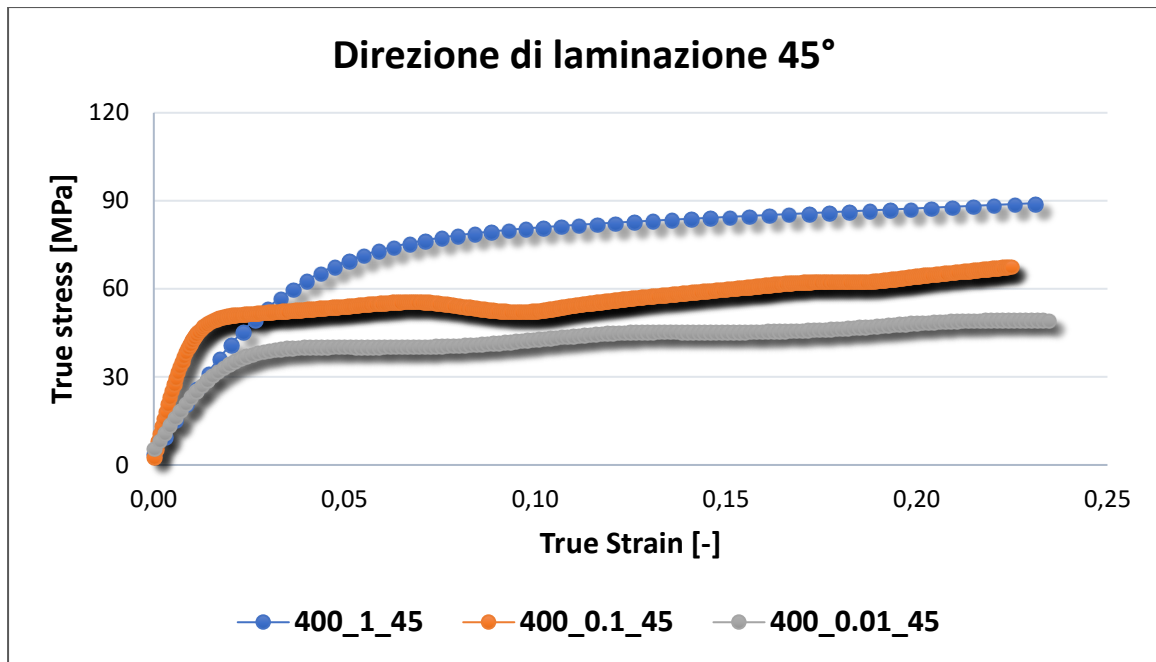


FIGURA 81: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 45° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

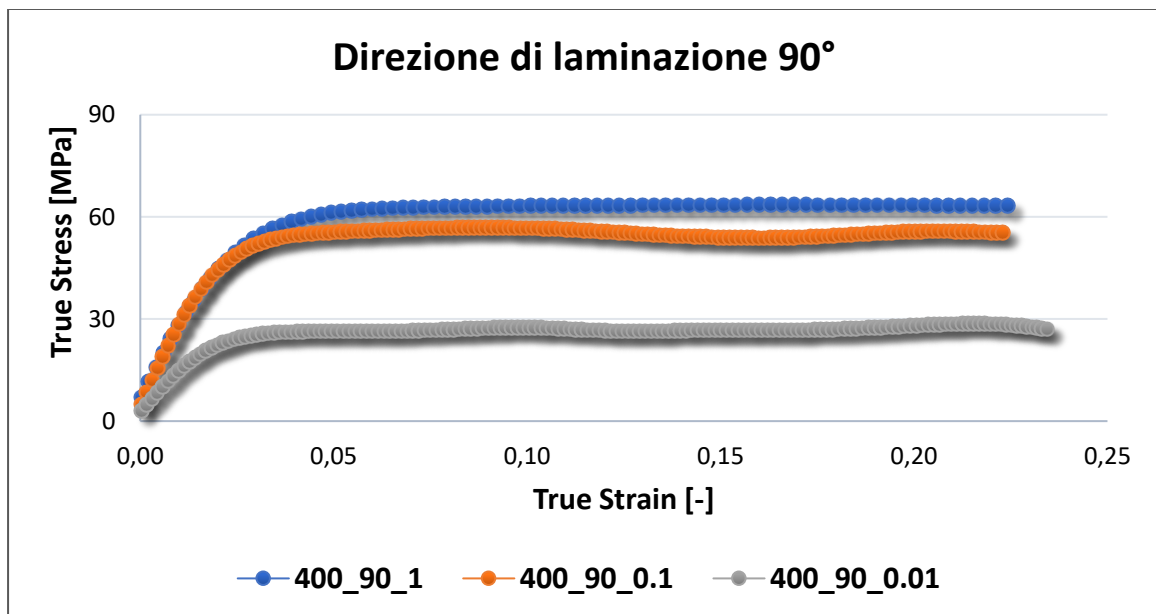


FIGURA 82: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 400°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 90° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

Per ogni direzione di laminazione l'influenza della velocità di deformazione è evidente. All'aumentare della velocità di deformazione, aumenta la tensione di flusso delle curve.

### 5.3 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 300°C.

#### 5.3.1 Valutazione dell'effetto della direzione di laminazione a velocità di deformazione imposta

Per le prove a 300°C, le curve di sforzo-deformazione risultano essere non sensibili alle diverse direzioni di laminazione per ogni velocità di deformazione imposta.

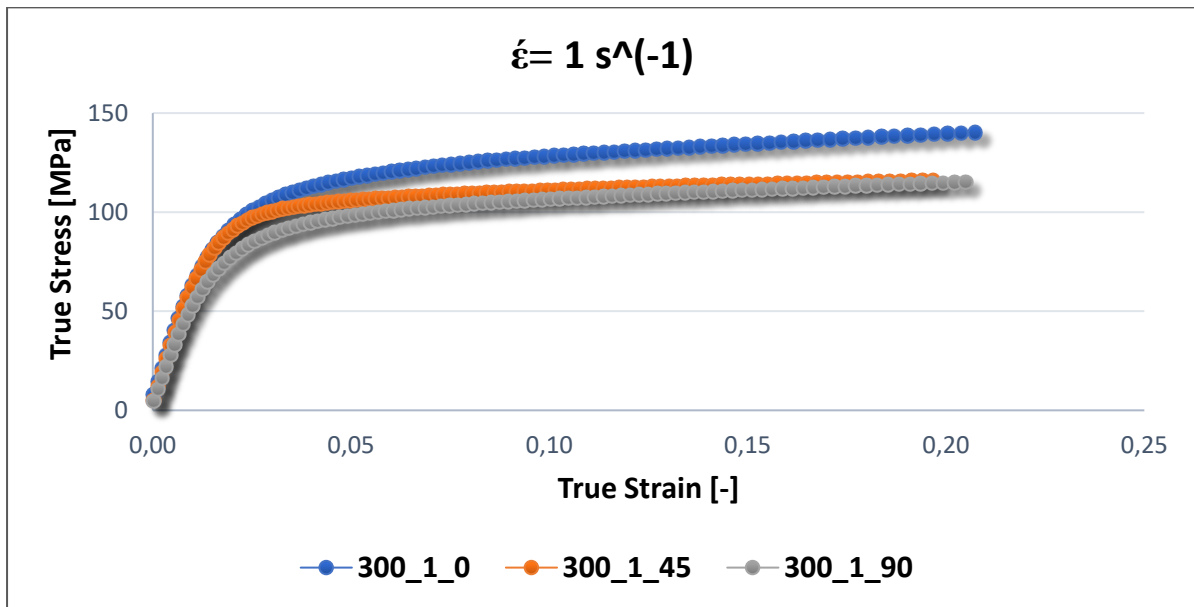


FIGURA 83 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

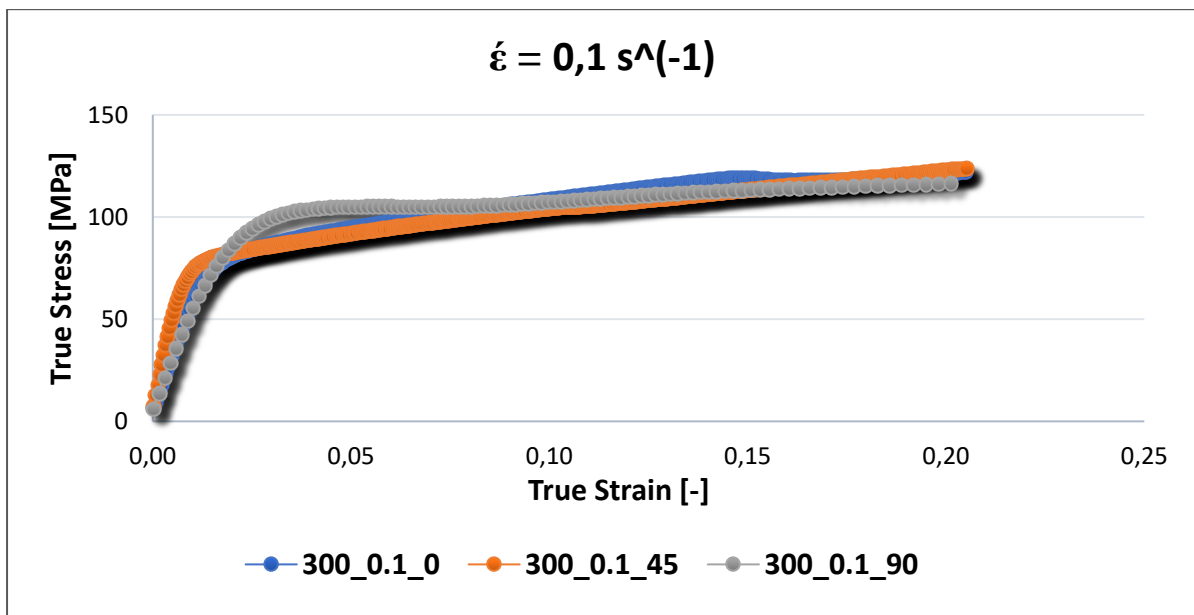
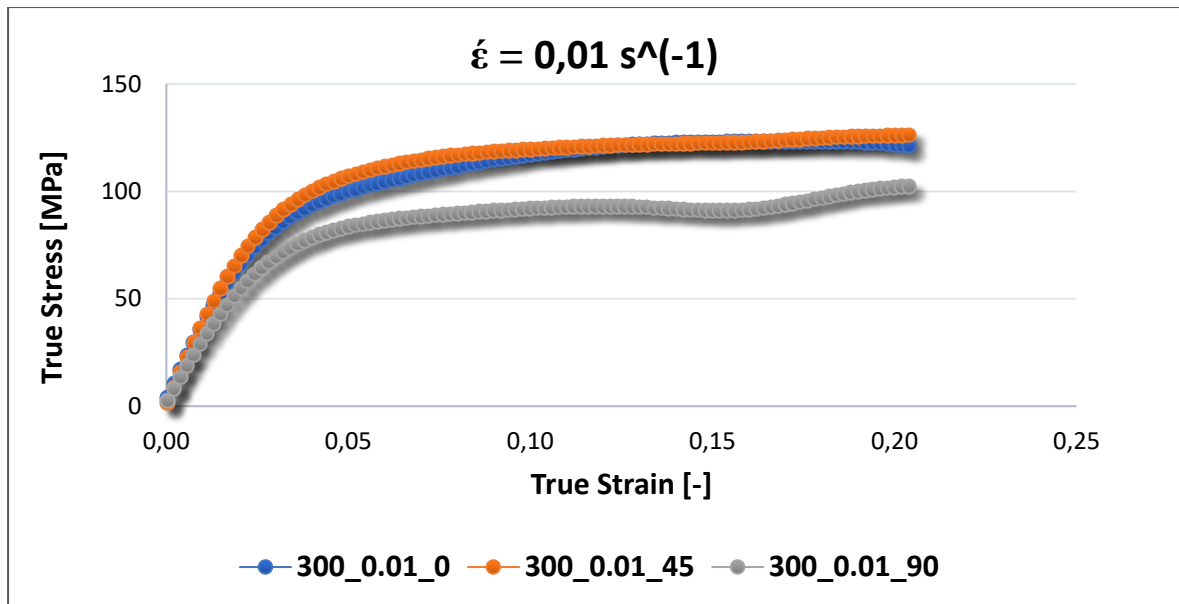


FIGURA 84: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0,1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

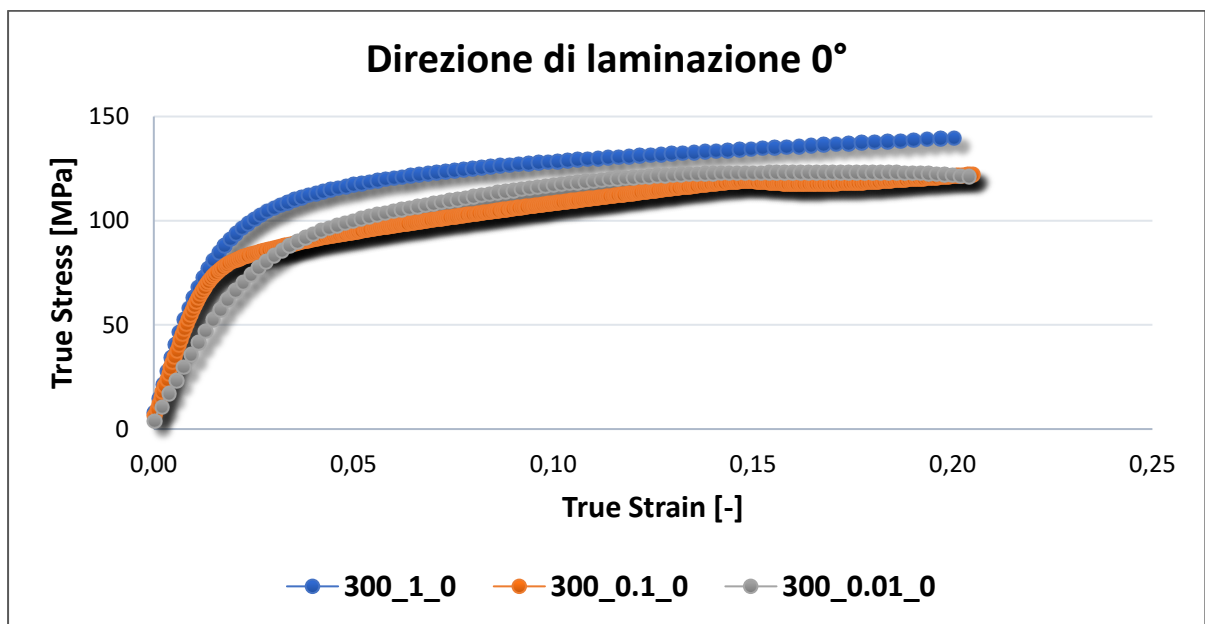




**FIGURA 85: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE**

### 5.3.2 Valutazione dell'effetto della velocità di deformazione a direzione di laminazione imposta.

Per le prove condotte a 300°C, la curva sforzo-deformazione risulta essere non sensibile alla variazione della velocità di deformazioni, in quanto per qualunque direzione analizzata, le curve descritte alle diverse velocità di deformazioni presentano un andamento simile e sono descritte nello stesso intervallo di sforzo e di deformazione.



**FIGURA 86: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE**

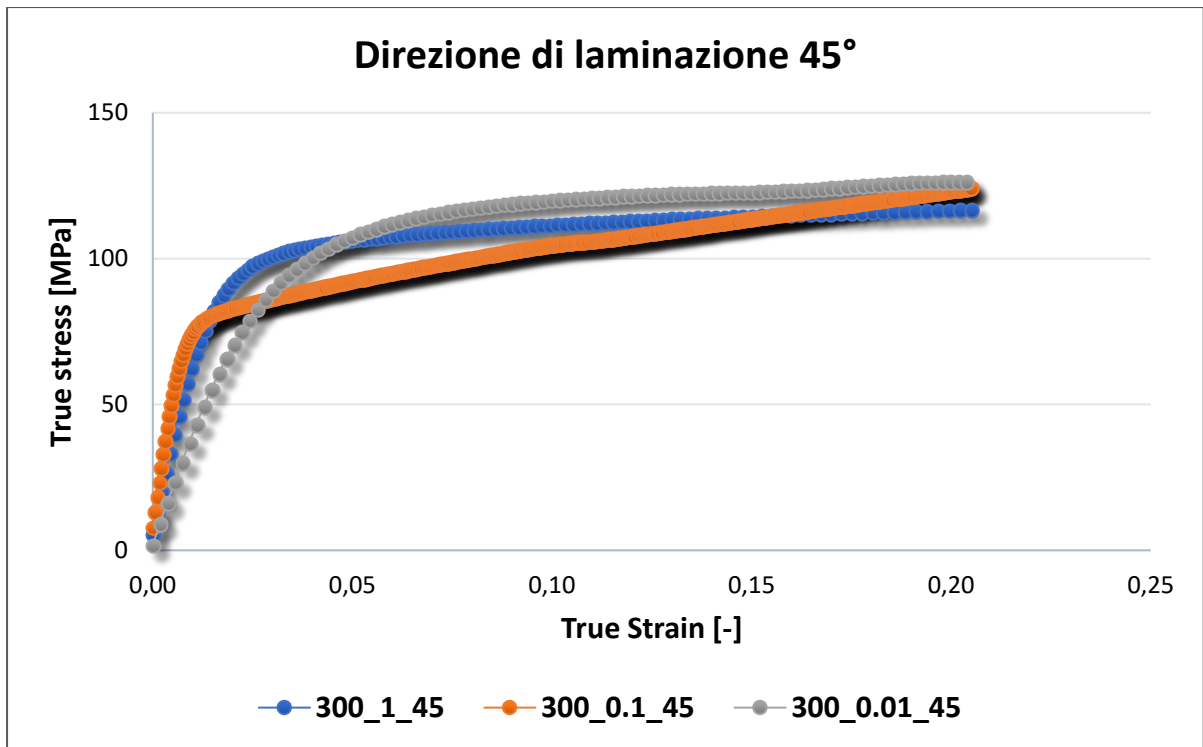


FIGURA 87 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 45° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

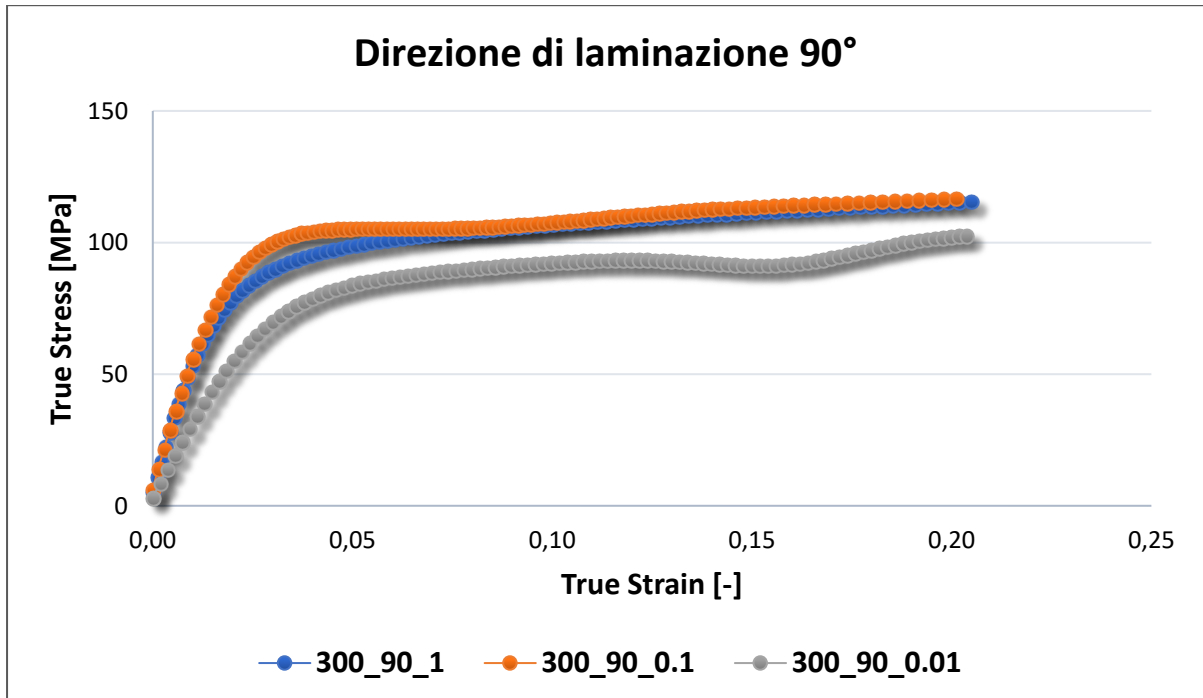


FIGURA 88: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 90° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

## 5.4 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 200°C.

### 5.4.1 Valutazione dell'effetto della direzione di laminazione a velocità di deformazione imposta

Le curve di sforzo-deformazione per le prove condotte a 200°C risultano essere non sensibili alla direzione di laminazione a velocità di deformazione imposta.

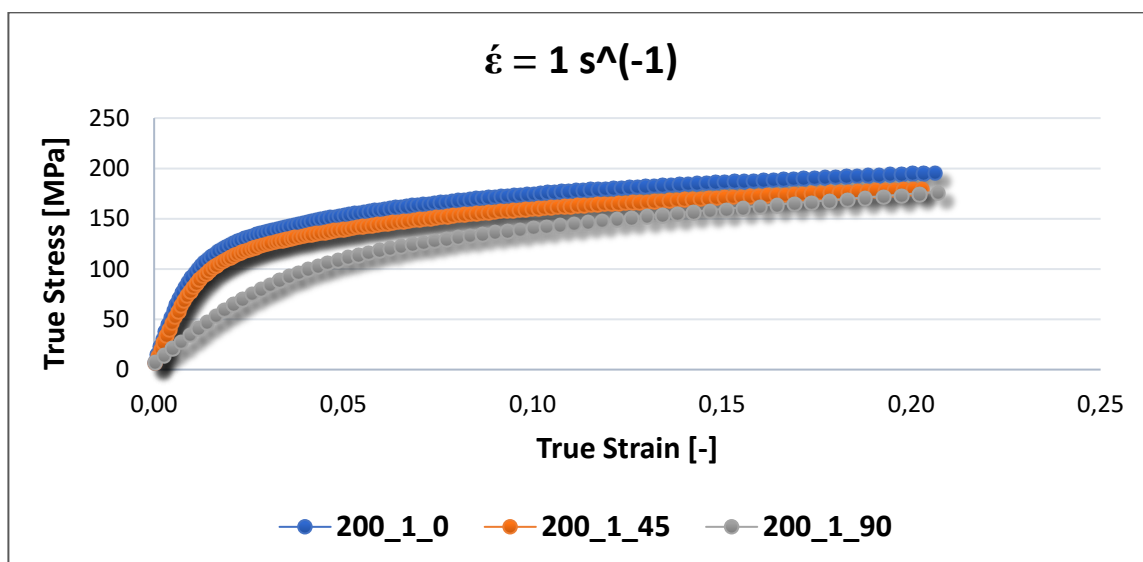


FIGURA 89: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

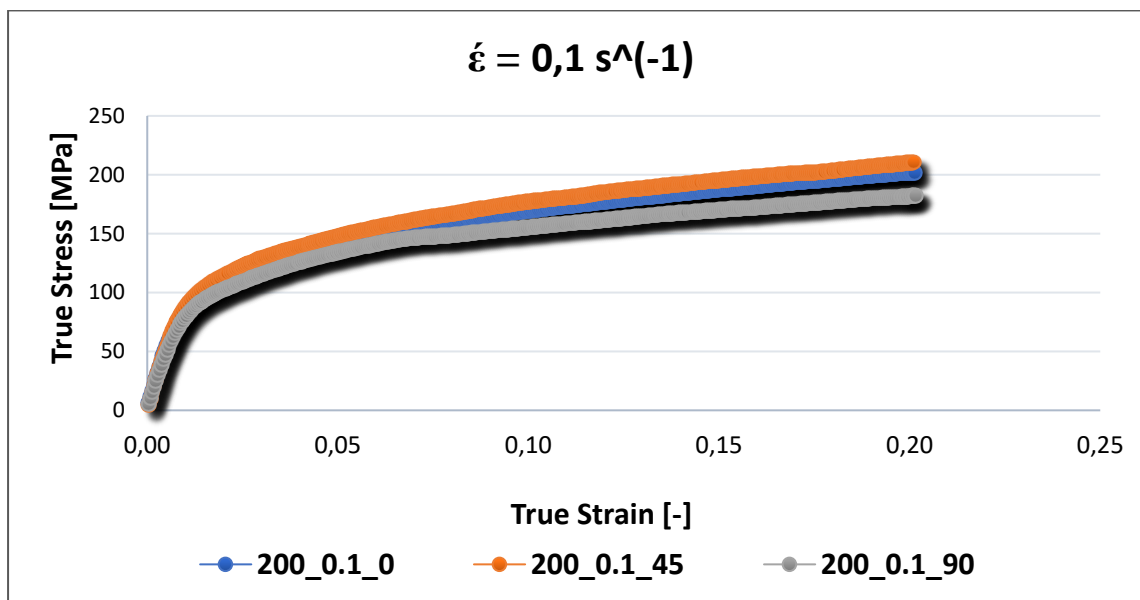


FIGURA 90: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0,1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

