



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Caratterizzazione meccanica ad alto strain rate
di un tecnopolimero**

*High strain rate mechanical characterization of a
technopolymer*

Relatore:

Marco Sasso

Tesi di laurea di:

Tommaso Baleani

A.A. 2021/2022

Indice

1. Introduzione	1
2. Split Hopkinson bar	3
2.1 Velocità di deformazione	3
2.2 Generalità della SHB	5
2.3 Barra dell'UNIVPM	11
3. Esperimenti	17
3.1 Provini	17
3.2 Elaborazione dei dati	19
3.3 Conclusioni	37
Bibliografia	38

Capitolo 1

Introduzione

Ogni volta che un componente può essere soggetto a dei carichi applicati velocemente, a seconda del contesto d'applicazione, può risultare fondamentale conoscere il comportamento dinamico del materiale. Al variare della velocità di deformazione applicata, uno stesso materiale può comportarsi in maniera assai diversa. Se poi si considerano anche diversi valori della temperatura del materiale, la varietà dei risultati aumenta ulteriormente.

In questo lavoro viene trattato lo studio di un materiale posto a trazione ad alta velocità di deformazione (high strain rate) a diverse temperature. Si cerca la curva tensione-deformazione vera (σ - ϵ), in maniera analoga alla classica prova di trazione quasi-statica. Di fatto, gli esperimenti condotti appartengono alla famiglia dei test distruttivi con l'applicazione di carico un unitario e consentono di fornire un'ulteriore analisi allo studio che si può fare con la classica prova di trazione. Nella pratica uno dei modi con cui si può condurre la caratterizzazione meccanica ad alta velocità di deformazione, è l'uso del dispositivo che prende il nome di "split Hopkinson bar" (SHB) [1]. In particolare, in questo lavoro viene usata la SHB dell'UNIVPM. La complessità della strumentazione di una SHB, degli esperimenti attuati con essa e della conseguente elaborazione dei dati ricavati, spiegano come mai le SHB siano relativamente recenti e non presenti in tutti i laboratori. Al momento i test con la split Hopkinson bar non sono ancora standardizzati, a differenza di quanto avviene ad esempio per i test a trazione quasi-statica, data la maggiore esperienza maturata e la maggiore diffusione delle corrispettive macchine. Questo incide particolarmente sulla varietà della geometria dei provini. Nel corso degli anni le SHB si sono affermate sempre di più grazie al progressivo miglioramento dei dispositivi di misura. Da decenni, la split Hopkinson bar detiene una riconosciuta utilità nello studio dei materiali ad alta velocità di deformazione, tanto da risultare lo strumento più diffuso per questa branca di studi.

Il materiale che viene studiato è un tecnopolimero. Tale nome è ingannevole perché può non riguardare materiali puramente polimerici, ma anche materiali che hanno una base polimerica ed una carica minerale o un rinforzo in fibra; materiali cioè, che risultano essere dei compositi. I tecnopolimeri stanno trovando sempre più attenzione nella scelta dei materiali per componenti che

non devono essere particolarmente resistenti. Ovvero, ci sono delle situazioni in cui questa particolare categoria di materiali può arrivare ad essere preferita a delle leghe. È stato riscontrato infatti, che i tecnopolimeri presentano delle migliori proprietà meccaniche rispetto ai tradizionali polimeri, mentre per il resto, hanno generalmente le tipiche e vantaggiose proprietà dei polimeri stessi.

Nello specifico si studiano dei provini con base polimerica in polipropilene (PP) rinforzata al 20% in fibra di vetro. La fabbricazione dei provini è avvenuta mediante stampaggio a iniezione. I test che si possono attuare variano tra loro per le condizioni del provino, ovvero: la temperatura, l'orientamento delle fibre e la lunghezza del tratto utile. Quest'ultima caratteristica in particolare influenza la velocità di deformazione. I dati dei provini presenti in questo lavoro hanno le fibre a 45° e riguardano test condotti:

- a freddo (temperatura di -20 °C), a strain rate (SR) che può essere quasi-statico, oppure 10 s⁻¹;
- a caldo (temperatura di 80 °C), a strain rate che può essere quasi-statico, 10 oppure 100 s⁻¹;
- a temperatura ambiente, a strain rate che può essere quasi-statico, 10, 100, oppure 1000 s⁻¹.

La trattazione è descritta come segue. Inizialmente vengono fatti dei cenni sulla teoria della velocità di deformazione. Successivamente vengono descritte le possibili configurazioni ed il funzionamento di una SHB, focalizzandosi poi sulla barra dell'UNIVPM. Infine, dopo la descrizione dei provini testati, vengono elaborati i risultati di alcuni particolari esperimenti e questi vengono confrontati con altre curve tensione-deformazione vere già a disposizione. L'elaborazione dei risultati, riguarda dei test a temperatura di 80 °C, con strain rate 100 s⁻¹.

Capitolo 2

Split Hopkinson Bar

2.1 Velocità di deformazione

Rispetto all'applicazione di un carico nel caso quasi-statico, all'aumentare della velocità di deformazione, alcune proprietà meccaniche cambiano considerevolmente, mentre altre possono cambiare in maniera trascurabile. Per confrontare i casi, si portano sul piano tensione-deformazione reale, le curve caratteristiche di uno stesso materiale, ottenute al variare della velocità di deformazione. All'aumentare dello strain rate, innanzitutto si presenta un aumento della resistenza del materiale. Inoltre, il materiale presenta una variazione dell'allungamento a rottura. In dei casi, se aumenta la velocità di deformazione, aumenta l'allungamento a rottura, mentre negli altri casi avviene il contrario. Invece, il modulo di elasticità normale per molti materiali cambia in maniera trascurabile al variare dello strain rate. Di fatto la sensibilità alla velocità di deformazione non è uguale per tutti i materiali. La Figura 2.1.1 mostra le peculiarità associate a dei determinati valori di velocità di deformazione. La classificazione della meccanica di deformazione presente in tale figura, riguarda la microstruttura delle leghe. Quando la velocità di deformazione è elevata, il materiale può non avere il tempo per scambiare con l'esterno il calore generato dalla deformazione plastica e la sua temperatura può aumentare repentinamente.

Esistono vari modelli del comportamento delle leghe in funzione della velocità di deformazione. Quello più usato è il modello empirico di Johnson-Cook [2], in quanto risulta essere uno dei modelli più semplici. Tale modello descrive la tensione effettiva in funzione della deformazione, della velocità di deformazione e della temperatura. Ulteriori studi su quel modello, vengono mostrati ad esempio per la lega d'alluminio 6061-T6, in svariate analisi [3, 4, 5].

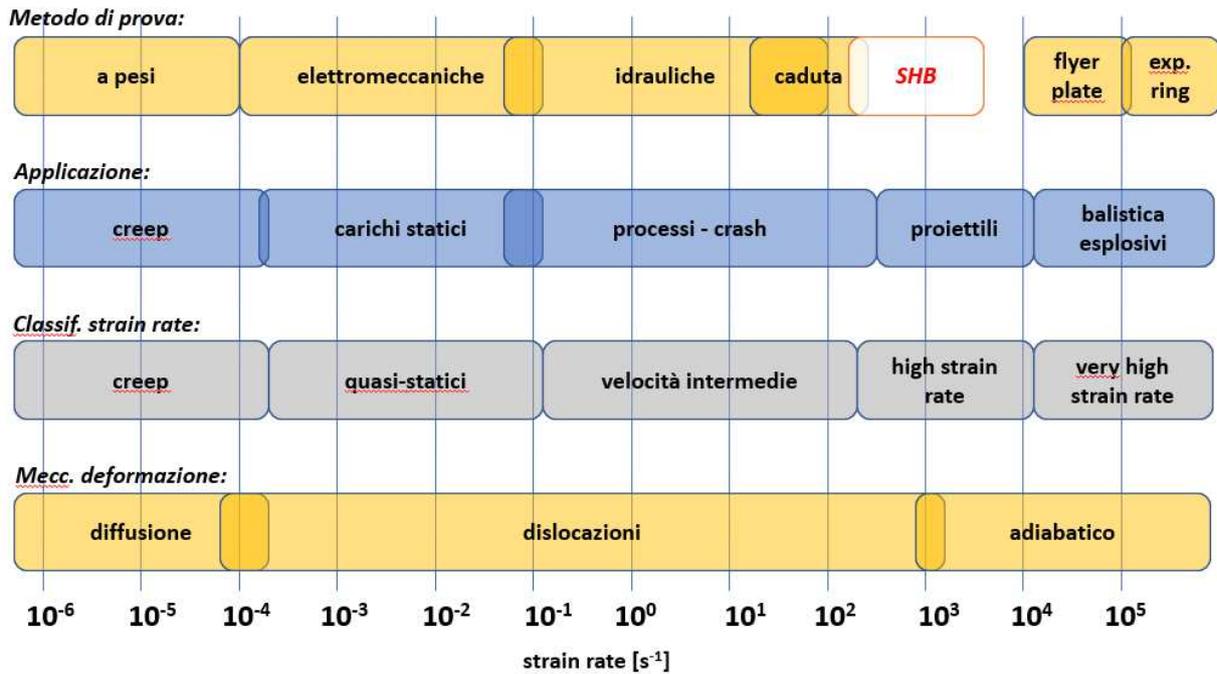


Fig. 2.1.1 Lo specifico intervallo di strain rate applicato da una SHB in realtà dipende molto dal suo funzionamento: l'intervallo della SHB dell'UNIVPM è tra 10² e 2x10³ s⁻¹

Di seguito sono riportate le relazioni essenziali che riguardano la deformazione quando c'è da considerare l'effetto della velocità di deformazione. La velocità di deformazione si può scrivere, a seconda che si consideri la deformazione nominale o la deformazione reale, come:

$$\dot{e} = \frac{de}{dt} \quad (2.1.1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.1.2)$$

dove e è la deformazione nominale ed ε è la deformazione reale. In particolare riguardo la velocità di deformazione nominale \dot{e} , si può scrivere:

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (2.1.3)$$

dove L_0 rappresenta la lunghezza iniziale del tratto utile del provino, L la lunghezza istantanea del tratto utile e V la velocità d'applicazione del carico.

Visto che la relazione tra deformazione nominale e reale è:

$$\varepsilon = \int_0^L \frac{dL}{L} = \ln(1 + e) \quad (2.1.4)$$

dove L è la lunghezza del tratto utile del provino studiato, risulta che:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{dt} \ln(1 + e) = \frac{\dot{e}}{1+e} \quad (2.1.5)$$

Riguardo il modello di Johnson-Cook, l'equazione costitutiva è:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_{pl}^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - T^{*m}) \quad (2.1.6)$$

dove σ è la tensione reale, A è la tensione di snervamento, ε_{pl} è la deformazione plastica reale, B ed n sono i parametri di incrudimento, C ed $\dot{\varepsilon}_0$ sono i coefficienti di sensibilità alla velocità di deformazione, T^* ed m sono i parametri di addolcimento, il quale può essere presente a temperature elevate. In particolare, $\dot{\varepsilon}_0$ è una velocità di deformazione di riferimento e T^* è la temperatura omologa, definibile come:

$$T^* = \frac{T - T_{amb}}{T_f - T_{amb}} \quad (2.1.7)$$

dove T_f è la temperatura di fusione del materiale, T_{amb} la temperatura ambiente e T la temperatura corrente. Nella (2.1.6), ogni parentesi fornisce uno specifico contributo alla tensione. La prima parentesi fornisce la tensione in funzione della deformazione in condizioni di velocità di deformazione di riferimento e di temperatura ambiente. La seconda parentesi fornisce il contributo della velocità di deformazione. Infine, la terza parentesi fornisce il contributo della temperatura.

2.2 Generalità della SHB

L'evoluzione delle macchine di misura che hanno portato alla SHB ha richiesto decenni. Di seguito si riportano brevemente i sistemi di misura che hanno delineato le basi concettuali delle SHB per come le intendiamo oggi.

Innanzitutto, la barra di Hopkinson deve il suo nome a Bertram Hopkinson (1874 – 1918), che al fine di determinare la pressione prodotta da una esplosione, propose nel 1914 una strumentazione, basata sulla propagazione di onde di pressione attraverso delle barre [6]. In particolare Hopkinson cercò la curva pressione-tempo. Nel sistema messo a punto da Hopkinson sono richieste due barre metalliche.

In vista di un test, le due barre sono tenute attaccate consecutivamente per via magnetica mediante un solenoide, poi in un test l'estremità libera di una delle due barre subisce la detonazione di un esplosivo. Di conseguenza, l'onda di pressione prodotta fa sparare via l'altra barra, la quale va ad impattare contro un pendolo balistico per misurarne la quantità di moto. Per far sì che non vengano sparate via entrambe le barre, la lunghezza della barra che deve impattare contro il pendolo balistico, deve essere sufficientemente più grande della lunghezza dell'altra barra. Tuttavia, la strumentazione messa a punto da Hopkinson non garantisce una sufficiente affidabilità dei risultati.

Successivamente Rhisiart Morgan Davies (1903 – 1958) nel 1948 modificò lo schema proposto da Hopkinson e apportò notevoli migliorie nelle tecniche di misurazione, ottenendo quella che viene chiamata “single pressure bar” o anche “barra di Davies” [7], il cui schema essenziale è visibile in Figura 2.2.1. In particolare la misurazione con il lavoro di Davies divenne di tipo elettrico e si basò sull'impiego di un oscilloscopio a raggi catodici.

