



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Analisi di prove dinamiche e
quasi-statiche effettuate su sughero
tramite lo studio di modelli
Foam/iperelastici**

**Analysis of dynamic and quasi-static tests
carried out on cork through the study of
Foam/hyperelastic models**

Candidato:
Federico Ciocci

Relatore:
Prof. Marco Rossi

Anno Accademico 2019-2020



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Analisi di prove dinamiche e
quasi-statiche effettuate su sughero
tramite lo studio di modelli
Foam/iperelastici**

**Analysis of dynamic and quasi-static tests
carried out on cork through the study of
Foam/hyperelastic models**

Candidato:
Federico Ciocci

Relatore:
Prof. Marco Rossi

Anno Accademico 2019-2020

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Alla mia famiglia

Ringraziamenti

Prima di iniziare vorrei ringraziare il mio relatore prof. Marco Rossi per avermi permesso di svolgere il tirocinio e per la sua disponibilità in fase di elaborazione del lavoro.

Ringrazio inoltre la mia famiglia e i miei compagni di corso per tutto il loro prezioso supporto.

Ancona, Febbraio 2021

Federico Ciocci

Sommario

Il presente elaborato tratta del sughero e delle sue proprietà. Lo studio parte dalla sua estrazione in natura fino ad arrivare all'applicazione di modelli matematici che possano identificarne il comportamento meccanico sotto tensione. L'obiettivo è quello di analizzarne la sua struttura e composizione interna per poi ricavarne le proprietà meccaniche.

La tesi è articolata in quattro capitoli: nel primo si discute dell'estrazione, della struttura e della composizione chimica del sughero per poi esaminare gli utilizzi e le lavorazioni possibili più diffuse. Nel secondo vengono introdotti due modelli teorici affini allo studio della curva tensione-deformazione propria del materiale e nel terzo vengono descritte le prove effettuate in laboratorio e il relativo metodo di identificazione scelto per i modelli teorici. Infine, nell'ultimo capitolo, sono elencati i risultati ottenuti con l'applicazione dei suddetti modelli ai dati sperimentali.

Indice

1	Il sughero	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Estrazione	2
1.3	Struttura	3
1.4	Composizione chimica	6
1.5	Proprietà e utilizzi	7
1.6	Lavorazioni possibili	10
2	Modelli teorici	13
2.1	Descrizione modelli Avalle e Hyperfoam	13
2.1.1	Descrizione modelli Avalle e Hyperfoam dipendenti dalla densità (lineari e non)	14
3	Prove sperimentali	17
3.1	Descrizione prove effettuate (sughero utilizzato, macchinari e velocità impatto)	17
3.2	Metodo di identificazione (funzione errore)	19
4	Risultati	21
4.1	Risultati applicazione modelli su prove singole	21
4.1.1	Applicazione Avalle a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	21
4.1.2	Applicazione Hyperfoam a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	25
4.2	Risultati applicazione modelli in funzione della densità	29
4.2.1	Applicazione modello Avalle lineare in funzione della densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	29
4.2.2	Applicazione Hyperfoam lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	33
4.2.3	Applicazione Avalle non lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	37
4.2.4	Applicazione Hyperfoam non lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato	41
	Conclusioni	47

Indice

Bibliografia e Sitografia

49

Elenco delle figure

1.1	Tipico andamento tensione-deformazione durante compressione.	2
1.2	Procedura di estrazione del sughero (1).	2
1.3	Procedura di estrazione del sughero (2).	3
1.4	Schema sezioni tangenziale, assiale e radiale del sughero. . .	3
1.5	Sezioni tangenziale (A), assiale (B) e radiale (C) del sughero al microscopio.	4
1.6	Corrugazioni al microscopio della sezione tangenziale del sughero.	4
1.7	Possibile struttura schematica della suberina.	6
1.8	Possibile struttura schematica della lignina.	7
1.9	Coefficiente di Poisson	8
1.10	Pannelli di sugheri isolante.	9
1.11	Casco da bicicletta con protezione in sughero.	9
1.12	Bollitura delle cortecce sugherose	11
1.13	Lavorazioni sughero espanso.	11
3.1	Direzioni di taglio predefinite del sughero.	17
3.2	Barra di Hopkinson.	18
4.1	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione A. . . .	21
4.2	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C. . . .	22
4.3	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D. . . .	22
4.4	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione dinamica di sughero con densità $100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione A.	23
4.5	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione dinamica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C.	23
4.6	Applicazione modello <i>Avalle</i> su compressione dinamica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D.	24
4.7	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione A. . . .	25
4.8	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C. . . .	25

Elenco delle figure

4.9	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione quasi-statica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D. . . .	26
4.10	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione dinamica di sughero con densità $100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione A. . . .	27
4.11	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione dinamica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C. . . .	27
4.12	Applicazione modello <i>Hyperfoam</i> su compressione dinamica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D. . . .	28
4.13	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.	29
4.14	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.	30
4.15	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.	30
4.16	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.	31
4.17	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.	31
4.18	Applicazione modello lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.	32
4.19	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.	33
4.20	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.	34
4.21	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.	34
4.22	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.	35
4.23	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.	36
4.24	Applicazione modello lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.	36

4.25	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.	37
4.26	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.	38
4.27	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.	38
4.28	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.	39
4.29	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.	40
4.30	Applicazione modello non lineare <i>Avalle</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.	40
4.31	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.	41
4.32	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.	42
4.33	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.	42
4.34	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.	43
4.35	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.	44
4.36	Applicazione modello non lineare <i>Hyperfoam</i> in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.	44

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto densità tra sughero agglomerato ed espanso.	10
-----	---	----

Capitolo 1

Il sughero

1.1 Introduzione

Il sughero costituisce la corteccia naturale della cosiddetta *Quercus Suber L.*, più comunemente conosciuta con il nome di sughera o quercia da sughero. Appartenente alla famiglia dei materiali cellulari, materiali ampiamente conosciuti e utilizzati ingegneristicamente in molte applicazioni nelle quali viene richiesta una buona capacità di assorbimento di energia se sottoposti a compressioni di rilevante entità, esso ne costituisce una valida alternativa totalmente naturale.

I materiali cellulari riescono, infatti, a mantenere un livello di tensione relativamente basso e costante, mentre subiscono grandi deformazioni per poi riuscire, mediante la densificazione delle celle interne che si verifica ad alte tensioni, ad assorbire grandi quantità di energia.

Molti di questi materiali si deformano permanentemente in seguito a importanti collisioni, riducendo quindi la propria capacità di assorbire energia per un eventuale nuovo impatto. Il sughero, sotto questo aspetto, rappresenta un buon compromesso in termini di buona capacità di assorbimento energetico e buon ritorno viscoelastico.

La curva sperimentale a compressione della tensione in funzione della deformazione presenta, infatti, inizialmente (a basse deformazioni e tensioni) una pendenza elastica per poi essere seguita da una zona a pendenza pressoché nulla, dove la tensione si mantiene costante, raggiungendo elevate deformazioni e infine una zona dove la pendenza aumenta notevolmente e si registra il valore di tensione più alto (**Figura 1.1**).

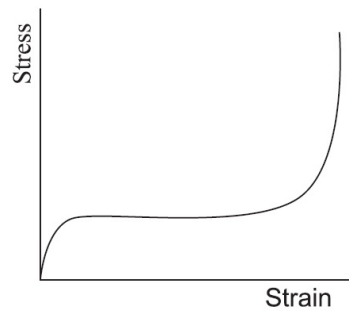


Figura 1.1: **Tipico andamento tensione-deformazione durante compressione.**

1.2 Estrazione

Il sughero naturale viene estratto direttamente dallo strato esterno della corteccia della quercia (**Figura 1.2 e Figura 1.3**). L'estrazione avviene quando la pianta raggiunge una circonferenza superiore ai 60 cm misurata a 1,30 m da terra (sviluppo conseguito in medie condizioni da un albero di circa 20-25 anni).

Il prodotto ottenuto, chiamato sugherone "vergine", è di scarsa qualità ed è utilizzabile esclusivamente per la realizzazione di pannelli coibentanti e conglomerati.

La seconda estrazione può essere effettuata dopo 10 anni. Il prodotto viene chiamato sughero "gentile".



Figura 1.2: **Procedura di estrazione del sughero (1).**



Figura 1.3: Procedura di estrazione del sughero (2).

1.3 Struttura

Questo particolare materiale cellulare può essere descritto al microscopio come un tessuto omogeneo di celle chiuse a parete sottili regolarmente distribuite senza alcuno spazio intercellulare. Il risultato che si ottiene da questa distribuzione è quella di una struttura a forma di alveare.

Le osservazioni al microscopio elettronico mostrano anche come, lungo la direzione radiale, il sughero si presenti sottoforma di poligoni da 4-9 lati; le forme più frequenti sono quelle pentagonali, esagonali ed eptagonali. Lungo la direzione assiale e tangenziale la struttura è simile a quella di un muro di mattoni dove generalmente tre lati si incontrano ad ogni vertice; il muro di celle formatosi non è però costituito esclusivamente da mattoni rettangolari, ma per lo più da poligoni con sei lati (**Figura 1.4** e **Figura 1.5**).

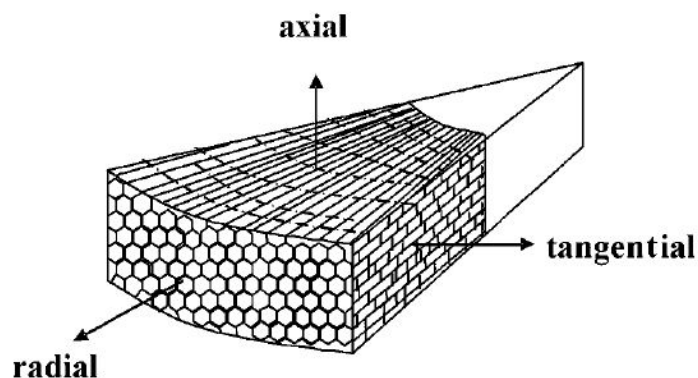


Figura 1.4: Schema sezioni tangenziale, assiale e radiale del sughero.

Le celle formatesi all'inizio della stagione della crescita sono più larghe e con pareti meno spesse rispetto alle celle formatesi a fine della stagione di crescita. L'area di base del prisma va da 4 a $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ mentre la sua altezza dai 30 ai $40 \text{ }\mu\text{m}$;

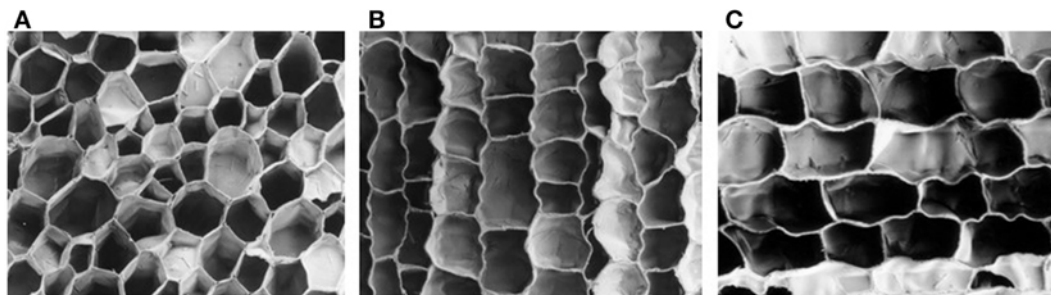


Figura 1.5: **Sezioni tangenziale (A), assiale (B) e radiale (C) del sughero al microscopio.**

lo spessore delle pareti si aggira intorno ai 1-1,5 μm . Nel sughero di fine stagione l'altezza del prisma si riduce fino a 10 μm mentre lo spessore delle celle raddoppia. Per cm^3 si contano dalle 4 alle 7×10^7 celle (inizio stagione) e dalle 10 alle 20×10^7 celle (fine stagione).

All'interno di queste celle chiuse è presente un gas presumibilmente simile all'aria che riduce di molto la densità di questo materiale e che, insieme alle piccole dimensioni sopra citate, rendono questo materiale un buon isolante. La presenza dell'aria svolge anche un ruolo rilevante nel comportamento meccanico del sughero che verrà discusso nei capitoli successivi.

Le facce laterali delle celle del sughero non sono lisce ma presentano corrugazioni irregolari nate probabilmente durante la compressione nella fase di crescita delle celle e della corteccia (**Figura 1.6**); le celle possono infatti presentarsi quasi completamente lisce oppure addirittura collassate su se stesse. Le basi delle celle possono allo stesso modo apparire ondulate ma la completa corrugazione non si osserva generalmente.