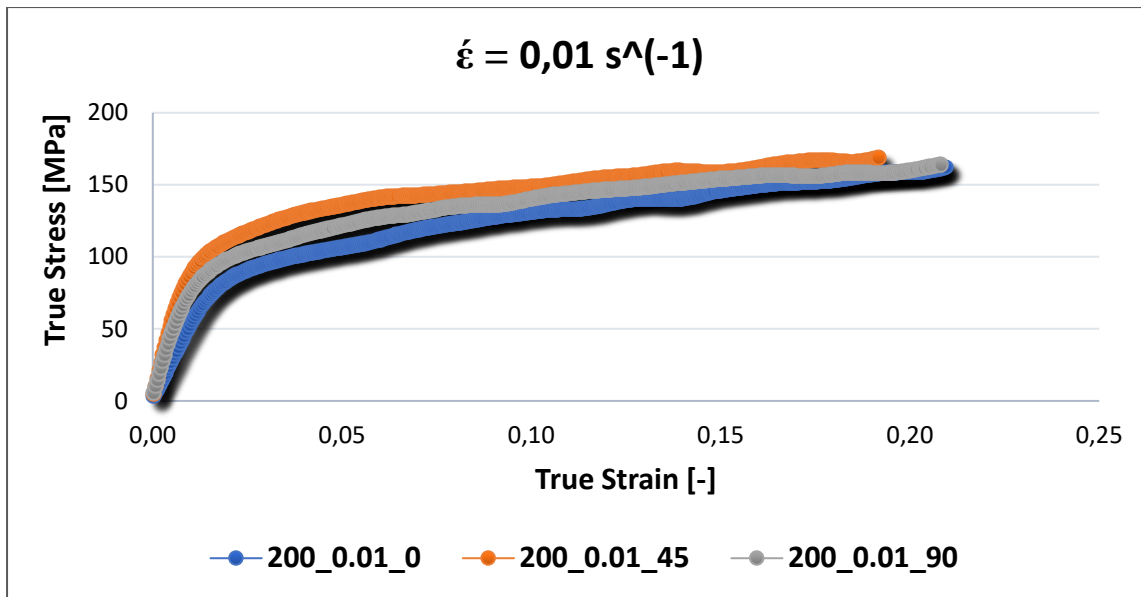


FIGURA 91: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

**5.4.2 Valutazione dell'effetto della velocità di deformazione a direzione di laminazione imposta.**

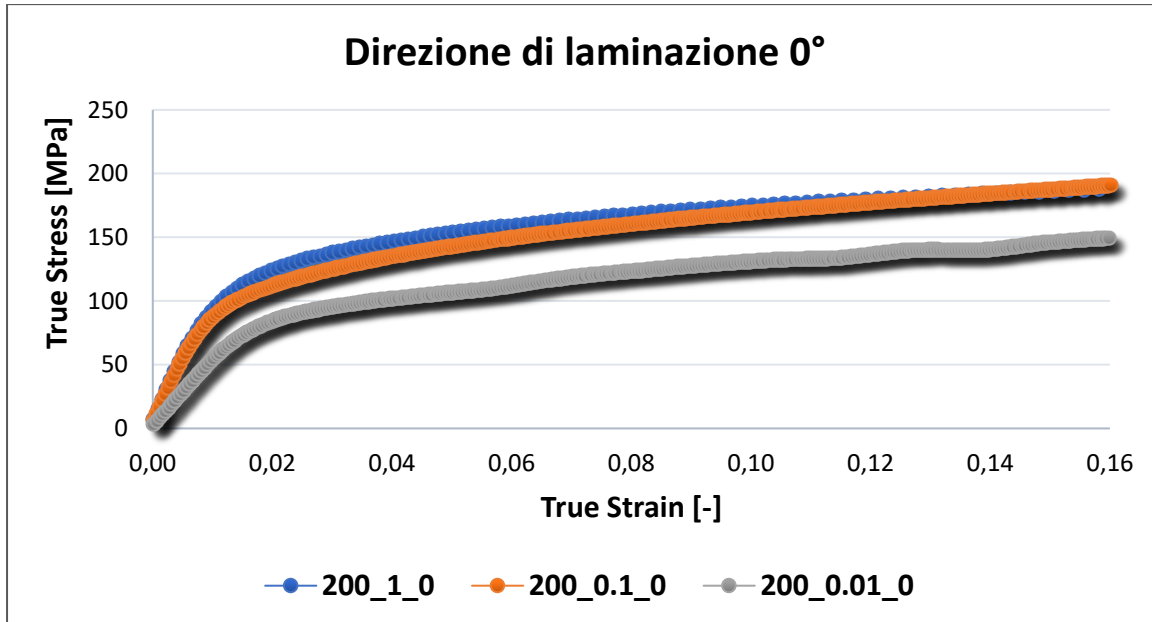


FIGURA 92: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

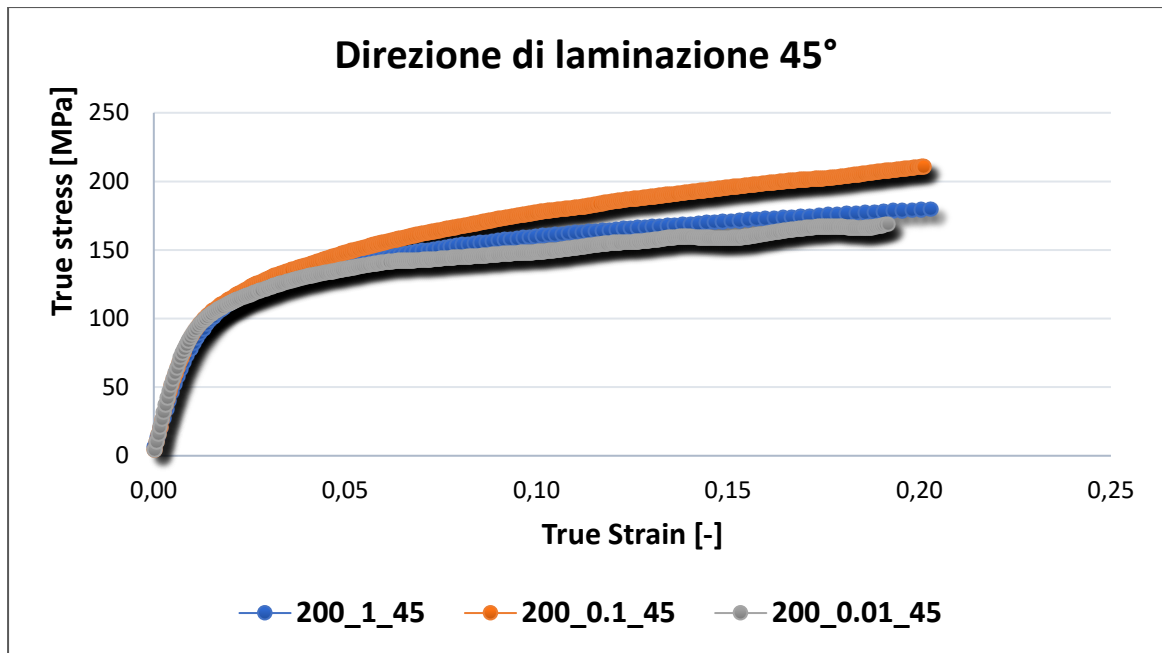


FIGURA 93: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 45° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

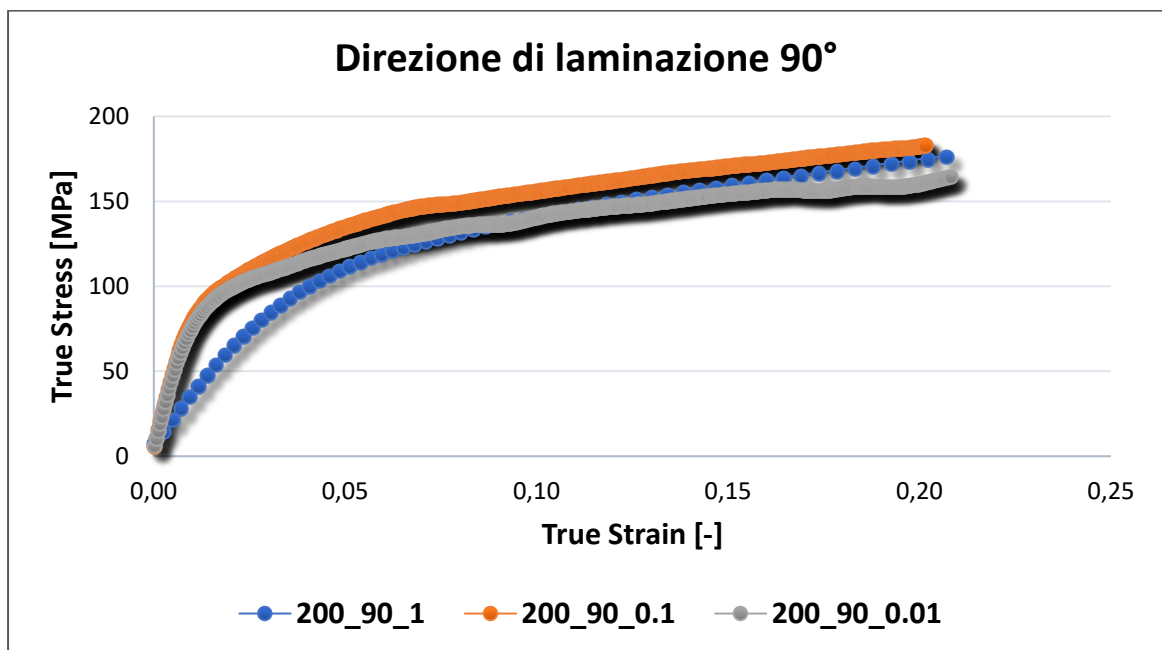


FIGURA 94: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 90° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

Per le prove a 200°C le curve di sforzo-deformazione risultano essere non sensibili alla velocità di deformazione per ogni direzione di laminazione imposta. Le curve sono descritte nello stesso intervallo di valori di sforzo e deformazione per tutte e tre le direzioni di laminazione.

## 5.5 Curve di sforzo deformazione reali per le prove condotte a 25°C.

### 5.5.1 Valutazione dell'effetto della direzione di laminazione a velocità di deformazione imposta

Dai tre grafici rappresentati, si osserva che la direzione di laminazione non influisce sulla curva di sforzo-deformazione.

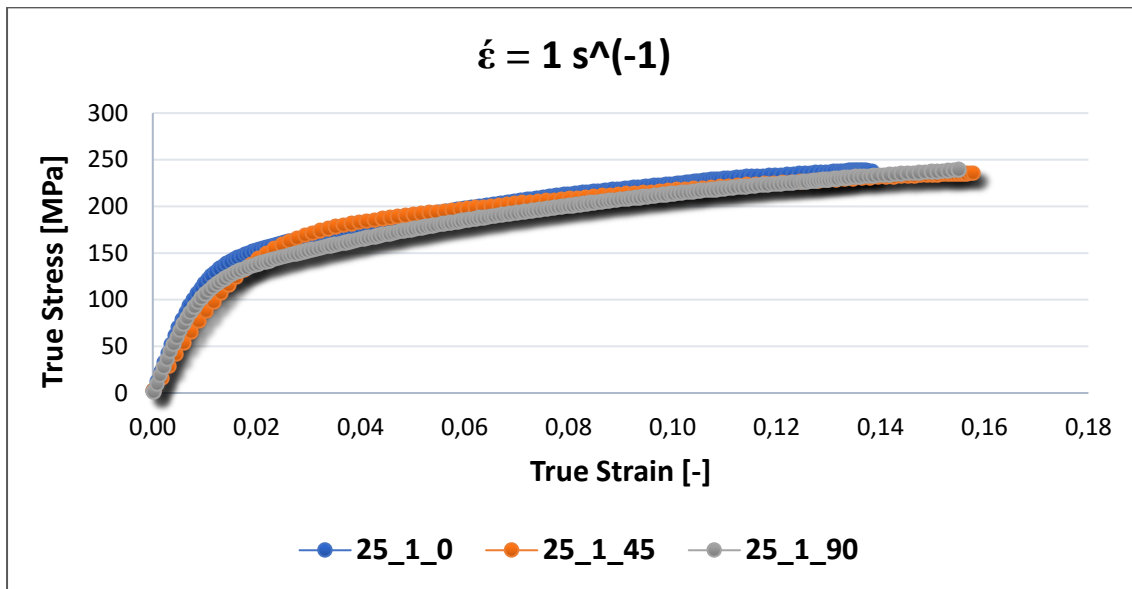


FIGURA 95: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

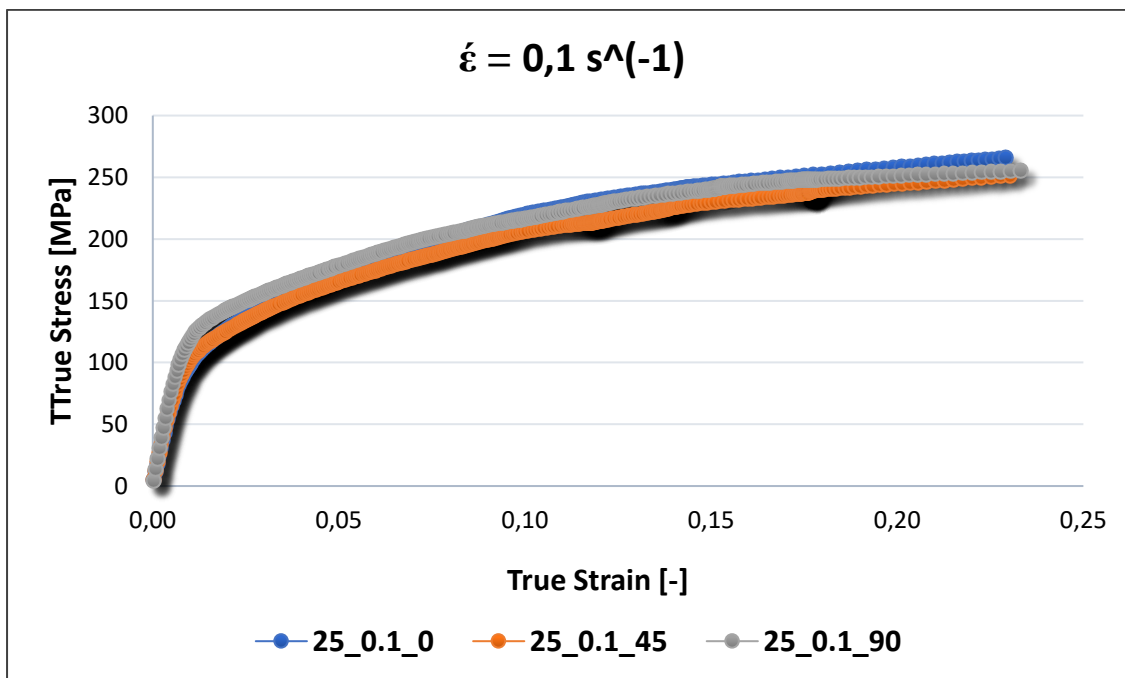


FIGURA 96: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$  IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

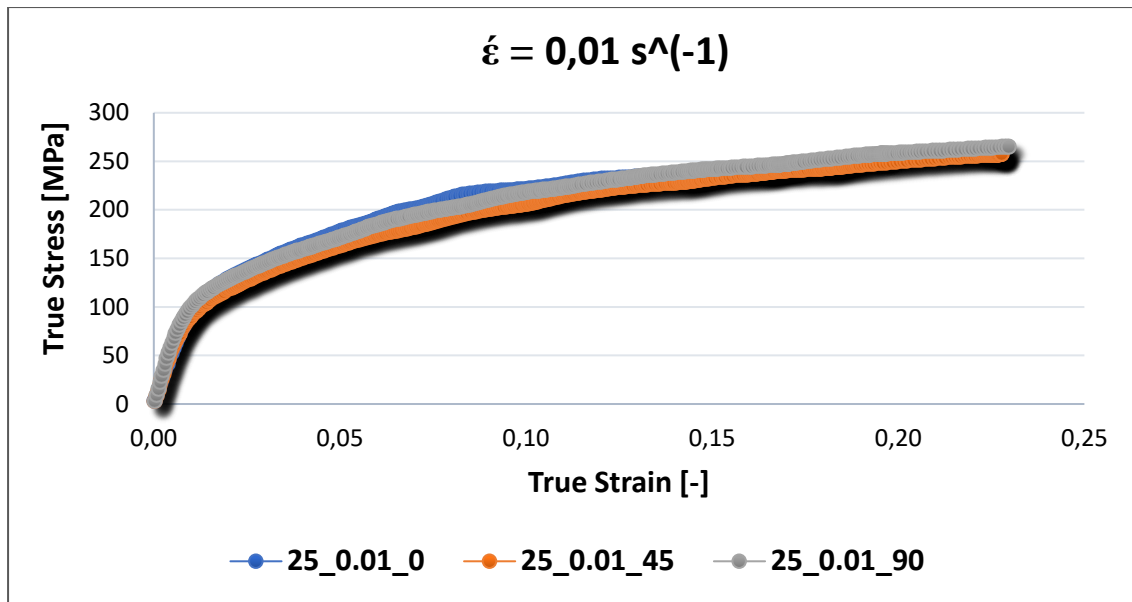


FIGURA 97: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01 S<sup>-1</sup> IN FUNZIONE DIREZIONE DI LAMINAZIONE

### 5.5.6 Valutazione dell'effetto della velocità di deformazione a direzione di laminazione imposta.

Dal confronto dei grafici è evidente che non si ha sensibilità alla velocità di deformazione. Inoltre, la curva di trazione descritta a 25°C dopo il trattamento di solubilizzazione ha un andamento simile alla curva descritta dalla prova di trazione a freddo.

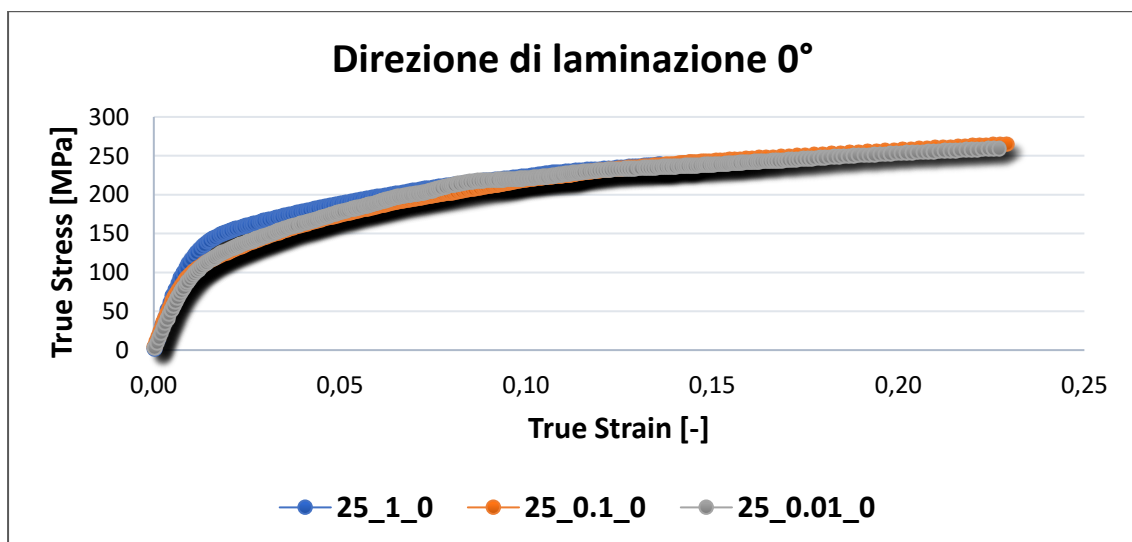


FIGURA 98: : CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

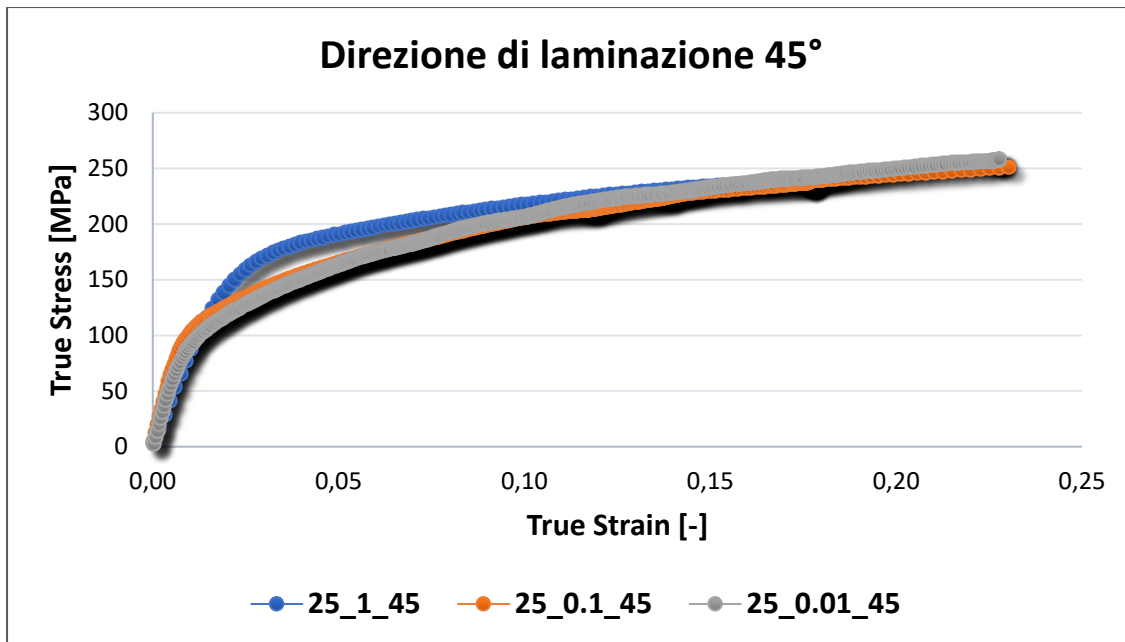


FIGURA 99: : CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 45° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

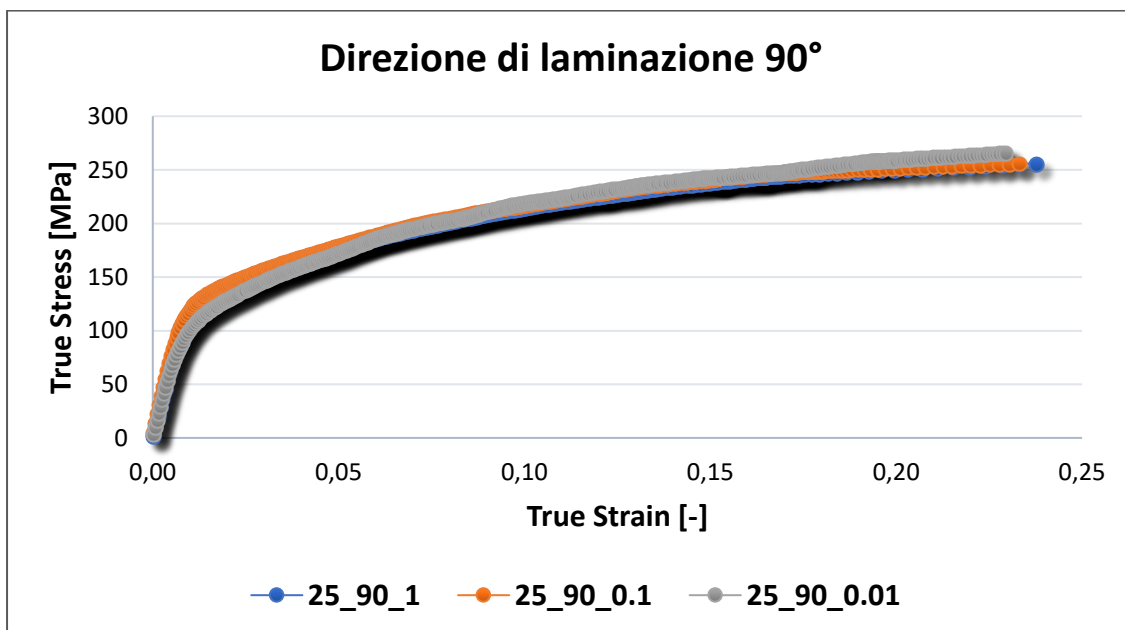


FIGURA 100: : CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 25°C IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 90° IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE



## 5.6 Effetto della temperatura sulla curva sforzo-deformazione

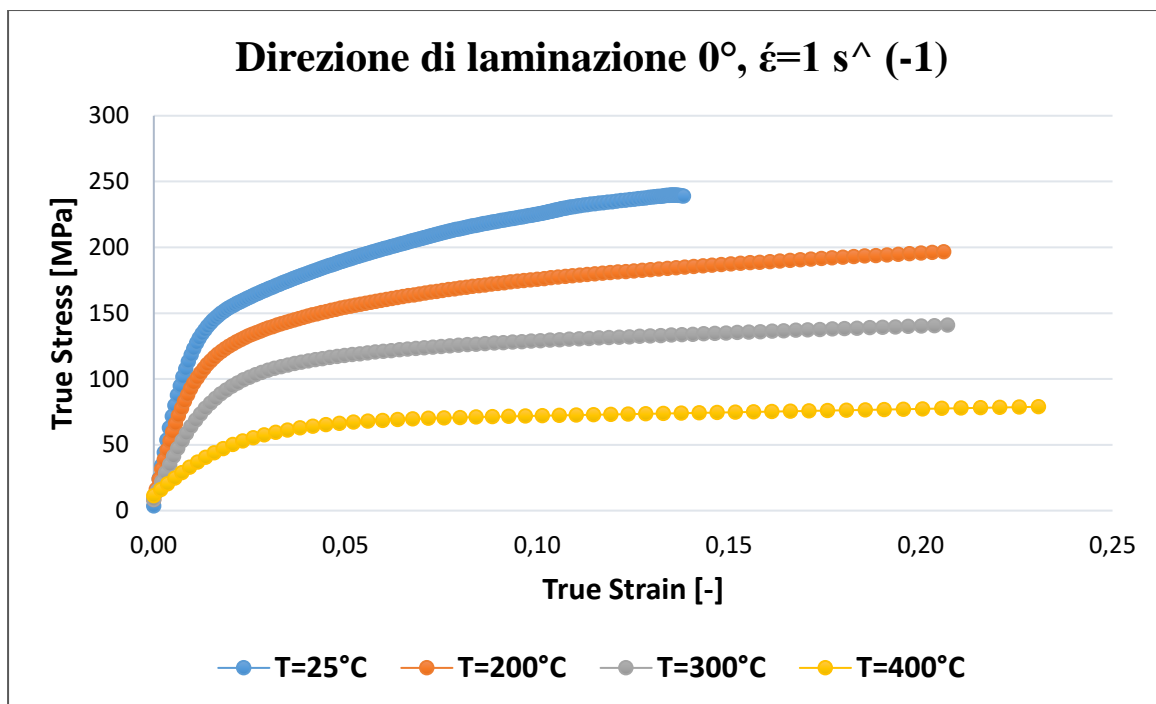


FIGURA 101: : CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 1  $\text{s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

