



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

**Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica**

**STUDIO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE DI UN TECNOPOLIMERO  
RINFORZATO A DIVERSE TEMPERATURE E VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE**

**STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A REINFORCED  
TECHNOPOLYMER AT DIFFERENT TEMPERATURES AND STRAIN RATES**

Relatore:

**Prof. SASSO MARCO**

Tesi di Laurea di:

**GENTILI SARA**

Correlatore:

**Prof. CHIAPPINI GIANLUCA**

A.A. 2022/2023

# SOMMARIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	4
<b>2.</b>	<b>PROVA DI TRAZIONE</b> .....	5
2.1	PROVE QUASI STATICHE.....	6
2.2	PROVE A VELOCITA' INTERMEDIA DI DEFORMAZIONE.....	7
2.3	PROVE IN TEMPERATURA.....	7
2.4	PROVE DINAMICHE.....	7
<b>3.</b>	<b>LA BARRA DI HOPKINSON</b> .....	8
3.1	STORIA DELLA BARRA.....	8
3.2	A COSA SERVE LA BARRA ?.....	9
3.3	DIFFERENZA DA UNA MACCHINA A PROVA STATICA.....	10
3.4	TIPOLOGIE DI PROVE.....	11
3.5	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	12
3.6	DESCRIZIONE BARRA UNIVPM.....	14
3.7	ESTENSIMETRO.....	17
3.8	PROGRAMMA DI ACQUISIZIONE.....	19
3.9	TARATURA.....	22
3.10	OUTPUT FORNITI DALLA PROVA DI TRAZIONE.....	25
<b>4</b>	<b>PROVINO</b> .....	29
4.1	ANISOTROPIA.....	30
<b>5</b>	<b>TECNOPOLIMERO</b> .....	32
5.1	POLIPROPILENE.....	33
5.2	RAFFORZAMENTO DEI TERMOPLASTICI.....	34
5.3	COS'È UN MATERIALE COMPOSITO?.....	34
5.4	COMPOSITI RINFORZATI CON FIBRE.....	38
5.5	LA MECCANICA DEI MATERIALI COMPOSITI.....	41
<b>6</b>	<b>TABELLE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE</b> .....	43
6.1	RISULTATI TEST.....	46
6.2	CONFRONTO TRA DATI ACQUISITI E SCHEDA MAIP.....	62
	<b>CONCLUSIONE</b> .....	63

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Provino.....	5
Figura 2 velocità di deformazione .....	6
Figura 3 Bertram Hopkinson.....	8
Figura 4 Herbert Kolsky.....	9
Figura 5 Macchina di prova in funzione dello strain rate .....	10
Figura 6 Rappresentazione schematica della barra di Hopkinson .....	10
Figura 7 Tipologie di prove eseguibili con la barra.....	11
Figura 8 Configurazione classica.....	12
Figura 9 Configurazione diretta. ....	13
Figura 10 Elemento sacrificale.....	14
Figura 11 Barra dell'università Politecnica delle Marche .....	14
Figura 12 Schematizzazione della barra pretensionata.....	15
Figura 13 Telecamera ad alta velocità .....	16
Figura 14 Schematizzazione posizionamento telecamera.....	16
Figura 15 Estensimetro utilizzato nella prova .....	17
Figura 16 Estensimetro a mezzo ponte .....	18
Figura 17 Cella a trazione .....	18
Figura 18 Programma di acquisizione .....	19
Figura 19 Front panel Lab View .....	20
Figura 20 Schematizzazione onda di pressione .....	21
Figura 21 Interfaccia MatLab.....	21
Figura 22 Martinetto .....	23
Figura 23 Elemento sacrificale.....	23
Figura 24 Esempio mappa di deformazione attraverso la (DIC).....	25
Figura 25 Schematizzazione curva sforzo-deformazione.....	26
Figura 26 Confronto tra curva nominale e ingegneristica .....	28
Figura 27 Frame di rottura prova Zwick.....	29
Figura 28 Vista 3D e vista dall'alto del provino .....	30
Figura 29 Disposizione delle epsilon nello spazio tridimensionale.....	31
Figura 30 Provini con fibre a diverse angolazioni rispetto al flusso .....	31
Figura 31 Unità strutturali del polipropilene .....	33
Figura 32 Semplificazione delle fasi dei compositi.....	35
Figura 33 Esempio di particelle utilizzate nei compositi, a destra le flakes mentre a sinistra i whickers .....	37



Figura 34 Sforzo-deformazione dei vari tipi di fibre di rinforzo .....	40
Figura 35 Lamina materiale composito, .....	41
Figura 36 - Provini a 0°, temperatura ambiente .....	46
Figura 37 - Provini a 0°, temperatura $T=-20^{\circ}\text{C}$ .....	47
Figura 38 Prove con fibre a 0°- $\varepsilon = 10^1s - 1$ ,.....	47
Figura 39 Prove con fibre a 0°- $\varepsilon = 10^2s - 1$ .....	48
Figura 40 Prove con fibre a 0°- $\varepsilon = 10^3s - 1$ .....	48
Figura 41- Provini a 45°, temperatura ambiente.....	50
Figura 42- Provini a 45°, temperatura $T=-20^{\circ}\text{C}$ .....	50
Figura 43- Prove con fibre a 45°- $\varepsilon = 10^1s - 1$ .....	51
Figura 44- Prove con fibre a 45°- $\varepsilon = 10^2s - 1$ .....	51
Figura 45- Prove con fibre a 45°- $\varepsilon = 10^3s - 1$ .....	52
Figura 46- Provini a 90°, temperatura ambiente.....	53
Figura 47 - Provini a 90°, temperatura $-20^{\circ}\text{C}$ .....	54
Figura 48- Prove con fibre a 90°- $\varepsilon = 10^1s - 1$ , .....	54
Figura 49- Prove con fibre a 90°- $\varepsilon = 10^2s - 1$ .....	55
Figura 50- Prove con fibre a 90°- $\varepsilon = 10^3s - 1$ .....	55
Figura51-Prove T ambiente- $\varepsilon = 10^1 - 2s - 1$ .....	56
Figura 52- Prove T ambiente- $\varepsilon = 10^1s - 1$ .....	57
Figura 53- Prove T ambiente- $\varepsilon = 10^2s - 1$ .....	57
Figura 54- Prove T ambiente- $\varepsilon = 10^3s - 1$ .....	58
Figura 55- Prove $T=-20^{\circ}\text{C}$ - $\varepsilon = 10^1s - 1$ .....	59
Figura 56- Prove $T=-20^{\circ}\text{C}$ - $\varepsilon = 10^2s - 1$ .....	59
Figura 57- Prove $T=-20^{\circ}\text{C}$ - $\varepsilon = 10^3s - 1$ .....	60
Figura 58- Confronto della resistenza del materiale in funzione dell'orientamento delle fibre – temperatura ambiente.....	61
Figura 59- Confronto della resistenza del materiale in funzione dell'orientamento delle fibre – temperatura $T=-20^{\circ}\text{C}$ .....	61
Figura 60 Scheda tecnica Maip.....	62



## INDICE TABELLE

Tabella 1 Caratteristiche tecnopolimeri .....	33
Tabella 2 Prove eseguite a T ambiente .....	43
Tabella 3 Prove eseguite a T=-20°C .....	43
Tabella 4 - Caratteristiche di resistenza dei provini a 0° .....	49
Tabella 5 - Caratteristiche di resistenza dei provini a 45° .....	52
Tabella 6 - Caratteristiche di resistenza dei provini a 90° .....	56
Tabella 7 Procedura per ricavare le curve .....	65

## INDICE FORMULE

Formula 1	Sensibilità estensimetro.....	9
Formula 2	Valore della deformazione .....	25
Formula 3	Velocità di deformazione ingegneristica.....	25
Formula 4	Deformazione ingegneristica.....	25
Formula 5	Sollecitazione ingegneristica.....	25
Formula 6	True strain.....	25
Formula 7	True stress.....	25
Formula 8	Resistenza a trazione.....	28
Formula 9	Duttilità.....	28
Formula 10	Resilienza.....	28
Formula 11	Tenacità.....	28
Formula 12	Indice di anisotropia.....	32



## 1. INTRODUZIONE

L'utilizzo di materiali termoplastici rinforzati con fibra corta di vetro in applicazioni ingegneristiche sta crescendo e diversificandosi. I compositi rinforzati con fibra di vetro sono utilizzati nell'industria automobilistica da molti anni a causa della loro elevata resistenza meccanica e rigidità, peso ridotto, resistenza alla corrosione, libertà di progettazione, facilità di fabbricazione e assemblaggio semplificato.

Questi tecnopolimeri sono materiali ben noti aventi un comportamento meccanico fortemente dipendente dalle condizioni di prova. Infatti, gradienti di temperatura o variazioni della velocità di deformazione influenzano la risposta meccanica. La causa di questa variabilità è da ricercarsi nella struttura intrinseca e nelle relative interazioni molecolari. In generale, il moto relativo delle catene polimeriche è favorito da un incremento di temperatura mentre è più difficile in caso di deformazione rapida.

La caratterizzazione dei materiali a diverse velocità di deformazione è un aspetto importante per una corretta progettazione, verifica e simulazione numerica dei componenti meccanici sottoposti ai carichi dinamici. In questo lavoro di tesi abbiamo verificato il comportamento del polipropilene rinforzato con fibre di vetro a due livelli termici, rispettivamente a temperatura ambiente ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ) e ad una temperatura  $T=-20^{\circ}\text{C}$ ). La caratterizzazione delle prove inoltre dipendeva anche dall'orientazione delle fibre pari a  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  e  $45^{\circ}$ . Dopo aver eseguito le prove quasi statiche e quelle con elevata velocità di deformazione attraverso la Barra di Hopkinson abbiamo potuto delineare il comportamento del materiale in questione.



## 2. PROVA DI TRAZIONE

Le prove a trazione che vengono in genere condotte per la caratterizzazione dei materiali sono prove quasi-statiche, nelle quali un provino è sottoposto ad uno spostamento costante a velocità molto basse tali da ritenere la componente dinamica nulla. I risultati così ottenuti sono utili per il calcolo strutturale statico, ma non per fenomeni nei quali risulta fondamentale l'analisi della dipendenza dalla velocità di deformazione. Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse procedure di prova per la caratterizzazione del comportamento dinamico dei materiali.

Includere l'effetto della velocità di deformazione è fondamentale per la corretta modellazione del comportamento ad impatto delle strutture. Leggi costitutive in grado di rappresentare l'influenza della velocità di deformazione sono fondamentali per l'accuratezza di un modello numerico in grado di aiutare nella progettazione, sviluppo e ottimizzazione di strutture sicure ad impatto. Per caratterizzare il comportamento dinamico dei materiali sono state sviluppate leggi costitutive e modelli numerici appropriati e, accanto a questi, procedure sperimentali specifiche per ottenere le costanti relative a questi modelli.



*Figura 1 Provino*

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse procedure di prova per caratterizzare la dipendenza delle proprietà meccaniche dei materiali dalla velocità di deformazione. Realizzare una prova che permetta di determinare la dipendenza delle proprietà meccaniche di un materiale dalla velocità di deformazione è un problema di non facile soluzione. La dinamica dell'evento è complicata da fattori che richiedono una piena comprensione dei fenomeni che lo caratterizzano in modo da separare chiaramente la risposta del materiale da quella della struttura. Una caratteristica di queste prove è che possono essere usate per valutare il fenomeno all'interno di un certo intervallo di velocità di deformazione o per raccogliere precise informazioni sulla risposta dinamica del materiale.

In questo senso, un solo tipo di prova non è sufficiente per caratterizzare completamente il comportamento di un materiale. Le velocità di deformazione che caratterizzano fenomeni di interesse in campo ingegneristico spaziano su sedici ordini di grandezza: le macchine di prova convenzionali (idrauliche o pneumatiche) coprono un intervallo di velocità fra 0 e 10 s<sup>-1</sup>. Macchine per prove di caduta permettono di condurre prove con velocità di deformazione fra 10 e 1000 s<sup>-1</sup>. Macchine più sofisticate che permettono di raggiungere velocità di deformazioni maggiori come la barra di Hopkinson sono in genere prerogativa di centri di ricerca o di università – anche se di recente si registra una sempre maggiore diffusione di queste macchine anche fra aziende private.

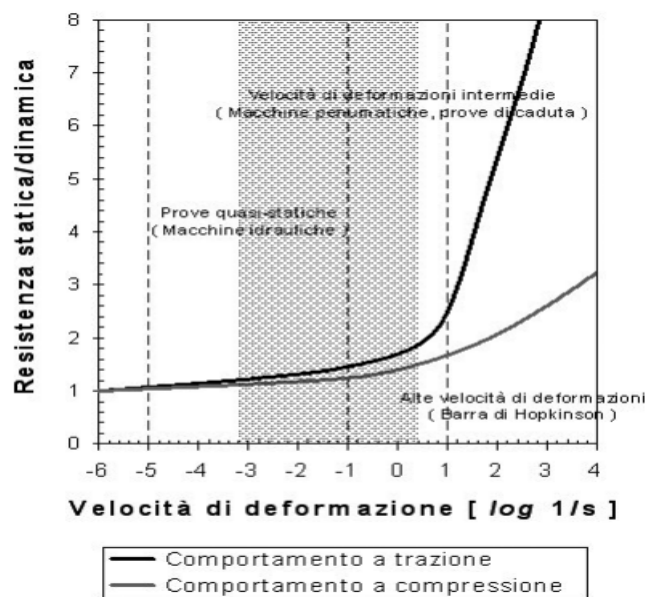


Figura 2 velocità di deformazione

## 2.1 PROVE QUASI STATICHE

Le prove di trazione quasi statiche sono state eseguite con una macchina elettromeccanica standard trazione/compressione (Zwick/Roell©Z050) in controllo di spostamento, alla velocità della traversa pari a 2 mm/min. Parallelamente, la deformazione del provino è stata misurata mediante analisi di immagini tramite Digital Image Correlation (DIC). Esistono macchine servo-idrauliche sviluppate per condurre prove di trazione



veloce (fastens) in grado di superare la soglia dei  $10^2 \text{ s}^{-1}$ . Macchine di questo tipo, però, sono poche e particolarmente costose.

## **2.2 PROVE A VELOCITA' INTERMEDIA DI DEFORMAZIONE**

Le prove di trazione a velocità intermedia sono state eseguite con una macchina pneumatica di trazione/compressione (SiPlan) in controllo di spostamento, alla velocità di 70 mm/s. Parallelamente, la deformazione del provino è stata misurata mediante analisi di immagini tramite Digital Image Correlation (DIC) per le prove a temperatura ambiente e tramite estensimetro ottico per le prove in temperatura (sia caldo che freddo).

## **2.3 PROVE IN TEMPERATURA**

Le prove in temperatura, sia statiche che dinamiche, sono state effettuate riscaldando in forno i provini prima del test per le prove a caldo, e raffreddando i provini in una macchina frigorifera per le prove a freddo. La temperatura raggiunta è stata monitorata con delle termocoppie piazzate sulla superficie dei provini; per raggiungere le temperature richieste e garantirne l'uniformità all'interno della sezione di prova, i provini sono stati mantenuti all'interno della macchina frigorifera e del forno per 60 minuti prima di eseguire i test. L'ambiente di prova, nella zona del tratto utile del provino è stato riscaldato e refrigerato utilizzando dei Vortec® airguns. Il campione è stato raffreddato in congelatore ad una temperatura pari a  $-30^\circ\text{C}$ , tuttavia una volta tirato fuori dal congelatore, vendendo a contatto con l'ambiente per via dello scambio termico la temperatura finale la possiamo approssimare  $t=-20^\circ\text{C}$ .

## **2.4 PROVE DINAMICHE**

La prova di trazione dinamica sui compositi è stata eseguita mediante la barra di Hopkinson, una macchina in grado di applicare un carico di trazione (o compressione) ad elevata velocità, pressoché in modo istantaneo. La macchina sfrutta la propagazione di onde meccaniche di stress che viaggiano ad elevata velocità sulle barre, ed arrivano sul provino



imprimendo il carico per un periodo piuttosto limitato (fino a 1 ms), ma sufficiente all'esecuzione della prova.

### 3 LA BARRA DI HOPKINSON

Le barre di Hopkinson (Kolsky) sono macchine per la caratterizzazione meccanica dei materiali sottoposti ad un carico dinamico. Questo tipo di macchina utilizza onde di pressione all'interno di barre sottili per sollecitare dinamicamente i provini del materiale da caratterizzare. Grazie ad una strumentazione adeguata è possibile ricavare le curve sforzo-deformazione a velocità di deformazione impossibili da ottenere con le tradizionali macchine idrauliche o elettromeccaniche. Il funzionamento della barra di Hopkinson si basa sullo studio della propagazione delle onde elastiche. L'attrezzatura di prova consiste di una o due travi snelle, a seconda della versione della prova, che permettono di sollecitare a compressione un provino di piccole dimensioni.

#### 3.1 STORIA DELLA BARRA

La barra di Hopkinson deve il proprio nome al suo ideatore, l'inglese Bertram Hopkinson (1874 – 1918). Nel 1914 ne propose la prima versione e sviluppò una procedura sperimentale per misurare la massima pressione generata dall'impatto di un proiettile.



*Figura 3 Bertram Hopkinson*

Nel 1948, Rhisiart Morgan Davies (1903 – 1958), intuendo i limiti tecnologici del metodo originale di Hopkinson, introdusse una nuova tecnica per la misura delle deformazioni assiali e radiali ad alta velocità di deformazione.

Nel 1949, Herbert Kolsky (1917 – 1992) pubblicò un articolo sulla misura delle proprietà meccaniche di diversi materiali (polietilene, gomma, PMMA, rame e piombo) ad alte velocità di carico usando una Hopkinson Pressure Bar modificata, in seguito conosciuta come “Kolsky Bar” o “Split-Hopkinson Pressure Bar” (SHPB).



*Figura 4 Herbert Kolsky*

### **3.2 A COSA SERVE LA BARRA ?**

All’inizio del secolo scorso, attorno l’anno 1914, fu ideato un metodo per eseguire prove sperimentali per la misura della massima pressione generata dall’impatto di un proiettile. Dopo diversi accertamenti riguardante i limiti tecnologici di questo esperimento, si introdusse una nuova tecnica per la misura delle deformazioni assiali e radiali ad alta velocità di deformazioni. Circa 30 anni dopo il primo metodo, venne pubblicato un articolo dove fu descritto un metodo di misura delle proprietà meccaniche di diversi materiali (esempio: polietilene, gomma, PMMA, rame e piombo) ad alte velocità di carico, utilizzando una barra di Hopkinson modificata. Con l’utilizzo della barra di Hopkinson (Kolsky) è possibile ricavare ed analizzare le proprietà dei materiali durante deformazioni ad elevati strain rate (velocità di deformazione). Impiegando una strumentazione adeguata si posso ricavare le curve di sforzo-deformazioni a velocità di deformazione impossibili da ottenere con l’impiego delle tradizionali macchine idrauliche o elettromeccaniche (prove statiche).

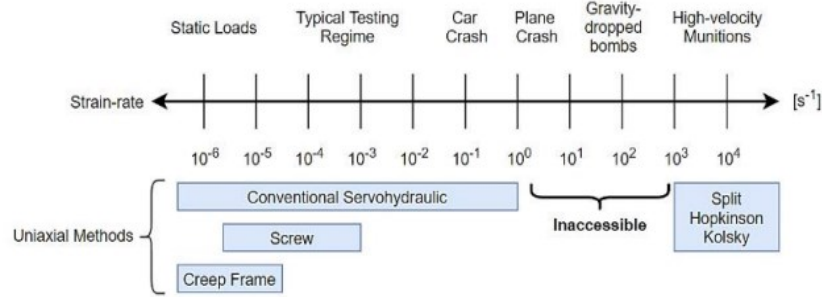


Figura 5 Macchina di prova in funzione dello strain rate

### 3.3 DIFFERENZA DA UNA MACCHINA A PROVA STATICA

Il modulo elastico viene usualmente determinato dalla curva sollecitazione-deformazione mediante una macchina di prova in condizioni quasi statiche, cioè con piccoli ratei di deformazione e velocità di carico molto bassa. Tuttavia, con la presenza di carichi dinamici la risposta del materiale può essere sostanzialmente diversa. Nel caso che una struttura sia soggetta anche a carichi dinamici, il progettista deve conoscere anche le proprietà dinamiche del materiale. Normalmente una semplice macchina di prova materiali non è in grado di applicare gli alti ratei di deformazione richiesti, di conseguenza viene utilizzata una barra di Hopkinson (Kolsky) per effettuare prove dinamiche e ottenere così le diverse proprietà dinamiche di diversi materiali.