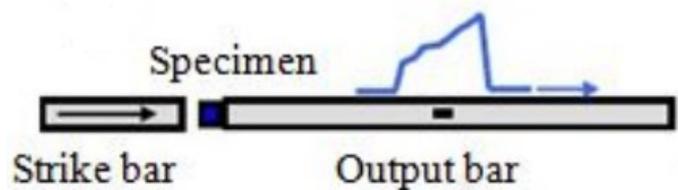


Fig. 2.2.1 Schema di una single pressure bar con rappresentazione dell'onda di deformazione

La barra che si usa al giorno d'oggi però, deriva da quella che propose Herbert Kolsky (1917 – 1992) nel 1949 [8], la quale prende il nome di “**split Hopkinson bar**” (SHB)¹. Tra l'altro, mentre fino al lavoro di Kolsky, le strumentazioni di Hopkinson e le loro evoluzioni furono usate esclusivamente per cercare la curva pressione-tempo di impatti da esplosioni, con Kolsky si iniziò a cercare la curva tensione-deformazione dei materiali in condizioni dinamiche. Il passo in avanti dello schema messo a punto da Kolsky consiste nel porre alle due estremità del provino, delle lunghe barre. Questo schema consente anche maggiore libertà nei test che si possono attuare, tanto che oltre a poter fare dei test a compressione, con dei particolari accorgimenti, si possono attuare anche prove a trazione e torsione. È visibile uno schema essenziale della SHB per test a compressione nella Figura 2.2.2.

¹ Altri modi con cui viene chiamata questa strumentazione sono: “split Hopkinson pressure bar” (SHPB), “barra di Hopkinson-Kolsky” oppure anche “barra di Kolsky”.

In principio, Kolsky impiegò dell'esplosivo al posto della striker bar e nei primi anni d'uso della barra proposta da Kolsky, per le misurazioni furono usati dei microfoni a condensatore e solo dopo si passò agli estensimetri posti sia nella input bar che nella output bar. Inoltre, Kolsky cercò anche di minimizzare l'inerzia assiale e radiale dei provini cilindrici ed il loro attrito alle interfacce.

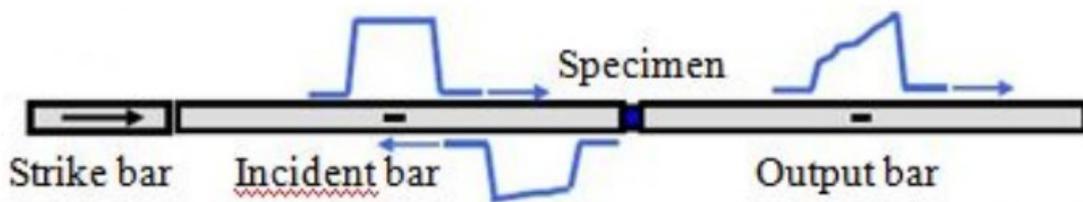


Fig. 2.2.2 Schema di una split Hopkinson bar con rappresentazione della propagazione delle onde di deformazione. La incident bar è anche detta input bar.

La velocità di propagazione dell'onda di pressione è uguale alla velocità del suono c nel materiale in questione:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.2.1)$$

dove E e ρ sono rispettivamente il modulo di elasticità normale e la densità. Le onde di deformazione si distinguono in: ϵ_I (onda di deformazione incidente), ϵ_R (onda di deformazione riflessa), ed ϵ_T (onda di deformazione trasmessa). Nel caso in cui, la striker bar sia dello stesso materiale ed abbia lo stesso diametro della input bar, l'onda di tensione incidente e l'onda di deformazione incidente dipendono dalla velocità della striker bar:

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho c v \quad (2.2.2)$$

$$\epsilon_I = \frac{1}{2} \frac{v}{c} \quad (2.2.3)$$

dove σ_I è la tensione incidente, v è la velocità con cui la striker bar colpisce la input bar. L'impulso incidente presenta una durata:

$$t = 2 \frac{L}{c} \quad (2.2.4)$$

dove L è la lunghezza della striker bar. L'onda che si muove nella input bar è lunga $2L$.

Nel caso di una **prova a compressione**, quando la striker bar colpisce la input bar, in quest'ultima si genera una distribuzione di deformazione ε_I approssimativamente rettangolare che si propaga lungo la barra. Quando quest'onda è arrivata nel provino, una parte dell'energia che porta con sé, si dissipa e quello che rimane comporta due distribuzioni di onde all'incirca trapezoidali. Una distribuzione sarà la ε_R che torna indietro nella input bar. L'altra distribuzione sarà la ε_T che proseguirà nella barra di output. I provini sono cilindrici ed hanno un diametro sufficientemente inferiore rispetto al diametro delle barre.

Nel caso di **prova a trazione**, la stessa distribuzione ε_I all'incirca rettangolare descritta nel caso della compressione, stavolta oltrepassa il provino, percorre tutta la barra di output e torna indietro divenendo senza cambiare forma, $-\varepsilon_I$. Quando poi questa ε_I negativa arriva al provino, si dissipa e si generano due distribuzioni d'onda all'incirca trapezoidali, una (la ε_T) che prosegue nella barra di input, l'altra (la ε_R) che si propaga nella barra di output. In questo caso, i provini richiedono l'impiego di afferraggi ed hanno un tratto utile con una sezione minore rispetto a quella della zona d'afferraggio.

Le versioni possibili con cui si può presentare oggi una split Hopkinson bar, indipendentemente dal fatto che vengano attuati test a compressione o a trazione, sono due:

1. **Versione classica** (quella descritta fino ad ora): le onde di pressione usate per testare i provini, vengono generate mediante un urto tra la striker bar e la input bar. La realizzazione pratica e odierna di questa versione comporta l'impiego di aria compressa (pistola a gas) per «sparare» la striker bar;
2. **Variante**: innanzitutto, la striker bar (qui detta anche barra di pretensionamento) ha un particolare collegamento con la input bar. Questa particolarità è dovuta al fatto che le due barre risultano effettivamente collegate, ma allo stesso tempo si crea l'opportunità di mandare a precarico solo una delle due barre. Le onde di tensione usate per testare i provini, vengono generate mediante un repentino rilascio del precarico imposto nella barra di pretensionamento. Il rilascio pressoché istantaneo del precarico può essere ottenuto con la rottura di un elemento sacrificale fragile. Tale elemento viene montato nella sua sede che può essere a monte della barra di pretensionamento oppure a valle della stessa. Quindi, per attuare un test, si impone un precarico alla barra di pretensionamento fino a far rompere l'elemento sacrificale.

Questa categoria di SHB, come mostrato da Mancini et al. [9], a sua volta si suddivide nella versione a compressione diretta (Figura 2.2.3) e nella versione a trazione diretta (Figura 2.2.4). Nelle stesse figure si può notare che l'onda di tensione che si propaga nella input bar

(assumendo che le varie barre abbiano stesso diametro e materiale) ha un valore di tensione che è la metà con segno opposto della tensione di precarico.

Sia per la versione a trazione diretta che per la versione a compressione diretta, l'elemento sacrificale si può installare a monte o a valle della barra di pretensionamento. Quel che cambia tra queste due installazioni non riguarda solo il disegno delle parti che contengono l'elemento sacrificale, ma riguarda soprattutto l'attuazione dell'esperimento. Quando l'elemento sacrificale è a monte, per fare un test di trazione bisogna precaricare la barra di pretensionamento a compressione e viceversa quando si vuole fare un test a compressione. Quando invece l'elemento sacrificale è a valle, un test a trazione si fa con un precarico a trazione ed un test a compressione si fa con un precarico a compressione.

Rispetto alla versione classica, non ci sono differenze riguardo le distribuzioni e la propagazione delle onde.

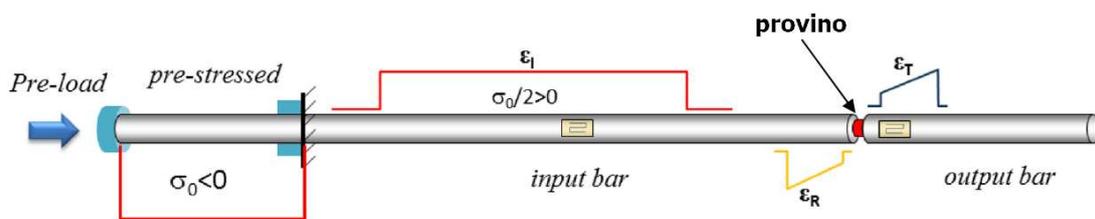


Fig. 2.2.3 Schema della split Hopkinson bar nella versione a compressione diretta. La barra di pretensionamento viene precaricata a compressione.

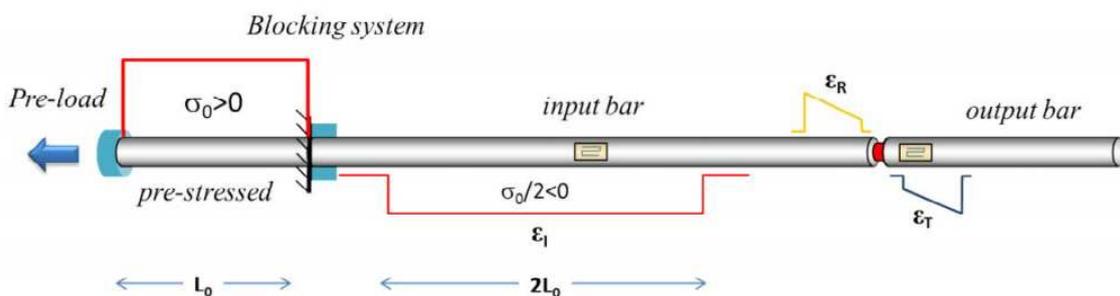


Fig. 2.2.4 Schema della split Hopkinson bar nella versione a trazione diretta. La barra di pretensionamento viene precaricata a trazione.

Le seguenti formulazioni riguardano la SHB classica nel caso di test a compressione. Si vuole determinare la deformazione nominale, la velocità di deformazione nominale e la tensione nominale

del provino. Come ipotesi semplificativa iniziale, si assume che le onde si propagano nelle barre secondo una teoria monodimensionale elastica. Gli spostamenti dei due capi del provino sono:

$$u_1(t) = c \int_0^t [\varepsilon_R(\tau) - \varepsilon_I(\tau)] d\tau \quad (2.2.5)$$

$$u_2(t) = c \int_0^t [-\varepsilon_T(\tau)] d\tau \quad (2.2.6)$$

dove c è la velocità del suono nel materiale della barra. La deformazione media del provino è quindi:

$$\bar{\varepsilon}(t) = \frac{u_2(t) - u_1(t)}{L_p} = \frac{c}{L_p} \int_0^t [-\varepsilon_T(\tau) - \varepsilon_R(\tau) + \varepsilon_I(\tau)] d\tau \quad (2.2.7)$$

dove L_p è la lunghezza iniziale del provino. Perciò, la velocità di deformazione media del provino è:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}(t) = \frac{c}{L_p} [-\varepsilon_T(t) - \varepsilon_R(t) + \varepsilon_I(t)] \quad (2.2.8)$$

Le forze ai capi del provino sono:

$$F_1(t) = A_b E_b [\varepsilon_R(t) + \varepsilon_I(t)] \quad (2.2.9)$$

$$F_2(t) = A_b E_b [\varepsilon_T(t)] \quad (2.2.10)$$

dove A_b è l'area della sezione della barra, E_b è il modulo di elasticità normale della barra. La tensione media è quindi:

$$\bar{\sigma}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \frac{1}{A_p} = \frac{A_b E_b}{2 A_p} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (2.2.11)$$

dove A_p è l'area iniziale della sezione del provino. Come ulteriore ipotesi semplificativa, si trascurano le inerzie radiali e assiali del provino. Quindi, il provino si trova in equilibrio dinamico, per cui si può scrivere:

$$F_1(t) = F_2(t) \quad (2.2.12)$$

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t) \quad (2.2.13)$$

Dunque, semplificando e riscrivendo non più ai valori medi le (2.2.8), (2.2.7) e la (2.2.11), le equazioni ricercate sono:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c}{L_p} \varepsilon_R(t) \quad (2.2.14)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c}{L_p} \int_0^t \varepsilon_R(\tau) d\tau \quad (2.2.15)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_b E_b}{A_p} \varepsilon_T(t) \quad (2.2.16)$$

2.3 Barra dell'UNIVPM

La split Hopkinson bar dell'UNIVPM [9] è una variante della versione classica di SHB ed è capace di attuare sia test di trazione che test di compressione. La sua struttura è visibile in Figura 2.3.1. La SHB in questione ha un ingombro totale di 15 m (tratto pretensionato di 3 m, tratto di input di 7.5 m, tratto di output di 4 m) ed è costituita da barre con diametro di 18 mm. In dotazione ci sono barre in 17-4 PH, Ti6Al4V, 7075T6, PET. In questo lavoro si fa riferimento all'impiego di barre in 17-4 PH. Il dimensionamento delle barre è tale per cui esse non raggiungano la tensione di snervamento. Ci sono dei manicotti fissati su delle travi HEA a supportare le barre. In particolare la barra di precarico si trova in molti più manicotti (numericamente 11) delle altre per unità di lunghezza per tutelarsi dall'instabilità elastica a carico di punta. Invece le barre di input e di output sono supportate da dei manicotti distanziati fra loro di un metro. La trave HEA che sta sotto la barra di pretensionamento, rispetto alle altre svolge un significativo ruolo strutturale visto che si deve inflettere minimamente durante la fase di precarico e per questo presenta una sezione più grande delle altre.