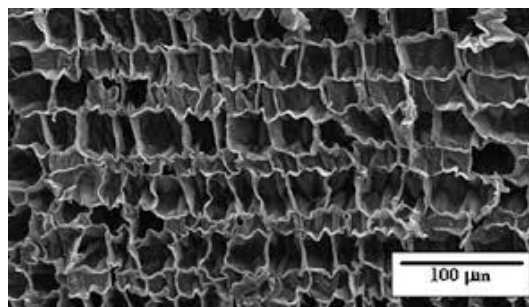


Figura 1.6: **Corrugazioni al microscopio della sezione tangenziale del sughero.**

Il sughero di fine stagione con le sue pareti più spesse, altezze dei prismi inferiori e la minore o assente corrugazione risulta essere più rigido. Il sughero "vergine" ha una struttura, uno spessore e una densità irregolare, ciò lo rende friabile e quindi poco resistente; viene usato principalmente per le tavole da sughero, isolamento, solette per scarpe etc.

Il sughero "gentile", invece, presenta una composizione più regolare, indice di maggior qualità e ridotta friabilità. Generalmente quest'ultima viene considerata la più idonea per realizzare i tappi.

1.4 Composizione chimica

Le pareti delle celle del sughero presentano una struttura a strati: esse consistono di una sottile lamina centrale ricca di lignina, spesse pareti secondarie costituite da lamine alternate di suberina e cera e infine una sottile parete terziaria di polisaccaridi. Pertanto, il sughero si presenta come un materiale polimerico altamente composito. Altri componenti, non macromolecolari, che vanno a costituire la parete cellulare delle celle sono tannini.

La ripartizione in percentuale di tali componenti dipende da molti fattori come l'origine geografica, il clima, le dimensioni dell'albero, le condizioni del suolo e se si tratta di sughero "vergine" oppure "gentile" (il primo contiene più suberina e più contenuti estraibili come le cere rispetto al secondo).

Mediamente si presenta un 45% di suberina, un 27% di lignina, un 12% di polisaccaridi, un 6% di cere e un 6% di tannini. La suberina (**Figura 1.7**) è responsabile della comprimibilità e dell'elasticità del sughero, mentre la lignina (**Figura 1.8**) della struttura delle pareti della cella. La composizione di entrambe non è stata ancora del tutto ben definita.

I polisaccaridi forniscono rigidità strutturale alle celle, impedendo il loro collasso, mentre le cere respingono acqua e contribuiscono alla bassa permeabilità del sughero; i tannini, invece, sono responsabili del colore e della protezione del materiale.

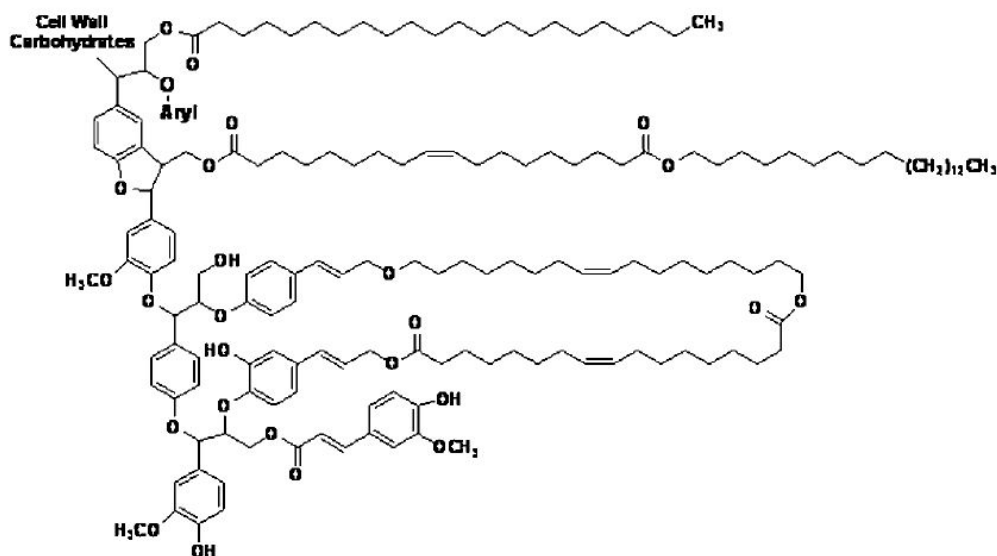


Figura 1.7: Possibile struttura schematica della suberina.

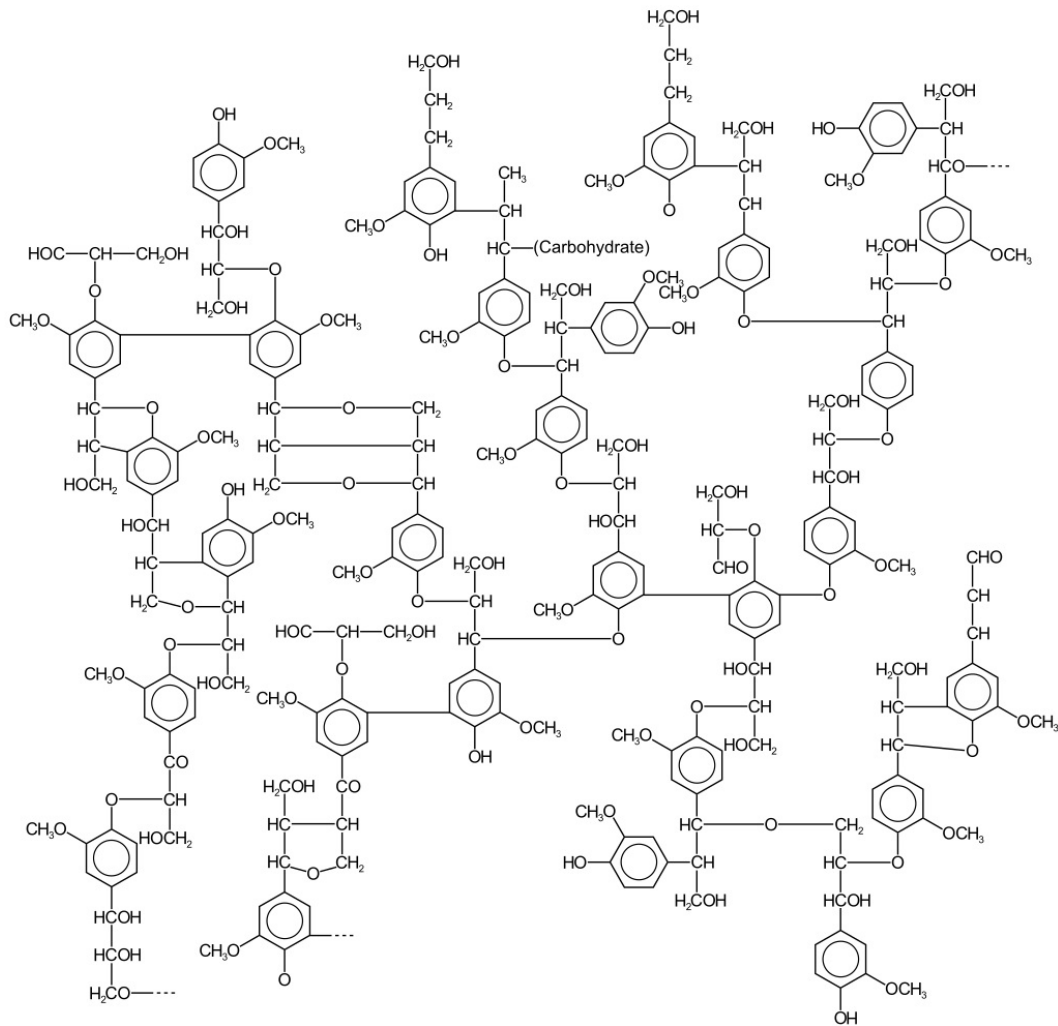


Figura 1.8: Possibile struttura schematica della lignina.

1.5 Proprietà e utilizzi

La struttura e la composizione chimica del sughero fanno sì che quest'ultimo possa essere utilizzato in molteplici applicazioni.

Tra le proprietà più sorprendenti possiamo elencare: la sua impermeabilità ai liquidi, la sua bassissima densità, l'ottima capacità di isolamento termico e acustico e, la più rilevante dal punto di vista meccanico, un'elevata attitudine allo smorzamento e al recupero strutturale in seguito a una sollecitazione quasi-statica o ad un impatto dinamico. La presenza di tutte queste proprietà è dovuta alla particolare composizione chimica, alla presenza di un gas simile all'aria all'interno delle celle e alle corrugazioni presenti su di esse.

Durante la compressione, la regione della flessione elastica delle celle arriva fino al 7% della deformazione, successivamente fino al 70% si ha la zona a tensione costante in cui le pareti cellulari iniziano a collassare. Infine si osserva, insieme al completo

schiacciamento di quest'ultime, il collasso delle celle che causa l'innalzamento nella curva analizzata al paragrafo 1.1.

Il coefficiente di Poisson ν (**Figura 1.9**) del sughero è influenzato dalla randomica e sfalsata disposizione della base delle celle e dalle corrugazioni sulle pareti cellulari laterali.

Quando questo materiale viene compresso lungo la direzione radiale, le parete cellulari si piegano e si "impacchettano", grazie alla presenza di queste corrugazioni, le quali aumentano di ampiezza; inoltre le basi delle celle nella direzione perpendicolare si allineano a quella radiale. Entrambi questi effetti sono la causa di un coefficiente di Poisson molto piccolo (circa zero) e quindi di una minuscola espansione nelle direzioni non radiali.

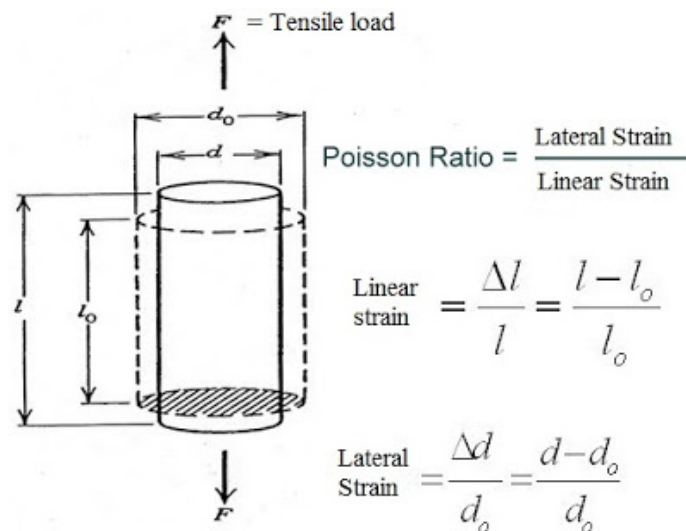


Figura 1.9: Coefficiente di Poisson

Tra le applicazioni più rilevanti del sughero abbiamo al primo posto la produzione di tappi che rende questo materiale molto richiesto all'interno del mercato delle bevande; è proprio grazie alla sua impermeabilità verso i liquidi e gas, insieme alla sua elevata comprimibilità e flessibilità, che risulta essere ideale per questi scopi. L'elevata impermeabilità lo rende frequentemente usato come guarnizione.

L'ottimo isolamento termico e acustico conduce invece alla fabbricazione di pannelli di sughero isolante (**Figura 1.10**), ottenuti attraverso trattamenti di espansione (bollitura) e, in alcuni casi, di agglomerazione di granuli (processi che verranno discussi nel paragrafo successivo).

Durante la produzione di tappi, una grande quantità di sughero non viene usata perché considerata non idonea oppure perché di scarto. Questi resti subiscono una triturazione e un'agglomerazione per poi essere usati, per esempio, come solette o simili. Grazie alle proprietà meccaniche precedentemente discusse, un'altra importante applicazione è quella stradale: il sughero è stato impiegato infatti all'interno dei caschi (**Figura 1.11**) o nei sistemi di sicurezza passivi.

Nel capitolo 3 si andrà proprio a studiare la sua risposta meccanica in seguito a compressioni con diverse velocità, per poi studiarne un modello teorico.



(a) Sughero agglomerato.

(b) Sughero espanso.

Figura 1.10: Pannelli di sugheri isolante.



(a) Esterno casco.

(b) Interno casco.

Figura 1.11: Casco da bicicletta con protezione in sughero.

1.6 Lavorazioni possibili

Come già accennato, il sughero non esiste solo allo stato naturale, ma può essere sottoposto a delle specifiche lavorazioni che causano cambiamenti nelle sue proprietà.

Tra le forme finali che si ottengono ricordiamo il sughero agglomerato o “biondo” e il sughero espanso o “bruno”; i rispettivi trattamenti possono variare a seconda del tipo di sughero trattato.

Il sughero agglomerato lo si ottiene generalmente facendo stagionare all’aperto, per almeno due anni, la corteccia estratta, per poi bollirla almeno un’ora e successivamente frantumarla e macinarla. Per subire il processo di bollitura le cortecce devono essere imbracate ed immerse nella caldaia, una vasca in acciaio inox riempita con circa 6 metri cubi d’acqua, mantenuta bollente da un bruciatore sotterraneo. Sopra la caldaia è disposto un dispositivo a tiranti che permette la completa immersione delle cortecce (**Figura 1.12**).

Dopo la macinazione, i granuli vengono legati attraverso appositi collanti che possono essere completamente naturali oppure sintetici, la qualità di queste colle, insieme alla grandezza dei granuli, ne determina il rispettivo comportamento meccanico.