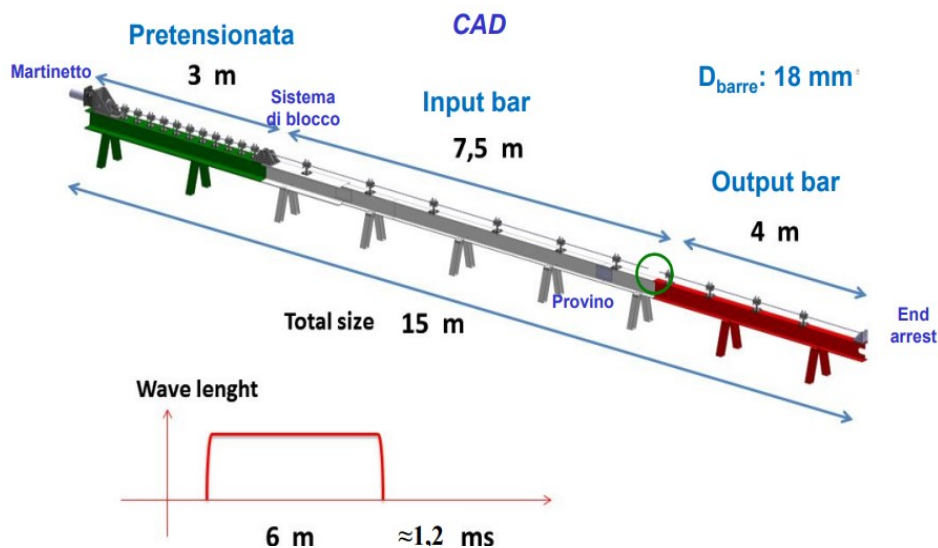


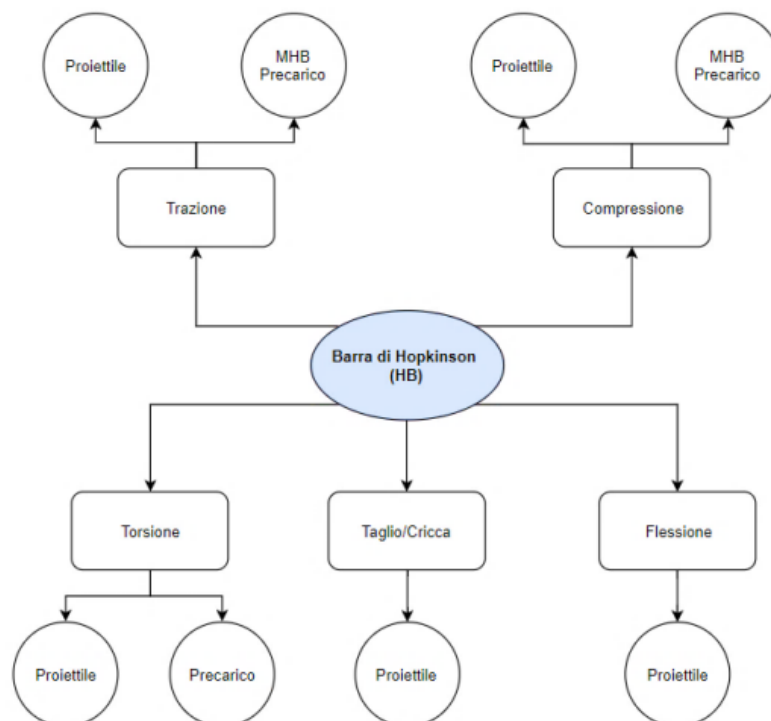
Figura 6 Rappresentazione schematica della barra di Hopkinson

### 3.4 TIPOLOGIE DI PROVE

Esistono diverse configurazioni della barra di Hopkinson (Kolsky), per ognuna è possibile eseguire diverse tipologie di prove dinamiche. In particolare le principali prove che si possono eseguire sono le seguenti:

- Trazione;
- Compressione;
- Torsione;
- Taglio/Cricca;
- Flessione.

Per ogni tipologia la macchina è configurata in maniera appropriata con particolari dispositivi. Ad esempio per la prova a flessione si adopera un sistema molto simile a quello impiegato su una macchina elettromeccanica universale, solamente che nel caso della barra di Hopkinson (Kolsky) la prova viene eseguita dinamicamente e non staticamente. Di seguito viene mostrata una mappa delle diverse prove effettuabili con la barra di Hopkinson (Kolsky), con i rispettivi sistemi di azionamento.



*Figura 7 Tipologie di prove eseguibili con la barra*

### 3.5 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Principalmente esistono due tipologie di configurazioni della macchina: la barra di Davies (Single pressure bar) e la SHPB (Split-Hopkinson Pressure Bar). La versione più utilizzata è la SHPB, che attualmente rappresenta la configurazione base per eseguire le diverse prove sopracitate (trazione, torsione, flessione, e simili), introducendo appositi accorgimenti. Questo dispositivo sostanzialmente è composto da tre barre coassiali cilindriche:

- Barra d'impatto ("Impattatore"), denominato anche attuatore.
- Barra d'input, denominata anche traversa mobile.
- Barra d'output, denominata anche traversa fissa.

#### Versione classica

- Consiste di tre barre allineate, una denominata Striker Bar, che viene sparata contro la prima barra denominata Input Bar, la quale è separata dall'ultima barra, denominata Output Bar, mediante l'interposizione del campione

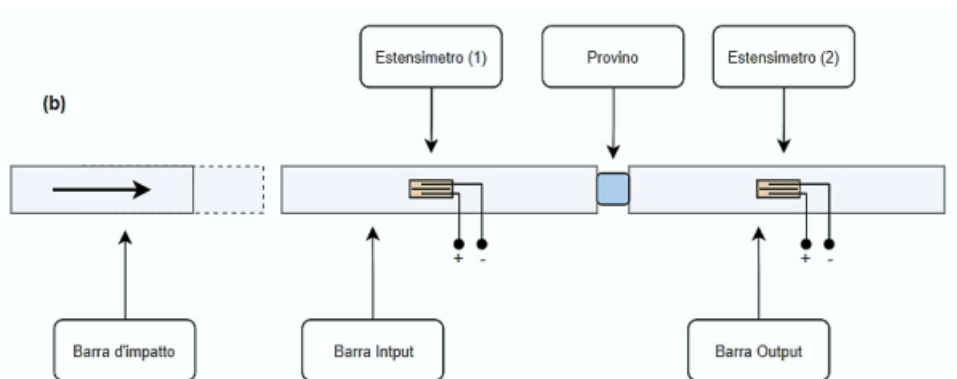


Figura 8 Configurazione classica

- Il principio di funzionamento si basa sulla generazione di un'onda di tensione-deformazione e la sua propagazione attraverso i componenti dell'apparato. L'impulso, che si propaga lungo la barra, si trasmette al provino che subisce deformazioni plastiche. Dallo studio della propagazione delle onde nelle barre si risale al comportamento del materiale del provino.

### Versione diretta

- Le onde di pressione vengono generate pretensionando parte dell'input bar
- È più compatta rispetto alla versione classica
- Il sistema di generazione dell'onda di input è basato sulla tranciatura di un disco a taglio
- Da la possibilità di ottenere onde di trazione e compressione con rottura dell'elemento sacrificale sempre a monte della pretensionata
- La lunghezza dell'onda è tale che permettere di coprire un range dello strain rate che va da circa  $10^2$  a circa  $2 \times 10^3$

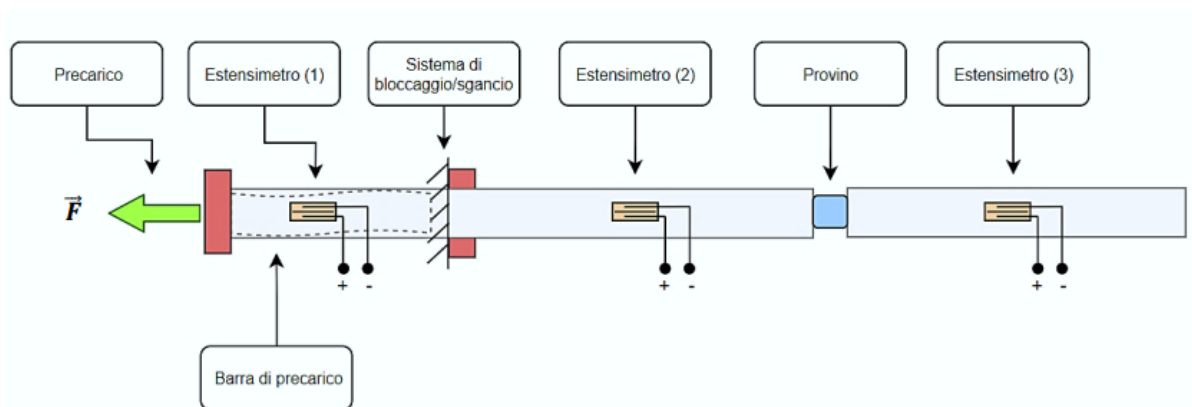
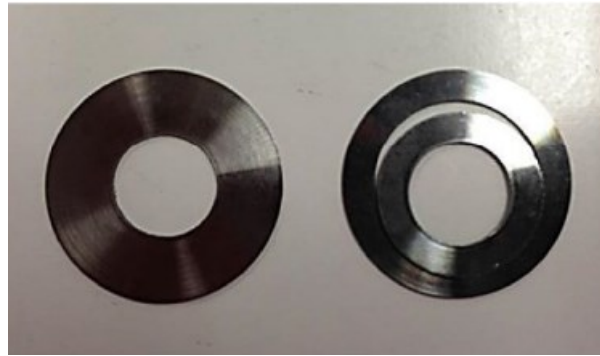


Figura 9 Configurazione diretta.

In questa tipologia di prova dinamica le onde sono generate pretensionando la porzione iniziale della barra (input bar), in trazione o in compressione a dipendenza del tipo di prova che si vuole effettuare. Il rilascio improvviso dell'incastro, generato dal sistema di bloccaggio/sgancio, produce un impulso della durata temporale pari al doppio del tempo necessario ad un'onda di tensione a percorrere una distanza pari alla porzione di barra precaricata. Il sistema utilizza un elemento sacrificale a forma di anello in metallo temprato. La tempra in questo caso è un trattamento necessario per aumentare la resistenza meccanica e diminuire l'allungamento a rottura, in modo che si fratturi più velocemente. Abbiamo usato anelli con spessore principalmente di 0.3, 0.5, 0.6 mm.





*Figura 10 Elemento sacrificiale*

I principali vantaggi di questo metodo sono:

- Una lunghezza delle onde di tensione facilmente regolabile;
- Distribuzione più uniforme degli sforzi attraverso la sezione retta.

Lo svantaggio consiste nell'utilizzo di un sistema relativamente complesso, (simile al sistema per barre di Hopkinson (Kolsky) in torsione), composto da un sistema ad incastro meccanico e da due cilindri idraulici.

### **3.6 DESCRIZIONE DELLA BARRA UNIVPM**

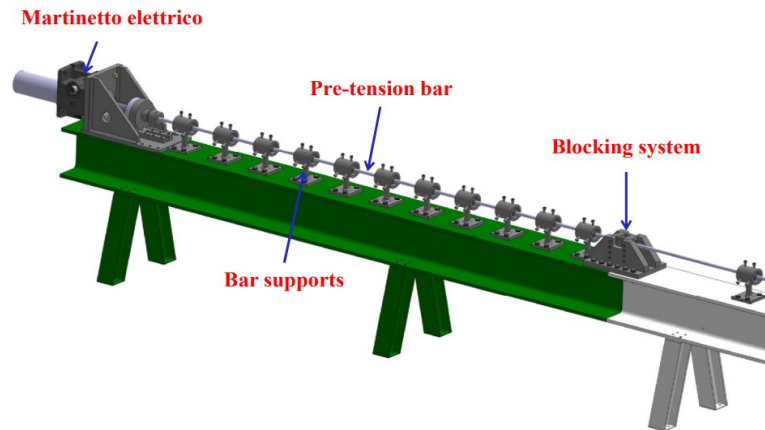
Il dispositivo installato è una versione a trazione e compressione diretta della cosiddetta “barra di Hopkinson”. Essa è lunga complessivamente 15 metri ed è costituita da un martinetto elettromeccanico di precarico da 100 kN, una barra pretensionata lunga 3.0 m, una barra di input lunga 7.5m, ed una barra di output lunga 4.0 m; al termine della barra di output è posto un blocco terminale per arrestare la corsa per motivi di sicurezza.



*Figura 11 Barra dell'università Politecnica delle Marche*



Per evitare che la trave pretensionata vada in instabilità, sono stati inseriti una decina di supporti i quali sono elementi meccanici che hanno la funzione di sostenere e guidare le barre. Attualmente questi supporti presentano delle problematiche a livello di regolazione, allineamento con la barra, generazione di attriti e modularità in generale;



*Figura 12 Schematizzazione della barra pretensionata*

La movimentazione e l'acquisizione è gestita da un PC e da una scheda National Instruments ad acquisizione simultanea su 4 canali a 16 bit (serie M). Sfruttando la propagazione di onde elastiche nelle barre, il dispositivo consente di effettuare prove di compressione e trazione su provini aventi dimensioni (Dxh) da 5x5 a 20x20 mm ad uno strain rate variabile tipicamente da  $10^2$  a  $10^4$  s<sup>-1</sup>.

La generazione dell'onda di carico è prodotta dalla rottura di un elemento sacrificale, e può avvenire direttamente in forma di trazione o di compressione. Sfruttando gli stessi supporti e lo stesso martinetto, sono utilizzabili 4 varianti diverse di barra di Hopkinson: a seconda del materiale che si vuole testare si possono usare barre in acciaio (17-4 PH), in titanio (Ti-6Al4V), in alluminio (7075T6) ed in plastica (PET). In questo modo sono state condotte campagne di prove da acciaio alto resistenziali a polimeri ed elastomeri, a schiume e materiali naturali a bassa densità.

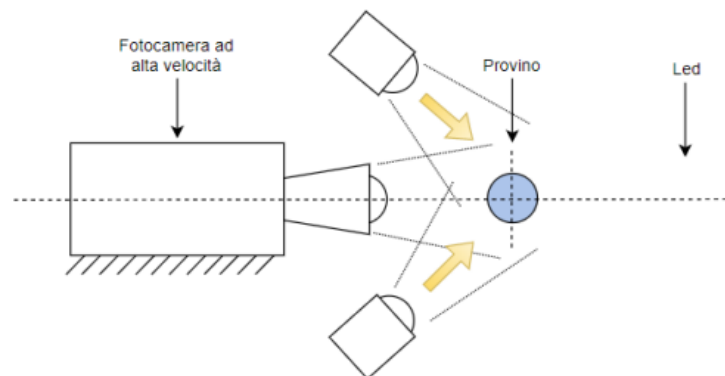
Il laboratorio dispone di una telecamera ad alto frame rate (Photron SA4), capace di acquisire fino a 100'000 immagini al secondo; essa viene

utilizzata per osservare l'evoluzione della rottura o della deformazione nel campione durante la prova; è possibile impiegare a tale scopo anche la tecnica DIC.



*Figura 13 Telecamera ad alta velocità*

Durante le riprese con la fotocamera ad alta velocità vengono impiegati dei led per illuminare la zona desiderata (zona del provino), garantendo una qualità maggiore delle immagini. La Figura mostra come i led dovranno essere posizionati in modo da evitare che il fascio luminoso impatti direttamente sull'obiettivo ottico della fotocamera ad alta velocità.

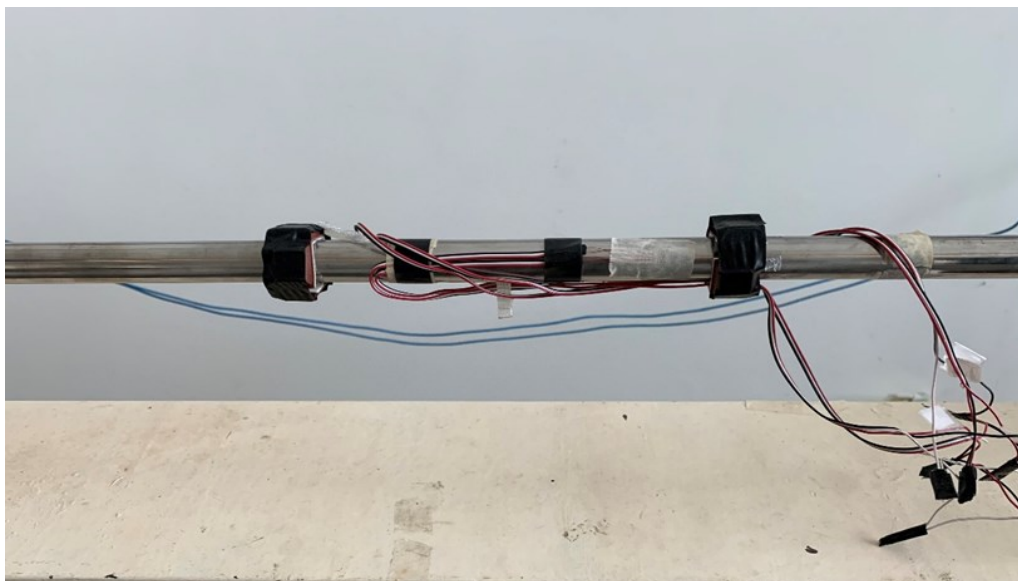


*Figura 14 Schematizzazione posizionamento telecamera*

La fotocamera ad alta velocità e i led devono essere collocati nella zona dove verranno posizionati i provini (zona tra la traversa mobile e quella fissa)

### 3.7 ESTENSIMETRO

L'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche (es. applicazione di carichi o variazioni di temperatura). Conoscendo a priori le caratteristiche meccanico/fisiche del materiale, misurando le deformazioni si possono facilmente ricavare i carichi a cui il materiale è sottoposto. Inoltre, utilizzando estensimetri di giusta tipologia e applicandoli in modo oculato, si possono rilevare la direzione e il verso di queste deformazioni, e di conseguenza il vettore delle forze applicato al materiale sotto esame.



*Figura 15 Estensimetro utilizzato nella prova*

L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni generalmente utilizzando collanti istantanei come il ciano acrilato. Il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa; queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un ponte di Wheatstone o altro sistema, tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate. Gli estensimetri sono installati in diverse zone della struttura.

In particolare, alcuni sono posizionati sulla superficie del provino mentre altri sono posizionati sulle diverse barre:

- Barra di precarico (misura della forza di precarico);
- Barra di input (misura della deformazione in entrata);
- Barra di output (misura della deformazione in uscita).

Durante l’inserimento/estrazione delle barre si dovrà prestare attenzione a non danneggiare gli estensimetri montati sulle barre.

Barra di input e output:



Figura 16 Estensimetro a mezzo ponte

### CELLE DI CARICO A TRAZIONE ESTENSIMETRICHE

Consideriamo l’applicazione di 4 estensimetri (ponte intero)

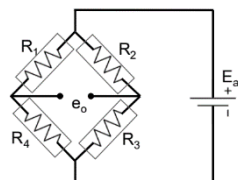
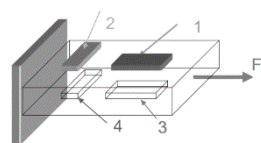
L’uscita del ponte sarà:

$$\frac{e_o}{E_a} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{F}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \frac{F_i}{EA}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu \frac{F_i}{EA}$$

Per cui la sensibilità del sistema sarà:



$$\frac{e_o}{E_a} = \frac{F}{2} \frac{F_i}{EA} (1 + \nu) \quad (1)$$

Figura 17 Cella a trazione

### 3.8 PROGRAMMA DI ACQUISIZIONE

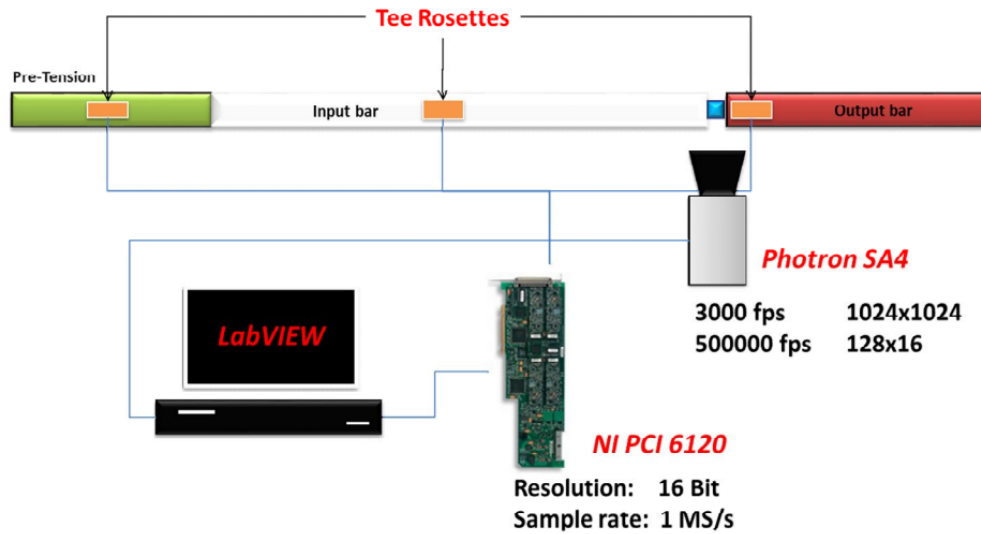
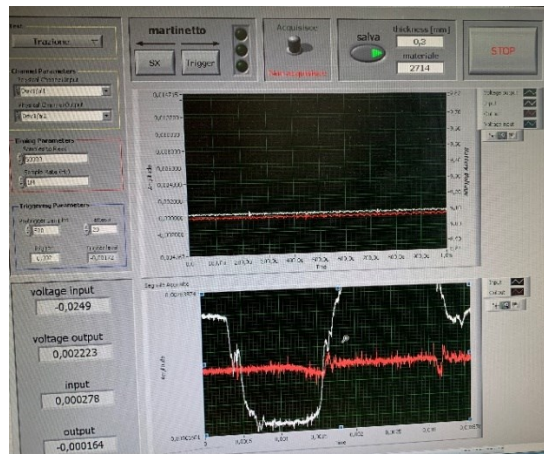


Figura 18 Programma di acquisizione

Nella versione classica della barra di Hopkinson (Kolsky), l'impulso generato dall'impatto dell'attuatore con la barra d'input si propaga lungo quest'ultima trasmettendolo fino al provino, subendo deformazioni plastiche (anche fino a rottura). Questo impulso d'urto corre lungo la prima barra. Una parte dell'impulso viene riflesso dall'estremità della barra, l'altra parte attraversa il campione di materiale e la barra di output. Abbiamo utilizzato Lab View per l'acquisizione dei dati attraverso la scheda di acquisizione. La movimentazione e l'acquisizione è gestita da un PC e da una scheda National Instruments ad acquisizione simultanea su 4 canali a 16 bit(serieM). Successivamente abbiamo impostato il Block Diagram e il Front Panel con il codice di acquisizione e lettura dei dati. Tra gli elementi più importanti troviamo:

- While Loop: ripete il codice all'interno del diagramma secondario finché non si verifica una condizione specifica (tasto destro – structures – while loop);
- Booleana: il controllore che ferma l'acquisizione dei dati (create control su output pulsante rosso del while loop);
- DAQ Assistant: permette di controllare la scheda di acquisizione (tasto destro – express - input);



*Figura 19 Front panel Lab View*

Andando ad analizzare I dati acquisiti , l'onda rappresenta il voltaggio ed è quadra quella rappresentata con il colore bianco nella barra di input e quando viene riflessa mentre quella trasmessa nella barra di output è più piccola e triangolare quella rossa. Infatti, parte dell'energia viene dissipata in deformazione plastica.