L'elemento sacrificale fragile si può installare all'interfaccia tra la barra di pretensionamento e la barra di input (caso di «rottura a valle») oppure si può installare nell'altro margine della barra di pretensionamento (caso di «rottura a monte»). I sistemi che contengono l'elemento sacrificale non hanno lo stesso disegno nei due casi di rottura. In questo lavoro si ha a che fare con la rottura a monte. Quindi se la barra di pretensionamento viene precaricata a compressione, il provino viene mandato a trazione e viceversa. Visto che in questo lavoro si fanno test a trazione, di conseguenza si presenta nella barra di pretensionamento un precarico a compressione. La barra di pretensionamento viene pretensionata mediante un martinetto a vite trapezia Servomech® che può generare al massimo 100 kN di precarico (Figura 2.3.3). L'elemento sacrificale è un dischetto cavo di acciaio 55NiCrMoV7 temprato che ha una tensione di rottura di circa 2000 MPa. La lunghezza assiale dell'elemento sacrificale, il cui ordine di grandezza è del decimo di millimetro, è da scegliere in base al precarico da raggiungere per mandare a rottura il provino. Ai fini dell'efficacia del test, prima di installare l'elemento sacrificale, bisogna asportare da esso la patina di ossido. La barra di pretensionamento e quella di input sono collegate fra loro in quanto i loro margini in questione sono avvitati in un nottolino di battuta. Cioè l'interfaccia tra la barra di pretensionamento e la barra di input si trova all'interno di tale nottolino che durante la fase di precarico è tenuto fermo da un blocco rigido (Figura 2.3.2). Quest'ultimo sistema, in sede di progettazione è stato studiato con l'analisi agli elementi finiti. Il provino si trova tra la barra di input e quella di output: più in particolare mediante delle spine (caso di test a trazione) è inserito in degli afferraggi i quali sono avvitati nelle corrispettive barre. Si può

avere a che fare con dei provini con tratto utile cilindrico con le estremità filettate da avvitare negli appositi afferraggi delle barre. Oppure, come avviene in questo lavoro il provino ha tratto utile con sezione rettangolare ed ha come mezzo di afferraggio delle spine. Nei provini di trazione, naturalmente la sezione del tratto utile è sufficientemente più piccola di quella presente in corrispondenza degli afferraggi. Sono presenti degli estensimetri nelle barre di input e output: nel caso della barra di input gli estensimetri si trovano all'incirca a metà barra, mentre nel caso della barra di output gli estensimetri si trovano nei pressi dell'afferraggio del provino. L'estremità della barra di output opposta a quella in cui si trova l'afferraggio del provino, a seconda del test attuato è libera (test di trazione) oppure ha un terminale d'arresto (test di compressione).

Tramite gli estensimetri della barra di output, si ottiene la forza trasmessa corrispondente alla resistenza del provino. La deformazione del provino viene generalmente misurata dall'analisi della deformazione sulla barra di input; tuttavia in questo lavoro essa è stata misurata direttamente mediante una telecamera ad alta velocità applicando la tecnica di elaborazione "Digital Image Correlation" (DIC) per le prove a temperatura ambiente e tramite estensometro ottico per le prove in temperatura (sia caldo che freddo).

Tabella 2.3.1 Alcune caratteristiche dell'acciaio 17-4 PH

Densità	[kg/m ³]	7800
Velocità del suono	[m/s]	5114.1
Durata dell'impulso	[ms]	1.173
Lunghezza d'onda dell'impulso	[m]	6
Modulo di elasticità normale	[MPa]	204000

Da come si nota dalla Tabella 2.3.1, con l'impiego di barre in 17-4 PH, quando si rompe l'elemento sacrificale l'onda di pressione arriva sul provino pressoché istantaneamente (viaggia a più di 5100 m/s) ed il carico sul provino viene impresso per un periodo di tempo piuttosto limitato (fino a circa 1 ms), ma sufficiente per l'attuazione della prova.



Fig. 2.3.1 La barra dell'UNIVPM: il colore delle travi HEA serve per distinguere i vari tipi di barre. Sopra il verde sta la barra di pretensionamento. Sopra il bianco sta la barra di input. Sopra il rosso sta la barra di output. Nelle immagini è presente la strumentazione pronta per un test.



(a) Blocco rigido smontato

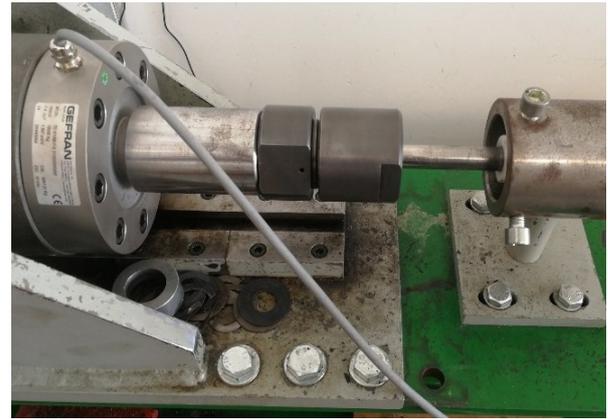


(b) Blocco rigido pronto per il test

Fig. 2.3.2 Sistema di bloccaggio con nottolino di battuta. Il nottolino che viene rappresentato è quello per test a monte. In (b) il nottolino è in battuta.



(a) Elemento sacrificiale non montato



(b) Elemento sacrificiale montato nella sua sede

Fig. 2.3.3 Nelle immagini sono presenti: il motoriduttore, il martinetto per il precarico e l'involucro di contenimento dell'elemento sacrificiale. I sottili dischetti cavi neri appoggiati sotto la zona dell'involucro di contenimento sono degli esempi di elementi sacrificali.

L'**esecuzione del test** avviene nel seguente modo. Una volta che vengono montate le pile per gli estensimetri, l'elemento sacrificiale ed il provino ad opportuna temperatura nella sua sede, si può passare a risolvere le eventuali sorgenti di disturbo. Arrivati ad avere gli strumenti di misura in attesa ed eliminate le eventuali sorgenti di disturbo per il segnale, si può avviare il test. All'inizio con il martinetto si mette in tensione la barra di pretensionamento fino a far rompere l'elemento sacrificiale. Con la rottura dell'elemento sacrificiale, parte l'onda di tensione attraverso la barra di input.

Gli strumenti di misura e più in generale gli **apparati elettronici** usati per svolgere questo lavoro sono svariati. I computer coinvolti servono per controllare gli estensimetri di input e output, la telecamera ed il riscaldamento (o il raffreddamento in base al test) dei provini da usare. L'acquisizione dei dati in questo test è così delicata che eventuali alimentatori possono interferire sull'efficacia degli estensimetri. Se non si riesce ad eliminare l'interferenza di una sorgente, allora tale sorgente va spenta prima del test. La postazione del provino è visibile in Figura 2.3.4. Si usa una telecamera Photron® SA4 per osservare la deformazione del provino dall'arrivo dell'onda di pressione fino alla rottura. Tale modello di telecamera ha due settaggi: 3000 fps, 1024x1024; 500000 fps, 128x16. Data la generazione di una grande quantità di immagini per unità di tempo, per motivi di memoria, il funzionamento della telecamera avviene solo nel piccolo arco di tempo in cui si manifesta l'impulso; più in particolare la telecamera inizia a riprendere quando è avviata dagli estensimetri di input. Negli

stessi istanti la luce viene generata da delle lampadine a corrente continua per non avere il problema della frequenza di rete.

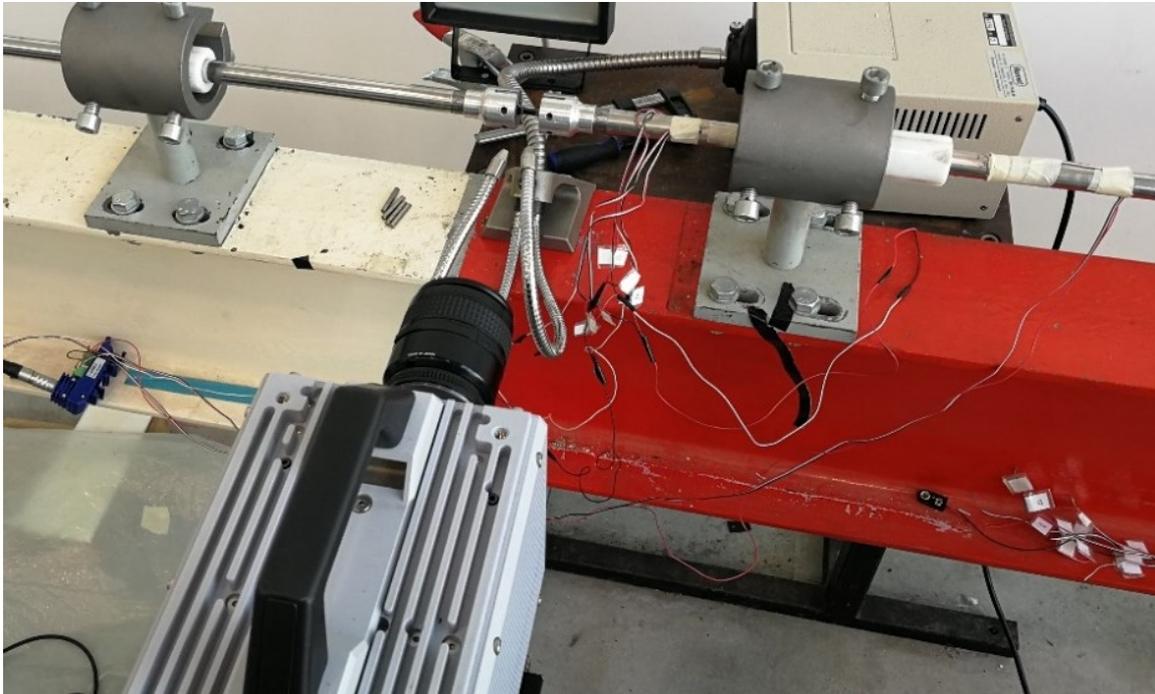


Fig. 2.3.4 La telecamera orientata sulla postazione del provino. Si può notare anche il posizionamento degli estensimetri di output. Le due serpentine che arrivano a ridosso del provino sono il sistema di illuminazione. Sopra la parte bianca della trave sono visibili le quattro spine da usare per bloccare il provino.

Gli estensimetri convertono le onde di sollecitazione (tensione meccanica) in segnali analogici proporzionali (tensione elettrica). L'alimentazione degli estensimetri avviene con comuni pile in corrente continua operanti a 9 V, le quali per sicurezza vengono montate a ridosso di un test per poi essere smontate e rimesse a caricare quanto prima. Per evitare gli effetti flessionali e termici sulle misure, riguardo il ponte di Wheatstone è adottata la configurazione a ponte intero. L'acquisizione con gli estensimetri avviene mediante schede NI® con 4 canali, 16 bit (serie M), modello PCI 6120, il quale opera ad 1 MHz.

Ai fini dell'attuazione di un precarico a compressione, è opportuno verificare ad **instabilità elastica** a carico di punta, il numero di manicotti, pari a 11, della barra di pretensionamento. I dati sono: $L=3000$ mm, $D=18$ mm, $n=12$, $E=204000$ MPa; dove L è la lunghezza della barra di pretensionamento, D è il diametro di tale barra, n è il numero delle onde ed E è il modulo di elasticità normale. Il momento d'inerzia vale:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2.3.1)$$

ne risulta $J=5153$ mm⁴. La forza critica vale quindi:

$$F_{cr} = \frac{EJ}{L^2} n^2 \pi^2 \quad (2.3.2)$$

ne risulta $F_{cr}=166$ kN > 100 kN. Da come si vede, il coefficiente di sicurezza impiegato è di 1.66.

Capitolo 3

Esperimenti

3.1 Provini

Usualmente, il materiale polimerico di un tecnopolimero risulta essere una resina termoplastica. Il polipropilene è una resina termoplastica semicristallina che detiene delle limitate proprietà meccaniche. Considerando però, che tale materiale ha un'ottima resistenza agli agenti chimici, una bassa densità ed un basso costo, al fine di mantenere i suoi vantaggi e di colmare le sue limitatezze meccaniche, esso può ricevere un rinforzo in fibra di vetro. Naturalmente, per motivi produttivi il tecnopolimero che ne viene fuori risulta anisotropo, cosa che complica la comprensione del suo stesso comportamento.

La forma dei provini è stata concepita per l'esecuzione delle prove dinamiche alla split Hopkinson bar, 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, come mostrato in Figura 3.1.1 ed in Figura 3.1.2. Le dimensioni principali dei provini sono riportate in Tabella 3.1.1. Al fine di variare lo strain rate della prova sono stati ricavati provini di lunghezza utile diversa a partire da placchette stampate a iniezione. Lo strain rate aumenta al diminuire della lunghezza utile del provino.

In questo lavoro, i dati presenti riguardano il caso di provini che hanno la fibra di vetro con orientamento a 45° rispetto al flusso. Più in generale, a causa dell'anisotropia, è usuale lo studio con ulteriori angolazioni della direzione delle fibre. In particolare ci si riferisce ai casi limite di fibre a 0° , cioè di fibre parallele al flusso, e di fibre a 90° , cioè di fibre perpendicolari al flusso.

