



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI ingegneria

Corso di Laurea triennale di ingegneria meccanica

Elaborazione di prove sperimentali di compressione a diverse velocità su materiali naturali e schiume

Elaboration of experimental compression tests at different speeds on natural materials and foams

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Marco Sasso**

Tesi di Laurea di:

Riccardo Monaco

A.A. 2019 / 2020

Indice

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Pvc.....	4
1.1.1 struttura.....	4
1.1.2 proprietà fisiche.....	5
1.1.3 proprietà viscoelastiche.....	7
1.2 sughero	9
1.2.1 struttura.....	9
1.2.2 composizione.....	11
1.2.3 applicazioni.....	11
1.2.4 proprietà fisiche.....	11
1.2.5 proprietà viscoelastiche.....	12
2. MODELLO	14
3. MATERIALI E METODI	16
3.1 materiali	16
3.2 metodi	17
3.3 matlab	18
4. RISULTATI	19
4.1 sughero.....	19
4.1.1 caso 1	19
4.1.2 caso2	23
4.1.3 caso 3	28
4.2 pvc	32

4.2.1 caso 1	32
5. CONCLUSIONI	36
6. BIBLIOGRAFIA	37

1. INTRODUZIONE

I solidi cellulari rappresentano una caratteristica classe di composti, la cui diffusione negli ultimi decenni ha avuto un notevole incremento. Alla base di questo fenomeno possiamo annoverare le loro particolari caratteristiche, tra cui: bassa densità relativa (intesa come rapporto tra la densità del solido fratto quella della parete cellulare), un'ottima capacità di smorzamento e di assorbimento dell'energia, isolamento e rigidità specifica. Sotto carico di compressione, infatti, possono assorbire grandi quantità di energia subendo, prima di giungere a densificazione, a grandi deformazioni anche se in presenza di un basso livello di tensione. Utilizzati principalmente in applicazioni ingegneristiche, rientrano in questo gruppo metalli, composti ceramici e vetrosi, materiali compositi, polimeri tra cui PVC e sostanze naturali come il sughero. (Fernandes et al., 2014)

1.1 PVC

Il cloruro di polivinile (PVC) è stato sviluppato per la prima volta circa 100 anni fa, ma a causa della sua instabilità le sue applicazioni commerciali si diffusero solo più tardi, a seguito della scoperta di mezzi e sostanze che rendessero possibile la sua stabilizzazione. Ottenuto da due materie prime naturali: cloruro di sodio (NaCl) (57%) e petrolio o gas naturale (43%), risulta essere meno dipendente da risorse non rinnovabili rispetto ad altre materie plastiche. Nella sua forma originale appare come polvere bianca, amorfa e opaca, estremamente versatile, che con l'aggiunta di agenti modificanti quali plastificanti, riempitivi, stabilizzanti ed altri additivi può raggiungere un variegato range di proprietà (Naqvi et al., 1985).

1.1.2 struttura

Il cloruro di polivinile (PVC) è un materiale polimerico sintetico (o resina), prodotto mediante addizione ripetitiva di monomeri di cloruro di vinile $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$. Se in passato era prodotto da acido cloridrico ed acetilene in presenza di sali di mercurio a $150\text{ }^\circ\text{C}$, oggi è frutto di un processo alternativo, basato sulla clorurazione dell'etilene a dicloroetano, seguito da cracking catalitico a cloruro di vinile con produzione di acido cloridrico. Questo processo, perfezionato con l'aggiunta di uno stadio di ossiclorurazione dell'etilene consente il riutilizzo dell'acido cloridrico prodotto durante il cracking. Il polivinilcloruro è poi prodotto per polimerizzazione radicalica iniziata da perossidi organici ed inorganici.

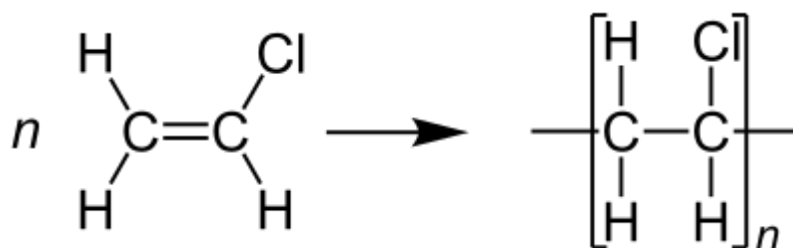


Figura 1: Struttura monomero cloruro di vinile.

La struttura molecolare del pvc è molto simile a quella del polietilene, se non fosse per la presenza di cloro (costituente da solo circa il 57% del peso della resina polimerica pura) la cui presenza rende possibile il mescolamento con altre sostanze. Si presenta come un polimero lineare con gli atomi di carbonio ibridizzati tutti sp^3 , interagenti tra loro tramite legami di tipo sigma (Wypych et al., 2020).

Essenzialmente amorfo è costituito da regioni sindiotattiche (non più del 20 % del totale) caratterizzate da bassi livelli di cristallinità. Alla base della sua instabilità, la presenza di difetti strutturali presenti nella catena che si comportano come siti di inizio della degradazione, per tale motivo il pvc puro da solo non è commercializzabile. (yang et al., 1983). In particolare, tra i difetti più importanti per la deidroclorurazione la presenza di cloro terziario, estremamente più reattivo rispetto al cloro secondario. Di per sé, infatti, rami del pvc non causano instabilità se l'idrogeno è presente nell'atomo di carbonio terziario, ma formano gruppi labili se il cloro è un sostituito dell'atomo di carbonio terziario. Nelle fasi iniziali, quando vi è ancora un'alta concentrazione di cloro terziario, si registra, infatti, un maggiore tasso di decomposizione del PVC. Il tutto sembra coincidere con le osservazioni dei test di degradazione del PVC durante i quali l'emissione iniziale di HCl è effettivamente più alta. Altro fattore importante la presenza di doppi legami interni, che a causa della presenza di gruppi cloroallile, possono fungere da centri di attivazione per la deidroclorurazione. In conclusione, possiamo dire che i gruppi cloroallile ed il cloro terziario sono i difetti più importanti per l'inizio della degradazione termica del pvc. (Wypych et al., 2020)

Il pvc combinato con altri composti può dar vita a sostanze con proprietà differenti. La massima resistenza si ottiene nei composti che non contengono sostanze plastificanti, sono i così detti UPVC o PVC-U. Aggiungendo a questi resine o altri modificatori (come ABS, CPE o acrilico) è possibile migliorare ulteriormente la resistenza agli urti, sono i così detti PVC modificati (PVC-M). Con l'aggiunta, invece, di plastificanti si possono produrre PVC flessibili o plastificati, con una vasta gamma di proprietà. Il CPVC (PVC-C) (PVC clorurato), si caratterizza per un contenuto di cloro più elevato, nel PVC orientato, invece, (PVC-O) le molecole sono preferibilmente allineate in una direzione particolare. (Patrick et al., 2005)

1.1.3 proprietà fisiche

Viene utilizzato con temperatura di esercizio compresa tra -10°C e $+60^{\circ}\text{C}$.

La durata dei manufatti varia da un minimo di un anno (imballaggi) a 10-50 anni (edilizia). Il suo peso molecolare è generalmente compreso tra 50.000 e 110.000, ed aumenta con la diminuzione della temperatura di polimerizzazione. Non presenta un punto di fusione fisso, ma già a $80 \sim 85^{\circ}\text{C}$ circa, comincia ad ammorbidire. A 130°C si trova in uno stato viscoelastico.

Presenta una elevata rigidità dielettrica, con eccellenti proprietà elettriche, poco influenzate da variazioni di temperatura, frequenza, intemperie ed umidità. Presenta, inoltre, un ottimo potere isolante. Ha una buona stabilità dimensionale, è termoplastico e termosaldabile, brucia solo in presenza di fuoco, ha una buona resistenza agli effetti dell'ambiente, principalmente ozono.

Fortemente impiegato nell'industria chimica, galvanica e petrolchimica grazie alla sua particolare resistenza a: soluzioni acido base, alcali, grassi, oli, benzine senza aromi ed a quasi tutti i prodotti chimici inorganici. È inoltre resistente agli agenti corrosivi più comuni, inclusi acidi inorganici, alcali e sali. Solubile in cicloesano e tetraidrofurano, può essere copolimerizzato con acetato di vinile e cloruro di vinilidene e sebbene si dissolva in idrocarburi aromatici, chetoni ed eteri ciclici, difficilmente dissolve in altri solventi organici.

Sotto irradiazione UV e in presenza di ossigeno e umidità, il PVC subisce un processo molto rapido di deidroclorurazione e perossidazione con formazione di polieni. Subisce una rapida deidroclorurazione autocatalitica in seguito all'esposizione al calore e alla luce ultravioletta, conducendo a una perdita di cloro sotto forma di acido cloridrico. La degradazione provoca anche un

drastico cambiamento nelle proprietà meccaniche del polimero, che è accompagnato da una riduzione o un aumento del peso molecolare a seguito rispettivamente della scissione a catena o della reticolazione delle molecole di polimero.

La lavorabilità di un materiale termoplastico dipende in gran parte dalla sua viscosità allo stato fuso. Il PVC non è adatto per lo stampaggio a iniezione di prodotti di grandi dimensioni, poiché la sua viscosità allo stato fuso è relativamente elevata, ma mostra un'eccellente lavorabilità secondaria nelle produzioni mediante piegatura, saldatura, incollaggio ad alta frequenza e formatura sottovuoto. (Wypych et al., 2020)

Le proprietà fisiche sono influenzate da due fattori dipendenti dalla storia termica: volume libero e cristallinità. Costituito da una struttura parzialmente amorfa e parzialmente cristallina, la presenza di queste regioni è condizionata dalla storia termica del materiale. La regione amorfa può presentarsi allo stato vetroso o allo stato liquido, con la presenza di una grande mobilità molecolare. Può essere studiata considerando il volume libero, con la struttura amorfa allo stato liquido che non dipende dal tempo ma solo dalla temperatura, al contrario allo stato vetroso il volume libero dipenderà dalla storia termica. La transizione tra i due stati sarà comunque possibile per temperatura di circa 70 C°

Anche i fenomeni di trasporto dipendono in realtà dalle variazioni di volume libero, infatti la diffusione e permeabilità del liquido e vapore è molto bassa nei campioni ricotti. Prove di rilassamento a temperature elevate hanno inoltre messo in evidenza un aumento del modulo di Young ed una drastica diminuzione dell'estensibilità del pvc, con l'aumento del tempo di ricottura. L'altro parametro fondamentale, la cristallinità, è valutabile solo con trattamenti termici. (Illers et al., 1977)

Property	Unit	PVC-U	Impact-modified PVC	PVC-P	PVC-U foam	PVC-C
Hardness, Shore; ISO 868 [3]		83–84 (D)	80 (D)	60–90 (A)	40–70 (D)	
Ultimate tensile strength; DIN 53455 [4]	MPa	50–75	40–50	10–25	15	50–55
Break to elongation; DIN EN ISO 178 [5]	%	10–50	30–100	150–400	10–15	23–50
Flexural strength; DIN EN ISO 178 [5], DIN EN ISO 527-1 [6], DIN EN ISO 257-2 [7], DIN EN ISO 604 [8]	MPa	70–90	70–80			
Modulus of elasticity (flexural modulus); DIN EN ISO 179-1 [9]	GPa	2.7	2.2–2.6		0.9–1.5	2.6
U-notch Charpy impact resistance; DIN 53453 [7] (20 °C)	kJ/m ²	2–5	5–20	No break		
Double V-notch Charpy impact resistance; (23 °C)	kJ/m ²		40–75			

Figura 2: Proprietà meccaniche del pvc.

1.1.4 Proprietà viscoelastiche

Le proprietà viscoelastiche dei polimeri sono in genere studiate tramite prove di compressione osservando già a temperatura ambiente una dipendenza di queste proprietà con il tempo e la velocità.

Il comportamento della schiuma differisce notevolmente tra trazione e compressione anche se entrambi mostrano una grande dipendenza dalla densità. A compressione, infatti, la deformazione ingegneristica può addirittura raggiungere il 90 %, mentre a trazione sarà inferiore all' 8%. In entrambi i casi, comunque, la densità gioca un ruolo fondamentale, venendo con un suo aumento ad aumentare: la pendenza iniziale, lo stress da collasso, la tensione di compressione nella regione piatta della curva, la pendenza iniziale e la resistenza alla frattura in tensione. Poiché il tratto elastico non presenta un comportamento lineare, le pendenze calcolate non sono altro che frutto di una media incrementale calcolata sull' intero intervallo elastico. (Walter et al., 2008)

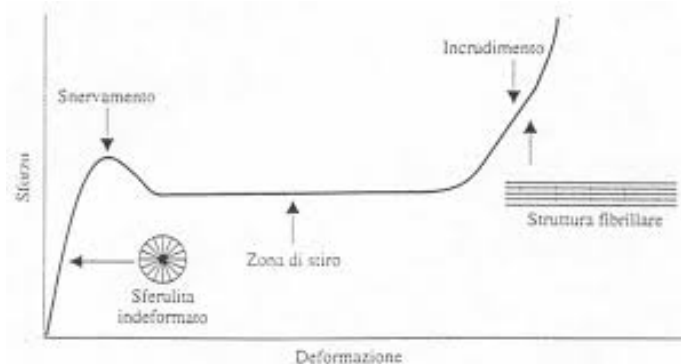


Figura 3: curva sigma epsilon del pvc per prove di compressione

A compressione si osserva un comportamento caratteristico. Dapprima, infatti, il materiale risponde in maniera elastica, a causa della flessione delle pareti cellulari, successivamente si registra in molti provini un calo dello stress all'estremità della regione elastica, con la creazione di un picco di stress prima ancora che l'altopiano sia definito. Si arriva poi alla regione dell'altopiano vero e proprio, in cui la tensione si mantiene pressoché costante per un certo range di deformazione più o meno ampio, fino al raggiungimento della regione di densificazione. Questo comportamento non è altro che il frutto di un collasso progressivo delle pareti. All'aumentare della tensione di compressione poi, la schiuma inizia ad irrigidirsi sempre più, subendo densificazione, fino a che, divenuta completamente densa inizierà a comportarsi come un composto solido. A questo punto un ulteriore aumento di deformazione comporterà una nuova impennata della tensione. Il sistema risulterà comunque ancora in grado di resistere ad ulteriore sollecitazione, al contrario di provini sottoposti a trazione, dove già per tensioni basse si registrerà una frattura del provino stesso. (Chen et al., 2013). La transizione tra le regioni di trazione e compressione appare discontinua ed i moduli elastici sono tra loro notevolmente differenti a causa della natura non lineare del tratto elastico. Inoltre, a differenza della compressione nella trazione sarà possibile individuare solo due zone nella curva: un tratto lineare elastico a causa della flessione delle pareti, ed una successiva regione con allineamento progressivo delle celle ed aumento di rigidità. Un ulteriore allungamento comporterebbe un aumento della deformazione assiale nelle pareti (Menges et al., 1982).