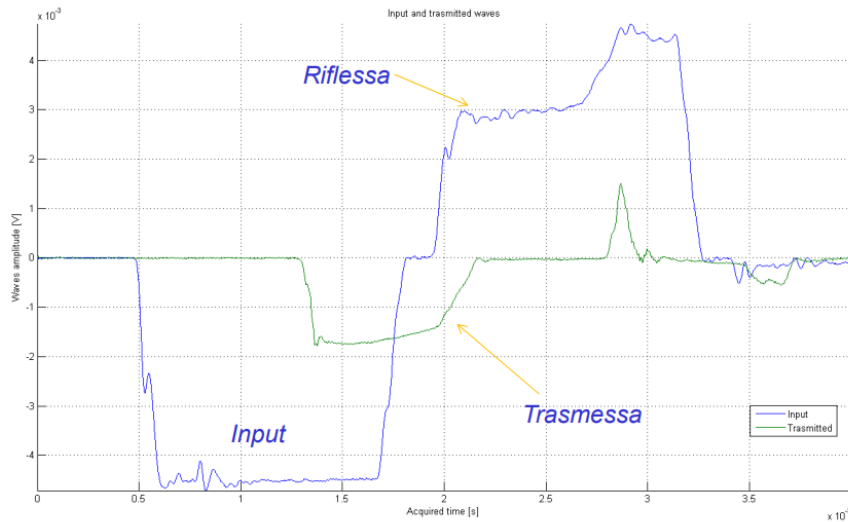


Figura 20 Schematizzazione onda di pressione

L'elaborazione finale dei dati l'abbiamo realizzata con MatLab andando ad analizzare il frame di rottura e i segnali acquisiti, successivamente abbiamo interpolato i dati ottenendo le curve sforzo-deformazione in funzione della temperatura e dell'orientazione delle fibre. In appendice è riportata la completa procedura eseguita attraverso l'ausilio di MatLab.

```

49 % epsilon=eps(1:772);%test31
50 % epsilon=eps(1:708);%test32
51 % epsilon=eps(1:1085);%test34
52 % epsilon=eps(1:772);%test35
53 % epsilon=eps(1:1189);%test36
54
55 figure
56 hold on
57 plot(epsilon)
58
59
60
61 [xData, yData] = prepareCurveData( [], epsilon );
62 ft = fittype( 'smoothingspline' );
63 opts = fitoptions( 'Method', 'Smoothingspline' );
64 opts.SmoothingParam = 0.001;
65 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
66 yyy = fitresult(xData);
67
68
69 fine=epsilon(end:end);
70 epsilon=yyy-yyy(1);
71 epsilon(end:end)=fine;
72
73 plot(epsilon, 'r')
74
75 t_eps=(0:(size(epsilon,1)-1))/300000;
76
77
78
    
```

Figura 21 Interfaccia MatLab





### 3.9 TARATURA

Poiché l'SHTB è utilizzato quasi abitualmente presso l'Università Politecnica delle Marche, i fattori di calibro degli estensimetri incollati sulle barre di ingresso e di uscita sono noti dall'esperienza nei test precedenti. Tuttavia, prima di una campagna di test, i fattori di misura vengono calibrati con un test statico, in cui l'attuatore elettromeccanico tira l'intero sistema, mentre una cella di carico misura il carico assiale effettivo e il sistema di acquisizione NI acquisisce il segnale dagli estensimetri.

La procedura è la seguente:

- 1) L'estremità libera della barra di uscita viene bloccata in battuta tramite apposito raccordo di raccordo
- 2) Le barre di ingresso e di uscita sono collegate da un dado filettato rigido al posto del provino
- 3) Una cella di carico standard (HBM U2A 10tons) collega l'attuatore elettromeccanico e la barra precompressa al posto del disco fragile.
- 4) L'attuatore elettromeccanico tira l'intero sistema mentre il segnale della cella di carico viene acquisito da una scheda daq standard e i segnali dagli estensimetri sulle barre vengono acquisiti dalla stessa scheda NI utilizzata durante le prove dinamiche.

Si ottiene un valore tipico di 2.0 per il fattore di gauge  $K$ , che viene utilizzato per estrarre il valore di deformazione secondo la nota formula

$$\varepsilon = \frac{1}{2(1 + \nu)} \frac{4 \Delta V}{K V_S} \quad (2)$$

dove  $\nu$  è il rapporto di Poisson del materiale delle barre,  $V_S$  è la tensione di eccitazione del ponte ed è lo squilibrio misurato.

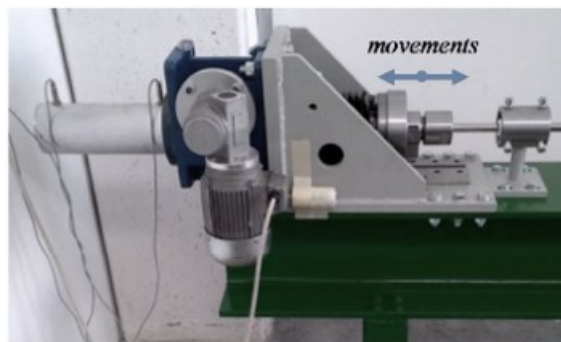




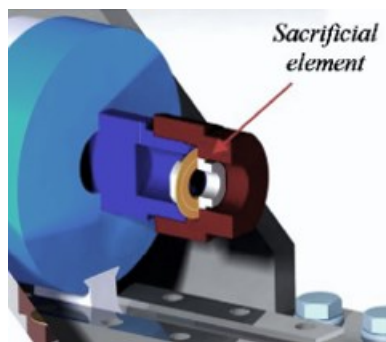
## SEQUENZA DEL TEST

La sequenza del test è la seguente:

- 1) La barra di uscita è scollegata dall'arresto di fine corsa
- 2) La superficie del campione viene preparata con un motivo in bianco e nero applicato con un aerografo
- 3) Il campione viene montato sui tiranti e vengono inseriti i perni
- 4) Il campione e gli elementi di fissaggio vengono montati tra le barre di ingresso e di uscita avvitandoli nei fori filettati destro e sinistro. Ciò garantisce una connessione stretta senza sollecitare il campione.
- 5) Le barre precomprese e di ingresso sono collegate da un collare cavo filettato internamente che funge anche da blocco unilaterale statico
- 6) Il disco fragile sacrificale è montato nel sistema frenante che collega l'attuatore elettromeccanico e la barra precompressa. Questo può essere visto nella vista in sezione di figura



*Figura 22 Martinetto*



*Figura 23 Elemento sacrificale*

7) L'attuatore si attiva e comprime la barra precompressa fino a che il disco fragile non cede a taglio; il rilascio improvviso del carico genera un'onda di trazione elastica.

8) L'acquisizione del segnale della scheda NI-6120 viene innescata dal fronte di salita dell'onda di ingresso misurata dagli estensimetri a metà lunghezza della barra di ingresso. Viene salvata una cronologia temporale di 10 ms sia per gli estensimetri a barra di ingresso che per quelli di uscita. Lo stesso trigger viene utilizzato per avviare l'acquisizione della telecamera ad alta velocità.

9) I segnali di tensione vengono convertiti in valori di deformazione e questi ultimi vengono convertiti in velocità di deformazione ingegneristica, deformazione e sollecitazione mediante le formule (3), (4) e (5).

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_S} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_S} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (4)$$

$$\sigma(t) = E_b \frac{A_b}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (5)$$

La formula (2) viene utilizzata per convertire i segnali di tensione in valori di deformazione; questi ultimi sono convertiti in velocità di deformazione ingegneristica, deformazione e sollecitazione dalle formule (3), (4) e (5).

Inoltre, i dati ingegneristici possono essere convertiti in true strain (delta)-true stress (S).

Le formule tipiche:

$$\delta = \ln(1+\varepsilon) \quad (6)$$

$$S = s(1+\varepsilon) \quad (7)$$

non sono raccomandati in tali prove di trazione poiché è probabile che si verifichi la strizione e la deformazione non è uniforme. Vengono invece utilizzati i risultati della correlazione delle immagini digitali.



Considerando la mappa di contorno della prima deformazione principale  $\delta_1$ , come quella mostrata in Figura il valore medio ( $\delta_1$ ) della sezione centrale viene utilizzato come vera deformazione.

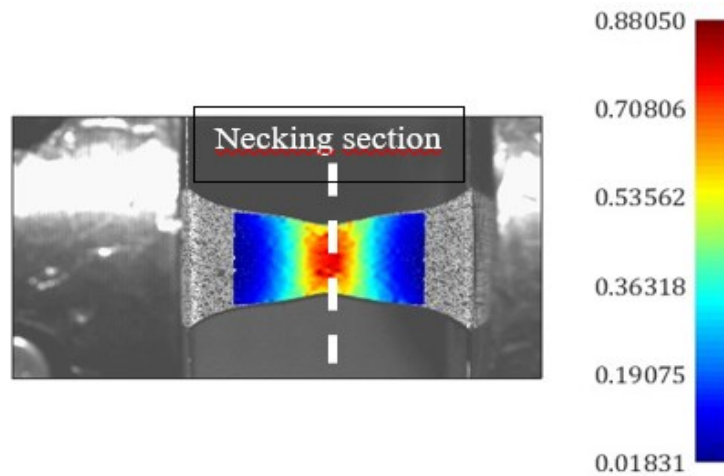


Figura 24 Esempio mappa di deformazione attraverso la (DIC)

Il valore  $(\delta_1)_{\text{max}}$  dell'ultimo telaio prima della frattura è la migliore stima della deformazione a rottura. Si noti che questa è una deformazione reale che non può essere confrontata direttamente con la deformazione ingegneristica a rottura misurata nelle prove di trazione standard; il valore ottenuto con DIC è più simile alla misura di duttilità calcolata dalla riduzione dell'area a rottura:  $\epsilon_f = \ln(A_0/A_f)$ .

### 3.10 OUTPUT FORNITI DALLA PROVA DI TRAZIONE

Esistono determinate norme per la realizzazione della prova di trazione. Per ogni istante si misurano la forza  $P$  e l'allungamento della direzione del carico  $\Delta L=L-L_0$ , poi si trasformano tali valori nelle deformazioni e nelle tensioni nominali, nel caso della curva dei valori nominali. In output si ottiene pertanto la curva  $s$ - $e$  nominale, la quale mostra il punto di strizione localizzata, non presente nella curva reale e importante da conoscere poiché in corrispondenza di esso lo stato di tensione passa da monoassiale a triassiale.

Nel caso nominale è possibile distinguere una regione elastica, al di sotto dello snervamento e a comportamento lineare, e una regione plastica, oltre lo snervamento e con comportamento non lineare e non monotono.

Il primo tratto della regione plastica è a comportamento crescente: la diminuzione dell'area reale (istante per istante) fa sì che la forza  $P$  cresca, ma al contempo l'incrudimento fa aumentare significativamente la  $P$ ; pertanto, complessivamente la forza  $P$  cresce e a parità di area iniziale la tensione nominale cresce. Il secondo tratto è decrescente: si ha la strizione; pertanto, la diminuzione dell'area reale istante per istante è tale da generare una diminuzione della forza  $P$  tale da contrastare l'aumento dovuto all'incrudimento; pertanto, complessivamente la forza  $P$  decresce e, a parità di area iniziale, la tensione nominale decresce.

Lo snervamento rappresenta il passaggio dal tratto lineare al tratto non lineare, la strizione rappresenta il passaggio dal tratto non lineare crescente al tratto non lineare decrescente. Il punto di snervamento non è sempre semplice da individuare; pertanto, si ricorre alla tecnica della retta a  $e=0,2\%=0,002$  (parallela al tratto elastico e passante per il punto di ascissa  $e=0,002$  e ordinata  $s=0$ ).

La deformazione omogenea è quella che va dall'inizio fino alla strizione, la deformazione non omogenea è quella che va dalla strizione alla rottura; insieme danno l'allungamento a rottura.



Figura 25 Schematizzazione curva sforzo-deformazione

## DESCRIZIONE DELLE SINGOLE PROPRIETA'

Il **modulo di elasticità (o di Young) E** → la pendenza del tratto elastico ed è una misura della rigidità.

La **resistenza allo snervamento  $s_0$**  → è il valore della tensione alla quale inizia la deformazione plastica (snervamento) e si calcola col metodo prima enunciato della deformazione residua allo 0,2%.

La **resistenza a trazione  $S_u$**  → è il valore della tensione nominale in corrispondenza del picco della curva.

$$s_u = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (8)$$

La **duttilità** → misurata attraverso l'allungamento a rottura ( $e_f$ ) e la riduzione di area a rottura ( $r_f$ ).

$$\begin{aligned} e_f &= \frac{L_f - L_0}{L_0} \\ r_f &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \\ e_f &= \frac{L_f}{L_0} - 1 = \frac{A_0}{A_f} - 1 = \frac{r_f}{1 - r_f} \end{aligned} \quad (9)$$

La **resilienza** → ossia la capacità del materiale di assorbire energia in campo elastico e di restituirla allo scarico, è valutata con il modulo di resilienza.

$$U_R = \frac{1}{2} s_0 e_0 = \frac{s_0^2}{E} \quad (10)$$

La **tenacità** → è la capacità del materiale di assorbire energia in campo plastico senza rotture, è una proprietà che combina resistenza e duttilità.

$$U_T = \frac{2}{3} s_u e_f \quad (11)$$



## CURVA DEI VALORI REALI

Si acquisiscono sempre i dati relativi a  $P$  e a  $\Delta L$ , ma si ricavo in output i valori della tensione vera o reale  $\sigma=P/A$  e della deformazione vera o reale  $\varepsilon=\ln(L/L_0)$ . La curva reale è sempre crescente fino alla rottura del provino, salvo addolcimento per alta  $T$ . Come già visto  $\sigma=s(1+e)$  ( $e$ =deformazione nominale) e  $\varepsilon=\ln(1+e)$ , dunque si ottiene che la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  è posizionata più in alto e a sinistra rispetto alla curva  $s$ - $e$  fino all'inizio della strizione, la quale si manifesta al raggiungimento del picco della curva nominale (massima tensione nominale). Il fatto che lo spostamento sia più in alto e a sinistra è dovuto al fatto che  $\sigma>s$  (poiché si moltiplica  $s$  per una quantità maggiore di 1) e  $\varepsilon<e$ .

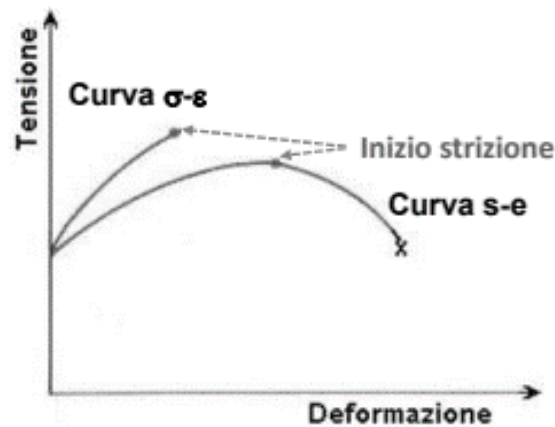
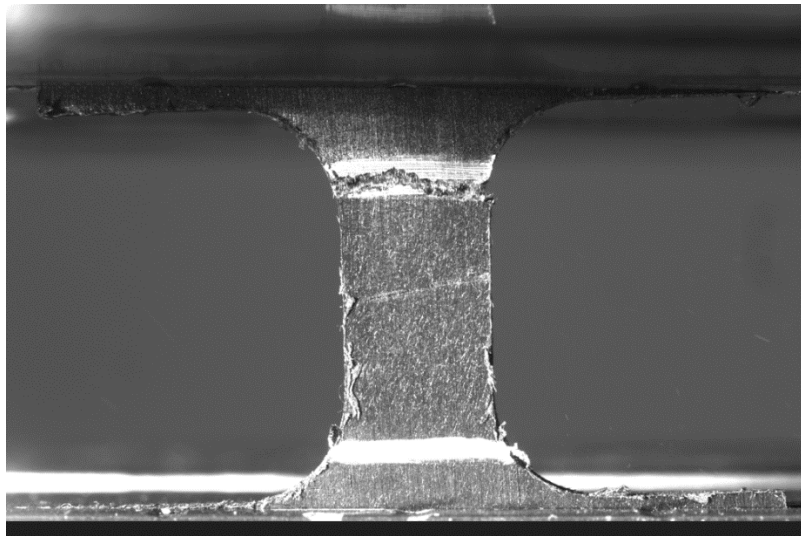


Figura 26 Confronto tra curva nominale e ingegneristica

Inoltre, dopo la strizione lo stato di tensione è triassiale, pertanto, è necessaria una correzione della curva  $\sigma$ - $\varepsilon$ . Supponiamo di indicare nella curva nominale come  $B$  il punto in cui si ha strizione e come  $C$  il punto in cui si ha la rottura, ad essi corrisponderanno nella curva reale i punti  $B'$  e  $C'$ , mentre le due curve hanno in comune il punto di partenza  $O$  (l'origine). Nella curva reale e nel tratto  $O$ - $B'$  valgono le relazioni  $\varepsilon=\ln(1+e)$  e  $\sigma=s(1+e)$ , mentre oltre la strizione  $B'$  lo stato di tensione è triassiale e vale  $\varepsilon=\ln(A_0/A)$ , pertanto o si applica un opportuno criterio di scorrimento oppure si corregge la curva considerando il tratto  $B'C''$  al posto del tratto  $B' C'$ . Di solito, comunque, durante l'esecuzione della prova ci si ferma al raggiungimento di  $B'$ .

## 4 PROVINO

**Specifiche per i provini.** Non esistendo normative specifiche per le prove dinamiche del tipo considerato, per il disegno dei provini è stato fatto riferimento alle normative per prove statiche UNI EN 10002-1 2004 e ASTM-E 8M-04. In particolare, sono state considerate le normative relative a provini piatti di piccole dimensioni da ricavare direttamente da lamiere del materiale da caratterizzare. Le dimensioni effettive dei provini poi sono state decise anche con riferimento alle dimensioni del sistema di prova e alle velocità di deformazione che si desiderava ottenere.



*Figura 27 Frame di rottura prova Zwick*

La forma dei provini è stata concepita per l'esecuzione delle prove dinamiche alla barra di Hopkinson, sulla base dell'esperienza pregressa su altri materiali polimerici. Pertanto, i provini sono di forma scalata rispetto alla tradizionale geometria per test quasi statici, con la parte in presa sugli afferraggi contenente le sedi per l'innesto di spine.

Al fine di variare lo strain rate della prova sono stati ricavati provini di lunghezza utile diversa a partire da placchette stampate a iniezione. Inoltre, è stata investigata la direzione di orientamento delle fibre ( $0^\circ$  = parallelo al flusso,  $90^\circ$  = perpendicolare al flusso,  $45^\circ$  = inclinato di  $45^\circ$  rispetto al flusso) sul comportamento dinamico del materiale

I provini sono stati disegnati in modo che il tratto utile permettesse il raggiungimento di elevate velocità di deformazione.