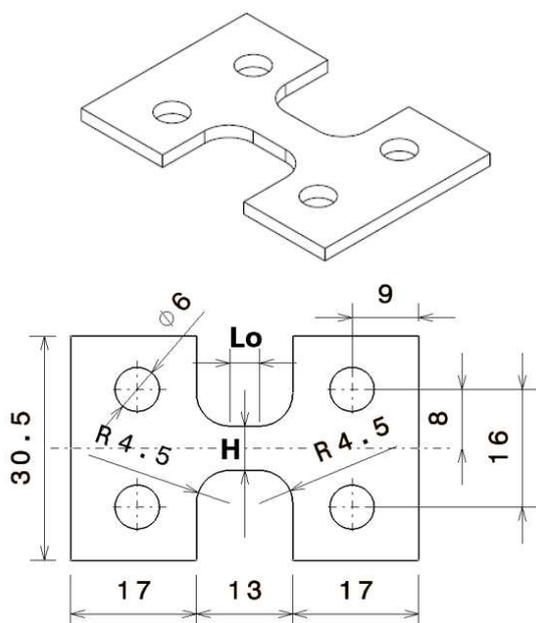


Fig. 3.1.1 Esempio di geometria dei provini

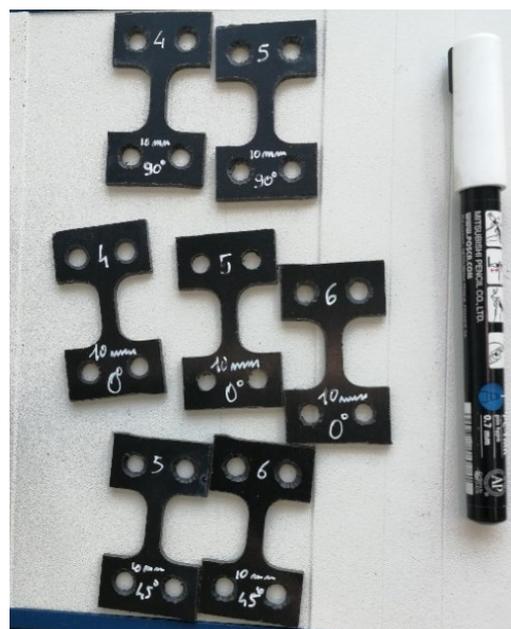


Fig. 3.1.2 Esempio dei provini

Tabella 3.1.1 Dimensioni dei provini

	Direzione 0°	Direzione 45°	Direzione 90°
Larghezza H [mm]	5	5	5.2
Spessore [mm]	2.3	2.22	2.2
Tratto utile Lo [mm]	4, 7, 10 per investigare diverse velocità di deformazione		

La **preparazione del provino** avviene nella seguente maniera. Il provino deve essere provvisto di due linee trasversali (marker) ai fini del rilevamento dell'allungamento nel corso della deformazione. Non ha importanza che i marker abbiano una certa distanza prestabilita fra loro, però devono appartenere al tratto utile. Tali marker vengono fatti tramite un pennarello; nel caso di questo lavoro, i provini sono di colore nero, quindi il pennarello è bianco. Nei casi in cui il provino da testare non dev'essere a temperatura ambiente, si ricorre ad una macchina frigorifera oppure ad un forno (visibile in figura 3.1.3) in base a quello che si cerca. I marker vengono fatti ovviamente prima dell'immissione del provino in questi apparecchi. Riguardo il forno, è stato usato un forno a microonde puramente come involucro isolante. All'interno di tale sistema sono poste delle resistenze e delle termocoppie. Tramite un computer dotato di un opportuno file LabVIEW®, si comandano le resistenze e si

monitora la temperatura con le termocoppie. In questo lavoro, il provino caldo ha una temperatura di 80 °C, quindi viene impostata nel forno una temperatura compresa in un piccolo intorno di tale valore ed ogni provino viene lasciato nel forno a regime per almeno una ventina di minuti.



Fig. 3.1.3 Forno usato per riscaldare i provini. Nella mezzeria si notano (fili bianchi) i tre terminali delle termocoppie. Nel piano sottostante ed in quello soprastante sono poste le resistenze.

Se il provino non si rompe, allora si usa un elemento sacrificale con maggiore lunghezza assiale. In questo lavoro, gli elementi sacrificali impiegati hanno avuto generalmente una lunghezza assiale di circa 0.4 mm. Se il provino non si rompe come voluto, cioè la frattura non avviene nel tratto utile (in tali casi è frequente la frattura nella zona degli afferraggi), il test è considerato nullo. Anche nel caso in cui, con l'arrivo dell'onda di tensione, uno dei marker esca dal campo visivo della telecamera, il test è considerato non valido.

3.2 Elaborazione dei dati

L'obiettivo dello studio condotto è l'ottenimento della curva tensione-deformazione vera del materiale testato e di conseguenza la determinazione di alcune proprietà meccaniche essenziali. In questo lavoro viene messo a punto un algoritmo che consente di fare una parte dell'elaborazione dei dati, in particolare si tratta della parte finale. Specificatamente, l'algoritmo scritto in questo lavoro, si applica quando sono già stati ottenuti i vettori tensione e deformazione, entrambi in funzione del tempo. Gli algoritmi che attuano le elaborazioni sono stati scritti sul software Matlab®.

Nel tirocinio sono stati condotti test con provini a temperatura di 80 °C. Con l'algoritmo sviluppato, vengono poi elaborati i dati di tre di questi test. In particolare, i provini in questione hanno le fibre a 45° ed il tratto utile di 10 mm. Questa elaborazione è stata basata sull'andamento di una curva (sempre a T=80 °C, fibre a 45°, ma a strain rate 10 [s⁻¹]), precedentemente elaborata, che viene considerata come riferimento. Le tre curve tensione-deformazione reale che si ottengono, vengono confrontate con le curve di altri test effettuati precedentemente, sia a diverse temperature che a diversi strain rate. Tutte le curve sono invece accomunate dall'avere le fibre a 45°.

Per condurre un'analisi preliminare riguardo il comportamento del provino, si fanno scorrere in ordine cronologico i numerosi frame della telecamera partendo dai primi frame disponibili (ovvero dall'arrivo dell'onda di tensione incidente a ridosso degli estensimetri di input), fino ad arrivare al frame dell'istante di rottura. In questo modo si nota il progressivo distanziamento che avviene tra i marker, cioè il progressivo allungamento del provino stesso. Un esempio di frame è visualizzabile in Figura 3.2.1. Si distingue qual è il frame della rottura, in quanto nei successivi frame, i due marker si allontanano nettamente.



Fig. 3.2.1 Un tipico frame: i due tratti bianchi sono i marker e per motivi di visibilità si evince quanto siano cruciali.

Mediante gli estensimetri della barra di output, si ottiene la forza trasmessa corrispondente alla resistenza del provino. La deformazione del provino viene misurata mediante la telecamera ad alta velocità per le prove a temperatura ambiente e tramite estensometro ottico per le prove a caldo e a freddo.

Su Matlab bisogna primariamente usare degli algoritmi che grazie al riconoscimento dei colori di un'immagine, consentono di determinare la distanza tra i marker in funzione del tempo. È appunto in tali algoritmi che va indicato il numero del frame corrispondente alla rottura del provino per far fermare l'analisi.

Nei passaggi iniziali dell'algoritmo messo a punto in questo lavoro, si va a determinare la curva che sintetizza meglio la distribuzione dei dati sperimentali, avvalendosi anche della curva di riferimento.

La curva che si ottiene può contenere in alcuni tratti degli andamenti da correggere e questo rappresenta il lavoro da fare in dei passaggi successivi. Una volta corretti gli andamenti anomali, si ha di fatto determinato la curva tensione-deformazione nominale (o ingegneristica). Successivamente, con ulteriori passaggi, si ottiene la curva tensione-deformazione reale (o vera). Di seguito è riportata la descrizione dell'algoritmo scritto in questo lavoro.

I seguenti discorsi valgono per tutte e tre le curve da elaborare, le quali fanno capo a dei test che in laboratorio sono stati denominati test 4, test 5 e test 6.

Una volta ottenuti i vettori tensione e deformazione, entrambi in funzione del tempo, si costruisce il piano tensione-deformazione e di conseguenza si nota la dispersione dei dati sperimentali ricavati, da come si può visualizzare in un esempio in Figura 3.2.2.

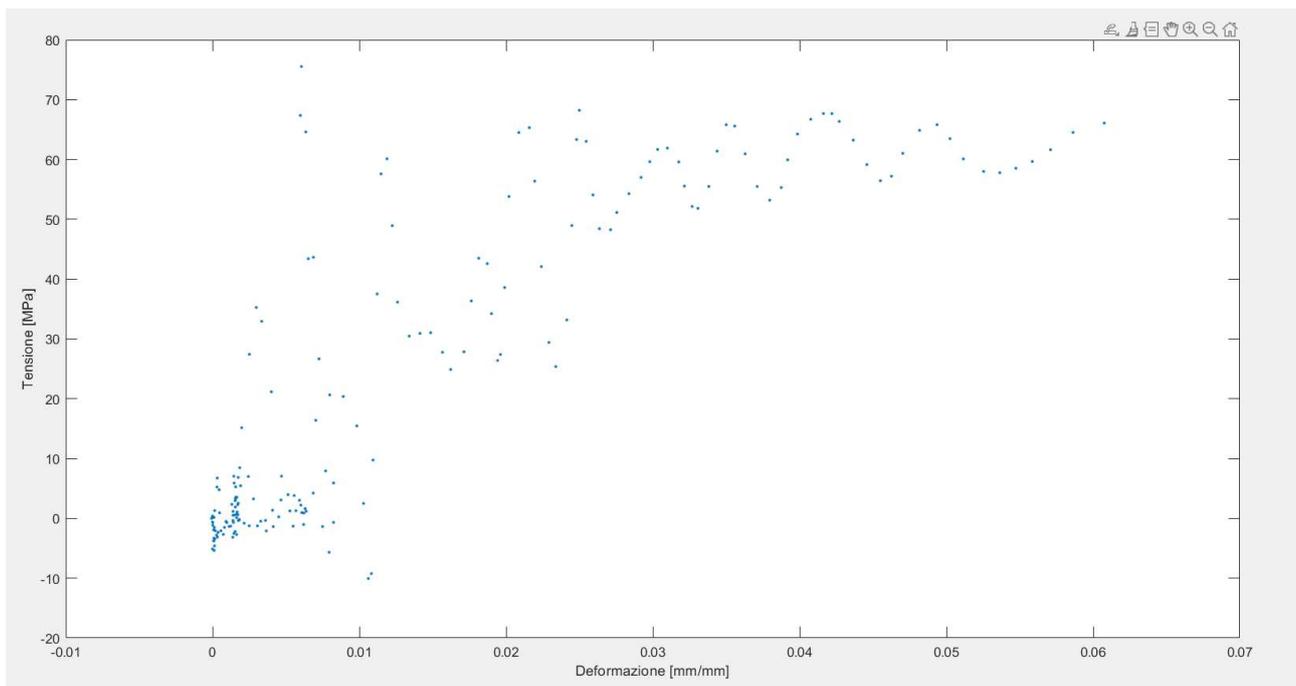


Fig. 3.2.2 Esempio di distribuzione dei dati sperimentali sul piano tensione-deformazione. L'esempio fa riferimento al test 4.

I dati possono essere rappresentati sul piano tensione-deformazione direttamente con dei punti, come in Figura 3.2.2, oppure tramite un'interpolazione di questi, mostrando quindi una curva. Tuttavia nella zona con deformazione compresa fra 0 e 0.01, la curva in questione sarebbe risultata davvero poco visualizzabile e per questo motivo, in questa parte d'analisi si ha preferito la rappresentazione

con punti. In particolare solo con deformazione maggiore di 0.025 si comincia a notare una distribuzione ondulatoria il cui valor medio ricorda approssimativamente l'andamento della curva tensione-deformazione.

La curva di riferimento è la curva di un test con fibre a 45°, con temperatura di 80 °C, e con strain rate 10. In realtà, tale curva non risulta completamente elaborata, in quanto presenta ruvidità, cioè è ancora leggermente influenzata dal rumore sperimentale. Quindi se ne completa l'elaborazione attuandone uno smusso mediante le funzioni polyfit (al sesto grado del polinomio) e polyval. Successivamente si fa lo scarto quadratico medio tra la curva di riferimento appena corretta ed i dati sperimentali, moltiplicando il tutto per un fattore correttivo, che si ha posto essere 1.5. Questi vari passaggi sono visualizzabili nel codice che segue. Nel codice riportato si può notare che il test in input è il test 4.

```
clc
clear
close all

load da_sistemare\curva_test4_10mm_45.mat
load OK\45_T80_SR10_2.mat

index=~isnan(sigma_immagini);
sigma_immagini=sigma_immagini(index);
eps=eps(index);

figure(1)
plot(eps,sigma_immagini,'.')
hold on
xlabel('Deformazione [mm/mm]')
ylabel('Tensione [MPa]')
plot(strain, stress,'b')

%%% andamento generale

p = polyfit(strain, stress,6);
y1 = polyval(p,eps);
plot(eps,y1,'c')
```

```

fun = @(x)(sum((x*y1-sigma_immagini').^2)/length(y1))^0.5;
x0 = [1.5];
x = fminsearch(fun,x0)

plot(eps,x*y1,'k')

```

Quest'operazione, i cui esiti sono visualizzabili in Figura 3.2.3, permette di avvicinarsi molto alla curva tensione-deformazione nominale, perché approssimativamente porta alla tipica forma di tale categoria di curve. Il motivo per cui fin qui non è stata ancora ottenuta accettabilmente la curva tensione-deformazione nominale, è il fatto che questo processo essendo molto generale, in quanto non stabilisce alcun vincolo sulla pendenza in particolari tratti, può portare a degli errori di andamento in alcune parti della curva. Nel caso di questo lavoro, tali errori si sono presentati nel tratto iniziale per tutti e tre i test da elaborare.