Il sughero espanso diversamente non necessita di leganti esterni in quanto, dopo la macinazione, viene inserito tutto in un’autoclave in cui avviene la tostatura con vapore intorno ai 350 °C; questa tostatura permette la fusione della suberina che funge da collante naturale e permette ai granuli di espandersi, inglobando aria e migliorandone le caratteristiche di coibenza (**Figura 1.13**).

Il sughero bruno presenta migliori caratteristiche termoisolanti (il processo di produzione provoca un rigonfiamento del granulo) ed è più leggero; in compenso presenta peggiori caratteristiche fonoisolanti.

Per quel che riguarda le densità, la tostatura rende il sughero bruno più leggero di quello agglomerato (**Tabella 1.1**); ciò comporta però peggiori caratteristiche meccaniche. Inoltre l’agglomerazione fornisce al sughero una maggiore elasticità meccanica e una quasi totale isotropia.

Tabella 1.1: Confronto densità tra sughero agglomerato ed espanso.

Tipo sughero	Densità [kg/m ³]
Agglomerato	150:160
Espanso	110:130



Figura 1.12: Bollitura delle cortecce sugherose



(a) Tostatura.

(b) Agglomerazione.

Figura 1.13: Lavorazioni sughero espanso.

Capitolo 2

Modelli teorici

2.1 Descrizione modelli Avalle e Hyperfoam

Una volta studiato sperimentalmente il comportamento meccanico del sughero è interessante svilupparne un modello numerico che approssimi il più possibile l'andamento della tensione in funzione della deformazione.

In questi capitoli verranno presi in considerazione due modelli teorici applicabili ai materiali cellulari: il modello Avalle **Eq. 2.4** (dal cognome del suo ideatore Massimiliano Avalle, professore ordinario all'Università di Genova) e il modello Hyperfoam **Eq. 2.3** (un modello isotropico e non lineare usato tipicamente per caratterizzare schiume elastomeriche che presentano un comportamento iperelastico, ovvero schiume linearmente elastiche a cui è possibile associare una funzione scalare definita energia specifica).

Questa funzione scalare ha la seguente struttura:

$$\mathbf{U} = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} [\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J_{el}^{-\alpha_i \beta_i} - 1)] \quad (2.1)$$

dove λ_i rappresentano gli allungamenti nelle direzioni principali ("principal stretches") e sono connessi alle deformazioni principali tramite la relazione $\lambda_i = 1 + \epsilon_i$, J_{el} è il rapporto di volume elastico ($J_{el} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$) e μ_i sono i moduli di taglio; α_i e β_i infine costituiscono dei coefficienti incogniti del curve-fitting. Il termine β_i , in particolare, risulta dipendente dal coefficiente di Poisson:

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (2.2)$$

Derivando **Eq. 2.1** in funzione di lambda lungo la direzione di compressione e approssimando ν del sughero pari a zero, si può ottenere un'espressione della tensione ("stress") definita così:

$$\sigma_{Hyp} = \frac{\partial U}{\partial \lambda_L} = \frac{2}{\lambda_L} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_L^{\alpha_i} - 1) \quad (2.3)$$

dove λ_L rappresenta lo "stretch" lungo la direzione di compressione.

Per quel che riguarda il modello Avalle, esso si presenta con la seguente funzione:

$$\sigma_{Av} = A[1 - e^{-\frac{E}{A}\epsilon(1-\epsilon)}] + B[\frac{\epsilon}{(1 - \epsilon - R)^n}] \quad (2.4)$$

Il termine E rappresenta il modulo di Young, R la percentuale di materiale solido presente mediamente nel sughero e n la costante del gas racchiusa all'interno delle celle, considerato simile all'aria ($n = 1,4$); A e B sono parametri utilizzati per il curve-fitting.

2.1.1 Descrizione modelli Avalle e Hyperfoam dipendenti dalla densità (lineari e non)

Durante le prove di compressione effettuate in laboratorio, le quali verranno illustrate nel capitolo successivo, si è notato come la risposta in termini di deformazione del sughero dipendesse, come era facile intuire, dalla densità dei campioni utilizzati.

Si è quindi provato a realizzare dei modelli matematici delle funzioni Avalle e Hyperfoam che potessero dipendere direttamente dalle densità dei provini analizzati e osservare quanto riuscissero a "seguire" graficamente il comportamento sperimentale di quest'ultimi.

Per ognuna delle due funzioni sopracitate sono stati costituiti due modelli in funzione della densità: uno lineare e uno invece non lineare.

AvalleDen

-MODELLO LINEARE:

$$\sigma_{AvLD} = Cdens\{A[1 - e^{-\frac{E}{A}\epsilon(1-\epsilon)}] + B[\frac{\epsilon}{(1 - \epsilon - R)^n}]\} \quad (2.5)$$

La linearità è stata resa dal prodotto del termine della densità $dens$ con un coefficiente incognito C , entrambi posti all'inizio dell' **Eq. 2.4**

-MODELLO NON LINEARE

$$\sigma_{AvNLD} = Cdens^D\{A[1 - e^{-\frac{E}{A}\epsilon(1-\epsilon)}] + B[\frac{\epsilon}{(1 - \epsilon - R)^n}]\} \quad (2.6)$$

La non linearità è stata resa dall'elevamento a potenza del termine $dens$ per un coefficiente incognito D .

HypefoamDen

-MODELLO LINEARE

$$\sigma_{HypLD} = Adens \frac{2}{\lambda_L} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_L^{\alpha_i} - 1) \quad (2.7)$$

Anche in questo caso la linearità è stata resa dal prodotto del termine della densità (dens) con un coefficiente incognito A , entrambi posti all'inizio dell' **Eq. 2.3**

-MODELLO NON LINEARE

$$\sigma_{HypNLD} = Adens^B \frac{2}{\lambda_L} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_L^{\alpha_i} - 1) \quad (2.8)$$

La non linearità è stata resa ancora dall'elevamento a potenza del termine dens per un coefficiente incognito B .

N.B Si precisa che

Sia per il modello indipendente dalla densità che per questi ultimi due, la funzione Hyperfoam è stata sviluppata fino al secondo termine della sommatoria (fino a $N=2$).

Capitolo 3

Prove sperimentali

3.1 Descrizione prove effettuate (sughero utilizzato, macchinari e velocità impatto)

I sugheri testati in laboratorio sono di tipo agglomerato e ne sono stati scelti di tre differenti densità: 100, 200 e 250 $[\frac{kg}{m^3}]$.

I provini sono stati tagliati da lastra di spessore 15 mm e sono state scelte tre diverse direzioni di taglio: A, C e D (come illustrato nella (Figura 3.1))

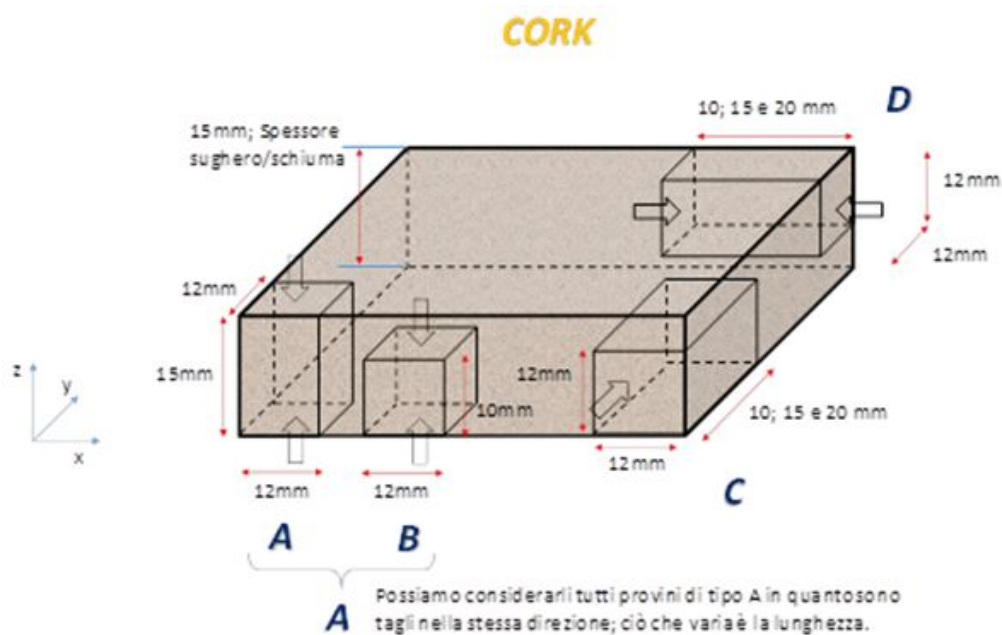


Figura 3.1: Direzioni di taglio predefinite del sughero.

Le prove di compressione sono state eseguite a diverse velocità di impatto (intese come *strain rate* $[\frac{1}{s}]$), partendo da quella maggiormente quasi-statica a $0.001 \frac{1}{s}$ fino ad arrivare a quella più dinamica con $1000 \frac{1}{s}$.

I macchinari utilizzati dipendono dalle velocità con cui si sceglie di analizzare i provini e nel nostro caso sono state adoperate la Barra di Hopkinson e una macchina pneumatica (SiPlan).

Capitolo 3 Prove sperimentali

La barra di Hopkinson è specifica per alte velocità di impatto ed è stata impiegata per la compressione a $1000 \frac{1}{s}$ con i valori di tensione e deformazione ingegneristici campionati a $1 MHz$.



Figura 3.2: Barra di Hopkinson.

La macchina pneumatica *SiPlan*, avente una cella di carico da $3 kN$ ed una velocità del punzone fino a $100 \frac{mm}{s}$, è stata scelta per le prove quasi-statiche; nel caso di compressione a $0.001 \frac{1}{s}$ il campionamento è stato fatto a $1 Hz$ e gli spostamenti del campioncino sono misurati in mm .

3.2 Metodo di identificazione (funzione errore)

I dati raccolti durante le prove di compressione sono stati inseriti all'interno dell'ambiente di calcolo fornito dal software Matlab. All'interno delle equazioni *Avallè* e *Hyperfoam*, come già anticipato, sono presenti dei coefficienti incogniti da determinare affinché il modello matematico possa rappresentare al meglio i valori di tensione trovati sperimentalmente.

Il metodo di identificazione selezionato per la ricerca di questi coefficienti è rappresentato dalla funzione *errore* **Eq. 3.2** a cui viene applicato il comando *fminsearch*; quest'ultimo permette di minimizzare la funzione.

$$err = \frac{\|sigmaExp - Snum\|}{\sqrt{length(Snum)}} \quad (3.1)$$

Snum e *sigmaExp* sono rispettivamente i valori di tensioni teorici (numerici) e sperimentali e *length(Snum)* rappresenta il totale del numero di punti di tensione calcolati. Piccoli valori di errore sono indice del fatto che il modello teorico non riesce ad avvicinarsi ulteriormente alla curva sperimentale e di conseguenza, se graficamente le due curve si distaccano eccessivamente tra loro, l'approccio matematico utilizzato non risulta opportuno.

L' **Eq. 3.2** è stata usata per tutti i modelli indipendenti dalla densità del campionario. Invece per quel che riguarda i modelli che mettono a confronto il comportamento del materiale al variare della densità, la funzione errore è la seguente:

$$err = \frac{\|sigmaExp10 - Snum10\|}{\sqrt{length(Snum10)}} + \frac{\|sigmaExp20 - Snum20\|}{\sqrt{length(Snum20)}} + \frac{\|sigmaExp25 - Snum25\|}{\sqrt{length(Snum25)}} \quad (3.2)$$

Capitolo 4

Risultati

4.1 Risultati applicazione modelli su prove singole

In questo capitolo verranno mostrati i risultati relativi alle applicazioni dei modelli *Avalle* e *Hyperfoam* ai dati campionati in laboratorio. Si farà riferimento alla compressione maggiormente quasi-statica a $0.001 \frac{1}{s}$ di *strain rate* e a quella più dinamica con $1000 \frac{1}{s}$. Per ogni modello si valuta l'efficacia a differenti densità di sughero e a differenti direzioni di taglio del campionario.