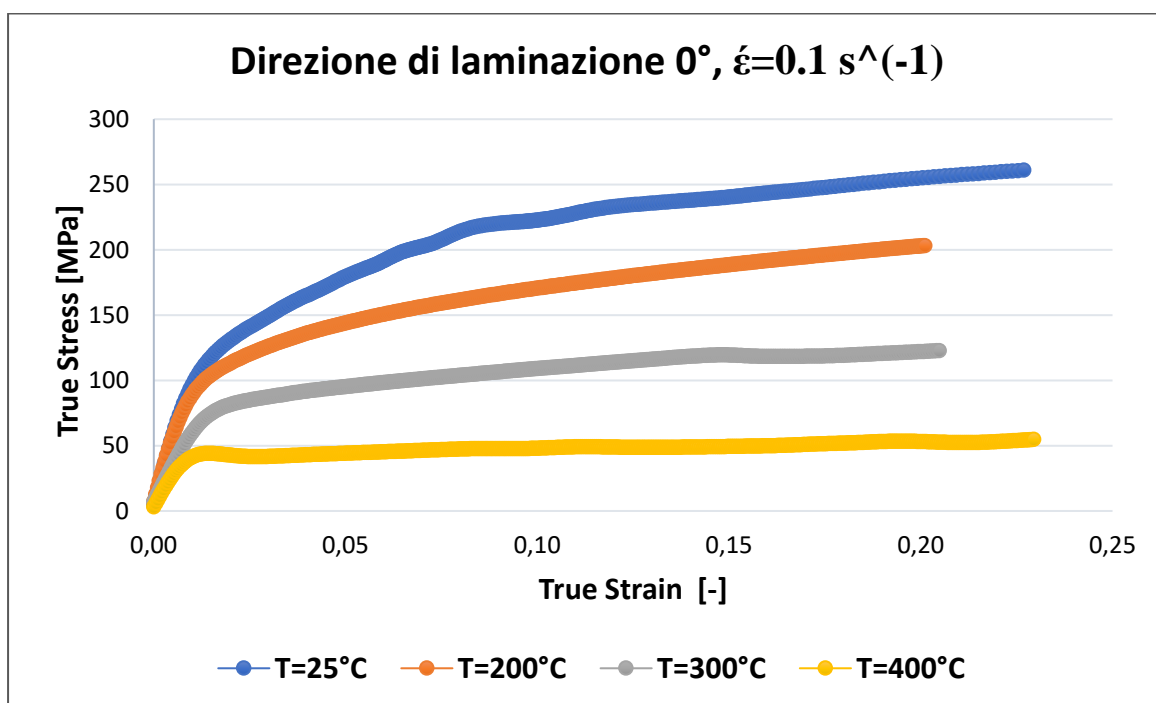
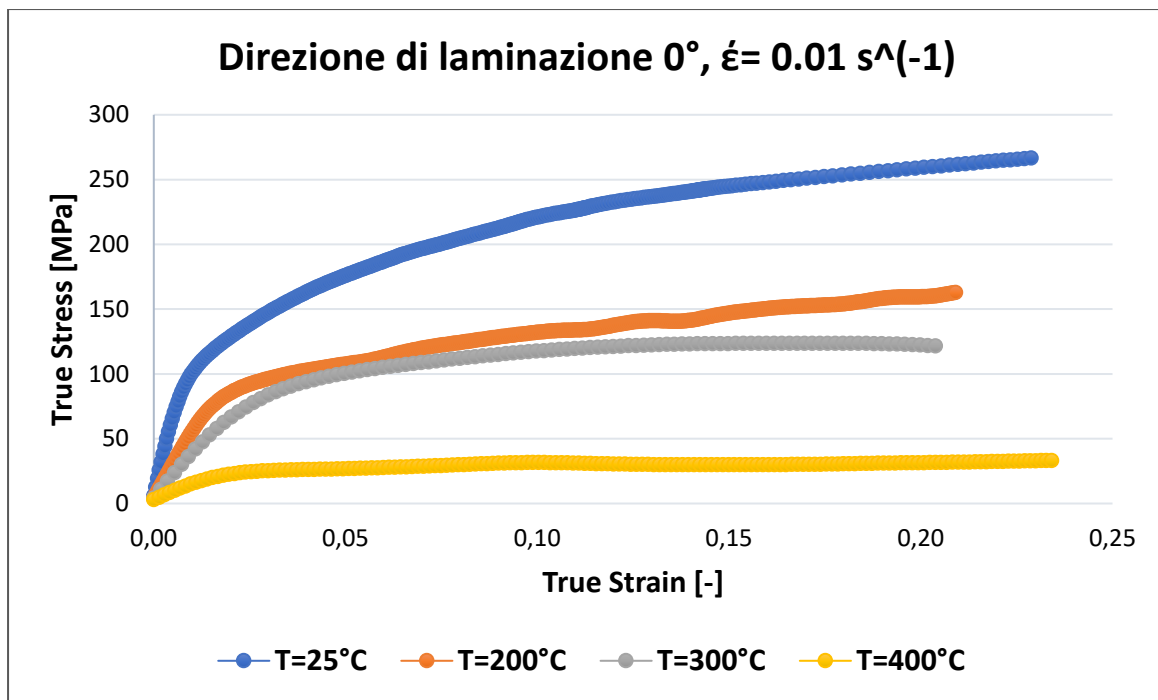


FIGURA 102: CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 0° ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.1  $\text{s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA



**FIGURA 103:** CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI IN DIREZIONE DI LAMINAZIONE 90° ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI 0.01  $\text{s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

## 5.7 Anisotropia della lega AA6082

Per ogni prova condotta a diversa temperatura è stata valutata anche il valore assunto dell'anisotropia, anisotropia normale media e anisotropia planare. I valori di anisotropia sono stati ottenuti tramite l'elaborazione dei dati di deformazione ottenuti dall'analisi delle immagini di ogni prova con il software di Aramis. Per ogni prova è stata presa l'immagine corrispondente alla deformazione massima, prima della frattura. Su questa immagine sono stati analizzati e elaborati i dati ottenuti da tre punti locali nella zona di massima deformazione presente nell'immagine.

### 5.7.1 Anisotropia

Dai valori assunti si può osservare che il materiale ha un comportamento quasi anisotropo per le tre direzioni analizzate. Nella direzione di 0°, l'anisotropia assume valori inferiori rispetto a quelli ottenuti per le altre due direzioni, che assumono invece valori confrontabili. Questa caratteristica si riproduce per ogni temperatura di prova e per ogni velocità di deformazione considerata.

I valori assunti non sono tendenti all'unità. La direzione 0° presenta valori inferiori rispetto alle altre direzioni per ogni temperatura di esercizio utilizzata. I valori di MBR non sembrano essere condizionati dalla velocità di deformazione e dalla temperatura di prova. Dalla tabella si può considerare un caso particolare in cui il materiale assume un comportamento isotropo. Per le prove condotte a 400°C con velocità di deformazione pari a 0.01 s<sup>-1</sup>, si può osservare che il valore di MBR per 0° è confrontabile con i valori assunti nelle altre due direzioni.

### 5.7.2 Anisotropia normale media

L'anisotropia normale media è in proporzionalità diretta con il rapporto minimo di imbutitura (LDR). Tramite il valore assunte dall' anisotropia normale media è possibile valutare LDR, parametro di progettazione che permette di avere una stima della profondità della coppetta, ottenuta con la perforazione della lamiera tramite un punzone. L'anisotropia normale media si calcola attraverso la media dei tre valori assunti dall'anisotropia nelle direzioni di laminazione a 0, 45, 90 attraverso l'espressione:

Se il valore ottenuto è pari all'unità allora il materiale ha un comportamento isotropo. Per gli altri valori assunti invece il materiale è anisotropo. Nei casi analizzati si osserva che l'anisotropia normale media assume un valore nell'intervallo di (0.80-0.90) per ogni temperatura di esercizio e velocità di deformazione. Dall'analisi di questo parametro il materiale ha un comportamento anisotropo in tutti i casi.

### 5.7.3 Anisotropia planare

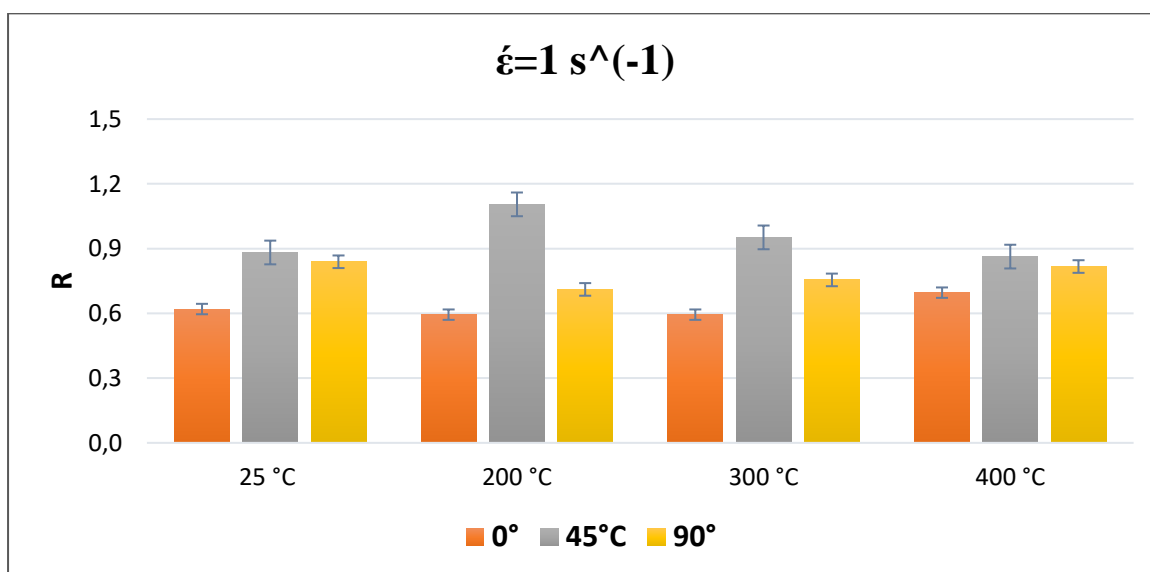
L'anisotropia planare è un parametro che indica l'eventuale formazione delle orecchie nel caso in cui la lamiera sia soggetta a imbutitura. Questo parametro si calcola attraverso l'espressione:

$$\Delta R = \left( \frac{R_0 - 2 * R_{45} + R_{90}}{2} \right) \quad (5.1)$$

se  $\Delta R$  assume valore pari a 0, allora il materiale non formerà le orecchie in imbutitura. In tutti i casi analizzati il valore assunto dall'anisotropia planare è diverso da 0.

**TABELLA 9 VALORI DI ANISOTROPIA E DELL'ANISOTROPIA PLANARE PER  $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$**

$\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$					
T[°C]	R=0°	R=45°	R=90°	R	$\Delta R$
25	0.620	0.882	0.839	0.806	-0.153
200	0.594	1.105	0.711	0.879	-0.452
300	0.594	0.952	0.755	0.813	-0.279
400	0.696	0.863	0.817	0.810	-0.106



**FIGURA 104: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $1 \text{ s}^{-1}$**

**TABELLA 10 TABELLA 11 VALORI DI ANISOTROPIA E DELL'ANISOTROPIA PLANARE  $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$**

$\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$					
T[°C]	R=0°	R=45°	R=90°	R	$\Delta R$
25	0.564	0.963	0.872	0.840	-0.245
200	0.584	0.989	0.81	0.842	-0.293
300	0.614	1.032	0.876	0.889	-0.288
400	0.686	0.765	0.814	0.875	-0.015

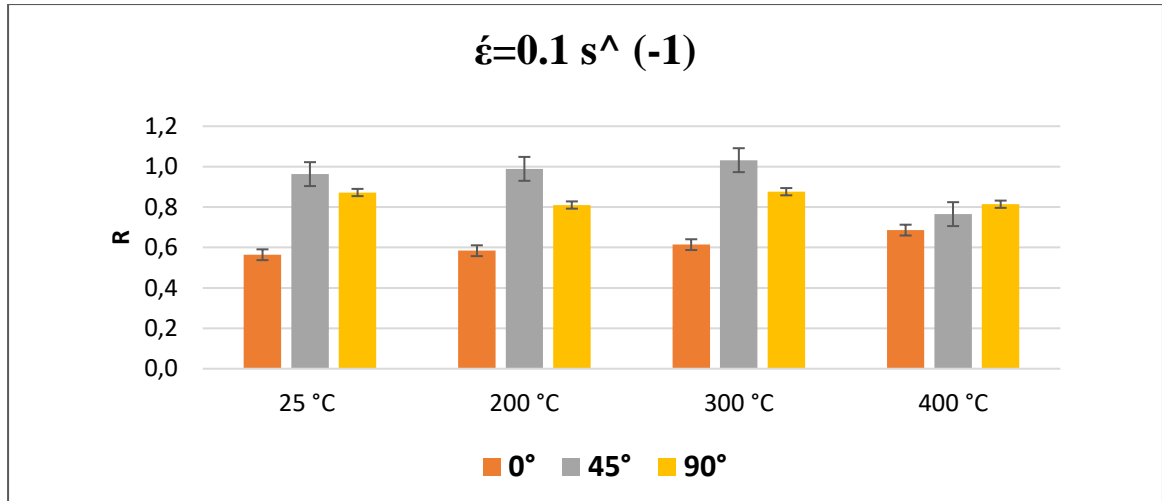


FIGURA 105: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$

TABELLA 12 VALORI DI ANISOTROPIA E DELL'ANISOTROPIA PLANARE PER  $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$

<b><math>\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}</math></b>					
<b>T[°C]</b>	<b>R=0°</b>	<b>R=45°</b>	<b>R=90°</b>	<b>R</b>	<b><math>\Delta R</math></b>
25	0.494	0.95	0.902	0.823	-0.251
200	0.563	0.922	0.784	0.798	-0.248
300	0.547	0.867	0.667	0.737	-0.26
400	0.786	0.872	0.776	0.827	-0.09

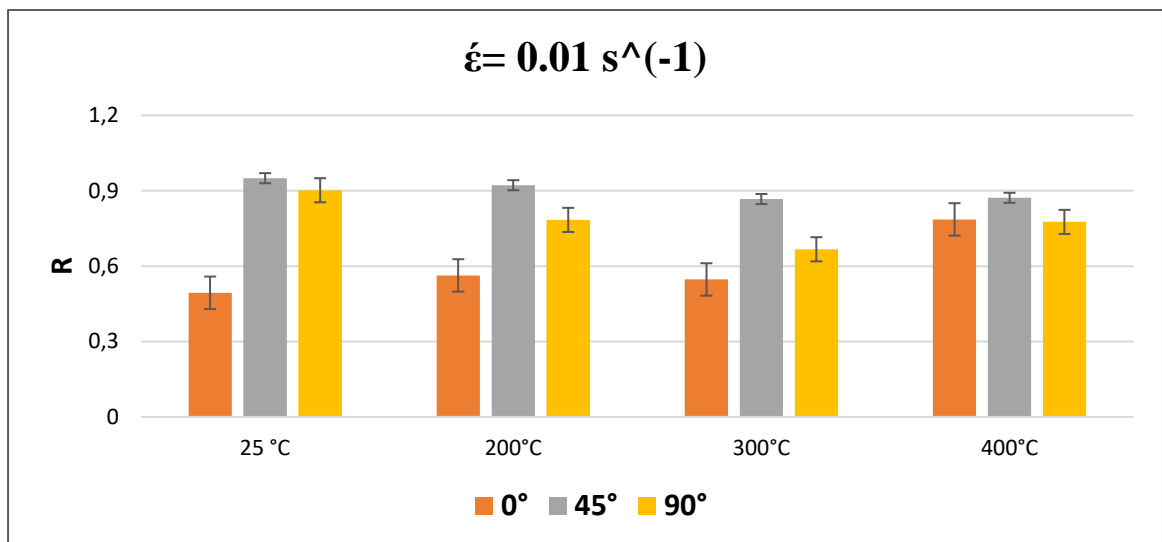


FIGURA 106: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.01 \text{ s}^{-1}$

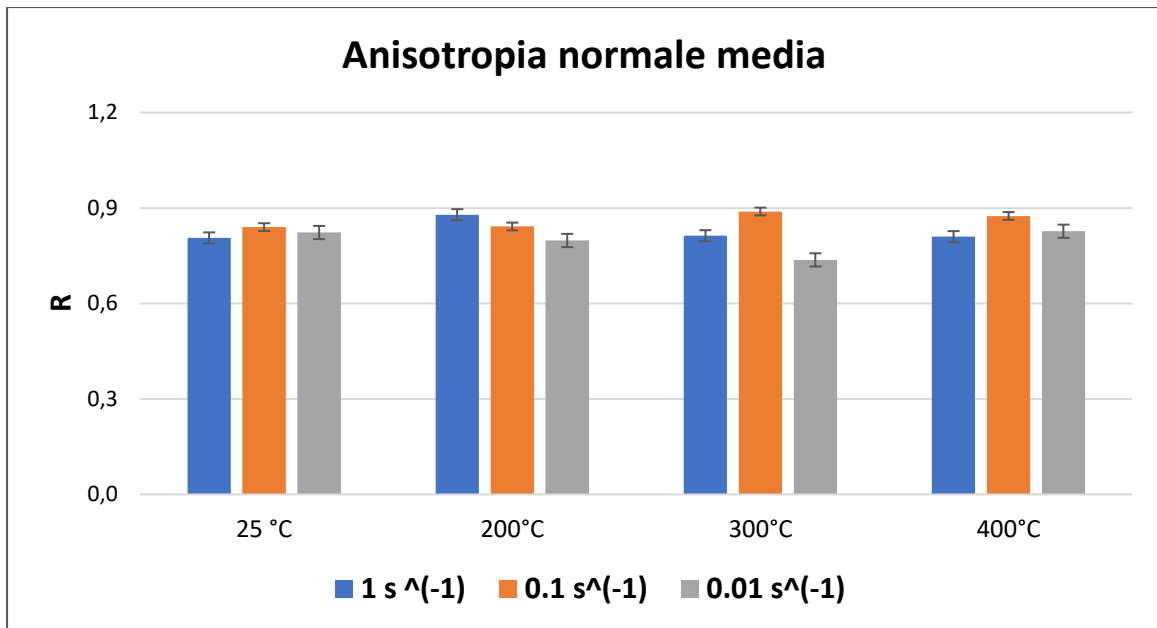


FIGURA 107: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA NORMALE MEDIA AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

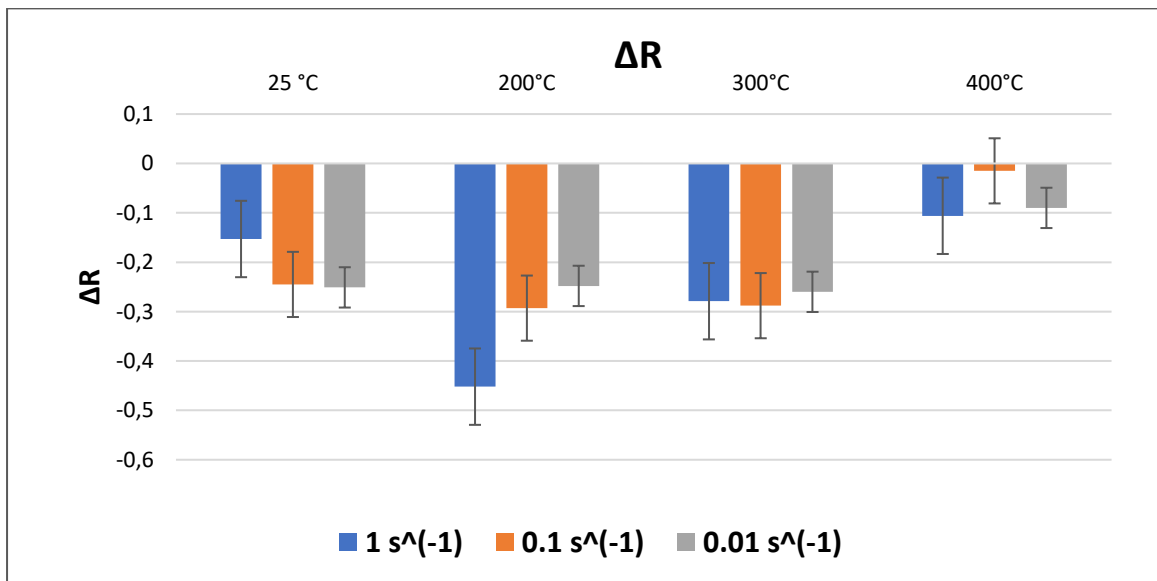


FIGURA 108: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA PLANARE AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

## 5.8 Deformazione a frattura della lega AA6082

Per ogni campione è stata calcolata la deformazione a frattura con la seguente formula:

$$\varepsilon_{frattura} = \ln\left(\frac{A_{iniziale}}{A_{finale}}\right) \quad (5.2)$$

I risultati sono stati poi riportati in un grafico per descrivere la variazione della deformazione a frattura per tutte le condizioni di prova eseguite. Si osserva dai valori riportati come ci sia poca sensibilità della temperatura nel caso di 420 e 300°C, mentre per i valori relativi a 200°C è presente una forte differenza dovuta al cambio di intervallo da lavorazioni a caldo a quello tiepido.