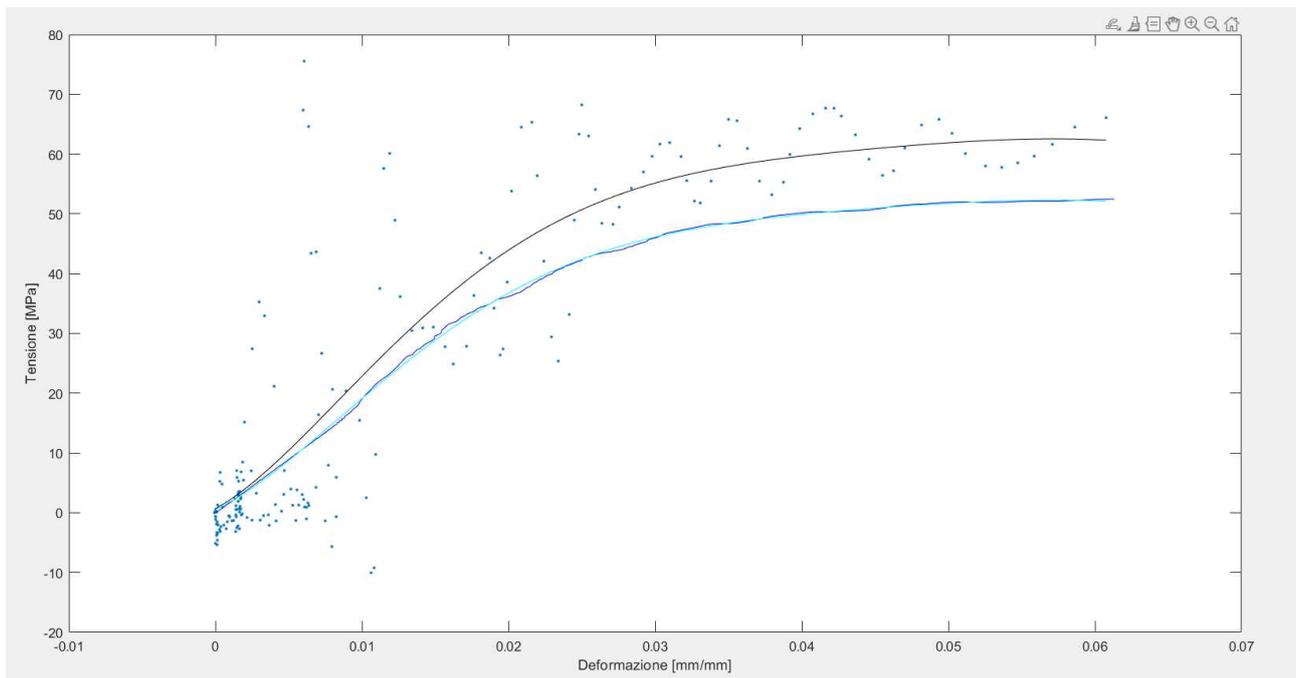


Fig. 3.2.3 Alla dispersione dei dati sperimentali di figura 3.2.2, sono sovrapposte la curva di riferimento (color blu), la curva che ne è la versione smussata (color ciano) e la curva ricavata dall'elaborazione fatta fin qui (color nero).

Nella Figura 3.2.3 si possono notare degli andamenti da correggere riguardo la curva appena ricavata. Nel tratto iniziale della curva con valori di deformazione che arrivano all'incirca a 0.008, è presente un andamento visivamente curvo, con concavità verso l'alto.

Nel primo tratto di una curva tensione-deformazione, com'è noto, l'andamento è approssimativamente lineare. Al fine di correggere l'errore e quindi di raffinare l'algoritmo, la prima parte della curva ricavata viene ricostruita. Il codice in questione è visualizzabile sotto, ed è in continuazione col codice precedentemente riportato. La ricostruzione del primo tratto della curva è basata sull'andamento della curva stessa nel tratto immediatamente successivo a quello da ricostruire. L'idea è ricavare la pendenza media di quest'ultimo tratto per ricostruire tramite essa, la prima parte della curva. Ci si focalizza sul tratto di curva compreso tra 25 e 30 MPa. Quell'intervallo risulta appropriato per tutti e tre i test. Vengono appositamente create delle variabili ("ee", "ss") per registrare i valori dei vettori tensione e deformazione nell'intervallo prefissato. Alle variabili "ee" ed "ss", che possono tracciare una breve curva solo approssimativamente lineare, viene applicata la funzione polyfit con grado uno del polinomio. Conformemente all'idea che sta alla base della ricostruzione del primo tratto di curva, il valore in uscita da tale polyfit, rappresenta la pendenza che assumerà il tratto ricostruito, cioè il modulo di elasticità normale E [GPa]. Quindi, a questo punto è nota, oltre ad una fondamentale proprietà meccanica, la pendenza con cui poter ricostruire linearmente, il primo tratto di curva. Però, prima ancora di pensare al margine sinistro del tratto da ricostruire, cioè del margine che deve coincidere con l'origine del piano tensione-deformazione, bisogna occuparsi dell'opportuno congiungimento tra il margine destro del tratto da ricostruire e la parte rimanente della curva. Al riguardo, vanno messi a punto dei passaggi i quali fanno in modo che non si crei una discontinuità tra il tratto ricostruito e la parte restante della curva. Senza cioè, dei particolari accorgimenti, si andrebbe a formare un gradino tra le due parti di curva da unire. Successivamente, si attua la centratura imponendo che il margine sinistro della curva coincida con l'origine del piano tensione-deformazione.

Nella pratica, al variare delle curve da elaborare, gli unici valori da mettere manualmente in input nell'algoritmo, riguardano gli estremi dell'intervallo di tensione in cui è racchiuso il tratto di curva di cui si calcola la pendenza media.

Si richiamano le formule della curva dei valori nominali (o ingegneristici) di tensione e deformazione.

La tensione nominale [MPa] è:

$$s = \frac{P}{A_0} \quad (3.2.1)$$

dove P [N] è la forza istantanea applicata al provino, A_0 [mm²] è l'area iniziale della sezione trasversale del provino.

La deformazione nominale [mm/mm] è:

$$e = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (3.2.2)$$

dove L_0 [mm] è la lunghezza iniziale del provino ed L [mm] è la lunghezza istantanea del provino sotto l'azione della forza P .

%%% correzione pendenza prima parte, ottenimento curva nominale

```
figure(2)
plot(eps,x*y1,'k','Linewidth',1)
hold on
xlabel('Deformazione [mm/mm]')
ylabel('Tensione [MPa]')

S=x*y1;

index=find(and(S>25,S<30));
ee=eps(index);
ss=S(index);
plot(ee,ss,'r')

p=polyfit(ee,ss,1);
E=p(1)

index=find(S<25);
eps(index)=S(index)/E;

eps(index(end)+1:end)=eps(index(end)+1:end)-(eps(index(end)+1)-eps(index(end)));
S(index(end)+1:end)=S(index(end)+1:end)-(S(index(end)+1)-S(index(end)));

eps=eps-eps(1);
S=S-S(1);
plot(eps,S,'b')
```

```

s=S;
e=eps;
figure(3)
plot(e,s,'k','Linewidth',1)
xlabel('Deformazione nominale [mm/mm]')
ylabel('Tensione nominale [MPa]')
hold on

```

La Figura 3.2.4 fa notare la curva che si ottiene dopo le elaborazioni fatte fin qui. Sempre nella stessa figura, si può osservare come a causa della correzione della pendenza del primo tratto e della centratura, la parte rimanente della curva subisca una leggera traslazione.

Con l'elaborazione arrivata a questo punto si ha determinato la curva tensione-deformazione nominale e l'esito per i tre test è visualizzabile nelle Figure 3.2.5, 3.2.6 e 3.2.7.

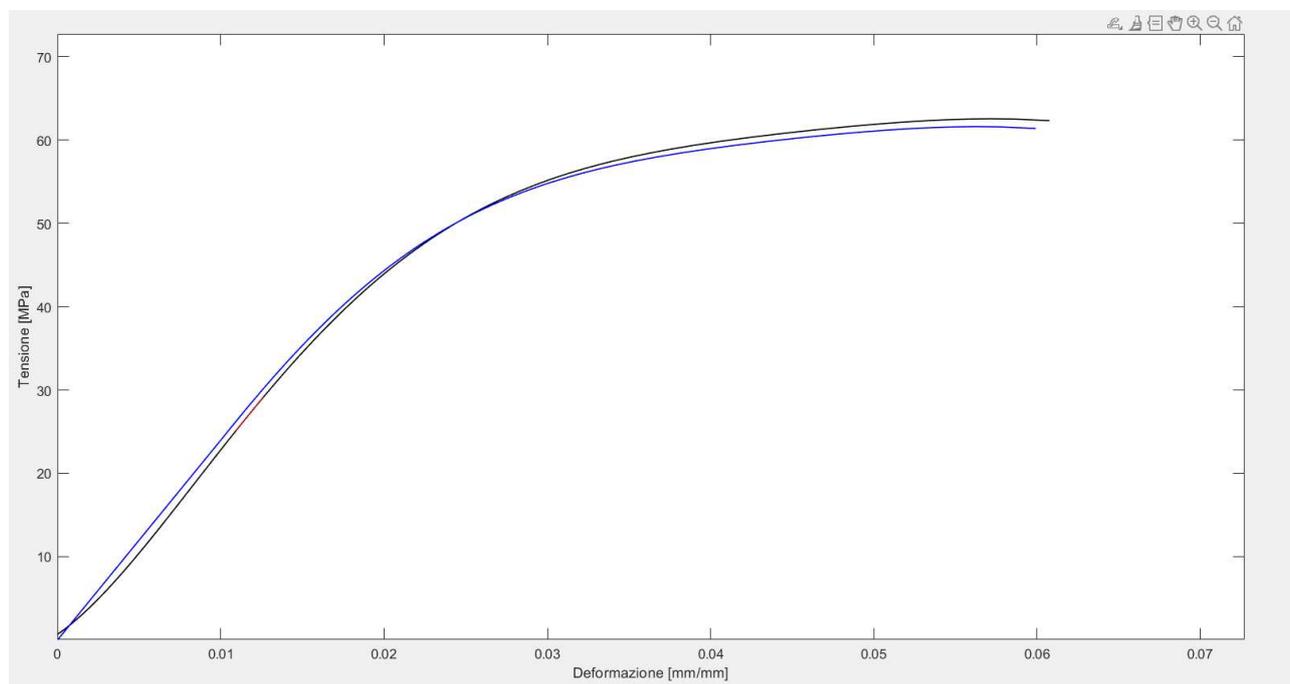


Fig. 3.2.4 Confronto tra la curva (color nero) di cui va corretto il primo tratto e la curva (color blu) con il primo tratto con pendenza corretta e centratura. Si fa riferimento al test 4. Il tratto rosso contenuto nella curva da correggere è il tratto compreso tra 25 e 30 MPa che è stato considerato come riferimento. La curva blu in altre parole, è quindi la curva tensione-deformazione nominale.