Dall'analisi delle curve si può affermare che i valori del modulo di compressione e delle sollecitazioni al collasso, aumentano con la densità della schiuma, comportamento analogo seguito anche a trazione (Chen et al., 2013).

La resa delle schiume risulta influenzata da: resa plastica irrecuperabile del polimero, instabilità elastica delle pareti cellulari, frattura fragile delle pareti cellulari. Caratteristica importante della schiuma è un rapporto di Poisson che per piccole deformazioni sia che siano dovute a compressione che a trazione è mediamente pari ad $1/3$. Per deformazioni maggiori, invece, durante la compressione si registra un coefficiente pari a zero, in quanto nella direzione perpendicolare all'asse di compressione, si registra una deformazione quasi trascurabile della schiuma. E', invece, diverso da zero durante la trazione, a seguito dell'allineamento e dell'allungamento delle pareti cellulari.

In generale risulta che all'aumentare della velocità di deformazione il modulo di compressione/taglio ed il carico di snervamento aumentano. A taglio e compressione i comportamenti sono simili, anche se a compressione si registra un cedimento, mentre a taglio un indurimento alla deformazione. Danni verificatisi nella schiuma dopo il cedimento seguono il modello di Mullins. Per una fissata ampiezza di deformazione, l'isteresi aumenta con il tasso di deformazione. Aumentando l'ampiezza di deformazione il danno prodotto aumenta, mostrando come le proprietà viscoelastiche cambino con il danno. (Chen et al., 2013).

1.2 SUGHERO

Il sughero è un materiale molto diffuso e a tutti ben noto, ma non altrettanto ben conosciuto. L'uso che lo rende tanto comune è quello di sigillare bottiglie, ma è molto di più: la sua struttura microscopica è sorprendente, rendendolo campione di isolamento meccanico, acustico, termico ed elettromagnetico. Ottenuto dalla corteccia di querce da sughero, la sua estrazione avviene nel periodo che va dai primi di maggio a fine agosto, quando il sughero distacca più facilmente senza causare danni alla pianta. La prima decorticazione di una giovane quercia, la demaschiatura, si effettua quando la pianta ha circa 25-30 anni e una circonferenza non inferiore ai 60 cm, e se ne ottiene un sughero da macina detto sugherone o maschio. Le successive estrazioni avvengono a intervalli di almeno dieci anni, come previsto dalle normative, ma anche 12-13 se il sughero non ha raggiunto un calibro accettabile. Il prodotto ottenuto è detto sughero gentile e viene utilizzato, se di buona qualità, per la fabbricazione dei tappi. Le principali aree di diffusione della quercia da sughero sono il Portogallo, la Spagna, la Sardegna, la Sicilia, la Maremma grossetana, la Corsica, il sud della Francia, il Nordafrica e la Cina. (Gil et al.,1998; Barberis et al.,2003; Pereira et al.,1984; Fialho et al.,2001; Carrasquinho et al.,1987; Pereira et al.,1987; Costa et al.,2003).

1.2.1 struttura

Il sughero è un materiale cellulare a celle chiuse che riempie tutti gli spazi, senza lasciare vuoti intercellulari. Come tutti i materiali di questo tipo le sue proprietà dipendono fortemente dalla geometria e dalla distribuzione delle celle. Caratteristica è la presenza di una struttura regolare a celle chiuse con una crescita regolare in direzione radiale al tronco dell'albero. Possono esservi durante la fase di crescita piccole variazioni nella densità e nelle dimensioni delle celle causate dal ritmo fisiologico della pianta, portando alla creazione di diversi anelli di crescita. La regolarità della struttura può anche essere compromessa da alterazioni locali dovute a diversi fattori biologici ed accidentali quali per esempio fratture o inclusioni del legno (Pereira et al.,2007).

Per descrivere correttamente la struttura del sughero sarà necessario conoscerne la corretta collocazione spaziale all'interno della pianta, definendo con la sezione trasversale quella perpendicolare alla direzione assiale (estensione verticale dell'albero), la sezione tangenziale è perpendicolare a quella radiale (direzione di sviluppo della sezione di tronco), ed infine la sezione radiale che contiene la direzione assiale ed è perpendicolare alla direzione tangenziale.

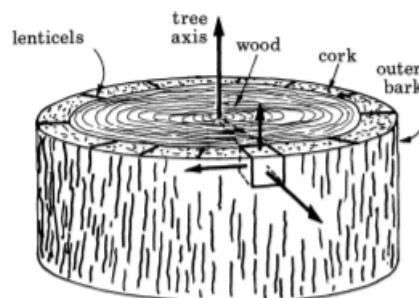


Figura 4: sezione tronco della quercia da sughero, riportante le direzioni assiali, radiali e tangenziali di riferimento.

Nella sezione tangenziale le cellule del sughero sono organizzate secondo una struttura a nido d'ape, senza spazi vuoti tra le cellule contigue, con i singoli poligoni costituiti da elementi da quattro ad otto

lati (Gibson et al., 2005; Fialho et al., 2001; Pereira et al., 1987). In direzione radiale e trasversale invece la struttura appare completamente diversa a quella tangenziale. Le singole celle, infatti, richiamano dei mattoncini rettangolari allineati con i tre lati che si incontrano nei singoli vertici. Tridimensionalmente possiamo quindi pensare al sughero come costituito da celle riconducibili a prismi esagonali impilati in righe.

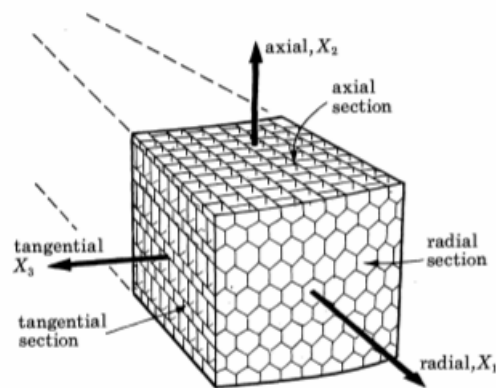


Figura 5: struttura celle di sughero nelle diverse direzioni di riferimento.

All'interno di ciascuna riga tutte le celle sono costituite dalla stessa base, ma differente altezza del prisma. Le varie righe sono tra loro allineate in direzione radiale e disposte con le basi del prisma parallelamente alla sezione tangente. Nelle file adiacenti le basi del prisma non sono coincidenti e giacciono tra loro in posizione sfalsata. In conclusione, quindi, le cellule di sughero sono poliedri che entrano tra loro in contatto in bordi facce e vertici. In particolare, due cellule possono entrare in contatto in una faccia, tre in un bordo e quattro in un vertice, di modo che in una struttura ideale con i prismi tutti uguali, ogni cellula entrerebbe in contatto con ben 14 cellule. Le dimensioni sono molto piccole, per una cella media normale parliamo di altezza del prisma di appena 40 μm , bordo di base 20 μm e spessore della parete di appena 1 μm . Nella realtà le dimensioni sono molto variabili in relazione anche al ritmo di crescita stagionale della pianta, in tal senso si possono per esempio distinguere all'interno di uno stesso anello annuale tra: quelle prodottesi nelle prime fasi di crescita da quelle nelle ultime fasi. Le prime risultano infatti più grandi e più sottili le seconde più corte e spesse. Altro dato caratteristico è il volume realmente occupato da materiale nel sughero, si stima infatti che la porzione solida occupa solo l'8-9% nelle cellule del primo periodo ed il 15-22% in quelle del secondo. (Pereira et al., 2007)

Ogni cellula si origina a partire di una cellula madre presente nel phellogen. La direzione di crescita è quella radiale. Rispetto ad altre piante il periderma del sughero presenta caratteristiche singolari di crescita regolarità e longevità. E' uno strato protettivo denominato phellem, costituito da cellule morte che fanno parte del periderma costituente la corteccia, che separa le cellule della pianta dall'ambiente esterno. Dopo la morte del phellogen, si verifica, infatti, una rapida formazione di tessuto filogenico traumatico che riprende la sua funzione come produttore di strato di sughero. E' questa caratteristica che dà alle piante da sughero la possibilità di poter essere usate come produttrici di sughero in maniera sostenibile.

1.2.2 Composizione

La composizione chimica è fortemente dipendente da diversi fattori: l'origine geografica, il clima, le condizioni del suolo, l'origine genetica, la dimensioni dell'albero, l'età (vergine o riproduzione) e le condizioni di crescita. La struttura della parete è costituita da lamelle centrali ricche di lignina (un polimero reticolato, parzialmente aromatico e composto da alcoli derivati dall'1-fenilpropano responsabile della struttura della parete) e da una parete secondaria costituita da suberina (un copolimero aromatico formato da monomeri di esteri con catene a 18-30 atomi di carbonio, responsabile della comprimibilità ed elasticità del sughero) alternata a lamelle di cera. Secondo alcuni studi la parete secondaria appare lignificata, presentando quindi anche tracce di cellulosa. Troviamo infine una terza parete di polisaccaridi. Tra i vari componenti, la suberina è la più abbondante (circa il 40%), la lignina corrisponde al 22%, i polisaccaridi al 18% e gli estraibili al 15%. Internamente, invece, le cellule contengono cristalli di cerina e fridelina ed una grande quantità di gas. (Pereira et al. 1979; Pereira et al., 1981; Bernards et al., 1998; Bento et al., 1992; Cordeiro et al., 1995; Pereira et al., 1988).

1.2.3 Applicazione

Oggi il sughero è stato riscoperto in applicazioni tecnologicamente avanzate grazie alla sua elaborata struttura e composizione. Viene utilizzato in strutture leggere, nel packaging, nell'isolamento termoacustico, come supporto per catalizzatori, applicazioni biomediche, sicurezza passiva in campo veicolistico, etc. Il sughero è adatto a migliorare le capacità dissipative dei polimeri rinforzati con fibre mediante strutture a sandwich in cui è utilizzato nel core.

1.2.4 Proprietà fisiche

Il sughero ha una straordinaria combinazione di proprietà. È leggero ma resistente (un tessuto vegetale che pesa appena 0.16 grammi per centimetro cubico); è un ottimo isolante per calore e suono (Questo perché i componenti gassosi contenuti nel sughero sono richiusi in piccoli compartimenti stagni, isolati l'uno dall'altro da una sostanza resistente all'umidità); ha un alto coefficiente di attrito; è impermeabile ai liquidi ed ai gas (grazie alla suberina e ai ceroidi contenuti nelle pareti cellulari); chimicamente stabile e resistente al fuoco (brucia senza produrre fiamma e non emette gas tossici durante la combustione). Non assorbendo polvere è considerabile come materiale ipoallergenico. Grazie alla sua struttura inoltre è molto resistente alle abrasioni ed agli impatti, avendo un alto coefficiente di frizione (Gibson et al., 1981). Ha inoltre mostrato una elevata affinità per i liquidi non polari ed a polarità molto bassa ed una buona compatibilità con polimeri acidi e basici (grazie alla sua superficie dalle caratteristiche anfotere) (Gibson et al., 1997).

In generale il sughero è caratterizzato da un peso specifico molto basso, ma fortemente variabile entro ampi limiti in funzione del trattamento subito (naturale o bollito) e della sua età (vergine o riproduzione). Si possono addirittura registrare variazioni di un fattore due passando da circa 120 a 240 kg/m³. (Cumber et al., 2000). Globalmente le variazioni di densità sono riconducibili alle dimensioni della cella (corrugazione, altezza e spessore della parete) ed alla frazione di volume occupata dai canali lenticolari. Alte densità, per esempio, coincidono con celle spesse e fortemente ondulate caratterizzate dalla presenza di pochi canali (Cumber et al., 2000; Gibson et al., 1981; Fortes et al., 1988; Baptista et al., 1993). In quest'ottica le cellule formate durante la primavera sono più sottili e quindi meno dense di quelle autunnali. Ad influire ancora sulla bassa densità anche la presenza di gas contenuto nelle celle.

Quest'ultimo, insieme alle ridotte dimensioni della cella sono anche alla base della trasmissione del calore, prevalentemente per conduzione, con pareti che presentano una conducibilità simile a quella del gas e quindi fortemente ridotta. Allo stesso modo anche la trasmissione del suono è molto scarsa in quanto la bassa densità e l'elevata porosità assorbono e trasformano in energia termica la maggior parte delle onde (Mano et al., 2002).