**TABELLA 13 VALORI DI AREA A FRATTURA E DEFORMAZIONE A FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 1$  [s<sup>-1</sup>]**

$\dot{\epsilon} = 1$ [s <sup>-1</sup> ]		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [A<sub>f</sub>]</b>	<b>Deformazione a frattura [ε<sub>f</sub>]</b>
[°C]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]
400	5.08	1.25
300	6.68	0.98
200	10.02	0.57

**TABELLA 14 VALORI DI AREA A FRATTURA E DEFORMAZIONE A FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 0.1$  [s<sup>-1</sup>]**

$\dot{\epsilon} = 0.1$ [s <sup>-1</sup> ]		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [A<sub>f</sub>]</b>	<b>Deformazione a frattura [ε<sub>f</sub>]</b>
[°C]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]
400	4.23	1.44
300	6.37	1.03
200	9.64	0.61

**TABELLA 15 VALORI DI AREA A FRATTURA E DEFORMAZIONE A FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 0.01$  [s<sup>-1</sup>]**

$\dot{\epsilon} = 0.01$ [s <sup>-1</sup> ]		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [A<sub>f</sub>]</b>	<b>Deformazione a frattura [ε<sub>f</sub>]</b>
[°C]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]
400	4.05	1.5
300	5.29	1.21
200	7.92	0.81

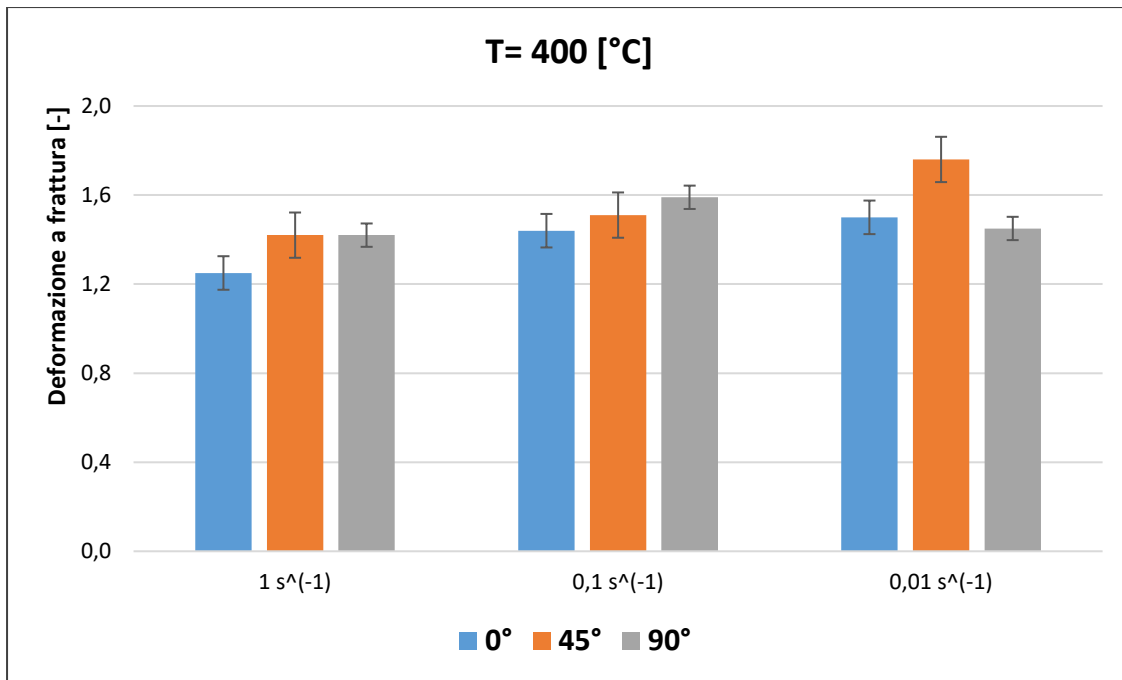


FIGURA 109: ISTOGRAMMA DI DEFORMAZIONE A FRATTURA ALLA T=400°C AL VARIARE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE

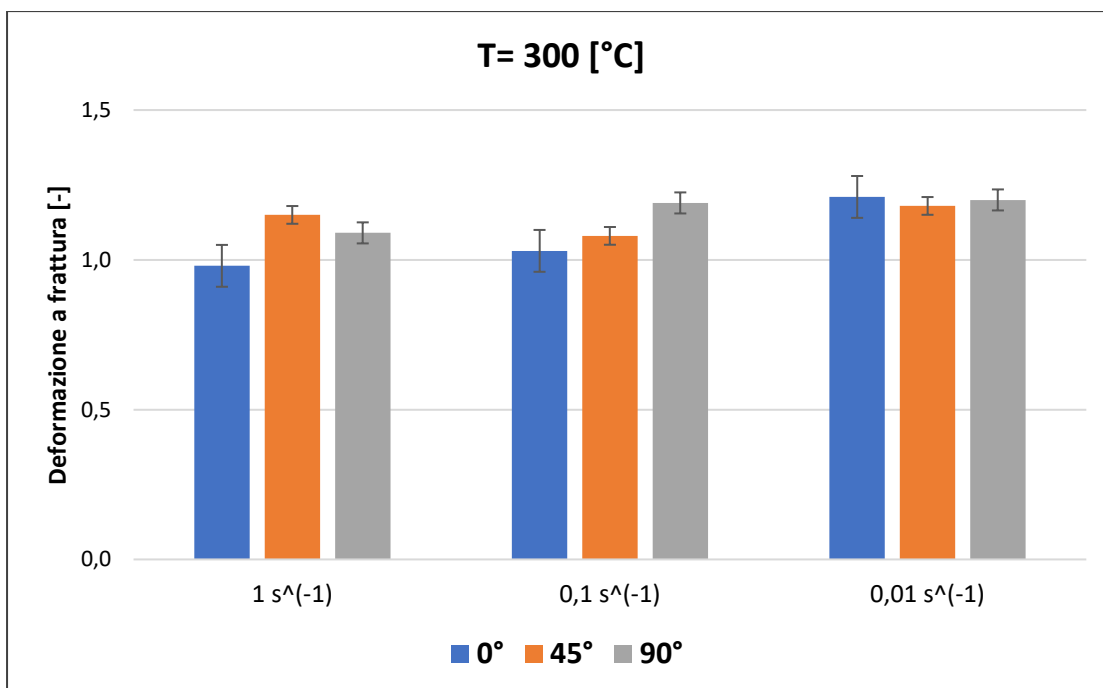


FIGURA 110: ISTOGRAMMA DI DEFORMAZIONE A FRATTURA ALLA T=300°C AL VARIARE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE



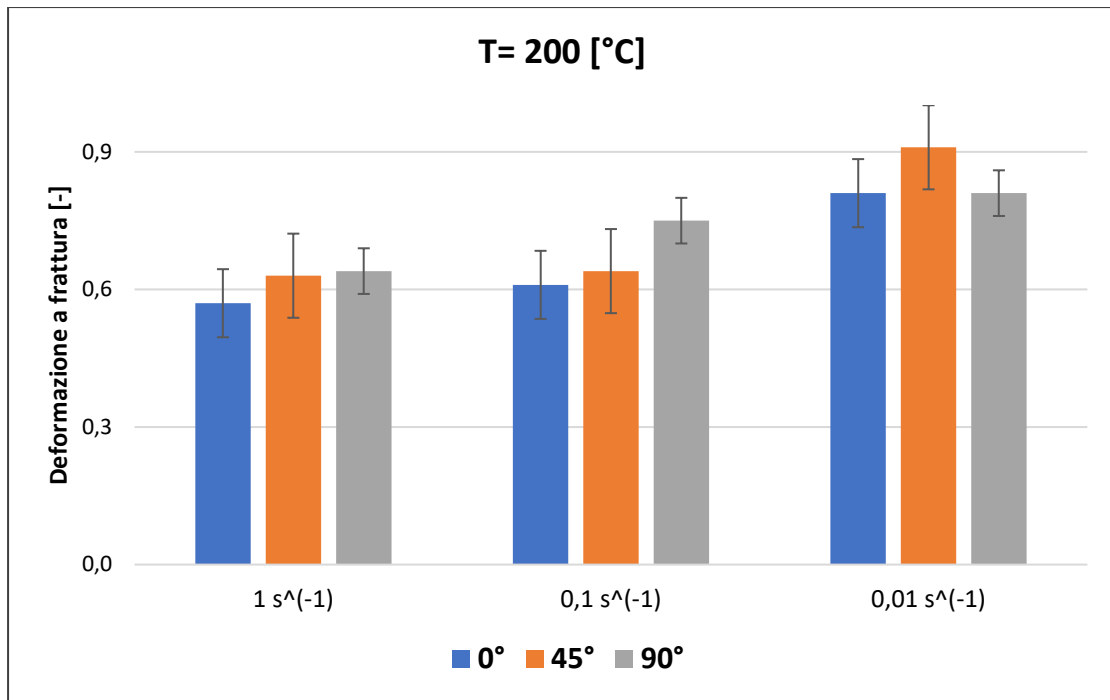


FIGURA 111: : ISTOGRAMMA DI DEFORMAZIONE A FRATTURA ALLA T=200°C AL VARIARE DELLA DIREZIONE DI LAMINAZIONE

Dai grafici riportati si può osservare l'influenza di temperatura e velocità di deformazione sulla deformazione a frattura. In particolare, i grafici evidenziano una sensibilità per la velocità di deformazione 0.01 s<sup>-1</sup> e per la temperatura di 200°C.

## 5.9 Analisi frattografica della lega AA6082

L'analisi frattografica è stata condotta mediante l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione settando il detector degli elettroni secondari (ETD). Per visualizzare al meglio le superfici di frattura e capirne la conformazione, l'analisi è stata effettuata sulla sezione trasversale. Nel seguito vengono dunque proposti i risultati ottenuti per i campioni aventi direzione di laminazione 0° alla velocità di deformazione di 0.1 s<sup>-1</sup>. La scelta della direzione di laminazione e della velocità di deformazione non influisce sulla qualità della valutazione della superficie a frattura. Le immagini sono state acquisite a 200X, 500X, 1000X e 2000X. I parametri descritti in fondo alle immagini indicano le condizioni di misura per l'acquisizione dell'immagine:

- WD (*working distance*) indica la distanza tra lente del microscopio e la superficie di frattura;
- HV è la tensione usata per emettere gli elettroni per l'acquisizione dell'immagine;
- HFW è la lunghezza di area valutata nell'immagine;
- Det EDT è il detector impiegato per l'acquisizione dell'immagine. In questo caso di studio sono elettroni secondari.

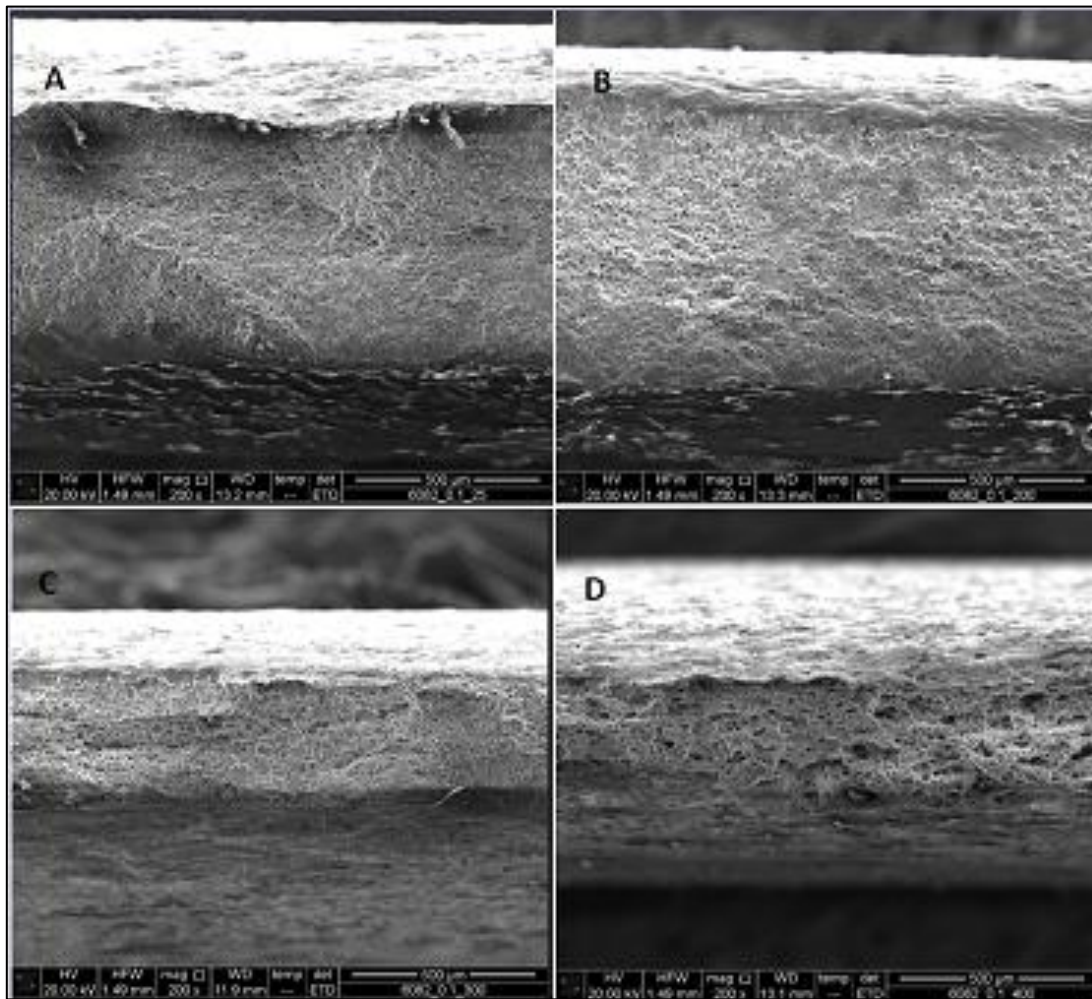


FIGURA 112 IMMAGINI AL SEM DI AA6082 200X A)25°C, B) 200°C; c)300°C; D)400°C

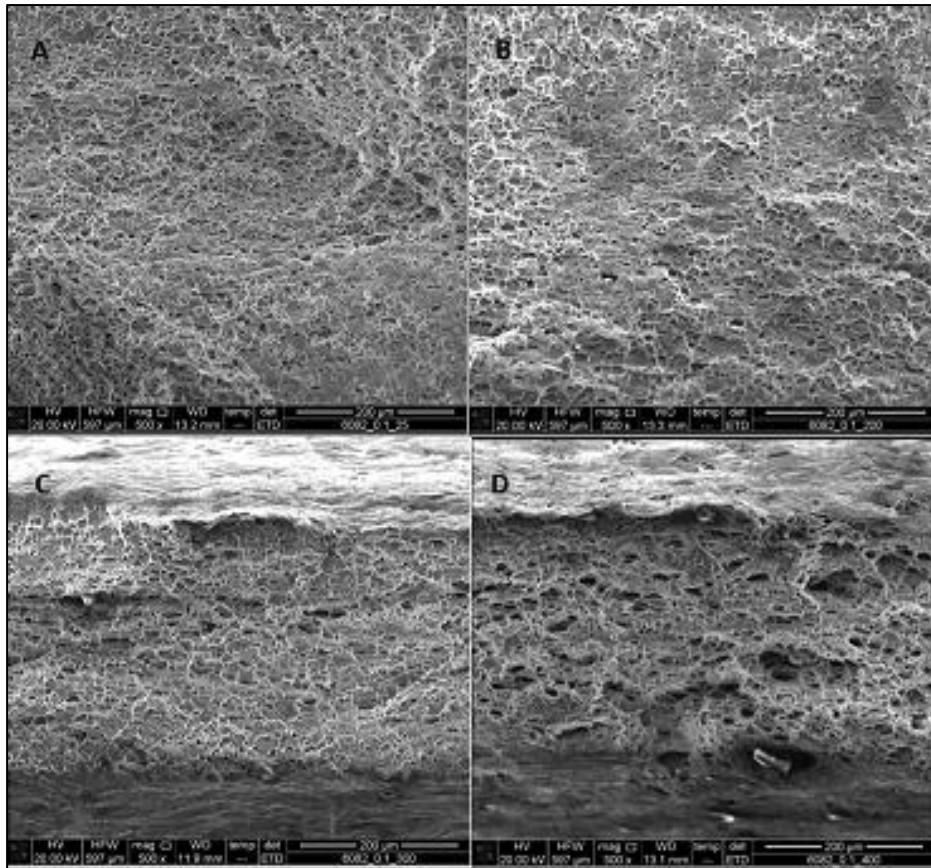


FIGURA 113 IMMAGINI AL SEM DI AA6082 500X A)25°C, B) 200°C; c)300°C; d)400°C

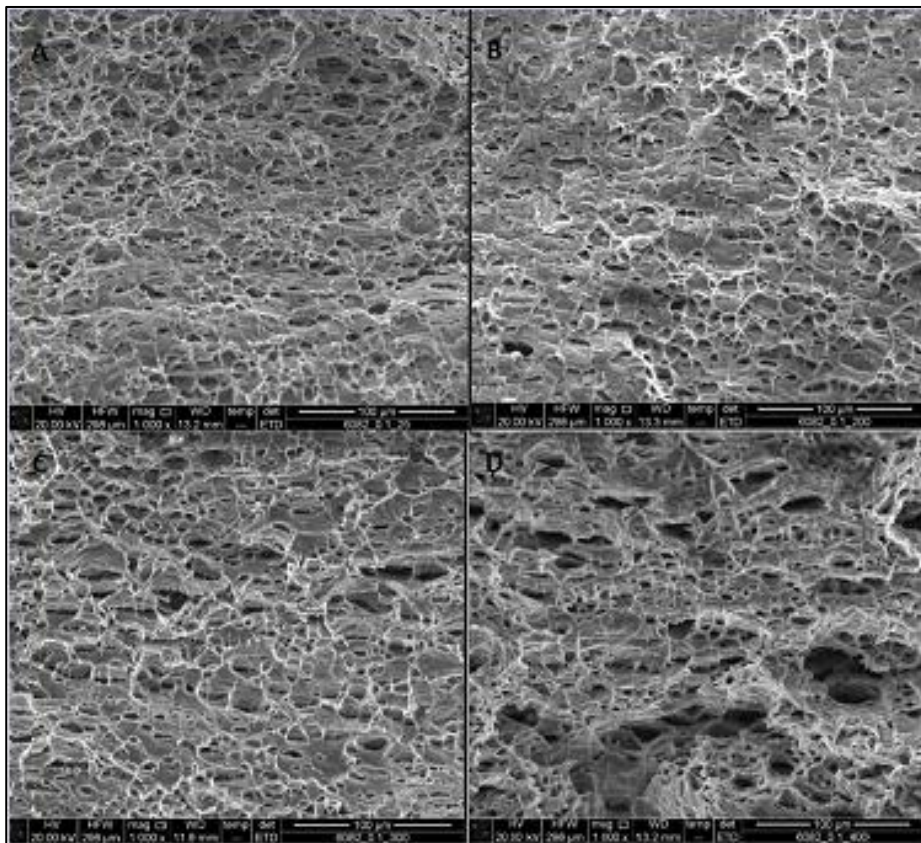


FIGURA 714 IMMAGINI AL SEM DI AA6082 1000X A)25°C, B) 200°C; c)300°C; d)400°C

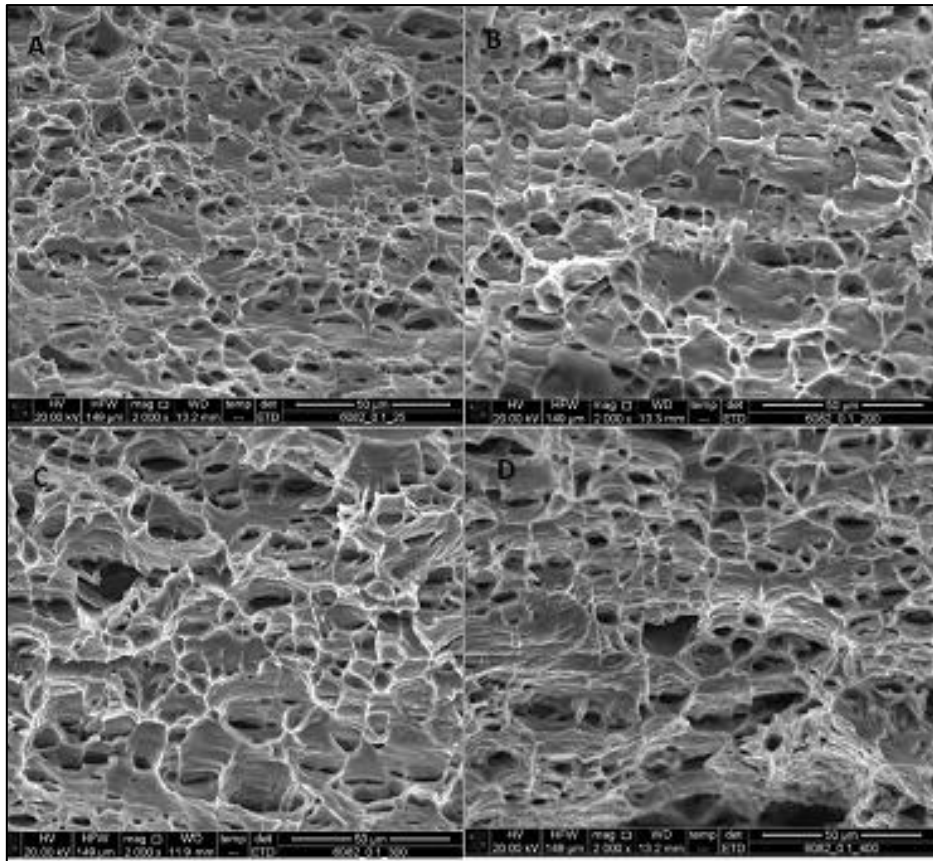


FIGURA 115 IMMAGINI AL SEM DI AA6082 2000X A)25°C, B) 200°C; c)300°C; D)400°C

Le immagini sono state riportate in funzione della temperatura a parità di ingrandimento. L'analisi microstrutturale permette di valutare qualitativamente la morfologia di frattura dei campioni. L'analisi permette di definire il meccanismo di frattura che interviene nei campioni durante la prova di trazione alle alte temperature. Per tutte le temperature le superficie mostrano un aspetto macroscopicamente fibroso. In particolare, si osserva la presenza di microcavità, indicatrici di una frattura di tipo duttile. La frattura duttile è conseguenza di deformazione plastica estesa con bassa velocità di propagazione a rottura. In generale, la frattura duttile è caratterizzata da tre fasi distinte:

- inizio della strizione sul provino e nucleazione dei microvuoti all'interno della zona in cui si è avuta strizione (116 (a) e (b) della figura sovrastante);
- i microvuoti si uniscono e formano una cricca nel centro del provino che si propaga verso la superficie in direzione ortogonale allo sforzo applicato (116(c) della figura sovrastante);
- quando la cricca si avvicina alla superficie la sua direzione si inclina di 45° rispetto all'asse di trazione e si ha una rottura di tipo coppa-cono (116 (d) ed (116e) della figura sovrastante).

Nel test di trazione quando il materiale esaurisce la capacità di incrudimento, si verifica una condizione di instabilità che determina la strizione. La strizione provoca un aumento della concentrazione di stress e induce un complesso stato di tensione triassiale a causa della differente deformazione imposta rispetto alle zone adiacenti (figura 116-a). All'aumentare della deformazione le cavità sferoidali si allungano molto più velocemente della matrice (determinando i dimples) e si allargano dal centro della strizione verso l'esterno con una velocità di crescita in direzione perpendicolare allo sforzo di trazione proporzionale alla presenza di particelle di seconda fase (figura 116-c). Quando lo spessore del materiale compreso tra la lacerazione interna e l'esterno della strizione raggiunge un valore critico, si crea il caratteristico piano di taglio a 45° rispetto all'asse di trazione ed il materiale cede (figura 116-d, e)

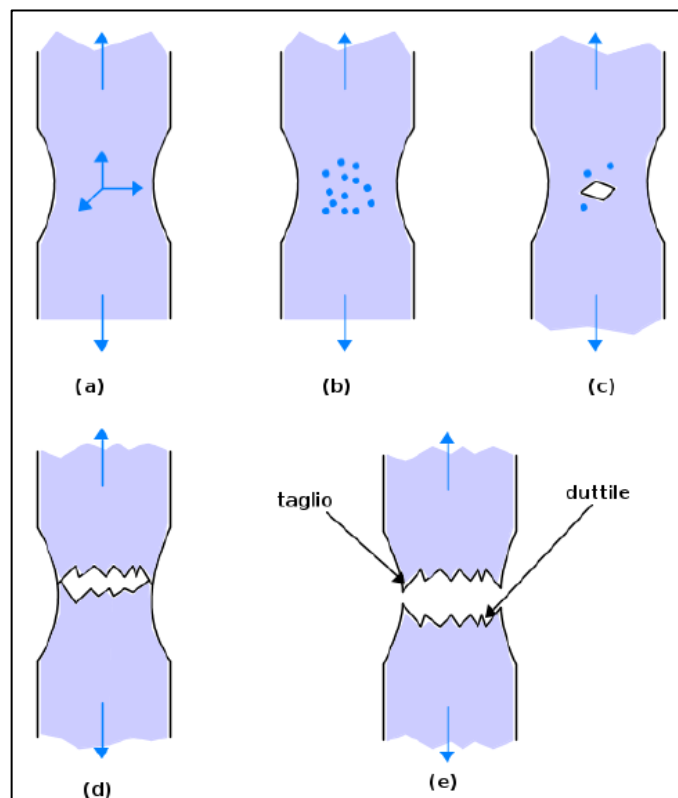


FIGURA 116: MECCANISMO DI FRATTURA

Dai confronti riportati in figure 112,113,114,115 si osserva che a parità di velocità di deformazione si ha un aumento delle dimensioni delle microcavità all'aumentare della temperatura. L'effetto della temperatura induce infatti una maggiore duttilità del materiale e riduce le concentrazioni di tensione. Si ha quindi che una temperatura alta non favorisce l'aumento dei siti di nucleazione, ma agevola la crescita di cavità, prima che il materiale ceda (ovvero prima che le cricche si uniscano in direzione perpendicolare alla direzione di applicazione dello sforzo).

## 5.10 Analisi risultati prove Nakazima

Per studiare la formabilità della lega AA6082 a caldo sono state condotte delle prove Nakazima per poter costruire la curva di formabilità del materiale a 350°C in condizione isoterme.

### 5.10.1 La prova

Ogni lamiera è stata sottoposta ad un ciclo termico di solubilizzazione, con conseguente raffreddamento fino a 350°C, temperatura alla quale la prova Nakazima è stata condotta.

La prova consiste nella perforazione della lamiera per mezzo di un punzone a caldo, scaldato precedentemente all'inizio della prova. Il punzone è ricoperto da un foglio di grafene per garantire una migliore omogeneità di temperatura durante la perforazione e per ottenere la frattura in corrispondenza dell'apice della cupola che si forma dopo la perforazione.

Le lamiere utilizzate sono di 7 geometrie diverse. Le diverse configurazioni permettono di ottenere i diversi stati di sollecitazioni, tali da poter descrivere la curva di formabilità del materiale. Le sette geometrie si differenziano nella larghezza della lamiera. In questo caso di studio sono state considerate le geometrie di riferimento secondo ISO12004. Le larghezze studiate sono: 30, 50, 60, 75, 100, 125, 210 mm. Prima della prova la lamiera viene verniciata per poter avere il pattern, analizzato dal programma *Aramis*, che permette di ricostruire i valori delle deformazioni maggiore e minore a partire dalle immagini ottenute durante la prova. La lamiera viene sottoposta a un ciclo di cottura della vernice per garantire una migliore adesione dello strato di vernice al materiale. Il ciclo prevede un riscaldamento fino a 150, 200 e 250°C con relativo mantenimento per due minuti. Ogni lamiera è successivamente sottoposta al ciclo termico per la solubilizzazione, che consiste in riscaldamento fino a 525°C, mantenimento a tale temperatura per un minuto e successivo raffreddamento fino a 350°C, temperatura alla quale viene effettuata la prova con il punzone. Il punzone si muove con velocità pari a 10 mm/s e mantenuto caldo a 350 °C durante il corso della prova.

Durante la prova, una fotocamera, montata sopra alla zona in cui avviene la perforazione della lamiera, acquisisce un numero di immagini tali da descrivere tutta la prova. La frequenza di acquisizione delle immagini è pari a 12 Hz. Le immagini sono poi rielaborate con *Aramis*. Da queste, si ricavano i valori di deformazione maggiore e deformazioni

minore precedenti alla frattura. Le coppie di punti che si ricavano, vengono poi mediate per ottenere la coppia di valori di deformazione che descrivono la curva di formabilità del materiale. Per ogni condizione di prova sono state eseguite almeno 2 ripetibilità.