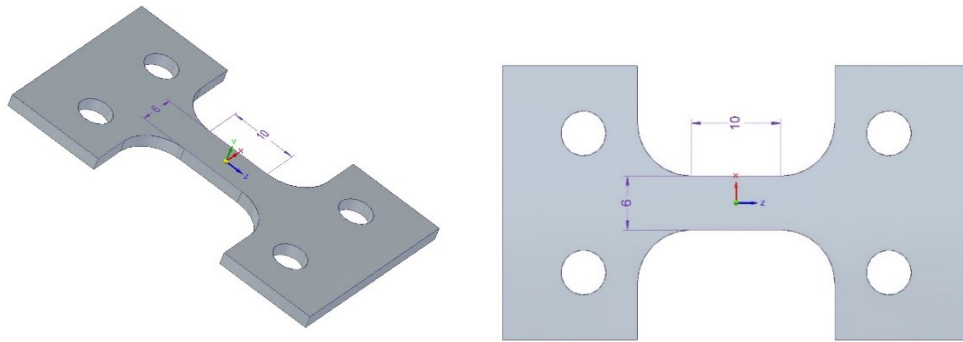


Figura 28 Vista 3D e vista dall'alto del provino

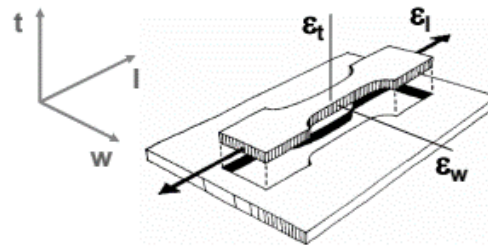
#### 4.1 ANISOTROPIA

Nel caso della lamiera il processo di fabbricazione, che include sempre alcuni passaggi di laminazione, induce nel materiale caratteristiche particolari. Le proprietà meccaniche dipendono dall'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione. In altre parole, le lamiere presentano tutte un certo grado di anisotropia. Quando la differenza di caratteristiche interessa direzioni diverse, ma tutte contenute nel piano della lamiera (molto frequentemente si consideriamo la direzione di laminazione e quella perpendicolare) si parla di anisotropia planare, quando invece la differenza di proprietà si manifesta lungo lo spessore si parla di anisotropia normale. In teoria, l'anisotropia planare può essere messa in evidenza effettuando la prova di trazione su provini estratti in direzioni diverse rispetto a quella di laminazione e osservando le differenze tra i risultati.

In pratica, però, questo metodo è poco sensibile e l'anisotropia viene valutata confrontando le variazioni di larghezza e di spessore dei provini. Se definiamo con  $\epsilon_w$  ed  $\epsilon_t$  le deformazioni (reali, logaritmiche) plastiche (cioè misurate dopo lo scarico o depurate dalla parte elastica) il coefficiente di anisotropia è dato da:



$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_0}{w_f}}{\ln \frac{t_0}{t_f}}$$



(12)

Figura 29 Disposizione delle epsilon nello spazio tridimensionale

In generale, il valore di  $r$  dipende dall'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione: si definiscono  $r_0$ ,  $r_{90}$  e  $r_{45}$  i valori relativi a provini paralleli ad essa, perpendicolari ed inclinati di  $45^\circ$ . Il valore medio tra i valori relativi alle tre inclinazioni diverse è di fatto una misura dell'anisotropia normale (lo spessore varia più o meno di quanto faccia la dimensione trasversale), mentre la differenza di questi valori può essere legata all'anisotropia planare. Per dettagli a questo proposito è possibile consultare le norme UNI 8341:1982 oppure la ISO 10113:2006.

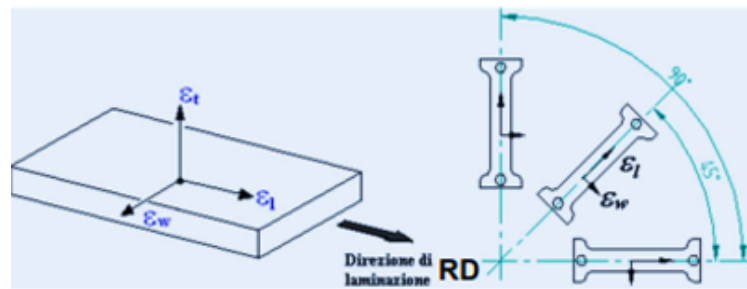


Figura 30 Provini con fibre a diverse angolazioni rispetto al flusso

Il metodo accennato è l'unico possibile per valutare l'anisotropia normale di una lamiera, visto che è tecnicamente impossibile misurare direttamente la resistenza del materiale in direzione normale. Per farlo, sarebbe necessario lavorare un provino perpendicolare al foglio di lamiera: l'asse del provino dovrebbe essere interamente contenuto nello spessore che sovente è di pochi millimetri. Il comportamento anisotropo della lamiera può essere desiderabile: in particolare l'anisotropia normale può implicare (se il coefficiente è maggiore di 1) che il materiale si deformi maggiormente nel piano della lamiera (effetto desiderato) rispetto a quanto faccia nel senso dello spessore (che porta all'assottigliamento ed

alla rottura); relativamente all'anisotropia planare, questo effetto è generalmente indesiderato.

In questo lavoro abbiamo studiato il comportamento di un particolare materiale composito con matrice polimerica; il polipropilene, uno dei tecnopolimeri più utilizzati, rinforzato con fibre di vetro. Successivamente per comprendere i risultati delineati al termine del lavoro è utile comprendere che cosa sono i materiali compositi e quali sono le loro principali proprietà.

## 5 TECNOPOLIMERO

I tecnopolimeri sono polimeri dotati di elevate caratteristiche fisico-meccaniche (rigidità, tenacità, duttilità, lavorabilità, resistenza a temperature estremamente elevate, a carichi statici e dinamici e all'invecchiamento) tali da consentirne l'utilizzo in sostituzione dei metalli.

La definizione di tecnopolimero è arbitraria, dato che virtualmente ogni materia plastica può essere considerata in una certa forma un tecnopolimero. La tabella riporta la densità, la resistenza a trazione agli urti, la rigidità dielettrica e la massima temperatura di utilizzo. La bassa densità di questi materiali è un grande vantaggio per molte realizzazioni di progetto. Come per la maggior parte delle materie plastiche, la loro resistenza a trazione è relativamente bassa; i valori mostrati in Tabella 1 variano da 55 a 95 Mpa. Questi bassi valori costituiscono generalmente uno svantaggio per la progettazione.



Tabella 1 Caratteristiche tecnopolimeri

Materiale	Densità g/cm <sup>3</sup>	Resistenza a trazione MPa	Rigidità all'impatto Izod, J/m	Rigidità dielettrica V/m	Massima temperatura d'uso (senza carico)
Nylon 6.6	1.13-1.15	62-83	220	15 200	82-150
Poliacetale, omopolimero	1.42	69	75	12 600	90
Policarbonato	1.20	62	640-840	15 000	120
Poliestere:					
PET	1.37	72	43	–	80
PBT	1.31	55-57	64-70	23 200-27 600	80
Polifenilenoossido	1.06-1.10	54-66	270	15 800-19 700	80-105
Polisolfone	1.24	70	64	16 700	150
Polifenilensolfuro	1.34	69	16	23 400	260
Polietero-etero-chetone	1.33	95	66-87	25 000-33 000	250

La capacità di isolamento elettrico dei tecnopolimeri è alta come per la maggior parte delle materie plastiche. Ci sono molte altre importanti proprietà dei tecnopolimeri che li rendono industrialmente importanti. Sono relativamente facili da trasformare in prodotti semifiniti o finiti, e la loro lavorazione può essere automatizzata. I tecnopolimeri hanno una buona resistenza alla corrosione in molti ambienti e in alcuni casi anche una eccellente resistenza agli agenti chimici aggressivi.

## 5.1 POLIPROPILENE

Il polipropilene è la terza materia plastica dal punto di vista dei volumi di produzione ed è uno dei materiali meno costosi dato che può essere sinterizzato da derivati petrolchimici grezzi a basso costo utilizzando catalizzatori di tipo Ziegler.

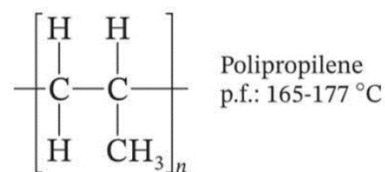


Figura 31 Unità strutturali del polipropilene

Il polipropilene ha proprietà equilibrate e attraenti per la produzione di molti manufatti. Le proprietà includono una buona resistenza chimica all'umidità e al calore, unite da una bassa densità ( da 0.900 a 0.910 g/cm<sup>3</sup>), buona durezza superficiale e stabilità dimensionale. Inoltre, ha eccellente resistenza a fatica in flessione come cerniera e può essere usato



per molti prodotti. Tutte queste caratteristiche rendono questo termoplastico un materiale molto competitivo.

## **5.2 RAFFORZAMENTO DEI TERMOPLASTICI PER AGGIUNTA DI FIBRE DI VETRO**

Alcuni termoplastici vengono rinforzati con delle fibre di vetro. Il contenuto di vetro in questi materiali varia dal 20% al 40% in peso. Il quantitativo di vetro è un compromesso tra la desiderata resistenza meccanica, i costi globali e la facilità di lavorazione. Tuttavia, il rafforzamento tramite fibre di vetro comporta lati positivi e negativi, infatti se da una parte aumenta notevolmente la resistenza a trazione, al contrario l'allungamento a rottura subisce una notevole diminuzione dal 60 al 2,5%. Un altro modo molto efficace per il rafforzamento come abbiamo precedentemente visto è l'aumento del grado di cristallinità.

## **5.3 COS'È UN MATERIALE COMPOSITO?**

Un materiale composito è un materiale eterogeneo, cioè, costituito da due o più fasi con proprietà fisiche differenti, in quest'ultimo caso si parla di ibrido, le cui proprietà sono migliori di quelle delle fasi che lo costituiscono. Di solito, le diverse fasi nel composto sono costituite da materiali diversi, come compositi in fibra di carbonio e resina epossidica. Esse sono distinguibili, ma intimamente legate fra loro. I materiali compositi possono essere sia naturali, esempio il legno, in cui le fibre di cellulosa sono disperse in una fase di lignina, che artificiali. Anche se vengono considerati dei materiali moderni, i compositi sono usati da molto tempo e sono stati il risultato di idee volte a fornire all'uomo il materiale adatto alla soluzione dei problemi che si trovava a risolvere; esempi tipici sono i mattoni in argilla e paglia, gli archi e le baliste in legno e tendini di animali, le katane giapponesi, ma anche le leghe come il bronzo.

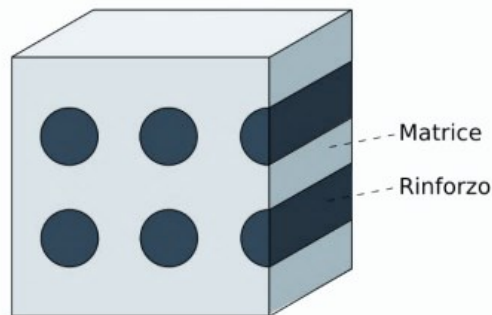


## STRUTTURA DEI MATERIALI COMPOSITI

Le singole fasi che formano i materiali compositi sono chiamati costituenti, e in base alla loro funzione prendono il nome di:

- Matrice;
- Rinforzo (fibre, additivi o cariche).

L'insieme di queste due parti costituisce un prodotto in grado di garantire proprietà meccaniche elevatissime, sia in termini di resistenza che di rigidità, (fondamentale è la cura dell'adesione interfacciale tra rinforzo e matrice) e massa volumica decisamente bassa.



*Figura 32 Semplificazione delle fasi dei compositi*

## MATRICE

La matrice è una fase continua e omogenea, che ha il compito di racchiudere il rinforzo, garantendo la coesione del materiale composito e di garantire che le fibre di rinforzo (o particelle) presentino la giusta dispersione all'interno del composito. Inoltre, essa trasmette il carico esterno alle fibre; andando a realizzare il cosiddetto "Fail Safe", cioè la rottura di una fibra non comporta la rottura dell'intero composito. Infatti, le matrici hanno un allungamento a rottura più elevato delle fibre, perché in caso di rottura di queste ultime, esse devono essere in grado di rallentare la propagazione del difetto alle altre fibre, aumentando la tenacità del composito. Inoltre, le matrici, se sottoposte a variazioni di temperatura,

durante il processo di produzione, non devono subire un ritiro troppo grande, per evitare l'insorgere di tensioni residue indesiderate.

A seconda della natura della matrice, i materiali compositi si suddividono in diverse categorie:

- Compositi a matrice polimerica, ad esempio termoplastici (ABS, Polipropilene, Poliammide) o termoindurenti (come le resine fenoliche, resine epossidiche, resine poliuretaniche);
- Compositi a matrice metallica, ad esempio alluminio, titanio e loro leghe, magnesio;
- Compositi a matrice ceramica, generalmente carburo di silicio o allumina;

Nella maggior parte delle volte le matrici più utilizzate sono quelle polimeriche, perché garantiscono una bassa densità a scapito di performance peggiori all'aumentare della temperatura, soprattutto utilizzando matrici termoplastiche, esse sono meno stabili chimicamente; si ha il rammollimento alle alte temperature. Il rammollimento della matrice termoplastica consiste nel passaggio da uno stato vetroso (solido), ad uno gommoso e infine a quello fluido, a causa della diminuzione della viscosità. Questo avviene poiché, i legami tra le varie molecole polimeriche sono dei legami deboli rispetto a quelli intermolecolari, e l'energia, sotto forma di calore, per rompere i primi è minore di quella necessaria per intaccare i secondi. Tra i vantaggi delle resine termoplastiche si ricordano la maggiore tenacità più elevata resistenza all'urto. Le matrici termoindurenti vengono perlopiù utilizzate quando si vogliono ottenere delle caratteristiche meccaniche molto elevate, infatti hanno una viscosità inferiore, una rigidità maggiore e una porosità minore rispetto alle matrici termoplastiche. Sono, però, più costose, infatti si usano in ambiti particolari, come la realizzazione di hypercar, applicazioni nautiche, aeronautiche e aerospaziali.

## RINFORZO

Il rinforzo è rappresentato da una fase dispersa, che viene appunto dispersa in varie modalità all'interno della matrice e ha il compito di assicurare



rigidezza e resistenza meccanica, assumendo su di sé il carico esterno applicato. A seconda del tipo di rinforzo, i materiali compositi si suddividono in:

- Compositi particellari, in cui il rinforzo è costituito da particelle;
- Compositi rinforzati con fibre, che possono a loro volta essere suddivisi in compositi a fibre continue (o lunghe), in questo caso le fibre sono disposte in modo ordinato e orientato nella matrice, compositi a fibre discontinue (o corte) allineate fra loro e compositi a fibre discontinue disposte random;
- Compositi strutturati, per esempio pannelli a sandwich, utilizzati per impieghi in flessione e laminati, ottenuti per sovrapposizione di lamine di fibra intrecciata in diversi modi e diversamente orientate.

## COMPOSITI PARTICELLARI

Le particelle utilizzate in questi compositi hanno dimensioni e conformazioni diverse (forma arrotondata, a lamelle, forma aciculare), in base alle caratteristiche che si vogliono ottenere. Infatti, le proprietà chimico-fisiche dipendono dalla geometria delle stesse, cioè dalla loro forma e dimensioni, ma anche dalla loro concentrazione, distribuzione e orientamento all'interno della matrice. Esempi di particelle sono i whickers (Figura 1.3, a sinistra) e le scaglie, o flakes (Figura 1.3, a destra)

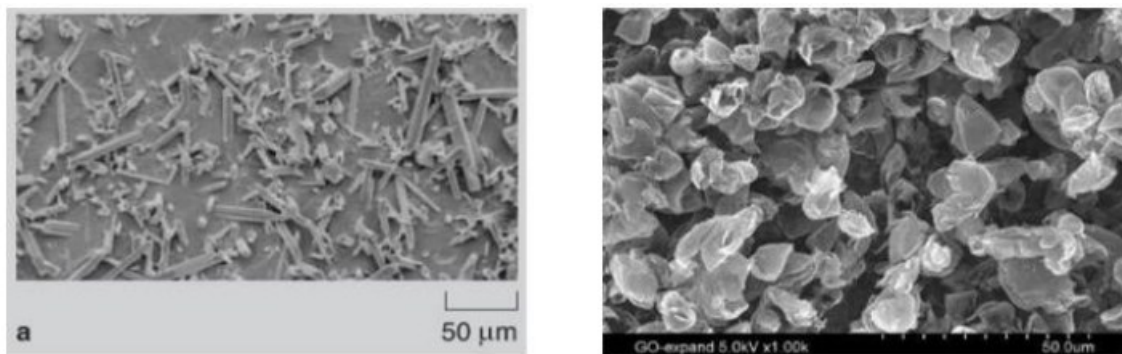


Figura 33 Esempio di particelle utilizzate nei compositi, a destra le flakes mentre a sinistra i whickers

Quest'ultime sono particelle piatte, a forma di squama ottenute a basso costo ed utilizzate tipicamente nella metallurgia delle polveri. Principale



vantaggio dell'utilizzo di particelle rispetto alle fibre è quello di avere il rinforzo distribuito all'interno della matrice in modo non controllato, ottenendo così dei compositi praticamente isotropi, per quanto riguarda le proprietà meccaniche. Con i flakes, inoltre, si possono ottenere anche particolari proprietà di ridotta trasmissione di liquidi, umidità e vapori, grazie alla loro geometria bidimensionale. Le particelle presentano i seguenti vantaggi:

- Minori costi di produzione;
- Facilità dei processi di formatura anche di forme complesse;
- Comportamento costitutivo isotropo, come scritto poco sopra. A seconda dello scopo per cui vengono aggiunti, le particelle si suddividono in:
  - Riempitivi, presentano un basso costo e solitamente sono costituiti da polvere;
  - Rinforzanti, i quali migliorano le caratteristiche meccaniche e termiche del composito;
  - Diluenti, migliorano la lavorabilità del composito, sono rappresentati dai pigmenti.

Le cariche devono essere bagnate dal polimero e vengono trattate superficialmente con additivi bagnanti, come i silani. I fattori più importanti che influenzano l'interazione polimero-carica sono la dimensione delle particelle e la forma di queste ultime, ossia il rapporto superficie-volume. L'effetto rinforzante migliora diminuendo le dimensioni delle particelle, dipende dalla frazione volumetrica e dalla distribuzione delle dimensioni.

#### **5.4 COMPOSITI RINFORZATI CON FIBRE**

Questi compositi sono di gran lunga quelli più utilizzati nelle costruzioni meccaniche. Il loro successo è strettamente legato all'elevato rapporto resistenza/peso (resistenza specifica) ed all'elevato rapporto rigidezza/peso (modulo specifico) unito alla possibilità di variare a piacimento il grado di anisotropia intervenendo, per esempio, sulla concentrazione e sull'orientamento del rinforzo. L'elevata resistenza





specifica dei compositi fibrosi è essenzialmente legata alla elevata resistenza delle fibre ed al basso peso di fibre e matrice.

Sperimentalmente si osserva che la resistenza di un dato materiale aumenta significativamente se esso viene prodotto in fibre sottili. Inoltre, la resistenza della fibra aumenta al diminuire delle dimensioni della sezione trasversale. L'anisotropia del materiale composito viene ottenuta in maniera controllata, andando a disporre le fibre di rinforzo nelle direzioni preferenziali, ossia in quelle direzioni in cui si sa verrà caricato e quindi le prestazioni vengono così "ottimizzate", è il caso dei compositi a fibre continue. Se, invece, la disposizione delle fibre è più difficilmente controllabile, come nel caso dei compositi a fibre corte, diventa più difficile orientarle nella direzione desiderata. Le fibre, naturali ed artificiali, oltre ad essere prodotte per scopi essenzialmente tessili, sono anche prodotte per scopi di tipo ingegneristico come le fibre vetrose, metalliche, sintetiche (es. nylon). Alle fibre è affidato, nella maggior parte dei casi, il compito di fornire al composito le proprietà desiderate di resistenza e rigidità. Le fibre, invece di essere trattate singolarmente, vengono concentrate in un fascio (roving) che ne contiene varie centinaia arrotolate con o senza twist su un cilindro; oppure vengono attorcigliate a trefolo ed avvolte (yarn). Successivamente possono essere intessute o usate per altri procedimenti di lavorazione. Le fibre sono utilizzate anche sotto forma di whiskers che sono singoli filamenti metallici con diametro di un micron e lunghezza di circa un millimetro, ognuno dei quali è realizzato da un singolo cristallo metallico; essi sono usati nei materiali compositi più leggeri ad alta resistenza e alta temperatura per scopi aerospaziali. Inoltre, le fibre devono essere trattate con dei compatibilizzanti, per aumentarne la bagnabilità e l'adesione con la matrice. Esse devono avere un diametro molto piccolo (intorno ai  $10\ \mu\text{m}$ ), perché i difetti sulle fibre si riducono e aumenta la superficie di contatto con la matrice.

Le fibre di rinforzo più utilizzate nei compositi fibrosi sono:

- Fibre di vetro (tipo E, tipo S più resistente del primo);
- Fibre di carbonio e grafite; • Fibre ceramiche (carburo di silicio e allumina);



- Fibre aramidiche (Nomex, Kevlar, Spectra, Dyneema) sono costituite da catene poliammidiche sintetiche;
- Fibre di boro, anche se non si può filare, per cui viene depositato sulle fibre di tungsteno.