L'attrito si aggira intorno allo 0,5 e come molte altre proprietà presenta un comportamento anisotropo (che si attenua in presenza di sughero umido), essendo maggiore per gli scorrimenti sul piano tangenziale rispetto ai piani ad esso perpendicolari. Risulta influenzato da fenomeni di adesione tra le aree di contatto e dalla deformazione per flessione delle pareti cellulari (Vaz et al., 1998).

Il materiale risulta essere caratterizzato da un comportamento anisotropo, valutabile dal rapporto tra la dimensione maggiore della cella e da quella minore (indicato con R) ed il cui valore influenza fortemente le proprietà del materiale. Nel caso del sughero, anche se tutt'ora non sono ancora note tutte le cause, è possibile ricondurre l'anisotropia a due fattori principale tra loro indipendenti: l'anisotropia della struttura, dovuta alla forma delle celle, e l'anisotropia del materiale dovuta alla parete delle celle. L'anisotropia strutturale in particolare deriva dalla non equidimensionalità delle celle, per le sezioni trasversali e radiali è possibile valutare, infatti, rapporti di anisotropia di 1,5-1,7, nella sezione tangenziale invece il rapporto è circa 1,0-1,1. Presenta simmetria ortotropica, il che significa che ha tre piani di simmetria ortogonali, anche se è possibile approssimarlo ad un materiale con simmetria circolare nel piano tangenziale, ovvero rispetto tale piano può essere visto come materiale isotropo ed assialsimmetrico rispetto alla direzione radiale. Per l'anisotropia materiale, risulta in gran parte sconosciuta, anche se in prima approssimazione può essere considerato isotropo per la presenza di cellulosa come elemento strutturale nella parete cellulare. Ad influenzare ci sono ancora la presenza di anelli della crescita, con la presenza di sottili strati di latercork e la formazione di canali lenticolari che non avendo le stesse dimensioni nelle differenti direzioni, introduce un fattore di variazione nel piano tangenziale (Pereira et al., 2007).

1.2.5 Proprietà viscoelastiche

Il sughero è caratterizzato da proprietà meccaniche caratteristiche. Analizzando la curva di compressione (sforzo-deformazione) è, infatti, possibile individuare tre regioni (**Figura 6**).

La prima è quella corrispondente ad una flessione elastica delle pareti cellulari, con una tensione fino a circa il 7% (corrispondente alla flessione elastica delle pareti cellulari). La seconda zona ha un andamento pressoché orizzontale che si estende fino ad una deformazione del 70% (dovuta dalla deformazione progressiva delle pareti cellulari stesse). In fine abbiamo l'ultima zona dove la curva presenta una pendenza elevata a seguito del collasso delle celle e dello schiacciamento delle pareti (Gibson et al., 1981; Rosa et al., 1988; Romano et al., 1999). In generale il sughero mostra un diverso comportamento in tensione e compressione. Il modulo di young in compressione è infatti notevolmente minore, questo può essere spiegato in termini di rigidità delle pareti cellulari, che aumenta al decrescere dell'ampiezza delle ondulazioni (la compressione aumenta l'ampiezza) (Rosa et al., 1991).

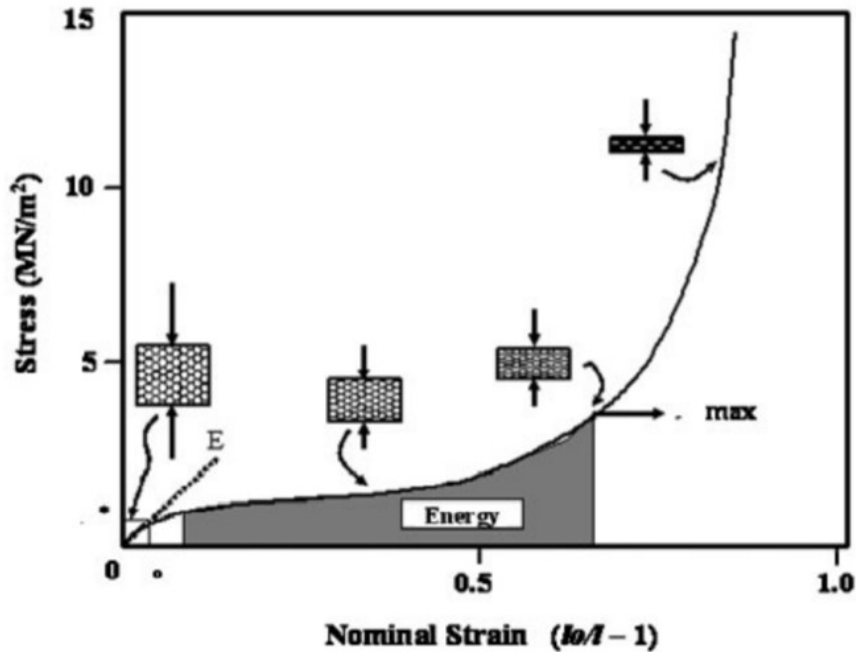


Figura 6: curva di compressione sforzo-deformazione del sughero.

Molte delle singolari proprietà del sughero, sono una conseguenza del coefficiente di Poisson, condizionato a sua volta dalla disposizione sfalsata e casuale delle celle e dall'ondulazione delle pareti cellulari laterali. Quando il sughero è compresso in direzione radiale, le pareti cellulari si piegano e si impacchettano, con l'ampiezza delle ondulazioni che aumentano e le basi cellulari perpendicolari alla direzione radiale che si allineano. Questi effetti determinano un'espansione nella direzione non radiale, e conseguentemente un valore positivo del coefficiente di Poisson. Al contrario se la compressione è eseguita in direzione non radiale, le pareti cellulari laterali si piegano, si raddrizzano e per tensioni elevate possono addirittura invertire la concavità, con conseguente restringimento in direzione radiale e valore negativo di Poisson per le alte deformazioni. (Fortes et al., 1989; Fortes et al., 1995).

Il trattamento termico in aria influenza notevolmente le proprietà di compressione del sughero. Trattando a 100-300 °C si osserva già una considerevole riduzione della forza del sughero. Dopo il riscaldamento a 200 °C si riscontra una diminuzione del modulo di Young di un fattore di circa 3 e superati i 300 °C di un fattore di 15. Riscaldare per circa un giorno a circa 100-150 °C aumenta a causa della perdita di acqua la resistenza a compressione, aumentare la durata del trattamento al contrario potrebbe avere un effetto contrario con diminuzione di resistenza, a causa della degradazione termomeccanica del materiale (Rosa et al., 1994).

Con il processo di ebollizione (trattamento termico con acqua), la presenza di acqua determina un ammorbidimento delle pareti cellulari che congiunta all'azione della pressione differenziale tra cellule adiacenti induce sollecitazioni di trazioni tali da raddrizzare le ondulazioni. Questo determina una riduzione dell'anisotropia e la presenza di un punto di snervamento a compressione più definito (Rosa et al., 1990; Rosa et al., 1991).

2. MODELLO

In generale la maggior parte dei modelli usati per le simulazioni numeriche, sono modelli fenomenologici, basati sulla semplice identificazione dei parametri che meglio riescono ad adattare ed approssimare i dati sperimentali, senza tener conto della densità. In tal senso, infatti, solo pochi modelli micro-meccanici, come il modello Gibson, tengono conto di tali effetti, ma hanno lo svantaggio di risultare eccessivamente complessi da gestire, a causa della necessità, di un'analisi approssimativa della struttura della schiuma.

Per valutare in maniera teorica il comportamento a compressione del materiale è stato usato il modello isotropo non lineare di Ogden, che rientra nella categoria dei modelli hyperfoam utilizzati per descrivere il comportamento iperelastico dei materiali. Questo modello si presta bene anche per applicazioni a deformazione finita, con possibilità di deformazioni elastiche fino al 90 % degli sforzi di compressione.

Nel modello usato, il comportamento elastico delle schiume si basa sulla funzione di energia di deformazione:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} \left((J)^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

Analizzando i termini dell'espressione troviamo:

- N, numero intero ≤ 6 (rappresenta l'ordine polinomiale).
- J, il rapporto di volume elastico, correlato al volume totale v (definito come rapporto tra volume corrente e volume di riferimento) ed al volume termico V_t secondo la relazione $J = v/V_t$, dove $V_t = (1 + \epsilon_t)^3$ con ϵ_t a sua volta, la deformazione di dilatazione termica lineare che si ottiene dalla temperatura e dal coefficiente di dilatazione termica isotropa
- λ_i , definisce la tensione principale correlata alla deformazione principale dalla relazione $\lambda_i = 1 + \epsilon_i$
- α_i e β_i sono invece esponenti non integrali che si adattano alla curva: il loro valore è scelto di modo da avere la migliore approssimazione possibile delle curve ottenute dai dati reali. Sono parametri del materiale con una dipendenza dalla temperatura. In particolare, per ogni termine nella funzione energia, il coefficiente β_i determina il grado di compressibilità ed è correlato al coefficiente di Poisson dalla relazione:

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

Da cui si conclude che se il coefficiente di Poisson è nullo, allora anche β_i lo sarà. β_i è anche correlato al modulo di compressibilità del materiale K_0 dalla relazione

$$K_0 = \sum_{i=1}^N 2\mu_i \left(\frac{1}{3} + \beta_i \right) \quad (3)$$

- μ_i , parametro del materiale dipendente dalla temperatura, è un coefficiente dell'espressione valutato in modo da avere una buona approssimazione della curva teorica rispetto a quella

reale, mantenendo però la relazione con il modulo di taglio del materiale μ_0 secondo l'espressione:

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (4)$$

Essendo il modulo di taglio dipendente dal modulo di Young (E) e dal coefficiente di Poisson (ν), secondo la relazione $\mu = E/(2*(1+\nu))$, da questo si ricava che per $\nu=0$, allora la somma dei coefficienti μ_i sarà eguale alla metà del modulo di Young, ovvero a metà della pendenza della curva.

- U rappresenta, infine, l'energia di deformazione

L'espressione prima definita permette quindi di calcolare l'energia di deformazione, noti i coefficienti del materiale e la deformazione. A partire da quest'ultima sarà poi possibile definire per derivazione l'espressione finale che permette di calcolare la tensione teorica secondo il modello di Ogden, il cui valore potrà essere confrontato con quello reale. La tensione teorica T_L risulterà essere data da:

$$T_L = \frac{\partial U}{\partial \lambda_L} = \frac{2}{\lambda_L} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_{i0}}{\alpha_{i0}} (\lambda_L^{\alpha_{i0}} - J^{-\alpha_{i0}} \beta_{i0}) \quad (5)$$

Il valore di N e i dati sperimentali di sforzo-deformazione possono essere specificati per un massimo di cinque semplici test: uniassiale, equibiassiale, taglio semplice, planare e volumetrico. È importante riconoscere che le proprietà dei materiali in schiuma possono variare in modo significativo da un lotto all'altro. Pertanto, tutti gli esperimenti devono essere eseguiti su campioni prelevati dallo stesso lotto di materiale. Questo metodo non consente però alle proprietà di dipendere dalla temperatura.

Per tutti i test, i dati di deformazione, inclusi i dati di deformazione laterale, devono essere forniti come valori di deformazione nominale (variazione di lunghezza per unità di lunghezza originale). Per le prove uniassiali, equibiassiali, di taglio semplice e planari, i dati di sollecitazione sono forniti come valori di sollecitazione nominale (forza per unità dell'area della sezione trasversale originale). I test consentono di usare sia dati di compressione che di tensione, con l'accortezza che le tensioni e le deformazioni di compressione devono essere inserite come valori negativi. Per le prove volumetriche i dati di sollecitazione sono forniti come valori di pressione.

In particolare, nei test uniassiali, equibiassiali e planari, J potrà essere calcolato come $J = \det(F)$, con

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dove le deformazioni sono valutate nei tratti principali.

A sua volta per le condizioni di carico uniassiali che si verificheranno nell'esperimento condotto, risulteranno essere: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ da cui risulterà anche $J = \lambda_3$.

(fernandes et al., 2014)

3. MATERIALI E METODI

3.1 Materiale

Per quanto riguarda i materiali, si è fatto ricorso a provini di sughero e pvc. In particolare, per quanto riguarda il pvc è stato scelto il Divinycell HP130, HP200 e HP250, una schiuma a cellule chiuse con densità media di 130 kg / m³, 200 kg / m³ e 250kg / m³, sviluppato per soddisfare elevate esigenze. L'esclusiva struttura chimica produce proprietà meccaniche impressionanti abbinate ad un peso ridotto, con la possibilità di mantenere un'alta percentuale delle sue proprietà anche durante l'esposizione ad ambienti con alte temperature. Offre proprietà elevate in tutte le aree significative, inclusa la meccanica. Tra queste: allungamento alla rottura, duttilità, adesione, resistenza alla pelatura, tenacità alla frattura e stabilità dimensionale. Altre caratteristiche fondamentali includono eccellente resistenza chimica, piccolo assorbimento di acqua e buon isolamento termico / acustico.