**TABELLA 16 SINTESI SCHEMATICA DEI PARAMETRI DI PROCESSO PER LA PROVA NAKAZIMA**

Temperatura di solubilizzazione	Tempo di solubilizzazione	Velocità di raffreddamento	Temperatura di prova	Temperatura Punzone	Lubrificante	Frequenza acquisizioni immagini
[°C]	[s]	[°C]/[s]	[°C]	[°C]		[Hz]
525	60	15	350	350	grafite	12

La curva di formabilità del materiale è descritta attraverso le 7 geometria di lamiera secondo la normativa ISO 12004. Ogni geometria rappresenta un particolare stato di sollecitazione a partire dallo stato mono assiale al biassiale. La procedura di analisi è implementata grazie all' uso del software *Aramis* e si basa su:

- Creare la mesh per tutte le immagini;
- Considera l'ultima immagine prima della frattura;
- Tracciare almeno 7 sezioni parallele, distanti ognuna 2 mm;
- Le sezioni devono essere il più lunghe possibile, purché descrivano solo l'area di frattura;
- Tracciare almeno 7 sezioni per deformazioni minori >0: perpendicolari alla frattura;
- Tracciare almeno 7 sezioni per deformazioni minori <0: parallele alla frattura.

La figura 118 descrive la deformazione maggiore e la deformazione minore in corrispondenza di una sezione della zona di frattura, prima che la frattura avvenga. La presenza di un picco pronunciato per la deformazione maggiore è indicativa di una deformazione post strizione a causa dell'elevata sensibilità alla velocità di deformazione a 350°C. questo fenomeno si può osservare per tutte le condizioni di test.

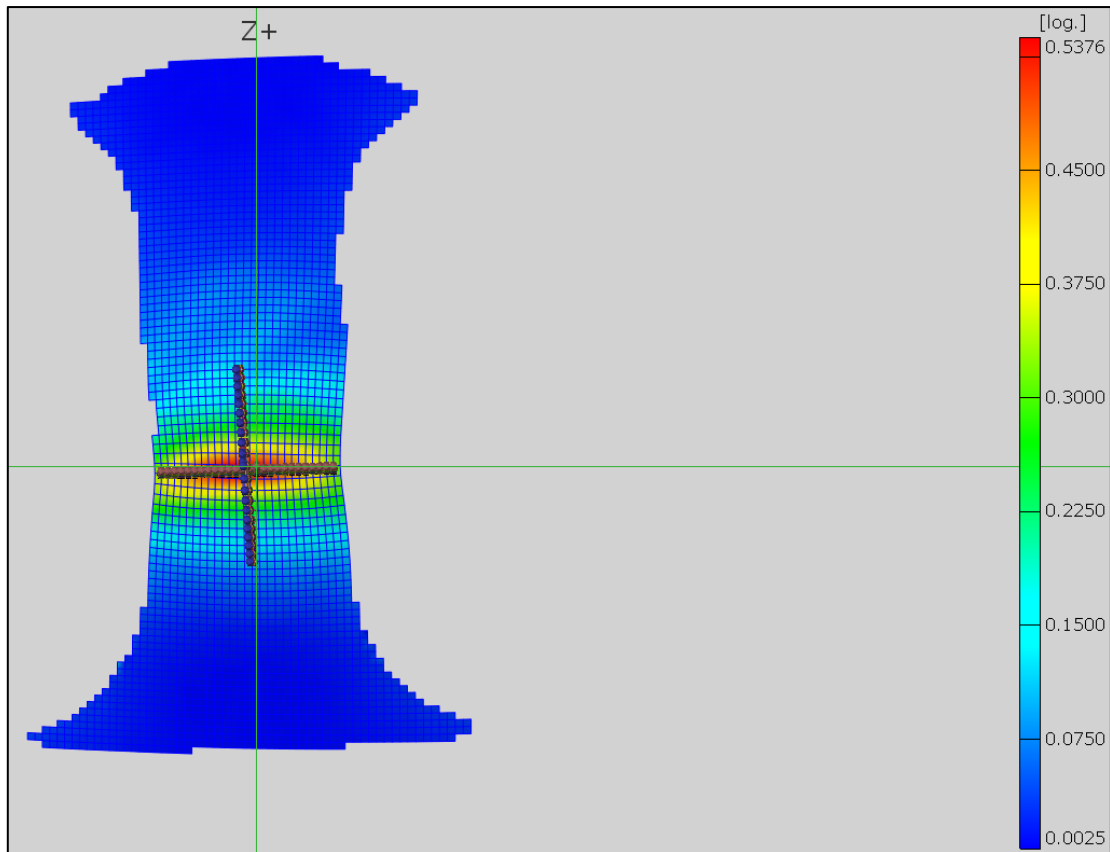


FIGURA 117 CAMPIONE GEOMETRIA 30 CM ANALIZZATO TRAMITE ARAMIS GOM

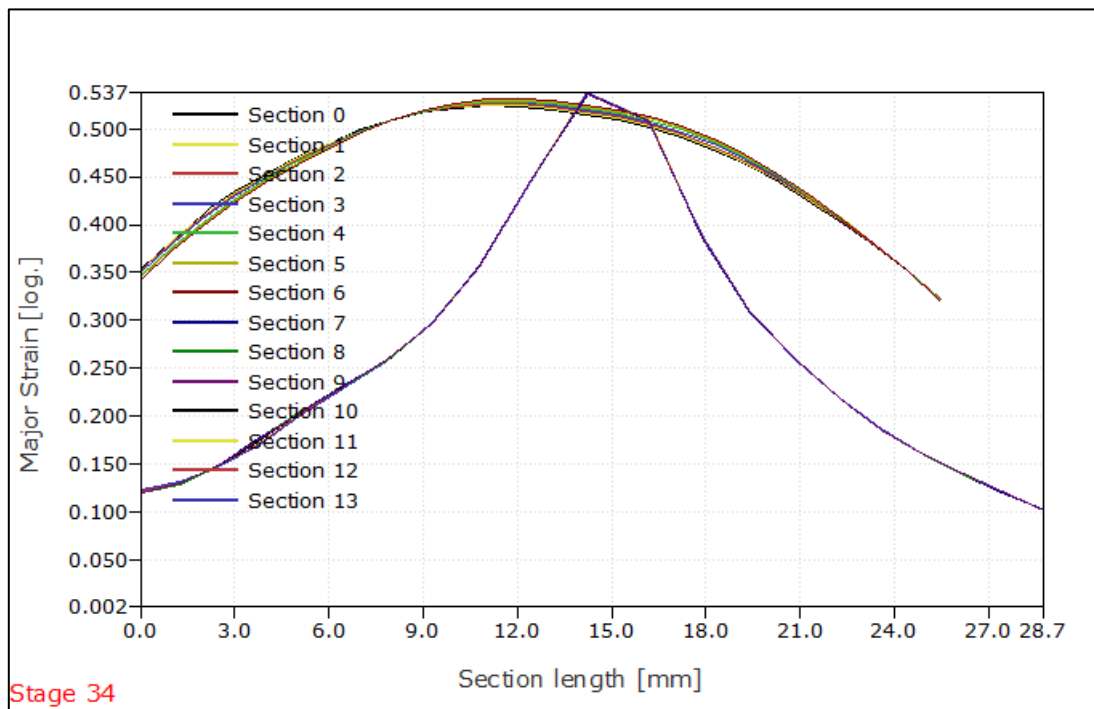
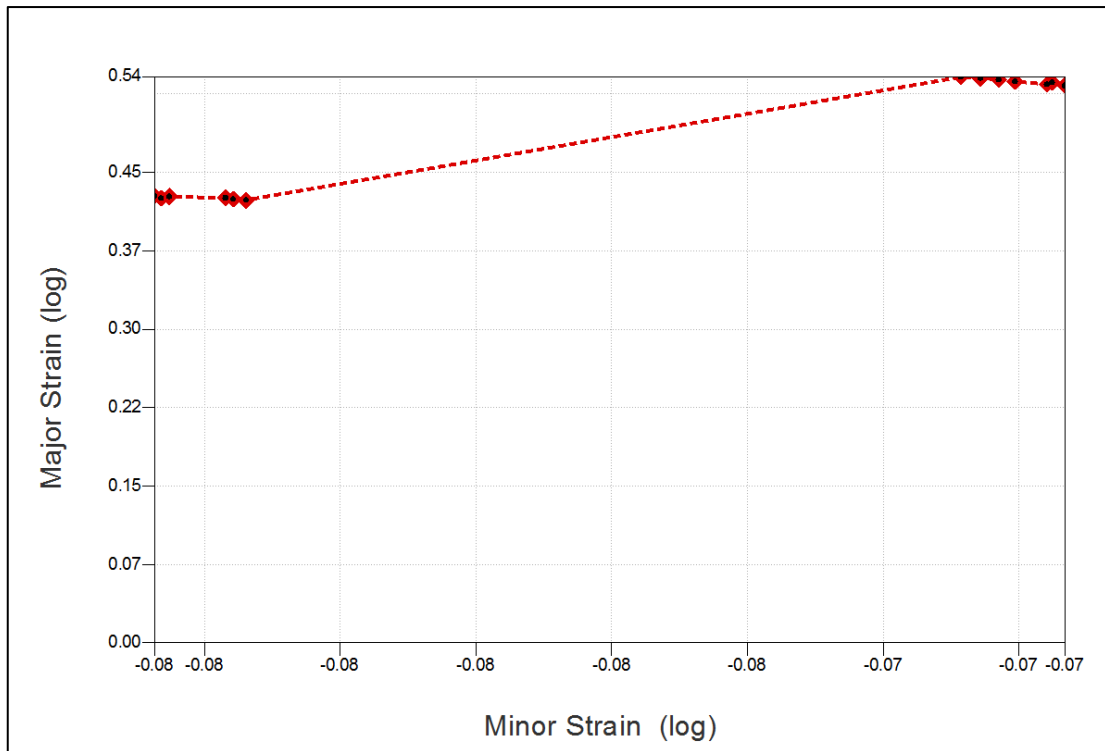
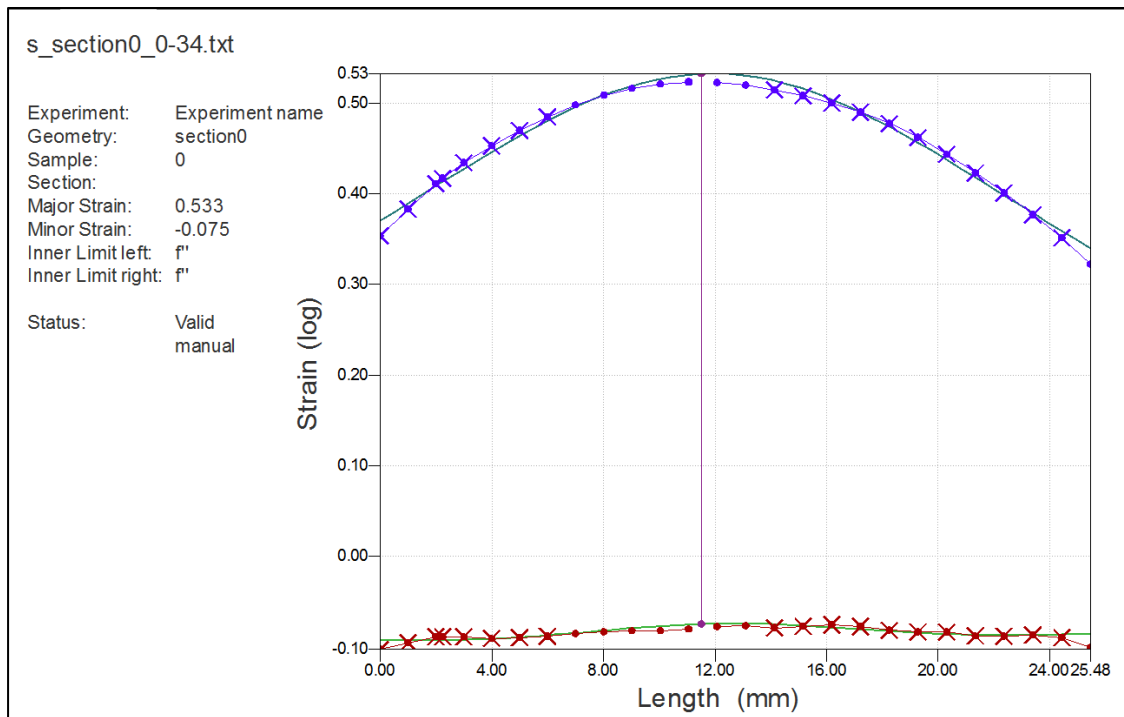


FIGURA 118 GRAFICO RAPPRESENTATIVO DEI VALORI DI DEFORMAZIONE A MAGGIORE PER LE SEZIONI PARALLELE E TRASVERSALI ALLA ZONA DI FRATTURA PER LA GEOMETRIA 30 CM





**FIGURA 119** GRAFICO DI DEFORMAZIONE MAGGIORE E MINORE PER UN CAMPIONE DI LARGHEZZA 30 CM



**FIGURA 120** GRAFICO CHE DESCRIVE L'INTERPOLAZIONE DEI DATI OTTENUTI DA ARAMIS GOM PER L'ANALISI DI DEFORMAZIONE LUNGO LA ZONA DI FRATTURA PER LA GEOMETRIA 30 CM

Con questa procedura la valutazione delle deformazioni maggiori e minore non è influenzata dalla strizione che il materiale subisce durante il corso della prova. La massima deformazione che il materiale può subire è determinata attraverso un'interpolazione. Ogni

condizione di prove fornisce quindi il valore massimo di deformazione prima di rottura per il relativo stato di tensione descritto e che serve inoltre per tracciare la curva di formabilità del materiale.

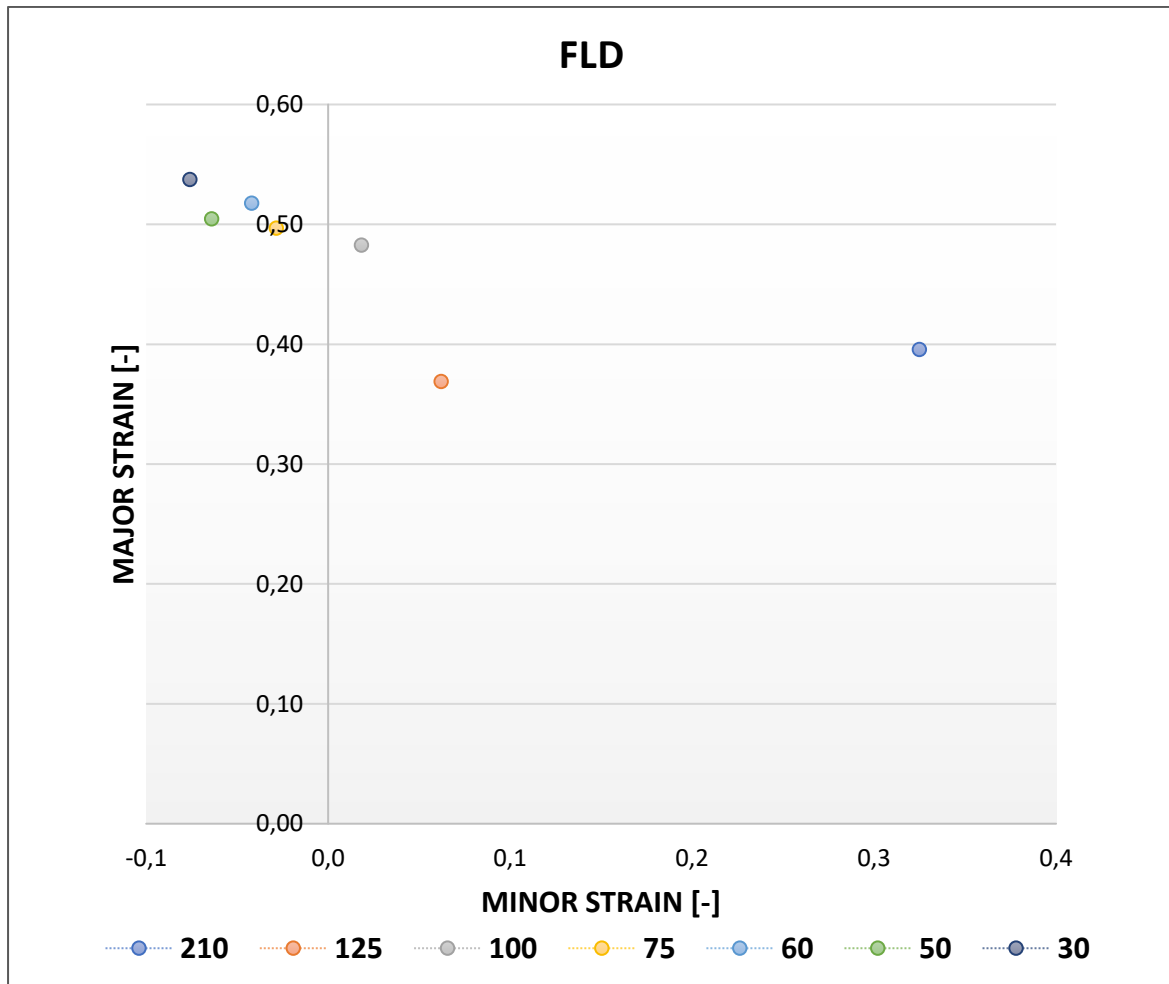


FIGURA 121: CURVA DI FORMABILITÀ A 350°C DELLA LEGA AA6082

## **5.11 Analisi e interpretazione dei risultati di lega AA7xxx**

In questo capitolo verranno presentati i dati di rielaborazione delle prove di trazione a caldo per una lega di alluminio di classe 7000. L'argomento era una commissione per l'azienda francese Constellium. Per segreto aziendale non è stata fornita il nome caratteristico della lega analizzata.

Per ogni prova sono state valutate la curva di forza e corsa del pistone della macchina e la curva di trazione reale del materiale. In seguito, sono poi state calcolate sia la deformazione a frattura di ogni provino, sia il valore dell'anisotropia per la valutazione dell'anisotropia.

### **5.11.1 Procedura prova**

Il test prevede un trattamento di solubilizzazione della lega prima della prova di trazione. Il provino viene scaldato fino a 480°C con velocità pari a 2.5 °C/s, solubilizzato a tale temperatura per 10 minuti e successivamente raffreddato in aria calma fino a 420°C, in aria forzata da 420 a 300° 200°C a seconda della prova. La prova di trazione è stata eseguita per 3 valori di velocità di deformazione pari a 0.1, 0.01, 0,001 s<sup>(-1)</sup>. Ogni prova ha ripetibilità pari a 2.

Le prova di trazione sono state eseguite a 420, 300, 200°C. Il raffreddamento è stato realizzato in aria ferma da 480°C a 420°C, mentre da 420°C a 300 o 200°C in aria forzata, con velocità pari a 75 °C/s.

### **5.11.2 Risultati delle curve di Forza Corsa.**

in questo paragrafo si riportano i grafici relativi alla curva di Forza corsa del pistone della macchina di trazione alle diverse temperature e velocità di deformazione.

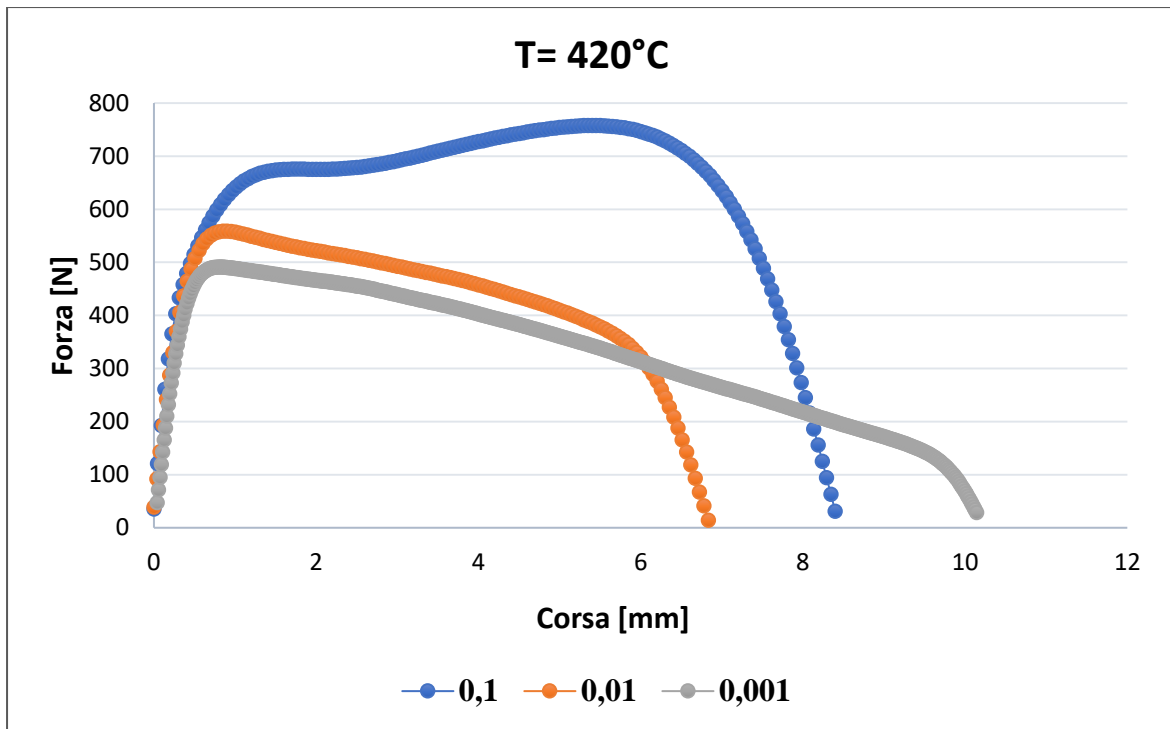


FIGURA 122: CURVE DI FORZA CORSA A 420°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

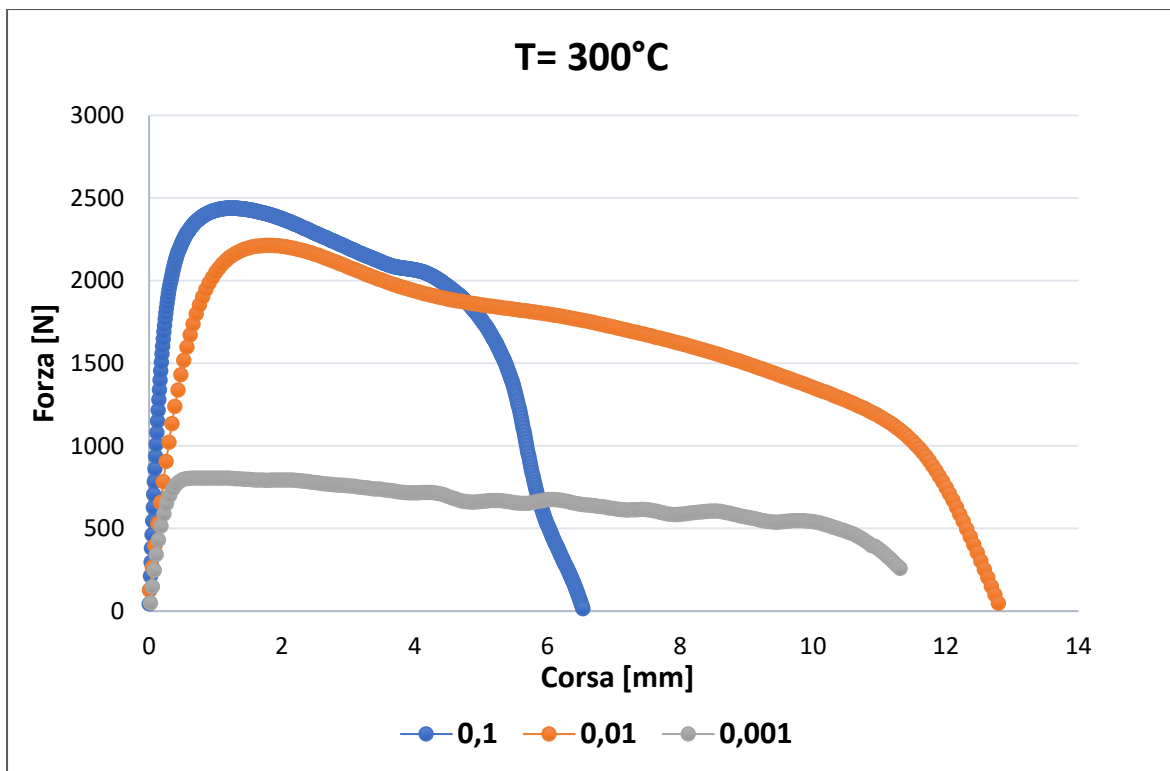
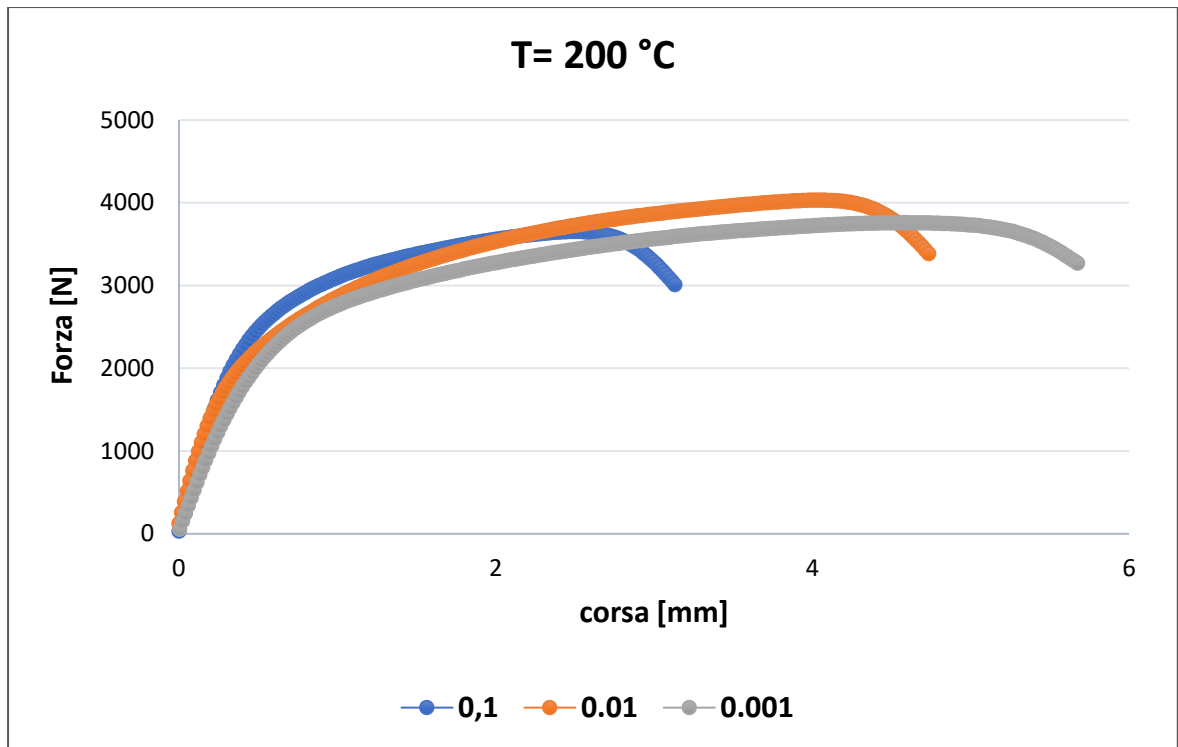


FIGURA 123 CURVE DI FORZA CORSA A 420°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE



**FIGURA 124** CURVE DI FORZA CORSA A 420°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

I tre grafici descrivono la curva Forza-Corsa delle prove in funzione della velocità di deformazione con temperatura di prova impostata. Si osserva come l'effetto della temperatura vada a ridurre la Forza necessaria per tirare il provino durante il test e ad incrementare la corsa del pistone.