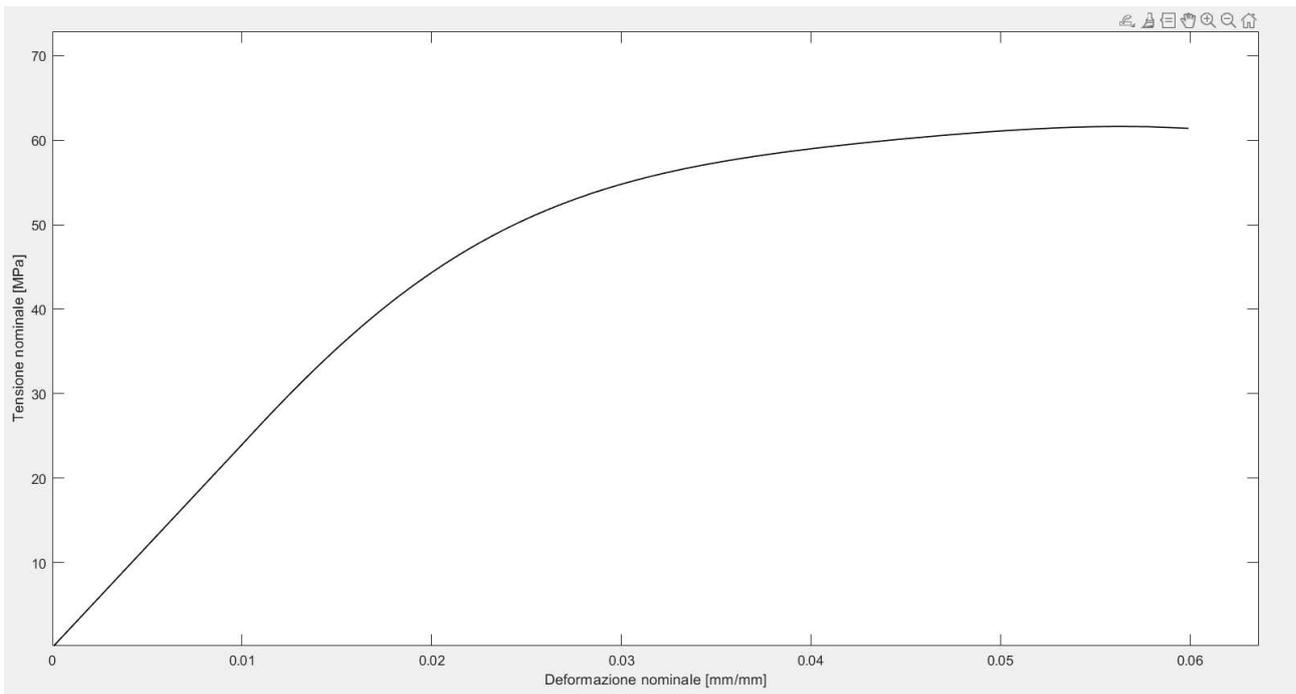


Fig. 3.2.5 Curva tensione-deformazione nominale del test 4

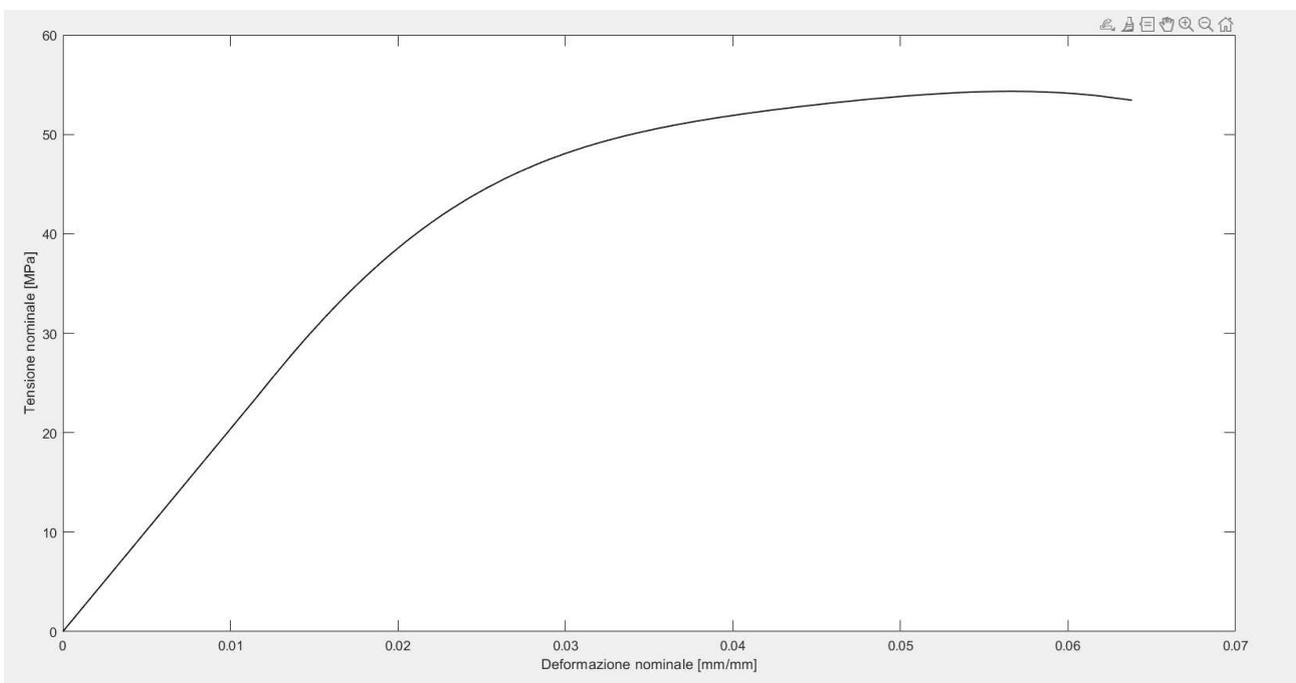


Fig. 3.2.6 Curva tensione-deformazione nominale del test 5

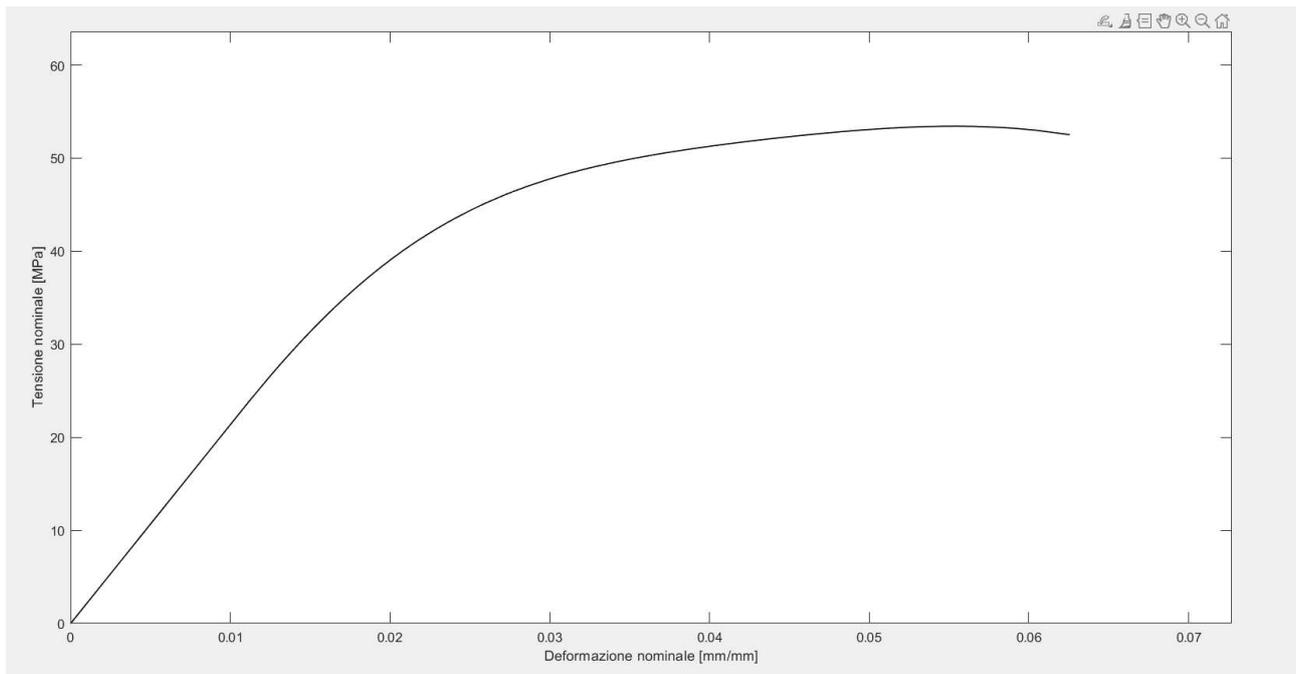


Fig. 3.2.7 Curva tensione-deformazione nominale del test 6

Nella Tabella 3.2.1 sono visualizzabili delle proprietà notevoli medie che sono state prese dalle curve nominali ricavate. I dati medi presentati sono stati ricavati con Matlab.

Tabella 3.2.1 Media di alcune delle proprietà meccaniche fondamentali ricavate nei tre test.

Deformazione nominale a rottura ϵ_f	[mm/mm]	0.062
Tensione nominale a rottura	[MPa]	55.8
Modulo di elasticità normale	[GPa]	2.2

Un altro aspetto che si può studiare è l'assorbimento a rottura di energia per unità di volume. Bisogna precisare che se è vero che il concetto fisico di tenacità lo si può definire come l'area sottesa alla curva tensione-deformazione nominale, classicamente tale proprietà non viene misurata mediante la prova di trazione, ma con dei test impulsivi (come il pendolo di Charpy). Infatti la tenacità è molto influenzata dalla velocità di applicazione del carico e dalla temperatura. Visto che in questo contesto si studiano test a varie velocità di deformazione e a varie temperature, per maggiore completezza

d'analisi, si riporta in Tabella 3.2.2 un valore approssimato dell'area sottesa alla curva tensione-deformazione nominale. In maniera approssimativa, per determinare tale area, si può fare una discretizzazione che consiste nel sommare fra loro tutti gli elementi del vettore stress e moltiplicare tale somma per il rapporto tra l'allungamento a rottura ed il numero di elementi del vettore stress. Si può fare riferimento anche al numero di elementi del vettore strain, perché quei due valori devono essere uguali per una stessa curva. Concettualmente:

$$(y_1\Delta x + y_2\Delta x + \dots + y_n\Delta x) = (y_1 + y_2 + \dots + y_n)\Delta x = (y_1 + y_2 + \dots + y_n) \frac{L_x}{n} \quad (3.2.3)$$

dove in questo contesto:

y_i rappresenta l'elemento i -esimo del vettore stress;

Δx rappresenta la differenza tra due elementi consecutivi del vettore strain;

L_x rappresenta l'allungamento a rottura;

n rappresenta il numero di elementi del vettore strain.

Tabella 3.2.2 Media di un'altra proprietà ricavata dai tre test.

Assorbimento a rottura di energia per unità di volume	[J/cm ³]	1.48
---	----------------------	------

Si richiamano le formule dei valori veri (o reali) di tensione e deformazione.

La tensione vera [MPa] è:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.2.4)$$

dove P [N] è la forza istantanea applicata al provino ed A [mm²] è l'area istantanea della sezione trasversale del provino.

La deformazione vera [mm/mm] è:

$$\varepsilon = \ln \frac{L_0}{L} \quad (3.2.5)$$

dove L_0 [mm] ed L [mm] sono le stesse grandezze della (3.2.2).

Applicando le formule che stabiliscono la relazione tra la curva i valori nominali e la curva ai valori reali, si può passare dalla curva tensione-deformazione nominale alla corrispondente curva reale.

$$\sigma = s(1+e) \quad (3.2.6)$$

$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad (3.2.7)$$

La relazione (3.2.7) è valida nella regione della deformazione omogenea. Oltre tale regione si ha la strizione e al livello teorico, il ricorso ad espressioni della ε in funzione della variazione di area:

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} \quad (3.2.8)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} \quad (3.2.9)$$

In questo contesto però, la strizione che si presenta è tanto piccola, da poter continuare ad usare con buona approssimazione la relazione (3.2.7).

Il codice che permette di fare le operazioni in questione è riportato appena sotto, ed è in continuità con i codici precedentemente mostrati. Per attuare le formule (3.2.6) e (3.2.7) bisogna usare un ciclo, come il for, che faccia ottenere ogni elemento dei vettori “sigma” ed “epsilon”.

```
%%% ottenimento curva reale
```

```
n=length(e)
```

```
for i=1:n
```

```
    sigma(i)=(s(i))*(1+e(i));
```

```
    epsilon(i)=log(1+e(i));
```

```
end
```

```
figure(4)
```

```
plot(epsilon,sigma,'k','linewidth',1)
```

```
xlabel('Deformazione reale [mm/mm]')
```

```
ylabel('Tensione reale [MPa]')
```

```
hold on
```

```
figure(5)
```

```
title('Confronto tra curva nominale (rosso) e curva reale (nero)')
```

```
xlabel('Deformazione [mm/mm]')
ylabel('Tensione [MPa]')
hold on
plot(e,s,'r','Linewidth',1)
plot(epsilon,sigma,'k','Linewidth',1)

stress=sigma;
strain=epsilon;

save sistemate\curva_OK_test4_10mm_45.mat
```

Gli esiti di questi passaggi sono visualizzabili nelle Figure 3.2.8, 3.2.9 e 3.2.10, dove sono appunto raffigurate le curve tensione-deformazione vere dei tre test.