Property	Test Procedure	Unit		HP60	HP80	HP100	HP130	HP200	HP250
Compressive Strength ¹	ASTM D 1621	MPa	Nominal	0.95	1.5	2.0	3.0	5.4	7.2
			Minimum	0.85	1.2	1.65	2.4	4.5	6.1
Compressive Modulus ¹	ASTM D 1621-B-73	MPa	Nominal	80	105	135	170	310	400
			Minimum	58	90	115	145	265	350
Tensile Strength ¹	ASTM D 1623	MPa	Nominal	1.8	2.8	3.5	4.8	7.1	9.2
			Minimum	1.5	2.2	2.5	3.5	6.3	8.0
Tensile Modulus ¹	ASTM D 1623	MPa	Nominal	75	100	130	175	250	320
			Minimum	57	80	105	135	210	260
Shear Strength	ASTM C 273	MPa	Nominal	0.85	1.25	1.6	2.2	3.5	4.5
			Minimum	0.75	1.0	1.4	1.9	3.2	3.9
Shear Modulus	ASTM C 273	MPa	Nominal	20	28	35	50	73	97
			Minimum	18	22	28	40	65	81
Shear Strain	ASTM C 273	%	Nominal	23	38	40	40	45	45
Density	ISO 845	kg/m ³	Nominal	65	80	100	130	200	250

Figura 7: proprietà meccaniche del divinycell HP.

Characteristics ¹	Unit	HP60	HP80	HP100	HP130	HP200	HP250	Test method
Density variation	%	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	-
Thermal conductivity ²	W/(m-K)	0.035	0.037	0.037	0.038	0.045	0.048	EN 12667
Coeff, linear heat expansion	x10 ⁻⁴ /°C	40	40	40	40	40	40	ISO 4897
Heat Distortion Temperature	°C	+125	+125	+125	+125	+125	+125	DIN 53424
Continous temp range	°C	-200 to +80	-200 to +80	-200 to +80	-200 to +80	-200 to +80	-200 to +80	-
Max process temp	°C	+145	+145	+145	+145	+145	+145	-
Dissipation factor	-	0.0003	0.0005	0.0006	0.0009	0.0015	0.0019	ASTM D 2520
Dielectric constant	-	1.07	1.09	1.11	1.15	1.23	1.29	ASTM D 2520
Poissons ratio ³	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	ASTM 638

Figura 8: caratteristiche tecniche del divinycell HP.

Anche per il sughero sono stati presi in considerazione provini nelle tre diverse densità, rispettivamente 130 kg / m³, 200 kg / m³ e 250kg / m³. Per entrambi i materiali, comunque, i provini consistono in tre tappi agglomerati che differiscono tra loro per densità e dimensione dei granuli. Tutti i campioni usati hanno una sezione trasversale quadrata di 12x12mm, con una lunghezza del provino di 15 mm per test da 10⁻³ a 10⁻¹ s⁻¹ e di 10 mm per prove da 10³ a 10¹ s⁻¹. Tutti i

provini sono stati testati a compressione con carico agente parallelamente alla direzione di crescita della schiuma.

3.2 Metodi

Le prove di compressione quasi statica (da 10^{-3} a 10^{-1}) sono state eseguite con una macchina di prova pneumatica Si-plan®, dotata di cella di carico da 3 kN. Il pistone della macchina può raggiungere velocità di 100mm/s. La frequenza di campionamento della posizione e del carico del pistone è stata imposta in modo da avere circa 1000 punti per una deformazione di compressione nominale del 70%. Nelle prove i campioni sono stati posti semplicemente su una piastra piana collegata alla cella di carico, a sua volta collegata alla parte fissa della macchina. Il pistone è stato poi spostato delicatamente verso il basso avvicinandosi alla superficie superiore del provino. La prova è iniziata quando il precarico ha raggiunto il valore di 2 N. Per prove a 10 s^{-1} il pistone è stato spostato nella posizione più alta ed accelerato da 0 a 100 mm/s prima di entrare in contatto con il provino. In questo modo i provini sono stati deformati alla più alta velocità di deformazione esercitabile da questa macchina. Anche in questo caso il test è stato considerato avviato quando il carico ha raggiunto i 2N.

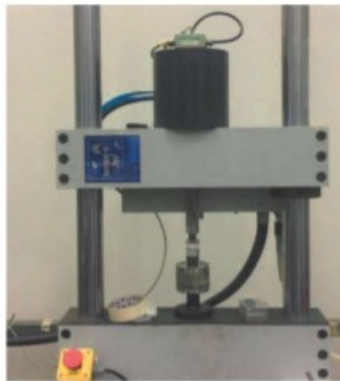


Figura 9: macchina di prova pneumatica Si-plan®.

I test dinamici sono stati eseguiti, invece, per mezzo della barra di pressione Split Hopkinson. L'apparato è costituito da tre barre allineate denominate barre precompressa, input e output, lunghe rispettivamente 3, 7,5 e 4 m. Le barre hanno un diametro di 18 mm. Un'onda di compressione viene prodotta attraverso il rilascio dell'energia elastica immagazzinata nella barra precompressa; precaricata staticamente per mezzo di un attuatore elettromeccanico fino a che un elemento sacrificale fragile non ne determina il rilascio. Questa onda, detta incidente, viaggia attraverso la barra di input e raggiunge il campione che è posizionato a contatto tra le barre di input e di output. Mentre il campione viene deformato rapidamente, l'onda viene parzialmente trasmessa alla barra di output e parzialmente riflessa nella barra di input. La deformazione indotta dalle onde incidente, riflessa e trasmessa viene misurata mediante rosette estensimetriche posizionate sulle barre di input ed output secondo una configurazione a ponte intero di Wheatstone.



Figura 10: barra di pressione Split Hopkinson.

3.3 Matlab

Per l'analisi dei dati e la determinazione dei coefficienti ottimali dell'espressione di Fernandes, è stato usato come strumento di calcolo Matlab (abbreviazione di Matrix Laboratory). Si tratta di un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla *MathWorks*. MATLAB consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. In particolare, tramite la funzione plot è stato possibile graficare le curve reali sigma epsilon ottenute a partire dai dati sperimentali prelevando i dati da dei fogli Excel creati a seguito delle prove di compressione.

Per quanto riguarda, invece, la determinazione dei coefficienti, è stata usata la funzione `fminsearch` che, tramite un processo iterativo si prefigura l'obiettivo di andare a trovare un minimo locale (x) della funzione (fun), a partire da un valore iniziale x_0 . La sintassi è del tipo:

$x = \text{fminsearch}(fun, x_0, options)$, con `options` corrispondente ad eventuali condizioni da imporre.

4. RISULTATI

Partendo dai dati reali di tensione e deformazione ottenuti per ogni singolo provino sottoposto a compressione, si è cercato di valutare come i modelli hyperfoam fossero in grado di approssimare il comportamento reale, tramite una espressione che tenesse conto dell'energia di deformazione. Da questa sarà possibile derivare una relazione diretta tra la sigma calcolata teoricamente con il modello e la deformazione reale ottenuta. La sigma teorica è stata poi confrontata con quella reale, valutando l'errore tra i due come lo scarto quadratico medio, ovvero come la norma della differenza tra tensione reale e teorica fratto la radice quadrata del numero di componenti del vettore.

Per il calcolo della tensione teorica si è fatto ricorso a Matlab che grazie alle sue funzioni ha permesso di calcolare i coefficienti dell'espressione di Ogden tali per cui l'errore tra le due tensioni fosse minimo. Per la determinazione dei coefficienti in particolare sono state adottate diverse strategie.

4.1 SUGHERO

Nel caso del sughero prima considerazione da fare è che si è osservato come per approssimare i dati siano bastati in realtà solo sei coefficienti, contro i nove del pvc. Il che significa che la nostra espressione è stata valutata per un valore di $n=2$, ottenendo come parametri: $u_1, u_2, a_1, a_2, b_1, b_2$.

4.1.1 Caso 1

Il primo studio condotto è quello che forse approssima meglio i dati reali, ma allo stesso tempo non sottende alle condizioni sui coefficienti imposte dal modello hyperfoam.

In questo caso, infatti, tutti e sei i coefficienti sono stati generati casualmente da Matlab tramite la funzione `fminsearch`, di modo da minimizzare l'errore con i dati reali. Sono stati ottenuti i seguenti coefficienti:

	A dens 130	A dens 200	A dens 250	B dens 130	B dens 200	B dens250
u_1	9,649	0,048	3,165	0,054	0,017	0,260
u_2	1,844	2,227	0,231	-1,268	4,418	6,970
a_1	2,263	19,283	8,2691	-1,662	-3,356	-2,052
a_2	56,851	13,186	-1,499	2,084	20,685	10,505
b_1	-0,947	0,166	-0,315	55,425	-0,791	-0,561
b_2	0,028	0,034	5,667	-1,572	0,019	-0,054

Tabella 1: coefficienti che meglio approssimano i dati reali, ottenuti per il sughero senza fornire alcuna imposizione.

Così facendo, però, tra i parametri non esiste alcun legame, né con il variare della direzione né con il variare della densità per una stessa direzione di carico. Anche u_1 ed u_2 non sono tra loro correlati, senza rispondere alla condizione imposta dal modello, tale per cui risulti $u_1+u_2=u$ con u modulo di taglio del materiale. L'errore che si intende definire è definito come errore quadratico medio, ovvero come la norma della differenza tra tensione reale e tensione teorica, fratto la radice quadrata del vettore tensione reale che si sta considerando.

Indicando con la curva in verde la curva teorica e quella in nero la curva reale otteniamo:

per la direzione di compressione a:

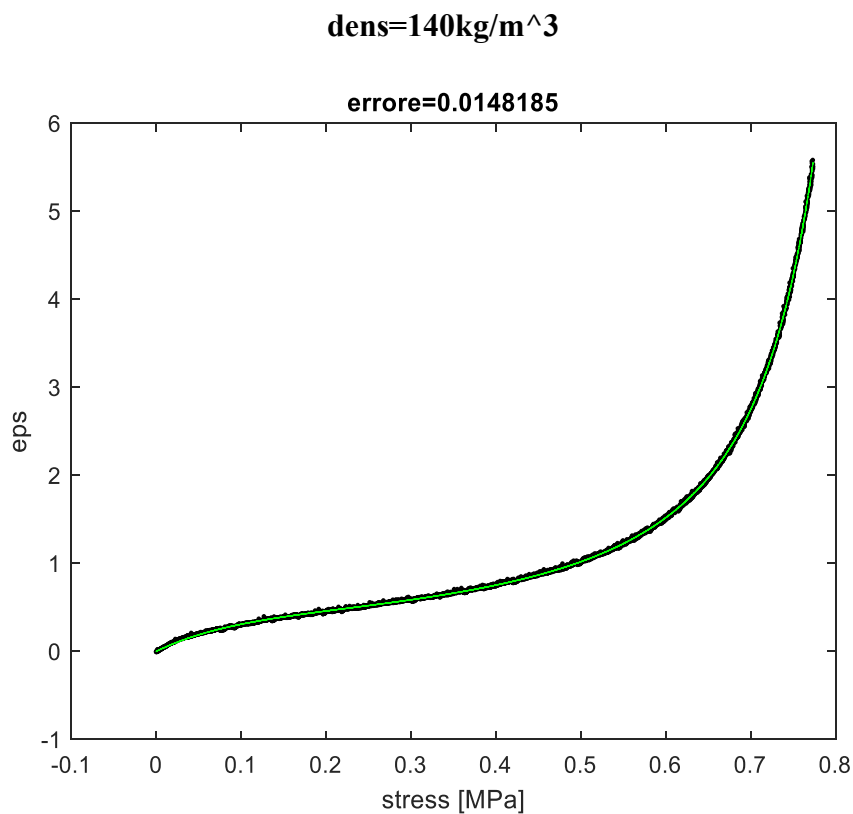


Figura 11: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =140kg/m³.

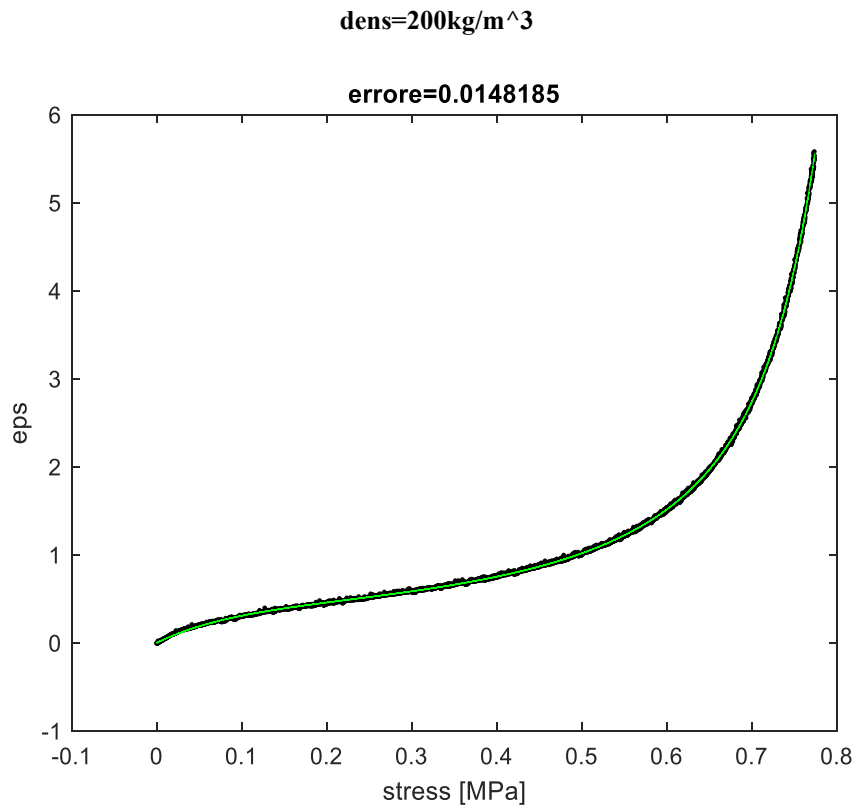


Figura 12: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =200kg/m³.