Le curve descritte a 420 e 300°C presentano un tipico andamento addolcente e presentano una forte sensibilità alla velocità di deformazione. Con l'aumentare della velocità di deformazione, si ha un aumento della forza massima per portare a rottura il provino. Le curve effettuate a 200°C hanno invece un andamento incrudente e poca sensibilità alla velocità di deformazione. La differenza è dovuta all'intervallo di temperatura di processo. Le leghe di alluminio hanno una temperatura di fusione che varia da 510 a 650°C. durante il corso delle prove si è osservato che la temperatura di fusione per questa lega è sui 500°C. il dato non è stato fornito dall'azienda per mantenere il segreto aziendale sulle caratteristiche. Assumendo una temperatura di fusione pari a 500°C, si ha che la temperatura omologa è pari a 250°C. in conclusioni si ha che per temperature maggiori di 250°C si hanno lavorazioni a caldo, mentre per quelli inferiori si entra nel campo di lavorazioni a tiepido e successivamente in quello delle lavorazioni a freddo. In conclusione, si ha che le prime due temperature corrispondono all'intervallo tipico delle lavorazioni a caldo, mentre la terza temperatura corrisponde all'intervallo di lavorazioni a tiepido.

In seguito, sono stati riportati i grafici delle stesse curve di Forza-Corsa in funzione della temperatura, con velocità di deformazione impostata. Dai grafici si osserva come l'effetto della temperatura sia positivo sulla variazione della forza massima in tutti e tre i casi. L'effetto di riduzione della forza non è costante nelle diverse velocità di deformazione. A  $0.0001 \text{ s}^{-1}$  la curva di Forza-corsa è più sensibile rispetto alle altre due velocità analizzate infine si osserva come il valore assunto dalla Forza massima per le prove a  $200^\circ\text{C}$  sia insensibile alla velocità di deformazione, e abbia valori molto più elevati rispetto a quelli ottenuti per le  $420$  e  $300^\circ\text{C}$ .

Nell'ultimo grafico è stato riportato un confronto fra due curve forza-corsa a  $0.01 \text{ s}^{-1}$ . La prima curva è stata eseguita a temperatura ambiente, senza trattamento di solubilizzazione, mentre la seconda è una curva a  $200^\circ\text{C}$  dopo solubilizzazione. Si osserva che anche se a  $200^\circ\text{C}$  il materiale assume un comportamento incrudente, l'effetto di una temperatura più alta è comunque positivo per la riduzione della Forza massima per rompere il provino.

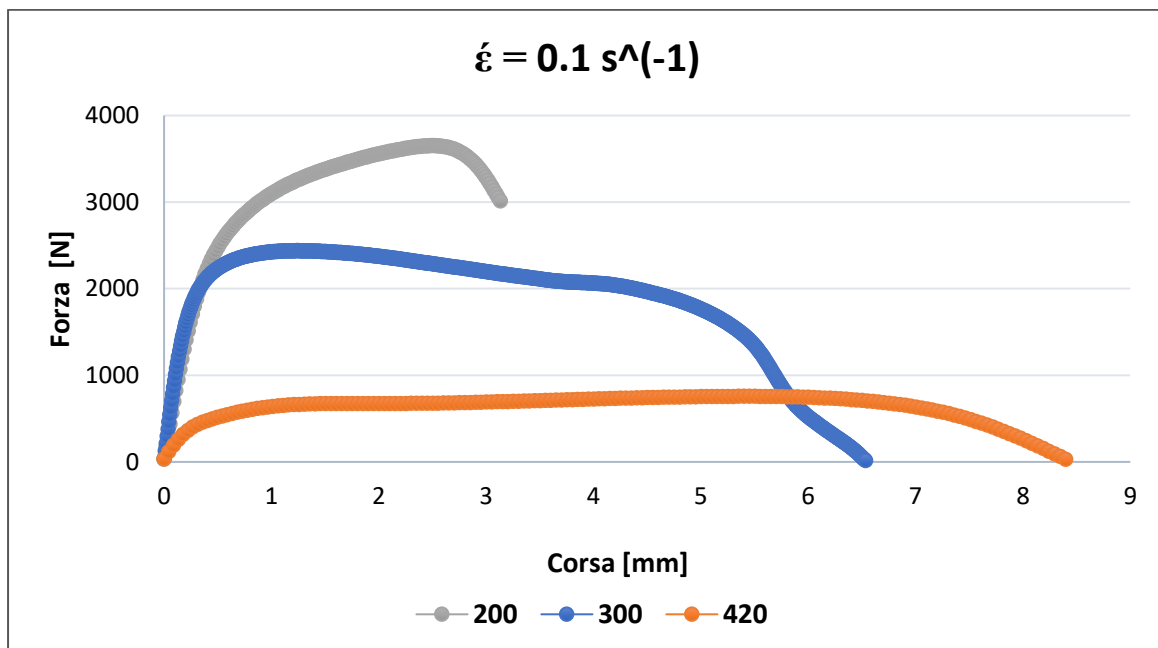


FIGURA 125: CURVE DI FORZA CORSA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

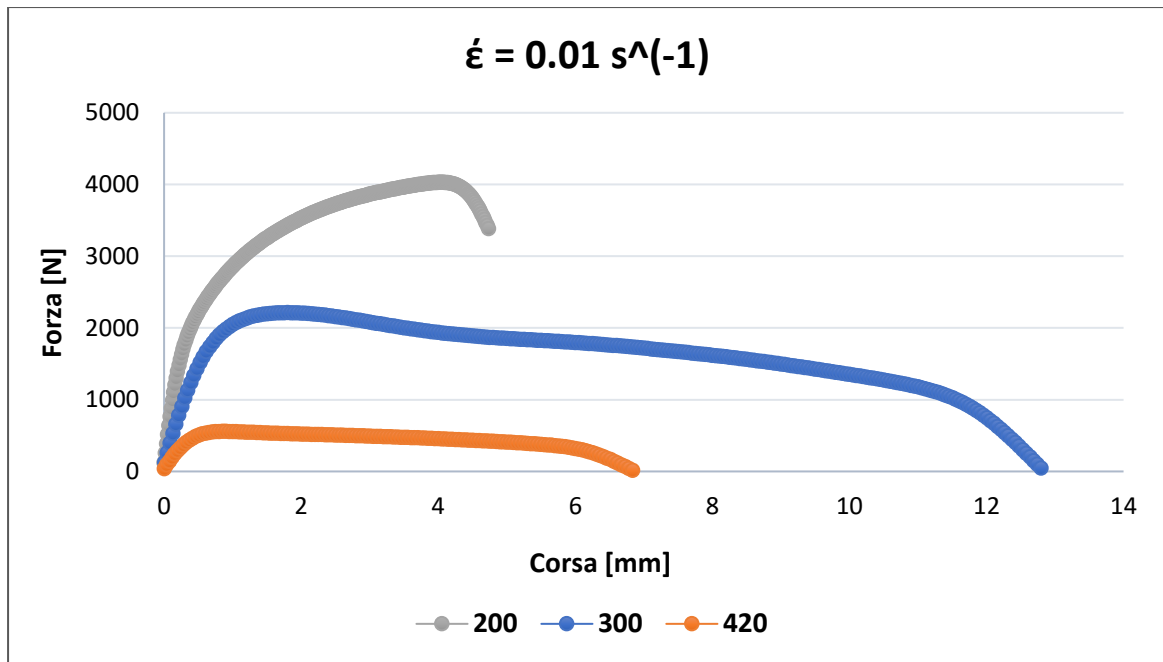


FIGURA 126 CURVE DI FORZA CORSA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.01 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

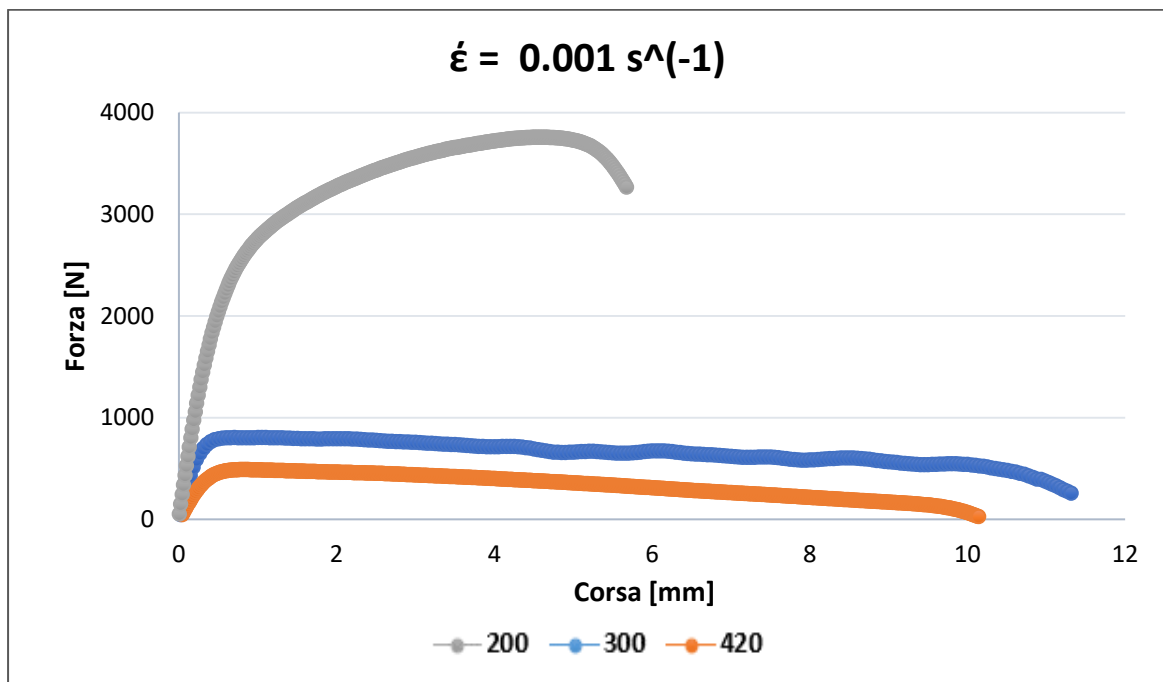


FIGURA 127 CURVE DI FORZA CORSA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.001 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

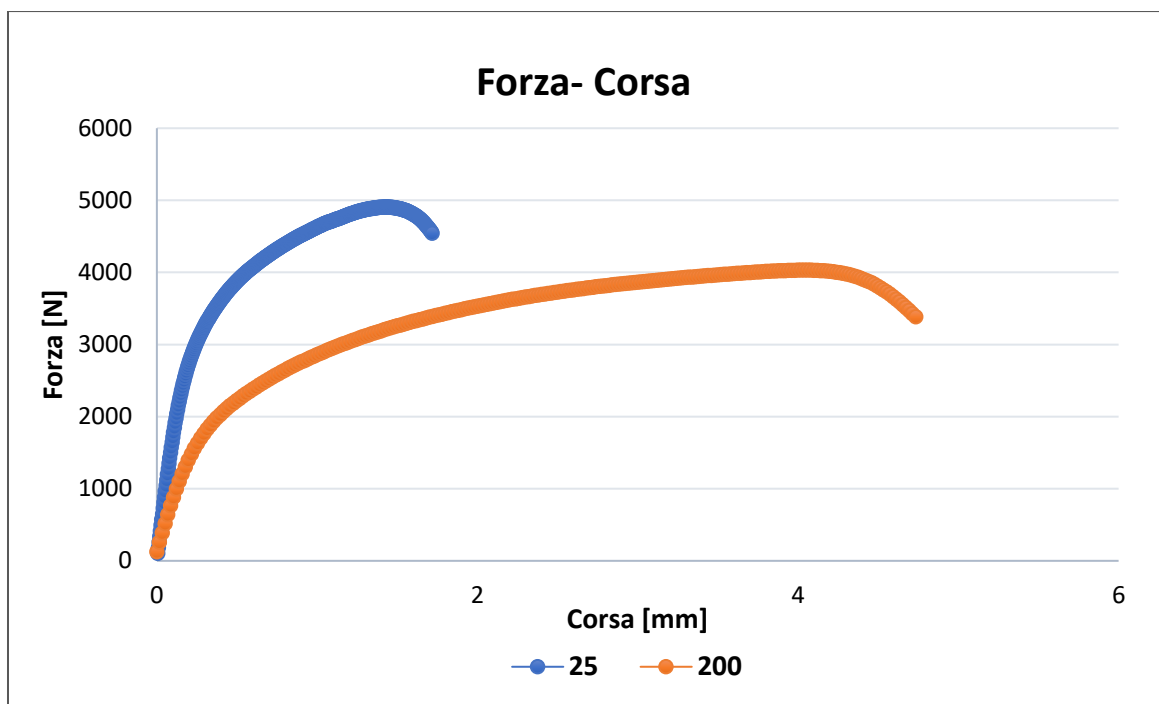


FIGURA 128 CURVE DI FORZA CORSA ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.001 \text{ s}^{-1}$  A  $25^\circ\text{C}$  E A  $200^\circ\text{C}$

### 5.11.3 Risultati delle curve di trazione con sforzo e deformazione reale

I grafici riportati descrivono le curve di trazione con sforzo reale, derivato dalla rielaborazione dei dati di forza e corsa delle prove, e la deformazione reale ottenuta dalla rielaborazione delle immagini attraverso Aramis. Dai grafici si osserva che a temperatura fissata, il materiale è molto sensibile alla velocità di deformazione e esiste una relazione di proporzionalità tra lo sforzo reale e la velocità di deformazione. Come dai grafici Forza-Corsa descritti in precedenza, si osserva che esiste una seconda proporzionalità indiretta tra la velocità di deformazione e la deformazione reale del materiale. In conclusione, a temperatura fissata, al diminuire della velocità di deformazione, diminuisce lo sforzo reale e aumenta la deformazione reale del materiale. Questa conclusione è valida per le temperature di  $420^\circ\text{C}$  e  $300^\circ\text{C}$ . per la temperatura di  $200^\circ\text{C}$  la sensibilità alla velocità di deformazione non è presente, e quindi non c'è una riduzione sensibile dello sforzo; si ha comunque un aumento della deformazione reale al diminuire della velocità di deformazione.

Come per le curve Forza-Corsa le stesse di trazione sono state rappresentate al variare della temperatura con velocità di deformazione fissata. Si osservano le stesse conclusioni descritte per le curve di Forza-Corsa.



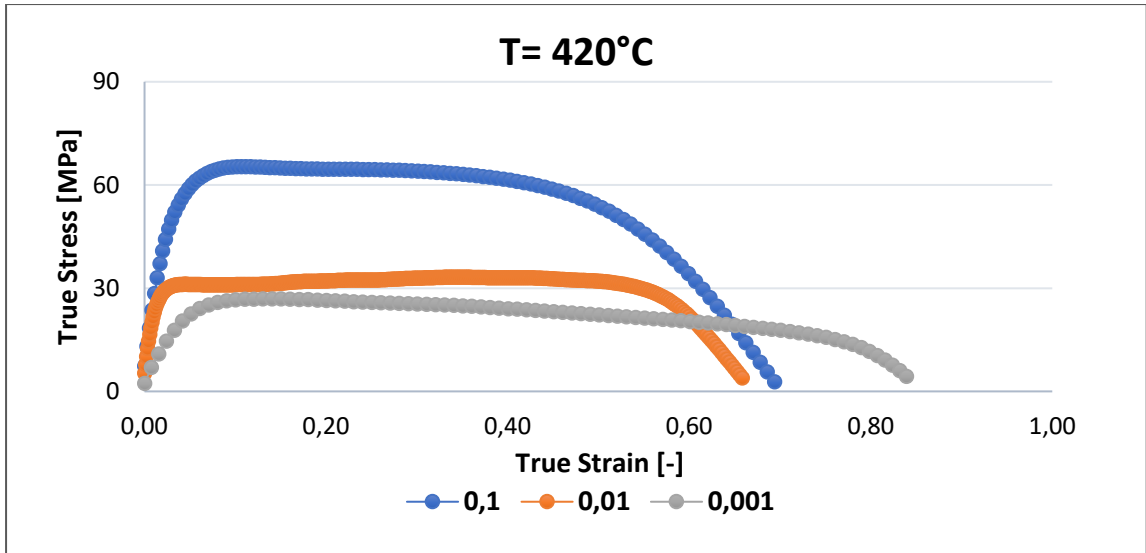


FIGURA 129 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 420°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

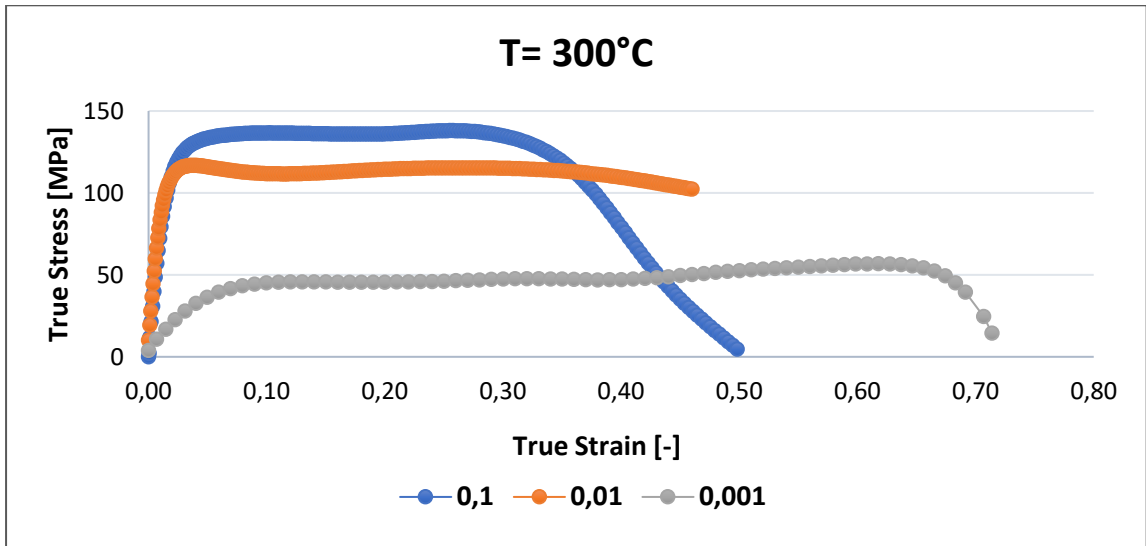


FIGURA 130 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 300°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

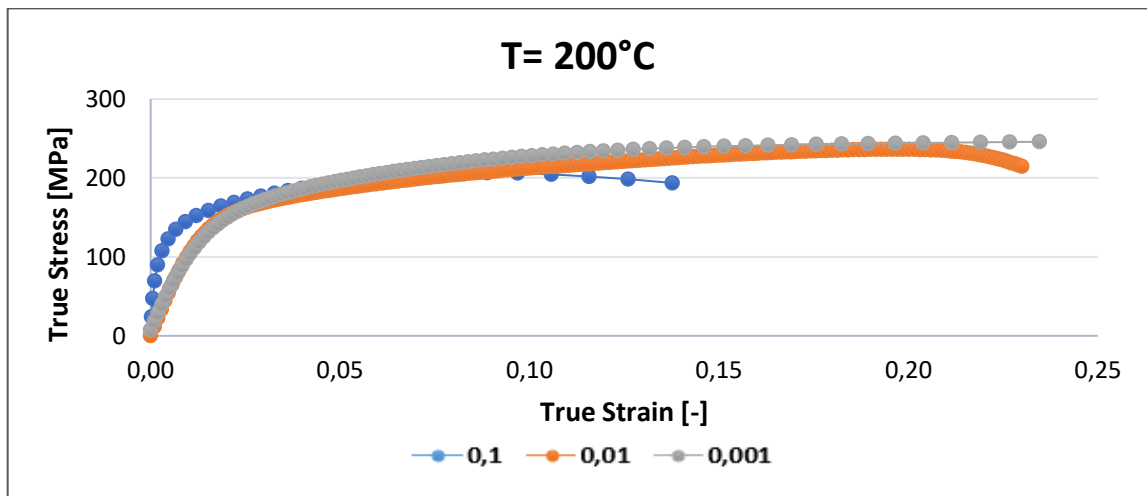


FIGURA 131 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI A 200°C AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE

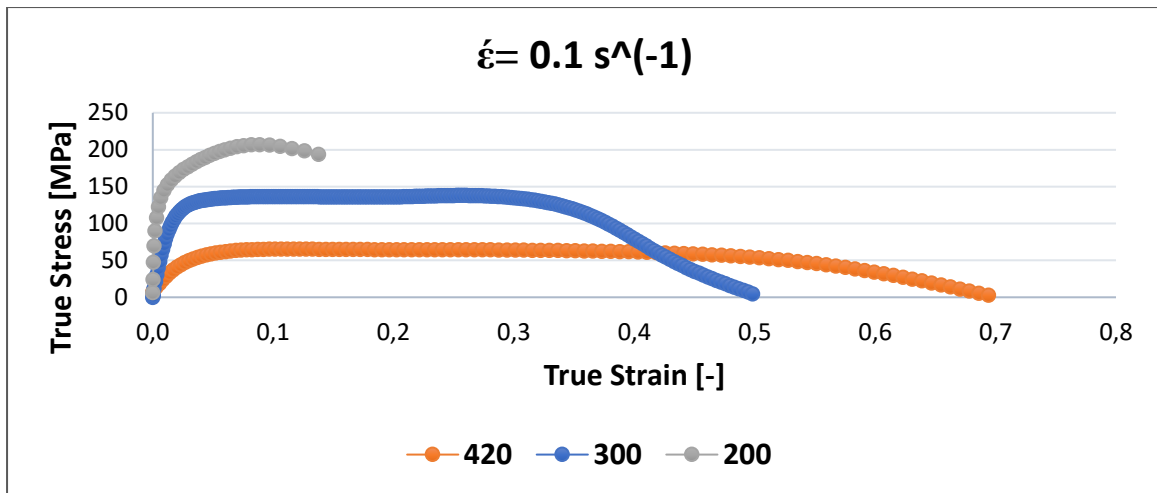


FIGURA 132 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

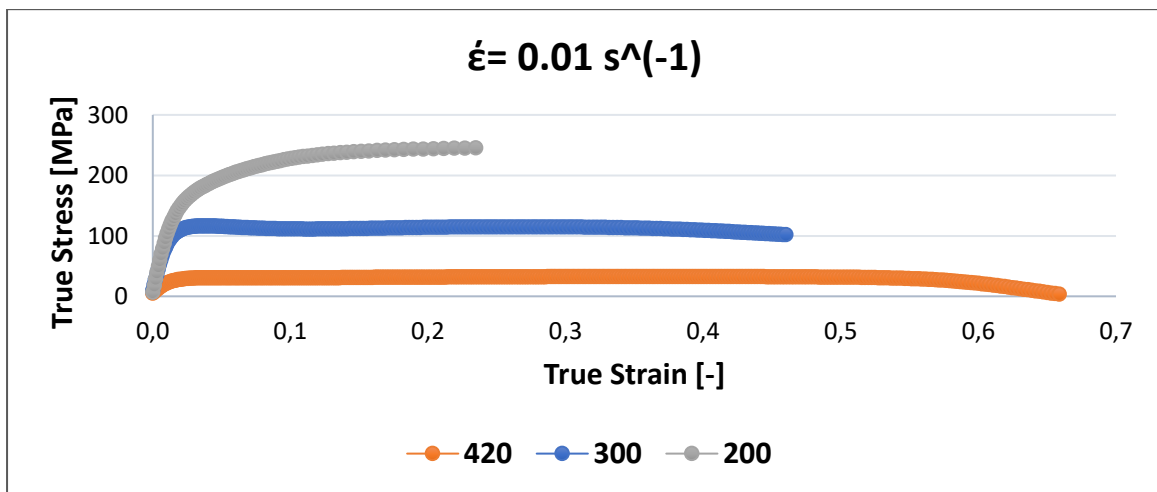


FIGURA 133 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.01 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

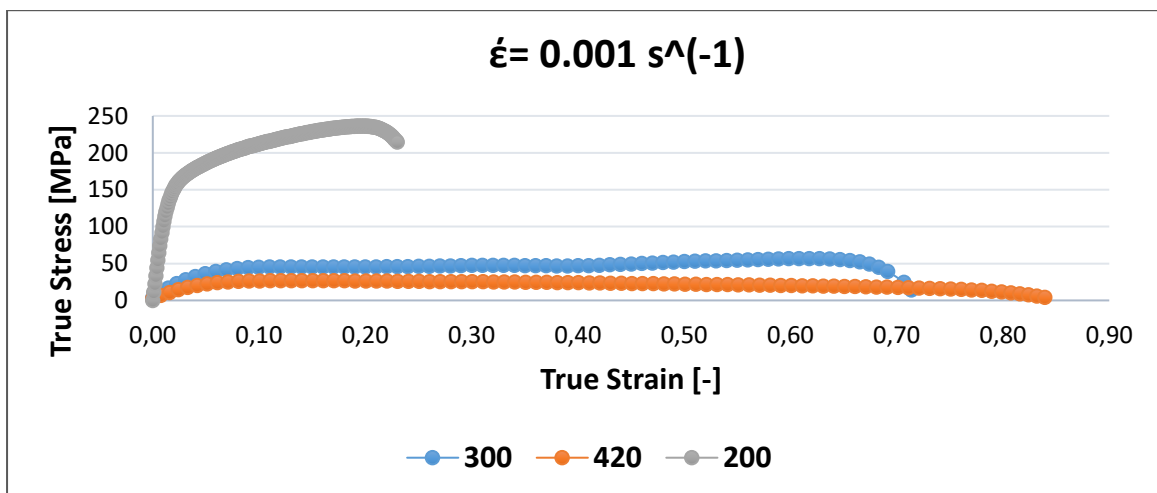


FIGURA 134 CURVE DI SFORZO E DEFORMAZIONE REALI ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.001 \text{ s}^{-1}$  AL VARIARE DELLA TEMPERATURA

## 5.12 Anisotropia della lega AA7xxx

Per ogni prova condotta a diversa temperatura è stata valutato il valore assunto dall'anisotropia. I valori di anisotropia sono stati ottenuti tramite l'elaborazione dei dati di deformazione ottenuti dall'analisi delle immagini di ogni prova con il software di Aramis. Per ogni prova è stata presa l'immagine corrispondente alla deformazione massima, prima della frattura. Su questa immagine sono stati analizzati e elaborati i dati ottenuti da tre punti locali nella zona di massima deformazione presente nell'immagine. Si considerano i valori di R dei diversi provini al raggiungimento di un allungamento del 20%.