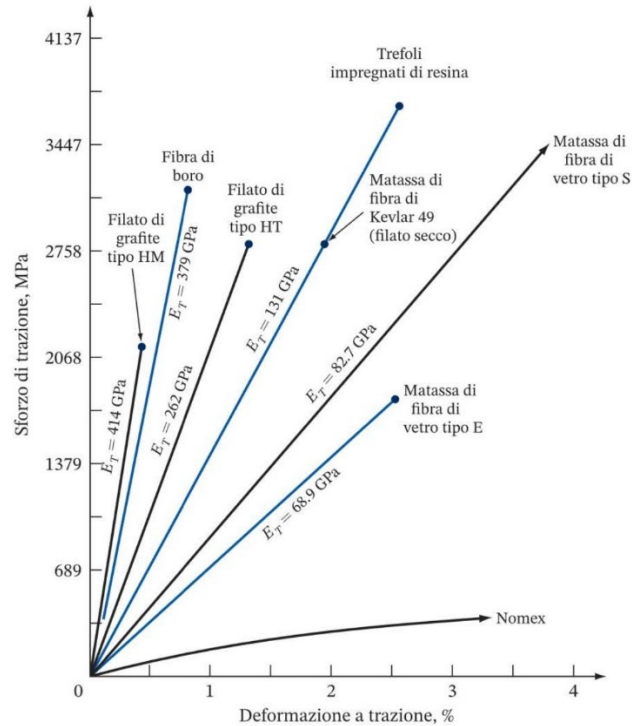


Figura 34 Sforzo-deformazione dei vari tipi di fibre di rinforzo

Negli ultimi anni si sta facendo uso sempre maggiore, legato principalmente ai problemi ambientali, delle fibre di origine vegetale, come canapa e simili. La Figura 34 confronta i tipici grafici sforzo-deformazione per le fibre di carbonio, aramidiche e di vetro. Le fibre di carbonio presentano la migliore combinazione tra elevata resistenza meccanica, elevato modulo elastico e bassa densità, ma presentano una bassa capacità di allungamento. La fibra aramidica (Kevlar 49) ha una buona combinazione tra elevata resistenza a trazione, modulo elevato, minore di quello delle fibre di carbonio, bassa densità ed elevato allungamento (resistenza all'urto).

Le fibre di vetro, che presentano valori di densità più elevati, hanno resistenza a trazione e modulo elastico più bassi delle altre fibre. Però, queste ultime sono molto più economiche delle altre per cui risultano anche le più impiegate.

## 5.5 LA MECCANICA DEI MATERIALI COMPOSITI

I materiali compositi hanno caratteristiche peculiari che li distinguono in modo netto dai tradizionali materiali per l'ingegneria; pertanto, necessitano di nuovi modelli analitici di descrizione del comportamento strutturale e appropriate procedure di analisi sperimentale. La maggior parte dei materiali tradizionali possono essere descritti come materiali omogenei (con proprietà uniformi, non funzione della posizione), ed isotropi (con proprietà costanti in ogni direzione e in ogni punto, non funzione dell'orientazione). I materiali compositi sono, invece, spesso eterogenei ed anisotropi, ed il loro studio può essere intrapreso attraverso due punti di vista: la micromeccanica e la macromeccanica. La prima è lo studio del comportamento del materiale composito in termini di moduli elastici partendo da quelli dei singoli costituenti. Oggetto complementare dell'analisi micromeccanica è la valutazione delle capacità di resistenza in termini di sollecitazione di rottura. La seconda è lo studio del comportamento del laminato, valutato come composizione del comportamento macroscopico delle singole lamine costituenti (teoria della laminazione). Si vuole ora riportare la teoria delle proprietà elastiche di una lamina.

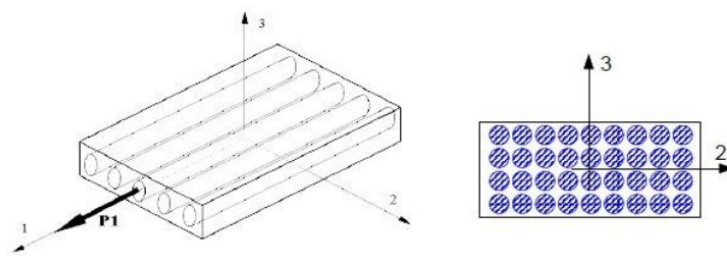


Figura 35 Lamina materiale composito, i cilindri rappresentano le fibre.

Le ipotesi utilizzate sono le seguenti:

- Fibre continue, omogenee, isotrope e linearmente elastiche;
- Fibre perfettamente allineate nella direzione 1 e distribuite in modo regolare;
- Matrice omogenea, isotropa e linearmente elastica;
- Perfetta adesione tra fibra e matrice (quindi  $\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ );
- Lamina omogenea, ortotropa e linearmente elastica.



## 6 TABELLE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE E TEMP.

TEMPERATURA AMBIENTE

*Tabella 2 Prove eseguite a T ambiente*

	0°	45°	90°
0,01 (ZWICK) L=7	1	1	1
10 (SIPLAN) L=7	3	3	3
100 (BARRA) L=10	3	3	3
1000 (BARRA) L=4	2	2	2

TEMPERATURA PARI A -20°C

*Tabella 3 Prove eseguite a T=-20°C*

	0°	45°	90°
0.01 (ZWICK) L=7	/	/	/
10 (SIPLAN) L=7	2	2	2
100 (BARRA) L=10	2	2	2
1000 (BARRA) L=4	2	2	2

L= LUNGHEZZA TRATTO UTILE

### PROVE TEMPERATURA AMBIENTE

#### DIREZIONE FIBRE 0°

PROVA	N TEST	L0	FPS
Zwick	4		
Siplan	8	7mm	50000
Siplan	3	7mm	20000
Siplan	1	7mm	20000
Barra	1	10mm	300000
Barra	2	10mm	300000
Barra	3	10mm	300000
Barra	10	4mm	150000
Barra	11	4mm	150000
Barra	31	4mm	300000

### DIREZIONE FIBRE 90°

PROVA	N TEST	L0	FPS
Zwick	5		
Siplan	9	7mm	50000
Siplan	10	7mm	50000
Siplan	11	7mm	50000
Barra	4	10mm	150000
Barra	5	10mm	150000
Barra	6	10mm	150000
Barra	12	4mm	150000
Barra	14	4mm	150000
Barra	32	4mm	300000

### DIREZIONE FIBRE 45°

PROVA	N TEST	L0	FPS
Zwick	6		
Siplan	12	7mm	50000
Siplan	13	7mm	50000
Siplan	14	7mm	50000
Barra	8	10mm	150000
Barra	9	10mm	150000
Barra	36	10mm	300000
Barra	16	4mm	300000
Barra	34	4mm	300000
Barra	35	4mm	300000

## PROVE A TEMPERATURA $T = -20^{\circ}\text{C}$

### DIREZIONE FIBRE $0^{\circ}$

PROVA	N TEST	L0	FPS
Siplan	15	7mm	50000
Siplan	16	7mm	50000
Barra	17	10mm	300000
Barra	18	10mm	300000
Barra	25	4mm	300000
Barra	26	4mm	300000

### DIREZIONE FIBRE $90^{\circ}$

PROVA	N TEST	L0	FPS
Siplan	17	7mm	50000
Siplan	18	7mm	50000
Barra	19	10mm	300000
Barra	20	10mm	300000
Barra	27	4mm	300000
Barra	28	4mm	300000

### DIREZIONE FIBRE $45^{\circ}$

PROVA	N TEST	L0	FPS
Siplan	19	7mm	50000
Siplan	20	7mm	50000
Barra	21	10mm	300000
Barra	22	10mm	300000
Barra	29	4mm	300000
Barra	30	4mm	300000



## 6.1 RISULTATI TEST

### PROVINI ORIENTATI A 0°

La Figura 36, riporta le curve tensione vera – deformazione vera relative ai provini con orientamento delle fibre a 0° per le prove a temperatura ambiente; la Figura 37 riporta le curve relative ai provini con orientamento delle fibre a 0° per le prove a bassa temperatura  $T=-20^{\circ}\text{C}$ .

In Figura 39, Figura 40 e Figura 41 è riportato il confronto delle curve tensione vera – deformazione vera a diversa temperatura per le prove dinamiche (rispettivamente  $\dot{\epsilon} = 10^1 \text{s}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{s}^{-1}$  e  $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{s}^{-1}$ ).

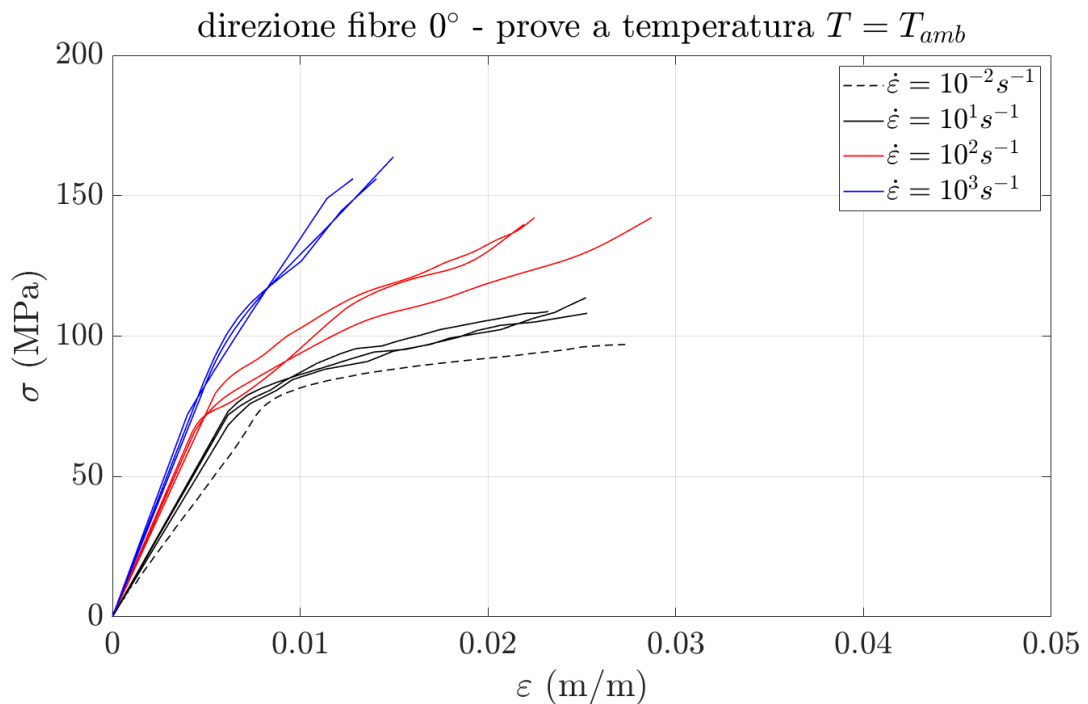


Figura 36 - Provini a 0°, temperatura ambiente



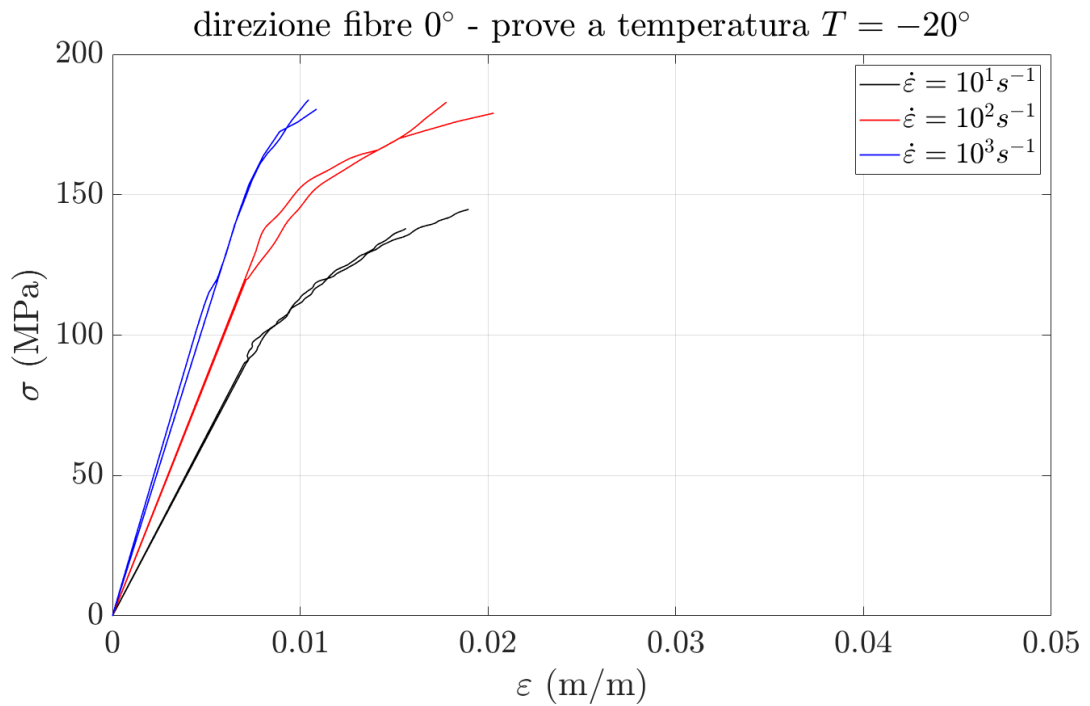


Figura 37 - Provini a  $0^\circ$ , temperatura  $T = -20^\circ C$

### CONFRONTO DELLE CURVE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE

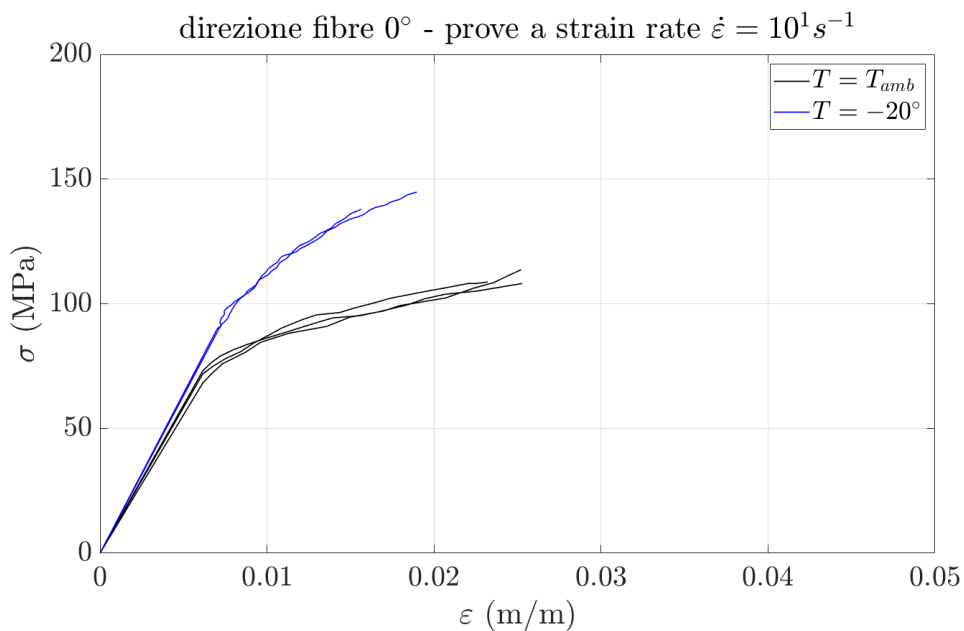


Figura 38 Prove con fibre a  $0^\circ$  -  $\dot{\epsilon} = 10^1 s^{-1}$ ,



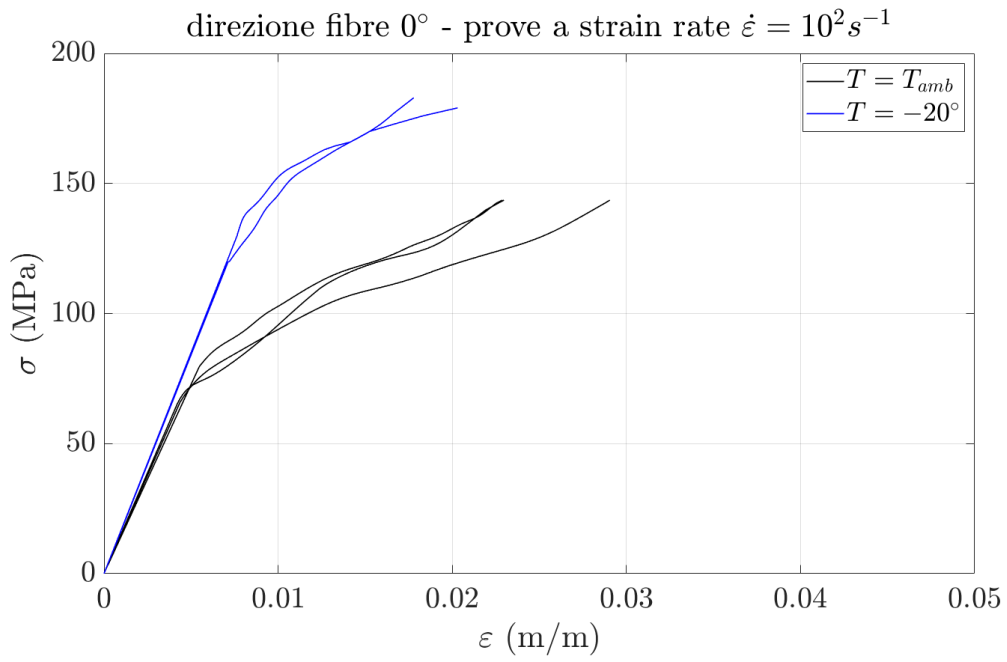


Figura 39 Prove con fibre a  $0^\circ$ - $\dot{\epsilon} = 10^2 s^{-1}$

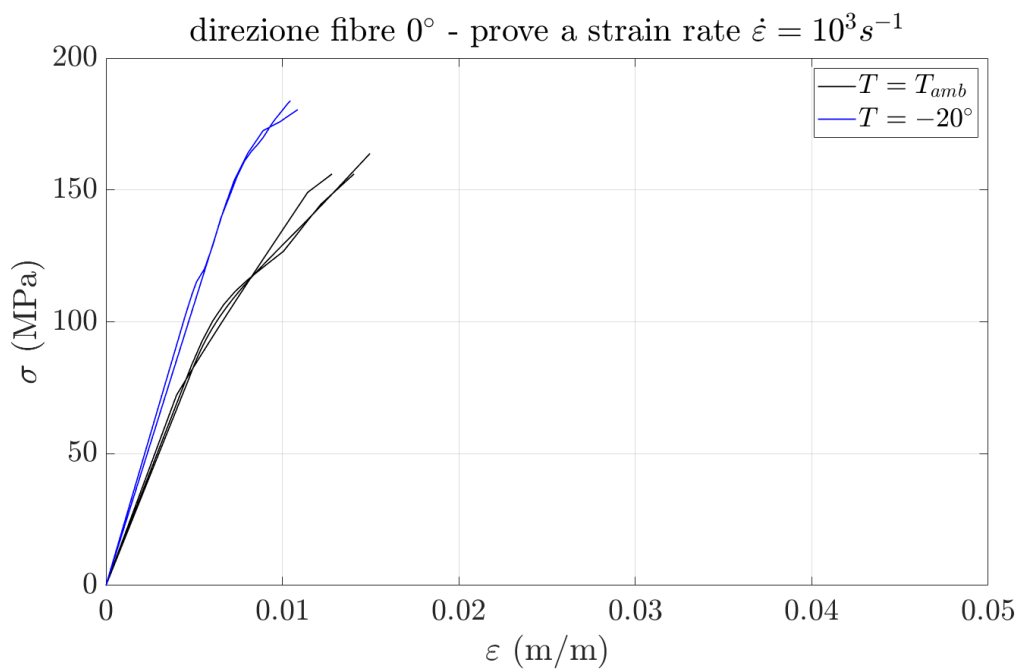


Figura 40 Prove con fibre a  $0^\circ$ - $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$

Dai grafici si evince che il materiale assume un comportamento molto sensibile con la velocità di deformazione, nel range tra  $10^{-2}$  a  $10^3$   $s^{-1}$ . Anche la temperatura influenza notevolmente la risposta meccanica del materiale, sia in termini di resistenza massima sia in termini di allungamento a rottura. La pendenza rimane pressoché invariata nel range tra  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$ .

I risultati presentano una buona ripetibilità statistica per ogni singolo gruppo di velocità di deformazione investigato e per ciascuna temperatura. I valori caratteristici di resistenza dei provini sono riportati nella seguente Tabella 4. Mediamente si può visualizzare un aumento di circa 30MPa nelle prove a freddo.

Tabella 4 - Caratteristiche di resistenza dei provini a  $0^\circ$

<i>strain rate</i> ( $s^{-1}$ )	$10^{-2}$		$10^1$		$10^2$		$10^3$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
T ambiente	96.99	/	110.17	3.02	141.42	1.37	158.65	4.50
T = -20°C	/	/	141.36	4.79	173.40	0.81	182.13	2.36

## PROVINI ORIENTATI A $45^\circ$

La Figura 41, riporta le curve tensione vera – deformazione vera relative ai provini con orientamento delle fibre a  $45^\circ$  per le prove a temperatura ambiente; la Figura 42 riporta le curve relative ai provini con orientamento delle fibre a  $45^\circ$  per le prove a bassa temperatura T=-20°C.

Nelle Figura 43, Figura 44 e Figura 45 è riportato il confronto delle curve a diversa temperatura per le prove dinamiche (rispettivamente  $\dot{\epsilon} = 10^1 s^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^2 s^{-1}$  e  $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$ ) relative ai provini con orientamento delle fibre a  $45^\circ$ .