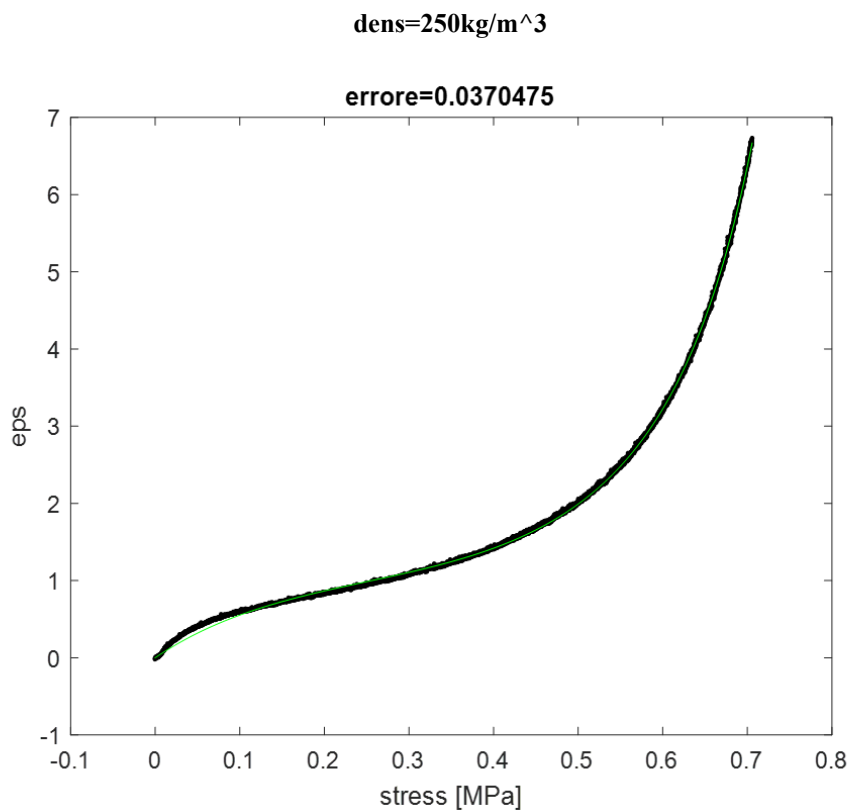


Figura 13: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =250kg/m³.

Per la direzione b

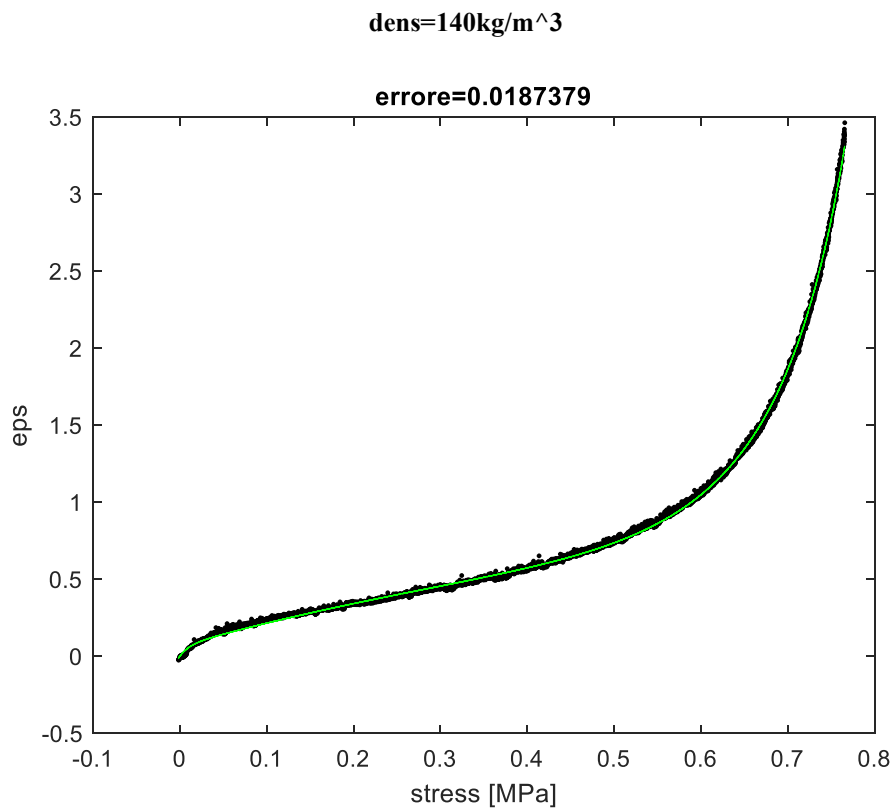


Figura 14: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =140kg/m³.

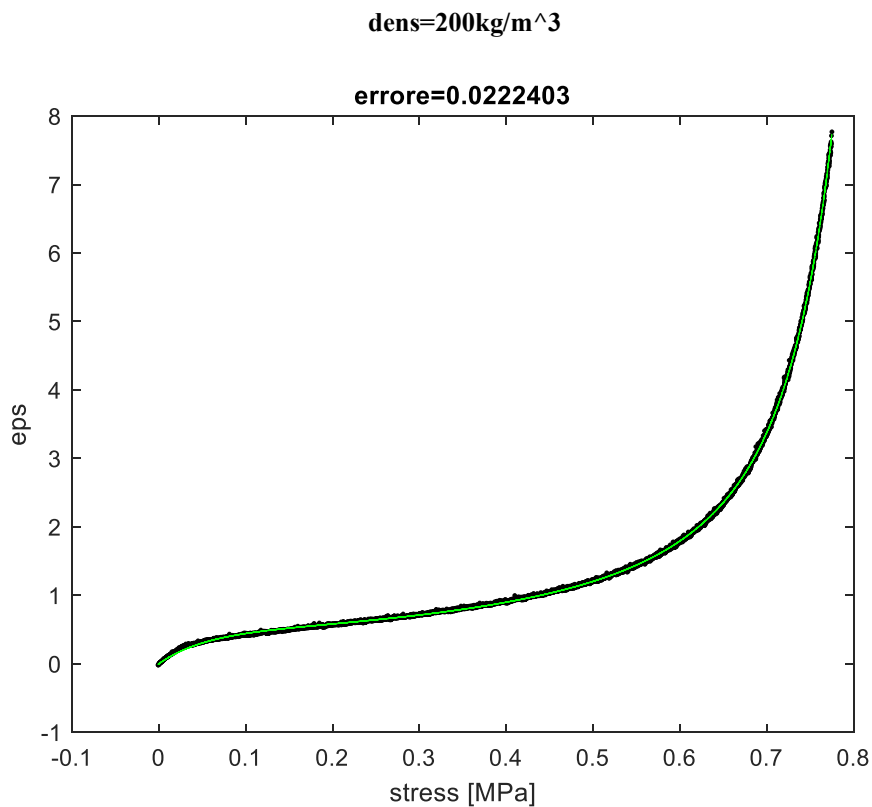


Figura 15: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =200 kg/m³.

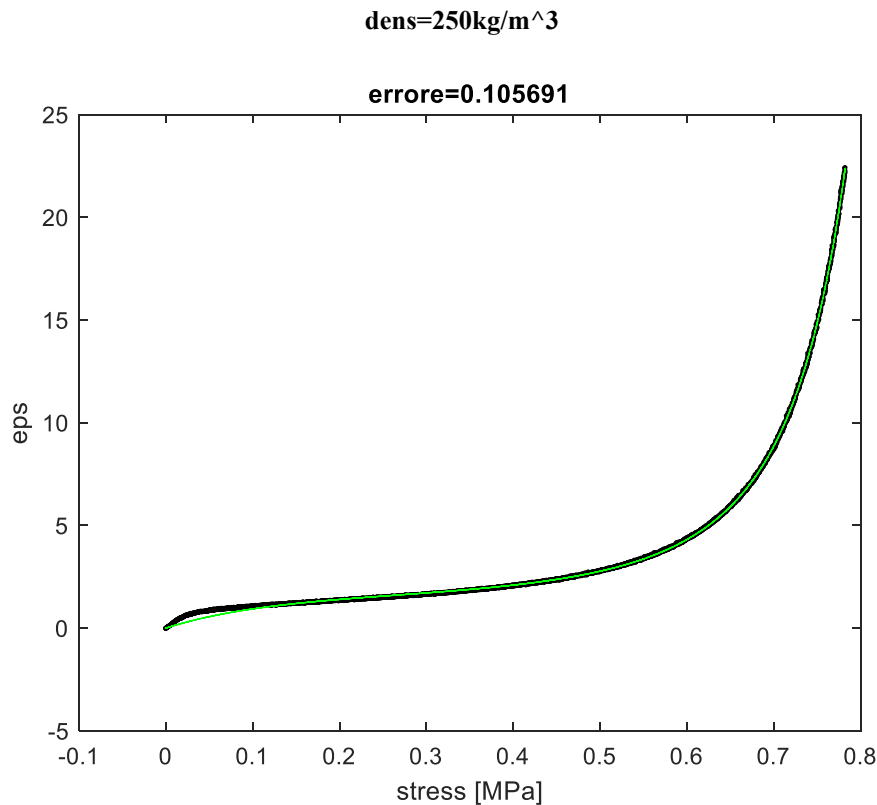


Figura 16: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =250 kg/m³.

Vediamo come gli andamenti seguano perfettamente le curve reali.

4.1.2 Caso 2

In questo secondo caso, la determinazione dei coefficienti è avvenuta sempre considerando una generazione casuale fatta tramite Matlab, ma con la caratteristica che ora sono imposte delle condizioni sui parametri stessi. Prima considerazione da fare è che essendoci posti in una situazione di carico uniassiale, ne deriva coefficiente di Poisson nullo, da cui essendo $b_i = \nu / (1 - 2\nu)$, si ricava che $b_1 = b_2 = 0$. I coefficienti a_1 ed a_2 restano, invece, generati casualmente. Per quanto riguarda u_1 si è cercato di assegnargli una dipendenza con la densità, per poter meglio valutare le sue variazioni con la densità, a parità di altre condizioni. Si è così utilizzata una espressione lineare del tipo: $u_1 = (f \cdot \text{dens} + q)$ dove f e q sono due coefficienti generati casualmente da Matlab per la minimizzazione dell'errore. A questo punto u_2 è determinata a partire dalle condizioni imposte dal modello, tale per cui risulti la sommatoria di $u_1 + u_2 = u$ con u modulo di taglio. Essendo $u = E / (2 \cdot (1 + \nu))$ (con E modulo di Young) ed essendo $\nu = 0$ per le condizioni imposte risulterà allora $u = E / 2$, ovvero il modulo di taglio pari a metà della pendenza della curva. A questo punto il valore di u potrà essere calcolato sperimentalmente a partire dai dati reali, valutando la pendenza delle curve reali ottenute dai dati sperimentali. Queste pendenze sono valutate ad un valore di deformazioni pari a circa il 4% del totale. Ripetendo questo calcolo per tutte le curve generate, ricaviamo per ogni provino un valore di E corrispondente pari a:

	dir A	dir B
dens 140	2,876	3,725
den 200	4,329	7,008
dens 250	8,223	20,247

Tabella 2: modulo di Young valutato sperimentalmente per ogni prova svolta.

Ottenuti questi valori, a questo punto si potrà trovare una relazione di u che vari con la densità, a parità di direzione di carico. Sperimentalmente si osserva che la relazione che meglio approssimerà i dati sperimentali trovati, risulterà essere un'espressione parabolica.

In particolare, per la direzione a si avrà:

$$u=(0.042236*(dens^2)-(1.1218*dens)+9.8704)/2$$

per la direzione b:

$$u=(0.15461*(dens^2)-(4.3099*dens)-7.8422)/2$$

Sulla base di queste condizioni, i coefficienti che minimizzeranno l'errore saranno:

	A dens 130	A dens 200	A dens 250	B dens 130	B dens 200	B dens 250
u1	1,402	2,129	0,108	0,018	3,479	0,089
u2	0,036	0,035	4,003	1,845	0,025	10,034
a1	11,194	11,033	-2,172	-2,435	14,352	-2,682
a2	-1,741	-2,254	12,212	12,305	-2,868	19,228
b1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
b2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 3: valori ottenuti imponendo le condizioni di Ogden sui coefficienti.