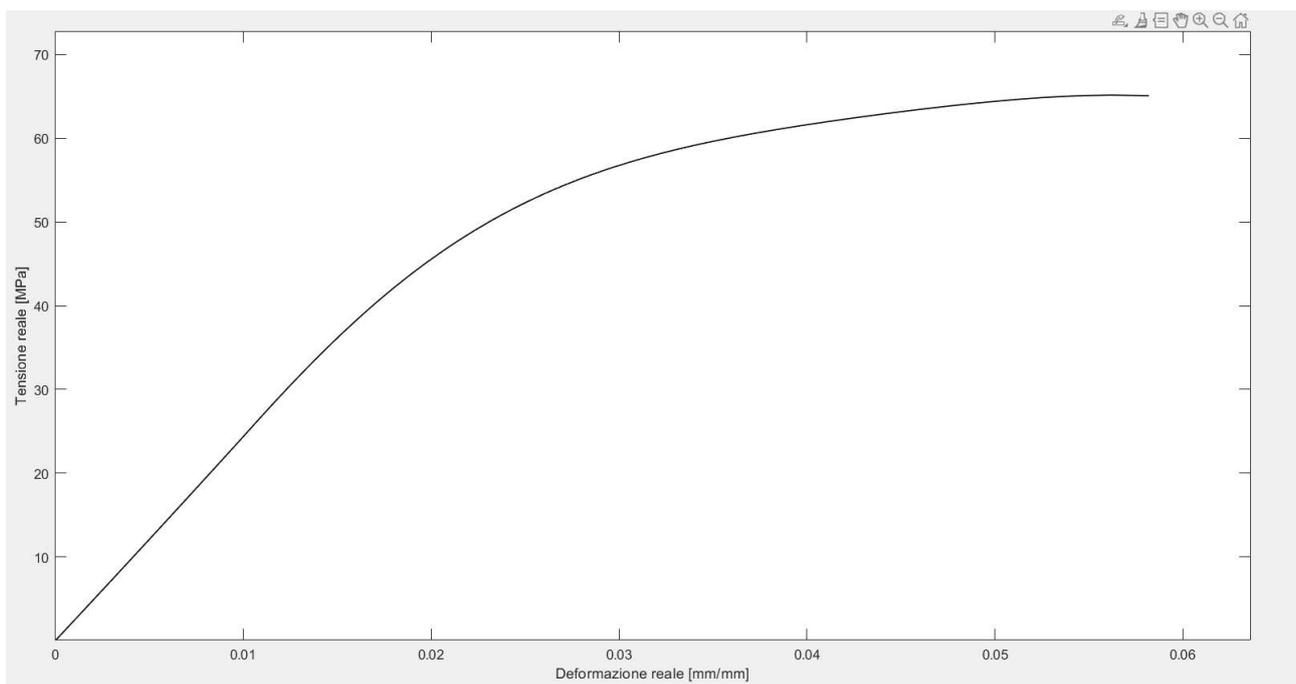


Fig. 3.2.8 Curva tensione-deformazione reale del test 4

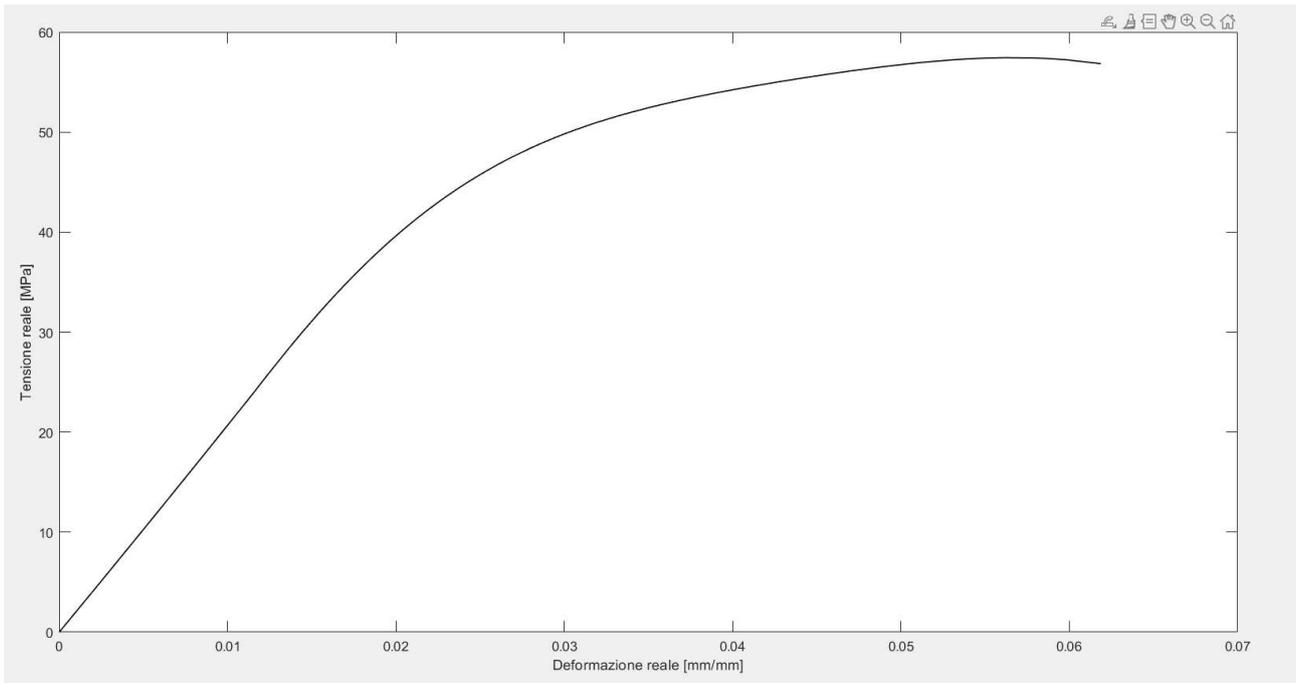


Fig. 3.2.9 Curva tensione-deformazione reale del test 5

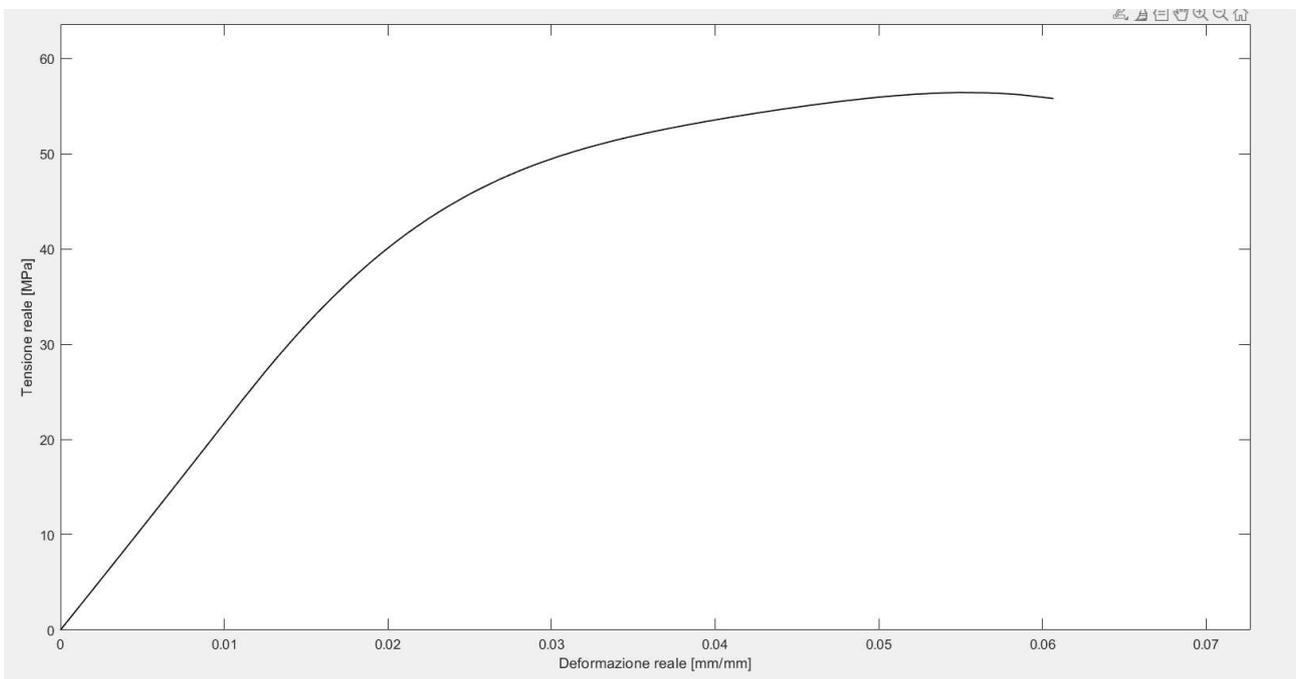


Fig. 3.2.10 Curva tensione-deformazione reale del test 6

Del tecnopolimero in questione, nella Tabella 3.2.3 si possono visualizzare i valori medi della deformazione reale a rottura e della tensione reale a rottura, ricavate nell'elaborazione di questi tre test.

Tabella 3.2.3 Media delle proprietà reali ricavate dai tre test.

Deformazione reale a rottura	[mm/mm]	0.060
Tensione reale di rottura	[MPa]	59.2

Nelle Figure 3.2.11, 3.2.12 e 3.2.13 viene evidenziata la distinzione per tre test tra la curva ai valori nominali e la curva ai valori reali. In maniera del tutto tipica, la curva reale si trova più in alto e a sinistra rispetto a quella nominale, oltre al fatto che entrambe le curve coincidono inizialmente. Per una curva ai valori nominali è tipica la presenza di un picco e poi di una discesa con concavità verso il basso. Per una curva ai valori reali, invece al livello teorico è presente monotonia, ma l'andamento non perfettamente monotono riscontrato nelle curve vere ricavate è comunque accettabile per approssimazione sperimentale. L'errore in questione è dell'ordine dei decimi di MPa.

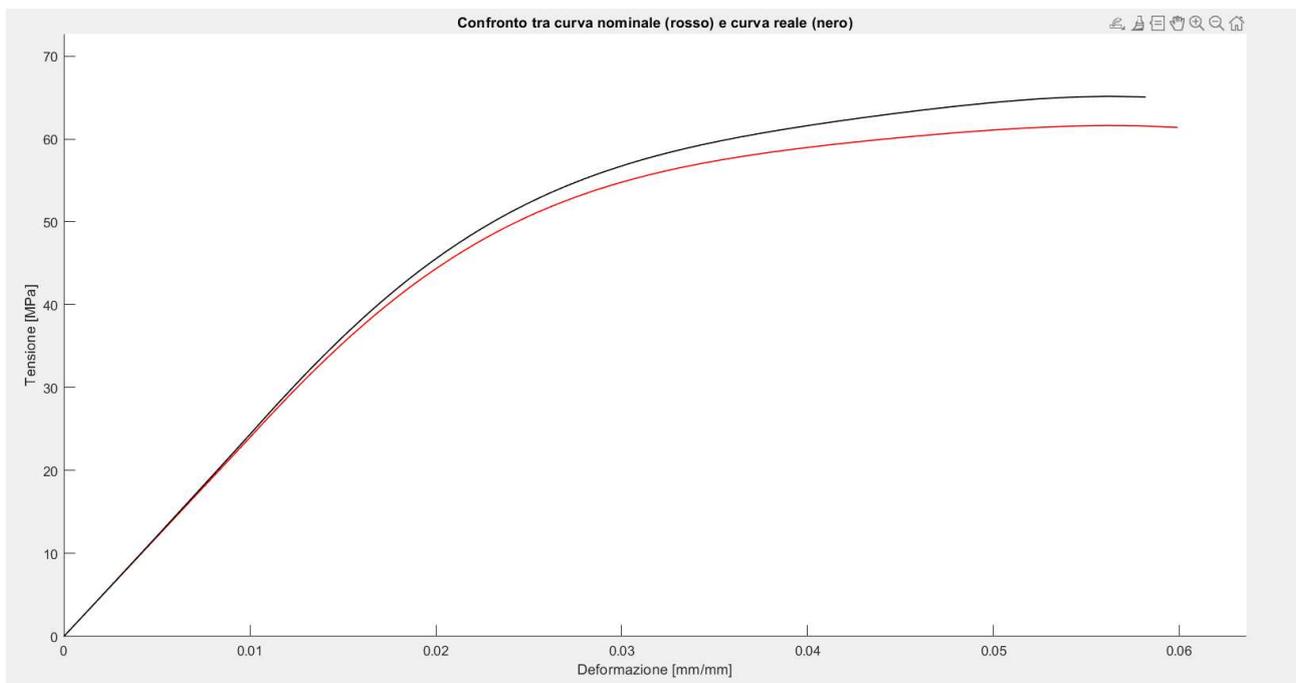


Fig. 3.2.11 Confronto tra la curva tensione-deformazione nominale e la corrispondente curva reale del test 4

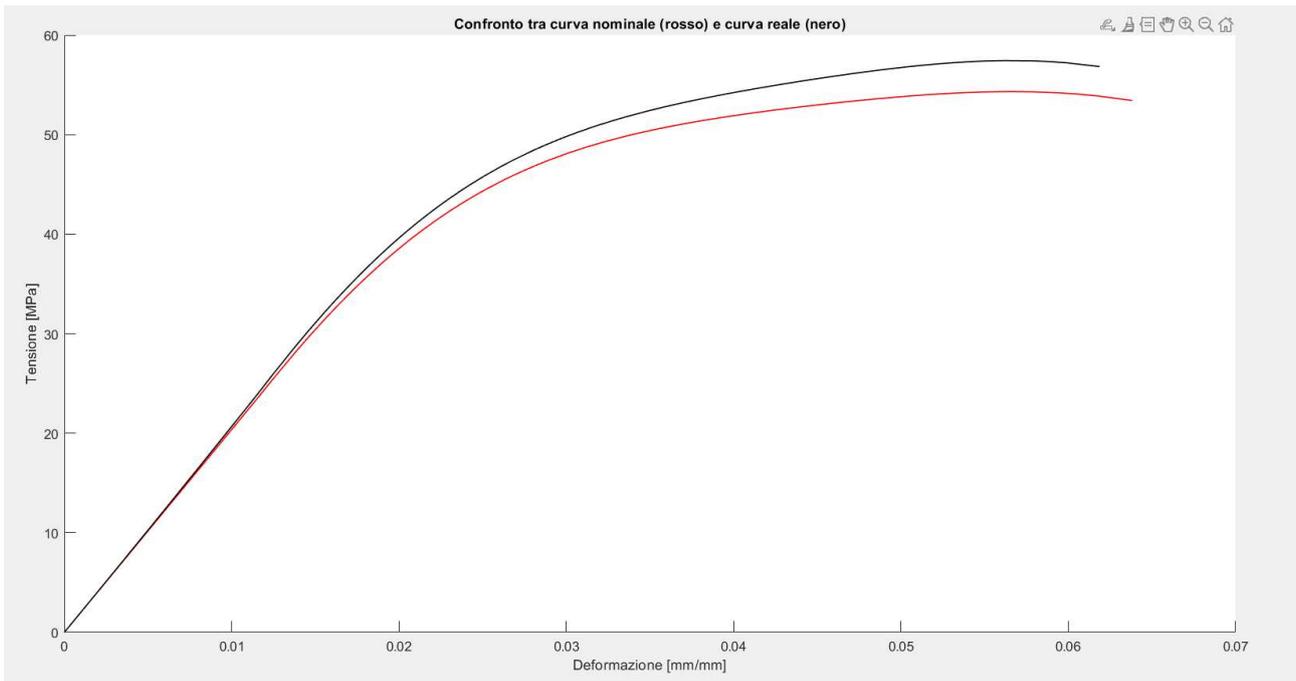


Fig. 3.2.12 Confronto tra la curva tensione-deformazione nominale e la corrispettiva curva reale del test 5