4.1.1 Applicazione Avalle a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

COMPRESSIONE QUASI-STATICA *AVALLE*

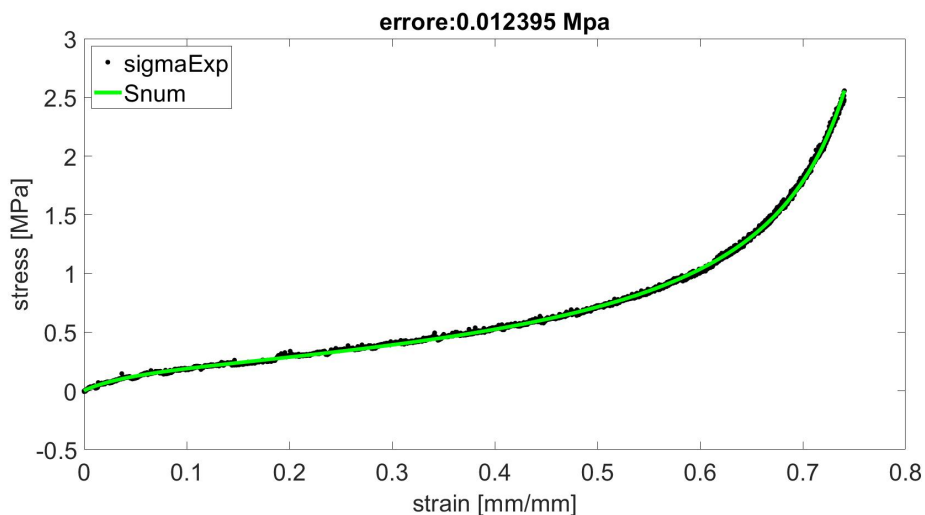


Figura 4.1: Applicazione modello *Avalle* su compressione quasi-statica di sughero con densità $100 \frac{kg}{m^3}$ tagliato in direzione A.

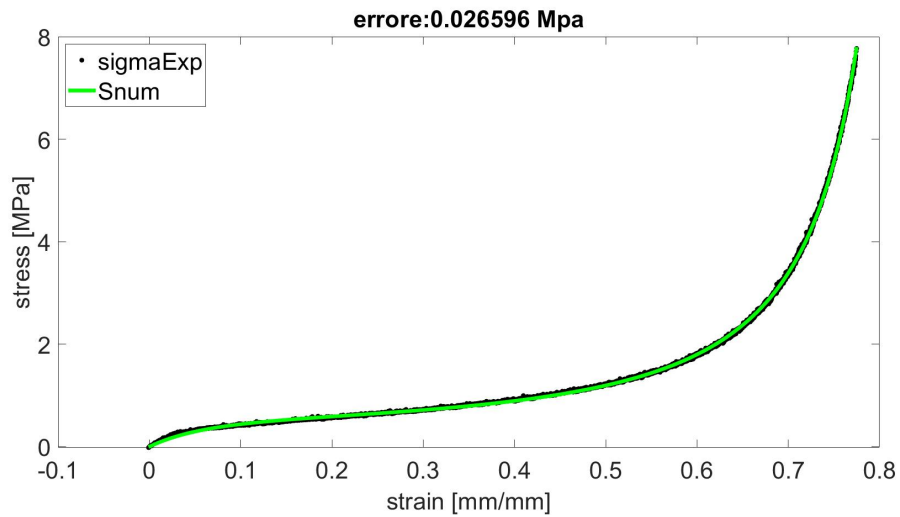


Figura 4.2: Applicazione modello *Avalle* su compressione quasi-statica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C.

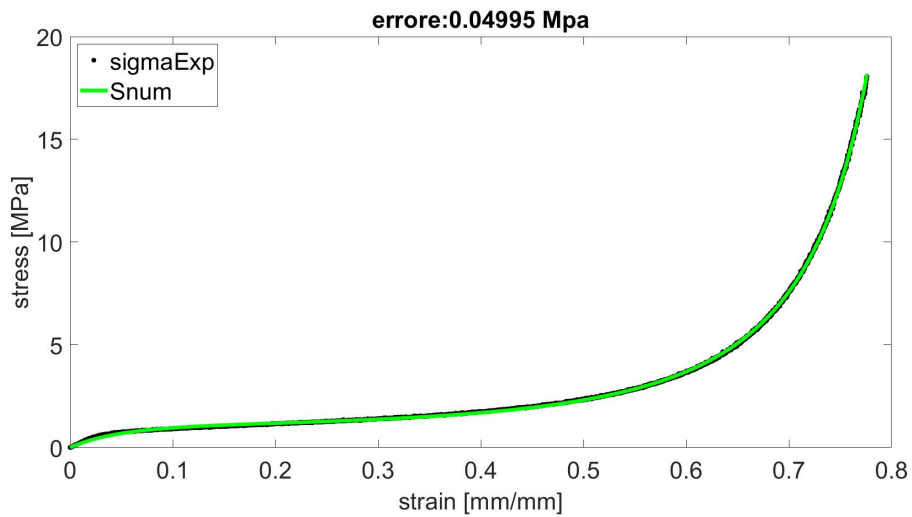


Figura 4.3: Applicazione modello *Avalle* su compressione quasi-statica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D.

COMPRESSIONE DINAMICA AVALLE

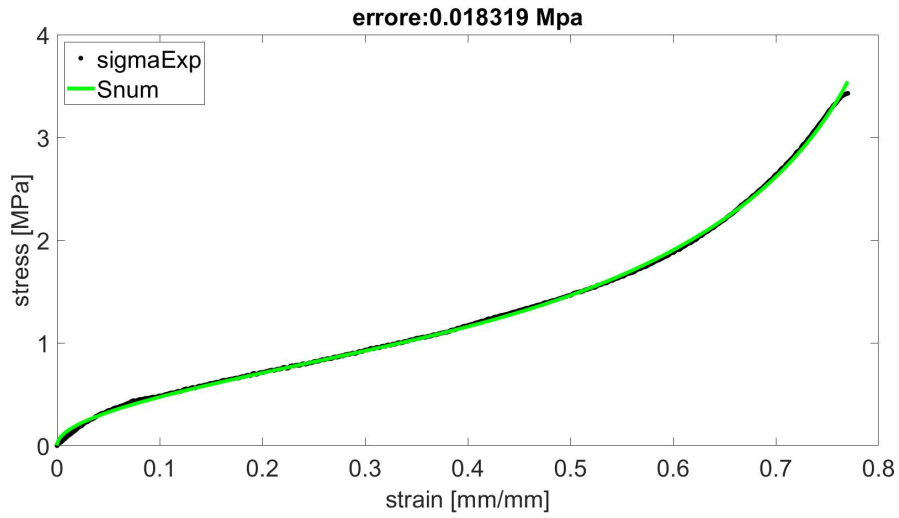


Figura 4.4: Applicazione modello *Avalle* su compressione dinamica di sughero con densità 100 $[\frac{kg}{m^3}]$ tagliato in direzione A.

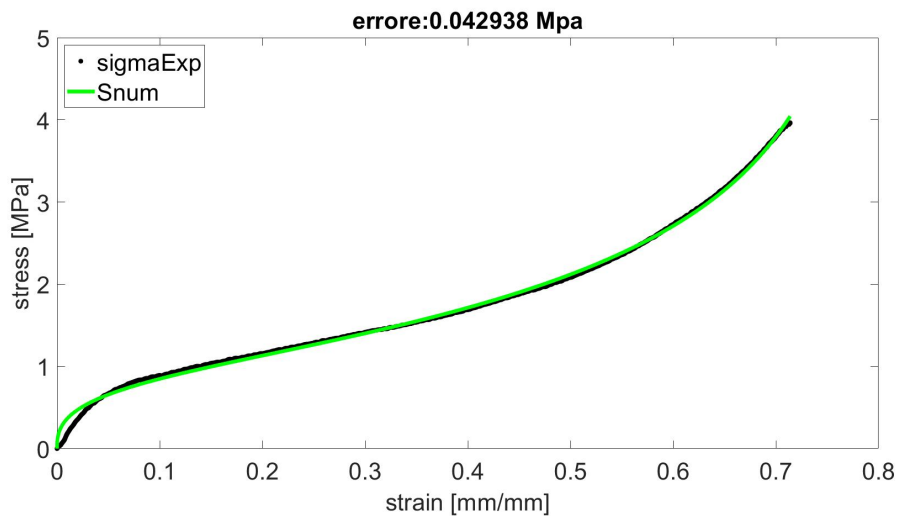


Figura 4.5: Applicazione modello *Avalle* su compressione dinamica di sughero con densità 200 $[\frac{kg}{m^3}]$ tagliato in direzione C.

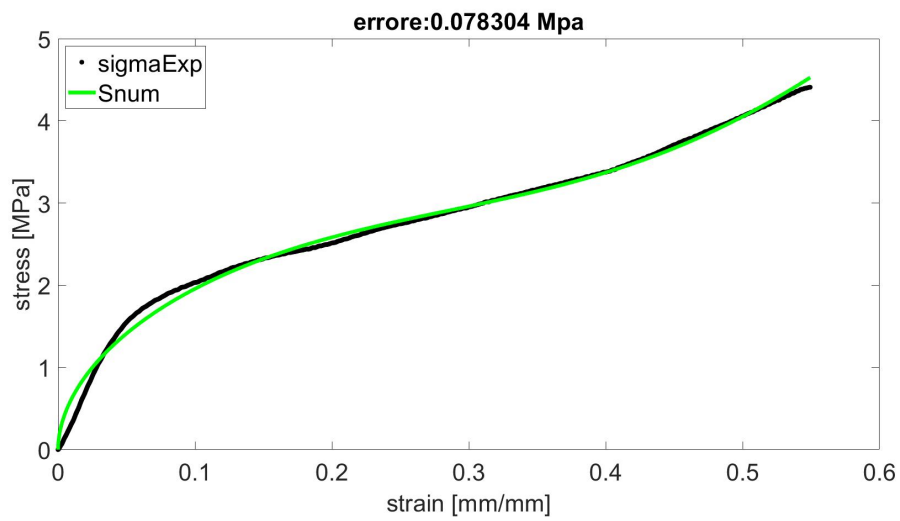


Figura 4.6: Applicazione modello *Avalle* su compressione dinamica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D.

4.1.2 Applicazione Hyperfoam a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

COMPRESSIONE QUASI-STATICA *HYPERFOAM*

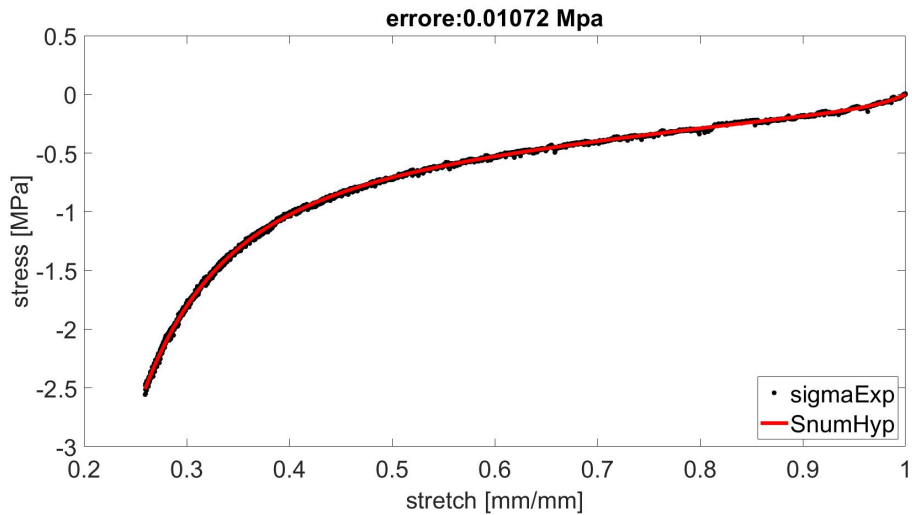


Figura 4.7: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione quasi-statica di sughero con densità 100 $[\frac{kg}{m^3}]$ tagliato in direzione A.

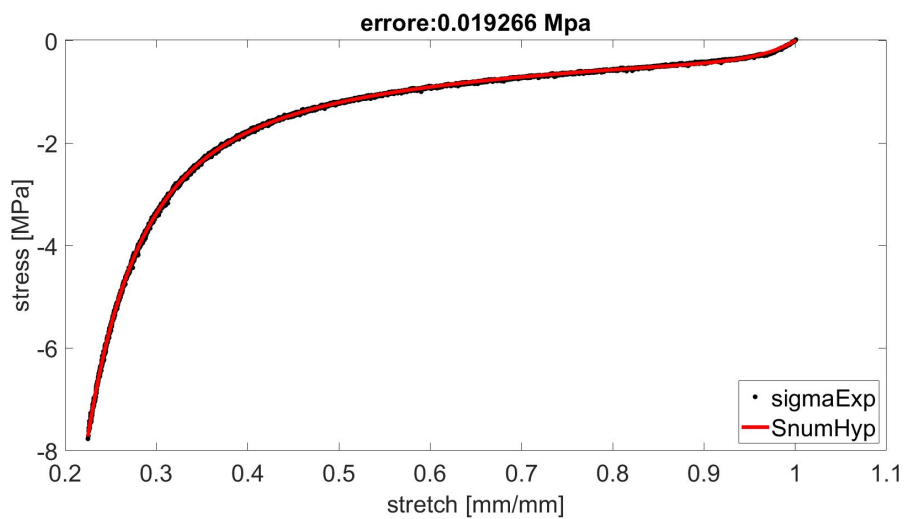


Figura 4.8: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione quasi-statica di sughero con densità 200 $[\frac{kg}{m^3}]$ tagliato in direzione C.