Ora anche i coefficienti $u1$ ed $u2$ seguiranno una relazione con la densità. Tuttavia, i parametri f e q calcolati per valutare l'espressione di $u1$ saranno rivalutati per ogni valore di densità.

le curve ottenute dai dati teorici e dai dati sperimentali saranno:

per la direzione A

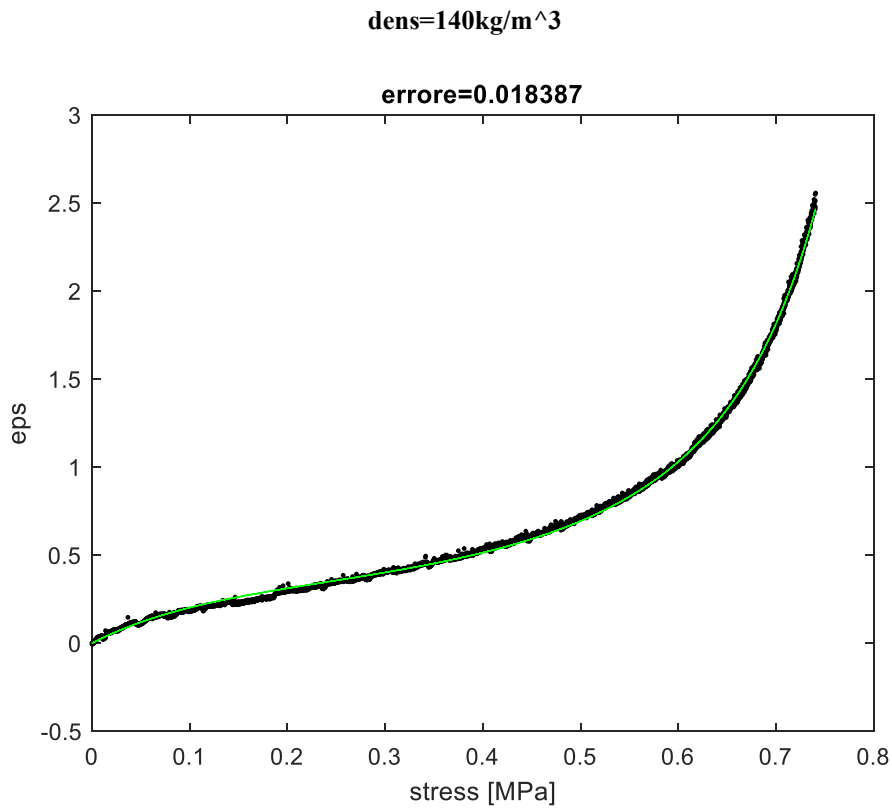


Figura 17: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =140kg/m³.

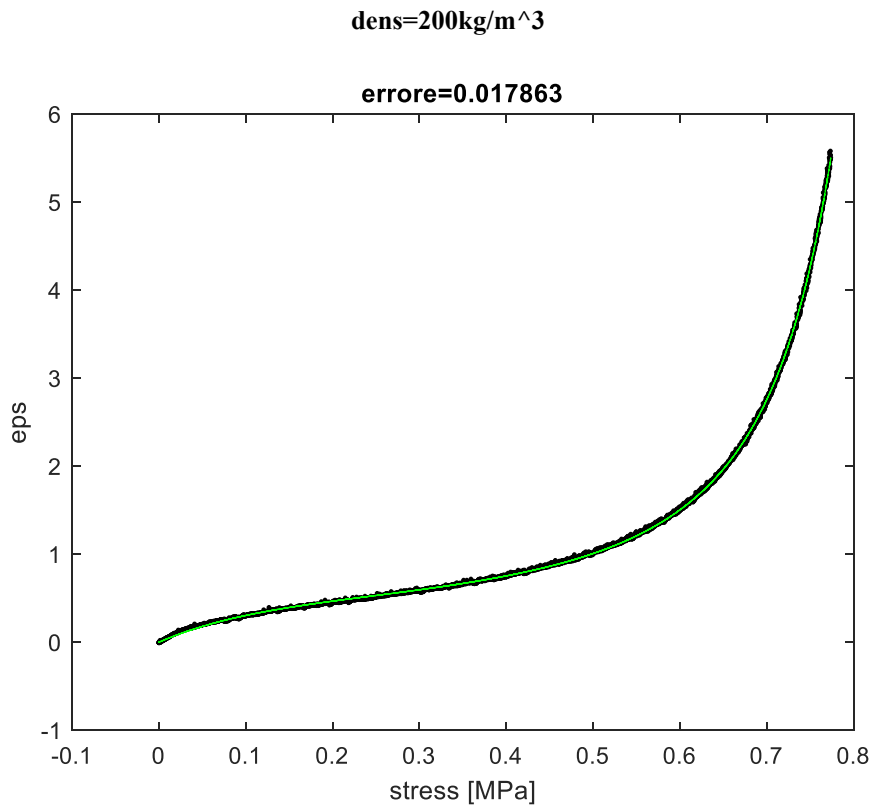


Figura 18: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =200kg/m³.

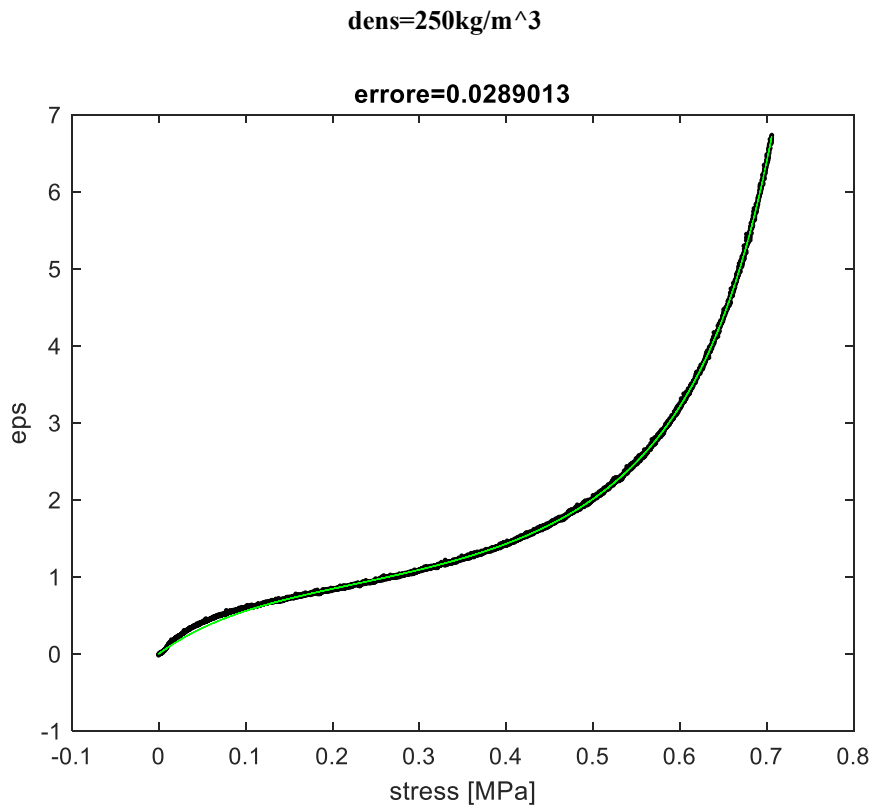


Figura 19: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =250kg/m³.

per la direzione B

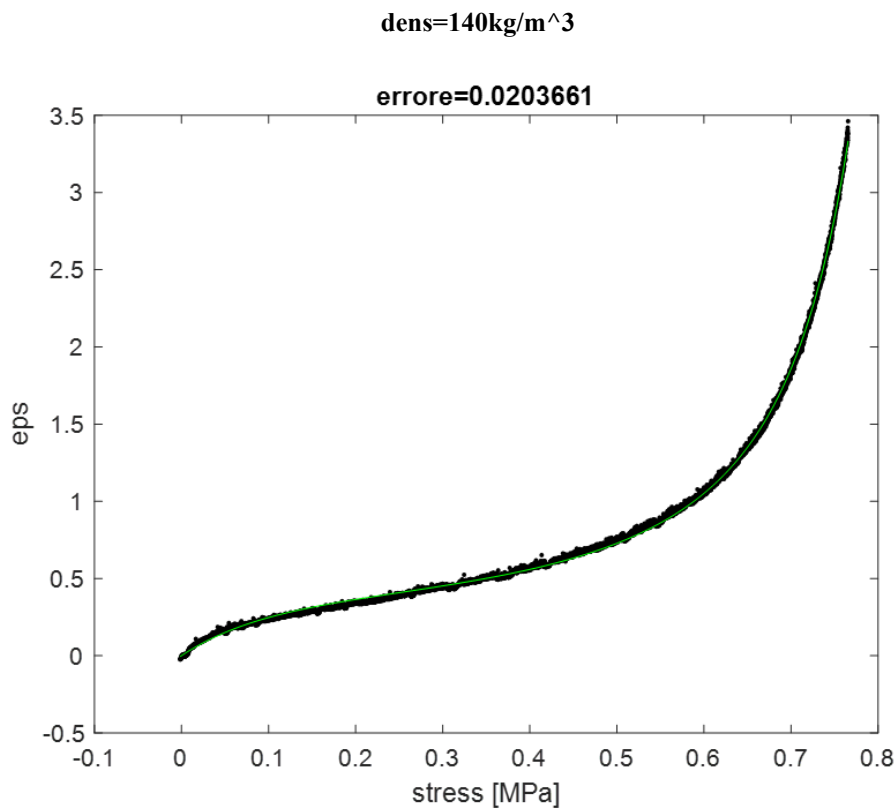


Figura 20: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =140kg/m³.

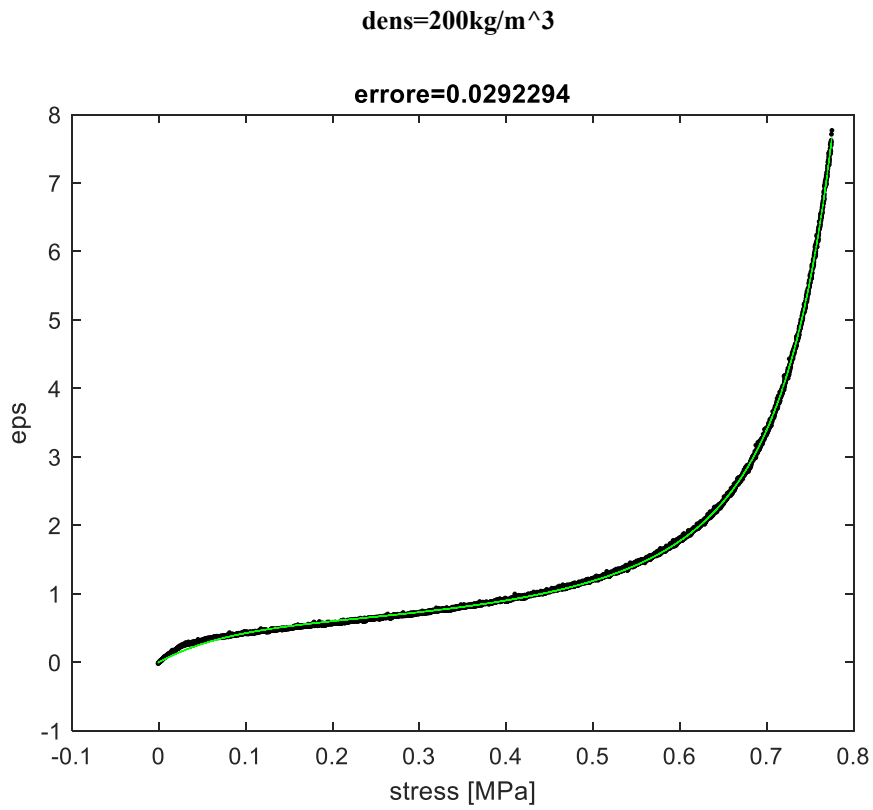


Figura 21: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =200 kg/m³.

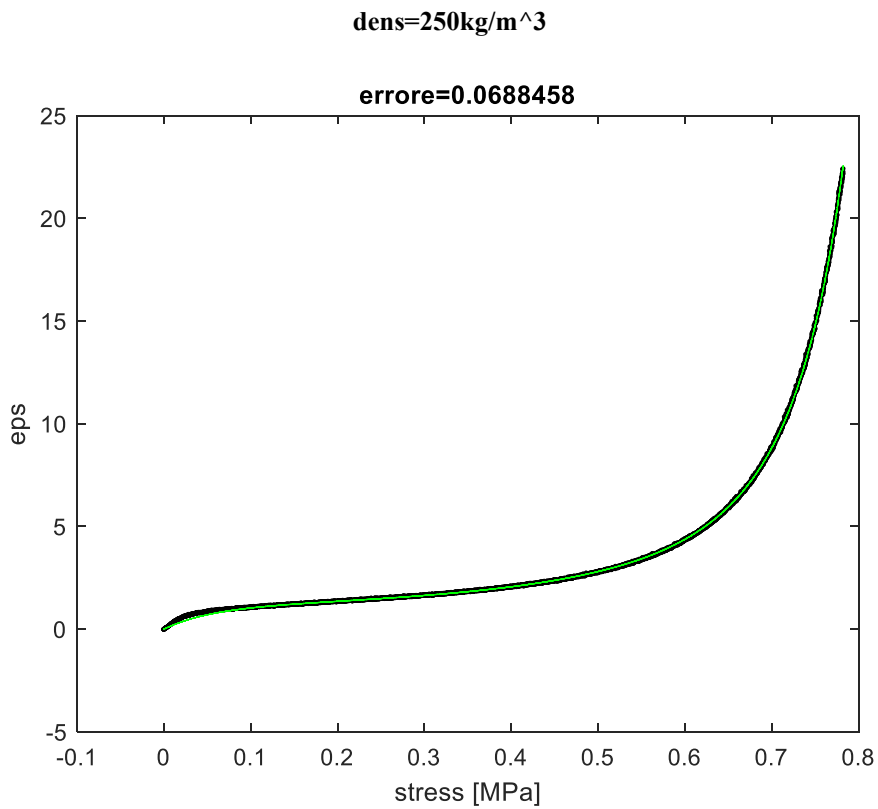


Figura 22: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =250 kg/m³.

