



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E
SCIENZE MATEMATICHE

Tesi di laurea

**Studio numerico-sperimentale delle proprietà dinamiche di
solidi cellulari torcenti**

**Experiments and predictive modelling of dynamics
performances of twisting cellular solids**

Relatore:

Prof. Marco Sasso

Correlatore:

Ing. Mattia Utzeri

Tesi di:

Michele Amadori

Anno accademico 2022-2023

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
1.1. <i>Solidi cellulari</i>	1
1.1.1. <i>Tipologie</i>	2
1.1.2. <i>Applicazioni</i>	3
1.1.3. <i>Comportamento meccanico</i>	3
1.2. <i>Barra di Hopkinson</i>	10
2. TWISTING GYROID	16
2.1. <i>Progettazione</i>	16
2.2. <i>Produzione</i>	17
2.3. <i>Caratterizzazione del materiale</i>	17
2.3.1. <i>Comportamento statico</i>	40
2.3.2. <i>Comportamento dinamico</i>	45
2.4. <i>Analisi agli elementi finiti</i>	57
3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	70
3.1. <i>Risultati sperimentali</i>	70
3.2. <i>Risultati numerici</i>	89
3.3. <i>Confronto numerico-sperimentale</i>	92
4. CONCLUSIONE.....	94
Bibliografia.....	99

Indice delle figure

Figura 1 Esempi di materiali cellulari, da sinistra; honeycomb, open-celled, closed-celled.....	2
Figura 2 Da sinistra, Bending dominated structures e Stretch-dominated structures [2].....	4
Figura 3 Confronto tra tensione generata da un solido pieno ed una schiuma [1]	5
Figura 4 Suddivisione curva σ - ϵ di un solido cellulare	6
Figura 5 Diagramma σ - ϵ con evidenziata l'area sottesa alla curva.....	8
Figura 6 Foto di Bertram Hopkinson.....	10
Figura 7 Foto di Herbert Kolsky.....	11
Figura 8 Barra SHTCB presente nel laboratorio dell'UNIVPM [7].....	12
Figura 9 Collegamento estensimetri assiali e torsionali	13
Figura 10 Estensimetri incollati sulla barra di output.....	14
Figura 11 Fotocamera ad alta velocità.....	14
Figura 12 A sinistra il provino NON twistato mentre a destra il provino twistato.....	16
Figura 13 Provini stampati.....	17
Figura 14 Curve sperimentali a diversi strain rate.....	21
Figura 15 Valutazione grafica della tensione di snervamento.....	25
Figura 16 Tratto plastico della curva in forma logaritmica.....	26
Figura 17 Curva sperimentale e numerica a confronto.....	27
Figura 18 Ottimizzazione curve mediante risolutore	29
Figura 19 Dettaglio della curva quasi statica	30
Figura 20 Curva quasi statica ottimizzata con risolutore e vincolo	31
Figura 21 Ingrandimento della curva quasi statica ottimizzata con il risolutore e il vincolo.....	32
Figura 22 Confronto tra le curve in prossimità dell'inizio del tratto plastico	32
Figura 23 Esempio di calcolo del PLWK su Excel.....	34
Figura 24 Confronto tra curva sperimentale e numerica a 1000/s di strain rate con valori di prova	36
Figura 25 Confronto tra curva sperimentale e numerica a 1000/s di strain rate dopo l'azione del risolutore.....	37
Figura 26 Grafico riassuntivo con confronto tra curve sperimentali e numeriche.....	39
Figura 27 Strumentazione utilizzata nelle prove sperimentali statiche	40
Figura 28 Telecamera utilizzata nella prova statica	41
Figura 29 Deformazione progressiva test Gy.....	42
Figura 30 Provino compresso staticamente (Test Gy).....	43
Figura 31 Deformazione progressiva Test TwGy_free.....	44
Figura 32 Provino compresso staticamente (Test TwGy_free).....	44
Figura 33 Comportamento onde di deformazione.....	45
Figura 34 Schematizzazione dimensioni del provino non filettato	48
Figura 35 Set-Up del provino non filettato sulla barra	50
Figura 36 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino non twistato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 2 mentre a destra il Test 3.....	50
Figura 37 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 2 e 3.....	51
Figura 38 Schematizzazione dimensioni del provino non filettato	51
Figura 39 Set-Up del provino avvitato ad un estremo della barra	53
Figura 40 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino twistato avvitato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 4 mentre a destra il Test 5	53
Figura 41 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 4 e 5.....	54

Figura 42 Set-Up del provino avvitato (parzialmente) ad entrambe le barre	55
Figura 43 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino twistato avvitato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 6 mentre a destra il Test 7	56
Figura 44 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 6 e 7.....	56
Figura 45 Provini con aggiunta di spessori cilindrici	57
Figura 46 Spostamento faccia superiore provino non twistato	59
Figura 47 Spostamento verticale calcolato sull'elemento trave del provino twistato	60
Figura 48 Reazione vincolare di coppia calcolata sull'elemento trave del provino twistato.....	61
Figura 49 Rotazione calcolata sull'elemento trave del provino twistato	62
Figura 50 Reazione vincolare di coppia calcolata sull'elemento trave del provino twistato.....	63
Figura 51 Rotazione calcolata sull'elemento trave del provino twistato	63
Figura 52 Step 0 della simulazione: l'onda non ha raggiunto il provino Gy	65
Figura 53 Step240 della simulazione: l'onda ha raggiunto il provino Gy deformandolo.....	66
Figura 54 Step400della simulazione: l'onda ha deformato completamente il provino Gy.....	66
Figura 55 L'onda di compressione arriva a contatto con il provino TwGy_lock	67
Figura 56 Risultato di primo tentativo TwGy_free.....	68
Figura 57 Rotazione subita dal provino TwGy_free durante lo schiacciamento	69
Figura 58 Curve σ - ϵ quasi statiche	70
Figura 59 Segnali elettrici acquisiti dagli estensimetri durante la prova	72
Figura 60 Visualizzazione della prima onda.....	73
Figura 61 Onda di deformazione incidente	75
Figura 62 Onda di deformazione riflessa	76
Figura 63 Onda di deformazione trasmessa.....	77
Figura 64 Sovrapposizione delle onde	78
Figura 65 Curva σ - ϵ del provino (Test 6)	79
Figura 66 Strain-Strain rate.....	79
Figura 67 Onde torsionali	81
Figura 68 Andamento della tensione tangenziale al variare della deformazione	82
Figura 69 Andamento della deformazione angolare nel tempo.....	84
Figura 70 Rotazione relativa in gradi	85
Figura 71 Confronto tra variazione angolare e longitudinale.....	86
Figura 72 Diagramma tensione ed efficienza	87
Figura 73 Confronto tra curve σ - ϵ sperimentali dinamiche	88
Figura 74 Grafico riassuntivo delle curve σ - ϵ delle prove quasi statiche.....	89
Figura 75 Confronto tra curve numeriche dinamiche	90
Figura 76 Confronto tra curve numeriche statiche e dinamiche	91
Figura 77 Confronto tra curve statiche numeriche e sperimentali.....	92
Figura 78 Confronto tra curve statiche numeriche e sperimentali.....	93
Figura 79 Risultati sperimentali ottenuti in altre prove.....	95
Figura 80 Valutazioni inerenti al SEA e al sigma di picco	97
Figura 81 Collocamento dei risultati ottenuti nel panorama dell'assorbimento energetico	98

Indice delle tabelle

Tabella 1 Dati Gy	18
Tabella 2 Area e Volumi	18
Tabella 3 Massa del provino	19
Tabella 4 Densità	19
Tabella 5 Valori di primo tentativo	27
Tabella 6 Valori ottenuti mediante risolutore	28
Tabella 7 Risultati ottenuti mediante risolutore e vincolo.....	31
Tabella 8 Parametri trapezio.....	34
Tabella 9 Dati per calcolo della temperatura omologa T^*	35
Tabella 10 Parametri C ed m valutati per la curva con strain rate pari a 1000/s.....	36
Tabella 11 Parametri C ed m valutati per la curva con strain rate pari a 1500/s.....	37
Tabella 12 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio Fe7131	38
Tabella 13 Dati dei provini utilizzati nel Test 2 e nel Test 3	49
Tabella 14 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 2 e per il Test 3.....	49
Tabella 15 Dati dei provini utilizzati nel Test 4 e nel Test 5	52
Tabella 16 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 4 e per il Test 5.....	52
Tabella 17 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 6 e per il Test 7.....	55
Tabella 18 Risultati dello studio inerente all'assorbimento energetico del test 6.....	87
Tabella 19 Risultati finali	96

Prefazione

In questo testo verrà descritto il lavoro svolto presso l'Università Politecnica delle Marche, con la collaborazione dell'ing. Mattia Utzeri, correlatore di questa tesi.

Alla base di questo testo vi è la valutazione del quantitativo di energia assorbito durante un impatto da un solido cellulare twistato. Questo oggetto, realizzato in acciaio Fe7131 mediante tecnica di stampa 3D, suscita una certa curiosità nell'ambito degli assorbitori d'urto in quanto, grazie alla sua particolare geometria, si pensa che potrebbe assorbire un maggior quantitativo di energia.

Si è partiti con lo studio delle caratteristiche meccaniche (statiche e dinamiche) dell'acciaio utilizzato per poter realizzare i provini. Si parla di caratterizzazione inversa del materiale, in quanto partendo da alcuni dati sperimentali forniti dal professore Edoardo Mancini, si sono ricostruite numericamente le curve del materiale. Questo primo step del lavoro è stato di fondamentale importanza, in quanto senza un'accurata definizione delle caratteristiche del materiale, tutto quello di cui si sarebbe parlato successivamente avrebbe perso di importanza e significato.

In questa prima fase del lavoro, si sono gettate, quindi, le basi di tutta la tesi.

Una volta gettate queste fondamenta, si sono sviluppati i modelli CAD delle due tipologie di solidi cellulari studiati mediante il software NTOP.

Entrambi i provini sono solidi cellulari caratterizzati da una sezione cilindrica: uno risulterà twistato rispetto all'asse longitudinale mentre l'altro no.

Successivamente, il lavoro prosegue con l'implementazione dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione del materiale all'interno del software di simulazione FEM, ABAQUS.

All'interno dell'ambiente CAE sono state eseguite delle simulazioni utili a testare il comportamento quasi statico e dinamico dei provini, sfruttando differenti configurazioni.

Il lavoro si conclude con una serie di prove sperimentali di compressione statiche e dinamiche svolte all'interno dei laboratori dell'UNIVPM.

Questi test sono stati svolti sfruttando la macchina Zwick/Roell per quanto riguarda lo studio del comportamento statico dei provini mentre si è utilizzata la barra di Hopkinson per testare dinamicamente il materiale.

Questi test sono stati possibili grazie all'Ing. Utzeri, correlatore di questa tesi senza il quale sarebbe stato impossibile svolgere l'intero lavoro.

Noti i dati sperimentali e quelli numerici è stato possibile effettuare un confronto tra i risultati ottenuti. Confronto che ha portato poi al raggiungimento di tutta una serie conclusioni più o meno inaspettate.

Capitolo primo

INTRODUZIONE

1.1 Solidi cellulari

L'uomo nel corso della storia ha sempre utilizzato materiali cellulari di origine naturale, basti pensare al legno impiegato nella costruzione di edifici e altri utensili o al sughero utilizzato per sigillare il contenuto delle bottiglie già in epoca romana [1].

Nel corso del tempo, l'umanità si è distaccata da questi materiali in quanto trovò maggior interesse altrove: l'uomo conobbe i materiali metallici e si concentrò sull'affinare e approfondire queste tecnologie.

Oggigiorno però, grazie all'avanzamento tecnologico legato principalmente alle tecniche additive, l'uomo ha riscoperto questi materiali e ha deciso di realizzare i propri.

Una cella, è un piccolo spazio chiuso, ma un insieme di celle costituisce un solido cellulare.

Tra i solidi cellulari più diffusi si trovano le schiume polimeriche, tuttavia, le tecniche additive odierne consentono di realizzare solidi metallici, ceramici e in vetro.

Questi materiali presentano caratteristiche uniche legate a diversi fattori [2] :

1. proprietà del materiale utilizzato per realizzare il solido cellulare;
2. la forma delle celle e il modo con cui queste sono connesse tra di loro,
3. la densità relativa ρ_0/ρ_s , cioè il rapporto tra la densità del solido cellulare ρ_0 e la densità del materiale con cui lo si realizza ρ_s .

1.1.1 Tipologie

I solidi cellulari sono particolari solidi realizzati mediante l'interconnessione di una rete di puntoni e piastre che vanno a formare i bordi e le facce delle varie celle [1].

Esistono differenti tipologie di solidi cellulari e queste si suddividono in tre differenti macrocategorie:

1. Honeycomb – strutture a nido d'ape: sono strutture bidimensionali di poligoni le cui celle richiamano la struttura esagonale delle api;
2. Open-celled foams – schiume a celle aperte, cioè strutture tridimensionali in cui le varie facce risultano essere aperte e l'aria è libera di uscire in caso di schiacciamento del solido;
3. Closed-celled foams – schiume a celle chiuse, cioè strutture tridimensionali in cui le varie facce risultano essere chiuse e l'aria è intrappolata all'interno delle pareti della cella.

Chiaramente, il modo con cui le celle vengono realizzate (chiuse o aperte) andrà ad influenzare le proprietà del solido.

Anche le spugne, oggetti di uso quotidiano, sono dei solidi cellulari, ma la differenza che sussiste con le schiume sta nel modo con cui sono distribuite le celle: nelle schiume queste sono distribuite con una logica ed una struttura ben definita, mentre nelle spugne questa distribuzione di celle risulta essere casuale.

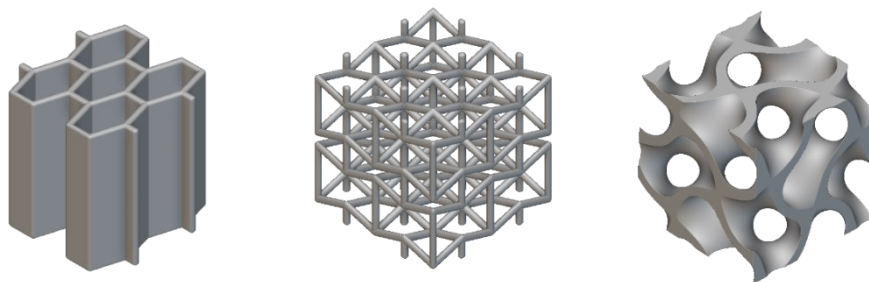


Figura 1 Esempi di materiali cellulari, da sinistra; honeycomb, open-celled, closed-celled

1.1.2 Applicazioni

Dal punto di vista industriale, questi particolari materiali possono assolvere a varie funzioni e possono essere quindi impiegati in settori anche molto variegati tra loro. Vengono utilizzati in ambito aeronautico, automobilistico, biomeccanico e altri settori. L'interesse industriale di questi materiali ruota attorno alla loro capacità di assorbire elevati quantitativi di energia meccanica e per tale motivo i solidi cellulari vengono impiegati laddove risulta importante la resistenza agli urti, l'immagazzinamento e diffusione dell'energia.

Grazie al fatto che la struttura di questi materiali viene progettata e realizzata artificialmente per mezzo di tecniche di produzione additive, le proprietà degli architected materials possono essere molto variegate. [3]

La particolare conformazione di cui sono dotati i solidi cellulari consente impieghi anche di natura strutturale laddove sono richieste proprietà meccaniche ottimali e pesi ridotti.

1.1.3 Comportamento meccanico

I solidi cellulari hanno caratteristiche meccaniche particolari che influenzano profondamente il loro comportamento e possono essere classificati anche in funzione di esse. Si parla infatti di bending-dominated e stretch-dominated structures in base a come il solido cellulare si comporta nel momento in cui viene compresso [2]. I materiali bending-dominated presentano una curva σ - ϵ caratterizzata da un picco ed un successivo plateau post-snervamento che si trova a valori di tensione più bassi (softening). Questi materiali si prestano maggiormente ad utilizzi legati appunto all'assorbimento energetico.

I materiali cellulari stretch-dominated sono invece caratterizzati da una fase elastica più estesa ed un comportamento post-snervamento caratterizzato da un plateau caratterizzato da una tensione crescente. Questa seconda tipologia di materiali si presta maggiormente ad applicazioni di natura strutturale.

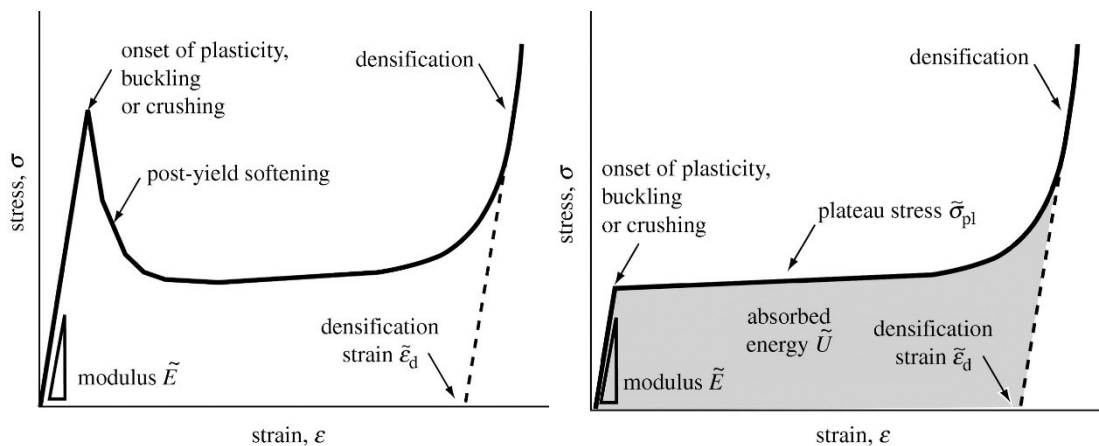


Figura 2 Da sinistra, Bending dominated structures e Stretch-dominated structures [2]

Le caratteristiche di questi solidi li rendono interessanti nell'ambito del packaging e della protezione.

Alla base di questi settori, vi è la capacità del materiale di convertire l'energia cinetica in energia di altro tipo (solitamente energia termica) evitando così di danneggiare l'oggetto da proteggere a seguito di un urto. [1]

Mettendo a confronto la capacità di assorbimento energetico di un solido pieno e una schiuma è possibile notare come la seconda consenta di ottenere dei picchi di forza inferiori rispetto a quelli che si otterrebbero utilizzando un solido "pieno".

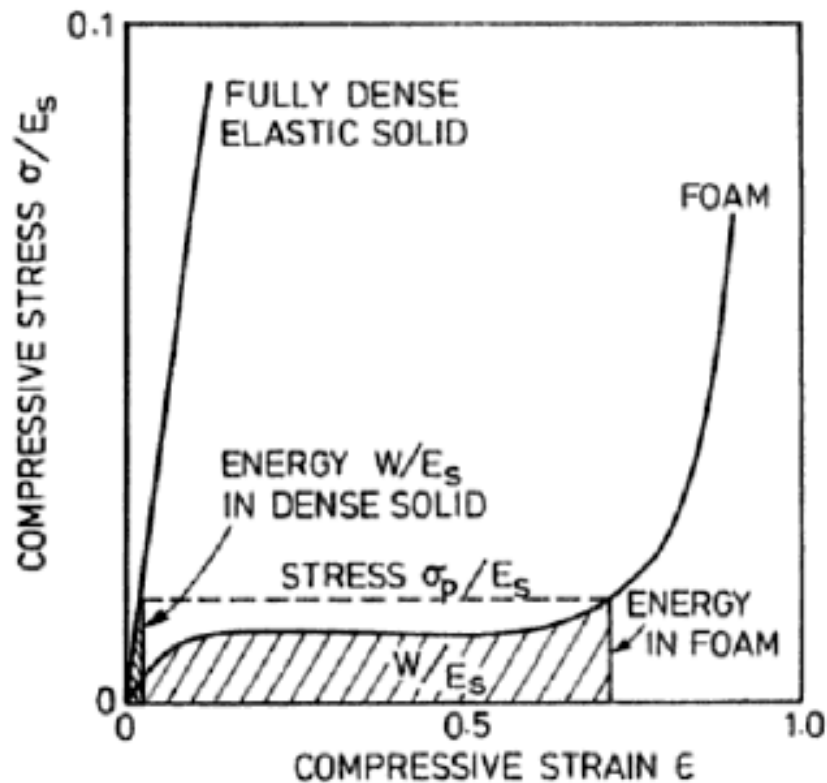


Figura 3 Confronto tra tensione generata da un solido pieno ed una schiuma [1]

Il comportamento del materiale è differente perché l'energia nel caso delle schiume viene assorbita mediante la deformazione plastica, instabilità o fratture delle pareti delle celle.

È proprio grazie al plateau che nasce, una volta superata la tensione di snervamento, che i solidi cellulari sono in grado di limitare il picco di carico. [1]

Osservando una curva σ - ϵ , è possibile valutare l'energia assorbita dal materiale andando a calcolare l'area sottesa alla curva.

La curva che descrive il comportamento a compressione di un solido cellulare può essere suddivisa in tre differenti zone [4]:

1. Regime elastico
2. Regime del plateau
3. Regime di densificazione

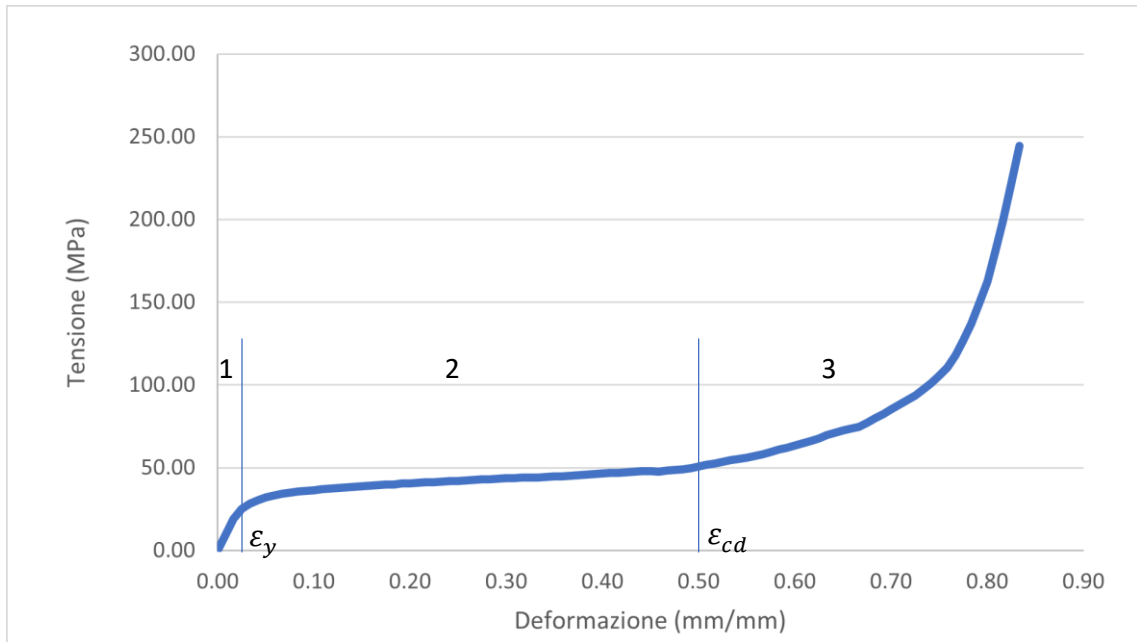


Figura 4 Suddivisione curva σ - ϵ di un solido cellulare

Delle tre fasi, quella più importante in termini di assorbimento energetico è rappresentata proprio dalla fase di plateau, che inizia una volta superata la ϵ_y (deformazione di snervamento) e termina con il raggiungimento di ϵ_{cd} (deformazione critica di densificazione). La fase di densificazione non è più interessante dal punto di vista dell'assorbimento energetico perché il solido cellulare inizia a comportarsi come un solido pieno a causa del contatto reciproco tra le pareti delle celle.

È quindi di fondamentale importanza capire quale sia il valore di deformazione corrispondente all'inizio della fase di solidificazione.

Secondo [4], esistono due metodi utili per individuare ϵ_{cd} ,

$$\epsilon_d = 1 - \alpha \frac{\rho_0}{\rho_s}$$

Equazione 1 Funzione lineare per il calcolo della deformazione di densificazione

Dove α varia tra 1.4 e 2, mentre ρ_0 indica la densità del solido cellulare mentre ρ_s rappresenta la densità della fase solida.

Se si assume che il coefficiente di Poisson in corrispondenza del regime di plateau sia pari a 0, è possibile riscrivere l'Equazione 1 nel seguente modo:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - \frac{\rho_0/\rho_s}{\rho/\rho_s}$$

Equazione 2 Funzione per il calcolo della deformazione di densificazione

Dove ε e ρ rappresentano la deformazione e la densità dell'oggetto compresso istante per istante. [4]

Il rapporto ρ/ρ_s assume un valore pari a 0.3 nel caso di schiume elastomeriche mentre assume il valore di 0.5 nel caso di schiume plastiche.

Un altro metodo prevede di calcolare ε_{cd} sfruttando la seguente relazione:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_d \cdot \left(1 - \frac{1}{D}\right)$$

Equazione 3 Funzione alternativa per il calcolo della deformazione di densificazione

Dove D , è una costante che assume valori predefiniti in base alla tipologia della schiuma, per fare un esempio $D=1$ nel caso delle schiume di polietilene e $D=1.55$ per le schiume di poliuretano.

Capire in quale istante o, meglio, conoscere la deformazione che genera l'esordio della densificazione è di fondamentale importanza quando si vuole parlare di assorbimento energetico. Prima di descrivere correttamente il metodo utilizzato per calcolare il valore ottimale di energia assorbita di un solido cellulare viene mostrato come calcolare l'energia assorbita da un solido quando viene deformato.

$$W = E_{assorbita} = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Equazione 4 Energia assorbita dal materiale per unità di volume

Tramite l'Equazione 4 è possibile calcolare l'energia assorbita per unità di volume che, graficamente parlando, corrisponde al calcolo dell'area sottesa alla curva σ - ϵ come mostrato nella Figura 5.

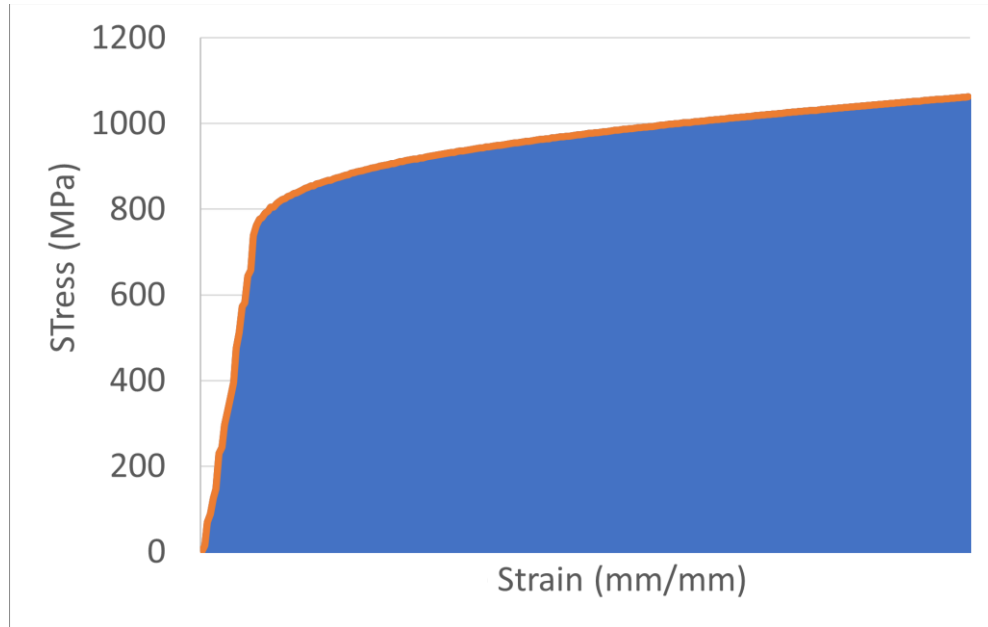


Figura 5 Diagramma σ - ϵ con evidenziata l'area sottesa alla curva

Queste tecniche di valutazione della deformazione critica di densificazione sono relazioni empiriche valide per le schiume aventi un comportamento piuttosto semplice descritto come in Figura 3.

Quando il comportamento del materiale si complica, risulta necessario scegliere un criterio più tecnico e specifico.

Il metodo utilizzato per poter valutare l'energia assorbita dai solidi cellulari analizzati è noto come metodo della massima efficienza. Questo metodo prevede innanzitutto di calcolare l'energia sfruttando l'Equazione 4 per poi dividere il risultato ottenuto per il valore di tensione misurato ad ogni istante di deformazione tramite l'Equazione 5.

$$\eta(\epsilon) = \frac{1}{\sigma(\epsilon)} \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

Equazione 5 Efficienza relativa all'assorbimento energetico

Si parla di metodo della massima efficienza, per cui una volta determinato il valore di essa si cerca di individuarne il massimo come nell'Equazione 6

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_{cd}} = 0$$

Equazione 6 Calcolo della massima efficienza

Il valore di ε corrispondente al massimo dell'efficienza relativa all'assorbimento energetico definisce il punto in cui inizia la fase di densificazione del solido cellulare.

Tutte queste relazioni vengono ora introdotte per essere utilizzate successivamente.

Una volta individuato il valore di deformazione critica di densificazione, è possibile ricalcolare l'energia effettivamente assorbita da questo tipo di solidi per mezzo della seguente equazione.

$$W = E_{assorbita} = \int_0^{\varepsilon_{cd}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Equazione 7 Energia assorbita dal solido cellulare

Una volta individuato questo valore di energia, è possibile calcolare il SEA (Specific Energy Absorbition), cioè l'energia specifica assorbita dal materiale.

$$SEA = \frac{W}{\rho_0} = \frac{W}{\bar{\rho} \cdot \rho_s}$$

Equazione 8 SEA (Specific Energy Absorbition)

Dove

- ρ_0 – Densità solido cellulare
- $\bar{\rho}$ – Densità solido relativa (Pari a circa il 10%)
- ρ_s – Densità del materiale (Densità dell'acciaio pari a 7850 kg/m³)

La valutazione del SEA consente di determinare quale provino sarà in grado di assorbire più energia a seguito della compressione.

1.2 Barra di Hopkinson

Le analisi utili a definire il comportamento dinamico del materiale vengono svolte utilizzando un particolare apparato noto come barra di Hopkinson (più recentemente si parla anche di barra di Kolsky). Queste prove consentono di ottenere le curve σ - ϵ del materiale studiato a differenti strain rate (velocità di deformazione $\dot{\epsilon}$) compresi all'interno di un range tra 10^2 - 10^4 s^{-1} [5] [6].

Il primo a adottare questi dispositivi fu Bertram Hopkinson il quale, intorno al 1914 decise di osservare e misurare l'intensità delle onde di pressione nate a seguito di un impatto o un evento esplosivo. [6]



Figura 6 Foto di Bertram Hopkinson

In particolare, ad Hopkinson interessò comprendere il modo con cui le onde di stress erano in grado di propagarsi all'interno di un mezzo solido, per tale ragione decise di adottare una lunga barra d'acciaio per eseguire queste valutazioni. Inizialmente, la barra di Hopkinson era costituita da una singola e lunga barra d'acciaio sospesa da alcuni fili dove un'estremità veniva sottoposta ad un impatto mentre in corrispondenza dell'altro estremo, un provino veniva collegato essa mediante del grasso.

A seguito dell'impatto, all'interno della barra nascono delle onde, in particolare si tratta di un'onda piana di compressione che attraversa l'intero corpo solido, superando lo strato di grasso e raggiungendo il provino.

Nel momento in cui l'onda di compressione raggiunge il provino, questa in parte viene trasmessa e in parte riflessa deformando il campione.