Nella tabella vengono riportati i valori ottenuti per l'anisotropia. Per i valori ottenuti si deduce che il materiale è fortemente anisotropo poiché assume valori notevolmente inferiori all'unità.

Per le leghe di alluminio i valori tipici dell'anisotropia normale media ricadano all'interno dell'intervallo di 0.6-0.8. Si osserva che i valori riportati nelle tabelle sono generalmente minori

TABELLA 17 ANISOTROPIA  $\dot{\epsilon} = 0.1 [s^{-1}]$

$\dot{\epsilon} = 0.1 [s^{-1}]$	
Temperatura	R
[°C]	[-]
420	0.564
300	0.534
200	0.2

TABELLA 18 ANISOTROPIA  $\dot{\epsilon} = 0.01 [s^{-1}]$

$\dot{\epsilon} = 0.01 [s^{-1}]$	
Temperatura	R
[°C]	[-]
420	0.696
300	0.602
200	0.259

TABELLA 19 ANISOTROPIA  $\dot{\epsilon} = 0.001 [s^{-1}]$

$\dot{\epsilon} = 0.001 [s^{-1}]$	
Temperatura	R
[°C]	[-]
420	0.541
300	0.609
200	0.536

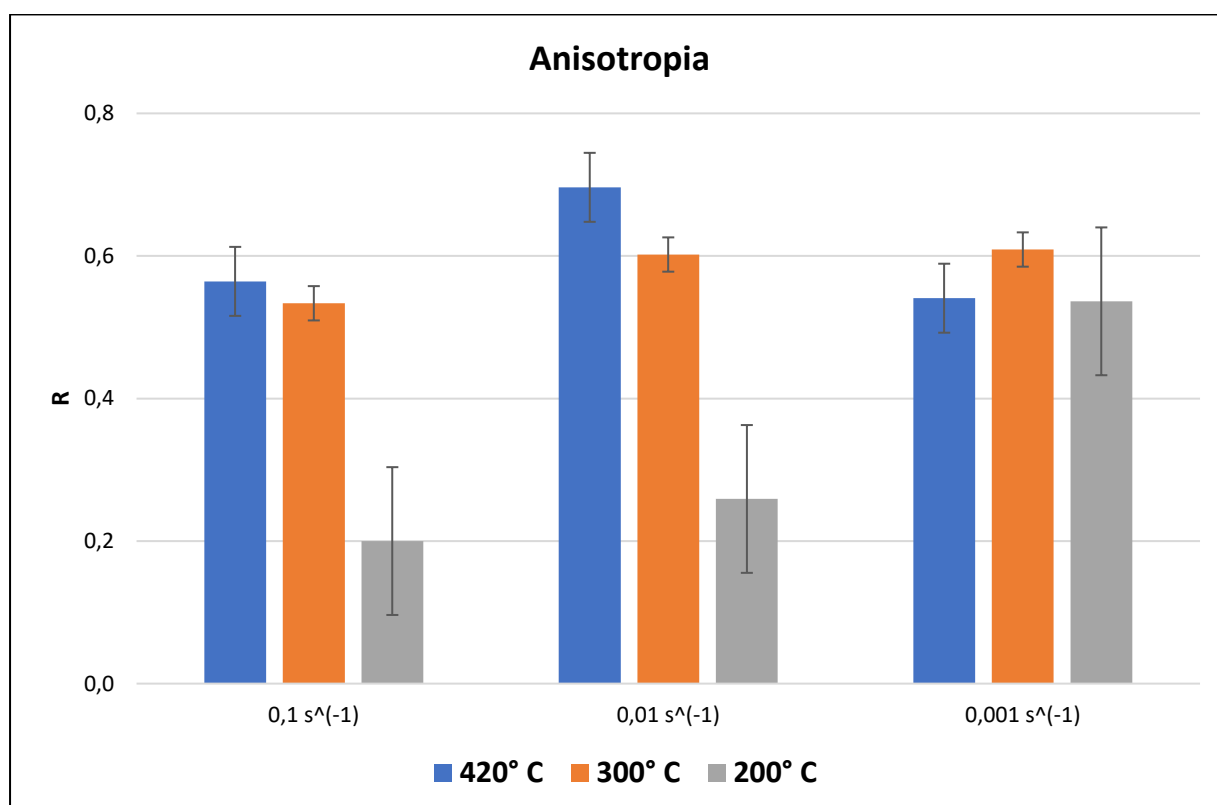


FIGURA 135: ISTOGRAMMA DI ANISOTROPIA PER LA LEGA AA7xxx

### 5.13 Deformazione a frattura della lega AA7xxx

Per ogni campione è stata calcolata la deformazione a frattura con la seguente formula:

$$\epsilon_{frattura} = \ln\left(\frac{A_{iniziale}}{A_{finale}}\right) \quad (5.3)$$

I risultati sono stati poi riportati in un grafico per descrivere la variazione della deformazione a frattura per tutte le condizioni di prova eseguite. Si osserva dai valori riportati come ci sia poca sensibilità della temperatura nel caso di 420 e 300°C, mentre per

i valori relativi a 200°C è presente una forte differenza dovuta al cambio di intervallo da lavorazioni a caldo a quello tiepido.

**TABELLA 20 VALORI DI AREA FRATTURA E DEFORMAZIONI A FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 0.1 [s^{-1}]$**

<b><math>\dot{\epsilon} = 0.1 [s^{-1}]</math></b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [<math>A_f</math>]</b>	<b>Deformazione a frattura [<math>\epsilon_f</math>]</b>
<i>[°C]</i>	<i>[mm<sup>2</sup>]</i>	<i>[-]</i>
420	6.97	1,00
300	7.38	0,95
200	14.72	0,26

**TABELLA 21 VALORI DI AREA A FRATTURA E DEFORMAZIONE DI FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 0.01 [s^{-1}]$**

<b><math>\dot{\epsilon} = 0.01 [s^{-1}]</math></b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [<math>A_f</math>]</b>	<b>Deformazione a frattura [<math>\epsilon_f</math>]</b>
<i>[°C]</i>	<i>[mm<sup>2</sup>]</i>	<i>[-]</i>
420	6.54	1,07
300	6.84	1,02
200	13.30	0,36

**TABELLA 22 VALORI DI AREA A FRATTURA E DEFORMAZIONE DI FRATTURA  $\dot{\epsilon} = 0.001 [s^{-1}]$**

<b><math>\dot{\epsilon} = 0.001 [s^{-1}]</math></b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Area a frattura [<math>A_f</math>]</b>	<b>Deformazione a frattura [<math>\epsilon_f</math>]</b>
<i>[°C]</i>	<i>[mm<sup>2</sup>]</i>	<i>[-]</i>
420	6.62	1,09
300	6.40	1,10
200	12.66	0,41

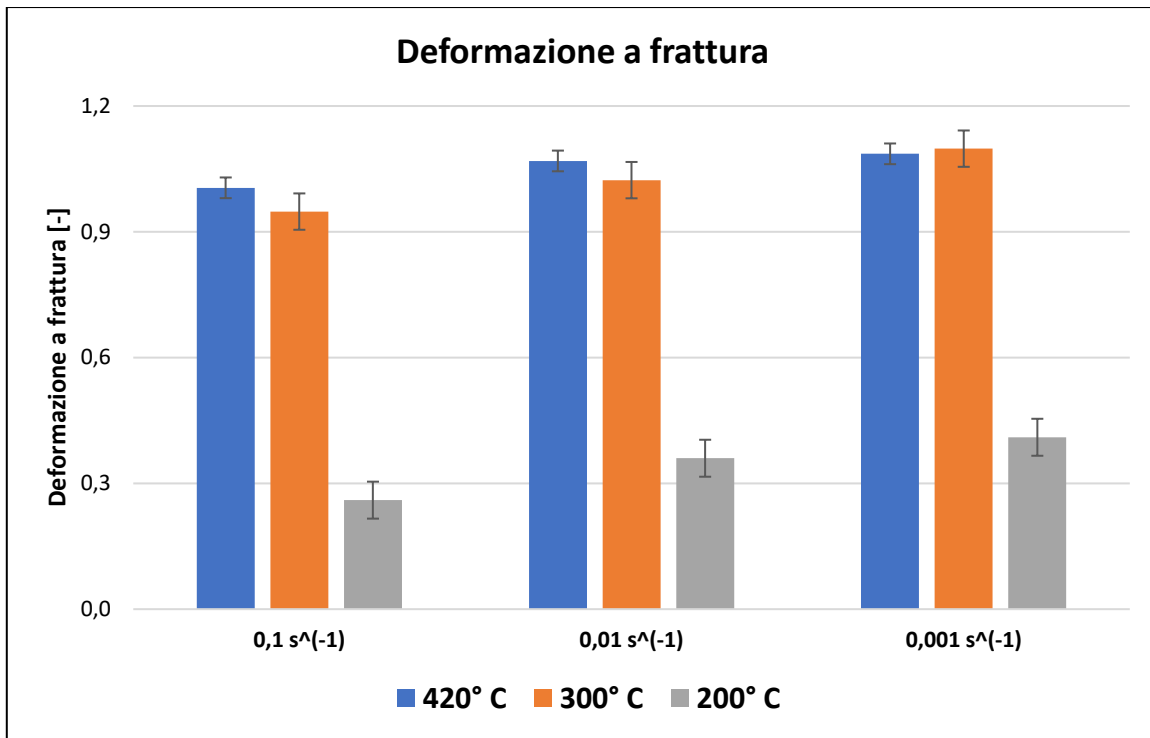


FIGURA 136 ISTOGRAMMA DI DEFORMAZIONE A FRATTURA PER LA LEGA AA7XXX

I grafici mostrano come all'aumentare della temperatura si abbia un aumento del valore della deformazione a frattura, che accompagna la riduzione dell'area a frattura. Si osserva come per una stessa temperatura il valore della deformazione a frattura sia simile tra i campioni tirati a valori diversi di velocità di deformazione, ma questo è da addurre anche all'incertezza della misura causata dalla morfologia stessa del campione. Si ha infatti che il provino presenta una superficie di rottura molto assottigliata in punta che risulta di difficile misura con gli strumenti a disposizione.

## 5.14 Analisi frattografica per AA7xxx

L'analisi frattografica è stata condotta mediante l'utilizzo del microscopio elettronico a scansione settando il detector degli elettroni secondari (ETD). Per visualizzare al meglio le superfici di frattura e capirne la conformazione, l'analisi è stata effettuata sulla sezione trasversale. Nel seguito vengono dunque proposti i risultati ottenuti per i campioni aventi direzione di laminazione 0° alla velocità di deformazione di 0.1 s<sup>-1</sup>. La scelta della direzione di laminazione e della velocità di deformazione non influisce sulla qualità della valutazione della superficie a frattura. Le immagini sono state acquisite a 200X, 500X, 1000X e 2000X.

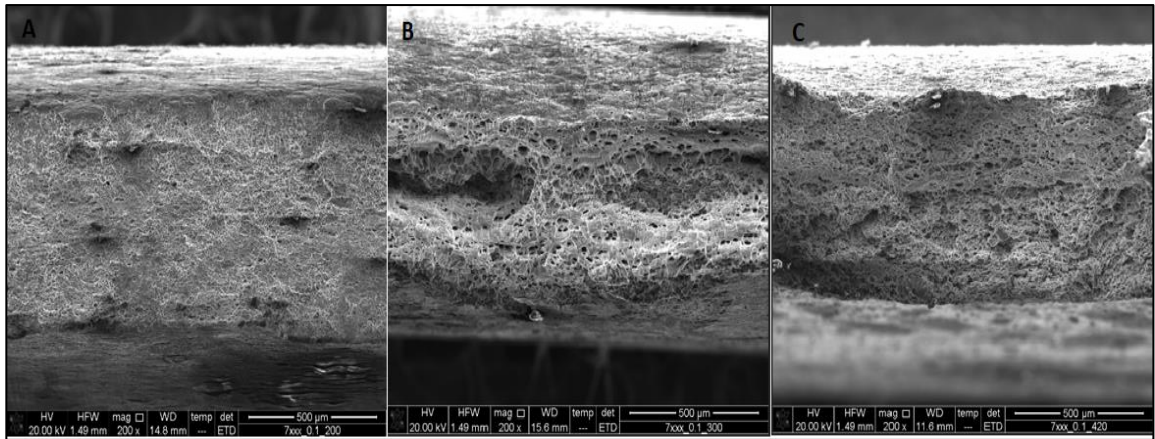


FIGURA 137 IMMAGINI AL SEM DI AA7xxx 200X A)200°C, B) 300°C; c)420°C

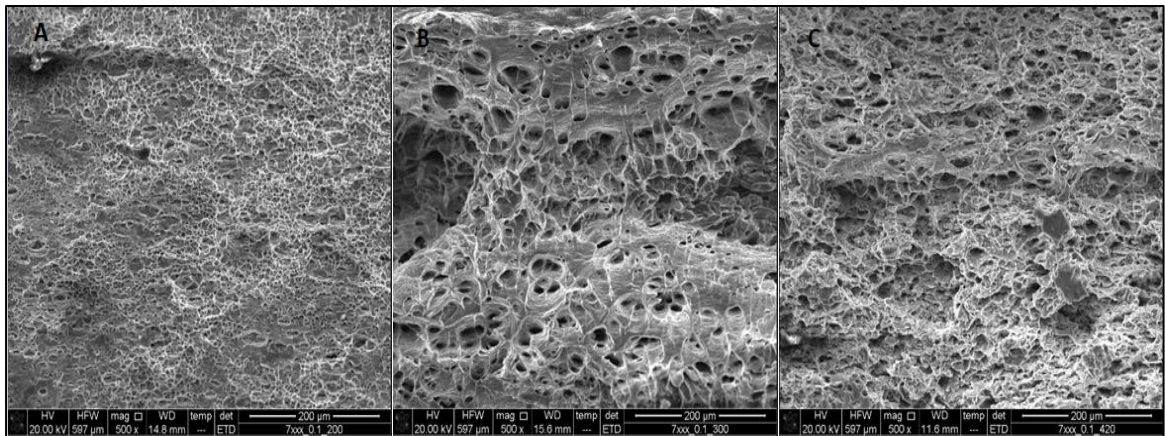


FIGURA 138 IMMAGINI AL SEM DI AA7xxx 500X A)200°C, B) 300°C; c)420°C

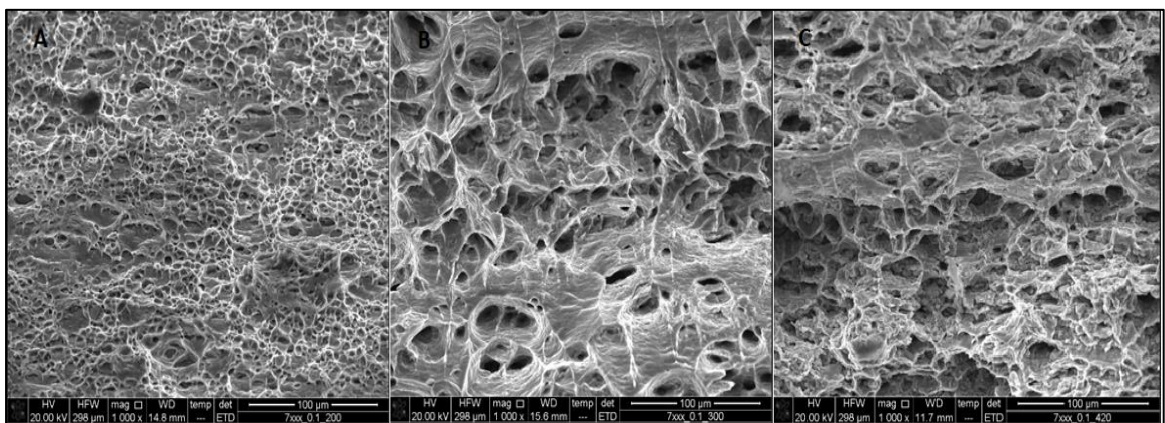


FIGURA 13972 IMMAGINI AL SEM DI AA7xxx 10200X A)200°C, B) 300°C; c)420°C

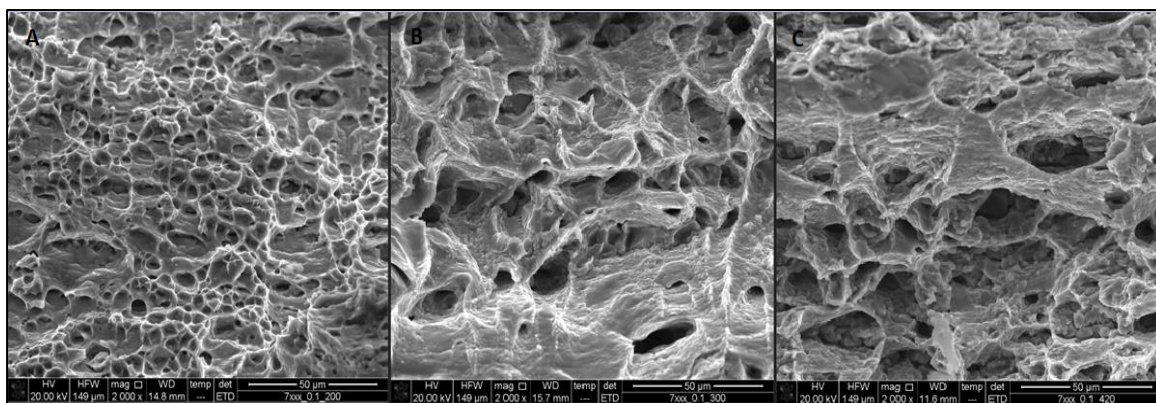


FIGURA 140 IMMAGINI AL SEM DI AA7xxx 2000X A)200°C, B) 300°C; c)420°C

La discussione delle immagini è analoga a quella presentata nel paragrafo 5.9 relativo all'analisi frattografica della lega AA6082.

## 5.15 Confronto delle leghe

### 5.15.1 Anisotropia

TABELLA 23 ANISOTROPIA DELLA LEGA AA6082 E DI AA7xxx ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$

ANISOTROPIA (R)		
$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
Temperatura	AA6082	AA7xxx
[°C]	[-]	[-]
420	0.814	0.564
300	0.876	0.534
200	0.81	0.2

TABELLA 24 ANISOTROPIA DELLA LEGA AA6082 E DI AA7xxx ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.01 \text{ s}^{-1}$

ANISOTROPIA (R)		
$\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ [s}^{-1}\text{]}$		
Temperatura	AA6082	AA7xxx
[°C]	[-]	[-]
420	0.827	0.696
300	0.737	0.602
200	0.798	0.259



dai valori in tabella si osserva che a parità di velocità di deformazione le leghe presentino valori di anisotropia molto diversi, ma comunque inferiori a 1. In entrambi i casi il materiale è anisotropo. La lega AA7xxx presenta valori di R inferiori rispetto alla lega AA6082. Si può dedurre che il materiale tirato sia più duttile rispetto alla lega AA6082 a seguito del maggior tempo di mantenimento.

### 5.15.2 Deformazione a frattura

**TABELLA 25** DEFORMAZIONE A FRATTURA DELLA LEGA AA6082 E DI AA7XXX ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.1 \text{ s}^{-1}$

<b>DEFORMAZIONE A FRATTURA [<math>\epsilon_f</math>]</b>		
<b><math>\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ [s}^{-1}\text{]}</math></b>		
<b>Temperatura</b>	<b>AA6082</b>	<b>AA7xxx</b>
<i>[°C]</i>	<i>[-]</i>	<i>[-]</i>
420	1.44	1,00
300	1.03	0,95
200	0.61	0,26

**TABELLA 26** DEFORMAZIONE A FRATTURA DELLA LEGA AA6082 E DI AA7XXX ALLA VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE DI  $0.01 \text{ s}^{-1}$

<b>DEFORMAZIONE A FRATTURA [<math>\epsilon_f</math>]</b>		
<b><math>\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ [s}^{-1}\text{]}</math></b>		
<b>Temperatura</b>	<b>AA6082</b>	<b>AA7xxx</b>
<i>[°C]</i>	<i>[-]</i>	<i>[-]</i>
420	1.5	1,07
300	1.21	1,02
200	0.81	0,36

In termini di deformazione a frattura, i valori assunti nelle diverse prove sono confrontabili. In particolare, si osserva che la lega AA6082 presenti valori maggiori di deformazione a frattura rispetto alla lega AA7xxx. Tale osservazione è concorde con la discussione dei risultati ottenuti dalle prove di trazione a caldo.