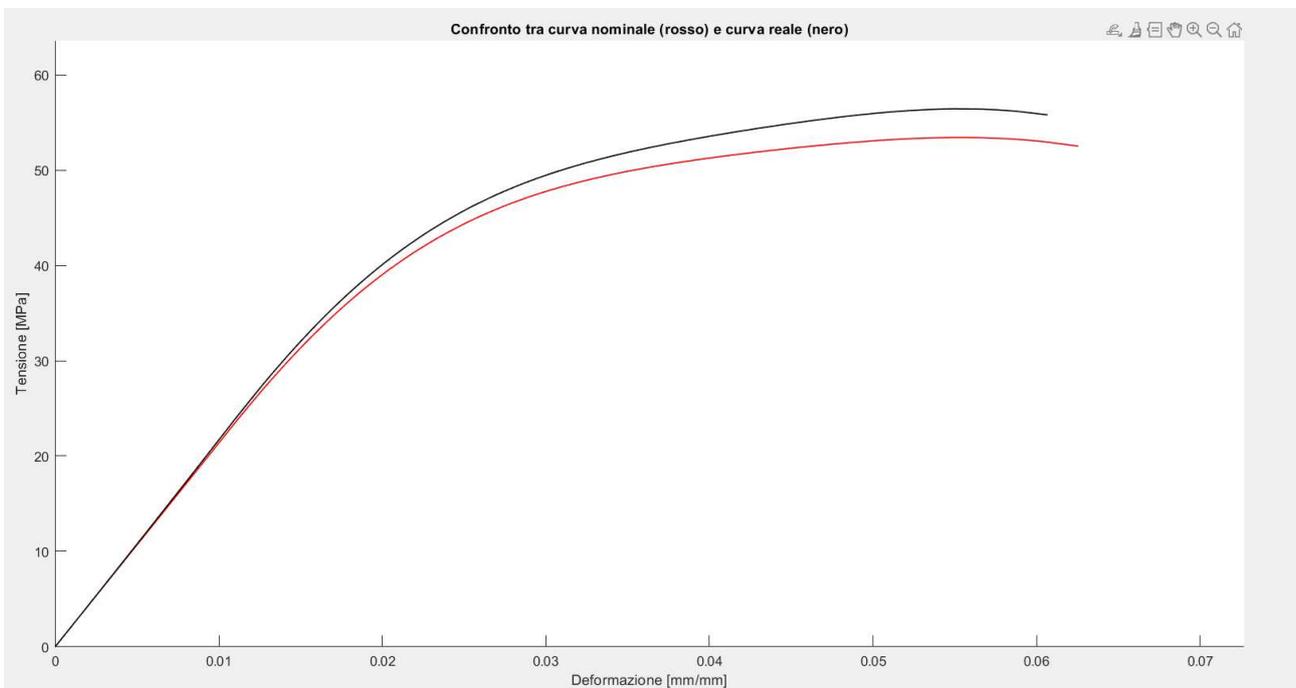


Fig. 3.2.13 Confronto tra la curva tensione-deformazione nominale e la corrispettiva curva reale del test 6

Infine le varie curve tensione-deformazione reali a disposizione vengono portate tutte su uno stesso grafico, come si può notare in Figura 3.2.14. All'infuori delle tre curve elaborate in questo lavoro, per le altre curve vale un discorso analogo a quello fatto per la curva di riferimento precedentemente descritta all'inizio dell'algoritmo. Cioè queste altre curve presentavano ruvidità ed in questo lavoro ci si è limitati a smussarle.

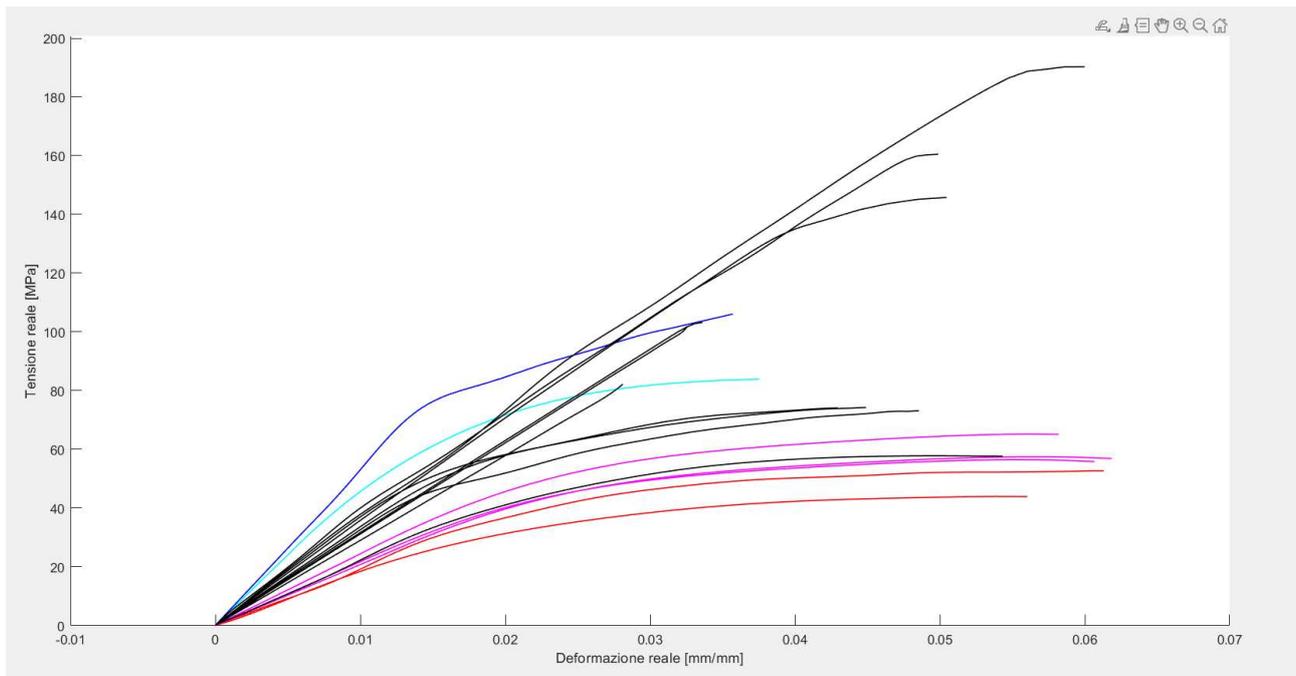


Fig. 3.2.14 Grafico che mostra le varie curve. Quelle tre in color magenta sono quelle elaborate in questo lavoro. Le curve in rosso e magenta riguardano i test a temperatura di 80 °C. Le curve in nero riguardano i test a temperatura ambiente. Le curve in ciano e blu riguardano i test a temperatura di -20 °.

La Figura 3.2.15 evidenzia le velocità di deformazione delle varie curve. Come si può notare, si possono distinguere famiglie di curve in base alla temperatura ed alla velocità di deformazione. Si possono fare inoltre le seguenti osservazioni. All'aumentare della temperatura, diminuisce la tensione di rottura. All'aumentare dello strain rate aumenta la tensione di rottura. Il modulo di elasticità normale non cambia molto al variare dello strain rate. Riguardo la deformazione a rottura, questa a parità di temperatura e al variare dello strain rate può, a seconda dei casi, aumentare o diminuire.

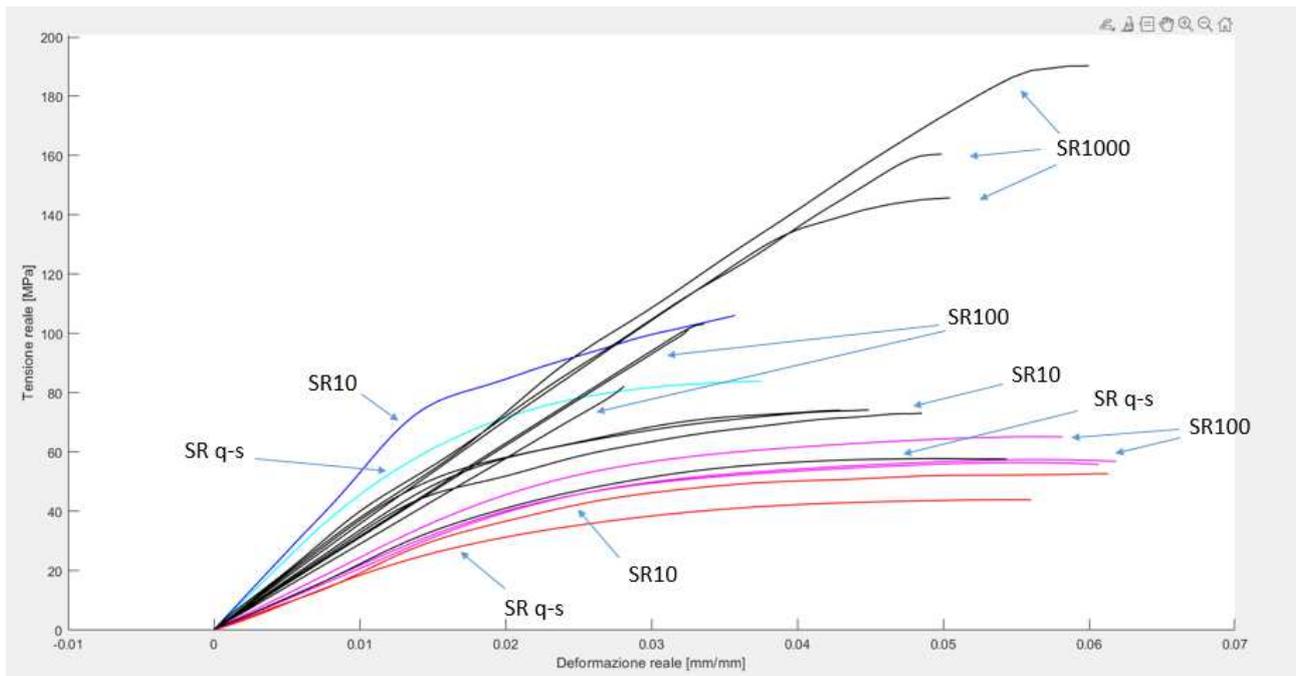


Fig. 3.2.15 Le stesse curve della figura 3.2.14 con indicazione della velocità di deformazione. La denominazione SR sta per “strain rate”. La denominazione q-s sta per “quasi-statico”.

Nella Tabella 3.2.4 si possono notare i valori delle proprietà fondamentali che si possono ricavare dalle curve elaborate. Invece nella Tabella 3.2.5 si riportano altre proprietà per maggiore completezza d’analisi. Dei dati a disposizione, gli esperimenti a T80 SR100, Tamb SR10, Tamb SR100 e Tamb SR1000, hanno molteplicità tre. Nelle tabelle se ne riportano i valori medi.

Tabella 3.2.4 Valori di alcune proprietà meccaniche fondamentali ricavate dalle curve a disposizione.

Test	Deformazione reale a rottura [mm/mm]	Tensione reale di rottura [MPa]	Modulo di elasticità normale [GPa]
T-20 SR q-s	0.038	83.9	4.8
T-20 SR10	0.036	106.0	5.3
T80 SR q-s	0.056	43.9	1.8
T80 SR10	0.061	52.6	1.9
T80 SR100	0.060	59.2	2.2
Tamb SR q-s	0.054	57.6	2.2
Tamb SR10	0.046	73.8	3.5
Tamb SR100	0.031	95.6	3.0
Tamb SR1000	0.053	165.5	3.4

Tabella 3.2.5 Valori di altre proprietà meccaniche ricavati dalle curve a disposizione.

Test	Assorbimento a rottura di energia per unità di volume [J/cm ³]
T-20 SR q-s	1.16
T-20 SR10	1.56
T80 SR q-s	0.64
T80 SR10	1.02
T80 SR100	1.48
Tamb SR q-s	1.40
Tamb SR10	1.46
Tamb SR100	1.50
Tamb SR1000	4.38

3.3 Conclusioni

In questo lavoro è stato mostrato il comportamento meccanico al variare dello strain rate e della temperatura di un tecnopolimero, fabbricato con stampaggio a iniezione, costituito da una base polimerica in PP ed un rinforzo al 20% in fibra di vetro. La sperimentazione ha richiesto l'impiego della split Hopkinson bar dell'UNIVPM. Al fine di elaborare i dati sperimentali, è stato necessario mettere a punto un algoritmo che facesse ottenere prima la curva tensione-deformazione nominale ed infine la corrispondente curva reale. Successivamente sono state confrontate le varie curve tensione-deformazione vere a disposizione e sono state determinate alcune proprietà notevoli: la deformazione reale a rottura, la tensione reale di rottura, il modulo di elasticità normale. Inoltre, per un'ulteriore analisi, di ogni categoria di test è stato determinato l'assorbimento a rottura di energia per unità di volume. La varietà dei risultati mostrati, fa notare quanto nell'ambito dei test distruttivi a carico unitario, il classico approccio della trazione quasi-statica fornisca uno studio assai parziale del materiale.

Bibliografia

1. Song B, Chen W (2010) Split Hopkinson Kolsky bar: design testing and applications. Springer, New York. ISBN 978-1-4419-7981-0
2. Johnson GR, Cook WH (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Eng Fract Mech 21:31–48
3. Leuser DR, Kay GJ, LeBlanc MM (1999) Modeling large-strain, high-rate deformation in metals, 3th Biennial Tri-Lab. Eng. Conference on Modeling and Simulation, Pleasaton
4. Manes A, Peroni L, Scapin M, Giglio M (2011) Analysis of strain rate behavior of an Al 6061 T6 alloy. Procedia Eng 10:3477– 3482
5. Zhu D, Mobasher B, Rajan SD, Peralta P (2011) Characterization of dynamic tensile testing using aluminum alloy 6061-T6 at intermediates strain rates. J Eng Mech 137:669–679
6. Hopkinson B (1914) A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. Philos Trans R Soc Lond A 213:437–456
7. Davies RM (1948) A critical study of the Hopkinson pressure bar. Philos Trans R Soc Lond A 240:375–457
8. Kolsky H (1949) An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. Proc Phys Soc Lond 63:676-700
9. Mancini E, Sasso M, Rossi M, Chiappini G, Newaz G, Amodio D (2015) Design of an Innovative System for Wave Generation in Direct Tension–Compression Split Hopkinson Bar. J dynamic behavior mater 1:201–213