Hopkinson, svolgendo delle prove sperimentali su provini di lunghezza differente, ma con la stessa intensità, riuscì a tracciare delle curve sigma-tempo utili a descrivere l'impatto. Hopkinson osservò che la resistenza dinamica del materiale era doppia rispetto a quella misurata a bassi livelli di strain rate. I risultati ottenuti da Hopkinson, pur non disponendo di strumenti di misura avanzati, risultarono essere piuttosto precisi e importanti. [5]

Solo successivamente, nel 1949, Herbert Kolsky migliorò l'idea iniziale di Hopkinson ponendo in serie due barre: per tale motivo oggi, il dispositivo prende il nome di Split Hopkinson bar (Kolsky bar).



Figura 7 Foto di Herbert Kolsky

Kolsky, grazie a questa modifica del dispositivo e ad una tecnologia più evoluta, riuscì a calcolare la tensione, la deformazione e la velocità di deformazione all'interno del provino misurando le deformazioni in entrambe le barre mediante dei condensatori.

La misura delle deformazioni, oggi, viene eseguita mediante degli estensimetri (già introdotti da Krafft nel 1954) collegati all'input e all'output bar.

Nel corso dei decenni successivi, la barra di Hopkinson ha subito ulteriori miglioramenti consentendo di utilizzare tale dispositivo anche per prove ad alta temperatura, prove di torsione e di trazione, non solo per prove di compressione. Esistono differenti versioni del dispositivo, quella più nota è la Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) in cui sono presenti ben tre barre: pre-stressed, input bar e output bar.

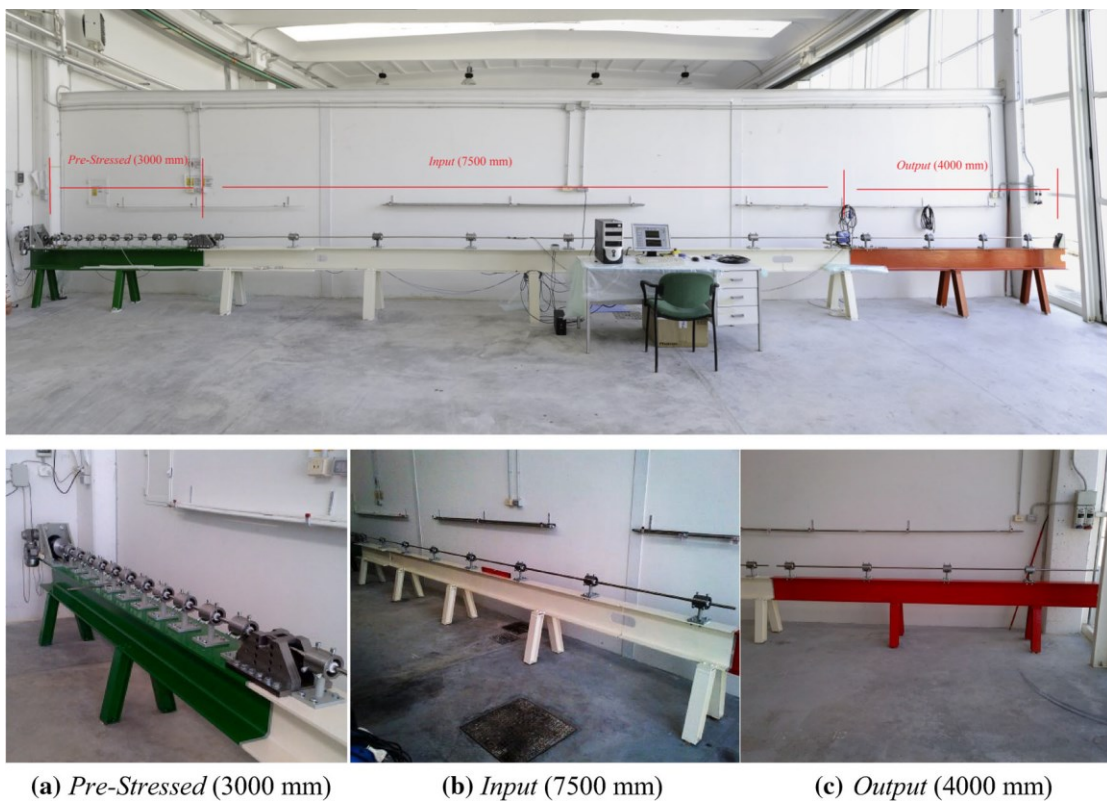


Figura 8 Barra SHTCB presente nel laboratorio dell'UNIVPM [7]

La barra di Hopkinson presente nei laboratori dell'UNIVPM, luogo in cui si sono svolte le prove sperimentali, viene chiamata SHTCB, ossia “Split Hopkinson Tension Compression Bar” [7] in quanto tale strumento può essere utilizzato sia per prove di compressione che per prove di trazione.

L'utilizzo di un martinetto consente di caricare la pre-stressed bar sia in trazione che in compressione, così da poter utilizzare lo stesso apparato sia per prove di trazione che per prove di compressione, senza effettuare particolari modifiche al sistema.

Nella versione con striker bar, per poter passare dall'esecuzione di una prova all'altra, sarebbe necessario modificare la posizione del lanciatore.

Prima di descrivere le ipotesi che stanno alla base del successo di queste prove, vengono descritte le principali componenti utili a realizzare i vari test (anello sacrificale, estensimetri e telecamera). L'anello sacrificale è un componente fondamentale della prova, in quanto cedendo a seguito di un certo carico imposto, la barra pretensionata andrà ad impattare con l'input bar generando l'onda incidente $\varepsilon_1(t)$. Lo spessore dell'anello sacrificale utilizzato è di 0,7 mm. Gli estensimetri sono strumenti di misura utili, nel caso della barra di Hopkinson, ad intercettare e misurare la deformazione che si manifesta all'interno della barra di input e di output.

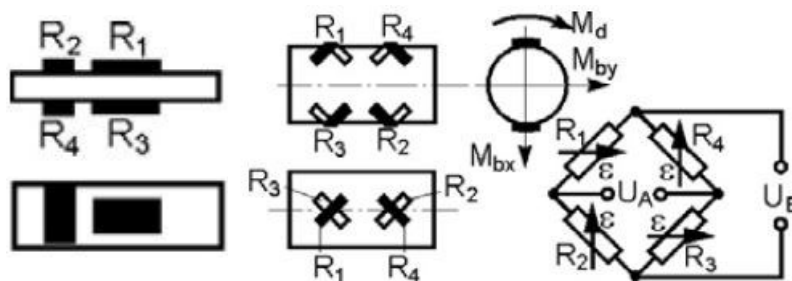


Figura 9 Collegamento estensimetri assiali e torsionali

Il segnale elettrico misurato da questi dispositivi viene convertito, come è possibile osservare successivamente, mediante opportune relazioni e fattori di conversione.

Questi estensimetri sono incollati sia sulla barra di input che sulla barra di output nel seguente modo: una prima rosetta di estensimetri assiali è incollata a metà della barra di input così da intercettare correttamente l'onda, una seconda rosetta di estensimetri (torsionali questa volta) sono incollati in prossimità dell'estremità dell'input bar. Gli

estensimetri montati sull'output bar, sono tutti posizionati in prossimità dell'estremità su cui è collegato il provino da testare.

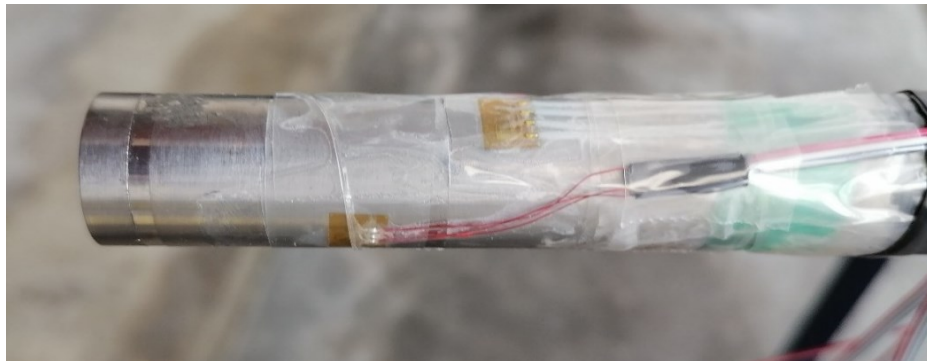


Figura 10 Estensimetri incollati sulla barra di output

Le telecamere ad alta velocità svolgono l'importante funzione di riprendere quanto accade durante l'impatto, la cui durata è di qualche millisecondo. Tramite queste telecamere, è possibile visualizzare attraverso immagini dettagliate quanto avviene in quel piccolo istante di tempo che caratterizza il fenomeno. La telecamera utilizzata ha ripreso l'impatto tramite 120mila frame per secondo, cioè in un secondo di acquisizione questa telecamera è in grado di generare 120mila immagini.



Figura 11 Fotocamera ad alta velocità

Tutto quello che viene percepito dagli estensimetri necessita di una serie di ipotesi di partenza di fondamentale importanza in quanto il mancato rispetto di esse potrebbe

rendere non validi i risultati ottenuti. Le differenti assunzioni alla base di queste prove sono descritte all'interno della letteratura scientifica [5] [6] e vengono qui riportate mediante un elenco puntato.

1. La propagazione delle onde nelle barre può essere descritta mediante la teoria di propagazione delle onde elastiche monodimensionali;
2. L'inerzia del provino è trascurabile e il provino si trova in equilibrio dinamico;
3. I campi di tensione e di deformazione all'interno del provino sono uniformi;
4. Gli effetti legati all'attrito nel test di compressione sono trascurabili;
5. L'incremento di temperatura non è trascurabile in questo tipo di test perché la rapidità delle deformazioni rende la distanza di diffusione termica comparabile con la dimensione del provino. Quando $\dot{\epsilon}$ è elevato, il processo lo si può considerare adiabatico e l'elevato lavoro di deformazione plastica compiuto viene trasformato in calore con un istantaneo incremento di temperatura. Nelle prove quasi statiche, il campione dissipa calore;
6. Lo strain rate $\dot{\epsilon}$ non è costante durante il test e non è distribuito in modo uniforme.

La pre-stressed bar viene posta in tensione mediante l'azione di un martinetto che tenderà a tirare la barra sino a quando non avviene la rottura di un anello sacrificale. In pratica si impone una certa tensione alla barra e nel momento in cui l'anello sacrificale si rompe, per effetto elastico del materiale questa tensione viene trasmessa all'interno della barra sottoforma di onda. L'onda di compressione si propagherà all'interno della barra a raggiungere il provino. Nel momento in cui l'onda raggiunge l'interfaccia con il provino, parte di questa verrà riflessa sull'input bar sottoforma di onda di trazione mentre parte di essa verrà trasmessa all'output bar.

Capitolo secondo

TWISTING GYROID

2.1 Progettazione

I modelli dei provini sono stati realizzati tramite il software Ntopology all'interno del quale è possibile realizzare oggetti dalle geometrie molto complesse. Sono stati realizzati due provini, uno ruotato rispetto all'asse verticale (provino twistato) e uno invece non è stato fatto ruotare.

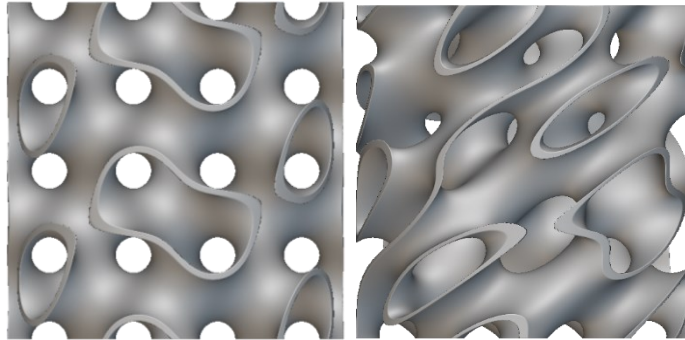


Figura 12 A sinistra il provino NON twistato mentre a destra il provino twistato

I provini misurano un'altezza pari a 12mm e un raggio pari a 6mm.

Per poter semplificare le operazioni di contatto sono stati aggiunti degli elementi cilindrici sopra e sotto ai provini. Lo spessore di questi elementi è pari a 2 mm per ciascun lato.

Questi provini sono stati disegnati (e realizzati) considerando una densità del materiale pari al 10%, cioè prendendo come riferimento un cilindro pieno è come se il 90% di questo fosse costituito da aria. Questa caratteristica è molto importante in quanto si vuole essere sicuri di poter schiacciare completamente questi provini durante le prove.

La configurazione utilizzata per poter realizzare questi campioni è detta 2x2x2, cioè, prendendo come riferimento un cubo è come se in ogni sua faccia ci fossero ben due celle.

2.2 Produzione

La realizzazione dei provini è avvenuta mediante l'utilizzo di tecniche di stampa 3D le quali offrono l'opportunità di realizzare forme geometriche molto complesse con un accurato controllo della periodicità delle celle che caratterizzano questa tipologia di materiali [8]. La tecnica di stampa 3D nota come SLS (Selective Laser Sintering) è impiegata ad esempio nella fabbricazione di manufatti in ceramica, metallo o materiali compositi. In pratica questa tecnologia sfrutta un laser per fondere le particelle di polvere tra di loro così da realizzare un primo strato di materiale fuso. Il processo si ripete strato in strato fino a quando non si è ottenuta la geometria desiderata. Questa tecnica consente di ottenere manufatti dalle geometrie anche molto complesse, tuttavia, fondendo particelle di materiale potrebbero nascere fenomeni di porosità che a loro volta potrebbero dar vita a fenomeni inaspettati nel comportamento meccanico dell'oggetto prodotto.



Figura 13 Provini stampati

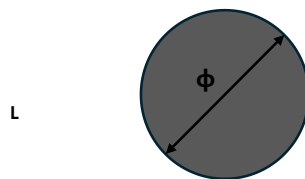
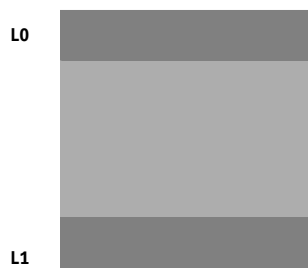
Una volta che i provini sono stati stampati, questi sono stati pesati con l'intento di verificare se la densità relativa fosse pari al 10% desiderato.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_0}{\rho_s}$$

Equazione 9 Densità relativa

Dove ρ_0 è la densità del solido cellulare, ρ_s è la densità del materiale mentre $\bar{\rho}$ è la densità relativa.

Prendendo come riferimento i dati relativi al test due (Gy) e contenuti in Tabella 1, si è cercato di calcolare la massa della sezione giroidale del provino, così da poterne calcolare poi la densità conoscendo quella del materiale di partenza, che si ricorda essere un acciaio ($\rho=7850 \text{ kg/m}^3$).



Dati	Gy	
ϕ	11.9	mm
L_0	4.6	mm
L_1	4.7	mm
L	21	mm
m	9.06	g

Tabella 1 Dati Gy

Il calcolo della densità relativa è partito considerando il cilindro come se fosse un solido pieno, ottenendo i seguenti risultati.

Dati	Gy	
A	111.22	mm^2
V_0	511.61	mm^3
V_1	522.74	mm^3
V	2335.63	mm^3
V_c	1301.28	mm^3

Tabella 2 Area e Volumi

Dove chiaramente con A si intende l'area della faccia circolare calcolata come $A=\pi \cdot r^2$ mentre i vari pedici legati ai volumi (V) si riferiscono alle sezioni cilindriche di altezza L0 e L1, mentre Vc indica il volume della parte centrale, infine, con V si intende il volume totale del provino considerando esso come un cilindro pieno ed è calcolato come $V=A \cdot L$.

Conoscendo la densità del materiale e il volume delle singole sezioni che compongono il cilindro è possibile calcolare la loro massa con il seguente e semplice calcolo $m=\rho \cdot V$.

Dati	Gy	
m_0	4.01	g
m_1	4.09	g
m	9.06	g
m_c	10.19	g
m_g	0.96	g

Tabella 3 Massa del provino

Come per il volume, con 0 e 1 si indica la massa delle due sezioni cilindriche, con m si indica la massa misurata dell'intero provino mentre con mc si indica la massa della sezione centrale del provino considerandola come un cilindro pieno. Con m_g invece si indica la massa della sezione giroidale calcolata come $m_g = m - m_0 - m_1$.

Nota la massa della sezione centrale giroidale del provino e noto il volume della sezione centrale è possibile calcolare la densità ρ_0 del giroide. Nella seguente tabella, sono illustrate la densità del materiale espresse in g/mm^3 .

Densità		
ρ_0	0.000735	g/mm^3
ρ_s	0.0785	g/mm^3

Tabella 4 Densità

Quindi, utilizzando l'Equazione 9 è possibile calcolare la densità relativa del materiale che sarà pari al $\bar{\rho}=10,68\%$.

Per quanto riguarda il provino del test 2 (Gy), si può affermare che la densità relativa di esso è concorde con le ipotesi iniziali, mentre la densità del provino utilizzato nel terzo test risulta essere leggermente più bassa (circa 8%). Tale valore probabilmente è associabile al processo di realizzazione del provino, che si ribadisce essere stato realizzato mediante stampa 3D. La bassa densità del provino garantisce leggerezza al manufatto.

2.3 Caratterizzazione del materiale

Il materiale che costituisce i provini analizzati nel corso di questo lavoro è una lega metallica chiamata Fe7131 molto utilizzata nell'ambito della stampa 3D.

Alla base del lavoro che verrà sviluppato in questo capitolo ci sono i dati sperimentali forniti dal professore Mancini, il quale si è occupato di stampare i provini metallici.

I dati sperimentali vengono qui raccolti all'interno di un diagramma σ - ϵ , in cui è possibile osservare come, lo strain rate sia in grado di modificare il comportamento del materiale.

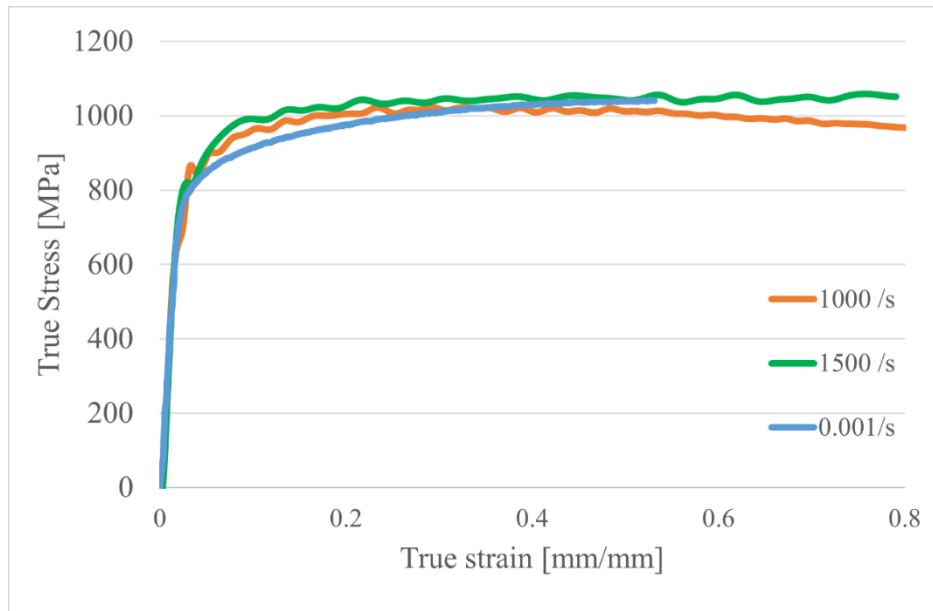


Figura 14 Curve sperimentali a diversi strain rate

La prova svolta con uno strain rate pari a 0.001/s è detta quasi statica, vista la bassa velocità di deformazione con cui questa viene eseguita (Figura 14, curva azzurra).

Le altre due curve descrivono il comportamento del materiale quando le prove vengono svolte con delle velocità di deformazione elevate (Figura 14, curva verde e arancione).

Da queste curve sperimentali si sono ricavati i vari parametri utili a ricostruire numericamente il comportamento del materiale.

Questo processo è di fondamentale importanza, in quanto per poter simulare i provini all'interno dei software FEM, bisogna dare in pasto a questi tutte le informazioni necessarie a descrivere correttamente il comportamento del materiale nella maniera più realistica possibile.

Per prima cosa, le curve riportate nella Figura 14, non comprendono valori di deformazione e tensione negativi: questi valori sono stati esclusi per il semplice motivo che all'inizio della prova, per via di alcune imprecisioni geometriche, la forza agente sulle facce in compressione del provino non è uniforme. È come se la pressa agisse su una superficie non piana ma obliqua, restituendo risultati non interessanti dal punto di vista meccanico.

Alla base della ricerca dei valori utili a descrivere il comportamento del materiale, vi è il modello di Johnson and Cook rappresentato mediante la seguente relazione.

$$\sigma = \left(A + B \cdot \varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - T^{*m} \right)$$

Equazione 10 Modello plastico di Johnson-Cook

Questa prima parte del lavoro, si è concentrata proprio sull'andare a valutare i seguenti parametri:

- A – Tensione di snervamento (σ_s) [MPa]
- B – Modulo di incrudimento [MPa]
- n – Indice di incrudimento
- C – Coefficiente di strain rate
- m – Coefficiente termico
- $\dot{\varepsilon}$ – Velocità di deformazione (Strain Rate) [s^{-1}]
- $\dot{\varepsilon}_0$ – Velocità di deformazione di riferimento (definita dall'utente) [s^{-1}]

- T^* Temperatura omologa [K]

I primi tre coefficienti vengono valutati partendo dai dati sperimentali della prova quasi statica, mentre i rimanenti verranno valutati considerando i dati delle prove dinamiche.

La temperatura omologa T^* viene definita mediante la seguente relazione

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

Equazione 11 Temperatura omologa

Qui di seguito, vengono definiti i vari termini presenti nell'equazione 13, quindi:

- T – Temperatura assoluta [K]
- T_{room} – Temperatura ambiente [K]
- T_{melt} – Temperatura di fusione del materiale [K]

La temperatura assoluta T rappresenta la temperatura che il materiale raggiunge durante il processo di deformazione plastica; infatti, il lavoro plastico compiuto per deformare il materiale viene convertito in calore causandone l'incremento della temperatura.

$$T = T_0 + \frac{PLWK}{\rho C_p} = T_0 + \frac{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon}{\rho C_p}$$

Equazione 12 Temperatura assoluta

Dove

- T_0 – Temperatura iniziale
- $PLWK$ – Plastic Work, rappresenta il lavoro plastico compiuto per unità di volume $[(J \cdot 10^6)/m^3]$
- ρ – Densità $[kg/m^3]$
- C_p – Calore specifico $[J/(kg \cdot K)]$

L'ottenimento dei dati per mezzo di tecniche numeriche è partito dalle curve utilizzate per descrivere il comportamento quasi statico del materiale.

Il modulo di Young (E) del materiale che è stato fornito è pari a 195GPa, valore molto prossimo a quello che si ritrova negli acciai.

Come accennato poco fa, l'obiettivo di questo capitolo è quello di individuare i valori delle costanti che descrivono il modello del materiale, ma trattandosi in questo caso di una curva rappresentante il comportamento quasi statico del materiale allora i valori di C e T possono essere considerati nulli. Tale considerazione è valida soltanto nel caso quasi statico, quindi l'equazione di Johnson-Cook può essere così riscritta.

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon_p^n)$$

Equazione 13 Johnson-Cook nel caso quasi statico

Per prima cosa, si è cercato di valutare quale fosse la tensione di snervamento del materiale e per farlo si è tenuto in considerazione la definizione stessa di σ_s : si parla di tensione di snervamento quando si considera quel valore di tensione in grado di restituire una deformazione plastica residua pari allo 0.2%.

Per poter valutare il primo coefficiente del modello di Johnson-Cook, si è quindi operato in maniera analoga alla ricerca del modulo di Young, imponendo il passaggio della retta per un valore di deformazione pari a 0.002. Tuttavia, come scritto poco fa, sono stati eliminati alcuni valori sperimentali nella valutazione del comportamento del materiale e nel calcolo della tensione di snervamento (quindi il parametro A ricercato), si è tenuto conto anche di questo andando a considerare come deformazione plastica residua un valore pari a 0.004. Tale risultato, lo si ottiene sommando i valori di deformazione che ad inizio prova restituivano valori di tensione negativa con il valore di deformazione plastica residua con cui si va a definire la tensione di snervamento.

Qui di seguito, un grafico mostra l'intersezione tra la curva sperimentale e la retta passante per il valore di deformazione plastica residua.

Il punto di intersezione tra la curva e la retta individua il valore di tensione di snervamento ricercato ed in questo caso σ_s si attesta, ad una prima valutazione, intorno ai 600MPa.

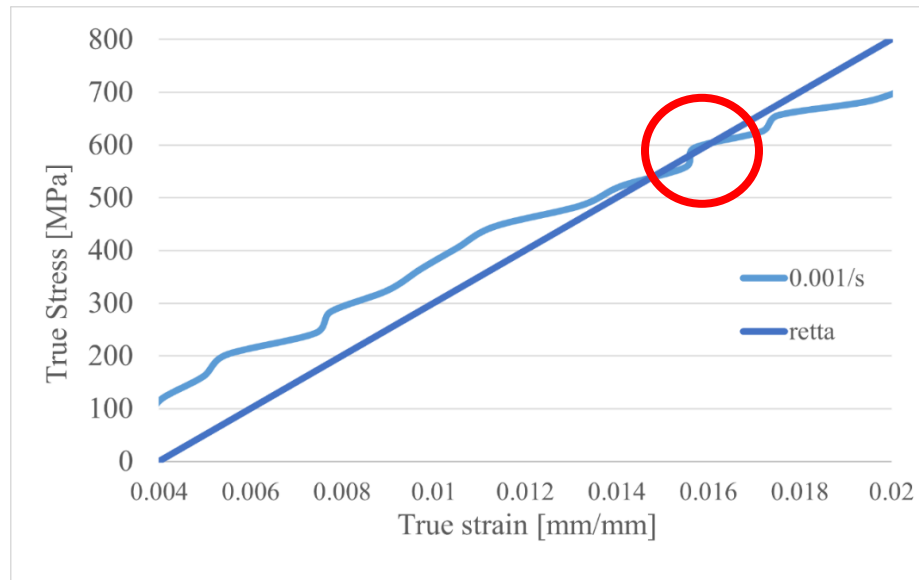


Figura 15 Valutazione grafica della tensione di snervamento

Una volta individuato il valore relativo alla tensione di snervamento (il parametro A), è stato necessario individuare una strategia utile a definire il parametro B ed n.

Si è inizialmente pensato di trasformare in forma logaritmica l'Equazione 13, per poi invertirla ed ottenere i parametri desiderati.

$$\sigma - \sigma_s = B \cdot \varepsilon_p^n \rightarrow \log(\sigma - \sigma_s) = \log(B \cdot \varepsilon_p^n) \rightarrow \log(\sigma - \sigma_s) = \log B + n \log \varepsilon_p$$

Equazione 14 Johnson-Cook quasi statico in forma logaritmica

Successivamente partendo dai dati sperimentali si è costruita la curva in forma logaritmica, avendo opportunamente calcolato il logaritmo della differenza tra la tensione puntuale e la tensione di snervamento e avendo calcolato il logaritmo della deformazione plastica.

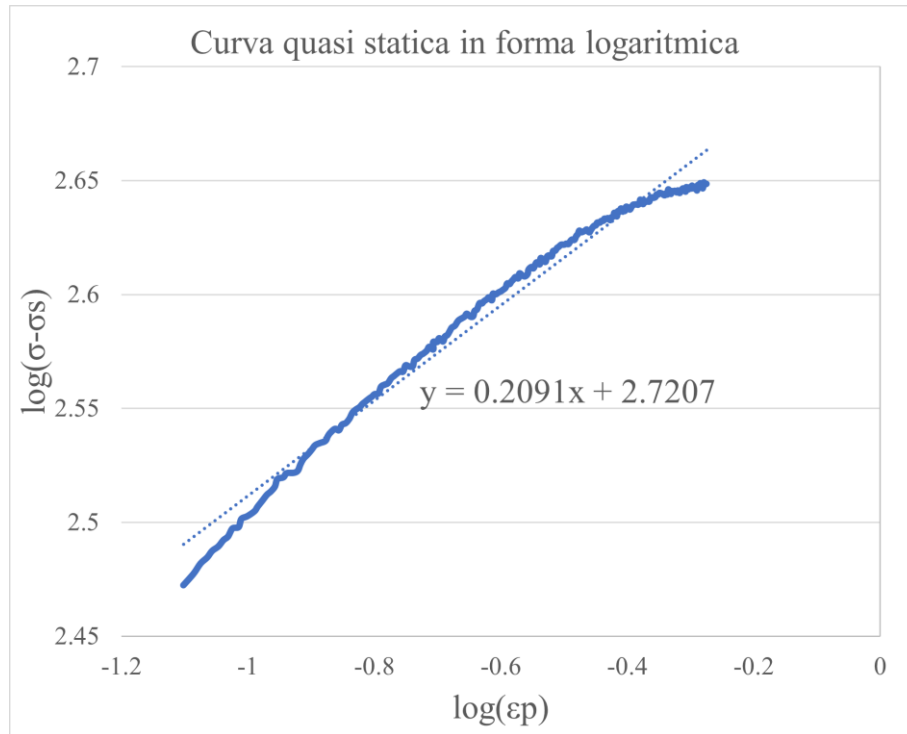


Figura 16 Tratto plastico della curva in forma logaritmica

Nella Figura 16, dopo aver rappresentato il tratto plastico della curva del materiale in forma logaritmica, è stata introdotta una linea di tendenza. Rappresentando sul grafico l'equazione di questa retta interpolante, è possibile individuare i valori di n e B , come mostrato nell'Equazione 14. Rappresentando la curva mediante l'Equazione 13, e ponendola a confronto con la curva sperimentale, è possibile osservare che le due curve quasi si sovrappongono, ad eccezione del tratto plastico iniziale.

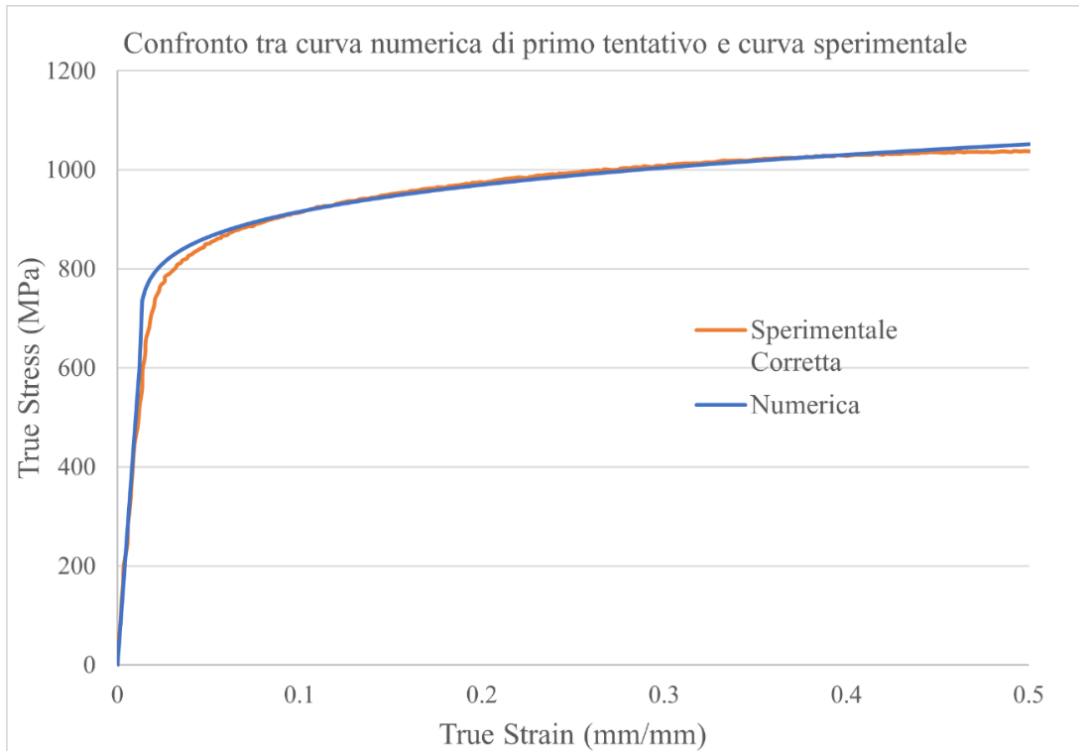


Figura 17 Curva sperimentale e numerica a confronto

I valori di primo tentativo ottenuti vengono riportati nella seguente tabella.