### 5.15.3 Analisi frattografica

$T=200^{\circ}\text{C}$

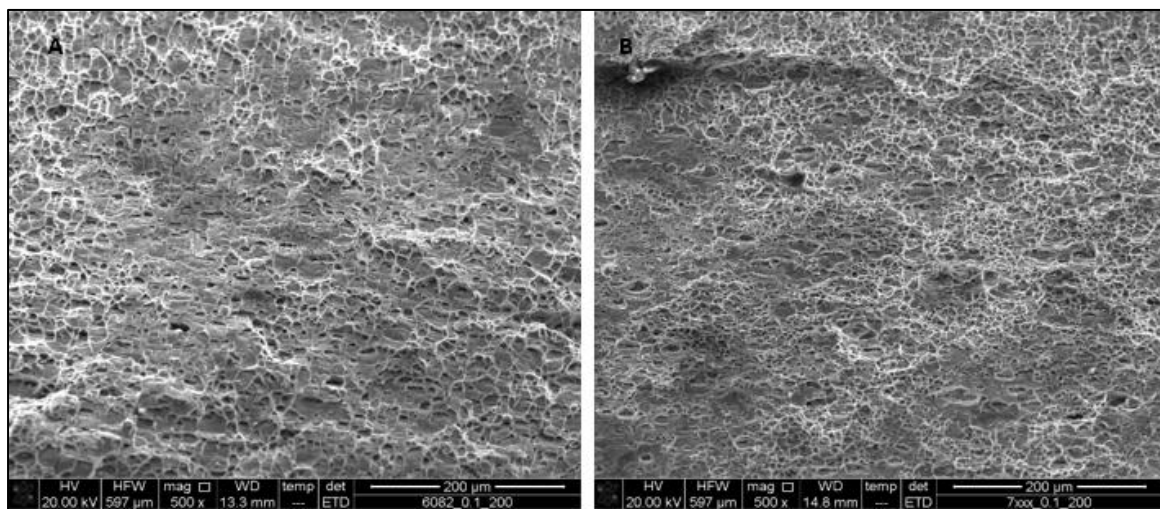


FIGURA 141 IMMAGINI AL SEM PROVE A  $200^{\circ}\text{C}$ , INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7xxx

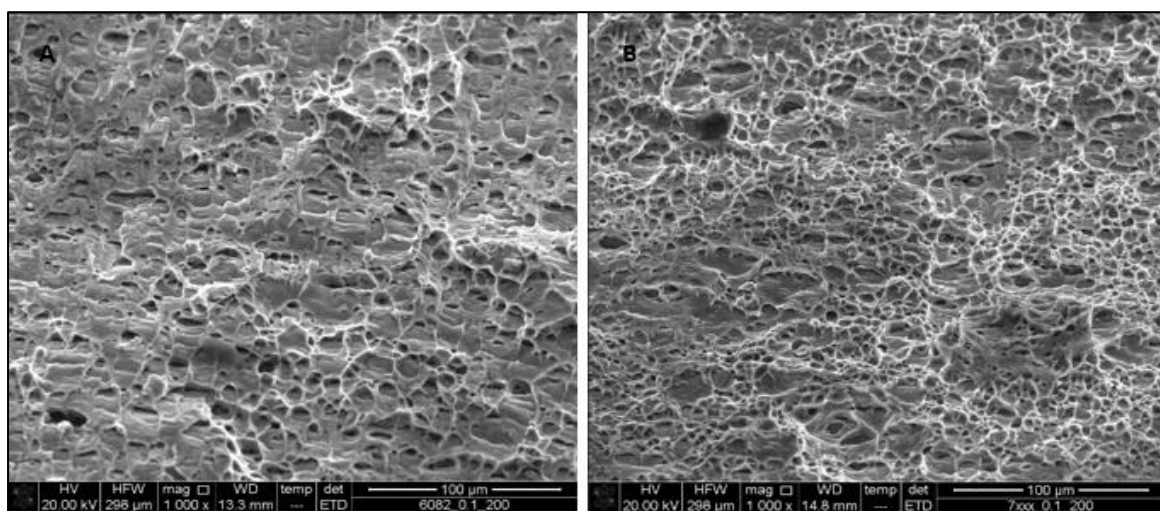


FIGURA 142 IMMAGINI AL SEM PROVE A  $200^{\circ}\text{C}$ , INGRANDIMENTO 1000X. A) AA6082, B) AA7xxx

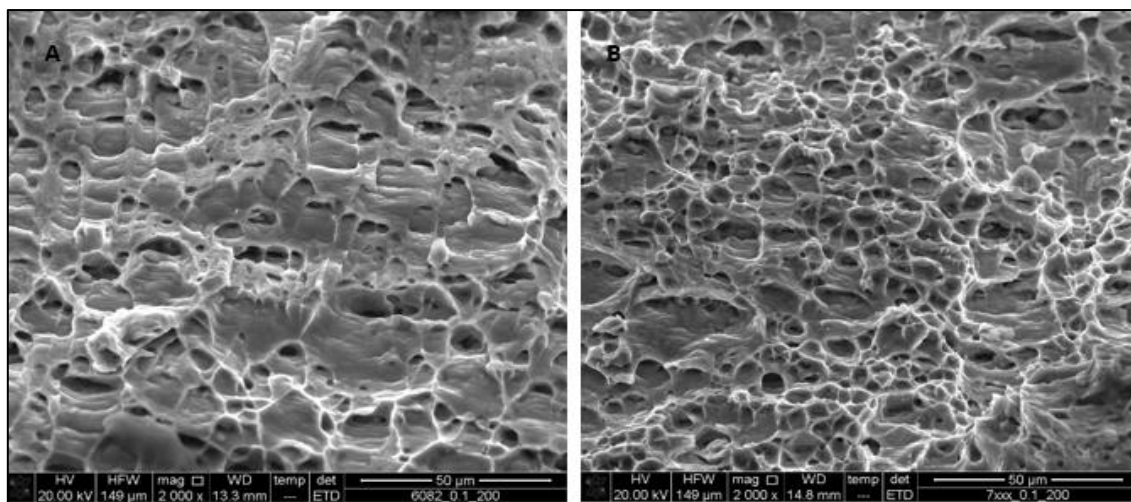


FIGURA 73 IMMAGINI AL SEM PROVE A 200°C, INGRANDIMENTO 2000X. A) AA6082, B) AA7XXX

$T= 300^{\circ}\text{C}$

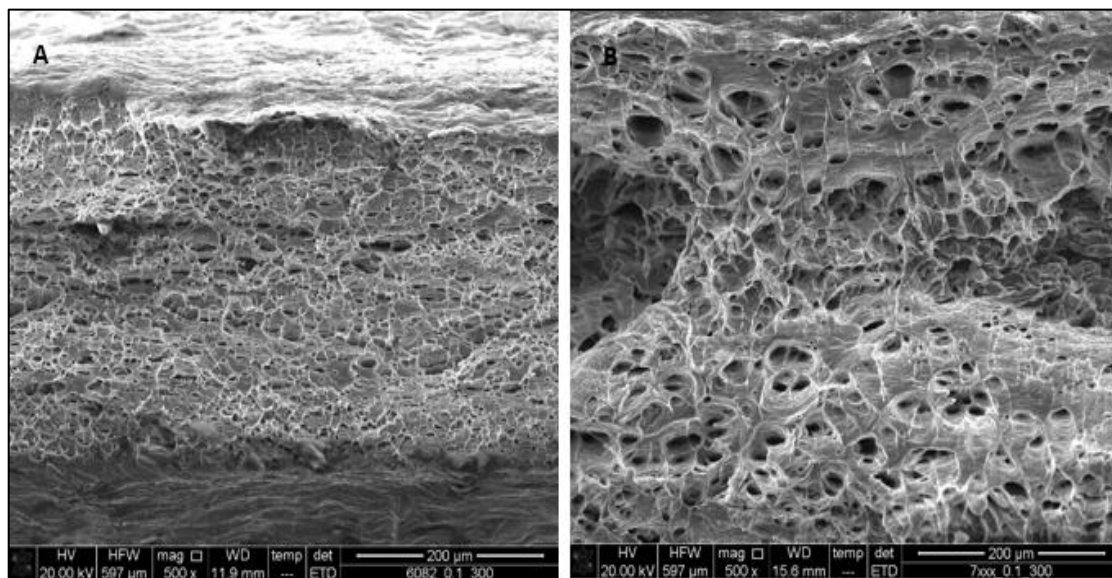


FIGURA 144 IMMAGINI AL SEM PROVE A 300°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

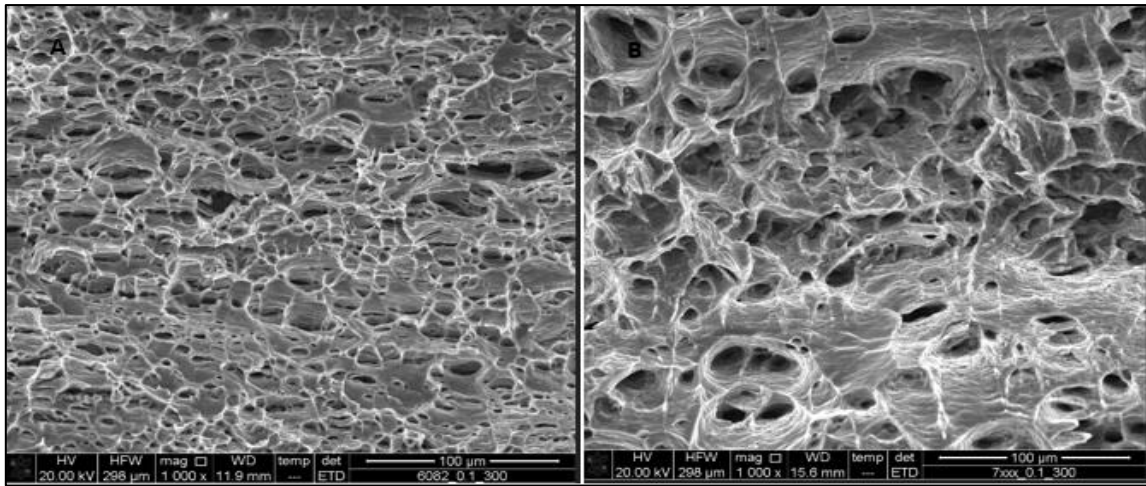


FIGURA 145 IMMAGINI AL SEM PROVE A 300°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

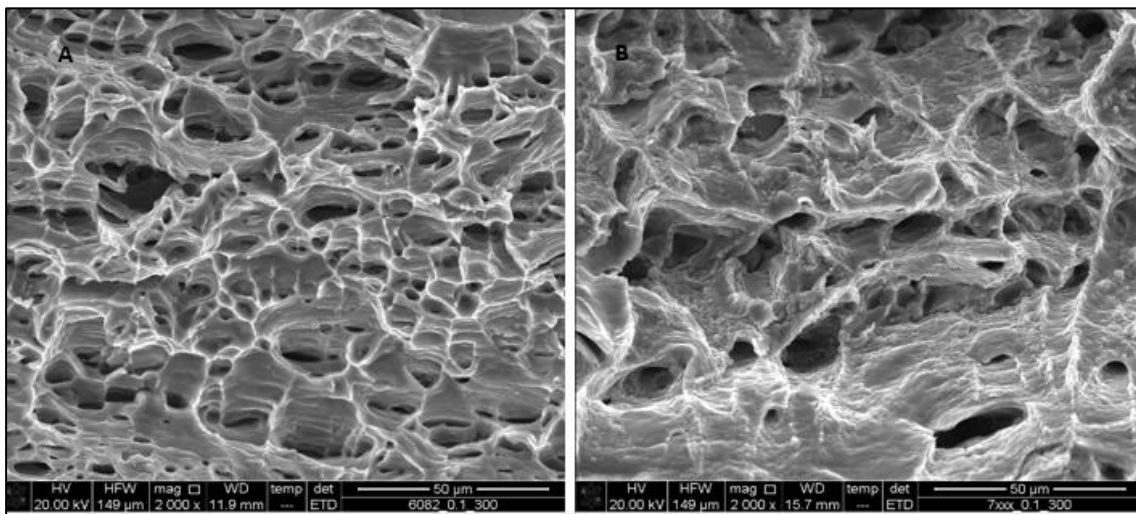


FIGURA 146 IMMAGINI AL SEM PROVE A 300°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

$T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$

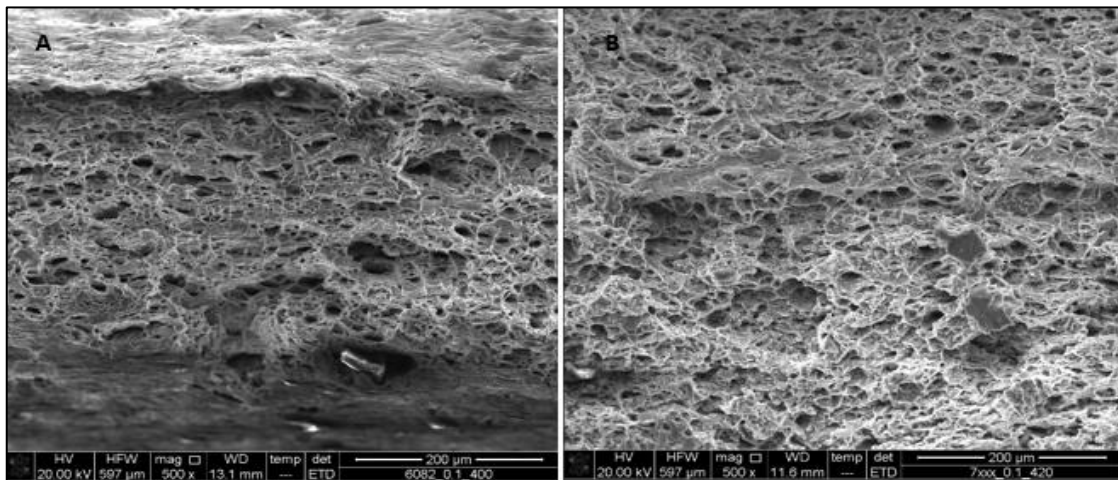


FIGURA 14774 IMMAGINI AL SEM PROVE A 400°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

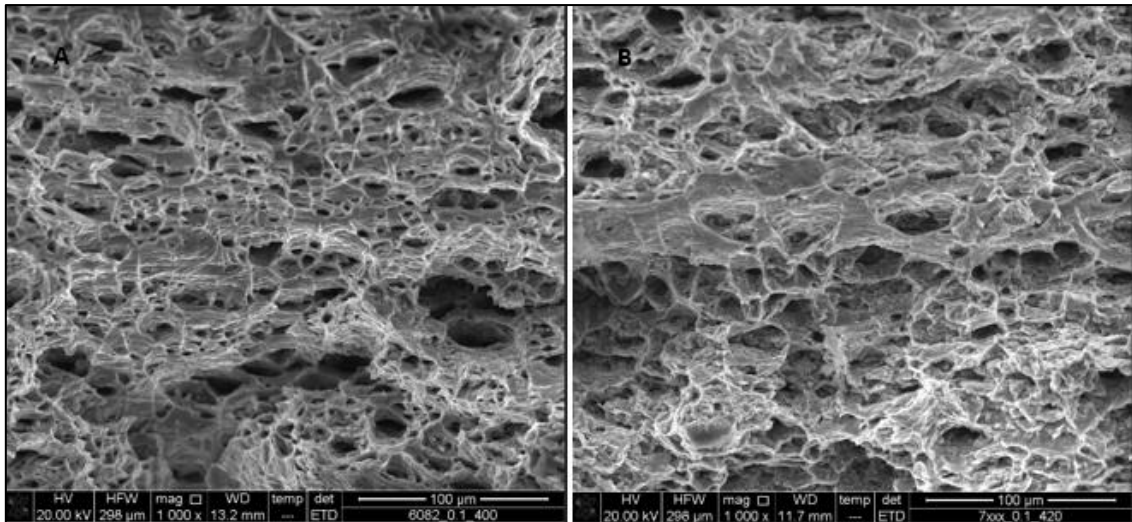


FIGURA 148 IMMAGINI AL SEM PROVE A 400°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

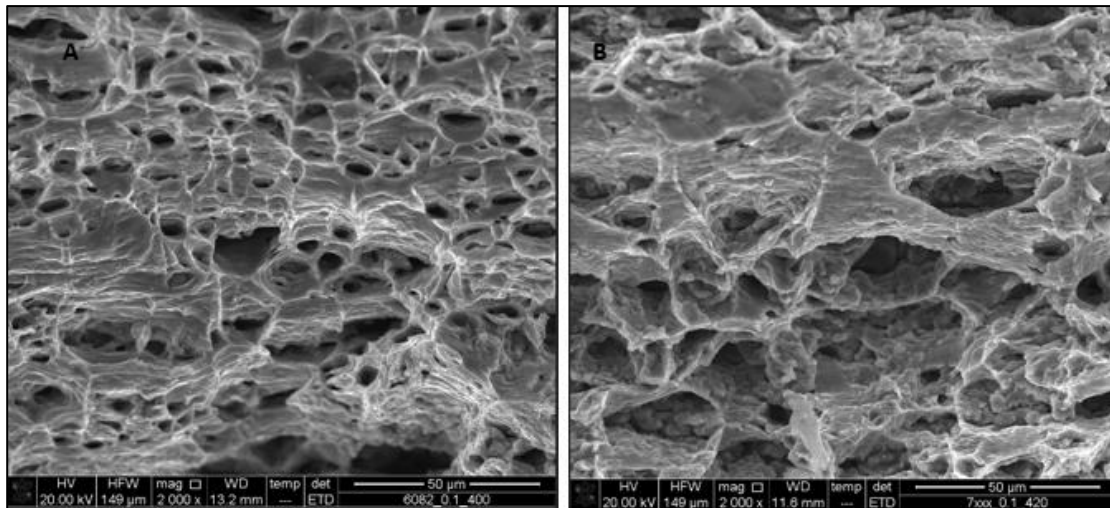


FIGURA 149 IMMAGINI AL SEM PROVE A 400°C, INGRANDIMENTO 500X. A) AA6082, B) AA7XXX

Dal confronto delle due leghe valutate, si osserva che il meccanismo di frattura è il medesimo. La lega AA7xxx presenta una maggiore tendenza alla formazione e crescita di microcavità a parità di velocità di deformazione e temperatura. Tale osservazione non è concorde con la valutazione eseguita per la deformazione a frattura, che indica una maggiore deformabilità per la lega AA6082, anziché AA7xxx alle stesse condizioni di prova. Si ha che il valore assunto dalla deformazione a frattura non è condizionato dal numero quantitativo delle cavità.



# Capitolo 6

## Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono stati oggetto di studio la lega di alluminio AA6082 e AA7xxxx. Lo studio aveva lo scopo di caratterizzare le leghe e di valutare le condizioni di miglior prestazione nella eventuale possibilità di un futuro impiego nella costruzione di parti di automobili, laddove l'alluminio non è ancora stato adottato.

La proprietà meccaniche delle leghe sono state valutate in condizioni di deformazione a caldo attraverso prove di trazione e Nakazima. Le prove di trazione a caldo condotte alle temperature di 200, 300, 400°C ed alle velocità di deformazioni 1, 0,1 e 0,01 s<sup>-1</sup> hanno evidenziato l'ottima risposta che il materiale fornisce in termini di minor tensione di flusso e di maggior duttilità, in confronto al materiale testato a temperatura ambiente. I dati ottenuti sperimentalmente sono concordi con la teoria osservata per la deformazione a caldo: le temperature più alte di 300 e 400°C (480°C per la lega AA7xxx) mostrano valori di tensioni di flusso molto bassi e maggiore deformazione a frattura. nella valutazione della formabilità a caldo della lega AA6082 sono state considerate sia l'effetto della direzione di laminazione sia la sensibilità alla velocità di deformazione. Si è osservato che minor è la velocità di deformazione impiegata nella prova, minore è la tensione di flusso che il materiale descrive durante la prova. Per quanto riguarda la sensibilità alla direzione di laminazione, essa è rilevante alla temperatura di 300 e 400 °C, mentre a 200 °C inizia a ridursi notevolmente. Si ha che le condizioni di tensioni di flusso minore sono alla temperatura di 400°C e alla velocità di deformazione di 0.01 s<sup>-1</sup>. La formabilità a caldo delle leghe AA7xxxx è stata valutata in funzione alla temperatura e alla velocità di deformazione. Anche la lega AA7xxxx dimostra maggiore duttilità, con riduzione di tensioni di flusso notevole e maggiore deformazione a frattura alla condizione di temperatura maggiore (480°C) e alla minore velocità di deformazione di 0.001 s<sup>-1</sup>.

Le due leghe sono state confrontate tra loro per valutare quale sia la più prestante. A parità di temperatura e alla velocità di deformazione di 0.1 s<sup>-1</sup>, la lega AA6082 risulta essere più formabile rispetto alla AA7xxx, in quanto presenta valori di tensione di flusso inferiori nonostante il tempo di solubilizzazione sia un decimo del tempo di solubilizzazione della lega AA7xxx. A parità di temperatura e velocità di deformazione di 0.01 s<sup>-1</sup> le due

leghe presentano valori di tensioni di flusso confrontabili. In particolare, si osserva che alla temperatura di 200°C entrambe le leghe descrivono un comportamento incrudente, che comunque presenta valori di tensioni di flusso inferiori rispetto a quelli tabulati a temperatura ambiente.

Per quanto riguarda la miglior velocità di deformazione che è opportuno adottare, si osserva che alle minori velocità di deformazione le tensioni richieste sono inferiori.

Se però si considerano i risultati ottenuti in ambito industriale, le valutazioni finali sono nettamente differenti rispetto a quelle fatte in termini di prestazione meccanica. Infatti, sebbene le prove condotte alle velocità di deformazione di 0.01 e 0.001 s<sup>-1</sup> risultano essere le più prestanti in termini di abbassamento della tensione di flusso, i tempi di prova risultano essere troppo lunghi per essere impiegati in produzione.

La condizione peggiore, in termini di tempo, risulta essere la prova a 480°C a 0.001 s<sup>-1</sup>. La condizione è gravosa perché necessita di più di 20 minuti per eseguire l'intera prova. In termini di temperatura, tale prova è la più gravosa perché il materiale viene scaldato a temperatura alta per un tempo prolungato.

Si ha quindi che sebbene basse velocità di stampaggio siano ottimali per una migliore prestazione, queste, allungano i tempi di ciclo di produzione. Risulta quindi preferire una velocità di deformazione di 0.01 s<sup>-1</sup> perché è il miglior compromesso tra la riduzione delle tensioni di flusso e aumento delle duttilità del materiale e il tempo di ciclo.

Tramite le prove di trazione a caldo sono state stimate l'anisotropia e la deformazione a frattura per ogni prova. Entrambe le leghe hanno un comportamento anisotropo, in quanto descrivono valori di R inferiori all'unità. In particolare, le leghe AA6082 risultano avere valori di R maggiori rispetto alle leghe AA7xxx. In termini di deformazione a frattura, si è osservato una concordanza tra i valori ottenuti dalla misura diretta dai campioni e le considerazioni finali sulle prove di trazione a caldo. Infatti, le leghe AA7xxx descrivono valori di deformazioni a frattura inferiori rispetto alla lega AA6082, dimostrando di essere meno duttili.

La formabilità della lega AA6082 è stata valutata anche attraverso la prova Nakazima, dalla quale è stata possibile ricavare la curva di formabilità a caldo del materiale alla temperatura di 350°C.

Le leghe sono state caratterizzate a livello microstrutturale attraverso analisi frattografiche, condotte al SEM. dalle immagini al SEM, tutti i campioni descrivono un aspetto fibroso, tipico della frattura duttile. L'analisi frattografica ha permesso di osservare la massiccia presenza di microcavità, la cui dimensione e numero aumenta con l'aumento della



temperatura di prova. questa variazione di numero e dimensione è giustificata dal fatto che a temperatura elevata si hanno meno siti di innesco alla cavitazione permettendo quindi l'accrescimento delle cavità prima di incorrere alla coalescenza e frattura.



# Bibliografia

## Capitolo 1

[1] Alluminio e automobili una coppia perfetta, *In fissa per alluminio, la tua finestra sul mondo*. (2017) Rivista online ([www.infissaper.it](http://www.infissaper.it)).

[2] GerGotz, Più alluminio in economia circolare, *Re-Auto*, (2016) Rivista online ([www.rinnovabili.it](http://www.rinnovabili.it)).

[3] Albrizio C, *Caratterizzazione della lega AA6016 per impiego nello stampaggio a caldo di componenti Automotive*, Tesi di laurea magistrale, Università di Padova, (2014)

[4] Nuovi processi tolgono peso e migliorano le prestazioni dell'Alfa Romeo Giulia, *Il Progettista industriale*, (2017) Rivista online ([www.ilprogettistaindustriale.it](http://www.ilprogettistaindustriale.it))

[5] Traverso M, *Progettazione di telai automobilistici Space Frame in lega leggera con particolare riguardo a soluzioni di tipo modulare*, Tesi di laurea magistrale, Università di Roma, (2001)

[6] R. Neugebauer, T. Altan, M. Kleiner, A. Sterzing - *Sheet metal forming at elevated temperature*, CIRP Annals. 55, (2006) 793.

[7] Dabalà M. *Appunti di scienza e tecnologia dei materiali metallici* (2016)

[8] Fiorini P, *le leghe da lavorazione plastica* ([www.aluplanet.com/documenti/approfondimenti/AutAll\\_App1.pdf](http://www.aluplanet.com/documenti/approfondimenti/AutAll_App1.pdf))

[9] Bonollo F, *leghe di alluminio*, approfondimenti metallurgici

[10] Europe Aluminum, *The Aluminum Automotive Manual-Materials Microstructure and Properties* (2002)

## Capitolo 2

[1] A. Foster, M. Mohamed, J. Lin, T. Dean. D. S.; Dean T.A *Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modeling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 53, (2012) 27.

[2] A. Foster, M. Mohamed, J. Lin, T. Dean, *An investigation of lubrication and heat transfer for a sheet aluminum heat, form-quench (HFQ) process*, SteelRes. Int. 79-11-VII (2008) 133–140.

[3] M. Mohamed, A.D. Foster, J. Lin, *Solution heat treatment in HFQ process*, Steel

Res. Int. 79-11-VII (2008) 160–167.

[4] D. Li, A.K. Ghosh, *Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys*, J. Mater. Process. Technol. 145 (2004) 281–293.

[5] G. Mroćka-Nowotnik, J. Sieniawski, A. Nowotnik, *Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and AA6082 aluminum alloys*, Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 20(1–2) (2005) 447–450.

[6] D. Lassance, D. Fabrègue, F. Delannay, T. Pardoen, *Micromechanics of room and high temperature fracture in 6xxx Al alloys*, Prog. Mater. Sci. 52 (2007) 67–129

[7] A. El-Danaf, A. AlMajidEhab, SolimanAbdulhakim, S. Mahmoud, *Hot deformation of AA6082-T4 aluminium alloy*, J. Mater. Sci. 43 (2008) 6324–6330.

[8] A. El-Danaf, Ehab, S. Soliman, Mahmoud, A. AlMajid, Abdulhakim, *Effect of solution heat treatment on the hot workability of Al–Mg–Si alloy*, Mater.Manuf. Process. 24 (6) (2009) 637–643

[9] L. Wanga, M. Strangwoodb, D. Balinta., T.A. Dean *Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions* Materials Science and Engineering A 528 (2011) 2648–2656

### Capitolo 3

[1] Atzori B. *Appunti di costruzioni meccaniche*.

[2] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid - *Tecnologia meccanica*.

[3] Bruschi S. *Appunti di tecnologia meccanica 2016/2017*

[4] [http://www00.unibg.it/dati/corsi/228509/31963-09\\_imbutitura.pdf](http://www00.unibg.it/dati/corsi/228509/31963-09_imbutitura.pdf)

[5] Shrinivas P. *Material property variations in tubes used for hydroforming Using the hydraulic bulge test to determine formability*, the tube & pipe journal 2002

### Capitolo 4

[1] **Venturato G.** *Studio del processo di piego-stiratura a caldo di tubi in lega di titanio Ti-3Al-2.5V*, tesi di laurea magistrale, Università degli studi di Padova (2015)

[2] **Turetta R.** *investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of quench enable high strength steels in hot stamping operations*, tesi di dottorato, Università degli studi di Padova (2008)

[3] **Caliari I.** *Appunti di tecnologia meccanica 2013/2014*

[4] **Noventa G.** *“Microstruttura e resistenza a corrosione di un acciaio duplex SAF2507 deformato a freddo”* Tesi di laurea - (2011)

[5] **Michieletto F** “*Caratterizzazione della formabilità a caldo di lamiere in lega Alluminio-Magnesio AA5083*” - Tesi di laurea (2012)