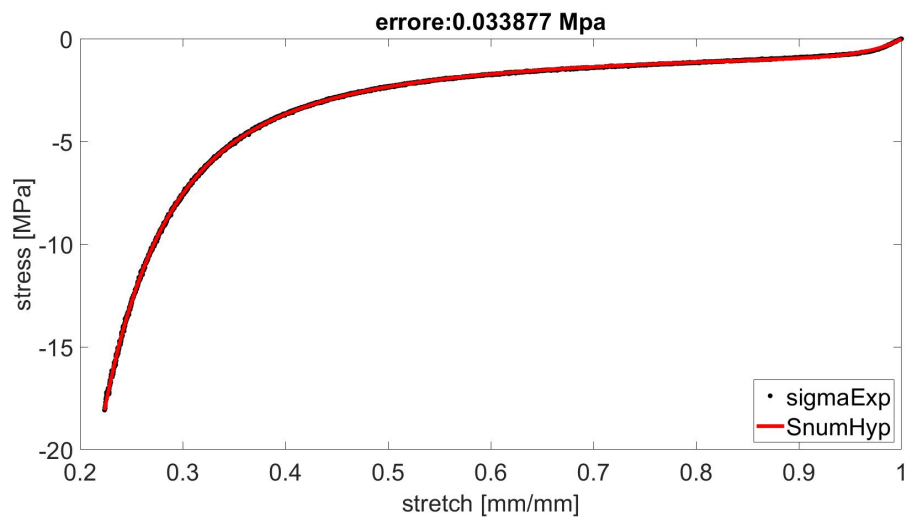


Figura 4.9: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione quasi-statica di sughero con densità $250 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione D.

COMPRESSIONE DINAMICA *HYPERFOAM*

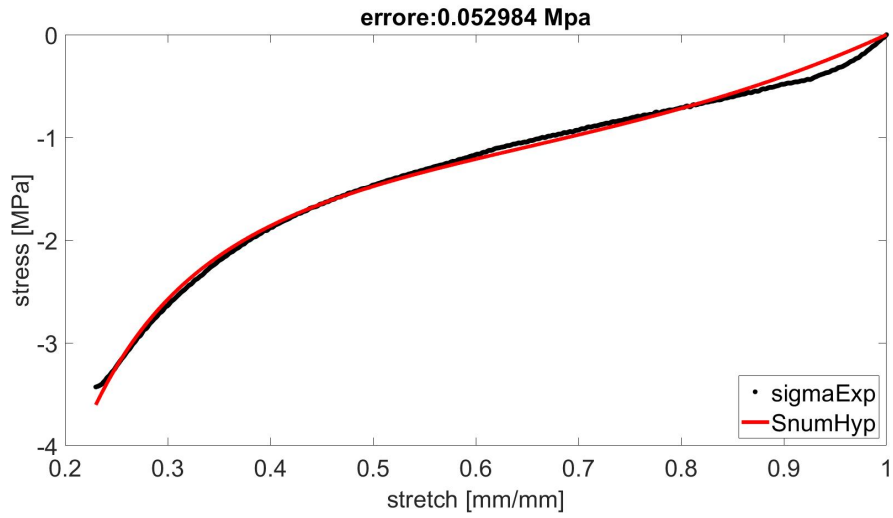


Figura 4.10: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione dinamica di sughero con densità $100 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione A.

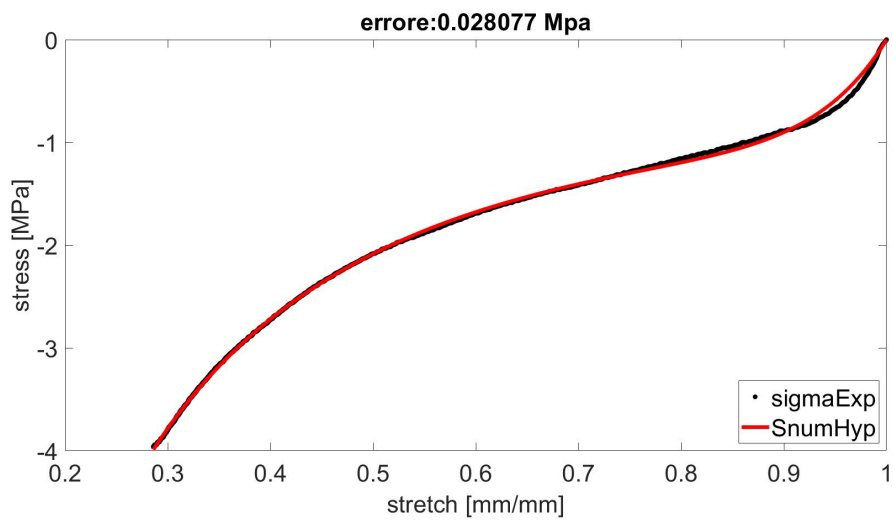


Figura 4.11: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione dinamica di sughero con densità $200 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ tagliato in direzione C.

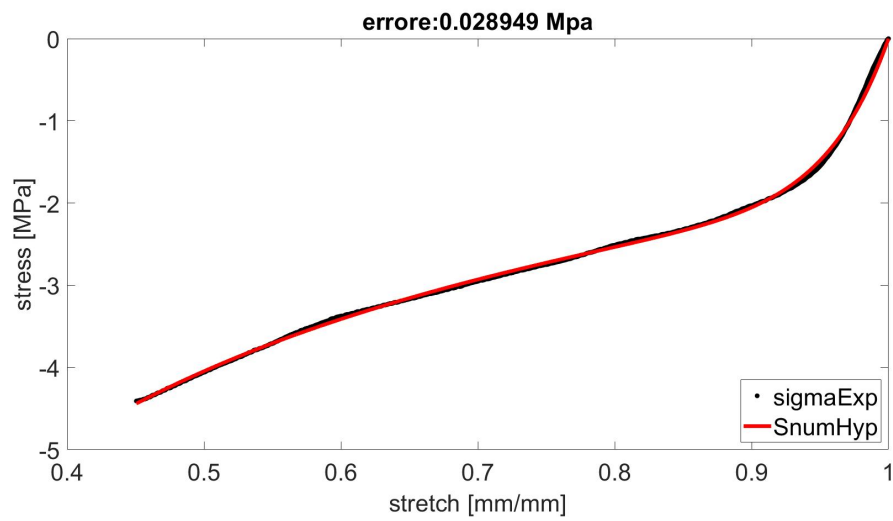


Figura 4.12: Applicazione modello *Hyperfoam* su compressione dinamica di sughero con densità $250 \frac{kg}{m^3}$ tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Le applicazioni illustrate nel precedente capitolo mostrano come i modelli *Avalle* e *Hyperfoam* siano delle ottime rappresentazioni dell'effettivo comportamento del sughero sotto compressione.

Il prossimo step è quello di verificare che anche i modelli in funzione della densità presentati nel Capitolo 2 (Eq. 2.5, Eq. 2.6, Eq. 2.7 e Eq. 2.8) possano essere delle buone approssimazioni dei dati sperimentali, tenendo conto questa volta di come la curva tensione-deformazione dipenda fortemente dalla densità del materiale.

4.2.1 Applicazione modello Avalle lineare in funzione della densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

AVALLE LINEARE COMPRESSIONE QUASI-STATICA

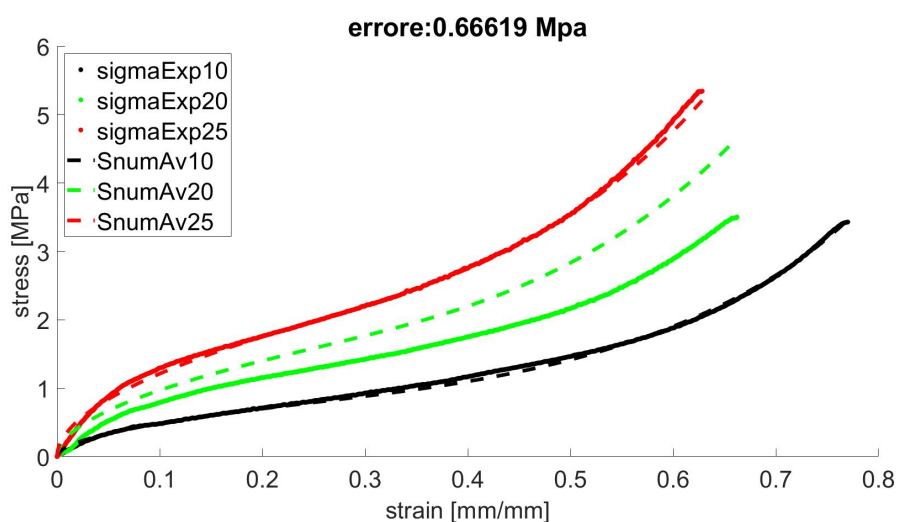


Figura 4.13: Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.

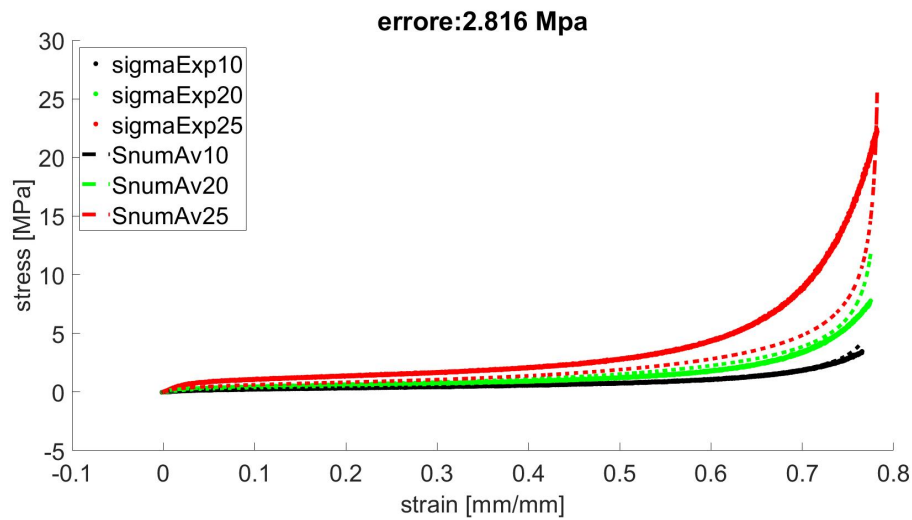


Figura 4.14: Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.

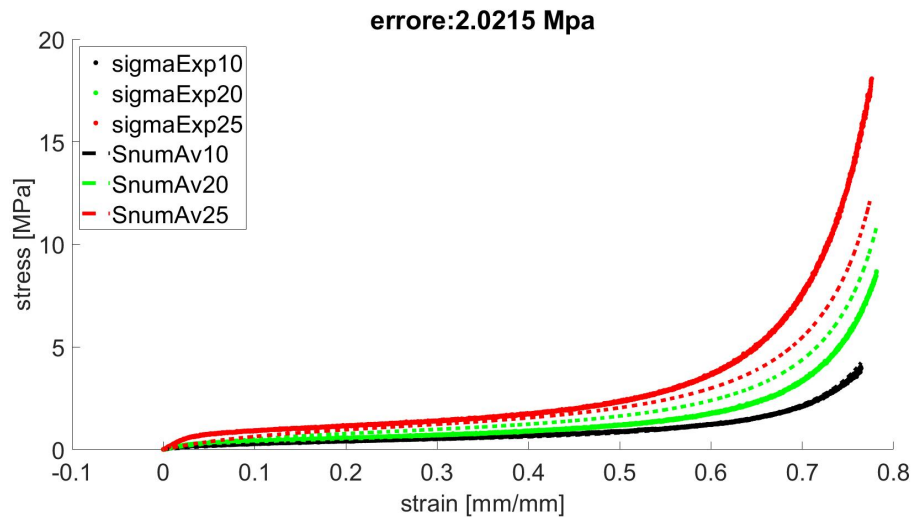


Figura 4.15: Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Il modello presenta in modo efficace il comportamento del sughero con basse densità in tutte le tre direzioni di taglio e il comportamento del sughero con densità elevate per la direzione A.

AVALLE LINEARE COMPRESSIONE DINAMICA

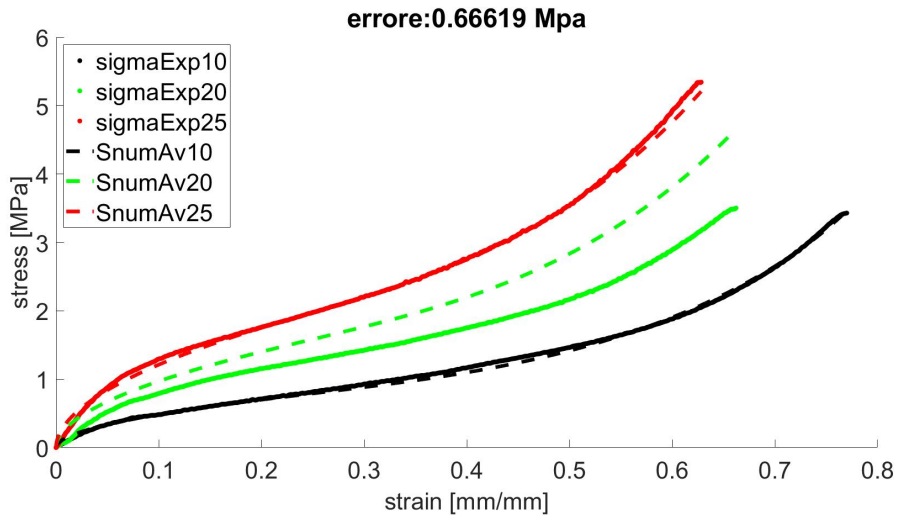


Figura 4.16: Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.