E	195000 MPa
σ_s	600 MPa
n	0.2092
B	525.654 MPa

Tabella 5 Valori di primo tentativo

L'obiettivo è quello di migliorare la sovrapposizione delle due curve, così da ottenere dei parametri più veritieri possibili. Per cercare di migliorare questi dati, si è sfruttato il risolutore di Excel.

Per poter sfruttare a dovere questa funzionalità del software appartenente al pacchetto office di windows, è stata calcolata la deviazione standard (S.D) tra la curva sperimentale e quella numerica.

$$S. D. = \sqrt{\frac{\sum_{\varepsilon} [\sigma_{num}(\varepsilon) - \sigma_{exp}(\varepsilon)]^2}{N}}$$

Equazione 15 Scarto quadratico medio

Vengono sottratti, a parità di ε , i valori di tensione della curva numerica e della curva sperimentale, il tutto viene elevato al quadrato e successivamente suddiviso per il numero di elementi presi in considerazione.

Tramite il risolutore è possibile minimizzare questa deviazione standard facendo variare σ_s , n e B elencati in Tabella 5. I risultati ottenuti mediante l'azione del risolutore sono elencati nella seguente tabella.

σ_s	591.318 MPa
n	0.221463
B	545.2197 MPa

Tabella 6 Valori ottenuti mediante risolutore

Mentre la curva numerica ottenuta a seguito dell'azione del risolutore assume la seguente forma.

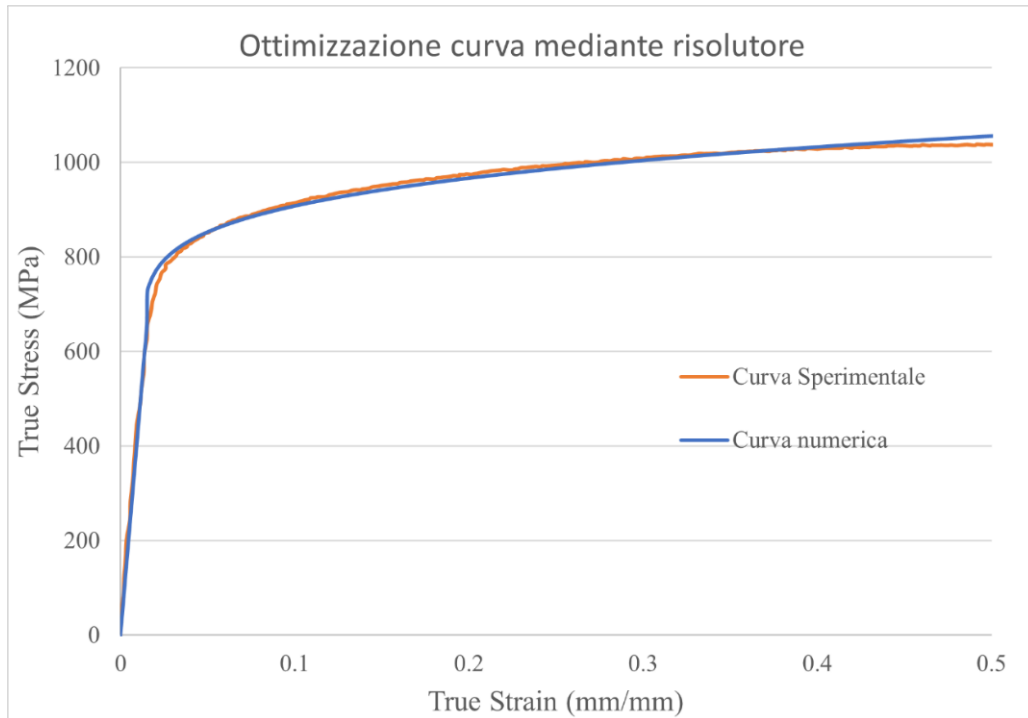


Figura 18 Ottimizzazione curve mediante risolutore

I valori ottenuti in Tabella 6, consentono di ottenere una curva che segue quasi alla perfezione quella sperimentale.

L'unica particolarità di questa curva numerica la si ritrova sempre in prossimità dell'inizio della fase plastica.

Andando ad osservare nel dettaglio questo particolare è possibile notare che, una volta raggiunta la tensione di snervamento la curva numerica non riesce a seguire alla perfezione quella sperimentale, creando una sorta di salto nella tensione valutata.

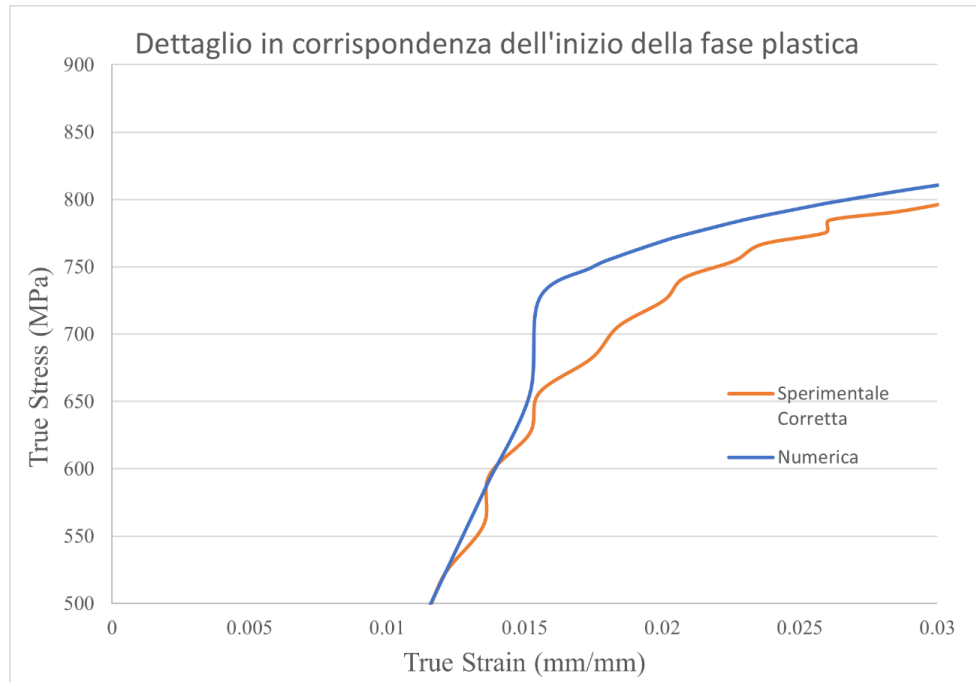


Figura 19 Dettaglio della curva quasi statica

Questo problema inizialmente ha suscitato alcuni dubbi legati al fatto che i parametri ottenuti non sarebbero stati interpretati correttamente dal software Abaqus; tuttavia, eseguendo delle prove si è visto che non vengono generati errori utilizzando dati ottenuti in questo modo.

Per cercare di ridurre questo salto, si è sfruttato il risolutore imponendo ad esso una condizione legata al modulo di Young del tratto di curva in prossimità dell'inizio del campo plastico. Si è imposto che il valore di E debba rimanere al di sotto di quello individuato, comportamento che una volta superato il tratto elastico della curva teoricamente si aspetta di ottenere ma che nel caso del salto questo non avviene.

Infatti, in presenza del salto vi è un'impennata del modulo di Young, questo però non deve presentarsi e per farlo si è deciso di aggiungere questo vincolo al risolutore.

Lo scarto quadratico medio calcolato tramite l'Equazione 15, viene minimizzato dal risolutore facendo variare σ_s, B ed n andando a vincolare la pendenza del tratto elastico della curva che dovrà essere inferiore al valore di E da calcolare.

Dopo alcune iterazioni, si sono ottenuti i seguenti valori riportati in tabella e la curva si è presentata come nel successivo grafico.

σ_s	658.30 MPa
n	0.261107
B	480.27 MPa

Tabella 7 Risultati ottenuti mediante risolutore e vincolo

I risultati ottenuti sono differenti da quelli presenti in Tabella 6, ma la differenza sta nella rappresentazione grafica.

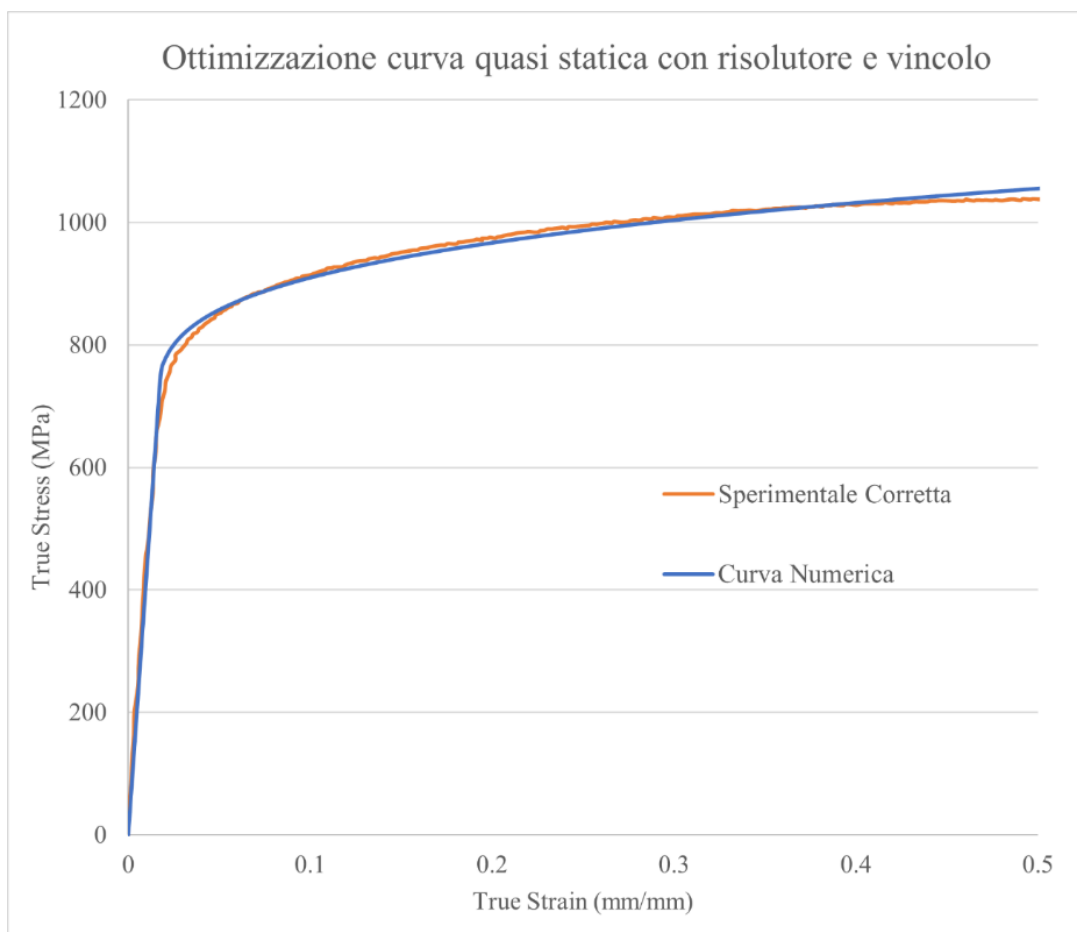


Figura 20 Curva quasi statica ottimizzata con risolutore e vincolo

Ad una prima occhiata la Figura 18 e la Figura 20 sembrano molto simili ma effettuando un ingrandimento in prossimità del tratto di inizio della fase plastica, la differenza risulta essere ben visibile.

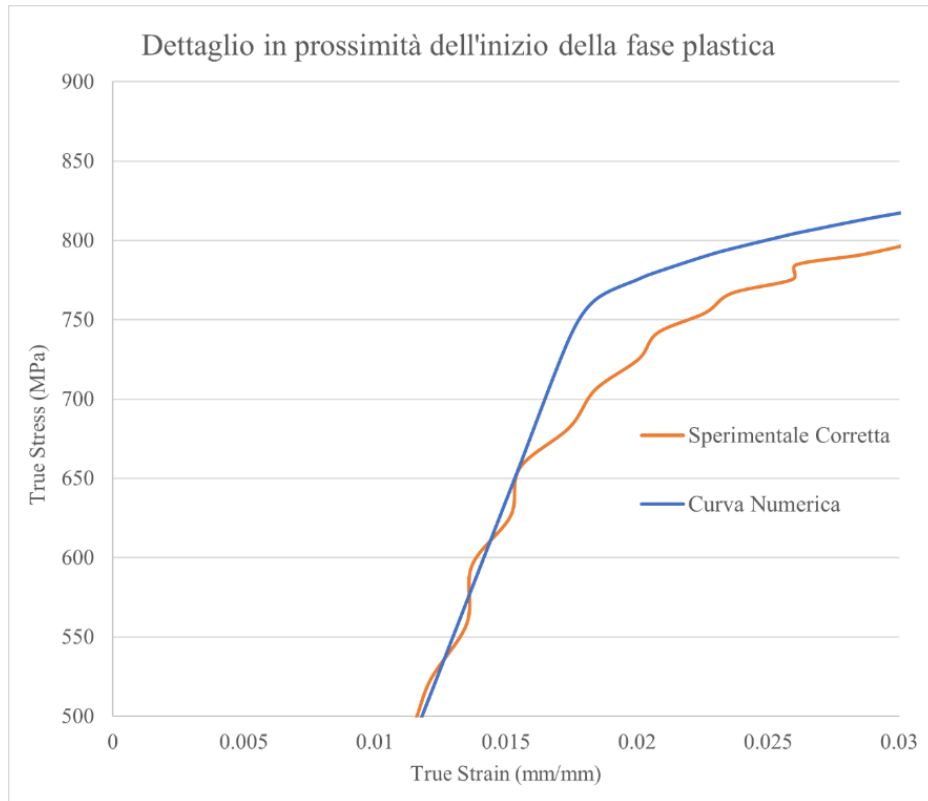


Figura 21 Ingrandimento della curva quasi statica ottimizzata con il risolutore e il vincolo

È immediato osservare come la curva numerica segua correttamente l'andamento del tratto elastico, abbassandosi dolcemente una volta raggiunto il campo plastico senza causare strane impennate di tensione.

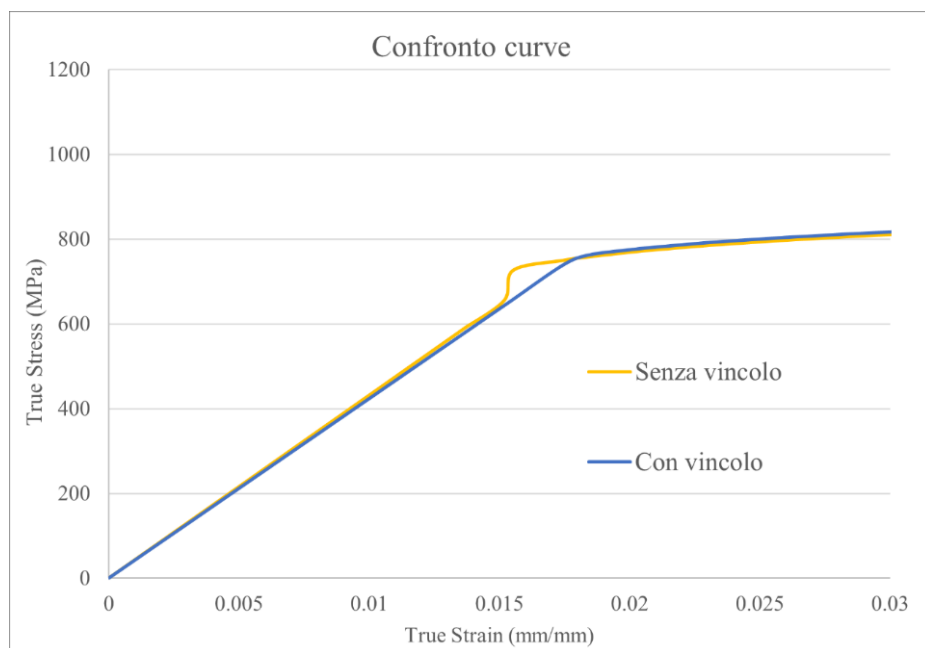


Figura 22 Confronto tra le curve in prossimità dell'inizio del tratto plastico

Per concludere questo paragrafo, nella Figura 22 sono poste a confronto le due curve numeriche ottenute mediante l'azione del risolutore. La curva gialla è stata ottenuta senza introdurre alcun vincolo sul modulo di Young mentre la curva blu è sottoposta al vincolo su E.

I risultati presentati finora si riferiscono solo ed esclusivamente al caso quasi statico.

Per poter studiare il comportamento dinamico del materiale, si è partiti dall'Equazione 10 nella sua interezza, considerando sia gli effetti legati allo strain rate che gli effetti legati alla temperatura. Dal punto di vista dinamico, i dati sperimentali di partenza facevano riferimento a strain rate pari a 1000/s e 1500/s.

I valori di partenza da cui parte questa fase dello studio del comportamento del materiale sono gli stessi riportati in Tabella 7. L'obiettivo di questa parte di studio è quello di ricercare i valori del parametro C ed m. La strategia utilizzata è stata quello di agire inizialmente sulle singole curve così da poter impostare correttamente le relazioni all'interno di Excel, per poi andare a ricercare una soluzione comune.

Per poter valutare correttamente i parametri di queste curve dinamiche, è stato necessario calcolare il PLWK, il ΔT e la temperatura omologa T^* .

Gli step che seguono risultano essere gli stessi per entrambe le curve studiate; l'unica differenza sta nello strain rate con cui sono stati ottenuti i dati sperimentali.

Nell'Equazione 12, si era definito il PLWK, ma dal punto di vista pratico non è stato specificato come questo è stato calcolato in questa sede.

Sapendo che il PLWK è definito come segue.

$$PLWK = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon$$

Equazione 16 Plastic Work done

L'integrale rappresenta l'area sottesa alla curva a partire da valori di deformazioni superiori a quello dello snervamento di cui si vuole effettuare questo calcolo.

Tale operazione, all'interno di Excel, la si può eseguire discretizzando la curva caratteristica del materiale in tanti piccoli trapezi.

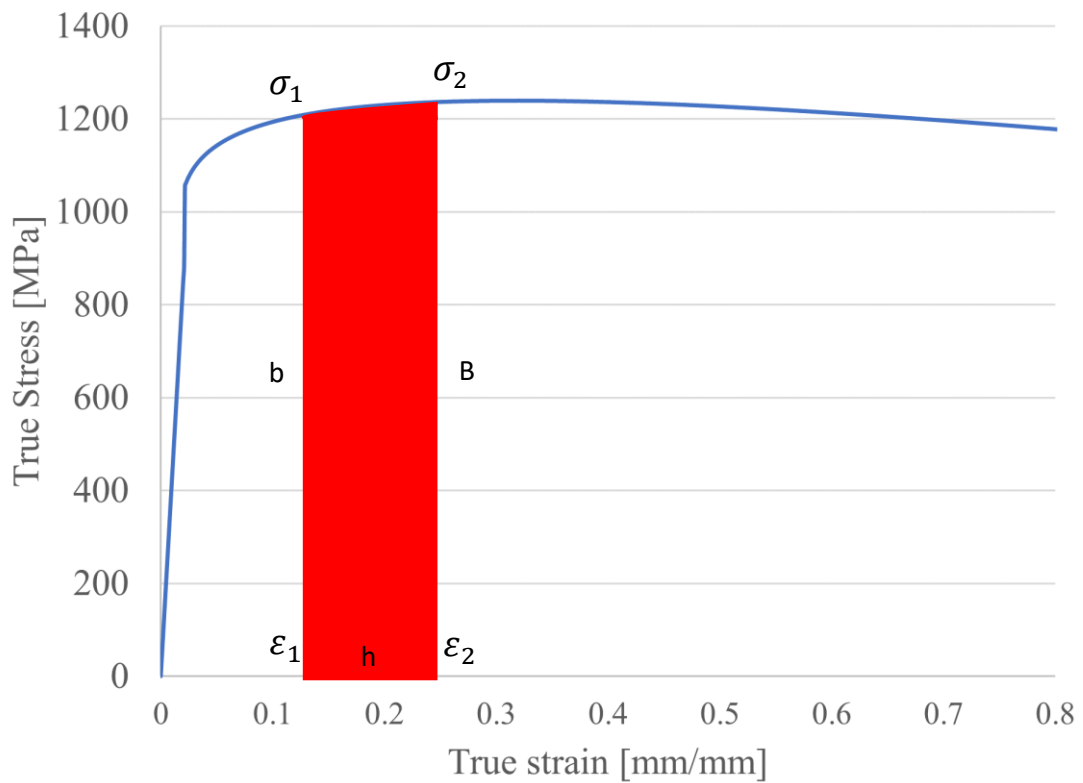


Figura 23 Esempio di calcolo del PLWK su Excel

La porzione di lavoro plastico compiuto in un intervallo di deformazione plastica è calcolabile come area del trapezio i cui dati vengono riportati nella seguente tabella.

b	σ_1
B	σ_2
h	$\varepsilon_2 - \varepsilon_1$

Tabella 8 Parametri trapezio

Si sta parlando di lavoro plastico svolto durante il processo di deformazione; tuttavia, si considerano due valori di deformazione totale visto che la componente elastica superato

lo snervamento risulta essere costante. Chiaramente, trattandosi di lavoro plastico, questo viene calcolato solo per valori di σ - ε post snervamento.

Il valore di PLWK è stato calcolato come segue per ogni punto.

$$PLWK_n = \frac{(B + b) \cdot h}{2} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2}$$

Equazione 17 Calcolo PLWK per ciascun intervallo di deformazione

Per il calcolo della temperatura assoluta e la temperatura omologa invece, si fa riferimento all'Equazione 11 e all'Equazione 12.

I dati relativi alle temperature vengono riportati nella seguente tabella e queste grandezze sono tutte riportate in Kelvin.

T_{room}	298 K
T_{melt}	1773 K

*Tabella 9 Dati per calcolo della temperatura omologa T^**

Fatte queste premesse, nei paragrafi successivi si osserverà il processo con cui si sono ottenute le curve numeriche dinamiche.

Partendo dai risultati ottenuti durante lo studio delle caratteristiche meccaniche quasi statiche del materiale, si è scelto di prendere la curva sperimentale calcolata con uno strain rate pari a 1000/s e di ricostruirla.

Si è partiti introducendo dei valori di prova del parametro C ed m, per poi andare ad ottimizzare la curva mediante il risolutore.

Tramite questa funzionalità di Excel, si è cercato di minimizzare lo scarto quadratico medio tra curva numerica e curva sperimentale facendo variare il parametro m e C.

Come è possibile osservare qui sotto, la curva numerica realizzata sfruttando dei valori di primo tentativo risulta essere molto diversa da quella sperimentale.

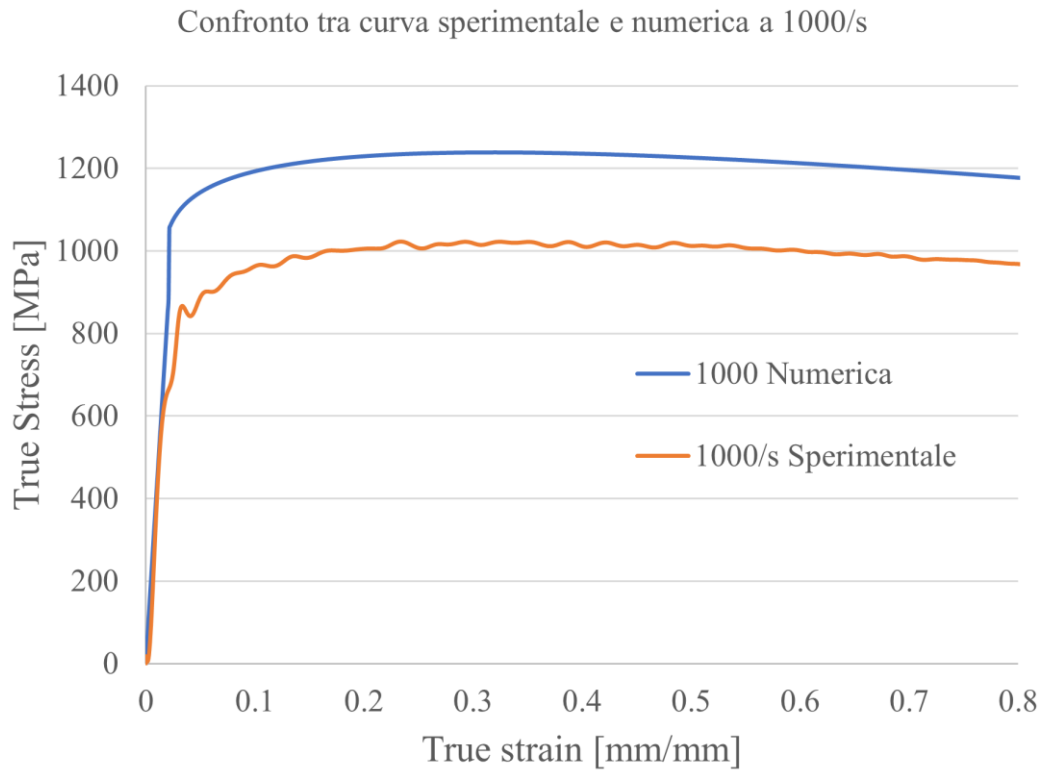


Figura 24 Confronto tra curva sperimentale e numerica a 1000/s di strain rate con valori di prova

Utilizzando il risolutore la curva si presenta in questo modo come mostrato nella Figura 25 mentre i parametri C ed m ottenuti, sono riportati nella seguente tabella.

C	0.009034
m	0.936138

Tabella 10 Parametri C ed m valutati per la curva con strain rate pari a 1000/s

Questi valori si riferiscono solo ed esclusivamente al caso legato ad uno strain rate pari a 1000/s, l'obiettivo è quello di ottenere dei valori di C ed m validi per ogni strain rate.

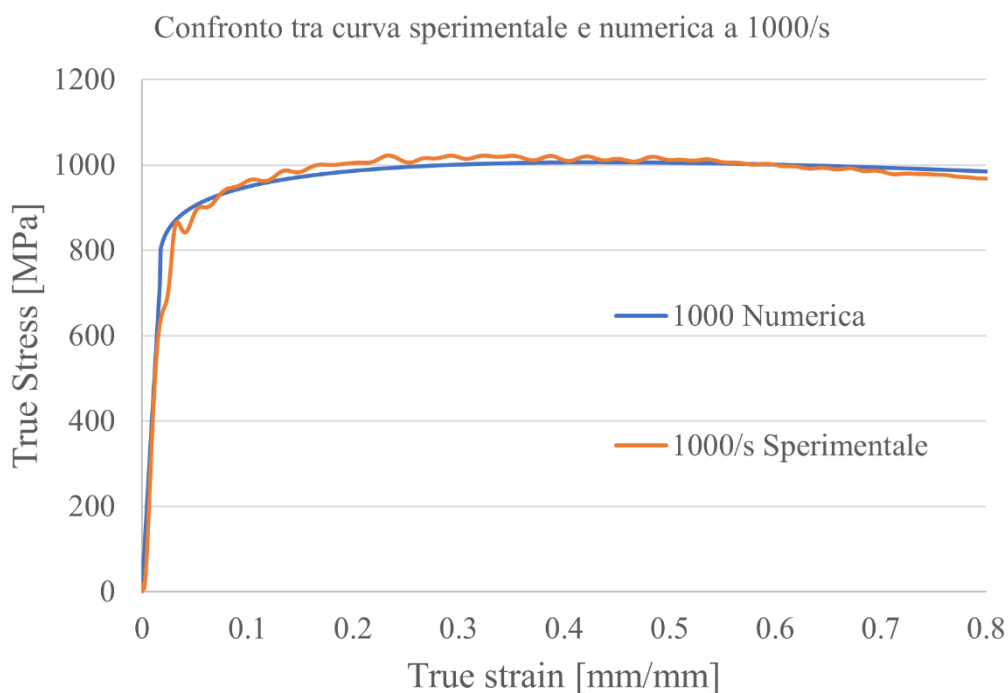


Figura 25 Confronto tra curva sperimentale e numerica a 1000/s di strain rate dopo l'azione del risolutore

Visto che per la curva realizzata considerando uno strain rate di 1500/s le operazioni eseguite risultano essere le stesse del caso a 1000/s, qui vengono riportati brevemente i risultati ottenuti.

I dati ottenuti mediante l'azione del risolutore per il caso relativo ad uno strain rate pari a 1500/s sono riportati in Tabella 11.

C	0.005011
m	1.121228

Tabella 11 Parametri C ed m valutati per la curva con strain rate pari a 1500/s

La rappresentazione grafica del caso relativo ad uno strain rate pari a 1500/s è stata omessa in quanto molto simile a quella ottenuta per la casistica precedente.

L'obiettivo legato alla caratterizzazione del materiale è quello di definire le caratteristiche meccaniche del materiale in maniera univoca.

Per ottenere una singola soluzione, la strategia utilizzata è analoga a quella utilizzata per le singole casistiche; tuttavia, in questo caso si è minimizzata una funzione obiettivo che rappresenta la media tra le deviazioni standard del caso quasi statico, il caso con uno strain rate pari a 1000/s e il caso con strain rate pari a 1500/s.

$$OBJ = \frac{\sum SD_n}{n} = \frac{SD_{qs} + SD_{1000/s} + SD_{1500/s}}{3}$$

Equazione 18 Funzione obiettivo da minimizzare mediante l'azione del risolutore

Per mezzo del risolutore, è stata minimizzata la funzione obiettivo facendo variare il parametro C, m e $\dot{\epsilon}_0$ con l'ultimo valore pari a 100.

I valori che caratterizzano meccanicamente il materiale, si ricorda essere un acciaio Fe7131, risultano essere i seguenti.

E	195000 MPa
σ_s	658.30 MPa
n	0.261107
B	480.27 MPa
C	0.029
m	0.994
$\dot{\epsilon}_0$	100

Tabella 12 Caratteristiche meccaniche dell'acciaio Fe7131

Nella pagina che segue, viene riportato un grafico riassuntivo in cui sono rappresentate le tre curve sperimentali di partenza e le tre curve numeriche ottenute mediante i ragionamenti illustrati nel corso del capitolo.