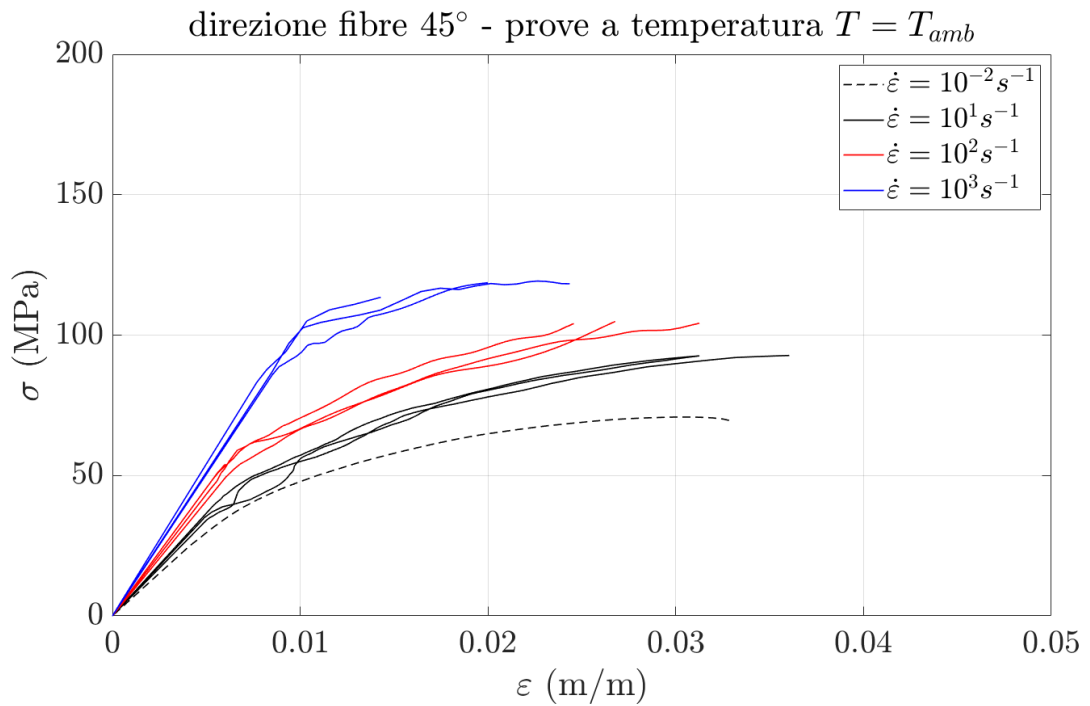


Figura 41- Provini a 45°, temperatura ambiente

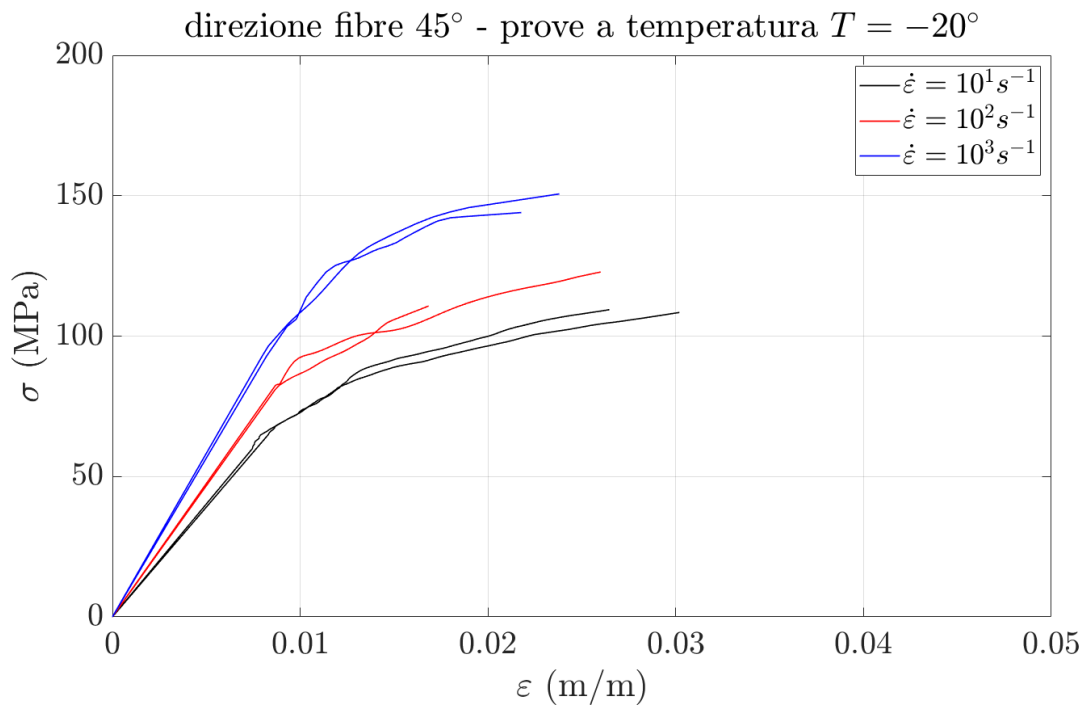


Figura 42- Provini a 45°, temperatura  $T = -20^\circ C$



## CONFRONTO PROVE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE

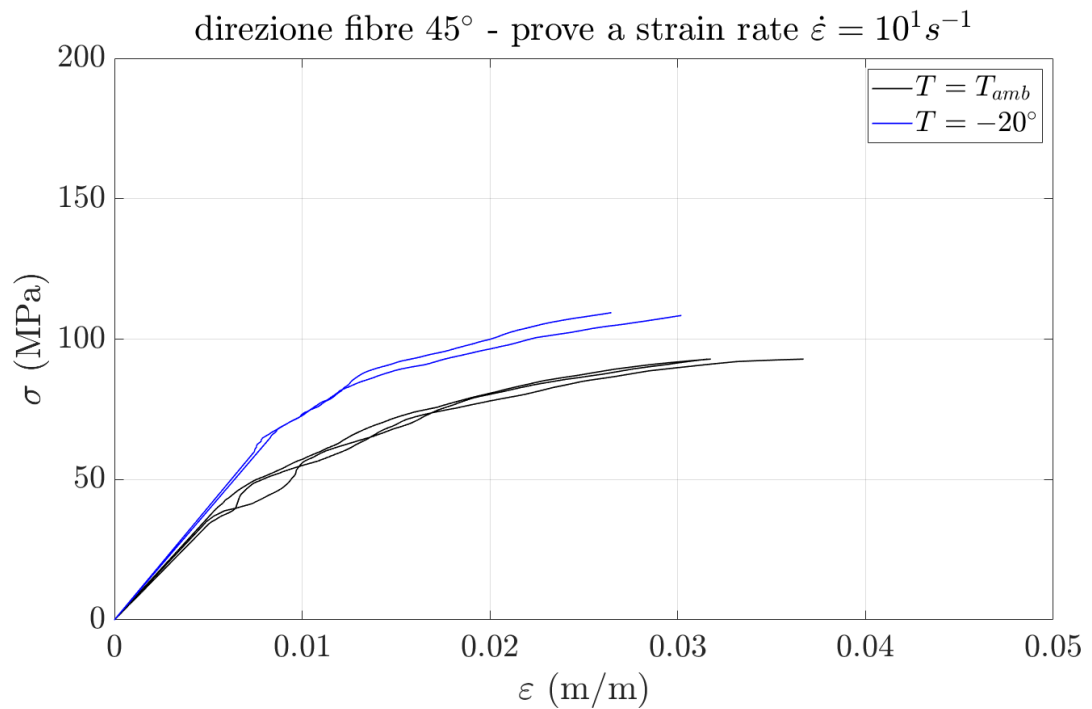


Figura 43- Prove con fibre a 45°-  $\dot{\epsilon} = 10^1 s^{-1}$

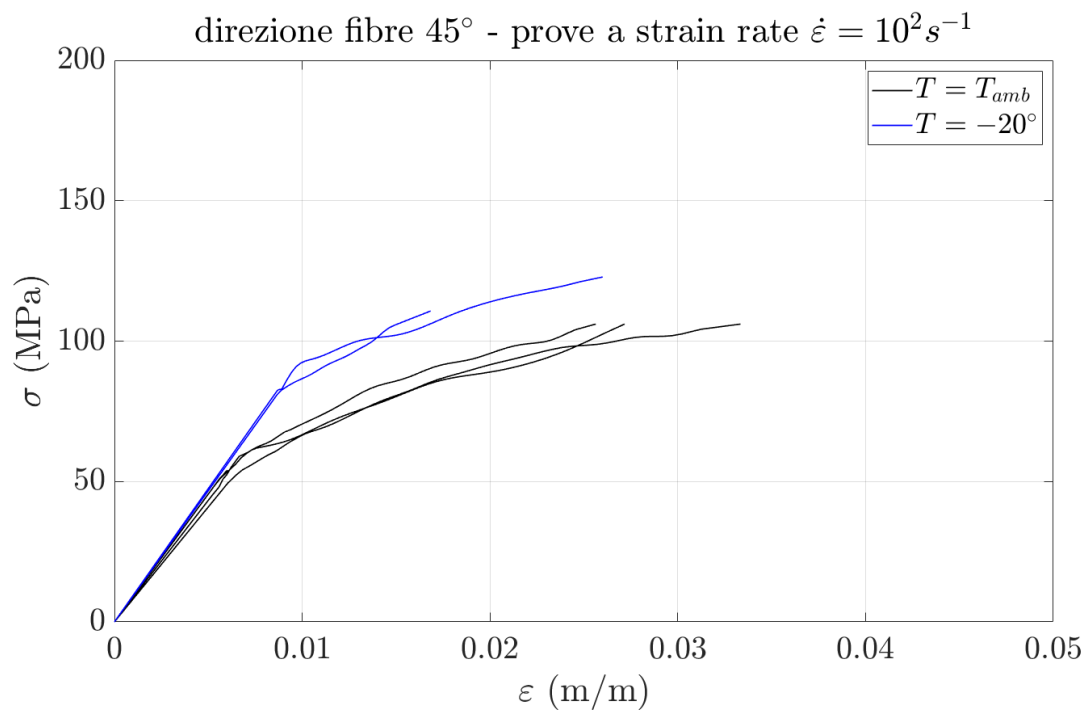


Figura 44- Prove con fibre a 45°- $\dot{\epsilon} = 10^2 s^{-1}$



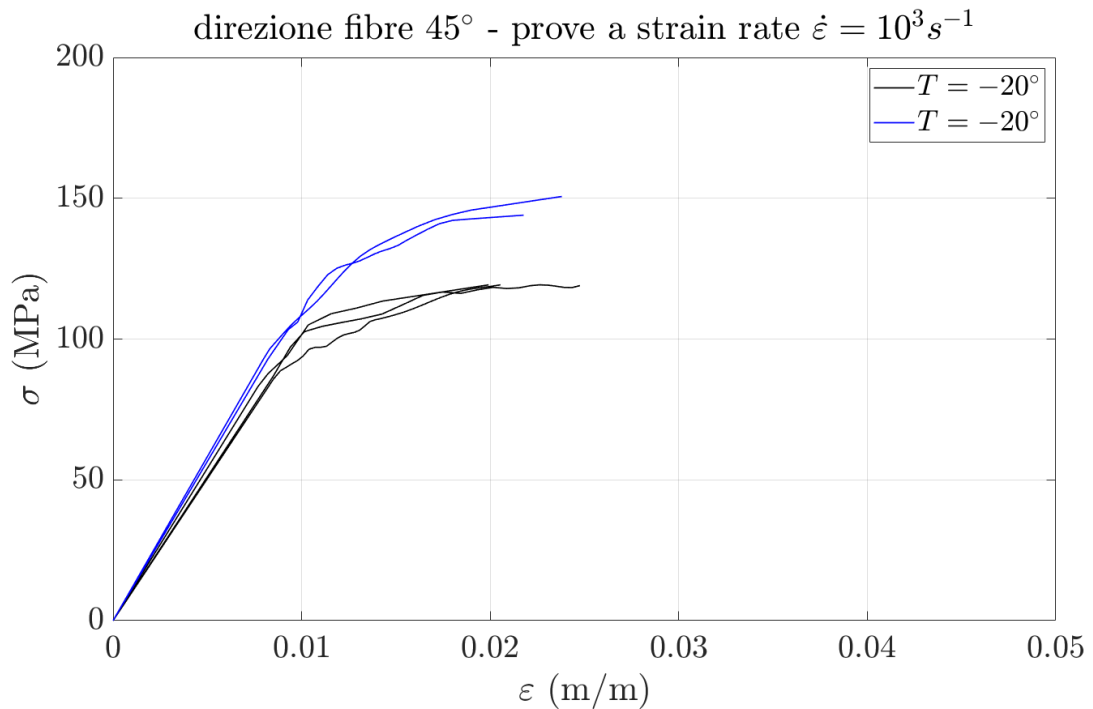


Figura 45- Prove con fibre a 45°- $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$

Anche nel caso di direzione 45° il materiale assume un comportamento molto sensibile con la velocità di deformazione e con la temperatura, nel range tra  $10^{-2}$  a  $10^3$  1/s presentando una discreta dispersione statistica per i test eseguiti alla massima velocità di deformazione. La pendenza in questo caso rimane costante in tutti i range di strain rate. I valori caratteristici di resistenza dei provini sono riportati nella seguente Tabella 5. In questo caso si può delineare un aumento di circa 20MPa nelle prove a freddo.

Tabella 5 - Caratteristiche di resistenza dei provini a 45°

strain rate ( $s^{-1}$ )	$10^{-2}$		$10^1$		$10^2$		$10^3$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
T ambiente	70.82	/	92.88	1.74	104.40	0.41	117.13	3.17
T = -20°C	/	/	108.91	0.70	116.78	8.56	147.31	4.69

## PROVINI ORIENTATI A 90°

La Figura 46, riporta le curve tensione vera – deformazione vera relative ai provini con orientamento delle fibre a 90° per le prove a temperatura ambiente; la Figura 47 riporta le curve relative ai provini con orientamento delle fibre a 0° per le prove a bassa temperatura  $T=-20^{\circ}\text{C}$ .

Nelle Figura 48, Figura 49 e Figura 50 è riportato il confronto delle curve tensione vera – deformazione vera a diversa temperatura per le prove dinamiche (rispettivamente  $\dot{\epsilon} = 10^1\text{s}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon} = 10^2\text{s}^{-1}$  e  $\dot{\epsilon} = 10^3\text{s}^{-1}$ ).