4.1.3 Caso 3

In questo caso valgono ancora le considerazioni fatte sui coefficienti b_1 e b_2 ed u del caso 2, in aggiunta considereremo anche una condizione sui coefficienti a_1 ed a_2 , i quali saranno ora anch'essi dipendenti dalla densità secondo la relazione

$$a_1 = (f_{a1} * s + q_{a1})$$

$$a_2 = (f_{a2} * s + q_{a2});$$

per u_1 avremo: $u_1 = (f_{u1} * s + q_{u1})$

la particolarità del caso 3 è legata ora al fatto che i coefficienti $f_{u1}, q_{u1}, f_{a1}, q_{a1}, f_{a2}$ ed q_{a2} saranno determinati in modo da essere costanti per una stessa direzione di esercizio della forza. Dunque nota la direzione, per un qualsiasi valore di densità potremo già calcolare a priori il valore dei coefficienti del nostro modello. In questo caso per poter valutare $f_{u1}, q_{u1}, f_{a1}, q_{a1}, f_{a2}$ ed q_{a2} si è da prima valutato, per una fissata direzione, considerando le varie densità, il corrispondente valore di errore quadratico medio percentuale, definito come l'errore quadratico medio precedentemente definito, fratto la tensione media. Da qui è stato poi valutato un errore totale per una data direzione, come somma degli errori calcolati per le varie densità per una data direzione. I coefficienti saranno quindi trovati ora per una data direzione di modo da minimizzare non l'errore per ogni singola densità, ma di modo da minimizzare l'errore totale calcolato per quella data direzione.

I coefficienti ottenuti saranno ora:

	a dens 140	a dens 200	a dens 250	b dens 140	b dens 200	b dens 250
u_1	0,046	0,039	0,035	0,029	0,032	0,033
u_2	-8,478	2,126	4,076	1,833	3,473	10,090
a_1	-1,513	-2,114	-2,414	-0,991	-2,663	-3,499
a_2	12,170	9,937	8,820	9,642	14,590	17,065
b_1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
b_2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabella 4: coefficienti ottenuti imponendo condizioni di Ogden e relazioni con la densità per u_1, a_1, a_2 .

Così facendo però quello che si osserva è che non sempre con queste condizioni i coefficienti ottenuti riusciranno a generare dei valori di sigma teorici che approssimino bene i dati reali. Abbiamo una discrepanza anche abbastanza visibile tra i due termini soprattutto in alcuni provini, come visibile dai grafici,

Direzione A

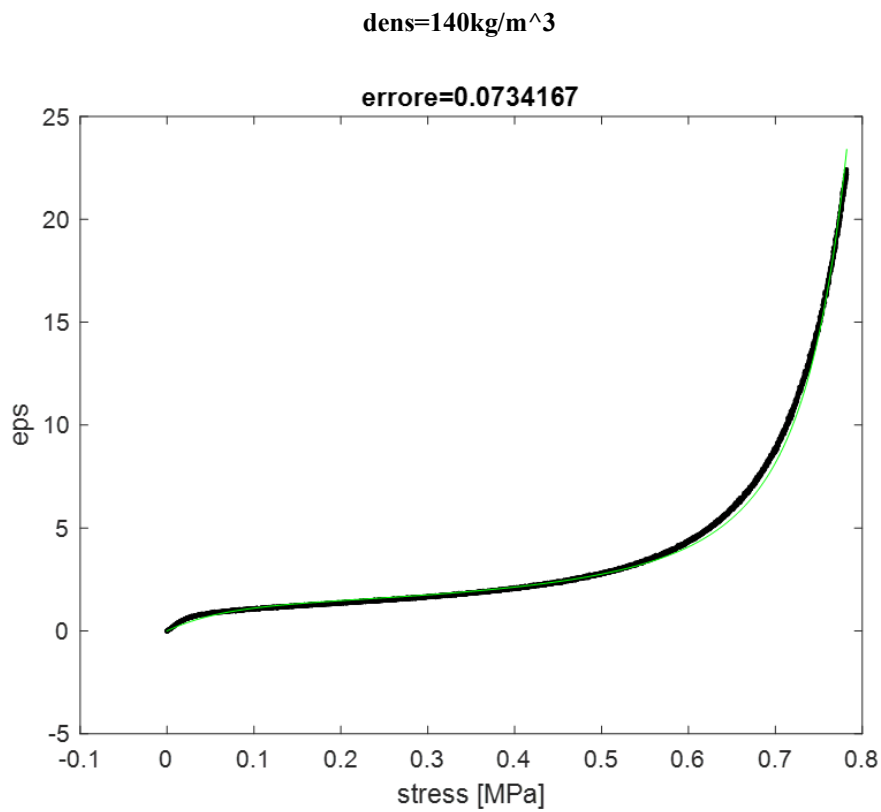


Figura 23: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =140kg/m³.

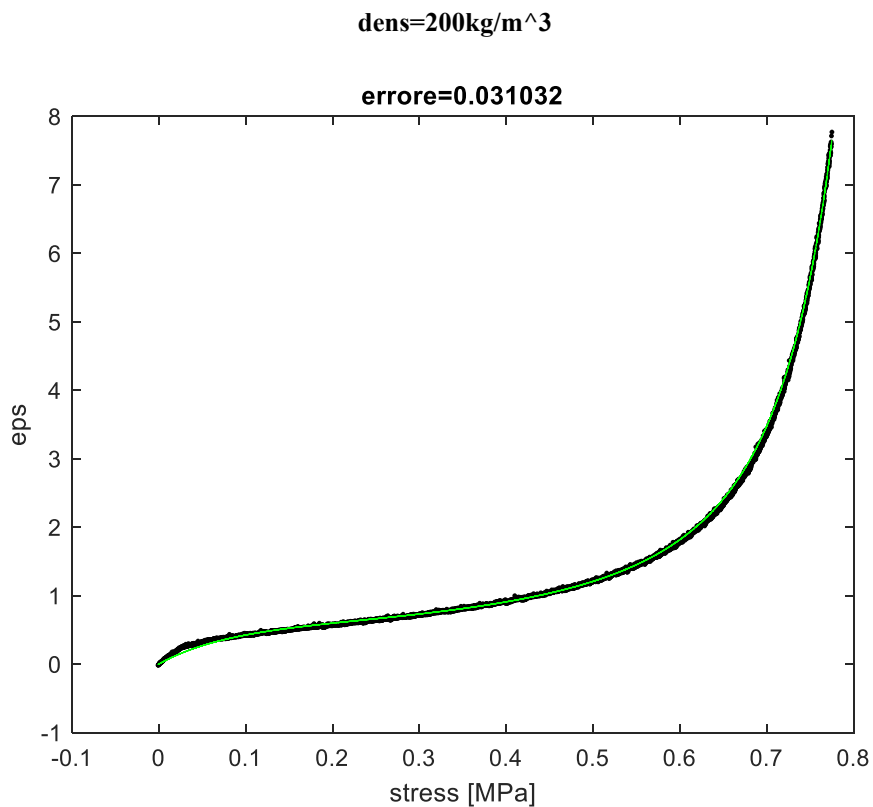


Figura 24: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =200 kg/m³.

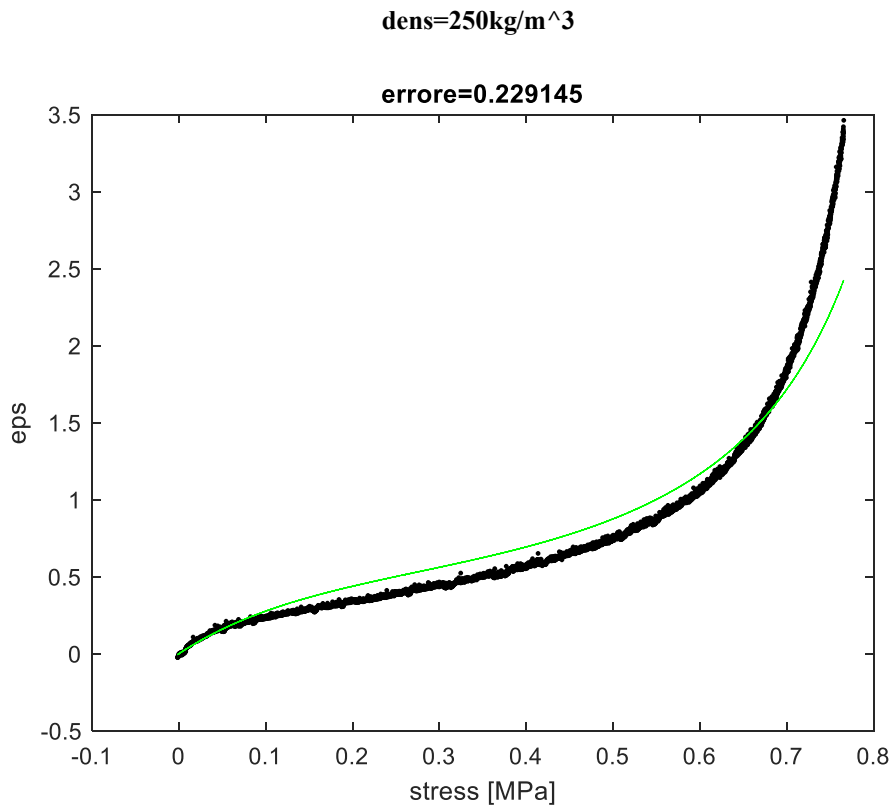


Figura 25: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione A e con dens =250 kg/m³.

Direzione B

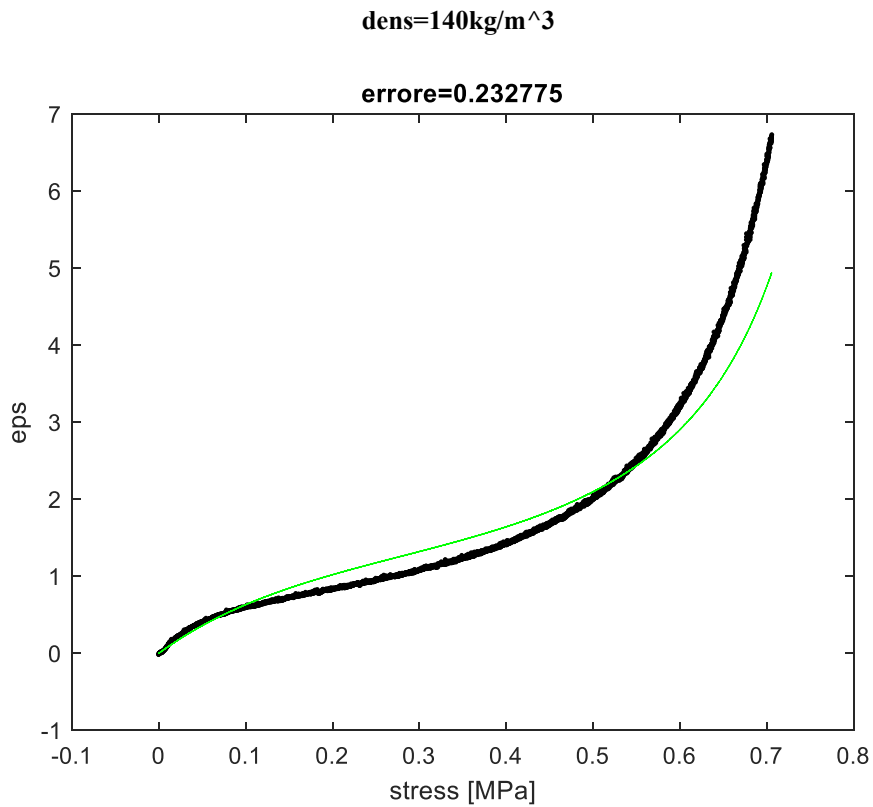


Figura 26: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =140 kg/m³.

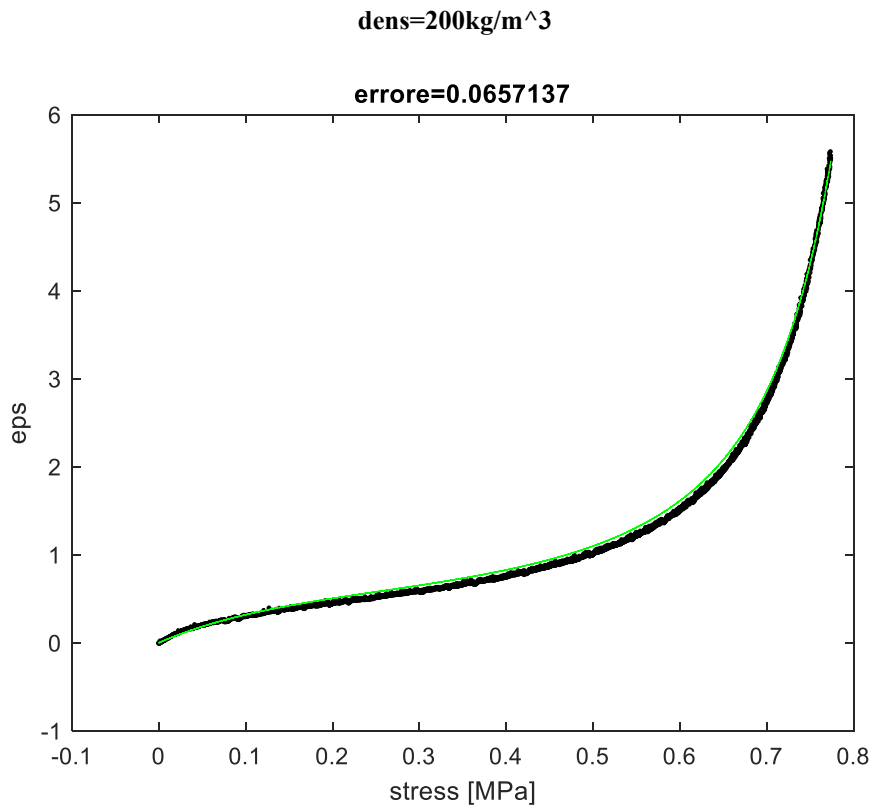


Figura 27: curva tensione deformazione dell'andamennto reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =200 kg/m³.