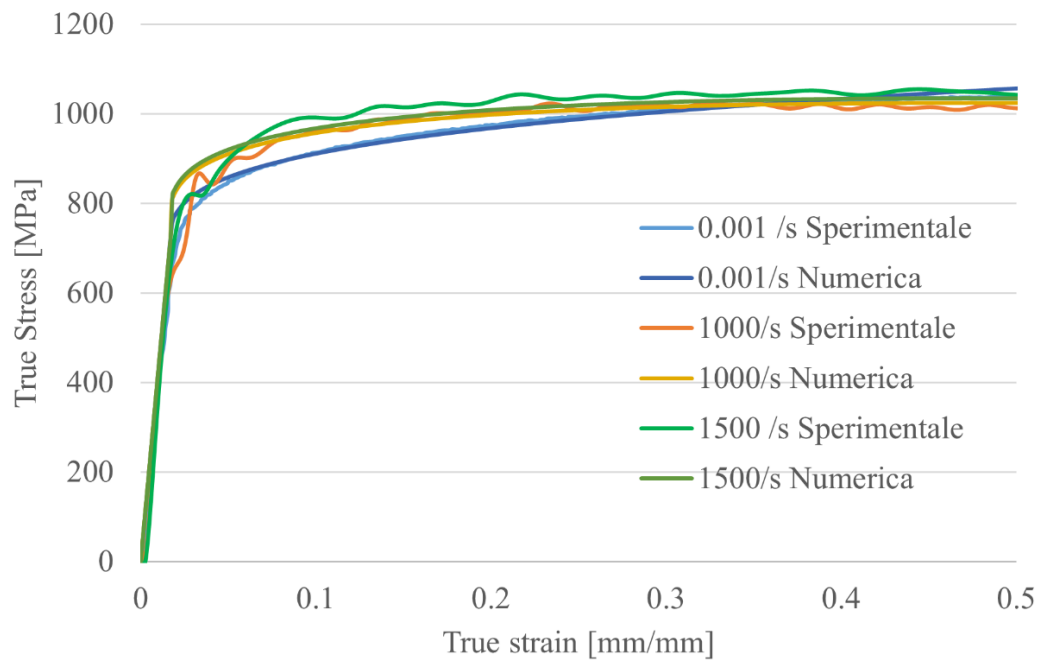


Figura 26 Grafico riassuntivo con confronto tra curve sperimentali e numeriche

Com'è possibile osservare nella Figura 26, le curve numeriche seguono piuttosto correttamente le curve sperimentali. È possibile notare come, all'aumentare dello strain rate, le curve risultano essere più alte rispetto a quelle con velocità di deformazione più bassa: questo è proprio un esempio che mostra la dipendenza del comportamento del materiale dalla velocità con cui lo si deforma.

Durante l'esecuzione di questa prova sono state acquisite delle immagini mediante delle opportune telecamere.



Figura 28 Telecamera utilizzata nella prova statica

Per quanto riguarda l'acquisizione delle immagini, è stato di fondamentale importanza illuminare correttamente la scena mediante l'azione di alcuni faretto inoltre è stato molto importante mettere bene a fuoco le telecamere.

Tramite il software di acquisizione, la messa a fuoco corretta delle telecamera ha consentito di eliminare eventuali zone troppo illuminate (sovraesposte) o troppo scure (sottoesposte).

Le immagini ottenute hanno consentito di osservare ciò che stava avvenendo nel corso della prova la cui durata è stata di circa 10-15 minuti per ogni provino testato.

Il provino non twistato è stato pitturato di bianco con alcuni dettagli neri così da poterne studiare, in altre sedi, le deformazioni locali mediante delle tecniche di analisi delle immagini. Com'è possibile osservare nelle seguenti immagini, è possibile notare come il provino si deforma quando sottoposto ad un carico statico.

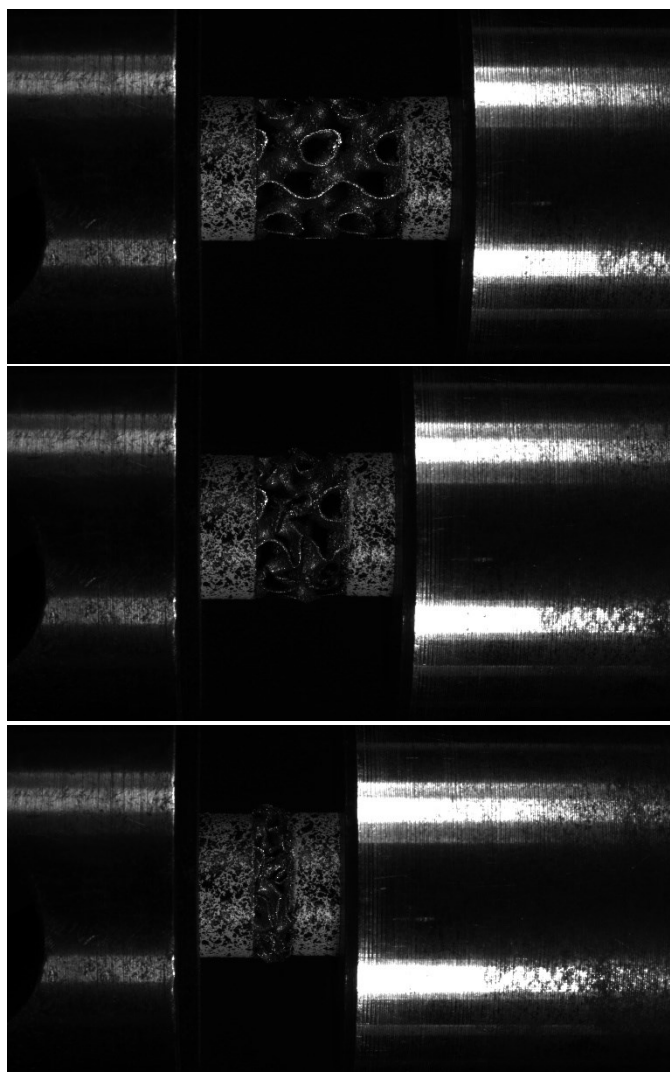


Figura 29 Deformazione progressiva test Gy

La prova è stata interrotta una volta raggiunta una tensione di circa 100MPa, per evitare problematiche legate alle tensioni agenti sul telaio della macchina.

Una volta terminata la prova, la traversa della macchina è stata fatta risalire così da consentire la rimozione del provino. Una volta rimosso dalla macchina Zwick, il provino si è presentato in questo modo.

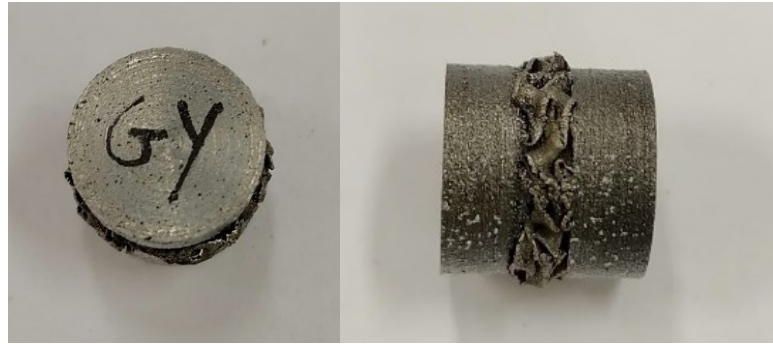


Figura 30 Provino compresso staticamente (Test Gy)

Successivamente si è deciso di testare sempre tramite una prova statica, il provino avente una geometria twistata.

Per poter eseguire questa prova, il provino è stato avvitato ad un supporto avente sezione maggiore con l'obiettivo di prevenire eventuali fenomeni di instabilità.

Il giroide è stato fatto poi appoggiare su un ulteriore supporto capace di ruotare dotato di alcune linee disegnate a pennarello utili ad osservare la rotazione subita dal provino durante il processo di compressione statica.

È stata evidenziata in rosso una di queste linee così da rendere meglio l'idea della rotazione che subisce la faccia non a contatto con la cella di carico.

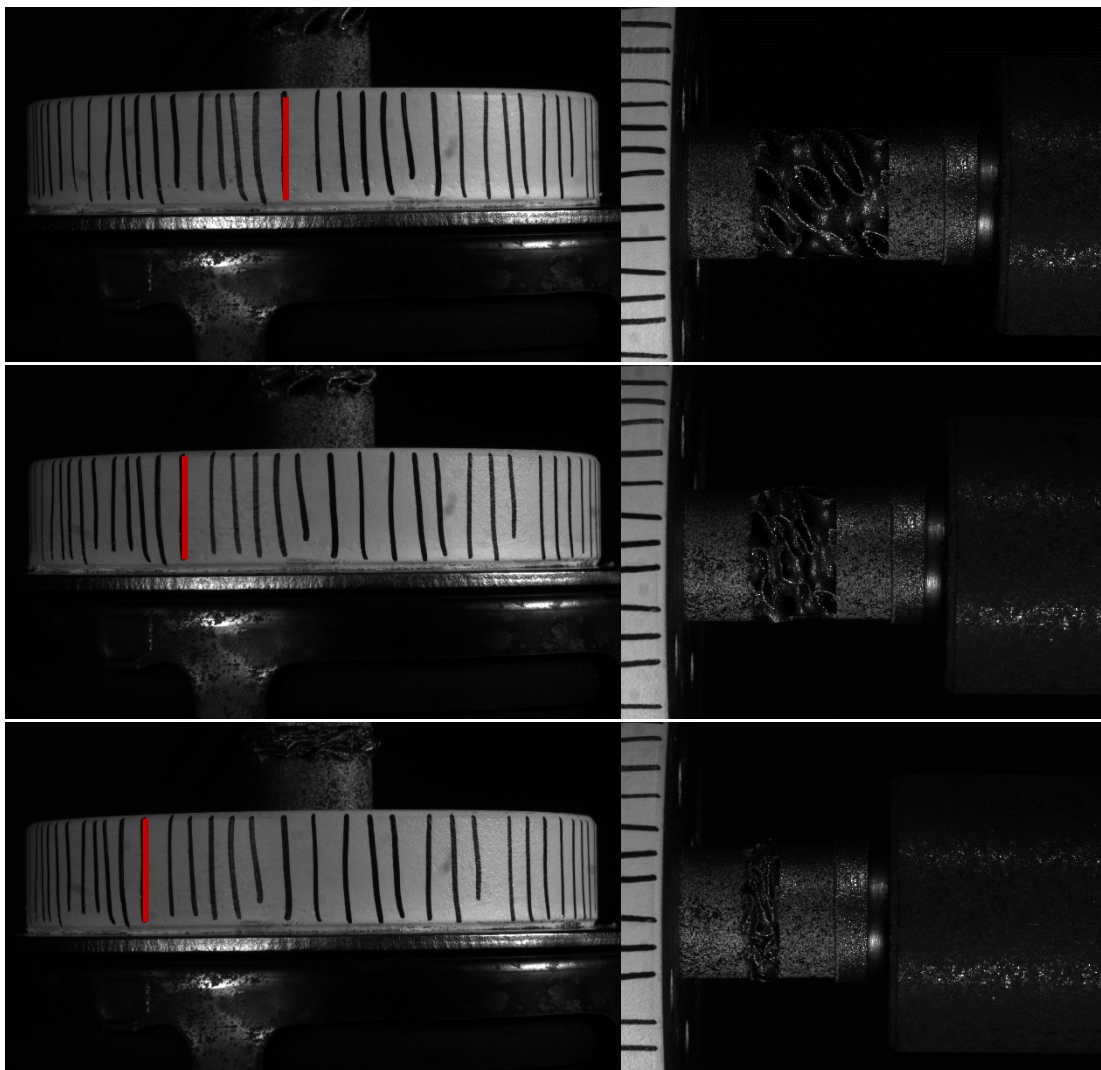


Figura 31 Deformazione progressiva Test TwGy_free

Com'è possibile osservare in Figura 31, il provino twistato se soggetto ad un'azione di compressione ruota grazie alla sua conformazione geometrica.



Figura 32 Provino compresso staticamente (Test TwGy_free)

2.3.2 Comportamento dinamico

Alla base dello studio del comportamento dinamico dei provini vi è la teoria delle onde che viene descritta attraverso le seguenti relazioni.

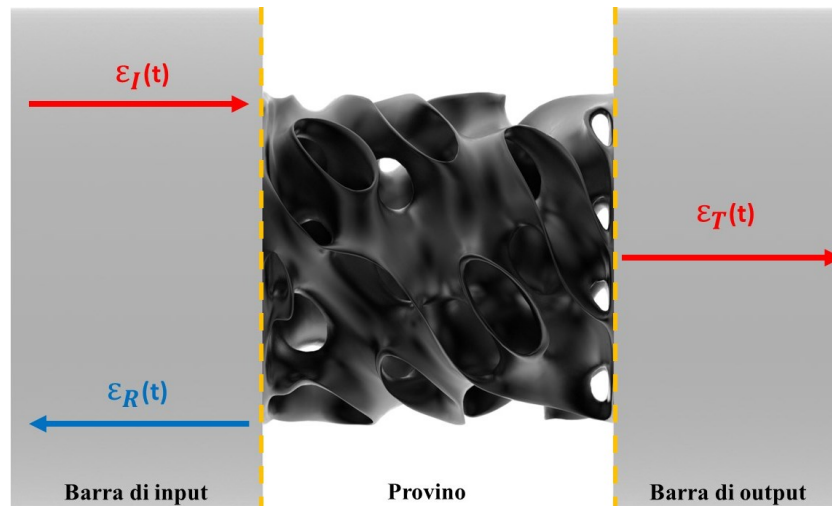


Figura 33 Comportamento onde di deformazione

$$\epsilon_I(t) + \epsilon_R(t) = \epsilon_T(t)$$

Equazione 19 Descrizione onde alle interfacce

Con $\epsilon_I(t)$ si indica l'onda incidente, ossia l'onda che viene generata mediante l'azione del martinetto e che si propaga per tutta la barra di input. Quando l'onda giunge in corrispondenza dell'interfaccia input-provino, parte di essa viene trasmessa alla barra di output, indicata con $\epsilon_T(t)$ mentre parte di questa viene riflessa alla barra di input stessa $\epsilon_R(t)$.

Queste deformazioni vengono valutate mediante l'utilizzo di estensimetri opportunamente collocati nelle barre di input e output.

In questa parte della tesi, vengono scritte e discusse diverse relazioni utili a descrivere il comportamento delle onde all'interno delle barre. Senza la comprensione di queste relazioni, sarebbe impossibile discutere i risultati di questo lavoro.

Partendo dai valori presenti nell'Equazione 19, ottenuti mediante le simulazioni numeriche o tramite gli estensimetri montati sulle barre, è possibile calcolare gli spostamenti delle interfacce, le forze che nascono su di esse, le deformazioni, lo strain rate e le tensioni.

Le prime relazioni che vengono qui riportate consentono di valutare gli spostamenti che si manifestano alle interfacce (Input-Provino e Output-Provino).

$$u_1 = c_0 \int_0^t [\varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_i(\tau)] d\tau$$

Equazione 20 Spostamento nella barra di input

$$u_2 = -c_0 \int_0^t [\varepsilon_t(\tau)] d\tau$$

Equazione 21 Spostamento nella barra di output

Successivamente, è possibile valutare la forza che si genera e si propaga per mezzo delle onde all'interno delle barre.

$$P_1(t) = A_b \cdot E_b \cdot [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)]$$

Equazione 22 Forza nella barra di input (interfaccia Input-Provino)

$$P_2(t) = A_b \cdot E_b \cdot \varepsilon_t(t)$$

Equazione 23 Forza trasmessa nella barra di output (interfaccia Provino-Output)

Descritte queste prime grandezze, è possibile valutare lo strain rate, la deformazione e la tensione

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \varepsilon_r(t) \quad \varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_t(t) d\tau$$

Equazione 24 Strain rate e Deformazione

$$\sigma(t) = \frac{A_b \cdot E_b}{A_s} \varepsilon_t(t)$$

Equazione 25 Tensione

Tensione nominale del provino e deformazione nominale

$$\varepsilon_t(t) = \frac{u_2(t) - u_1(t)}{L_s} = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] d\tau$$

Equazione 26 Deformazione nominale

$$\sigma(t) = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A_s} = \frac{A_b \cdot E_b}{2A_s} \cdot [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)]$$

Equazione 27 Tensione nominale

Per ciascuna tipologia di provino, sono state eseguite due prove sperimentali.

I risultati di queste prove, letti mediante i vari estensimetri montati sulla barra di input e sulla barra di output, vengono visualizzati in Volt.

Per poter convertire il segnale elettrico ottenuto grazie alla scheda di acquisizione in valori di deformazione, è necessario utilizzare una determinata relazione, che viene qui introdotta e analizzata.

$$\varepsilon_1 = \frac{2}{k \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{V_s}{V_0}$$

Equazione 28 Conversione del segnale elettrico in deformazione

Dove:

- k – Rapporto di conversione ($k=2.05$ per il ponte assiale di input, 1.96 per il ponte assiale di output)
- ν – Coefficiente di Poisson delle barre in titanio $\nu = 0.3064$
- V_s – Segnale acquisito
- V_0 – Voltaggio con cui si alimenta il ponte (Batteria)

Per quanto riguarda il segnale elettrico misurato mediante gli estensimetri torsionali, la conversione viene eseguita mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{k} \cdot \frac{V_S}{V_0}$$

Equazione 29 Conversione del segnale elettrico torsionale in deformazione

I ponti montati sulle barre consentono di calcolare non solo la deformazione assiale ε_1 ma consentono anche di calcolare la deformazione angolari $\varepsilon_{12} = \gamma/2$.

Per ciascuna prova eseguita, sono stati misurati i voltaggi delle batterie con cui si sono alimentati i ponti di Wheatstone, e quindi gli estensimetri. Sono state misurate anche le dimensioni e il peso dei provini. Ciascun provino, prima di essere collocato sulle barre è stato verniciato di bianco con alcuni dettagli neri così da poter valutare mediante delle tecniche di analisi di immagine la deformazione locale subito dal campione.

La numerazione dei test che verrà illustrata nei paragrafi successivi parte dal numero due in quanto un primo test è stato eseguito a vuoto con l'obiettivo di controllare se fosse tutto funzionante e operativo.

Le caratteristiche del provino vengono schematizzate mediante un'immagine per rendere più comprensibili quali misure sono state effettuate.

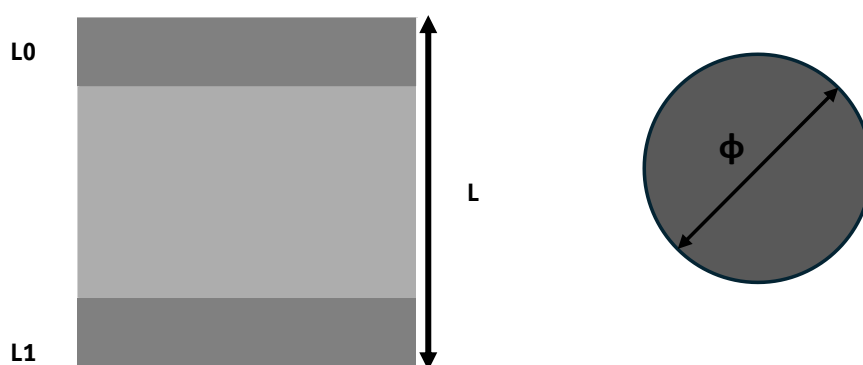


Figura 34 Schematizzazione dimensioni del provino non filettato

Queste dimensioni sono state misurate mediante un calibro ed una bilancia e vengono riportate nella seguente tabella.

Dati	Test 2		Test 3	
ϕ	11.9	mm	11.8	mm
L_0	4.6	mm	4.4	mm
L_1	4.7	mm	4.3	mm
L	21	mm	20.65	mm
m	9.06	g	8.8	g

Tabella 13 Dati dei provini utilizzati nel Test 2 e nel Test 3

I voltaggi delle batterie con cui vengono alimentati i ponti sono stati misurati utilizzando un multimetro.

Dati	Test 2		Test 3	
V_{in}	9.38	V	9.55	V
V_{out}	9.37	V	9.55	V

Tabella 14 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 2 e per il Test 3

In questi primi test sono state utilizzate soltanto due batterie (e quindi sono stati alimentati soltanto due ponti) in quanto si è voluta misurare soltanto la deformazione assiale del provino.

Il provino è stato poi posizionato tra la barra di input e la barra di output senza utilizzare alcun particolare supporto in quanto esso viene mantenuto in posizione grazie alla forza di attrito.



Figura 35 Set-Up del provino non filettato sulla barra

Tramite la fotocamera ad alta velocità sono state ottenute centinaia di immagini, qui vengono riportate tre immagini a prova così da poter osservare la deformazione progressiva dei vari provini durante i diversi test.

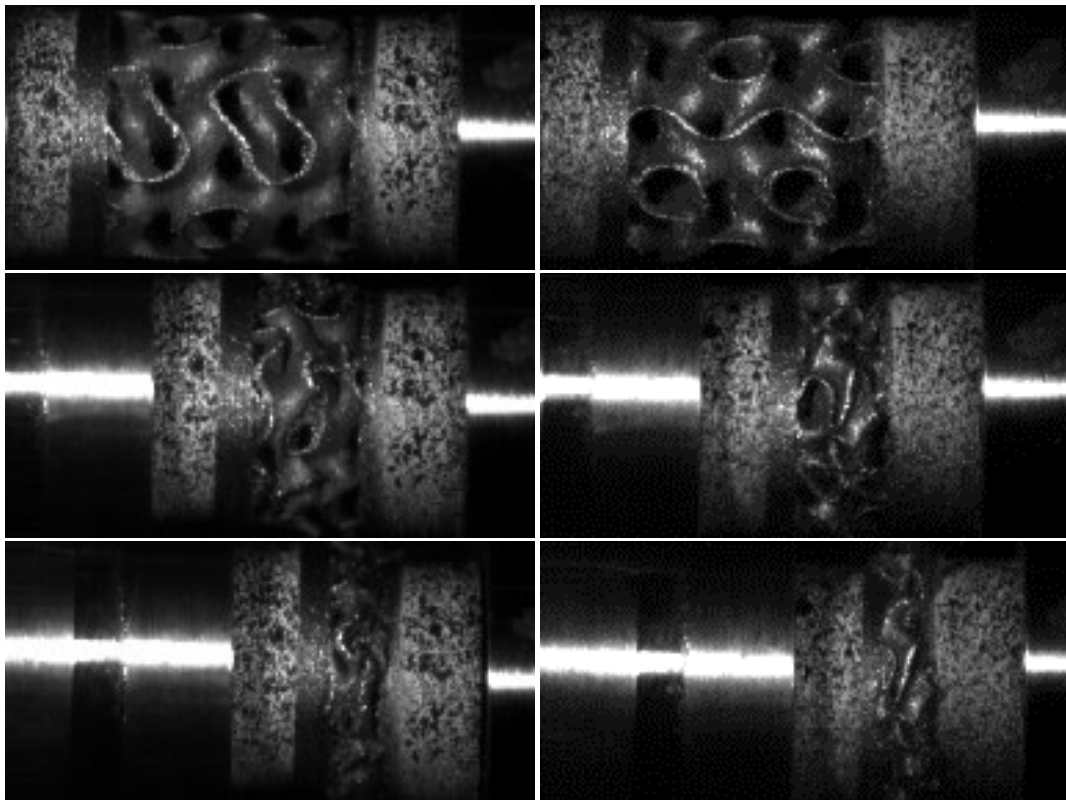


Figura 36 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino non twistato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 2 mentre a destra il Test 3

Al termine della prova, la cui durata è di qualche secondo tra pretensionamento e impatto, i provini si sono presentati come in Figura 37.



Figura 37 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 2 e 3

È possibile notare un piccolo disassamento tra le due facce a seguito dello schiacciamento.

Successivamente, si sono svolte le stesse operazioni anche con la seconda tipologia di provini, ossia quei provini twistati filettati da un lato e piatti dall'altro. Il set up della prova ha mostrato alcune differenze rispetto al caso precedente.



Figura 38 Schematizzazione dimensioni del provino non filettato

Per questa seconda tipologia di provini, si sono misurati il diametro della sezione cilindrica non filettata e la sua altezza, vista la geometria più complessa rispetto al caso precedentemente trattato. I provini sono stati anche in questo caso pesati.

Dati	Test 4		Test 5	
ϕ	11.89	mm	11.9	mm
L_0	5.6	mm	5.6	mm
m	22.56	g	22.91	g

Tabella 15 Dati dei provini utilizzati nel Test 4 e nel Test 5

Per quanto riguarda la misura del voltaggio delle batterie, per questa tipologia di provini si sono utilizzate quattro fonti di alimentazione in quanto si è cercato di misurare eventuali coppie generate a seguito dell'impatto.

Dati	Test 4		Test 5	
V_{in}	9.65	V	9.65	V
V_{out}	9.66	V	9.66	V
$V_{in} T$	9.55	V	9.26	V
$V_{out} T$	9.33	V	9.44	V

Tabella 16 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 4 e per il Test 5

Durante questi due test, il provino è stato avvitato inizialmente all'input bar mediante la rimozione del tappo presente sulla barra.

Successivamente, nel lato non filettato del provino posto a contatto con l'output bar è stata aggiunta una piccola quantità di grasso con l'obiettivo di minimizzare l'attrito all'interfaccia.



Figura 39 Set-Up del provino avvitato ad un estremo della barra

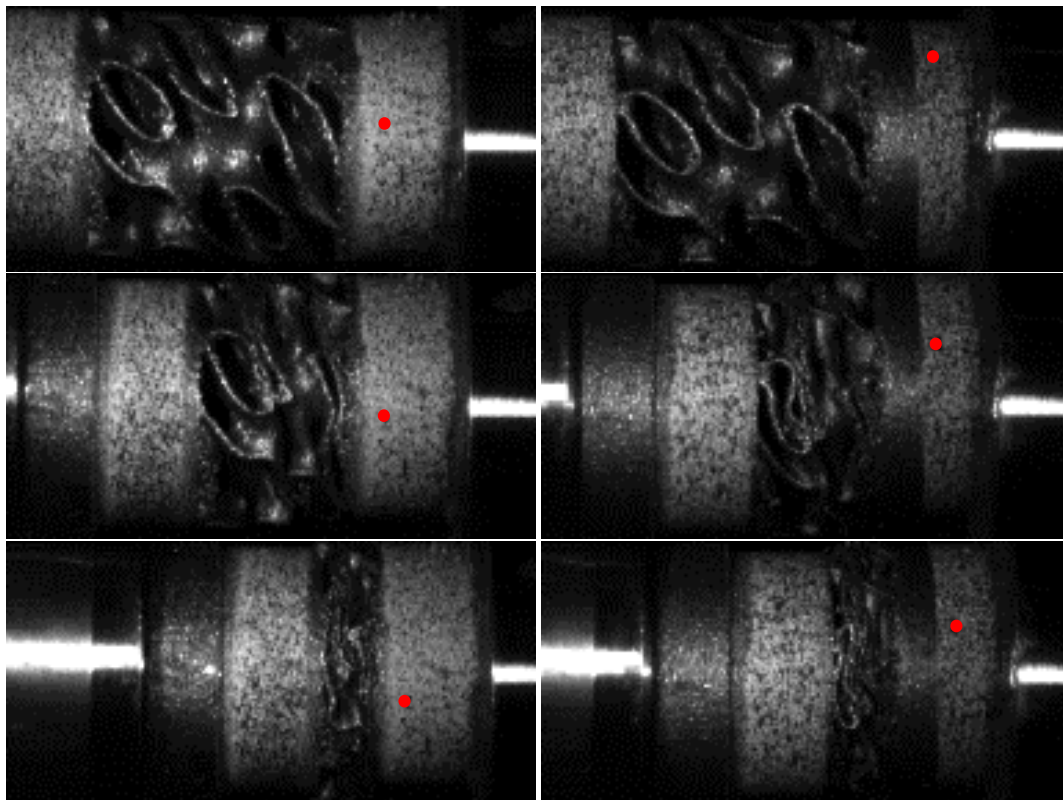


Figura 40 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino twistato avvitato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 4 mentre a destra il Test 5

Dalle immagini qui riportate non è possibile notarlo in maniera molto dettagliata; tuttavia, la superficie non avvitata alla barra subisce durante lo schiacciamento una rotazione rappresentata dal puntino rosso evidenziato in figura. La rotazione è indotta soltanto dalla geometria del provino. I puntini rossi sono stati posizionati in corrispondenza di alcune delle macchie nere realizzate mediante vernice.



Figura 41 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 4 e 5

Le prove sperimentali dinamiche si sono concluse mediante l'analisi di una terza serie di provini caratterizzata da due estremità filettate.

Vista la complessità della geometria di quest'ultima serie di provini, non sono state eseguite misure in termini di lunghezza e peso.

Le uniche misurazioni eseguite sono state quelle relative all'alimentazione delle batterie.

Dati	Test 6		Test 7	
V_{in}	9.64	V	10.05	V
V_{out}	9.63	V	10.10	V
$V_{in T}$	9.25	V	9.30	V
$V_{out T}$	9.44	V	9.14	V

Tabella 17 Voltaggi di alimentazione dei ponti per il Test 6 e per il Test 7

L'avvitamento del provino filettato in entrambi i lati è stato leggermente problematico a causa dei vari cavi elettrici collegati agli estensimetri.

Per evitare che durante l'impatto il provino si svitasse, esso è stato avvitato ad un'estremità in senso orario mentre dall'altra in senso antiorario. Una volta avvitata l'estremità del provino alla barra di input, si è visto necessario staccare i vari fili elettrici dalla scheda di acquisizione così da consentire la rotazione della barra di output.

I fili sono stati raccolti e arrotolati attorno all'output-bar la quale è stata fatta ruotare così da consentire l'avvitamento con il provino.



Figura 42 Set-Up del provino avvitato (parzialmente) ad entrambe le barre

La prova ha restituito dei risultati in parte aspettati e in parte no; infatti, il provino a seguito dell'impatto si è schiacciato all'apparenza senza subire alcuna rotazione della sua sezione centrale, inoltre, diversamente da quanto accaduto negli altri test, si è rotto.

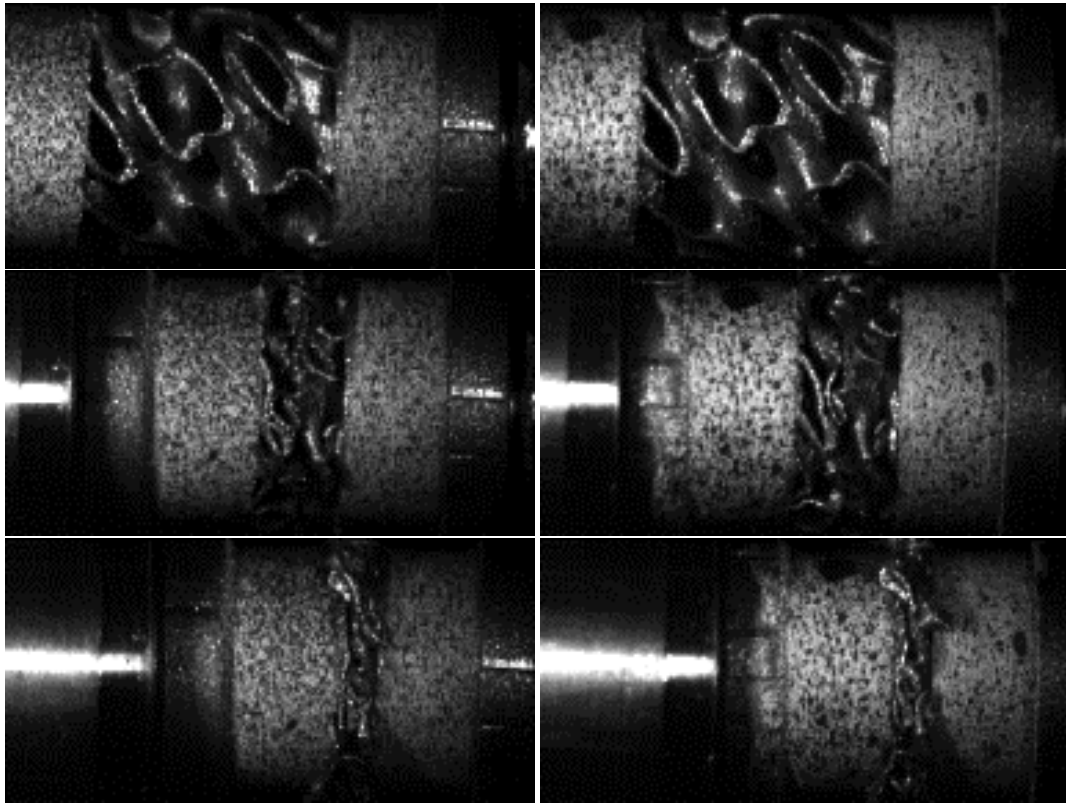


Figura 43 Dall'alto verso il basso, deformazione progressiva del provino twistato avvitato alla barra di Hopkinson. A sinistra è possibile osservare il Test 6 mentre a destra il Test 7

Analizzando soltanto visivamente queste immagini non è stato possibile comprendere se, durante l'impatto il provino abbia ruotato o meno. Tali risposte verranno cercate mediante l'analisi dei risultati.