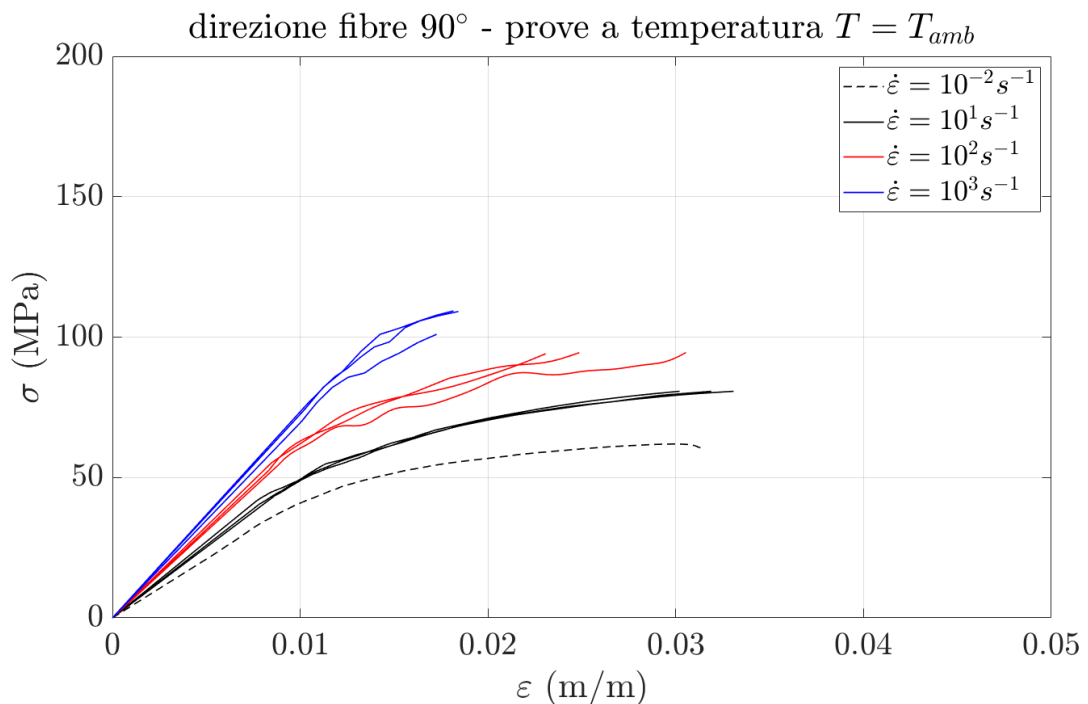


Figura 46- Provini a 90°, temperatura ambiente

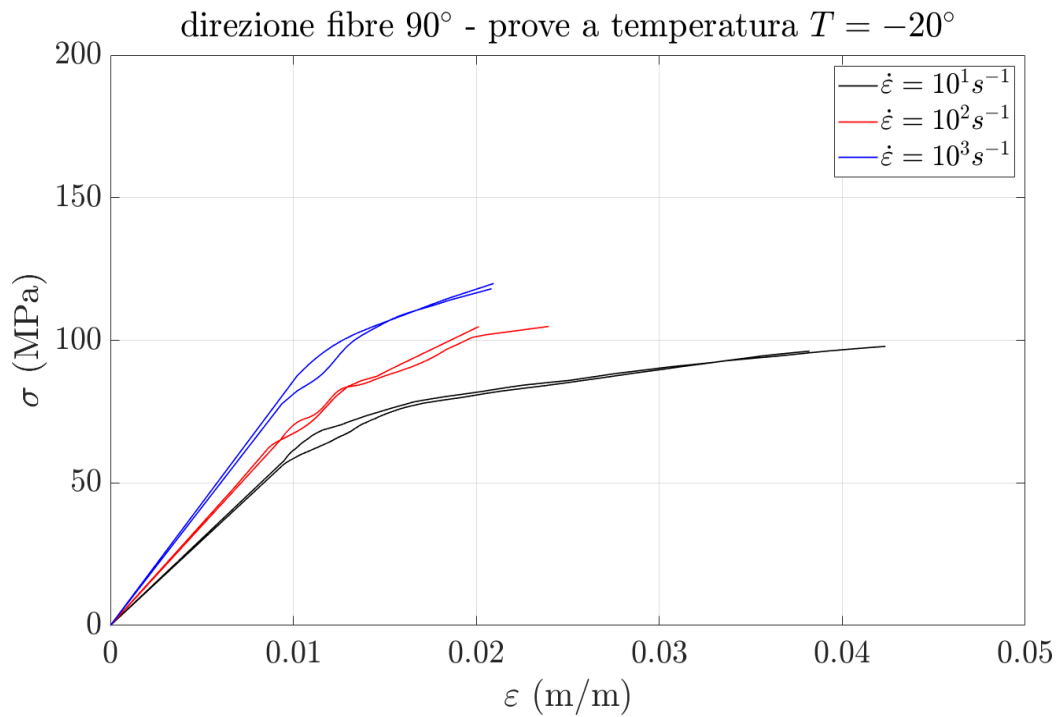


Figura 47 - Provini a 90°, temperatura -20°C

### CONFRONTO PROVE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE

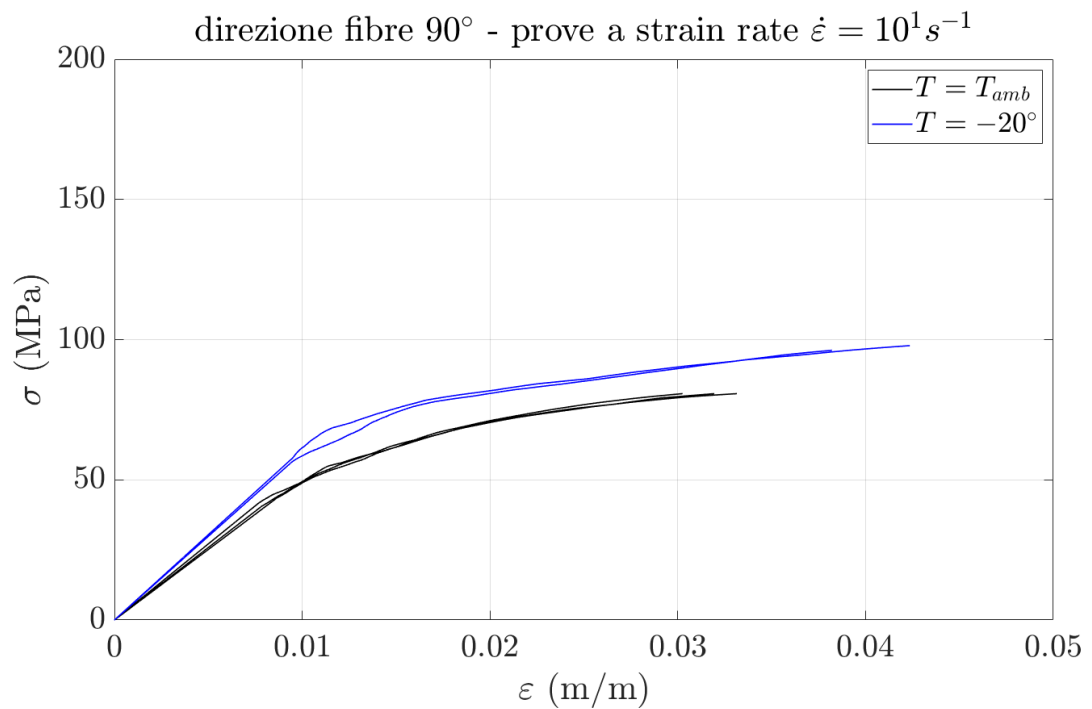


Figura 48- Prove con fibre a 90°-  $\dot{\varepsilon} = 10^1 s^{-1}$ ,





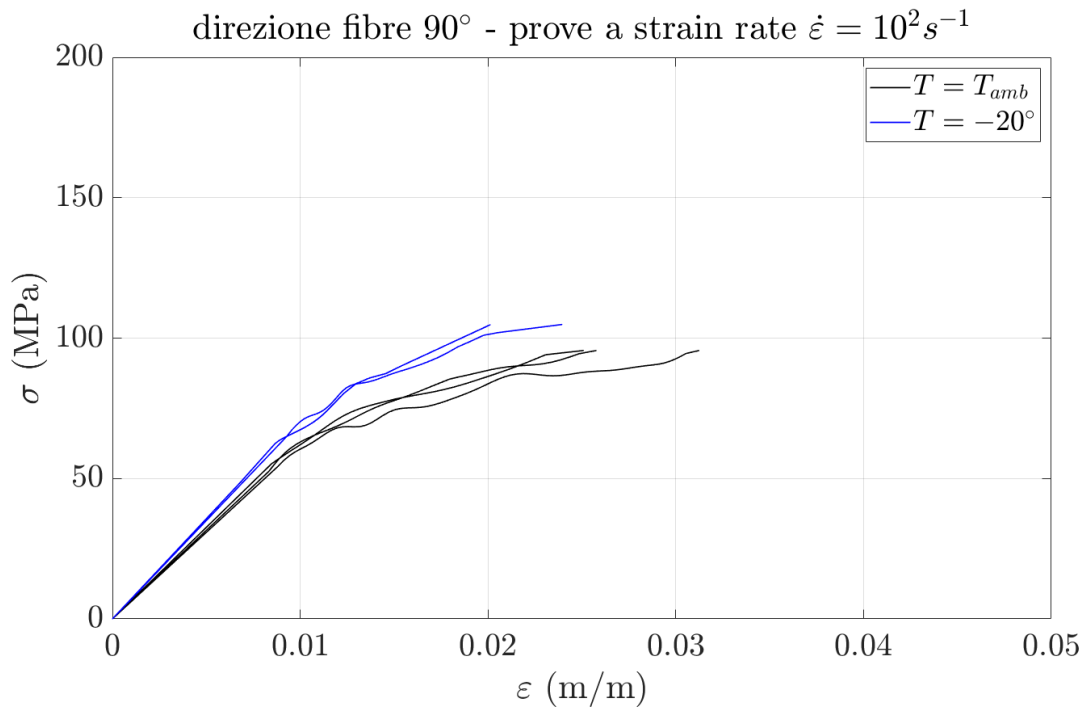


Figura 49- Prove con fibre a 90°- $\dot{\epsilon} = 10^2 s^{-1}$

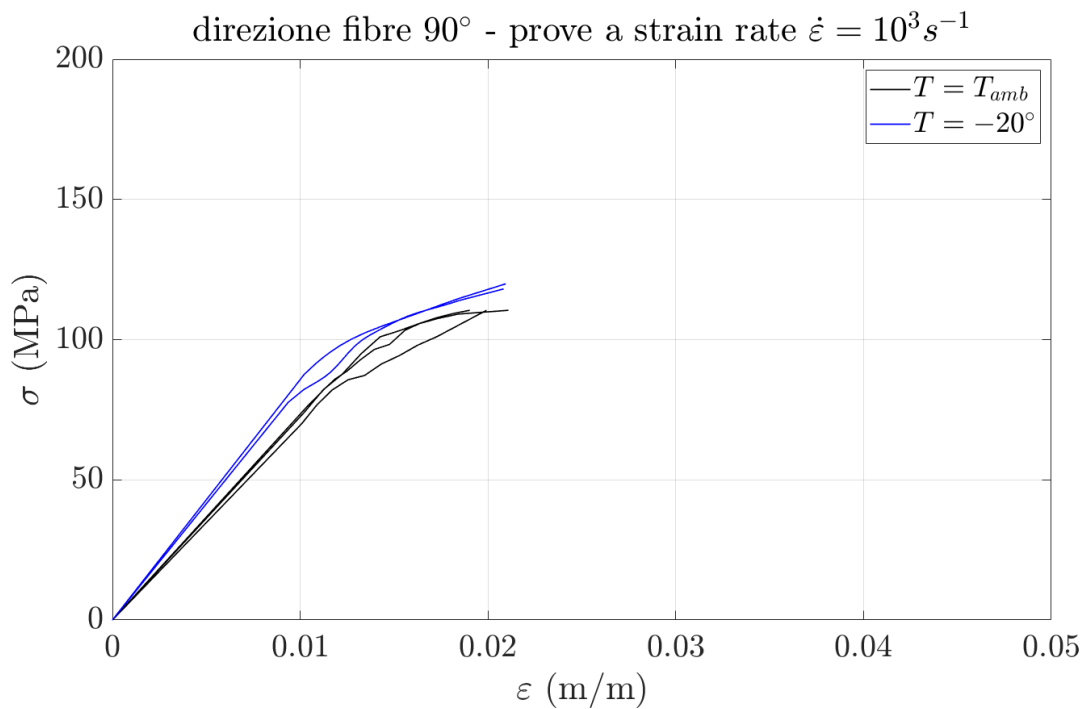


Figura 50- Prove con fibre a 90°- $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$

Anche in questo caso il materiale assume un comportamento molto sensibile con la velocità di deformazione e con la temperatura. I risultati presentano una buona ripetibilità statistica per ogni singolo gruppo di



velocità di deformazione investigato. I valori caratteristici di resistenza dei provini sono riportati nella seguente Tabella 6. In questo caso l'aumento di resistenza nelle prove a freddo è meno accentuato rispetto ai precedenti caso di ha un  $\delta=15\text{MPa}$

Tabella 6 - Caratteristiche di resistenza dei provini a  $90^\circ$

strain rate ( $s^{-1}$ )	$10^{-2}$		$10^1$		$10^2$		$10^3$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
T ambiente	61.9	/	80.70	0.002	94.34	0.23	106.49	4.75
T = $-20^\circ\text{C}$	/	/	97.02	1.17	104.83	0.04	118.98	1.28

## CONFRONTO CURVE A TEMPERATURA AMBIENTE IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE

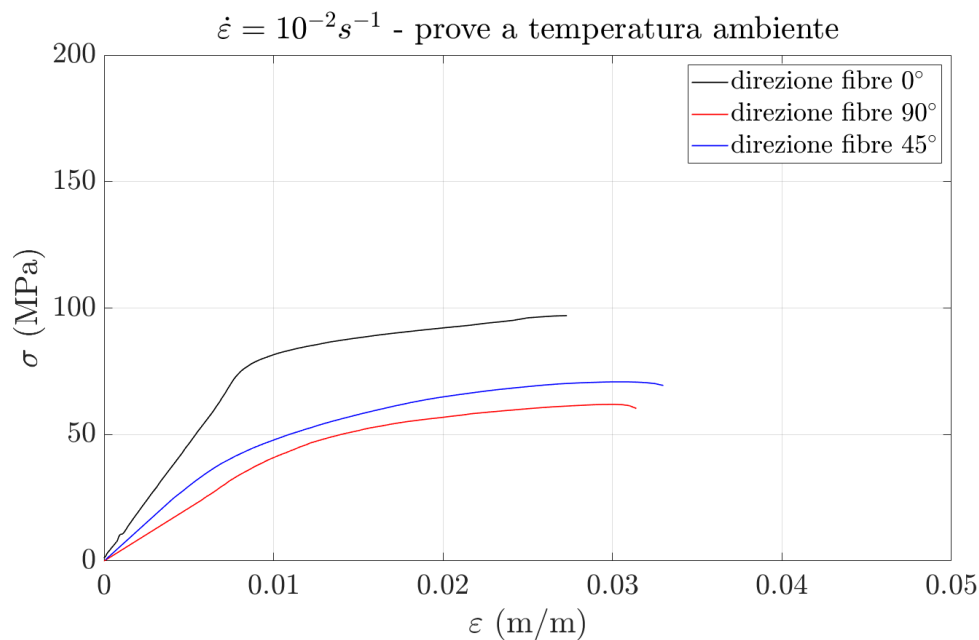


Figura51-Prove T ambiente- $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$



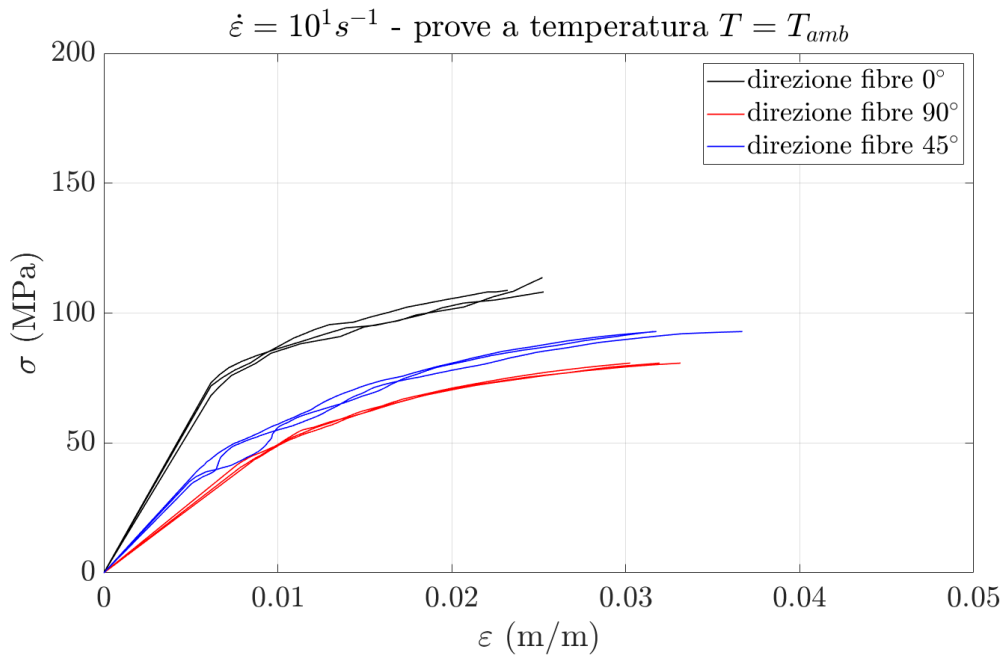


Figura 52- Prove  $T_{ambiente}$  -  $\dot{\epsilon} = 10^1 s^{-1}$

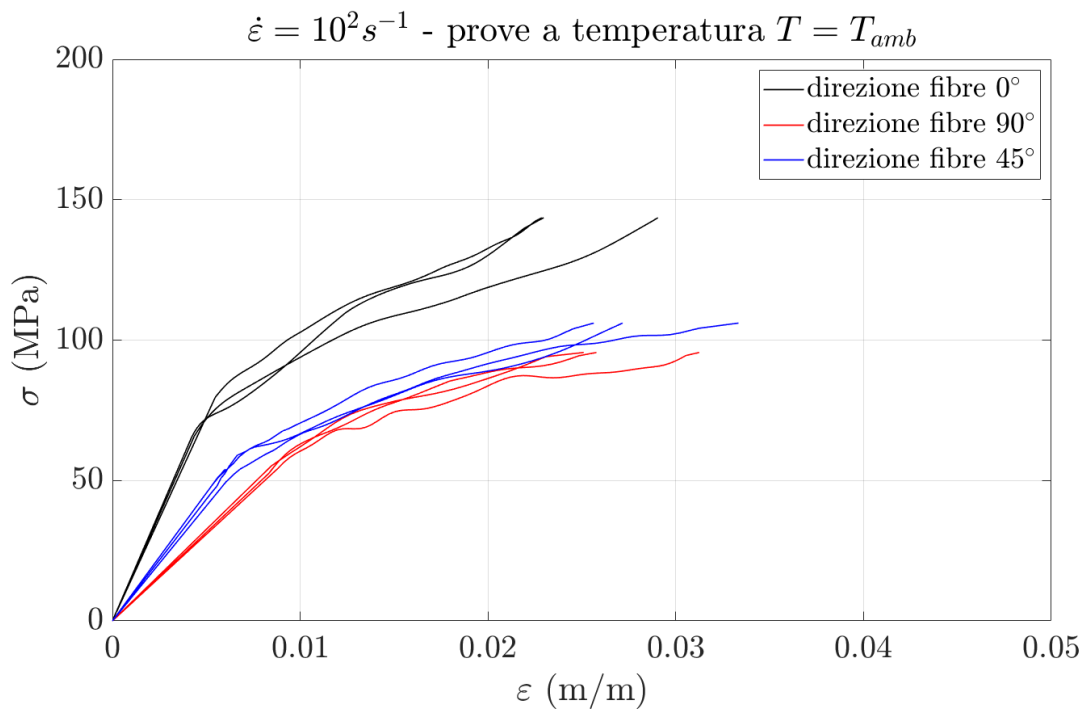


Figura 53- Prove  $T_{ambiente}$  -  $\dot{\epsilon} = 10^2 s^{-1}$



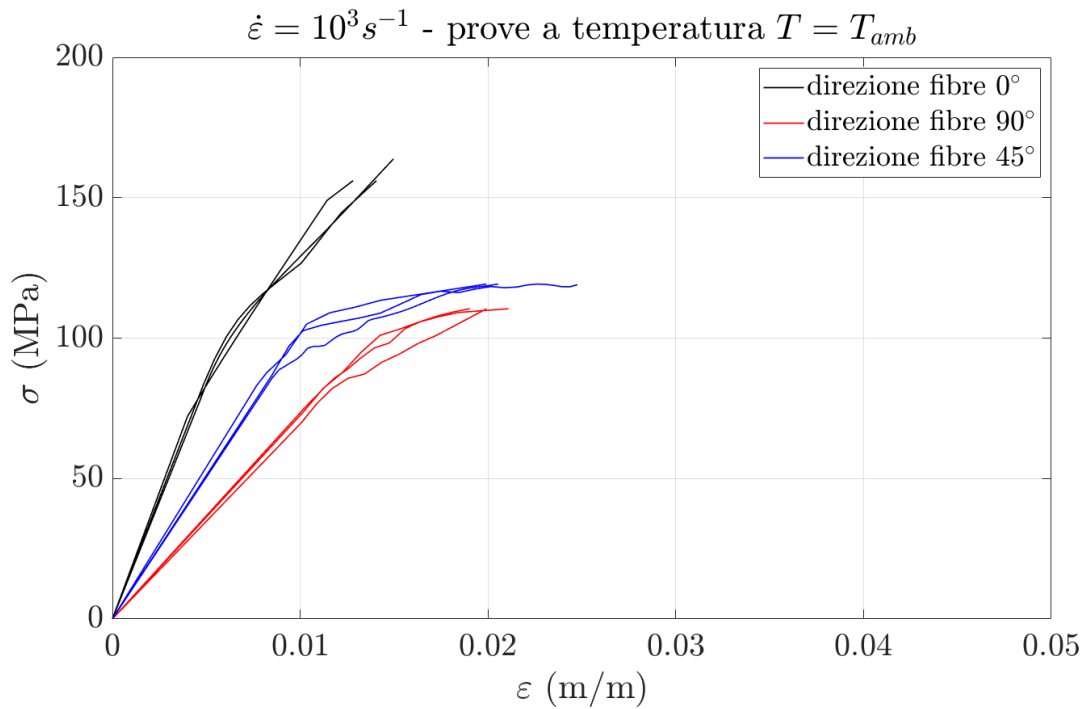


Figura 54- Prove  $T$  ambiente- $\dot{\varepsilon} = 10^3 s^{-1}$

Come si può osservare dai dati riportati le curve delle prove quasi statiche e quelle dinamiche sono notevolmente influenzate dalle direzioni delle fibre all'interno del provino. La curva con una resistenza superiore risulta essere quella con fibre a  $0^\circ$  mentre diminuisce notevolmente con una direzione delle fibre pari a  $90^\circ$  in tutti e quattro i casi. Il rapporto tra le pendenze rimane pressoché costante in tutti i range.

## CONFRONTO CURVE A $T=-20^{\circ}\text{C}$ IN FUNZIONE DELLO STRAIN RATE

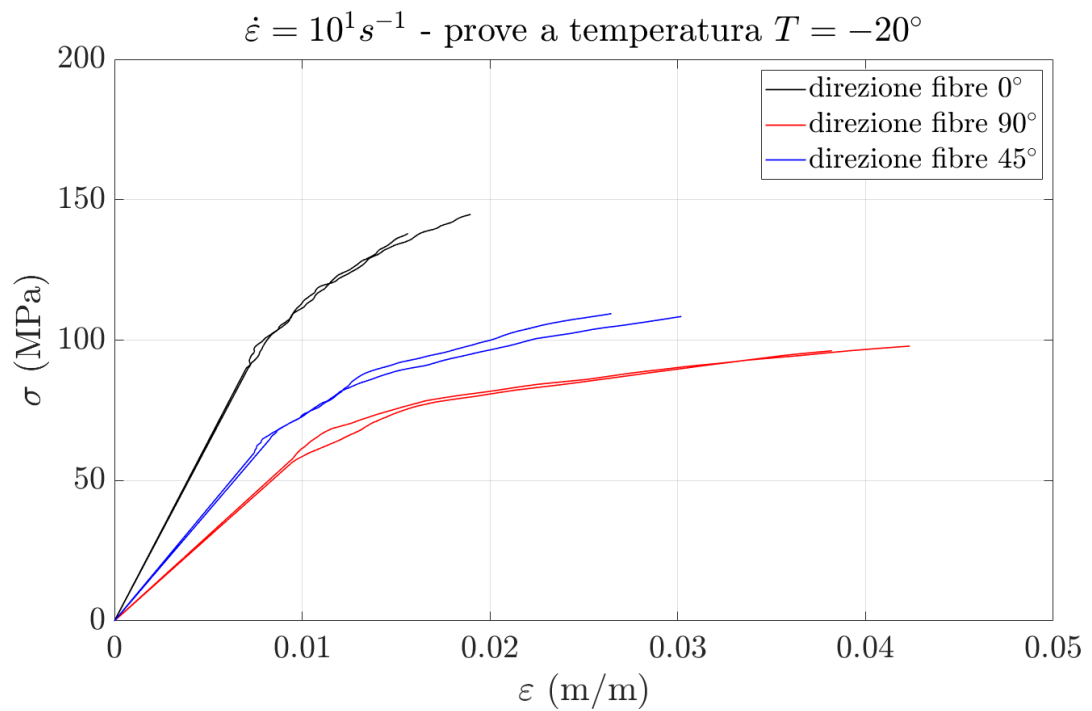


Figura 55- Prove  $T=-20^{\circ}\text{C}$  -  $\dot{\varepsilon} = 10^1 \text{s}^{-1}$

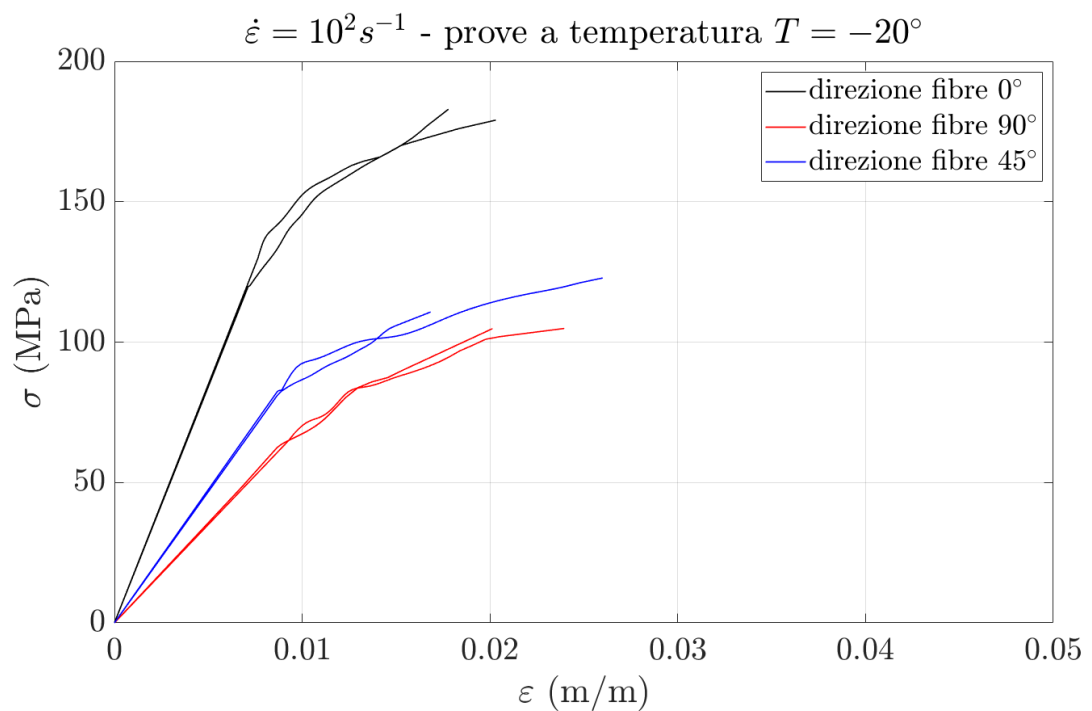


Figura 56- Prove  $T=-20^{\circ}\text{C}$  -  $\dot{\varepsilon} = 10^2 \text{s}^{-1}$