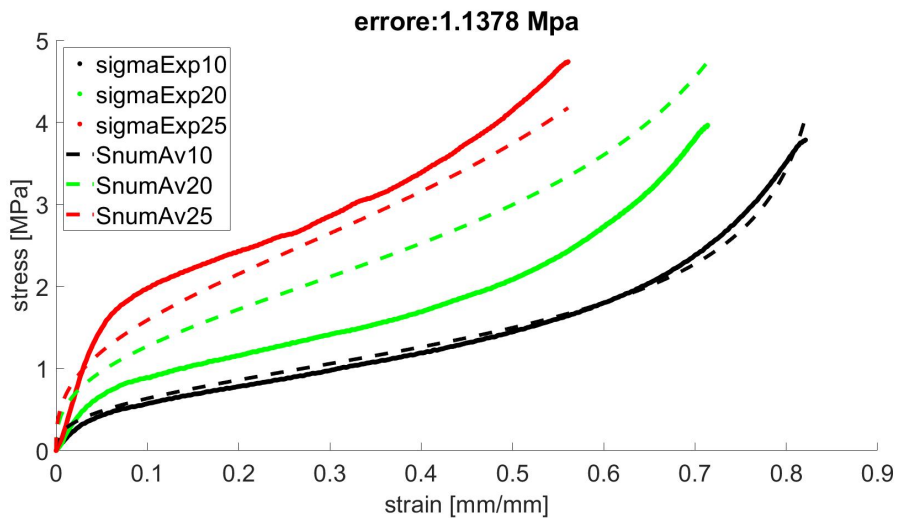


Figura 4.17: Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.

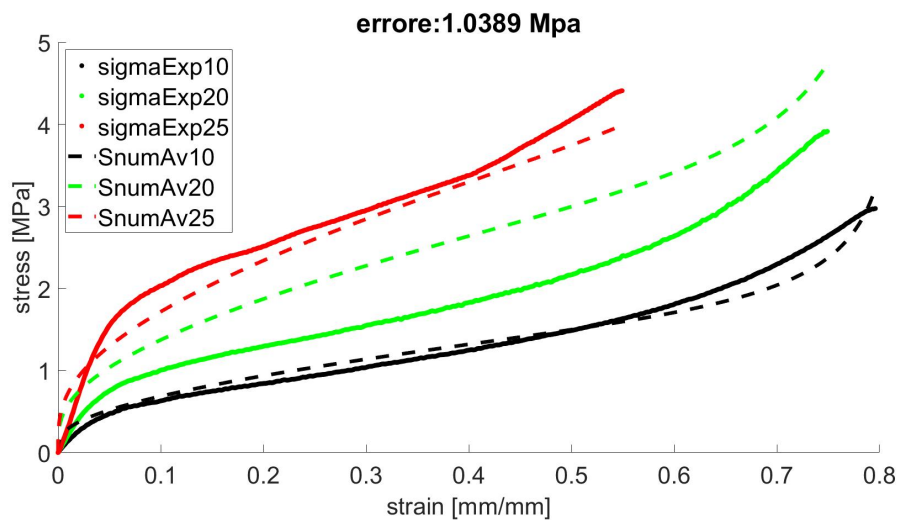


Figura 4.18: **Applicazione modello lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.**

A compressione dinamica il modello *Avalle* lineare è un ottima rappresentazione della compressione con piccole e alte densità mentre, come nel caso quasi-statico, a densità intermedie non si adatta perfettamente.

4.2.2 Applicazione Hyperfoam lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

HYPERFOAM LINEARE COMPRESSIONE QUASI-STATICA

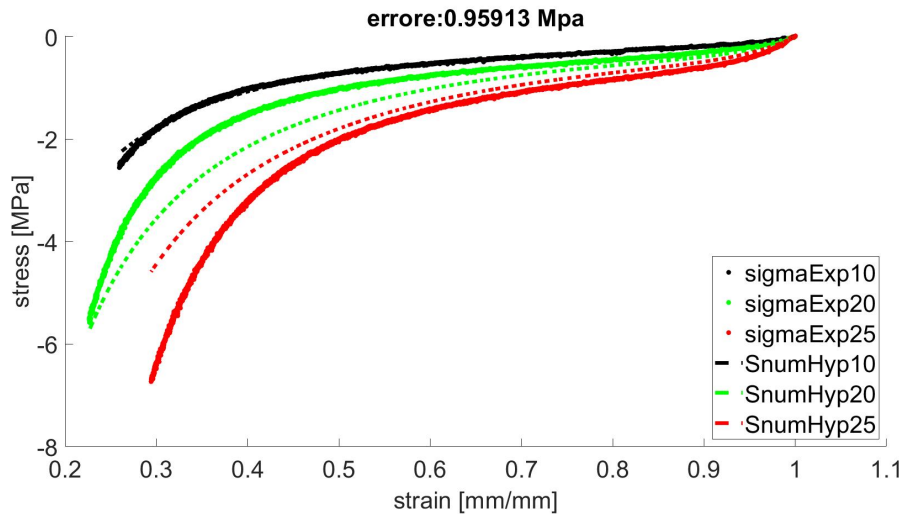


Figura 4.19: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.

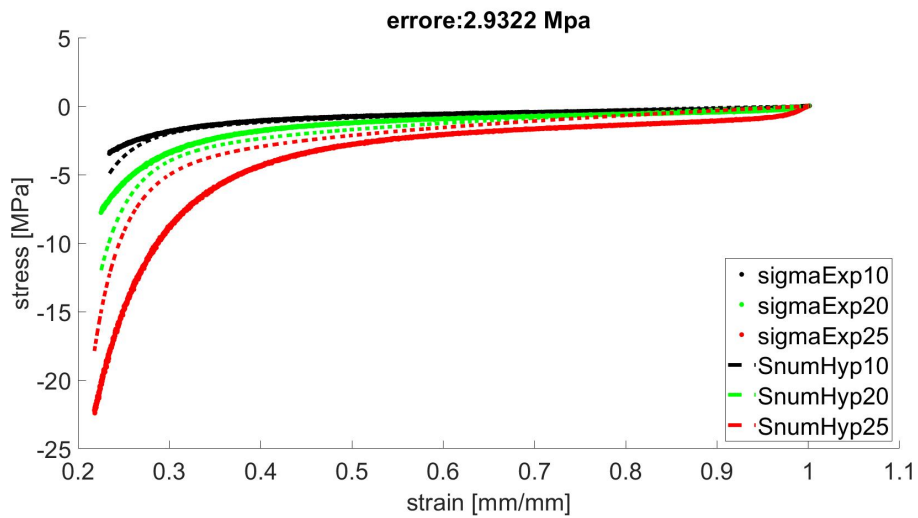


Figura 4.20: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.

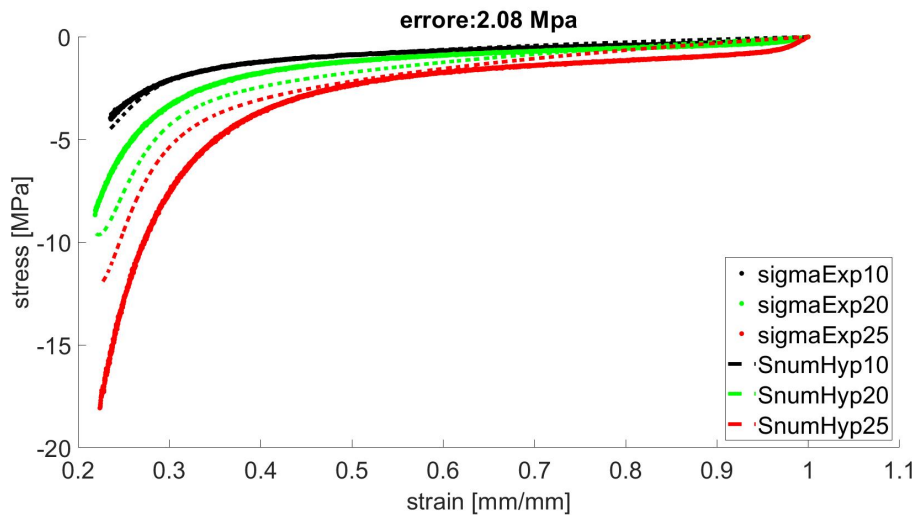


Figura 4.21: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Anche il modello *Hyperfoam* lineare presenta in modo efficace il comportamento del sughero con basse densità in tutte le tre direzioni di taglio e si avvicina al comportamento del sughero con densità elevate per la direzione A (a piccole deformazioni).

HYPERFOAM LINEARE COMPRESSIONE DINAMICA

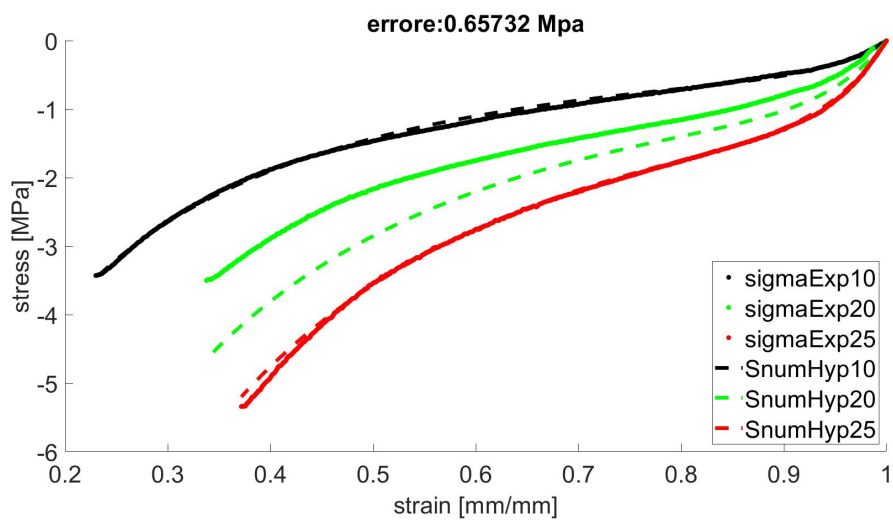


Figura 4.22: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.

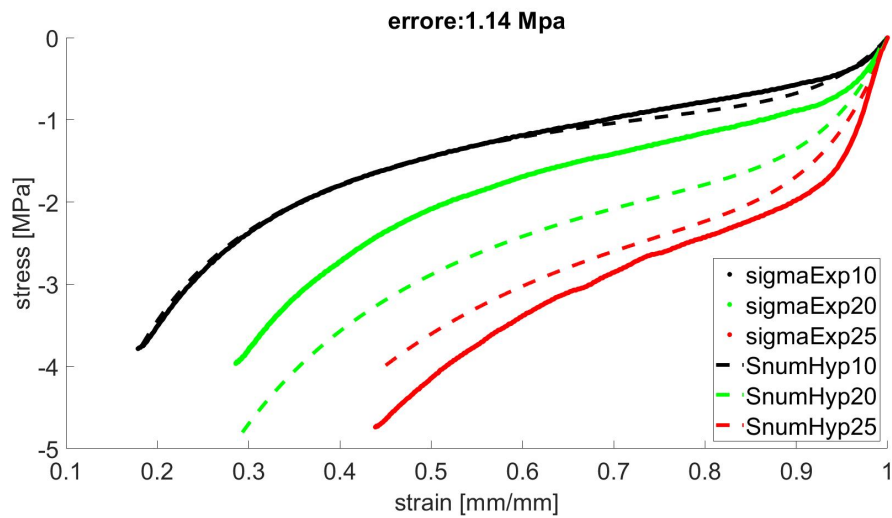


Figura 4.23: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.