Figura 44 Provini compressi al termine delle prove dinamiche 6 e 7

2.4 Analisi agli elementi finiti

Dopo avere eseguito le prove sperimentali si è cercato di replicare quanto visto ed eseguito nella realtà all'interno del software CAE Abaqus, con l'obiettivo di realizzare e definire un modello virtuale ottimale. Lo scopo principale delle simulazioni è quello di ridurre il numero di prove sperimentale, le quali spesso richiedono molto tempo e risorse. Nel caso in questione, la definizione di un corretto modello virtuale consente di evitare la stampa di un elevato quantitativo di provini.

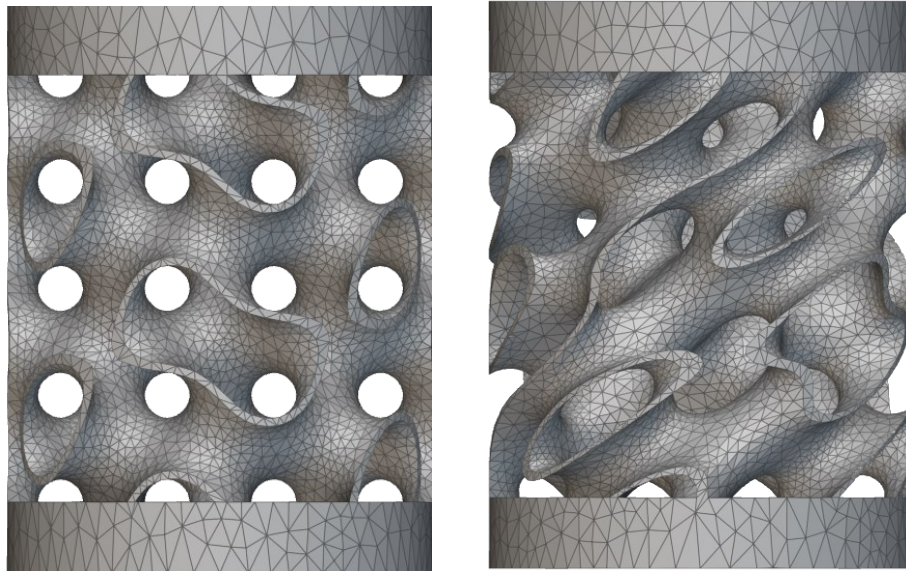


Figura 45 Provini con aggiunta di spessori cilindrici

Com'è possibile notare dalle due figure qui sopra, i provini realizzati mediante Ntopology sono stati anche meshati (discretizzati in tanti piccoli elementi) dal software stesso. Il numero di elementi con cui sono stati suddivisi questi piccolissimi provini è molto elevato, si parla di circa 55mila elementi.

Partendo dai risultati ottenuti grazie alla caratterizzazione del materiale e riportati in Tabella 12, lo studio è proseguito con la realizzazione del provino all'interno di un ambiente CAD e successivamente questo è stato sottoposto a diverse analisi agli elementi finiti mediante il software ABAQUS.

Le simulazioni sono partite mediante l'analisi del comportamento quasi statico del materiale per poi proseguire con le simulazioni dinamiche, la cui complessità è stata maggiore rispetto alle prime a causa del maggior numero di fattori in gioco.

In questa parte della tesi, vengono illustrati i passaggi eseguiti nell'impostare le varie simulazioni agli elementi finiti.

Sono state eseguite tre diverse simulazioni volte ad analizzare tre casistiche differenti:

1. Il provino NON twistato è incastrato alla base
2. Il provino twistato è incastrato alla base
3. Il provino twistato è libero di ruotare attorno all'asse verticale

In tutte e tre le simulazioni, il provino è soggetto ad un'azione di compressione realizzata mediante uno spostamento della faccia superiore impostato a 10mm.

Le prove quasi statiche sono state svolte considerando un intervallo temporale pari a 1s, mentre nella realtà prove di questo tipo hanno una durata di circa 15 minuti.

Per realizzare questa prova, si è definito il modello di Johnson-Cook all'interno del software andando però ad escludere la definizione del parametro C e del calore specifico tra le proprietà del materiale, in questo modo Abaqus è come se avesse interpretato l'Equazione 13.

La forza agente sul provino nel corso di queste prove è uniformemente distribuita, per questo motivo sono state escluse immagini volte a mostrare la forza o la tensione sul campione sono state omesse: si sarebbero ottenute delle mappe monocromatiche.

In questa prima simulazione non si sono andati a ricercare particolari fenomeni in quanto la conformazione geometrica del provino fa sì che esso non abbia nessuna particolare interazione; tuttavia, ai fini di questo lavoro, è di fondamentale importanza studiare il caso non twistato perché l'obiettivo di tutto lo scritto è comprendere se il provino twistato

sia in grado di assorbire più energia rispetto a questo caso. Vengono riportate successivamente alcune immagini ottenute dalla simulazione eseguita in cui si mostra lo spostamento della faccia superiore del provino.

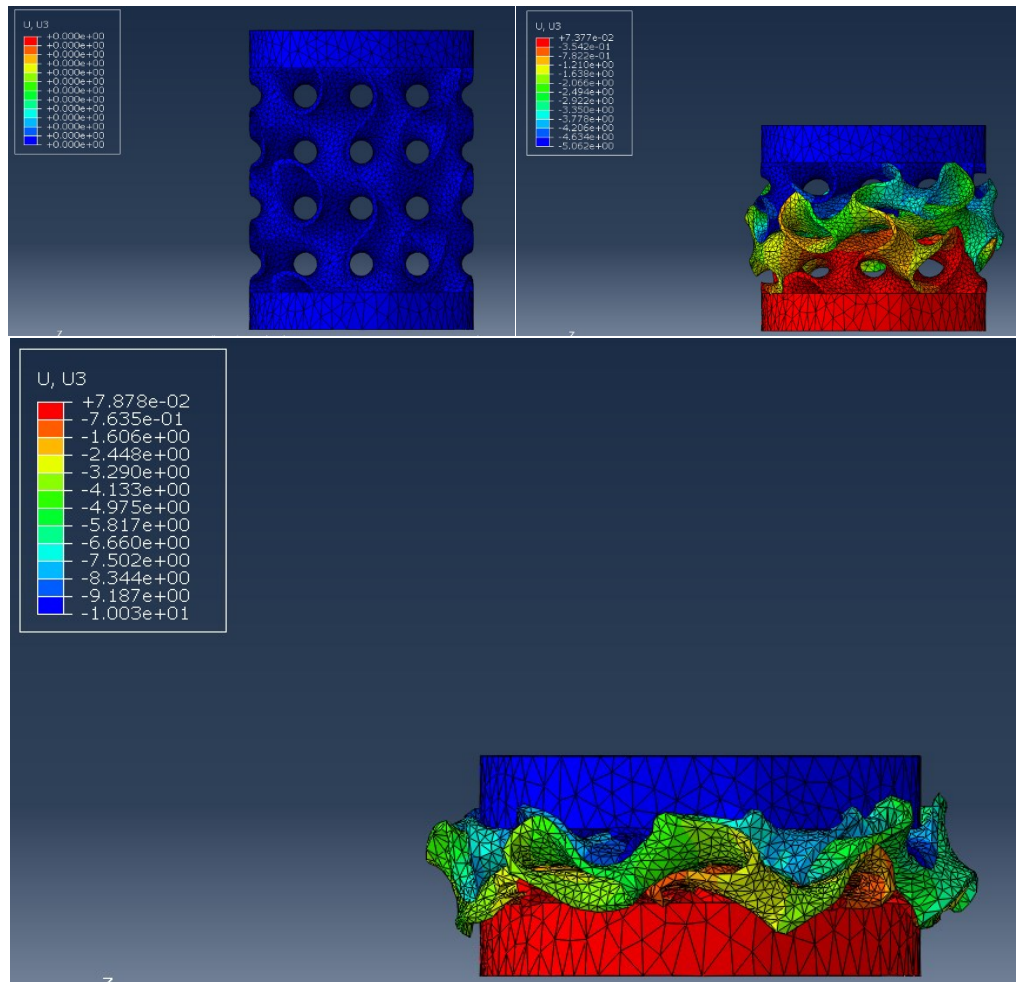


Figura 46 Spostamento faccia superiore provino non twistato

Esportando i dati relativi alla forza e allo spostamento della faccia superiore del provino, è possibile ricostruire le curve σ - ϵ che descrivono il comportamento a compressione del solido cellulare testato. La curva ottenuta ha la stessa forma vista nella teoria di questi particolari materiali e questo è stato un piccolo risultato preliminare molto importante.

Il provino si deforma collassando su stesso senza che avvenga alcuna rotazione.

Per quanto riguarda il provino twistato incastrato alla base, si è aggiunto un piccolo elemento trave fittizio sulla sua faccia superiore con l'obiettivo di semplificare la

valutazione di alcuni parametri molto importanti ai fini della simulazione, ossia la reazione vincolare del momento torcente e la deformazione angolare. Senza questo escamotage, sarebbe stato molto difficile poter effettuare queste valutazioni.

Vista la geometria particolare del campione studiato e tenendo conto del vincolo di incastro alla base si è previsto di ottenere un certo valore di coppia come reazione vincolare. Questa particolare risposta del provino è dovuta alla sua geometria.

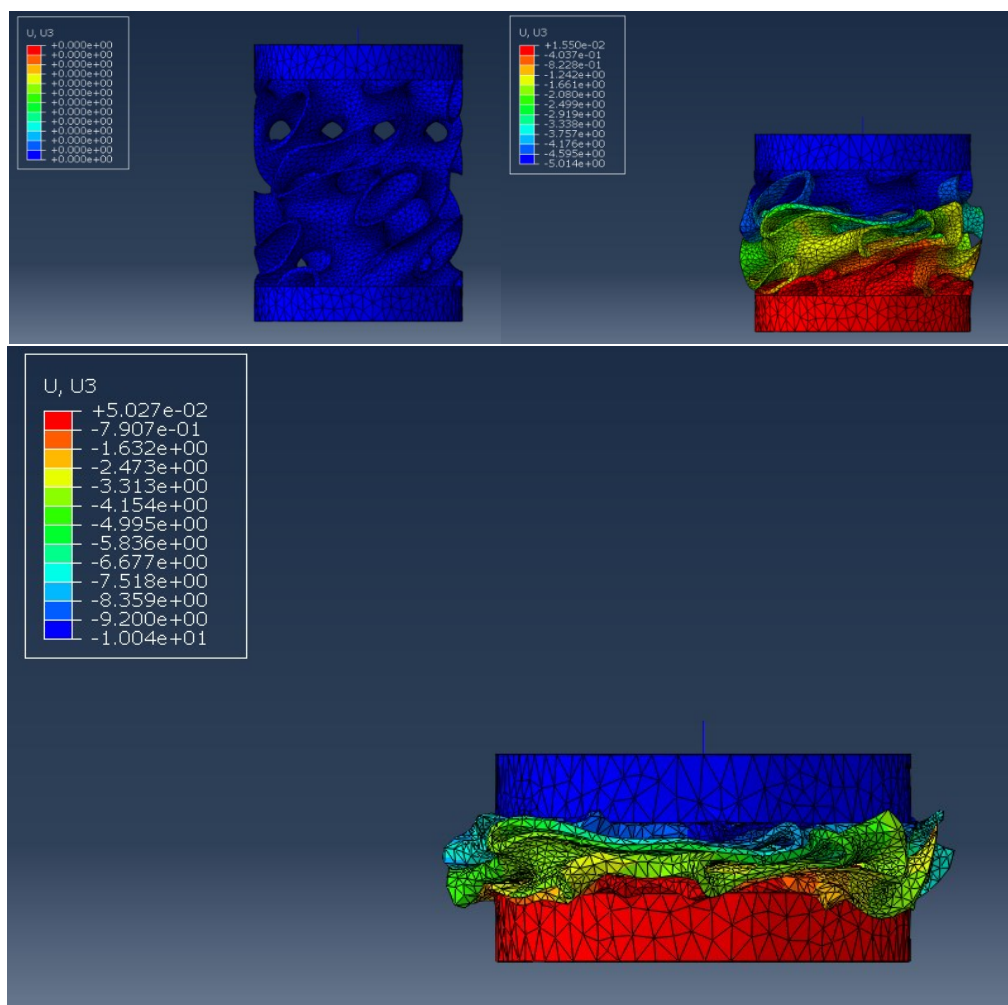


Figura 47 Spostamento verticale calcolato sull'elemento trave del provino twistato

Oltre allo spostamento subito dalla faccia superiore del provino durante lo schiacciamento, si sono volute osservare la reazione vincolare legata al momento e la rotazione subita dal provino, ottenendo i risultati di Figura 48 e Figura 49.

Visto che il provino risulta vincolato alla base e vista la sua geometria twistata, si sviluppa una coppia come è possibile osservare in Figura 48.

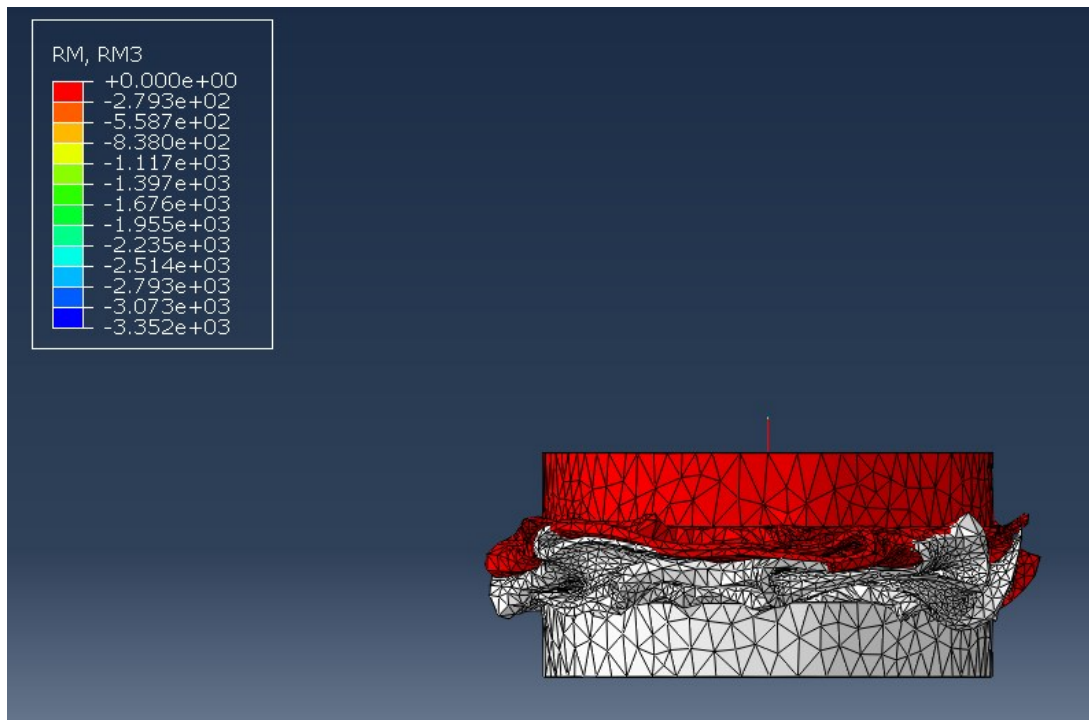


Figura 48 Reazione vincolare di coppia calcolata sull'elemento trave del provino twistato

Mentre com'è possibile osservare nella figura sottostante, oltre ad un leggero “rumore”, il campione non subisce rotazioni.

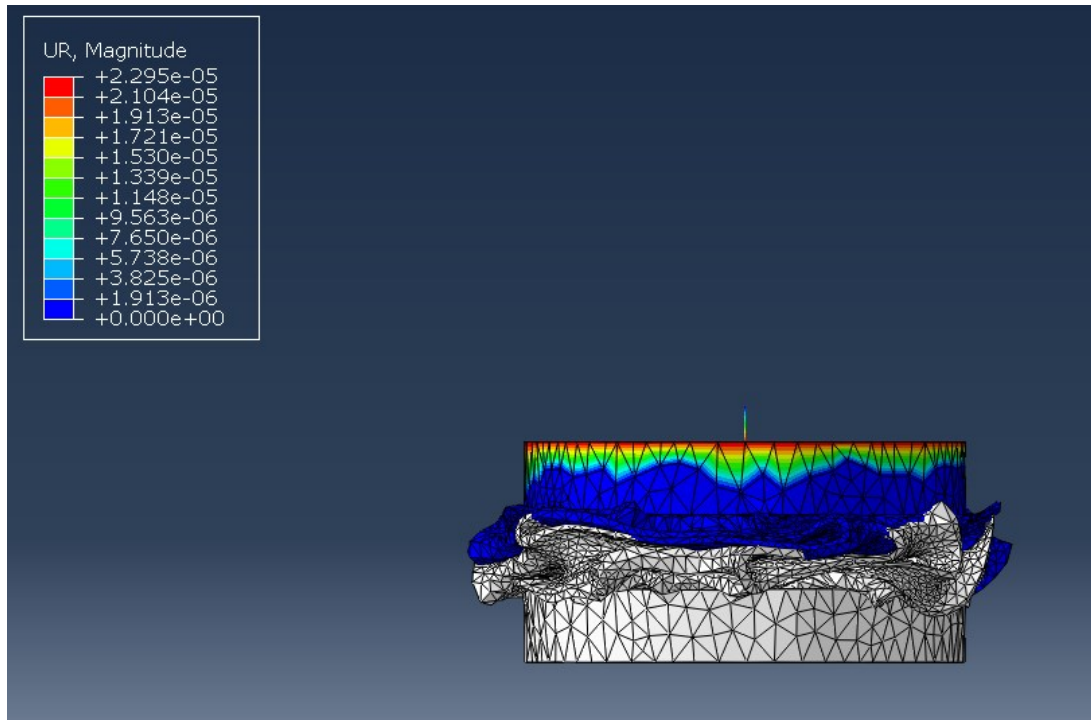


Figura 49 Rotazione calcolata sull'elemento trave del provino twistato

Anche in questo caso, esportando i dati relativi allo sforzo normale e all'abbassamento della faccia superiore è possibile calcolare la tensione e la deformazione subita dal provino durante la prova di compressione.

Nella terza simulazione, la faccia inferiore del provino twistato è stata lasciata libera di ruotare attorno al suo asse longitudinale.

Dal punto di vista visivo, non sono state riportate le immagini relative allo schiacciamento del provino in quanto pur essendo presenti delle particolarità, non sarebbe stato possibile osservare alcun dettaglio di interesse. I punti di interesse sono stati invece riportati e commentati.

Quest'ultima simulazione statica consente però di osservare alcune particolarità legate al fatto che la faccia inferiore del provino non è più incastrata alla base ma essa è libera di ruotare diversamente dal caso precedente.

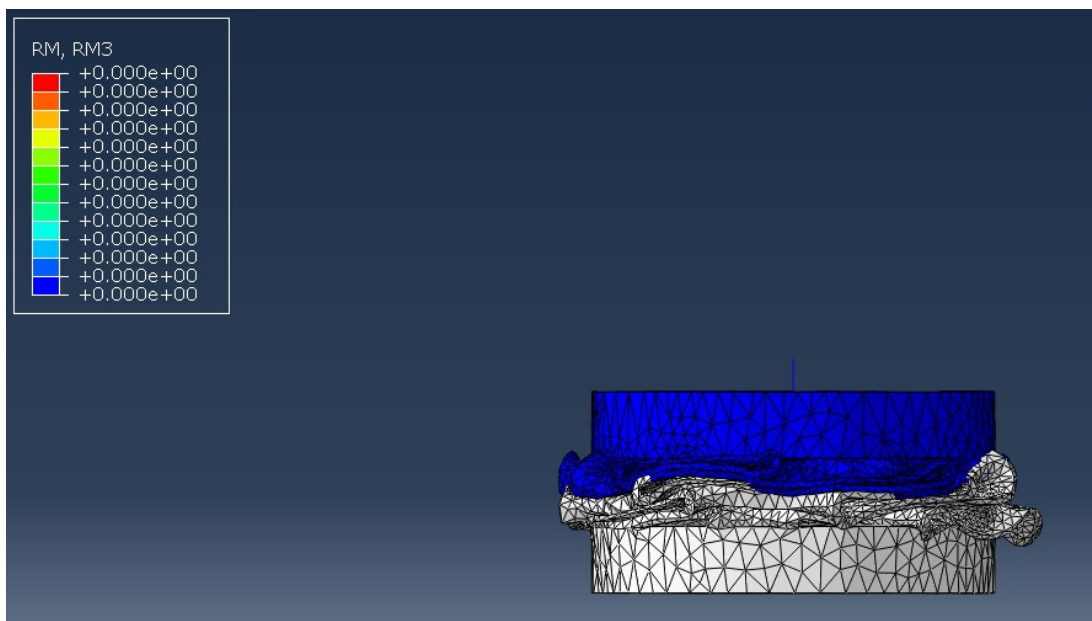


Figura 50 Reazione vincolare di coppia calcolata sull'elemento trave del provino twistato

Essendo libero di ruotare, sul provino non nascono coppie di reazione; tuttavia, esso subisce una rotazione attorno all'asse verticale anche piuttosto pronunciata. Com'è possibile osservare in Figura 51, la rotazione massima è di circa 0.48 radianti che, convertiti in gradi sono circa 27.5°.

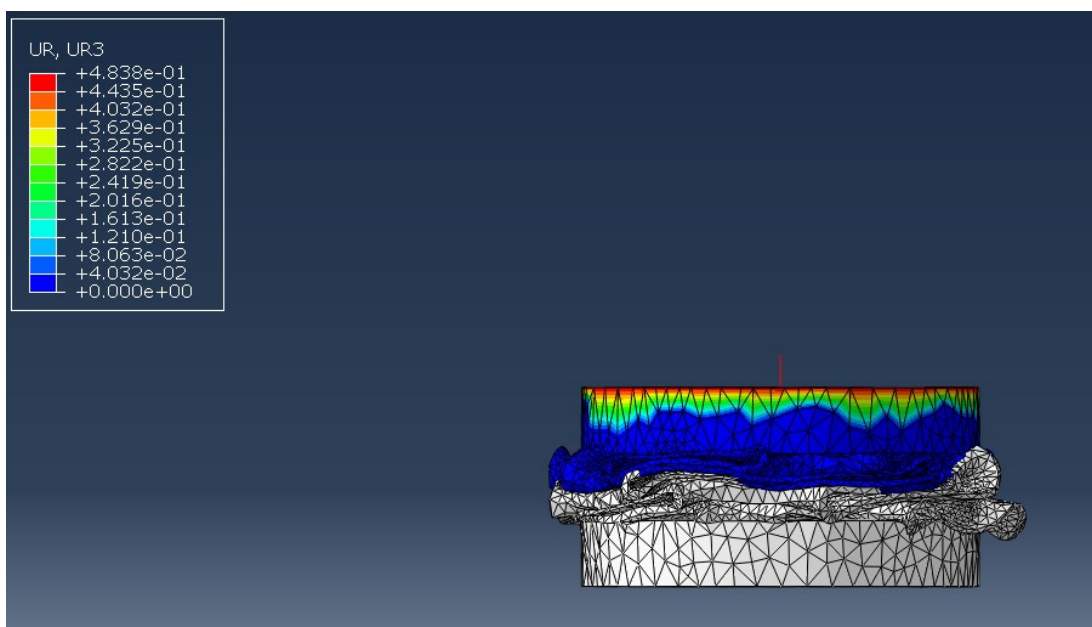


Figura 51 Rotazione calcolata sull'elemento trave del provino twistato

Dopo aver eseguito le simulazioni di natura statica, lo studio è proseguito con le simulazioni dinamiche. Per prima cosa si è realizzato un modello virtuale della barra di Hopkinson. Le barre sono state rappresentate all'interno di Abaqus mediante delle linee (wire) così da alleggerire la visualizzazione.

Per semplicità di trattazione, si svilupperà in maniera più approfondita una sola simulazione dinamica delle tre che sono state eseguite vista la loro eccessiva somiglianza nello svolgimento. Chiaramente, nel momento in cui si palesassero delle differenze sostanziali queste verrebbero studiate ed analizzate.

Come per le simulazioni quasi statiche, anche in questo caso si sono definite tutte le proprietà necessarie del provino e delle barre che compongono l'apparato della prova.

Per questa tipologia di simulazione è stato necessario definire correttamente le proprietà legate allo strain rate (quindi il parametro C ed ϵ_0) ma anche le proprietà termiche come T_{room} , T_{melt} , calore specifico e parametro m.

Per poter valutare correttamente gli effetti termici, si sono dovute selezionare correttamente alcune opzioni all'interno del software nel menù relativo alla definizione degli step, con particolare riferimento all'inclusione degli effetti termici adiabatici.

Si è imposto un campo di velocità alla barra pretensionata pari a 10 m/s così da generare un'onda di compressione avente un'entità calcolabile tramite la seguente relazione:

$$\sigma = \rho \cdot c \cdot v$$

Equazione 30 Calcolo dell'onda di compressione sulla barra pretensionata

Differentemente dal caso quasi statico nelle simulazioni dinamiche è stato necessario definire i contatti per poter garantire la corretta interazione tra le barre e il provino.

Visto che le travi sono state rappresentate per mezzo di linee, è stato necessario definire la corretta interazione tra il provino, l'input bar e l'output bar: per farlo si è scelto di

utilizzare un “coupling” attraverso il quale tutti i nodi della faccia del provino a contatto con la barra sono stati collegati al punto terminale del filo con cui è stato rappresentata la trave. Nelle immagini che saranno presenti nei seguenti capitoli, queste travi sono state rese tridimensionali per poter osservare meglio i fenomeni osservati.

Il tempo di acquisizione scelto per la prova è pari a 0.004 s.

L’onda generata grazie all’introduzione di un campo di velocità agente sulla barra pretensionata fa sì che si sviluppi una tensione all’interno della barra pretensionata, la quale successivamente andrà ad impattare con la barra di input.

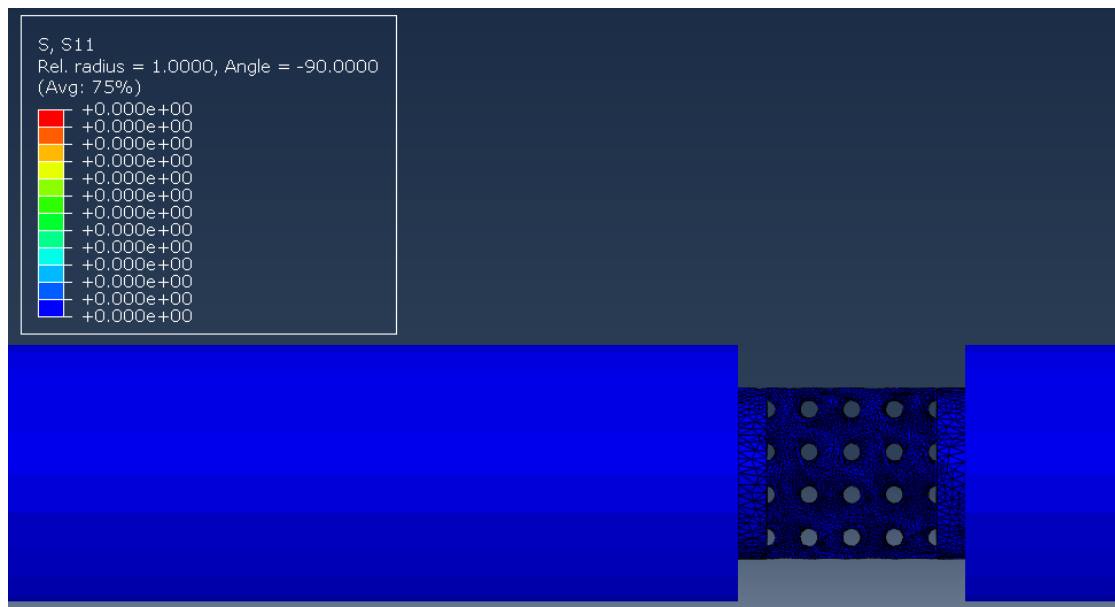


Figura 52 Step 0 della simulazione: l’onda non ha raggiunto il provino Gy

L’onda che si sviluppa a seguito dell’impatto tra la barra pretensionata e la barra di input chiaramente necessita di un certo tempo per poter raggiungere il provino ed è per questo che in Figura 52 le tensioni risultano essere inizialmente nulle.

La barra di input si ricorda essere lunga 7.5 m e considerando una velocità del suono nel mezzo pari a 4892.78 m/s impiega quasi 0.0015 secondi a raggiungere il provino.

Nel momento in cui l’onda giunge sul provino, esso comincia a deformarsi come in Figura 53. La geometria con cui il provino è stato realizzato non consente ad esso di ruotare

durante il processo di deformazione e questo è visibile ad occhio nudo proprio nella seguente immagine.

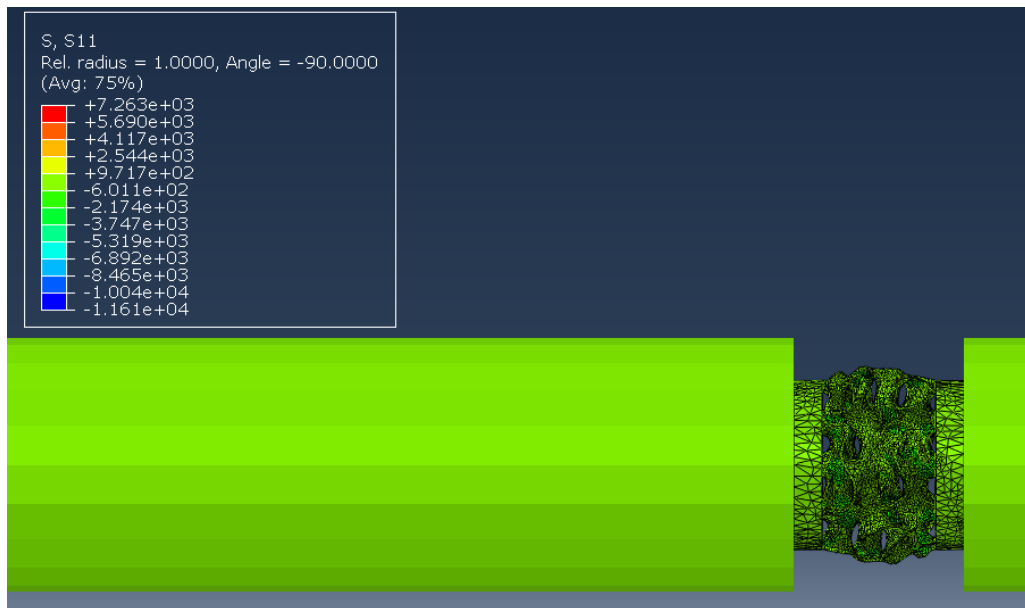


Figura 53 Step240 della simulazione: l'onda ha raggiunto il provino Gy deformandolo

Il provino si comprime aumentando la sua sezione trasversale proprio come avviene durante i processi di compressione dei solidi pieni.

Nel momento in cui l'onda raggiunge il provino, questa in parte si riflette lungo la barra di input cambiando di segno mentre in parte viene trasferita alla barra di output.



Figura 54 Step400 della simulazione: l'onda ha deformato completamente il provino Gy

L'ultima immagine raffigura il provino totalmente deformato a seguito dell'impatto, sarà curioso osservare le differenze che sussistono tra le simulazioni e le prove sperimentali. Nella simulazione relativa al provino twistato incastrato su entrambe le barre non c'è nulla di particolare da descrivere; tuttavia, è interessante osservare la seguente immagine per comprendere che lo stress si concentra all'interno delle celle in particolar modo mentre sulle pareti esterne esso risulta essere ridotto. Lo step mostrato nella Figura 55 descrive l'istante in cui l'onda di compressione raggiunge il provino giroidale twistato.