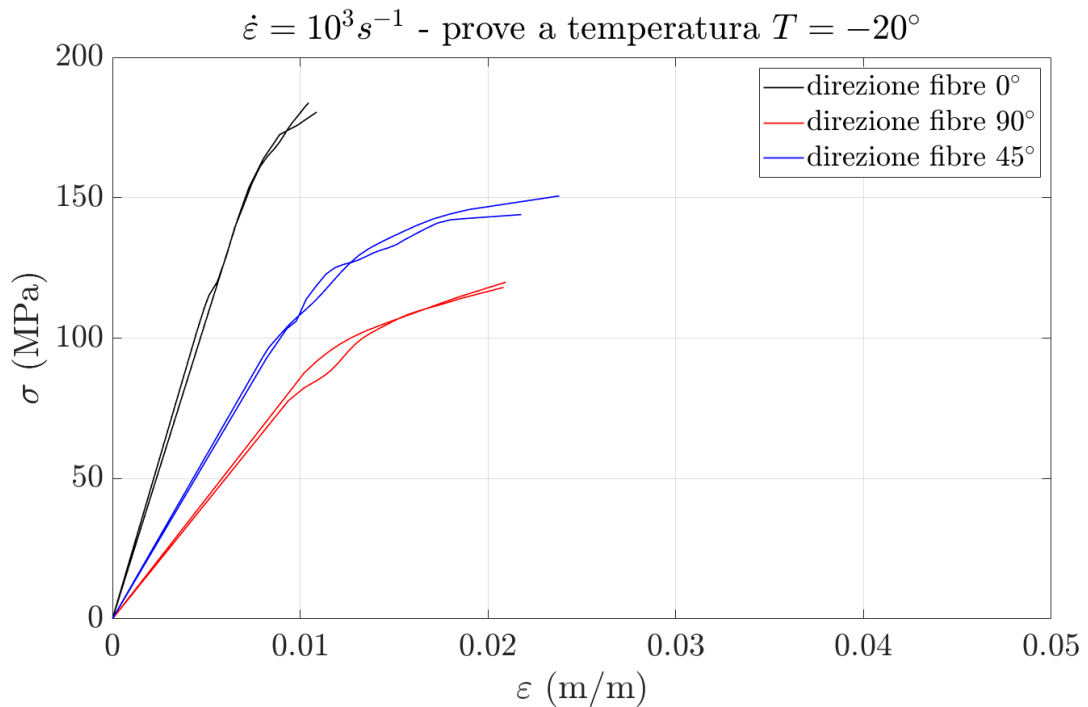


Figura 57- Prove  $T=-20^\circ C$  -  $\dot{\epsilon} = 10^3 s^{-1}$

A freddo non sono state eseguite prove quasi statiche. Andando ad estrapolare i dati dalle seguenti curve si può delineare un comportamento molto simile a quello delle prove ambiente, tuttavia, la resistenza raggiunta è notevolmente aumentata. Si può evidenziare un anomalo allungamento nelle prove con fibre pari a  $90^\circ$  con  $\dot{\epsilon} = 10^1 s^{-1}$

### EFFETTO ORIENTAMENTO DELLE FIBRE

La resistenza media del materiale in funzione dell'orientamento delle fibre viene riportata nelle seguenti Figura 58, Figura 59, rispettivamente per la temperatura ambiente, e a freddo. Si può notare che, a temperatura ambiente e a  $T=-20^\circ C$ , per ogni livello di velocità di deformazione, l'orientamento a  $0^\circ$  offre una maggiore resistenza casi rispetto agli altri; tuttavia, cresce linearmente in tutti i casi con l'aumentare dello strain rate.

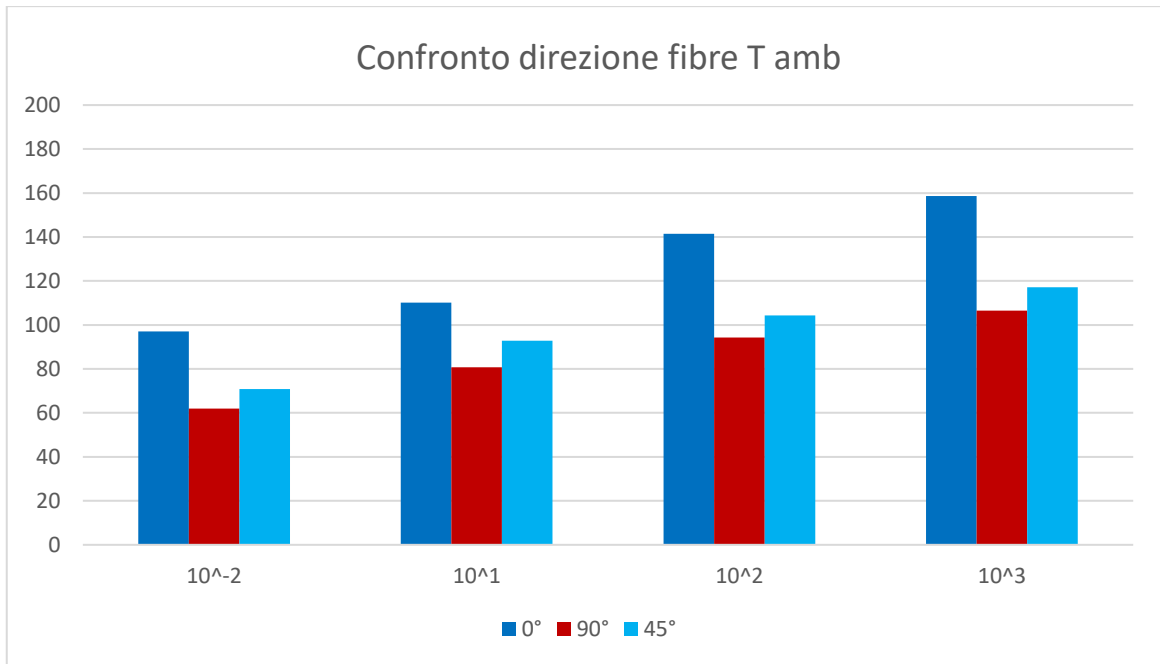


Figura 58- Confronto della resistenza del materiale in funzione dell'orientamento delle fibre – temperatura ambiente

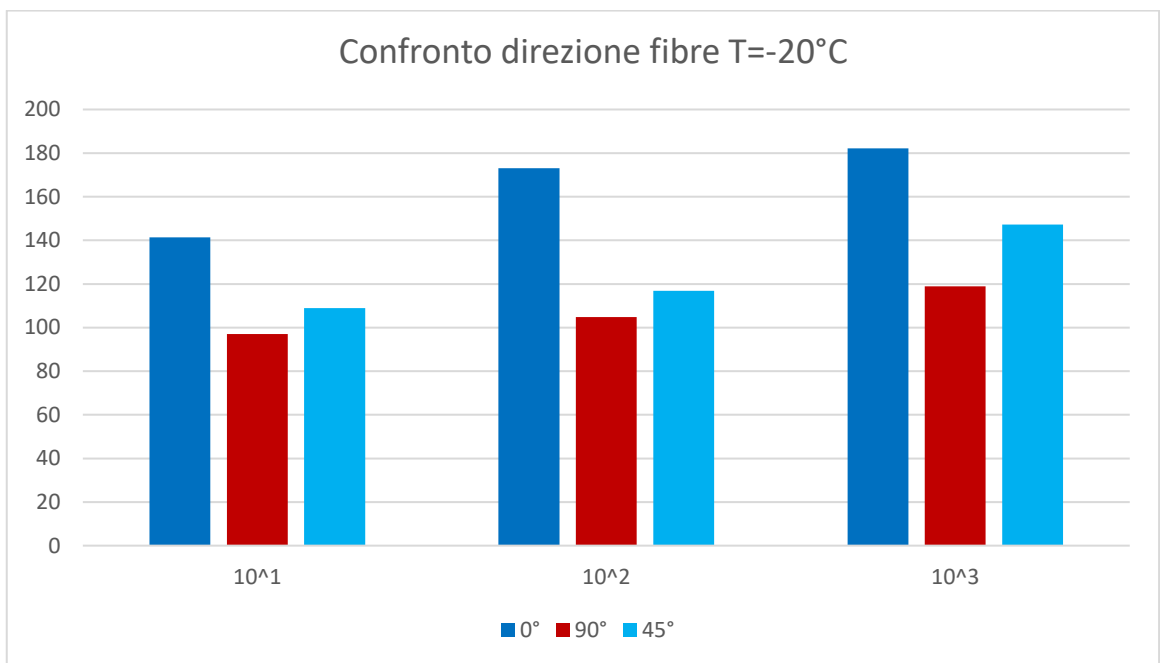


Figura 59- Confronto della resistenza del materiale in funzione dell'orientamento delle fibre – temperatura T=-20°C



## 6.2 CONFRONTO TRA DATI ACQUISITI E SCHEDA MAIP

SCHEDA TECNICA

So.F.T.E.R.

### TECNOPRENE VKM 24 NERO900 WVKM24NE900P

#### Polipropilene rinforzato Fibra Vetro (PP/GF)

<b>Descrizione</b>	Polipropilene omopolimero, 20% talco e 10% fibra vetro legati chimicamente, alta fluidità
<b>Colore</b>	Nero
<b>Normative</b>	Conforme al Regolamento (CE) N. 1907/2006 (REACH)
<b>Tecnologia di trasformazione</b>	Stampaggio a iniezione

Proprietà fisiche	Valori tipici (SI)	Valori tipici (EN)	Metodo
Melt Flow Index 230°C/2,16kg	15 g/10min	15 g/10min	ASTM D1238
Densità	1.13 g/cm <sup>3</sup>	1.13 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Ceneri	30 %	30 %	INTERNAL
Ritiro allo stampaggio	0.6 %	0.6 %	INTERNAL
Assorbimento acqua (24 h/23°C)	0.02 %	0.02 %	ASTM D570
Proprietà meccaniche	Valori tipici (SI)	Valori tipici (EN)	Metodo
Carico a rottura a trazione	58 MPa	8410 psi	ASTM D638
Modulo a flessione	4200 MPa	609000 psi	ASTM D790
Carico Massimo a flessione	90 MPa	13050 psi	ASTM D790
IZOD, con intaglio (23°C)	60 J/m	1.122 ft-lb/inch	ASTM D256
Charpy, con intaglio (23°C)	4.3 kJ/m <sup>2</sup>	2.045 ft-lb/inch <sup>2</sup>	ISO 179 - 1eA
Proprietà termiche	Valori tipici (SI)	Valori tipici (EN)	Metodo
HDT Heat Deflection Temperature ( 1,82 MPa)	136 °C	276.8 F°	ASTM D648
Coefficiente di espansione termica lineare	6 10 <sup>-5</sup> /K	6 10 <sup>-5</sup> /K	ASTM D696-3
Resistenza alla fiamma	Valori tipici (SI)	Valori tipici (EN)	Metodo
Resistenza alla fiamma (3,2 mm)	HB Class	HB Class	UL94
Proprietà elettriche	Valori tipici (SI)	Valori tipici (EN)	Metodo
Correnti striscianti (CTI)	600 VOLT	600 VOLT	IEC 60112
Costante dielettrica, 1kHz	2.5	2.5	ASTM D150
Resistività di superficie	10 <sup>14</sup> OHM/sq	10 <sup>14</sup> OHM/sq	ASTM D257

Figura 60 Scheda tecnica Maip

Confrontando i dati ottenuti con la scheda tecnica Maip, abbiamo rilevato un carico a rottura relativamente più elevato ma questo può dipendere





dalla percentuale di fibre di vetro contenute all'interno del tecnopolimero in questione.

## CONCLUSIONE

Nel presente elaborato sono stati presentati i risultati dei test dinamici a diverse temperature eseguiti su un materiale polimerico rinforzato stampato a iniezione, con lo scopo di valutarne la resistenza meccanica in funzione della velocità di deformazione, dell'orientamento delle fibre rispetto alla direzione del flusso di stampaggio e della temperatura.

I test sono stati eseguiti tramite macchina di trazione, macchina pneumatica e barra di Hopkinson, mentre la deformazione è stata misurata con l'uso di una telecamera ad alta velocità. I materiali hanno mostrato una deformazione a rottura piuttosto limitata, per le prove a temperatura ambiente e diminuita per le prove a freddo, dovuta alla presenza di carica vetro all'interno, mentre la resistenza è incrementata in maniera sensibile nel passaggio dalla condizione statica a dinamica. Alcune prove sono state ripetute in un secondo momento in quanto le curve sforzo deformazione risentivano dell'inerzia degli afferraggi che determinava un'errata percezione del segnale. Questo problema è stato risolto pretensionando manualmente la barra di output.

L'orientamento delle fibre ha un'influenza limitata sulla resistenza del materiale, tuttavia la direzione a  $0^\circ$ , a temperatura ambiente e a temperatura  $T=-20^\circ\text{C}$  è la più resistente.

La temperatura, oltre ad influenzare la resistenza del materiale, influenza in maniera notevole anche la rigidità iniziale.

Un ulteriore confronto è stato eseguito tenendo conto della curva reale, la quale approssima in maniera molto precisa quella ingegneristica.



## BIBLIOGRAFIA

- (1) Polymer. E. Farotti , E. Mancini , A. Lattanzi , M. Utzeri , M. Sasso,2022.
- (2) Struttura per barre di Hopkinson, Sulser Alain,2019.
- (3) Analisi del comportamento dinamico di un Polipropilene caricato. G.Chiappini, 2022.
- (4) “ Scienza e tecnologia dei materiali “ (Hashemi, Smith), 2019. Pagine 394,426-430, 441-443.
- (5) F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Micari, Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche, 2008.
- (6) Sviluppo di una macchina per prove di trazione veloce. M. Anghileri, L.-M. L. Castelletti, A. Milanese, G. Moretti, 2009.

## APPENDICE

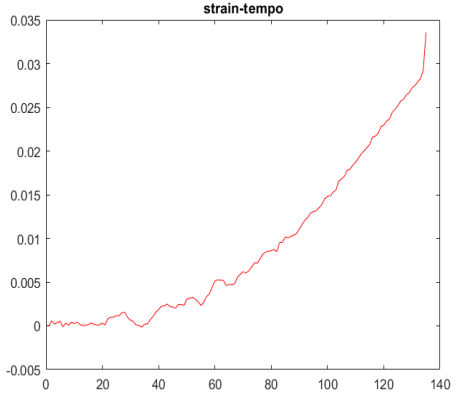
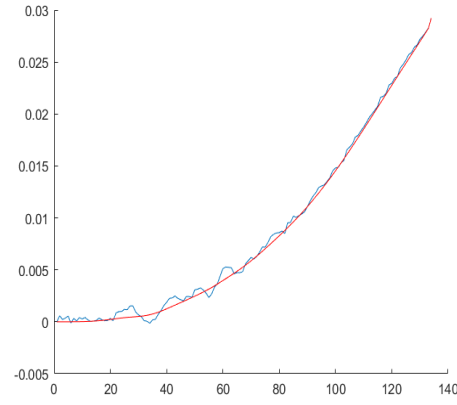
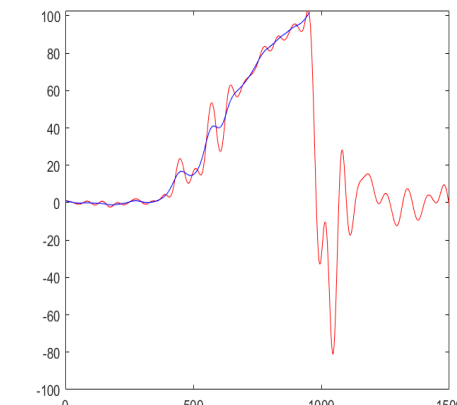
### PROCEDURA ESEGUITA CON MATLAB

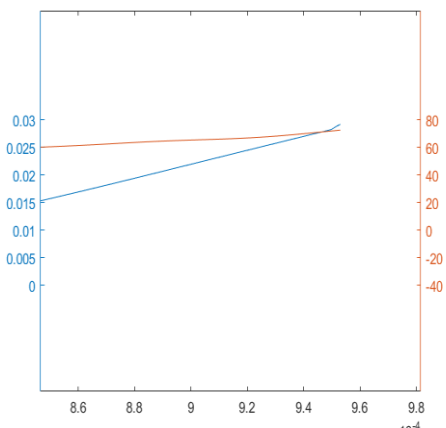
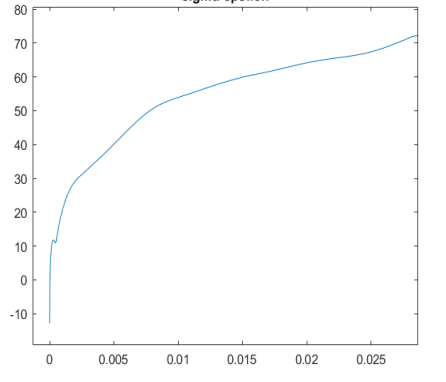
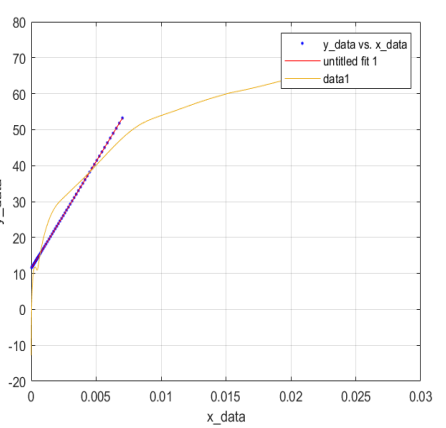
Il primo passo per la formulazione delle curve sigma epsilon è stato quello di analizzare la cartella con le relative immagini delle prove e selezionare il frame di rottura.

In seguito, è stato creato il codice per andare a delineare l'andamento delle epsilon posizionandoci correttamente sopra i marker. Successivamente abbiamo linearizzato la curva comparando l'andamento nel tempo della deformazione e della forza. Dopo aver verificato che vi sia stata una correlazione tra le seguenti grandezze abbiamo ricavato il grafico sigma-tempo. Tuttavia, per ottenere la curva desiderata abbiamo linearizzato quest'ultima cercando una pendenza confrontabile con il valore reale.



Tabella 7 Procedura per ricavare le curve

 <p>strain-tempo</p>	<pre> 1   clc 2   clear 3   close all 4 5   load test9 6 7   L=L(1:end); 8 9 10  eps=(L-L(1))/L(1); 11 12 13  figure 14  plot(eps,'r') 15  title('strain-tempo') 16                 </pre>
	<pre> 53  epsilon=eps(1:134);%test9 54  figure 55  hold on 56  plot(epsilon) 57 58 59 60  [xData, yData] = prepareCurveData( [], epsilon ); 61  ft = fitype( 'smoothingSpline' ); 62  opts = fitoptions( 'Method', 'SmoothingSpline' ); 63  opts.SmoothingParam = 0.001; 64  [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts ); 65  yyy = fitresult(xData); 66 67 68  fine=epsilon(end:end); 69  epsilon=yyy-yyy(1); 70  epsilon(end:end)=fine; 71 72  plot(epsilon,'r')                 </pre>
	<pre> 79  %% 80  load 'test9_barra.mat' 81  sigma=Stress; 82 83  figure 84  plot(sigma,'r') 85  hold on 86  Ds=mean(sigma(500:end)); 87 88  a=100; %per L=10 89  b=400; %per L=10 90 91  % a=10; %per L=4 92  % b=15; %per L=4 93 94 95 96  [~,vS]=max(sigma); 97  % vS=320; %test14                 </pre>

	<pre> 132 t_sigma=[(0:(size(sigma,1)-1))/1000000]'; 133 134 135 136 figure 137 plot(t_sigma,sigma) 138 title('sigma-tempo') 139 140 [~,vE]=max(epsilon); 141 [~,vS]=max(sigma); 142 % vS=327; %test14 143 % vS=344; %test24 144 % vS=341; %test29 145 Dt=t_sigma(vS)-t_eps(vE); 146 147 148 t_eps=t_eps+Dt; 149 150 figure                     </pre>
	<pre> 154 155 sigma_immagini=interp1(t_sigma,sigma,t_eps); 156 157 158 % sigma_immagini=sigma_immagini(~isnan(sigma 159 % epsilon=epsilon(~isnan(sigma_immagini)); 160 figure 161 plot(epsilon,sigma_immagini) 162 title('sigma-epsilon') 163 164 165 166 167                     </pre>
	<pre> 174 index=find(sigma_immagini&gt;0 &amp; sigma_immagini&lt;48 ); 175 176 x_data=epsilon(index); 177 y_data=sigma_immagini(index); 178 179 180 [xData, yData] = prepareCurveData( x_data, y_data ); 181 ft = fitype( 'poly1' ); 182 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft ); 183 % xData=(0:xData(end)/100:xData(end)); 184 yData=fitresult(xData); 185 figure( 'Name', 'untitled fit 1' ); 186 h = plot( fitresult, xData, yData ); 187 188 legend( h, 'y_data vs. x_data', 'untitled fit 1', 'locat 189 xlabel( 'x_data', 'Interpreter', 'none' ); 190 ylabel( 'y_data', 'Interpreter', 'none' );                     </pre>