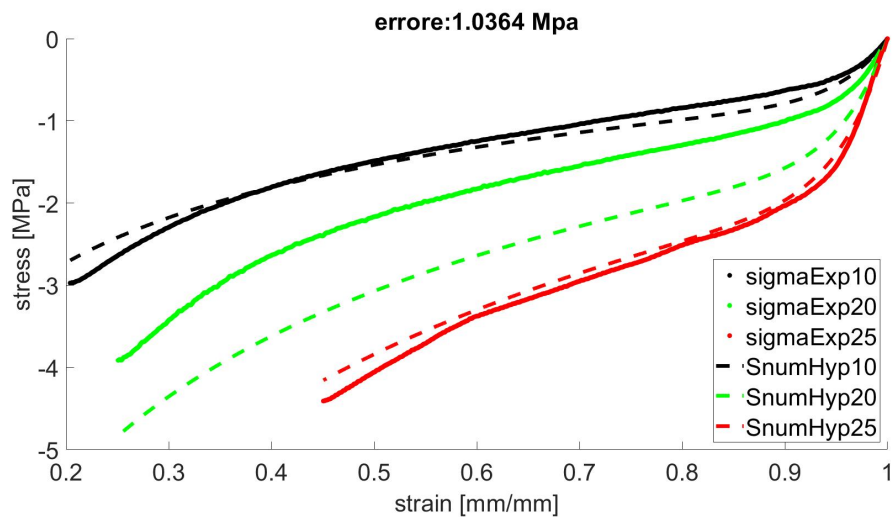


Figura 4.24: Applicazione modello lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Durante la compressione dinamica, seppur in modo meno dettagliato, l'andamento della tensione in funzione della compressione è approssimato correttamente a basse ed elevate densità per tutte e tre le direzioni, non riuscendo però per quelle intermedie.

4.2.3 Applicazione Avalle non lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

AVALLE NON LINEARE COMPRESSIONE QUASI-STATICA

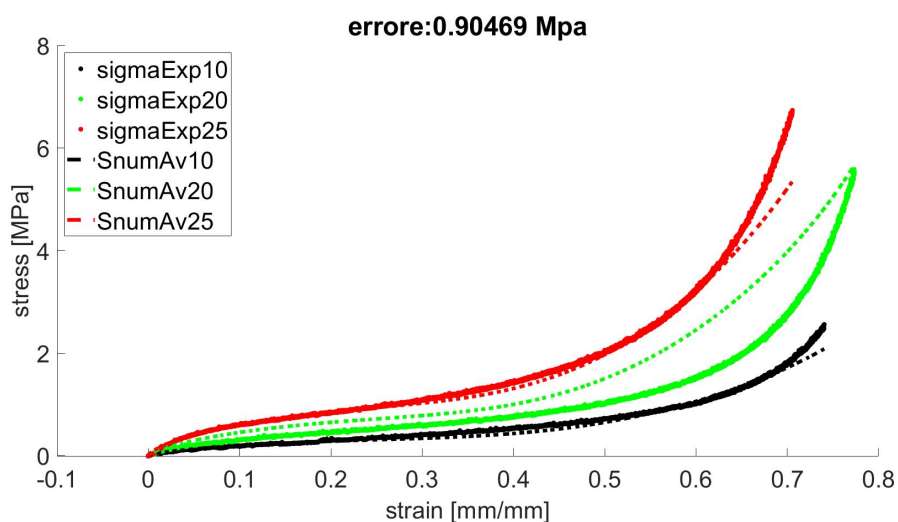


Figura 4.25: Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.

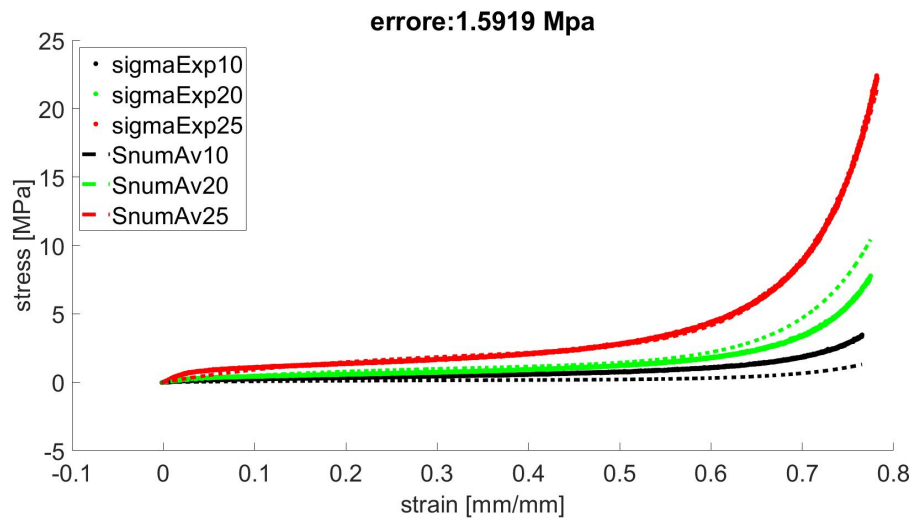


Figura 4.26: Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.

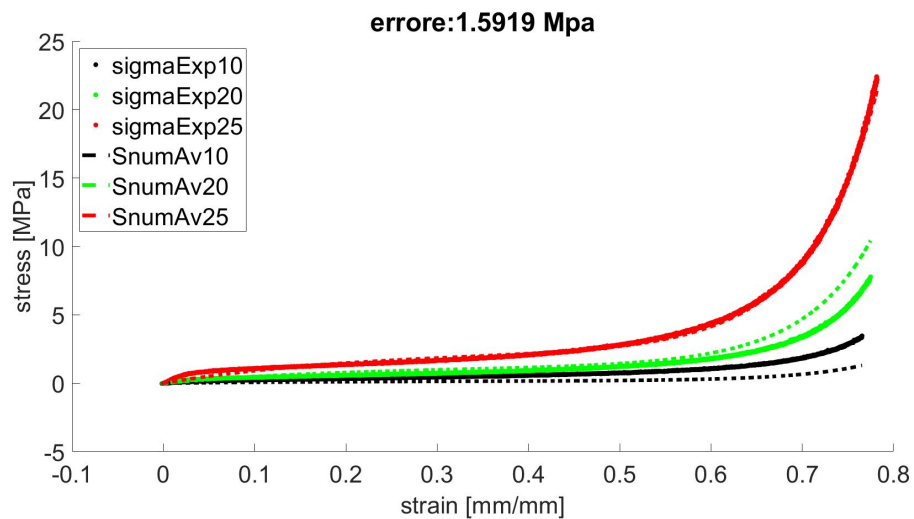


Figura 4.27: Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Il modello *Avalle* non lineare riesce, in opposizione a quello lineare, a rappresentare in maniera soddisfacente le compressioni con le densità più alte in tutte le direzioni; per la direzione A l'approssimazione è soddisfacente fino al 60 % di deformazione e riesce a rappresentare con cura anche la compressione a basse densità.

AVALLE NON LINEARE COMPRESSIONE DINAMICA

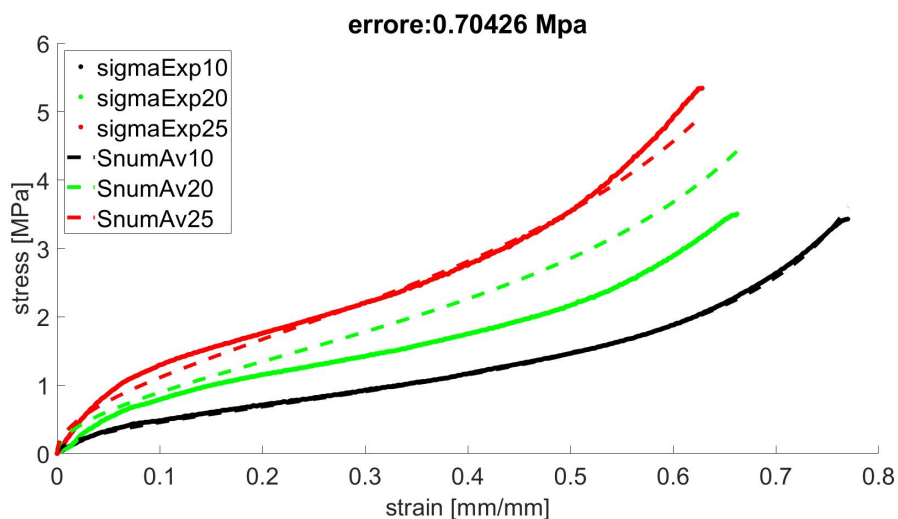


Figura 4.28: **Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.**

Come nel caso lineare il modello resta valido ad alte e a basse densità ma non a intermedie.

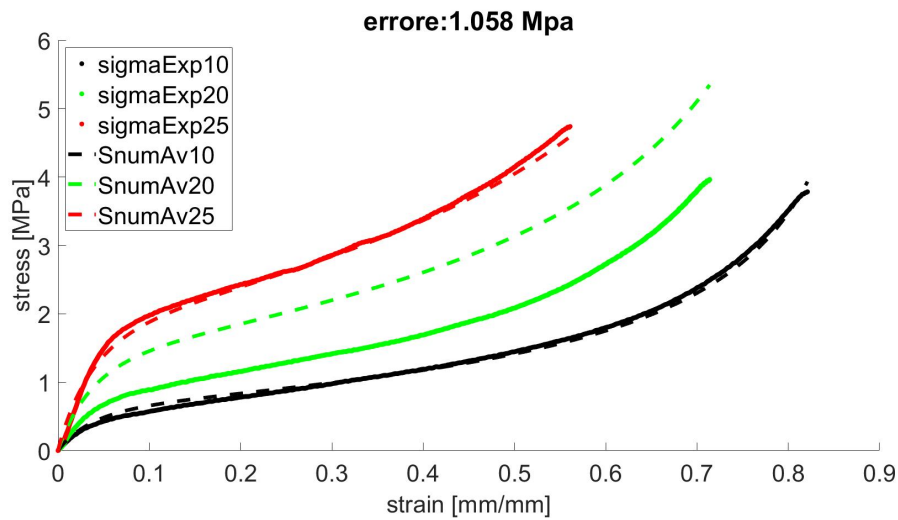


Figura 4.29: Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.

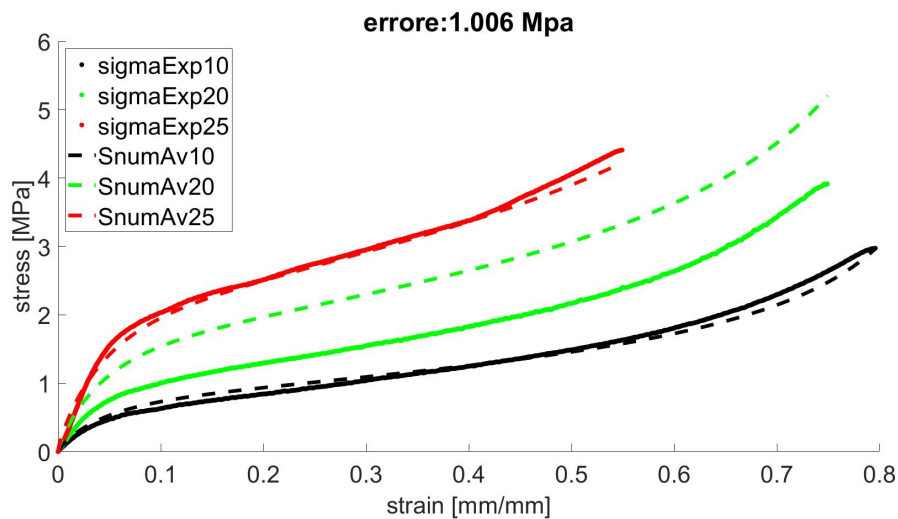


Figura 4.30: Applicazione modello non lineare *Avalle* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.

4.2.4 Applicazione Hyperfoam non lineare dipendente dalla densità a compressione quasi-statica e dinamica su sughero agglomerato

HYPERFOAM NON LINEARE COMPRESSIONE QUASI-STATICA

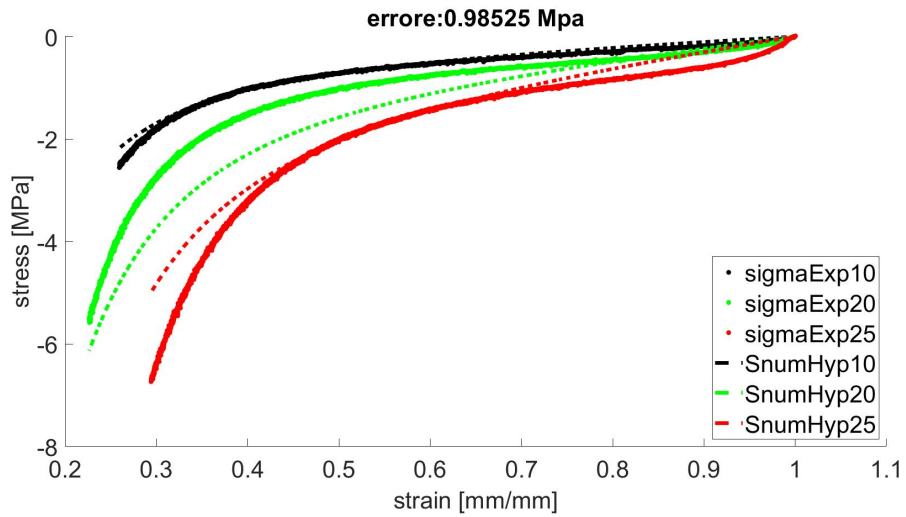


Figura 4.31: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione A.