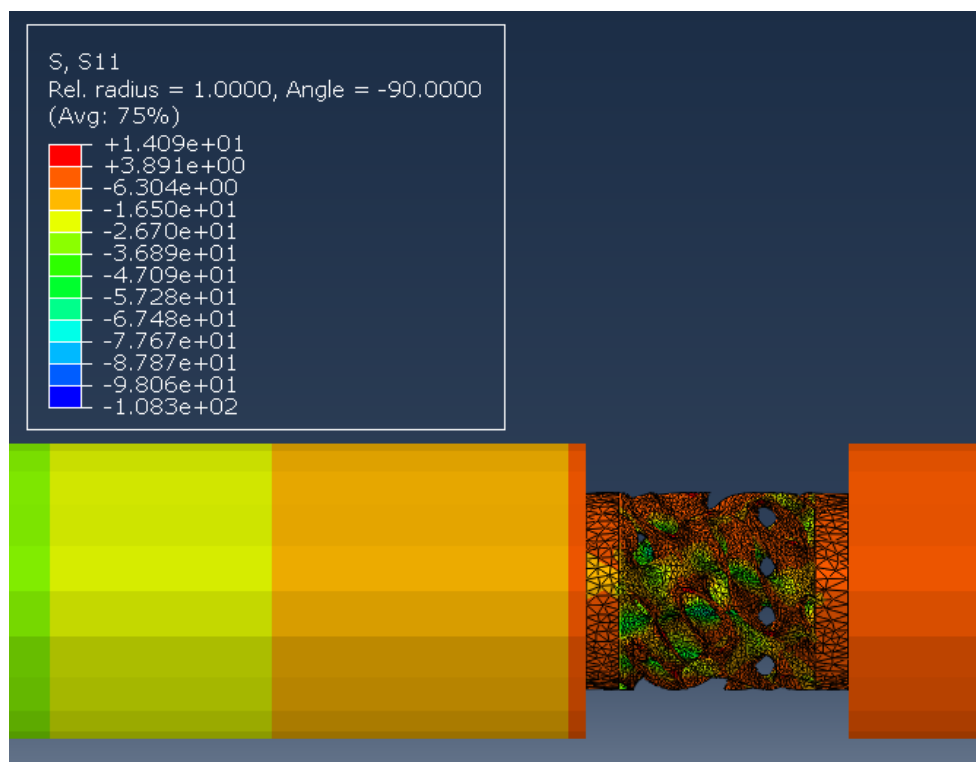


Figura 55 L'onda di compressione arriva a contatto con il provino TwGy_lock

Come per il caso precedente, anche a seguito di questa simulazione si è ricavata la relativa curva numerica dinamica che viene riportata attraverso il seguente grafico.

In questa terza simulazione dinamica, si è cercato inizialmente di collegare il provino giroidale twistato alla barra di output mediante la funzione coupling di Abaqus lasciando però libero il grado di libertà legato alla rotazione lungo l'asse longitudinale del provino.

Quello che si è ottenuto è stato un risultato inaspettato dal punto di vista della simulazione ma, realmente parlando quanto avvenuto è ciò che ci si aspetterebbe da una prova sperimentale di questo tipo. Infatti, al termine della simulazione il provino oltre ad essersi schiacciato ha subito pure un disallineamento come mostrato in Figura 56. Lo stesso risultati lo si è trovato nelle prove sperimentali.

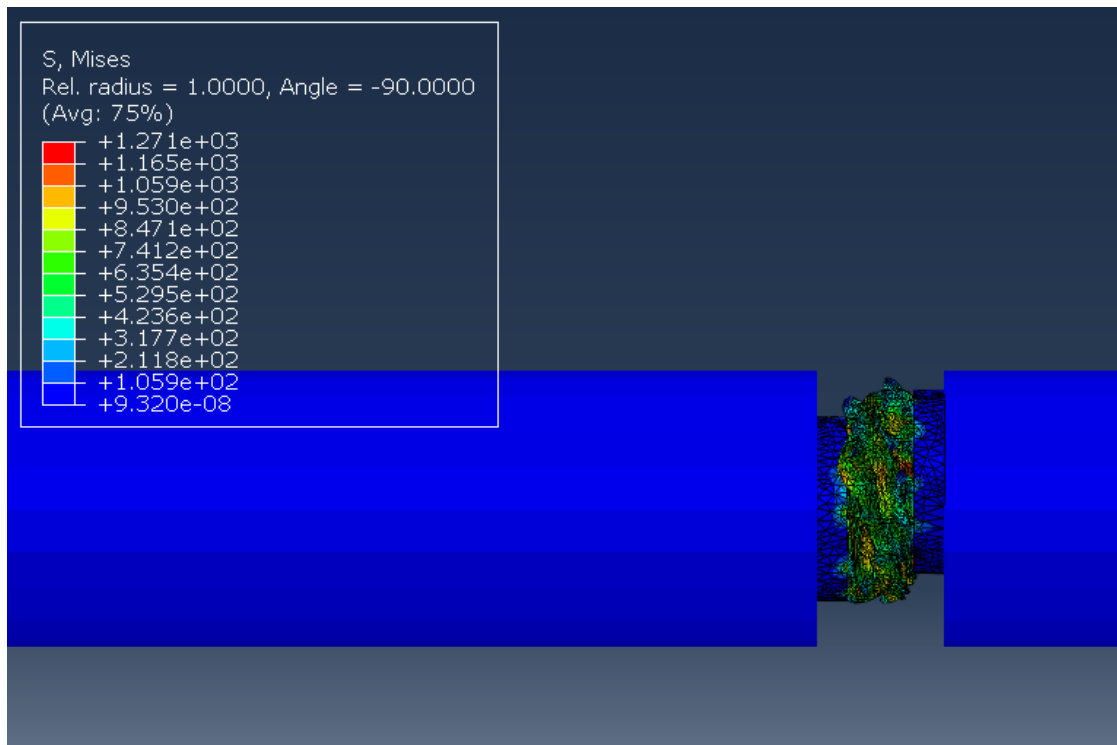


Figura 56 Risultato di primo tentativo TwGy_free

Visto che questa soluzione non ha consentito di valutare facilmente la rotazione subita dal provino a seguito dell'impatto, è stata effettuata un'ulteriore simulazione con lo scopo di valutare l'entità della rotazione.

Tramite l'aggiunta di un piccolo elemento trave all'estremità del provino, nel lato della barra di output, si è valutata la rotazione subita dal provino twistato durante il processo di compressione. Com'è possibile osservare in Figura 57, la rotazione assume un valore pari a 0.4 radianti ossia circa 23°. Il provino subendo una tensione assiale subisce anche una rotazione grazie alla sua conformazione geometrica.

La barretta aggiunta per eseguire questa valutazione serve sostanzialmente a simulare una condizione simile a quella offerta dall'aggiunta del grasso, ossia una condizione a basso attrito (quasi assente).

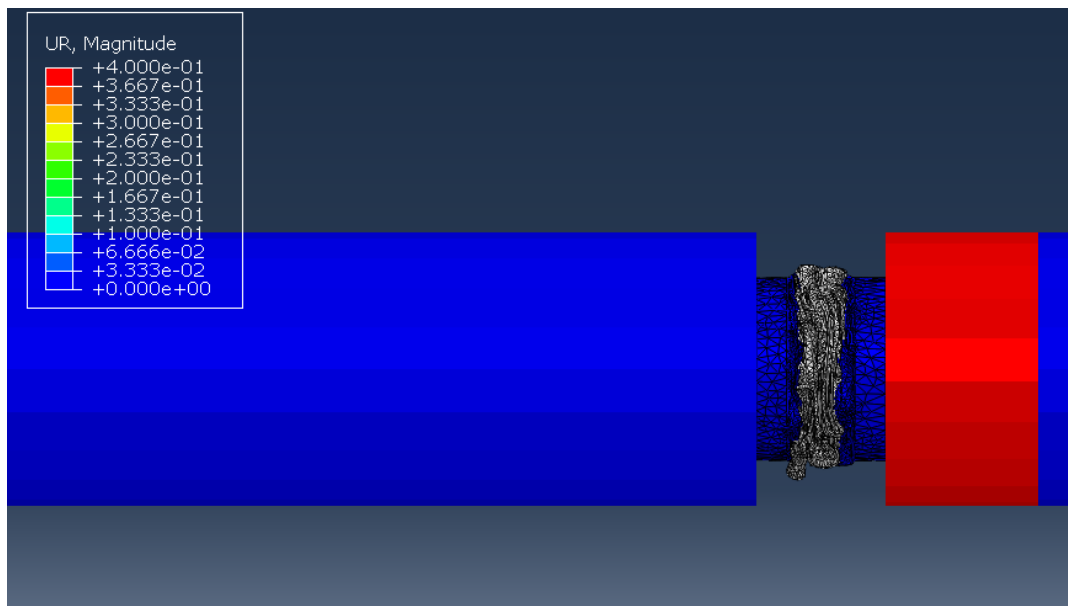


Figura 57 Rotazione subita dal provino TwGy_free durante lo schiacciamento

Capitolo terzo

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Questo capitolo rappresenta il centro del lavoro svolto in quanto si andranno ad analizzare tutti i risultati ottenuti mediante le prove sperimentali e le simulazioni descritte nei capitoli precedenti.

3.1 Risultati sperimentali

Tramite il software di acquisizione dei risultati, si sono ottenute le curve σ - ϵ dei provini testati a partire dalla forza registrata dalla cella di carico e dall'abbassamento imposto alla traversa della macchina Zwick.

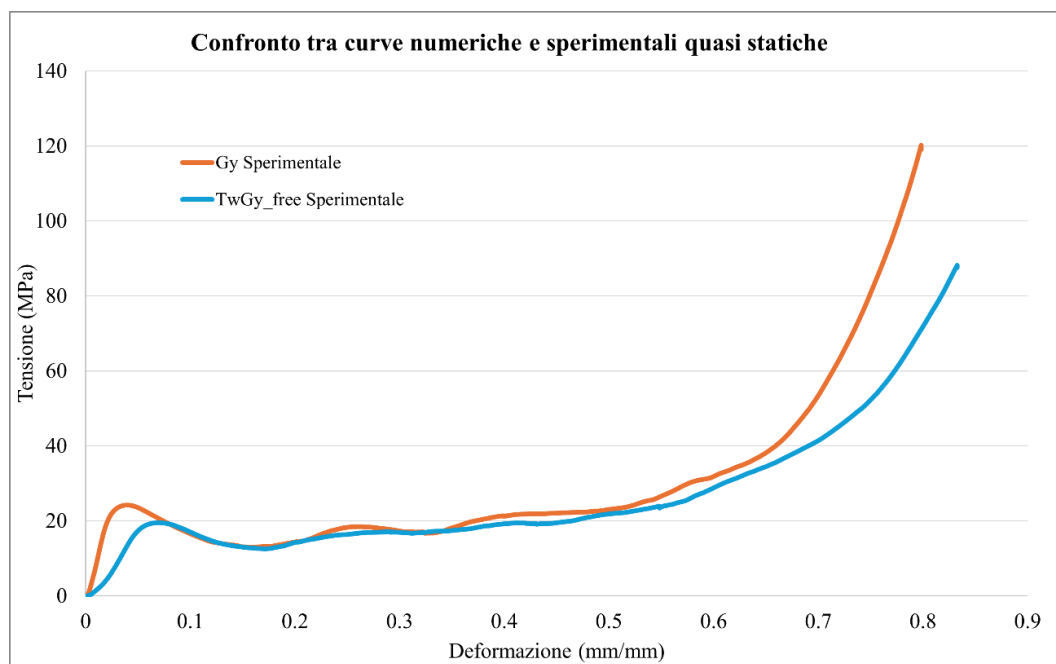


Figura 58 Curve σ - ϵ quasi statiche

Bisogna subito dire che, queste curve andrebbero in qualche modo corrette mediante l'utilizzo di tecniche di analisi di immagine perché durante i primi istanti di deformazione potrebbero insorgere dei problemi legati al contatto tra la cella di carico ed il provino andando quindi a restituire valori non proprio corretti di tensione e di deformazione.

In questo lavoro tale correzione non è stata svolta, ma per quelli futuri che vanno al di là di questo testo, tali correzioni sono state già previste.

È possibile notare dalla Figura 58 come le due curve sostanzialmente risultano essere molto simili dal punto di vista statico ad eccezione per il tratto iniziale che, come è stato già detto, necessita di alcune correzioni, soprattutto per quanto riguarda il test relativo al provino twistato (TwGy_free).

Probabilmente, a seguito del montaggio del provino filettato su di un supporto utile a garantire maggior stabilità al provino, sono nati dei giochi che hanno modificato la curva σ - ε nel tratto suo tratto iniziale.

Una volta ottenuti i risultati dei test sperimentali statici, si è passati all'analisi dei dati ottenuti mediante le prove sperimentali dinamiche eseguite con il sistema barra di Hopkinson. Per non cadere nella ripetitività di alcuni concetti, si sono descritti nel dettaglio i processi di analisi dei risultati di una singola prova. Tale descrizione chiaramente sarà valida per ogni altro risultato ottenuto con questo metodo. I dati delle prove dinamiche sono stati valutati con una frequenza di 1MHz ($1/10^6$ s). Per effettuare un'analisi completa, si prende come riferimento quanto acquisito nel Test 6.

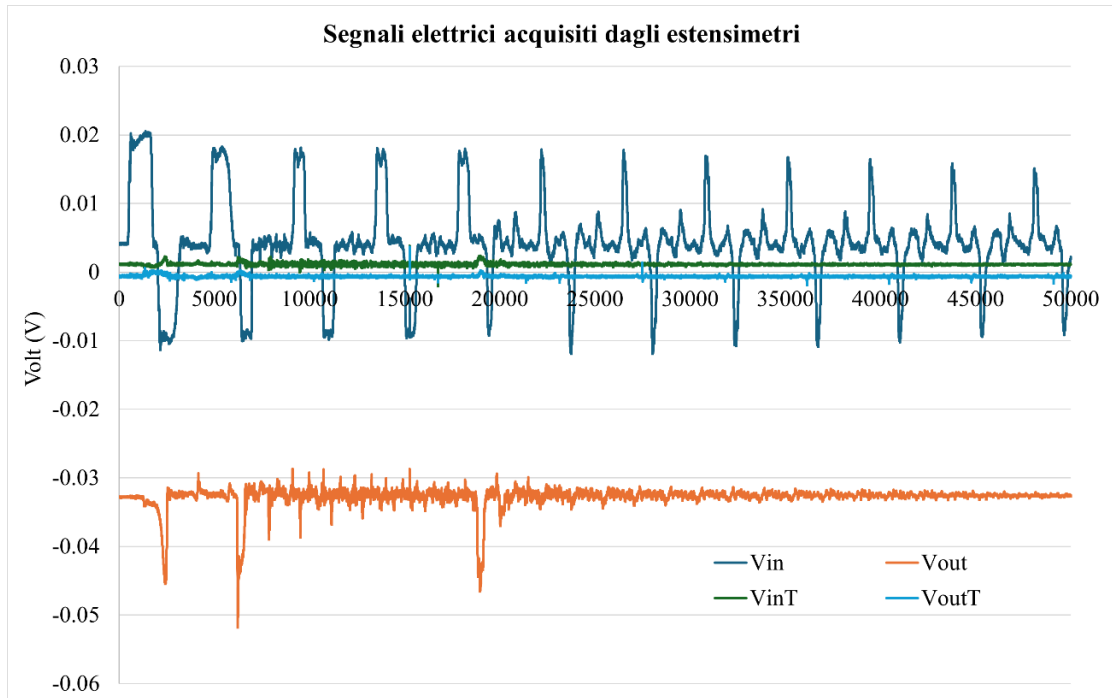


Figura 59 Segnali elettrici acquisiti dagli estensimetri durante la prova

Come mostrato in Figura 59, sono stati acquisiti ben quattro segnali grazie agli estensimetri opportunamente montati lungo le barre.

Due segnali, Vin e Vout, sono stati letti dagli estensimetri assiali mentre VinT e VoutT sono stati letti da quelli torsionali. L'analisi dei risultati si è concentrata sulla prima onda e non sulle onde successive, per questo motivo nella seguente immagine si è limitata la visualizzazione dei segnali.

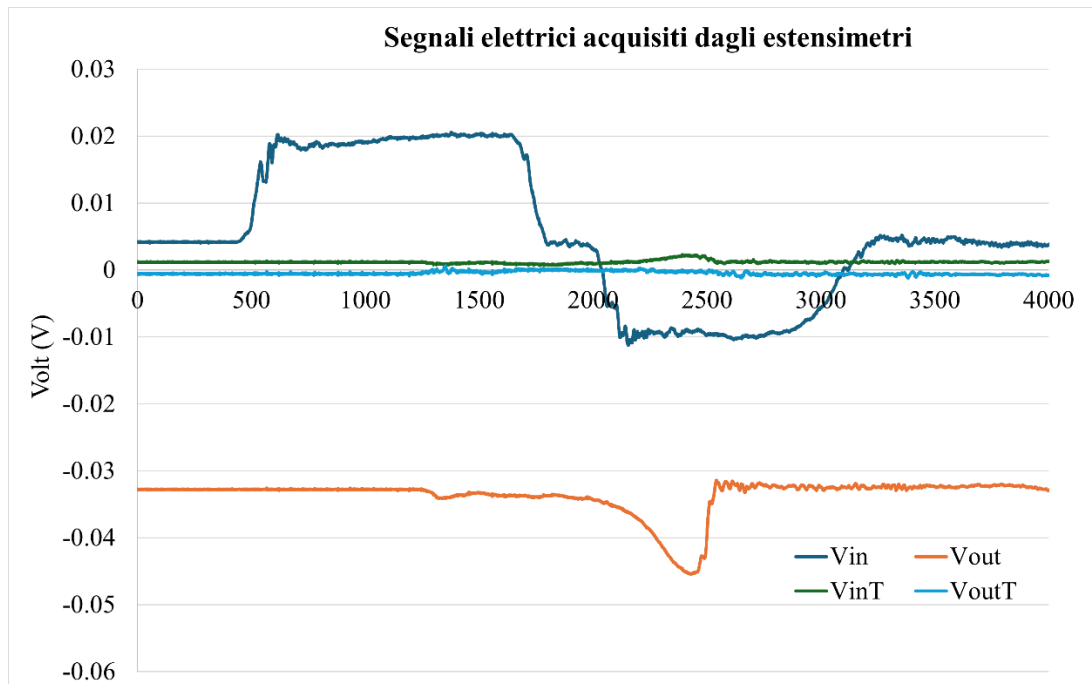


Figura 60 Visualizzazione della prima onda

L'analisi dei risultati è partita dall'interpretazione dei segnali acquisiti dagli estensimetri assiali e in maniera quasi del tutto simmetrica si sono replicate le stesse operazioni per quanto riguarda i segnali torsionali.

Per poter studiare correttamente i segnali ottenuti dagli strumenti di misura, per prima cosa si sono convertiti i segnali elettrici in deformazione mediante l'Equazione 28 così da ottenere dei grafici deformazione-tempo, inoltre questi dati sono stati sincronizzati così da poter essere confrontati tra di loro. La sincronizzazione serve a confrontare nella stessa lunghezza temporale segnali che si manifestano in istanti di tempo differenti.

In secondo luogo, com'è possibile notare in Figura 60, questi segnali non partono dal valore di zero, per cui immediatamente dopo la sincronizzazione si è trovata una soluzione a questo problema.

Come accennato poco fa, i segnali sono stati acquisiti con una frequenza di 1MHz quindi, lungo l'asse delle ascisse si è presa un'unità temporale pari a 10^{-6} s.

La lunghezza d'onda è calcolabile con le seguenti e semplici relazioni.

$$t = \frac{L}{C} = 0.01226s \quad C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 4892.78 \text{ m/s}$$

Equazione 31 Lunghezza d'onda (t) e velocità del suono nel mezzo solido (C)

Con “L” ci si riferisce al doppio della lunghezza della barra pretensionata (quindi 6m), con “C” ci si riferisce alla velocità del suono nel mezzo solido, con “E” e “ρ” come modulo di Young e densità della barra di titanio. La lunghezza è stata calcolata in questa sezione per verificare la correttezza dei risultati ottenuti.

A ciascun valore di tensione intercettato dagli estensimetri è stato associato un valore numerico. Sfruttando le funzionalità di Excel, si è imposto un valore, che verrà indicato con **X**, e si è andati a ricercare il valore di tensione elettrica ad esso relativo.

Questo passaggio è di fondamentale importanza in quanto consente di visualizzare il segnale acquisito dall'estensimetro soltanto a partire dal valore numerico scelto. A tale valore, è stato associato un tempo zero. In questo modo, le curve che descrivono le onde transitive nel mezzo avranno tutte lo stesso punto di partenza.

Per poter azzerare l'ordinata della curva, si è sottratto da ciascun valore di segnale il valore iniziale.

Quello che si è voluto visualizzare per prima cosa, è stata l'onda incidente.

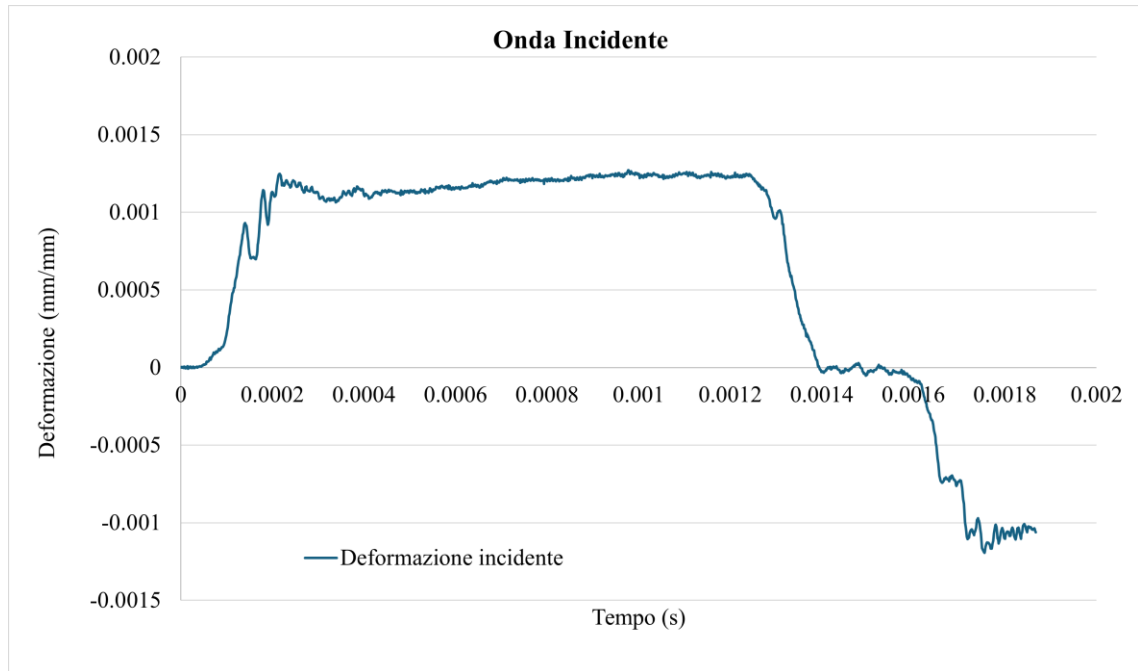


Figura 61 Onda di deformazione incidente

Per quanto riguarda l'onda riflessa il ragionamento seguito è stato analogo ma sono state necessarie delle osservazioni aggiuntive.

Il punto di partenza in cui visualizzare quest'onda è stato individuato sommando a X la lunghezza temporale dell'onda nell'input bar, calcolata come nell'Equazione 31 ma con "L" pari a 7,5 m ed è moltiplicata per 10^6 . Questa moltiplicazione consente di ottenere lo step associato al valore di segnale che si vuole visualizzare. A questa somma viene sottratto un certo coefficiente correttivo, scelto pari a 20.

Quest'operazione ha consentito di rappresentare graficamente l'onda di deformazione riflessa sull'input bar a seguito dell'impatto.

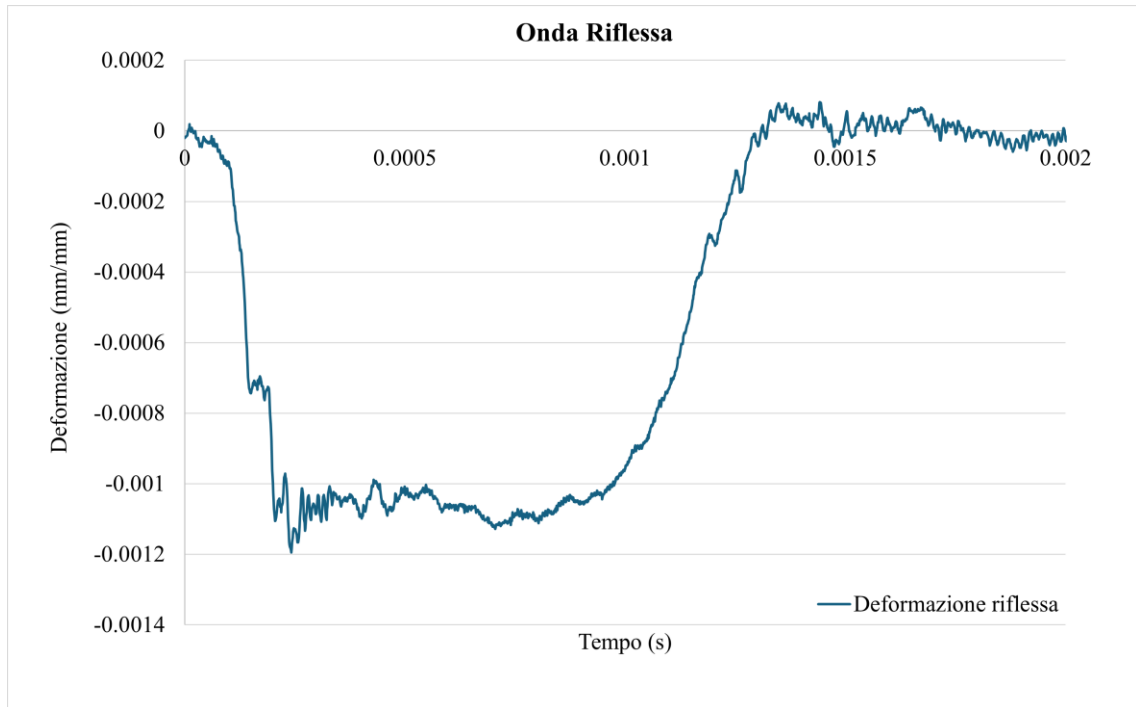


Figura 62 Onda di deformazione riflessa

Infine, per quanto riguarda l'onda trasmessa, si sono svolte operazioni molto simili a quelle precedentemente adottate per l'onda riflessa. Per prima cosa, si è calcolato il numero di step necessari all'onda per andare dall'estensimetro collocato al centro dell'input bar all'estensimetro collocato in prossimità del provino sull'output bar. A questo valore viene sommato **X** ed un altro valore, chiamato **FS** (Fattore di sincronizzazione).

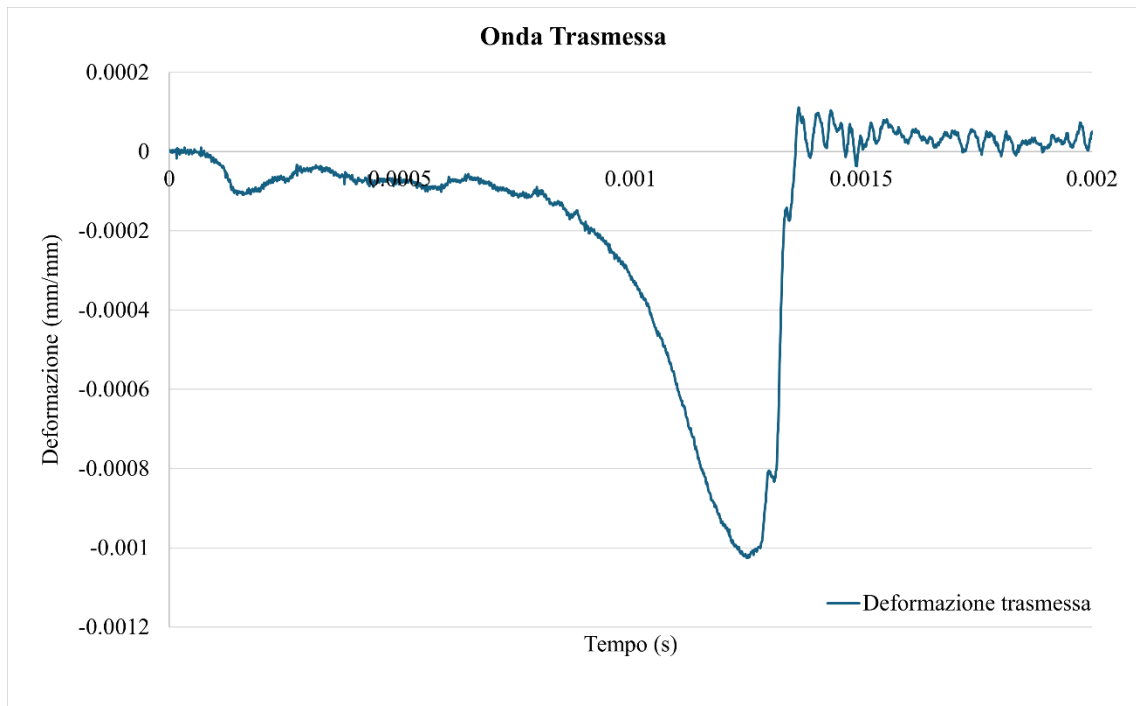


Figura 63 Onda di deformazione trasmessa

Come verifica, il passaggio successivo è stato quello sommare l'onda trasmessa e quella riflessa: l'onda risultante è stata chiamata "onda sincro". La corretta sovrapposizione di queste onde testimonia il fatto che, la prova sperimentale è stata eseguita rispettando le condizioni di equilibrio dinamico in conformità con l'Equazione 19.

L'onda trasmessa descrive il comportamento del materiale.

La sovrapposizione ottimale, è stata ottenuta modificando il parametro **X** e il parametro **FS**.

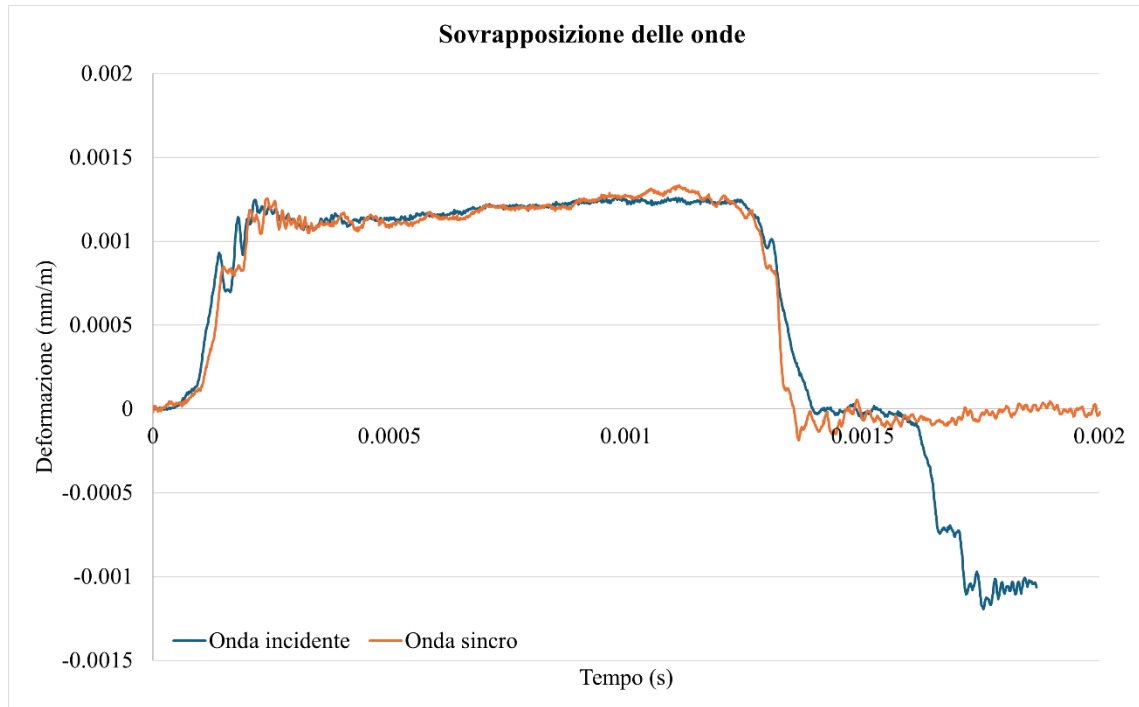


Figura 64 Sovrapposizione delle onde

Dopo avere eseguito la sincronizzazione delle onde lo studio si è concentrato sul calcolo della forza, la tensione, la deformazione e lo strain rate, mediante le relazioni di pagina 46 e 47

Com'è possibile osservare nel seguente grafico, nel momento in cui la tensione raggiunge il valore di snervamento, pari circa a 20MPa, il materiale subisce un addolcimento (softening). Questo è possibile affermarlo in quanto la tensione subisce una diminuzione anche significativa prima di giungere alla fase di plateau che caratterizza questi materiali dei cellulari. È proprio questa fase di plateau a caratterizzare la capacità di assorbimento energetico di questi materiali.

Nel momento in cui la tensione incomincia ad aumentare in maniera più rapida, come descritto precedentemente, si manifesta la fase di densificazione e il materiale non assorbe più energia.

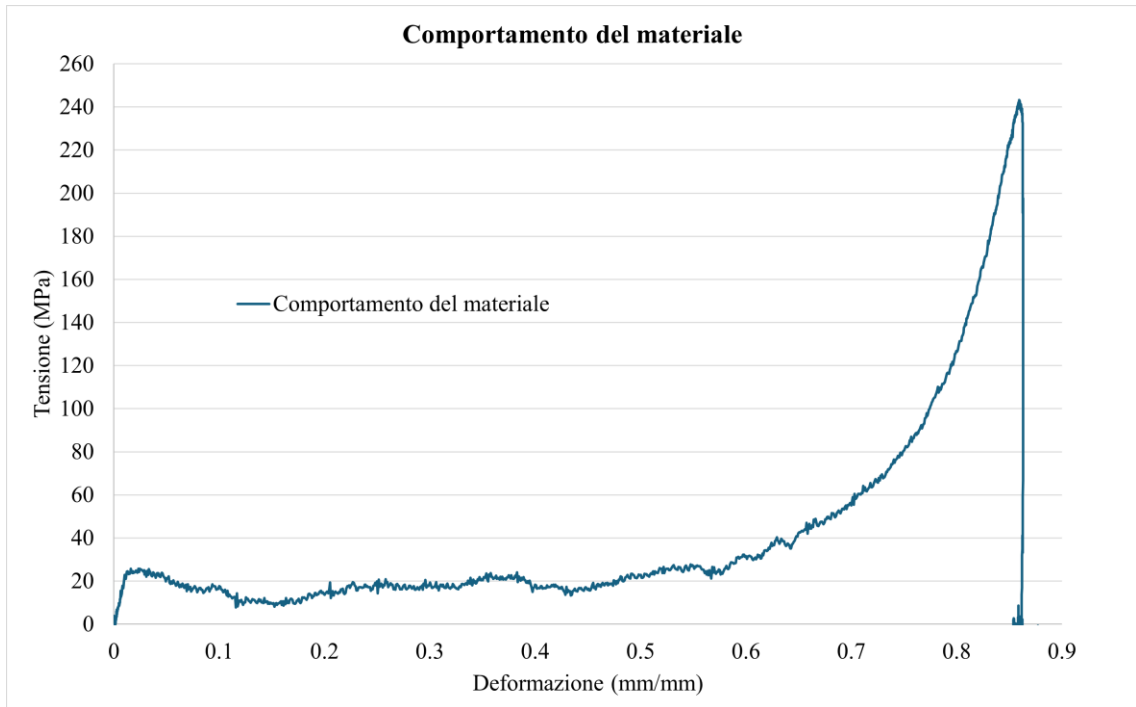


Figura 65 Curva σ - ϵ del provino (Test 6)

Una volta calcolate la σ e la ϵ , si è calcolato anche lo strain rate ossia la velocità con cui il provino si deforma. Tali risultati sono stati rappresentati all'interno di un grafico in cui in ascisse è stata posizionata la deformazione ϵ mentre in ordinata si trova lo strain rate $\dot{\epsilon}$.

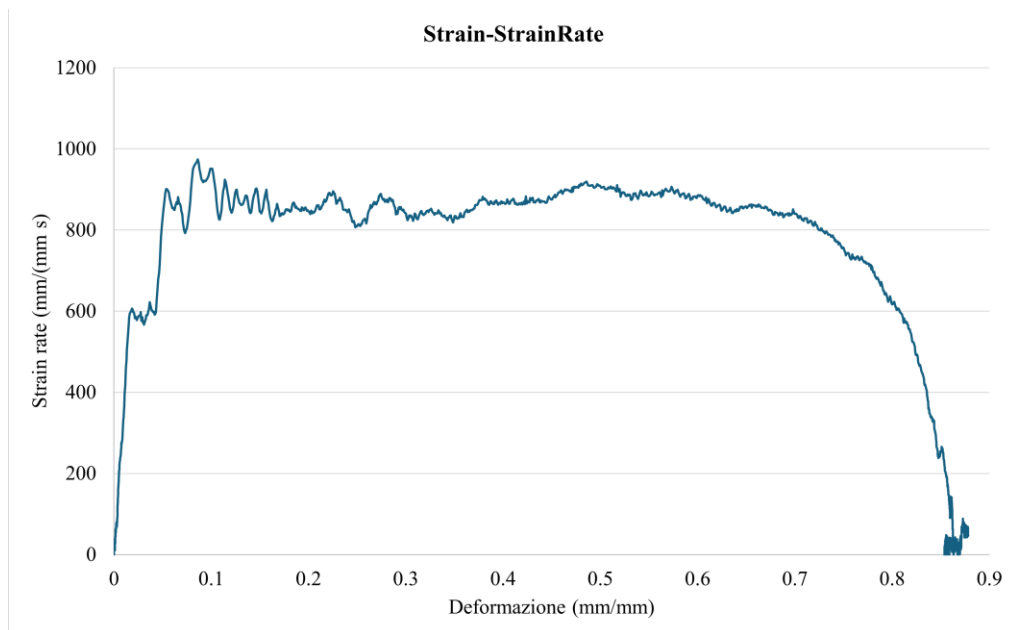


Figura 66 Strain-Strain rate

È possibile notare come lo strain rate non risulta essere costante durante il processo di deformazione, tuttavia in concomitanza con il manifestarsi della fase di plateau, si può affermare che questo parametro si attesta attorno a 900/s come valore medio massimo.

Per quanto riguarda lo studio dei risultati acquisiti mediante gli estensimetri torsionali, le operazioni eseguite sono analoghe al caso precedente con un'unica accortezza legata alle distanze dagli estensimetri. Se nel capitolo precedente si sono definiti degli step calcolati misurando la velocità con cui l'onda attraversa i vari estensimetri, qui si effettua lo stesso ragionamento tenendo però conto che, gli estensimetri torsionali sono posizionati a ridosso del provino sulla barra di input e di output. Questo indica il fatto che le distanze da considerare sono praticamente nulle. Un'altra particolarità di questa casistica riguarda l'assenza di un'onda prima incidente. La torsione, infatti, non viene indotta dal sistema relativo alla barra di Hopkinson ma nasce a causa della geometria del provino stesso.

Durante il processo di deformazione assiale, la geometria del provino restituisce alla barra di input e alla barra di output un segnale di natura torsionale: si sviluppa una coppia all'estremità del provino. L'onda che viene letta come incidente è in realtà la riflessa.

Una volta eseguite tutte le operazioni già precedentemente discusse per il caso assiale, è possibile rappresentare le varie onde di deformazione.

La deformazione in questo caso risulta essere di natura angolare; quindi, nella conversione dal segnale elettrico ad un valore di deformazione si applicherà l'Equazione 29. Anche in questo caso con "onda sincro" si intende la somma tra l'onda riflessa e l'onda trasmessa.

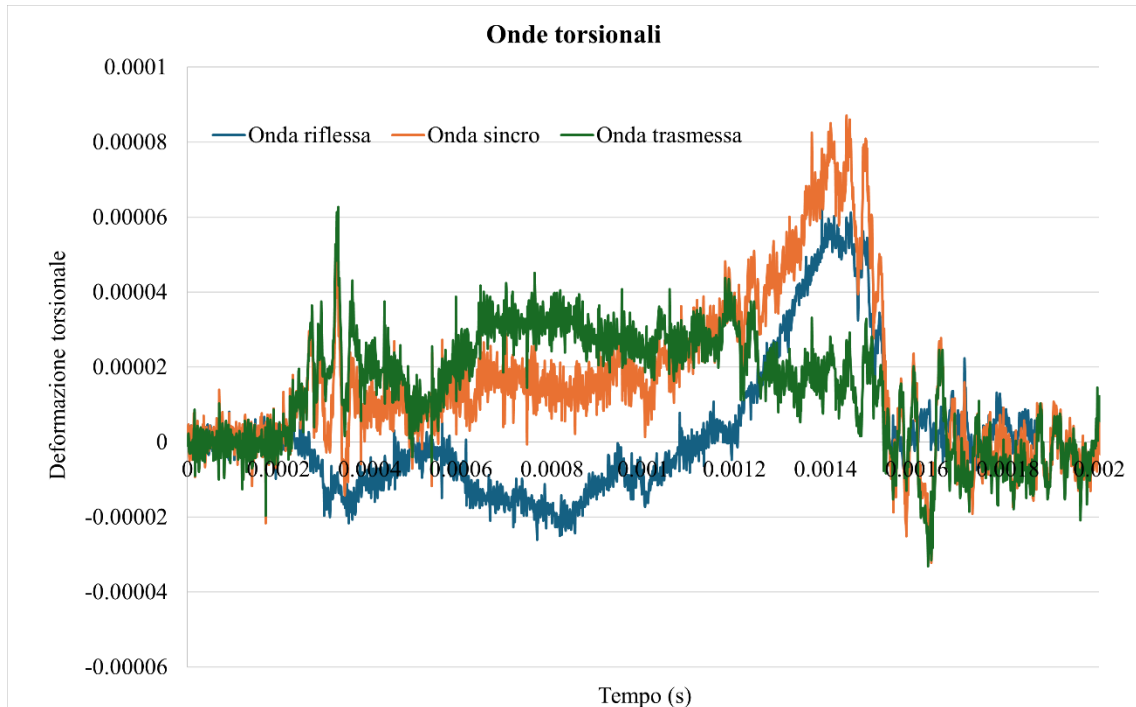


Figura 67 Onde torsionali

Tramite quest'immagine è possibile osservare come l'onda riflessa e quella trasmessa abbiano un andamento uguale e contrario ad eccezione di alcuni picchi iniziali. Quanto appena detto risulta valido fino al raggiungimento di un tempo pari a 0.0012 s: superato questo istante le curve assumono andamenti molto diversi tra loro andando ad inficiare sull'equilibrio dinamico. Si può affermare quindi che l'equilibrio dinamico alla torsione viene mantenuto fino al secondo 0.0012, momento in cui l'onda di deformazione riflessa e quella trasmessa assumono comportamenti molto diversi tra loro.

Dopo aver convertito i segnali elettrici in deformazioni angolari e dopo aver sincronizzato le onde, è necessario calcolare il momento torcente agente sull'output bar, la tensione tangenziale, la deformazione e lo strain rate torsionale.

Queste osservazioni hanno necessitato una reinterpretazione delle relazioni presenti a pagina 46 e 47.

Per prima cosa, la deformazione angolare ε_{xy} dalla scienza delle costruzioni equivale a:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma}{2} \rightarrow \gamma = 2 \cdot \varepsilon_{xy}$$

Equazione 32 Deformazione angolare

Definita ε_{xy} , è possibile calcolare il momento torcente e la tensione tangenziale definendo il modulo di taglio G e il modulo di resistenza W_t .

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad [MPa] \qquad W_t = \frac{\pi \cdot d_b^3}{16} \quad [mm^3]$$

$$Mt = \frac{2 \cdot G \cdot \varepsilon_{xy} \cdot \pi \cdot d_b^3}{16} = G \cdot \gamma \cdot W_t \quad [N \cdot mm]$$

$$\tau = \frac{Mt}{W_t} = G \cdot \gamma \quad [MPa]$$

Equazione 33 Relazioni utilizzate per l'analisi delle onde torsionali (G modulo di taglio, W_t modulo di resistenza a torsione, Mt momento torcente e τ tensione tangenziale)

Grazie a queste relazioni si sono calcolati i risultati di partenza da cui poi si è sviluppata l'analisi delle onde torsionali.

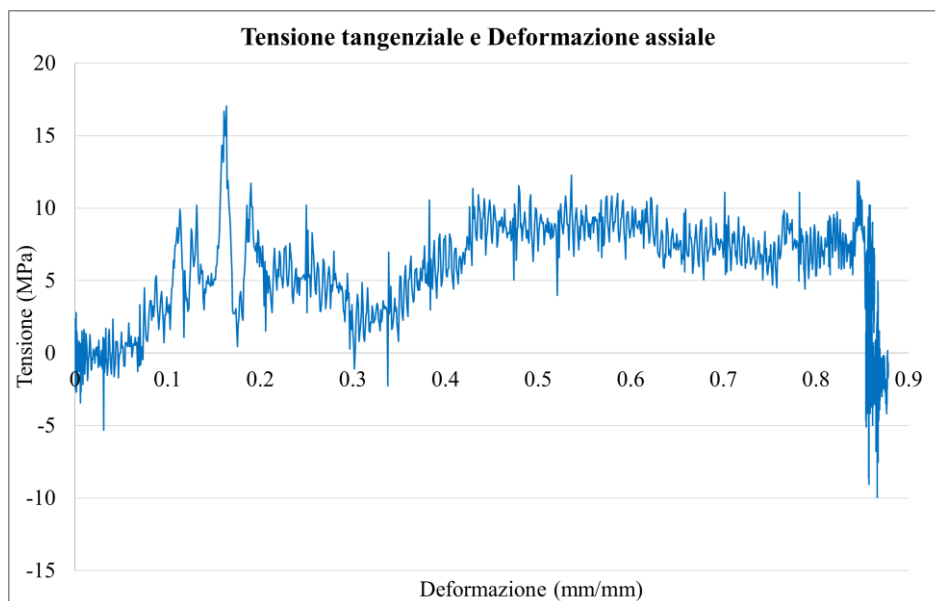


Figura 68 Andamento della tensione tangenziale al variare della deformazione

Com'è possibile osservare, le tensioni tangenziali agenti sul provino all'avanzare della deformazione si attestano attorno ai 10 MPa, ad eccezione di un picco di 15 MPa che si ha dopo una deformazione del 20%.

Un dato interessante che si è deciso di ricavare da queste onde è quello relativo alla ad eventuali rotazioni subite dal provino durante lo schiacciamento.

Analizzando le immagini in Figura 60, come già affermato, non è stato possibile osservare eventuali rotazioni subite dal provino.

Si è deciso di calcolare la rotazione subita dal provino nell'interfaccia con l'input bar (ϑ_1) e con l'output bar (ϑ_2). Le relazioni utilizzate sono le seguenti.

$$\vartheta_1 = \frac{2 \cdot C_s}{D_b} \cdot \int_0^t [\gamma_i(t) - \gamma_r(t)] dt = \frac{4 \cdot C_s}{D_b} \cdot \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)] \quad [rad]$$

$$\vartheta_2 = \frac{2 \cdot C_s}{D_b} \cdot \int_0^t \gamma_t(t) dt = \frac{4 \cdot C_s}{D_b} \cdot \int_0^t \varepsilon_t(t) dt \quad [rad]$$

Equazione 34 Rotazioni subite dalle facce del provino

Dove con C_s si intende la velocità di taglio ed è calcolabile come $\sqrt{G/\rho}$ mentre con D_b si intende il diametro della barra.

Noti questi valori angolari, è stato possibile calcolare la deformazione angolare subita dal provino mediante.

$$\gamma_s = \frac{r_s \cdot [\vartheta_1 - \vartheta_2]}{L_s} = \frac{2 \cdot D_s \cdot C_s}{L_s \cdot D_b} \cdot \int_0^t \gamma_r(t) dt = \frac{4 \cdot D_s \cdot C_s}{L_s \cdot D_b} \cdot \int_0^t \varepsilon_r(t) dt$$

Equazione 35 Deformazione angolare subita dal provino

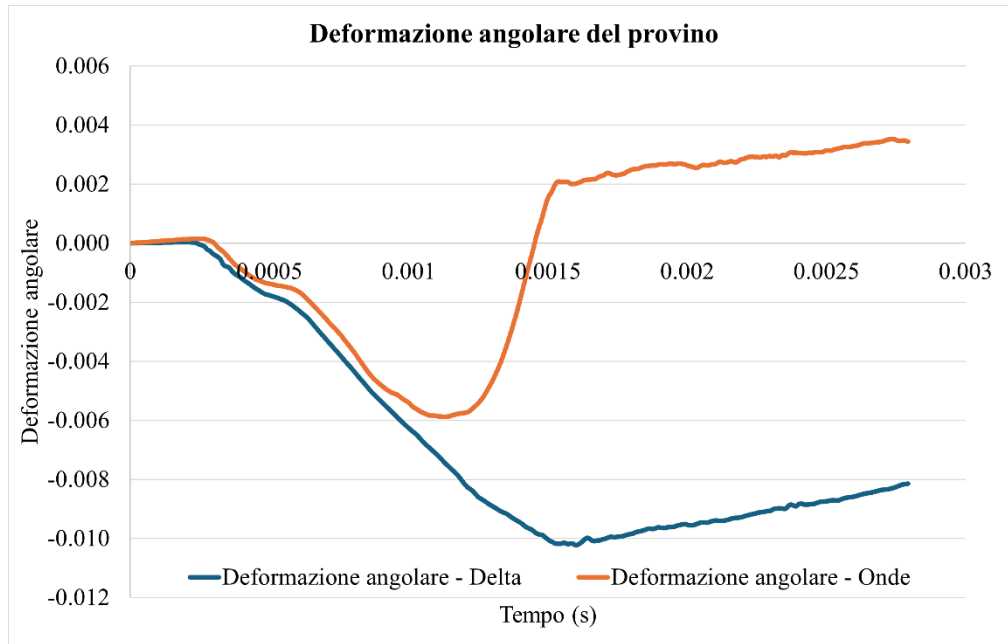


Figura 69 Andamento della deformazione angolare nel tempo

Le due curve rappresentano entrambe il modo con cui si deforma dal punto di vista angolare, “Delta” è calcolata come differenza tra gli angoli come nella prima parte dell’Equazione 35 mentre “Onde” la si calcola sfruttando l’onda riflessa.

Le due curve, anche in questo caso divergono in particolar modo una volta superato l’istante temporale $t=0.0012$ circa: questo dimostra nuovamente come l’equilibrio dinamico alla rotazione, ad un certo punto non è più garantito.

Successivamente si è voluto calcolare, in gradi, quale fosse la differenza di rotazione tra le due estremità del provino (θ).

La conversione da radianti in gradi la si effettua mediante la seguente relazione.

$$\pi: 180 = rad: grad \rightarrow grad = \frac{180 \cdot rad}{\pi}$$

Equazione 36 Conversione da radianti a gradi

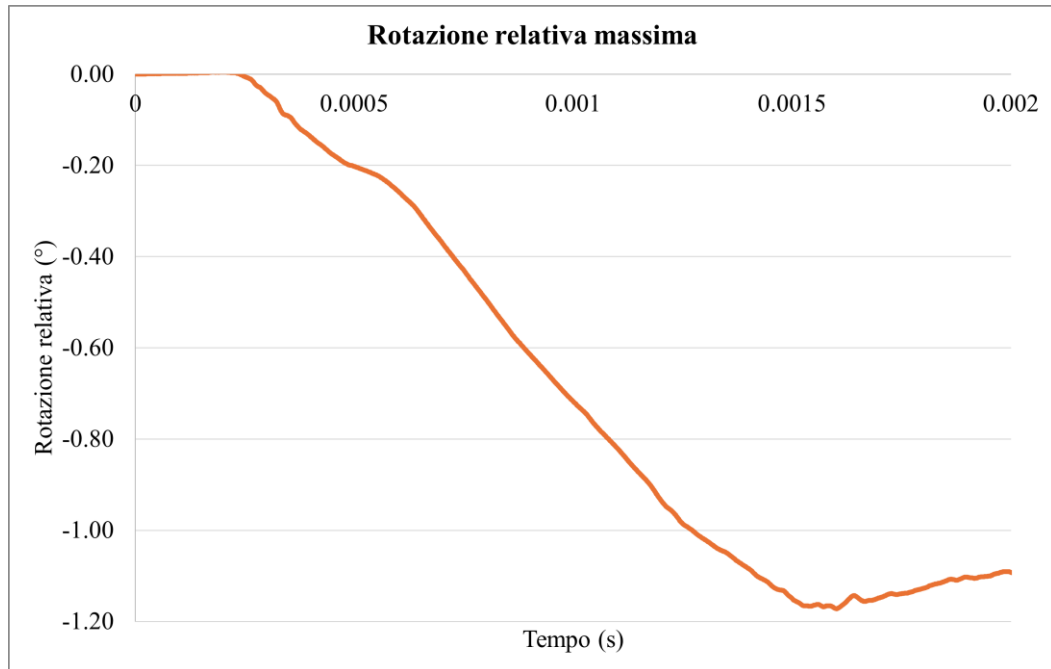


Figura 70 Rotazione relativa in gradi

Come detto precedentemente, ad occhio nudo non era stato possibile comprendere se il provino avesse subito o meno una rotazione essendo avvitato sia alla barra di input che alla barra di output; tuttavia, analizzando i risultati ottenuti è possibile osservare che il campione subisce una rotazione pari circa a 1.2° .

Per terminare questa parte di analisi, si è voluto confrontare la rotazione relativa subita con la variazione di lunghezza del provino.

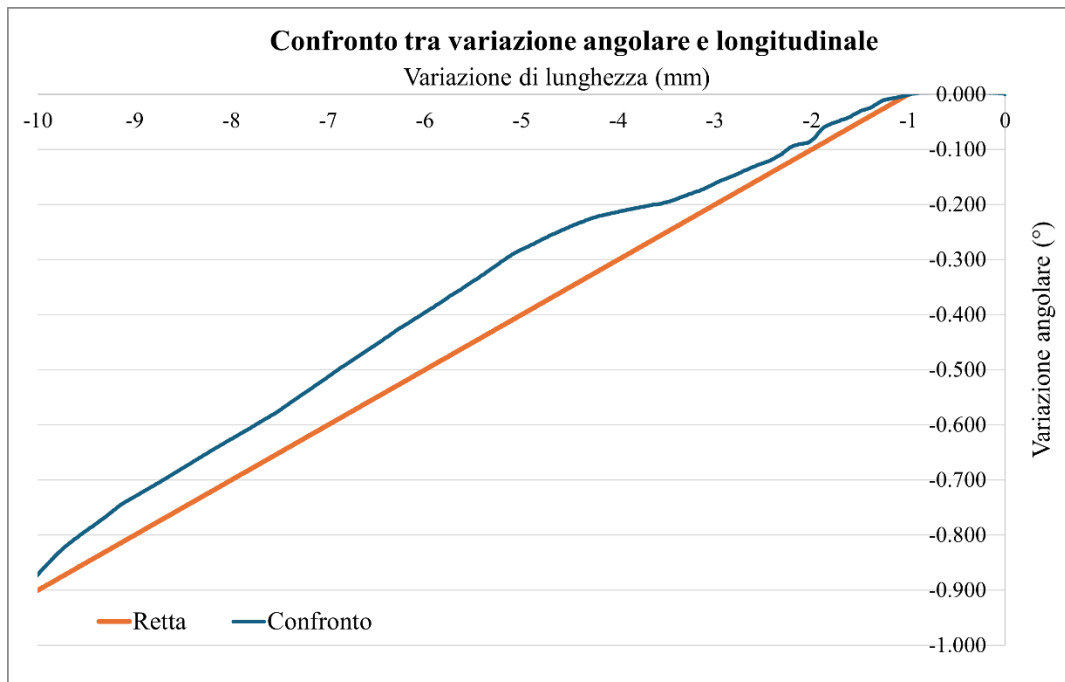


Figura 71 Confronto tra variazione angolare e longitudinale

Il rapporto che intercorre tra la variazione di lunghezza e la variazione angolare è piuttosto rettilineo a dimostrazione del fatto che queste due grandezze in questi provini risultano essere interconnesse tra loro in maniera lineare.

L'ultima parte di analisi riguarda l'argomento cardine dell'intero lavoro di tesi svolto, ossia si vuole studiare quanta energia è stata assorbita dal provino a seguito dell'impatto avvenuto all'interno del sistema "barra di Hopkinson".

Come accennato nel capitolo introduttivo, la strategia scelta per poter valutare l'assorbimento energetico è quella relativa alla massima efficienza.

Grazie ai risultati ottenuti mediante le operazioni svolte nei capitoli precedenti, i risultati più importanti che occorre utilizzare sono quelli relativi alle tensioni (σ e τ) e alle deformazioni (ϵ e γ).

Utilizzando le relazioni di pagina 8 e 9, è stato possibile calcolare quindi il valore di efficienza massimo, il quale consentirà di definire anche il valore di deformazione di densificazione.

Nel calcolo dell'efficienza, si è sempre considerato il massimo valore di tensione in accordo con la letteratura, visto che il materiale subisce un addolcimento una volta superato il valore di snervamento.

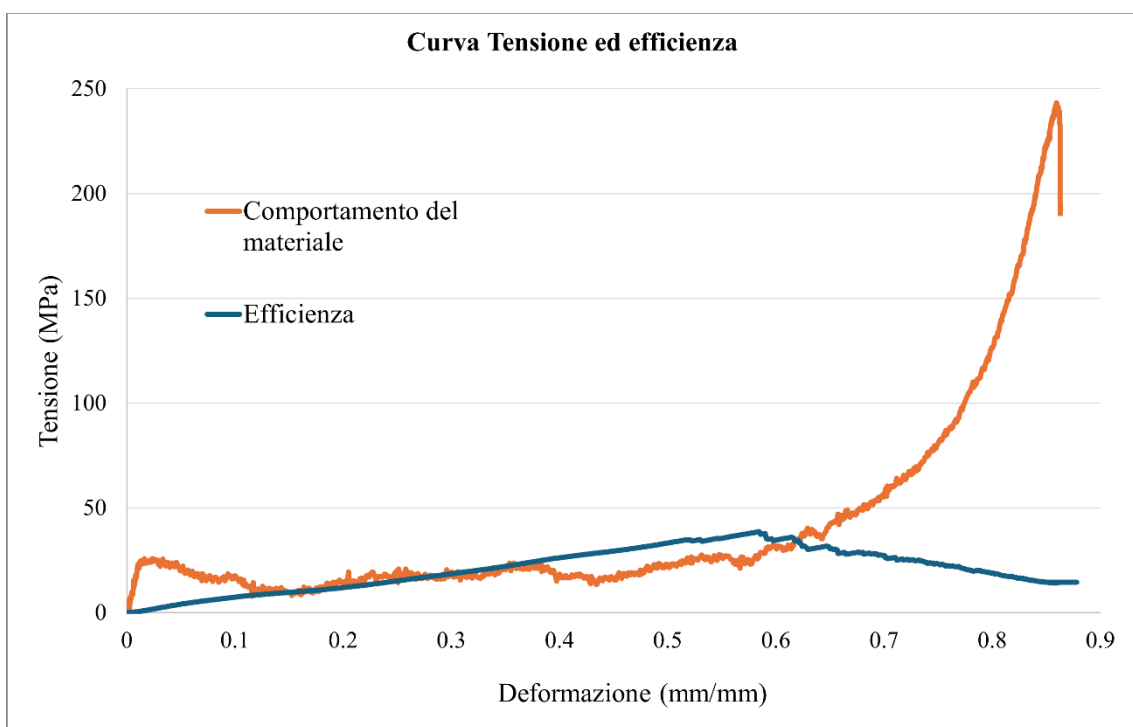


Figura 72 Diagramma tensione ed efficienza

I valori di efficienza e di deformazione di densificazione vengono riportati nella seguente tabella.

Dati	Valori	Unità di misura
η_{max}	38.59	/
ϵ_{cd}	0.58	/
W	10.68	J
SEA	13.61	J/g

Tabella 18 Risultati dello studio inerente all'assorbimento energetico del test 6

Per concludere il discorso legato alle prove dinamiche, attraverso la Figura 73 è possibile osservare le curve σ - ϵ ottenute mediante la rielaborazione dei risultati acquisiti dagli estensimetri collocati lungo la barra di input e di output.

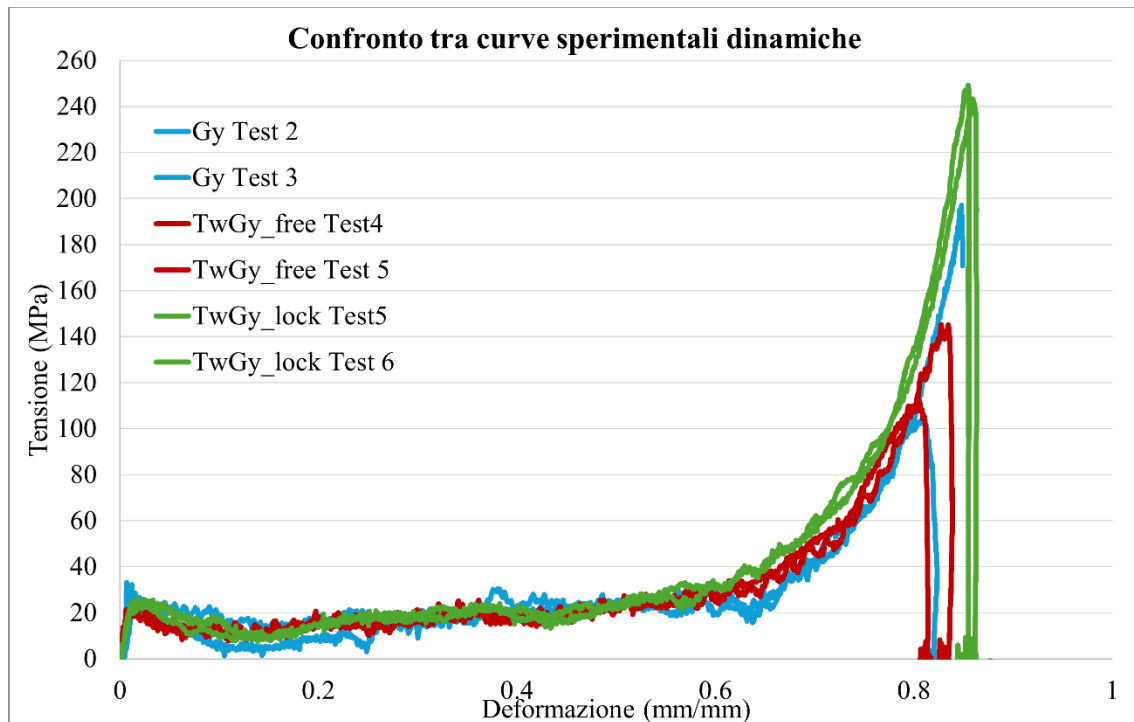


Figura 73 Confronto tra curve σ - ϵ sperimentali dinamiche

È possibile osservare che, pur modificando la configurazione geometrica del provino o il modo con cui esso viene vincolato al sistema della barra di Hopkinson, il comportamento del materiale risulta essere piuttosto simile in tutte e sei le prove svolte.