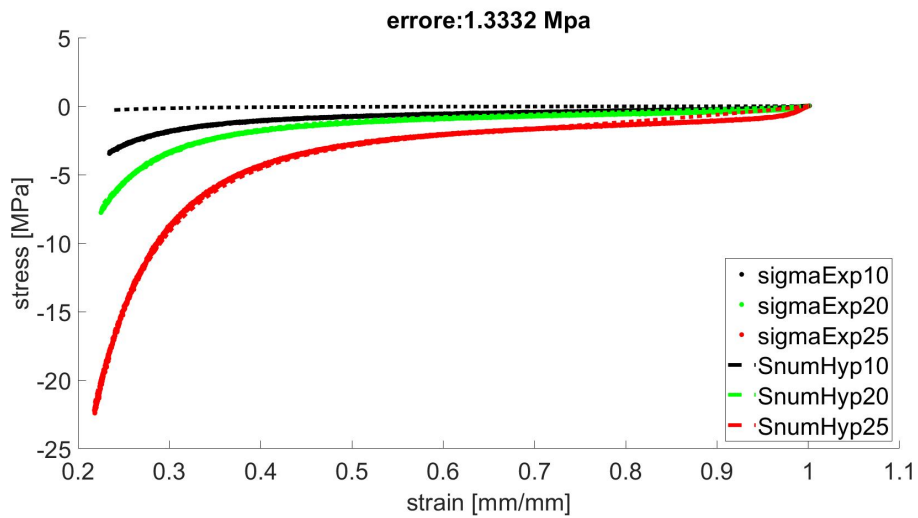


Figura 4.32: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione C.

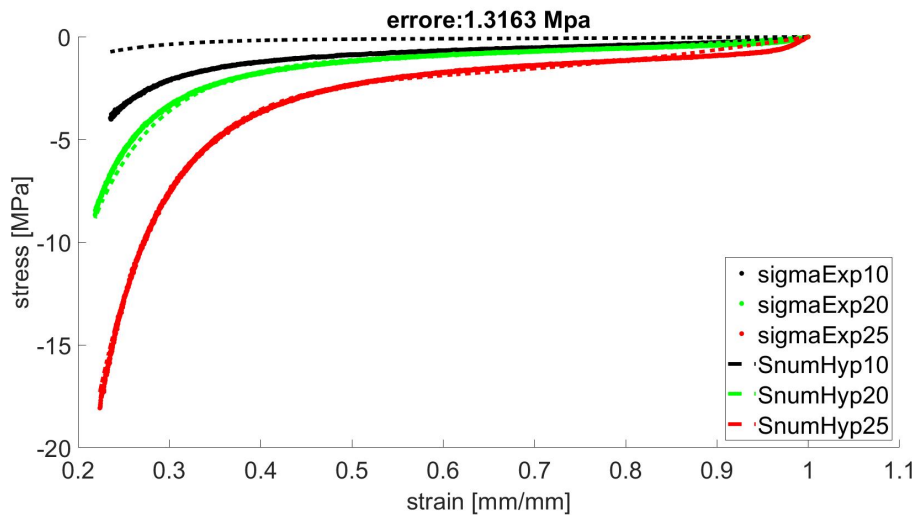


Figura 4.33: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione quasi-statica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Ad alte densità il modello *Hyperfoam* non lineare risulta un'ottima rappresentazione della funzione *strain-stress* per tutte e tre le direzioni di taglio (per la direzione A fino al 55 % di strain). Per le direzioni C e D, inoltre, anche a densità intermedie il modello risulta valido, mentre per la A risulta valido anche a basse densità.

HYPERFOAM NON LINEARE COMPRESSIONE DINAMICA

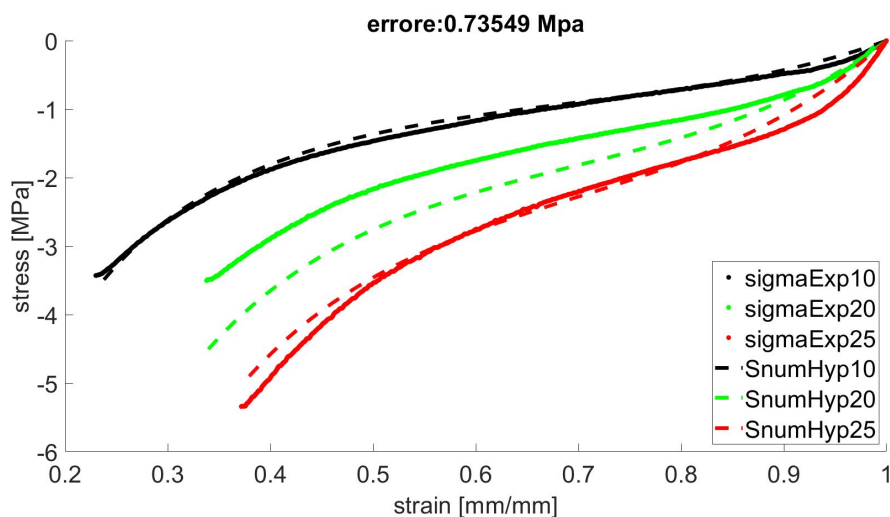


Figura 4.34: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione A.

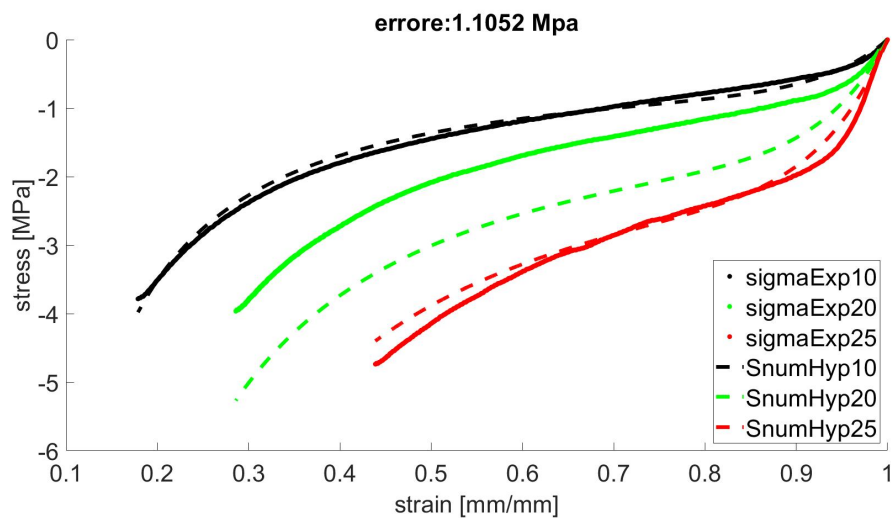


Figura 4.35: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione C.

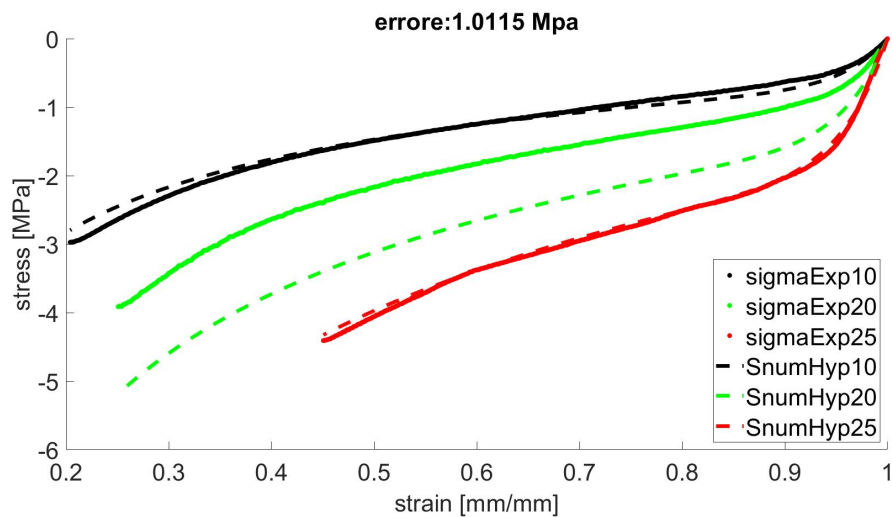


Figura 4.36: Applicazione modello non lineare *Hyperfoam* in funzione della densità su compressione dinamica di sughero tagliato in direzione D.

4.2 Risultati applicazione modelli in funzione della densità

Il modello presenta lo stesso comportamento del caso lineare.

Conclusioni

In conclusione il sughero si rivela essere un materiale dai molteplici utilizzi. Ciò è dovuto alla sua particolare struttura interna e alla sua composizione chimica che gli permette di essere impermeabile ai liquidi, di essere un ottimo isolante termo-acustico e di presentare un'elevata attitudine allo smorzamento e al recupero strutturale.

Quest'ultimo aspetto dal punto di vista meccanico ha suscitato un notevole interesse nello sviluppo di specifici modelli matematici; tra quelli presentati, entrambi si sono rilevati idonei per una corretta approssimazione dei dati sperimentali, se considerati singolarmente e indipendenti dalla densità.

I modelli che implicano la densità come parametro, infatti, pur non riuscendo a descrivere contemporaneamente tutte e tre le curve tensione-deformazione correttamente, rappresentano sicuramente un ottimo punto di partenza per ulteriori analisi.

Bibliografia e Sitografia

BIBLIOGRAFIA

- (Figura 1.1) F. A. O. Fernandes, R. J. S. Pascoal, R. J. Alves de Sousa. Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials and Design* 58 (2014) 499-507.
- (Figura 1.4)(Figura 1.6) S. P. Silvia, M. A. Sabino, E. M. Fernandes, V. M. Correlo, L. F. Boesel and R. L. Reis. Cork: properties, capabilities and applications.
- (Figura 1.5)(Figura 1.7) Helena Pereira. The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry. bioresources.com
- R. T. Jardim, F. A. O. Fernandes, A. B. Pereira, R. J. Alves de Sousa. Static and dynamic mechanical response of different cork agglomerates. *Materials and design* 68 (2015) 121-126.
- M. Ptak, P. Kaczynsky, F. A. O. Fernandes, R. J. Alves de Sousa. Assessing impact velocity and temperature effects on crashworthiness properties of cork material. *International Journal of Impact Engineering* 106 (2017) 238-248.
- Helena Pereira, M. Emilia Rosa and M. A. Fortes. THE CELLULAR STRUCTURE OF CORK FROM QUERCUS SUBER L. *JAWA Bulletin n.s., Vol. 8 (3), 1987.*

SITOGRAFIA

- (Figura 1.2) <https://it.wikipedia.org/wiki/Sughero>
- (Figura 1.3) <https://www.mutodigallura.com/gallery/estrazione-sughero/>
- (Figura 1.8) <https://it.wikipedia.org/wiki/Lignina>
- (Figura 1.9) <https://www.hkdivedi.com/2017/01/define-poissons-ratio-in-physics.html>
- (Figura 1.10 Figura 1.13) https://restructura.house/pannelli-isolanti-in-sughero-biondo-naturale.html#.X_nO9OhKhPY
- (Figura 1.11) <https://www.behance.net/gallery/815551/Cork-Bicycle-Helmet-Concept-For-Lacoste>
- (Figura 1.12) <http://www.sugherificioeuropa.it/wp/it/pages/come-lavoriamo/>
- (Figura 3.2) <https://www.relinc.com/it/split-hopkinson-bar-kolsky-bars/split-hopkinson-bar/>
- <http://130.149.89.49:2080/v6.11/books/usb/default.htm?startat=pt05ch21s05abm08.html#usb-mat-chyperfoam>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Corteccia_\(botanica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Corteccia_(botanica))
- <https://www.corklink.com/index.php/expanded-cork-black-cork-supplier/>
- <http://www.sardegnaambiente.it/index.php?xsl=611&s=19&v=9&c=11894&es=4272&na=1&n=10>
- <https://www.corkor.com/blogs/corkor/72696197-what-is-cork>
- <https://www.teknoring.com/news/materiali-da-costruzione/sughero-espanso-caratteristiche-e-utilizzi/>
- <http://www.ristrutturazionedilizia.com/efficienza-energetica/sughero-pregi-difetti-confronto-altri-materiali-isolanti/>
- <http://www.chimicare.org/curiosita/la-chimica-delle-piante/il-sughero-un-materiale-naturale-dalle-proprietà-sorprendenti/>
- <http://www.mondialsughero.it/processo-prodotti-vo/#:~:text=Bollitura%20delle%20fasce%20di%20sughero&text=La%20bollitura%20delle%20plance%20deve,e%20la%20data%20di%20bollitura>

- [https://www.sughero24.it/proprietà-del-sughero/#::~text=La%20loro%20composizione%20chimica%20%C3%A8,e%20altre%20sostanze%20\(5%25\)](https://www.sughero24.it/proprietà-del-sughero/#::~text=La%20loro%20composizione%20chimica%20%C3%A8,e%20altre%20sostanze%20(5%25)).
- <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/il-sughero-un-materiale-naturale-dai-molti-vantaggi/>
- https://www.youtube.com/watch?v=V7d6xCE-h2E&ab_channel=ProSuber