La differenza più marcata la si trova nel massimo valore di tensione raggiunto al termine della prova, tuttavia ai fini dell'assorbimento energetico, questo dato assume poca importanza. In tutte e tre le casistiche è presente il fenomeno del softening, in italiano addolcimento, in quanto con il procedere della deformazione la tensione inizialmente subisce un calo. Questo fenomeno è più o meno marcato a seconda del test osservato.

3.2 Risultati numerici

Visto che riportare singolarmente le curve ottenute per ciascuna simulazione risultava essere di poco interesse in termini di analisi, queste sono state accorpate all'interno di un singolo grafico così da poter effettuare un confronto tra i risultati numerici ottenuti.

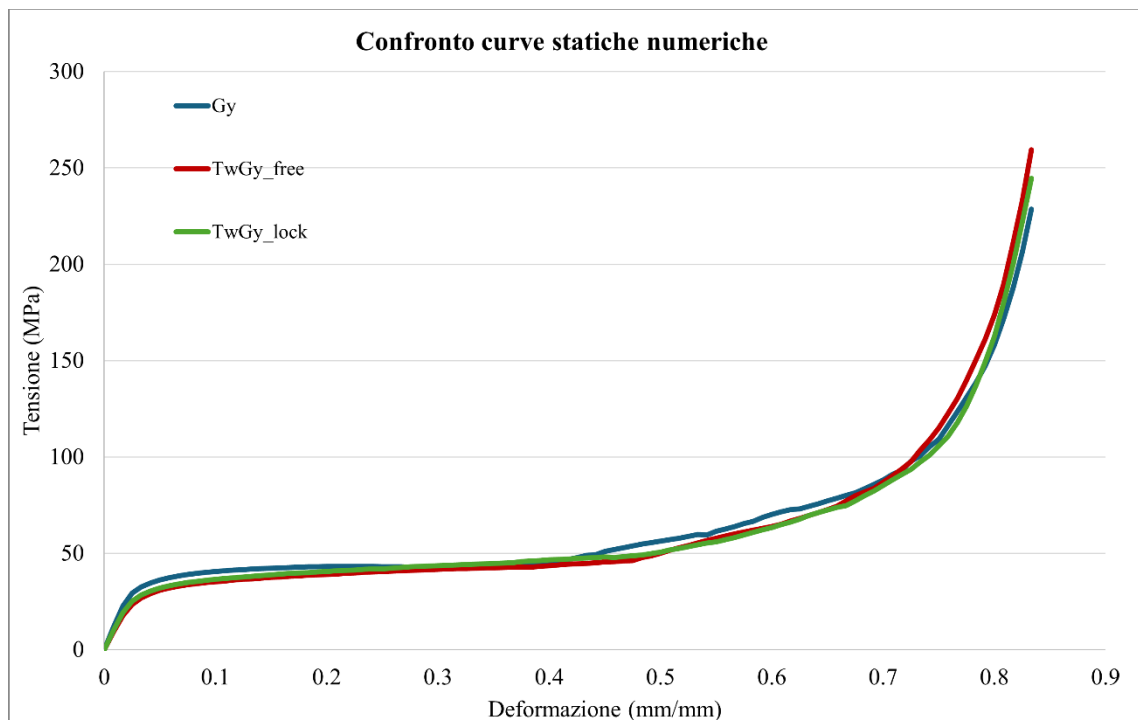


Figura 74 Grafico riassuntivo delle curve σ - ϵ delle prove quasi statiche

Com'è possibile osservare queste curve risultano essere molto simili tra di loro, cosa assolutamente prevedibile.

La curva del giroide NON twistato risulta essere più alta durante la fase di plateau, probabilmente a causa della sua conformazione geometrica che lo rende più rigido rispetto alla controparte twistata.

L'utilità di queste curve quasi statiche risiede nel confronto che ne verrà fatto successivamente quando si avranno a disposizione anche le curve dinamiche.

In questo modo sarà possibile osservare come gli effetti dinamici modificano il comportamento del materiale.

Come fatto con le curve numeriche statiche viene ripetuto anche per le curve dinamiche come mostra la Figura 75.

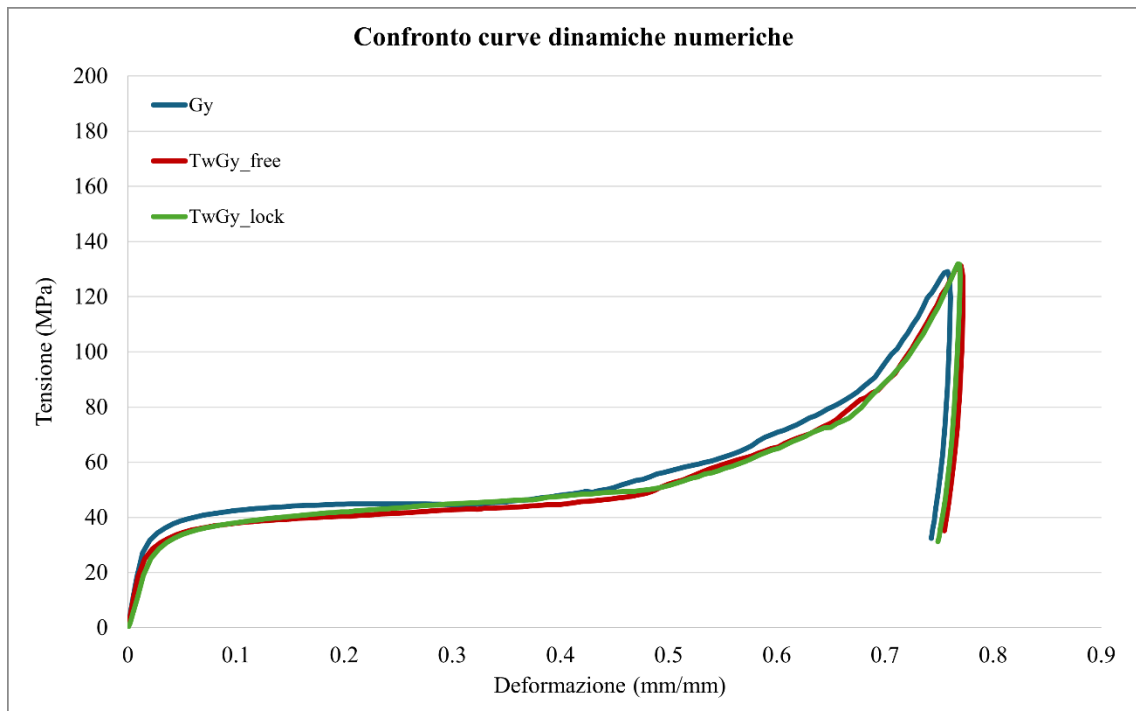


Figura 75 Confronto tra curve numeriche dinamiche

Il comportamento dinamico descritto da queste tre simulazioni non offre particolari spunti di riflessione, se non fosse che effettivamente risultano essere molto simili tra loro.

Il provino non twistato (Gy) ha addirittura una curva leggermente più alta di quelle che è possibile ottenere tramite il provino twistato. Questo probabilmente è dovuto al fatto che la conformazione non twistata risulta essere più rigida rispetto alla configurazione twistata.

Ponendo a confronto le curve numeriche statiche e dinamiche ottenute dalle simulazioni si vuole osservare in che modo lo strain rate influenza il comportamento del materiale.

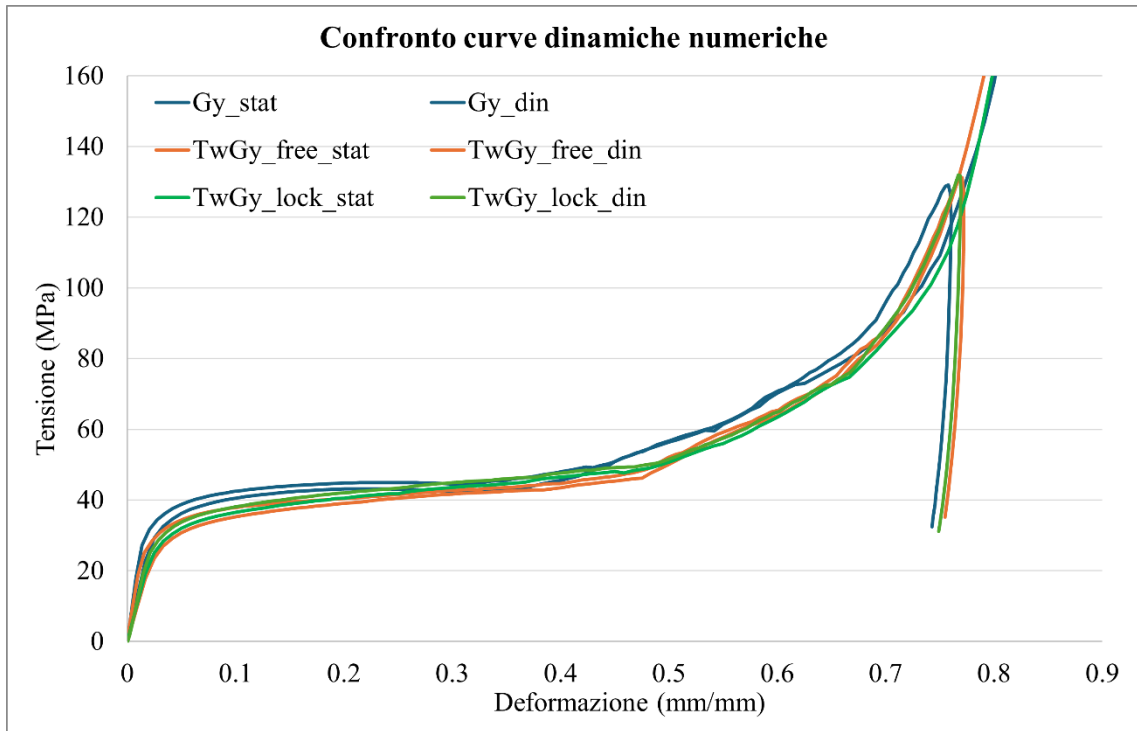


Figura 76 Confronto tra curve numeriche statiche e dinamiche

La sensibilità allo strain rate è bassa visto che queste curve numeriche sono praticamente sovrapposte.

3.3 Confronto numerico-sperimentale

In questo capitolo verranno poste a confronto le varie curve ottenute dalle simulazioni e dalle prove sperimentali per poter capire se quanto svolto dal punto di vista numerico risulta essere confrontabile con ciò che avviene nella realtà. Si parte con il confronto tra le curve numeriche e le curve sperimentali statiche.

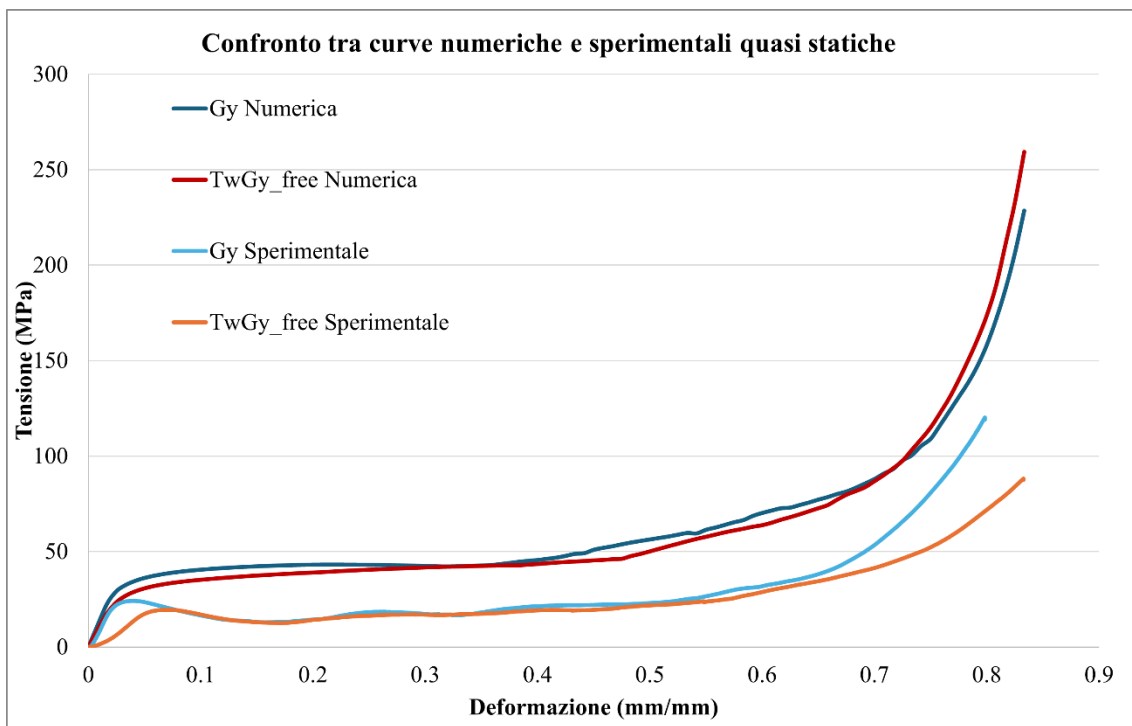


Figura 77 Confronto tra curve statiche numeriche e sperimentali

La Figura 77 mostra un confronto tra le curve ottenute mediante le simulazioni e le curve ottenute a seguito dello studio dei dati sperimentali ottenuti dai diversi test quasi statici. Le curve numeriche ottenute dalle simulazioni sono più alte rispetto a quelle sperimentali. Le cause possono essere differenti: la discretizzazione del provino potrebbe non essere sufficientemente accurata da descrivere correttamente il comportamento del provino durante la fase di compressione, il modello utilizzato per descrivere il comportamento del materiale non è in grado di farlo con precisione oppure potrebbero essersi verificati dei problemi durante la fase di caratterizzazione del materiale.

Successivamente si è passati a confrontare le curve dinamiche e quello che si è ottenuto risulta essere molto simili a quanto osservato con le curve statiche. È presente una differenza piuttosto marcata tra le due tipologie di curve. Questo risultato è stato piuttosto inaspettato e verrà discusso più approfonditamente nel capitolo conclusivo.

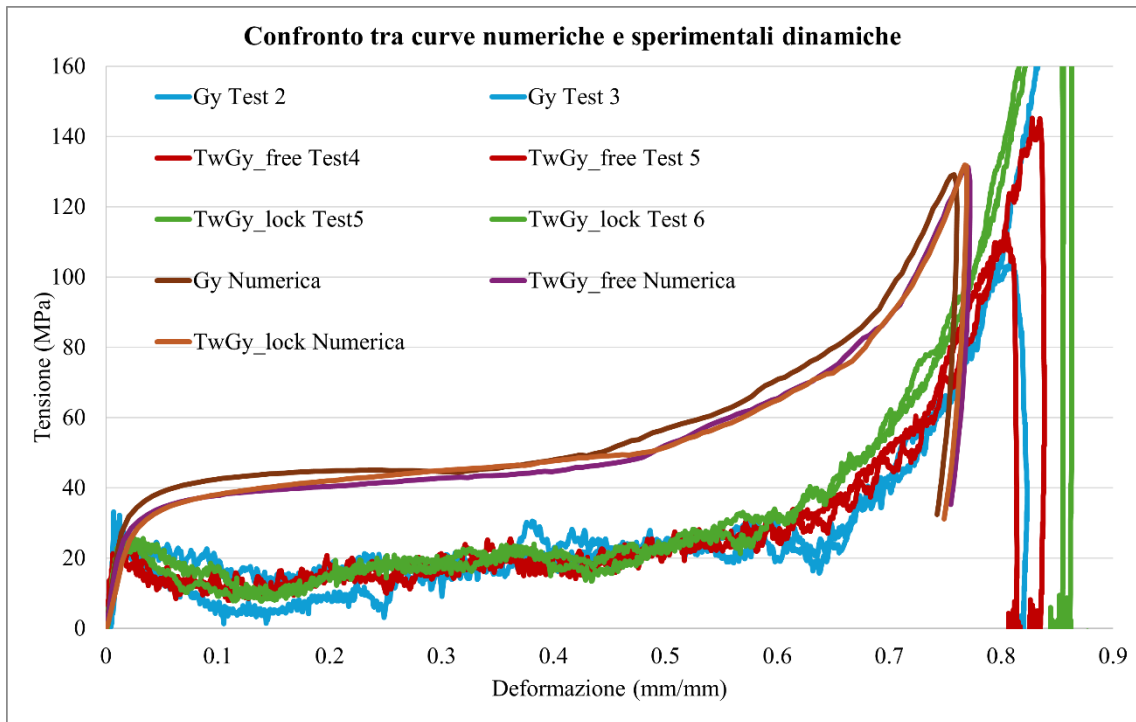


Figura 78 Confronto tra curve statiche numeriche e sperimentali

I risultati numerici ottenuti quindi non sono in grado di descrivere correttamente quanto visto sperimentalmente; quindi, questo comporta ulteriori modifiche al modello numerico prima di poter effettuare con un'elevata ripetibilità i test sperimentali e dinamici svolti già in questo lavoro. Ad un'occhiata rapida pare come se le curve numeriche descrivessero valori di tensione doppi rispetto a quelli descritti dalle curve sperimentali.

Il confronto numerico sperimentale ha fatto sorgere questa problematica, tuttavia l'analisi energetica risulta essere corretta ma viene confinata solo all'analisi di quanto ricavato mediante le curve sperimentali.

Capitolo quarto

CONCLUSIONE

Come già accennato, le curve numeriche sono molto diverse dalle curve sperimentali e le motivazioni possono essere variegate. Si potrebbe pensare a fenomeni di instabilità, ma questi sono stati trascurati per il semplice fatto che i provini, per come sono realizzati non presentano questa problematica. Si potrebbe pensare al modello utilizzato per descrivere il comportamento del materiale; tuttavia, è stato osservato in altri studi che il modello Johnson and Cook funziona correttamente. Quello che non è stato considerato probabilmente, è stato il meccanismo di danneggiamento del materiale. Questo fenomeno riscontrato anche in altri studi svolti all'interno dell'università è caratterizzato da un abbassamento delle curve numeriche una volta superato il valore di snervamento (ma a volte accade che questo abbassamento si verifichi anche prima del raggiungimento del picco numerico). Probabilmente questo fenomeno di danneggiamento è associabile ad un difetto di stampa. In uno studio svolto nei laboratori dell'università su un materiale plastico, si è osservato come alcuni strati di materiale stampato possono staccarsi quando subiscono un'elevata deformazione. È come se i vari fogli di materiale stampati, superato un certo valore di tensione incomincino a separarsi tra di loro. Questo causa un forte abbassamento del picco delle curve e caratterizza in particolar modo la fase di softening successiva al picco stesso.

Se il materiale fosse stato stampato in maniera perfetta, il comportamento del giroide sarebbe stato molto più simile al risultato numerico ottenuto.

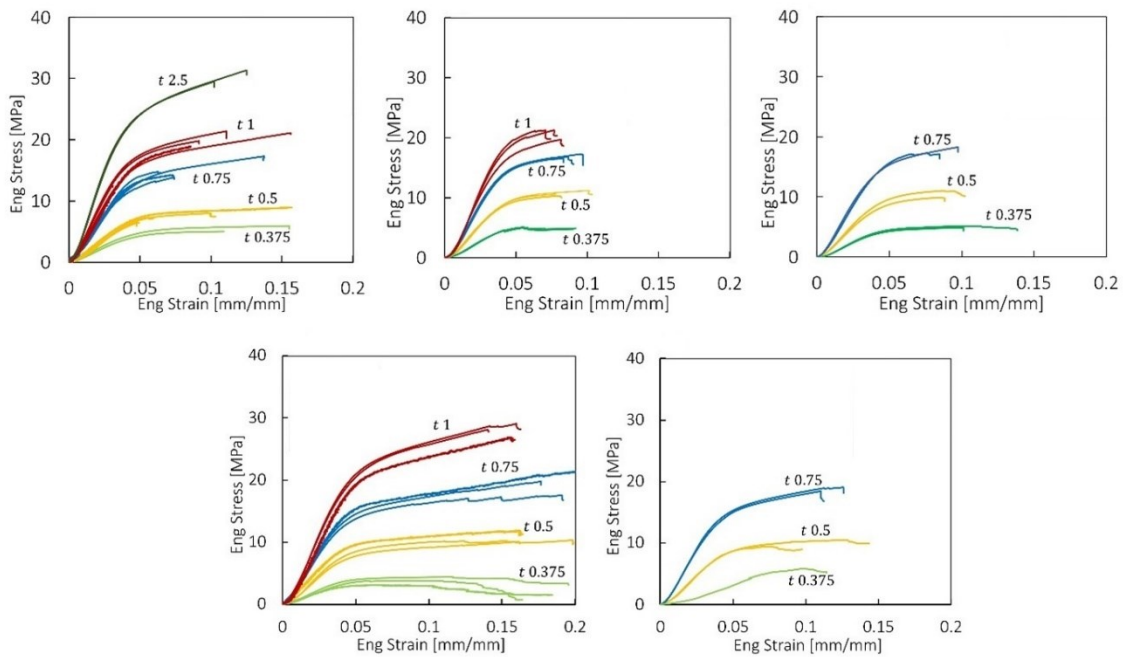


Figura 79 Risultati sperimentali ottenuti in altre prove

Osservando la Figura 79, è possibile osservare come le curve sperimentali ottenute in altri studi interni all'università siano molto simili, come andamento, alle curve numeriche ottenute in questo studio.

Dal punto di vista energetico invece, i principali risultati sono stati raccolti all'interno della Tabella 19, dalla quale si diramerà l'intera discussione di essi. Si sono voluti riportare l'efficienza massima (η_{max}), la deformazione critica di densificazione (ϵ_{cd}), la tensione di picco (σ_p), l'energia assorbita massima (W_{max}) e l'energia specifica assorbita (SEA). Con tensione di picco si intende la tensione massima prima del plateau (o la fase di softening come accade nelle prove sperimentali)

	Statiche				Dinamiche					
	Test	Gy	TwGy_free	TwGy_lock	Gy Test 1	Gy Test 2	TwGy_free Test 3	TwGy_free Test 4	TwGy_lock Test 5	TwGy_lock Test 6
Numeriche	η_{max}	40.47	39.29	40.92	40.77		39.58		41.4	
	ϵ_{cd} (mm/mm)	0.675	0.61	0.57	0.56		0.48		0.65	
	σ_p (MPa)	29.8	26.94	28.34	36.24		32.42		32.5	
	Wmax (J)	32.97	25.59	23.81	9.62		19.27		30.09	
	SEA (J/g)	41.99	32.6	30.33	12.25		24.55		38.33	
	Sperimentali	η_{max}	39.71	38.75	Non eseguito	33.59	44.34	36.45	35.61	38.46
ϵ_{cd} (mm/mm)		0.52	0.56	0.67		0.67	0.65	0.61	0.584	0.62
σ_p (MPa)		24.2	19.5	32.2		26.85	24	22.1	25.7	23.7
Wmax (J)		9.62	9.46	9.2		13.74	12.36	10.66	10.68	12.18
SEA (J/g)		12.25	12.05	11.71		17.5	15.75	13.58	13.57	15.52

Tabella 19 Risultati finali

Tutti questi risultati sono stati ottenuti attraverso le relazioni e i ragionamenti esposti nei capitoli precedenti. Il provino twistato con rotazione bloccata non è stato testato sperimentalmente dal punto di vista statico per mancanza di tempo e maggior complessità della prova. Sarà testato successivamente in altri lavori.

Com'è possibile notare in Tabella 19 i valori di SEA ottenuti attraverso lo studio dei risultati sono confrontabili tra loro. Quindi dal punto di vista energetico, twistando o meno il provino si ottiene lo stesso assorbimento energetico. Tuttavia, anche se questo risultato è diverso dall'aspettativa iniziale, è stato possibile effettuare delle osservazioni interessanti ponendo a confronto il valore di SEA e di tensione di picco.

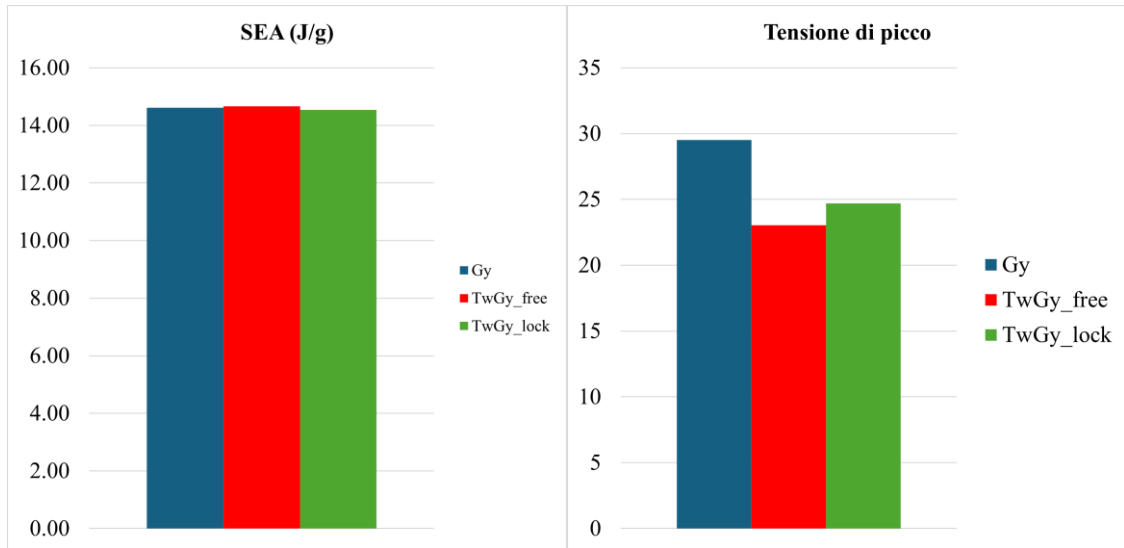


Figura 80 Valutazioni inerenti al SEA e al sigma di picco

Nella Figura 80 sono stati riportati i valori medi di SEA e σ_p ottenuti attraverso l'analisi dati delle prove sperimentali e basta a causa della diversità dei risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche. Il valore di SEA medio oscilla tra 14.54 per il provino twistato con rotazione bloccata e 14.66 per il provino twistato con rotazione libera. La differenza tra questi due valori è minima, tuttavia è interessante osservare la diversità delle tensioni di picco.

A parità (circa) di SEA, la tensione di picco varia di diversi Mega Pascal e questo è un risultato molto importante.

A parità di energia specifica assorbita varia in maniera anche rilevante la forza che viene trasmessa all'oggetto che si vuole proteggere mediante l'assorbitore d'urto.

Confrontando il provino non twistato (Gy) con gli altri provini è lampante osservare come esso abbia una tensione di picco piuttosto elevata. Facendo due calcoli velocemente, è possibile notare come la tensione di picco del provino Gy sia superiore a quella del provino TwGy_free del 20/22%. Questo significa che la forza subita da un oggetto

protetto attraverso un assorbitore d'urto realizzato usando la tecnologia di TwGy_free è inferiore rispetto a quella che si otterrebbe utilizzandone uno con la tecnologia di Gy.

Questo valore di σ_p del provino TwGy_free è inferiore pure a quello calcolato per TwGy_lock, anche se tale differenza è ridotta rispetto al caso precedente (4%).

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di testare come sia possibile incrementare l'assorbimento energetico realizzato da materiali già abbastanza evoluti. Infatti, osservando correttamente il grafico seguente, i risultati ottenuti grazie a questo lavoro possono collocarsi in un contesto piuttosto avanzato, considerando che oltre tale livello la ricerca si sta ancora interrogando. I tre pallini aggiunti al grafico posizionano a grandi linee i risultati ottenuti nel panorama dell'assorbimento energetico conosciuto in funzione dei valori di SEA e densità relativa.

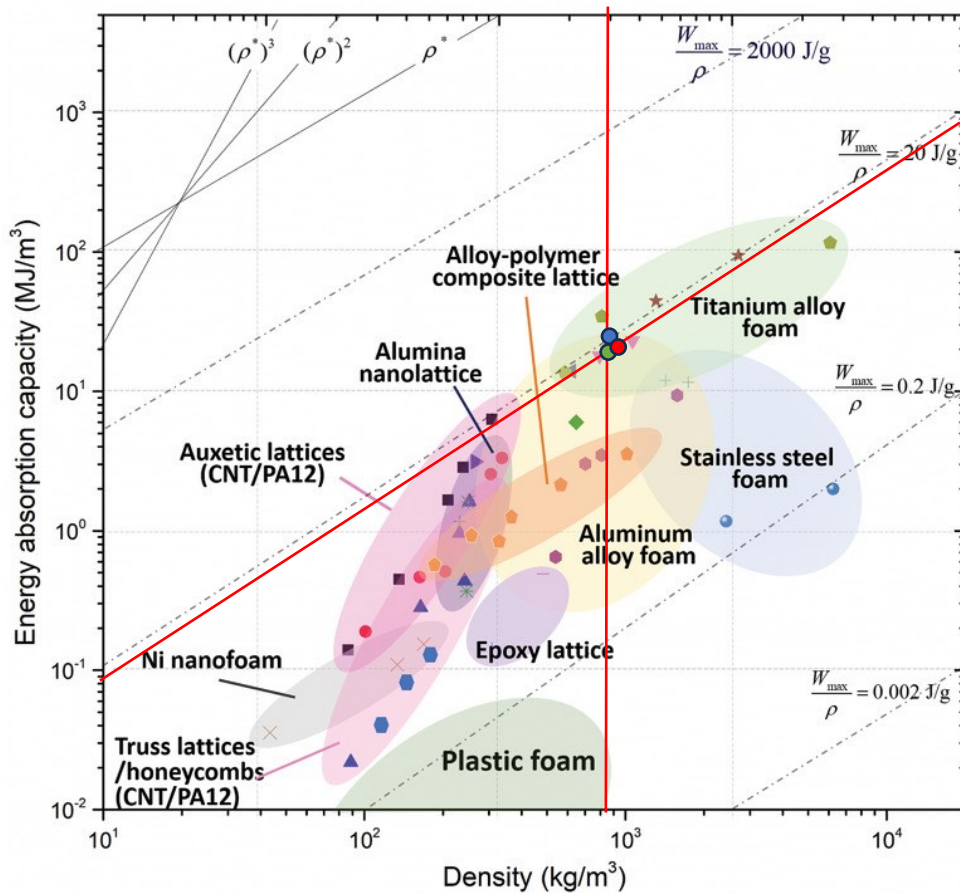


Figura 81 Collocamento dei risultati ottenuti nel panorama dell'assorbimento energetico

Bibliografia

- [1] L. J. Gibson e M. F. Ashby, *Cellular Solids - Structure and properties* second edition, Cambridge University Press, 1997.
- [2] M. F. Ashby, «The properties of foams and lattices,» *Philosophical transaction of the royal society*, 29 Novembre 2005.
- [3] Ntop, «Architected materials for impact absorption: A complete guide,» [Online]. Available: <https://www.ntop.com/resources/blog/architected-materials-impact-absorption/>.
- [4] Q. M. Li, I. Magkiriadis e J. J. Harrigan, «Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids,» *Journal of cellular plastics*, n. 42, 2006.
- [5] M. A. Meyers, *Dynamic behavior of materials*, A wiley-interscience publication by John Wiley & Sons, inc, 1994.
- [6] M. Sasso, G. Newaz e D. Amodio, «Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar test and finite element optimization,» *Materials science & engineering*, pp. 293-294, Ottobre 2007.
- [7] E. Mancini, M. Sasso, M. Rossi, G. Chiappini, G. Newaz e D. Amodio, «Design of an Innovative System for Wave Generation in Direct,» *J. dynamic behavior mater.*, pp. 201-213, 2015.
- [8] Y. Shangqin, K. C. Chee e Z. Kun, «3D-Printed MEchanical METamaterials with High Energy Absorption,» *Advanced Materials TEchnologies*, pp. 1-9, 2019.
- [9] N. A. Fleck, V. S. Deshpande e M. F. Ashby, «Micro-architected materials: past, present and future,» *Procedings of royal society*, 30 Giugno 2010.