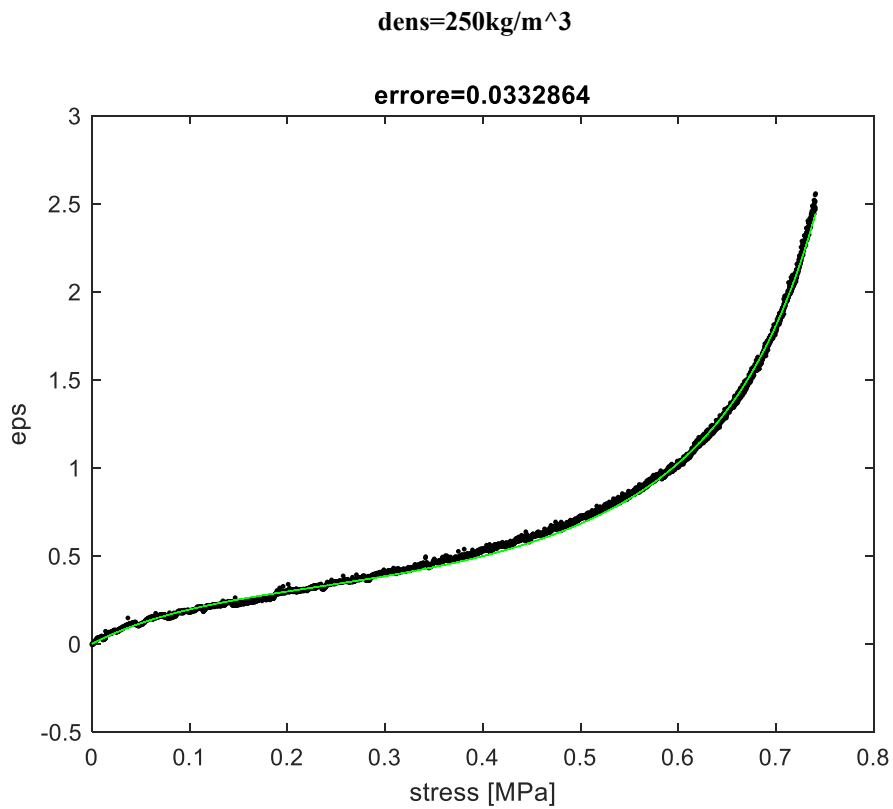


Figura 28: curva tensione deformazione dell'andamennto reale e teorico del sughero, valutato nella direzione B e con dens =250 kg/m³.

4.2 PVC

Quanto fatto per il sughero, è stato ripetuto anche per il pvc, utilizzando il medesimo modello di riferimento. La differenza ora sta nel fatto che tuttavia non sono bastati 6 coefficienti, ma è stato necessario ricorrere ad un valore di $n=3$, il che implica ben nove coefficienti da trovare per generare la nostra tensione teorica attraverso il modello hyperfoam. Anche per il pvc faremo riferimento alla prova di carico condotta a basse velocità, rispettivamente $0,001 \text{ s}^{-1}$.

4.2.1 Caso 1

L'unico caso preso in considerazione è quello con i dati teorici generati a partire da coefficienti ottenuti da Matlab, senza alcuna imposizione, ottenuti semplicemente di modo da ottimizzare l'errore con i dati reali. Le curve ottenute seguono molto bene gli andamenti reali. Unica discrepanza nel tratto iniziale, dove si verifica un piccolo discostamento, riconducibile alla presenza di rumori nella misurazione e ad un comportamento elastico del materiale, non contemplato dal modello in questione.

I coefficienti ottenuti saranno:

	A dens 10	A dens 20	A dens 25	B dens 10	B dens 20	B dens 25
u1	5,016	0,001	0,002	3,182	11,455	3,956
u2	1,019	5,566	3,420	6,114	17,797	-6,100
u3	2,185	34,940	13,830	10,895	2,448	8,564
a1	3,366	20,809	22,248	3,209	10,868	0,990
a2	1,393	2,156	0,102	0,553	12,223	17,399
a3	8,842	1,017	-0,409	24,117	1,037	-1,904
b1	-8,317	-2,360	-1,530	-13,288	0,260	-24,563
b2	3,886	-11,234	-156,421	1,621	-3,726	1,000
b3	0,934	1,089	31,179	0,100	11,451	3,673

Tabella 5: coefficienti che meglio approssimano i dati reali, ottenuti per il pvc senza fornire alcuna imposizione.

Direzione A

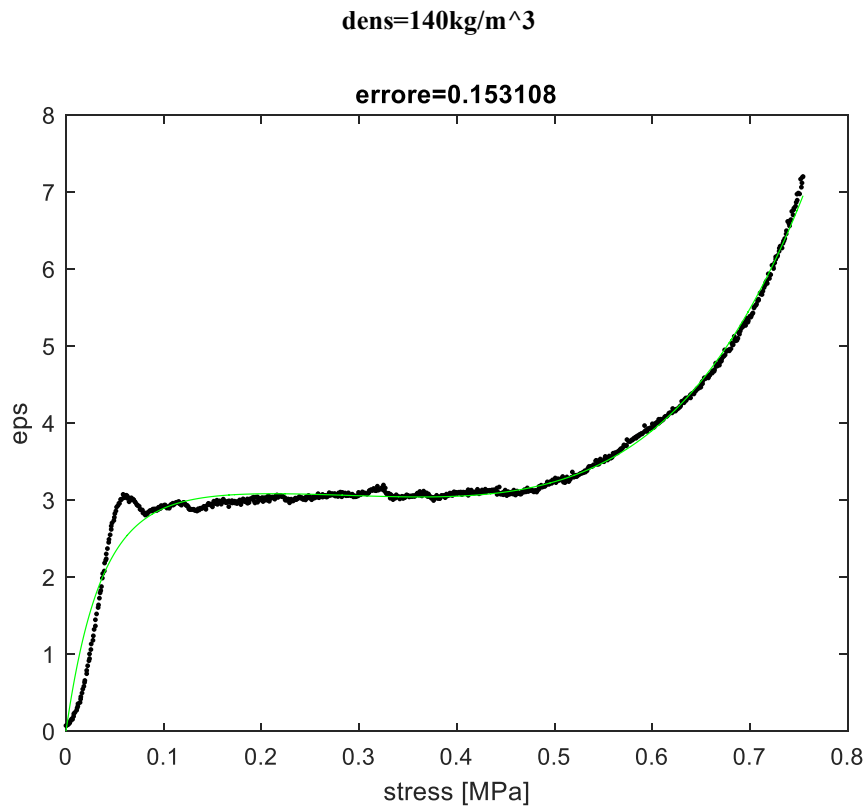


Figura 29: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione A e con dens =140 kg/m³.

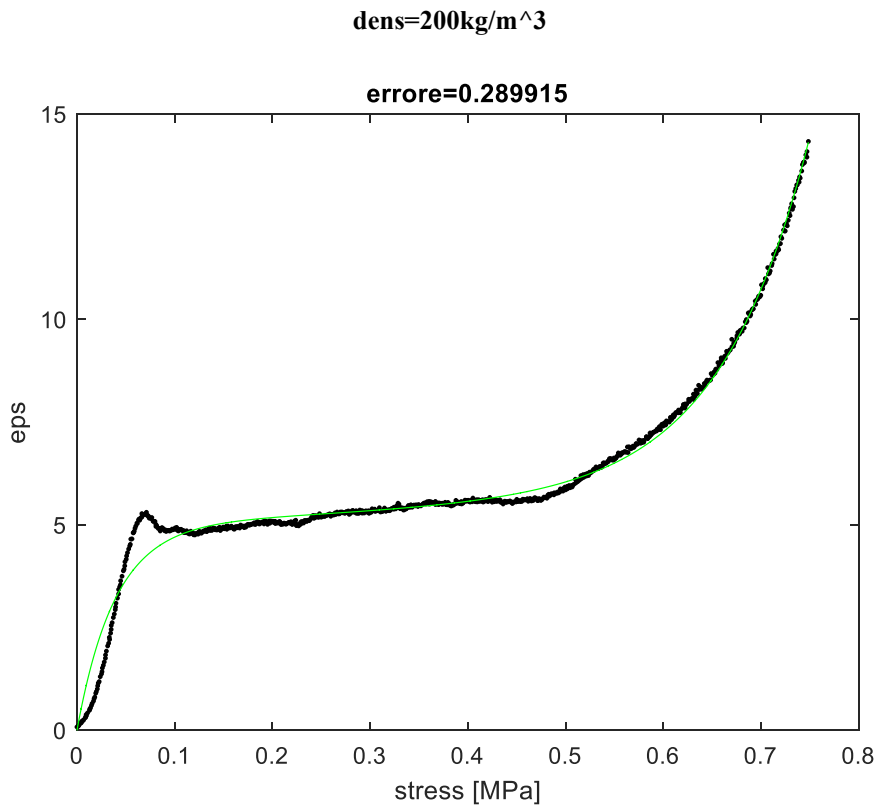


Figura 30: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione A e con dens =200 kg/m³.

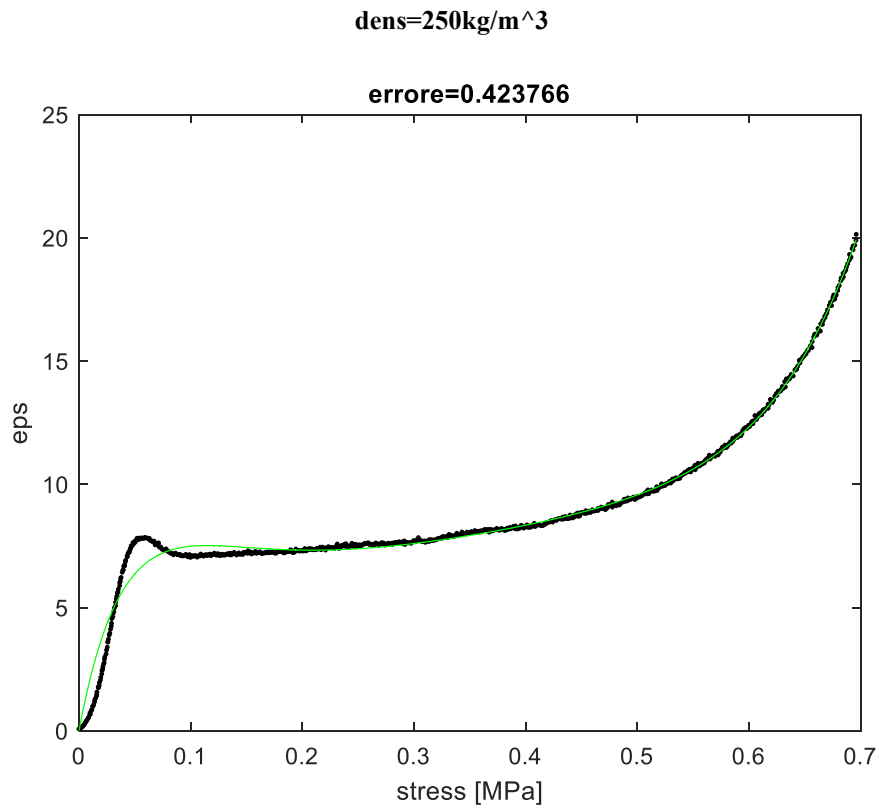


Figura 31: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione A e con dens =250 kg/m³.

Direzione B

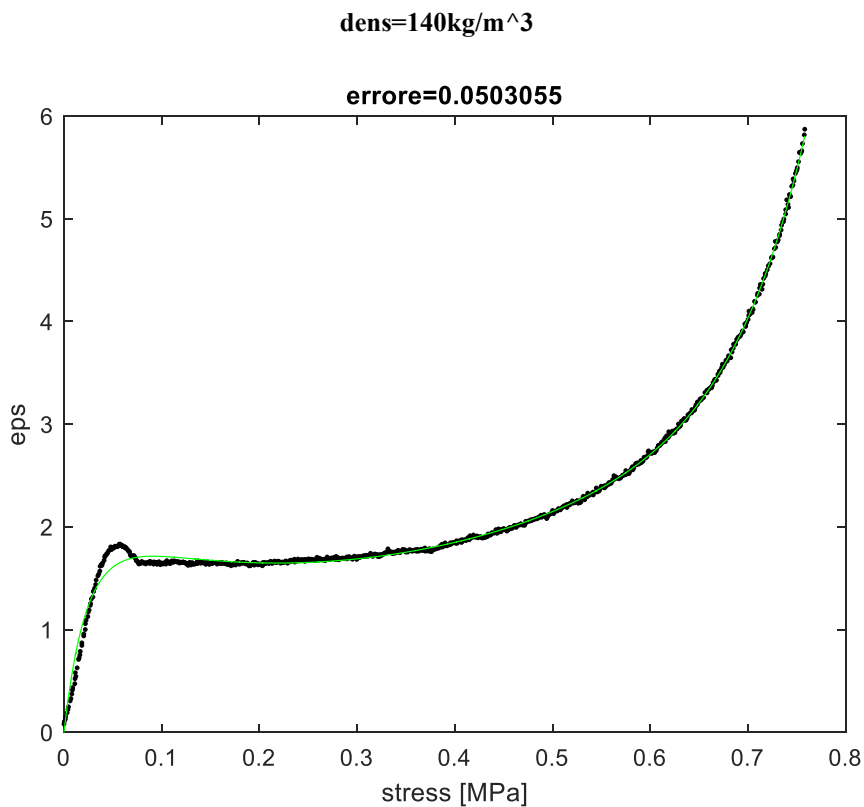


Figura 32: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione B e con dens =140 kg/m³.

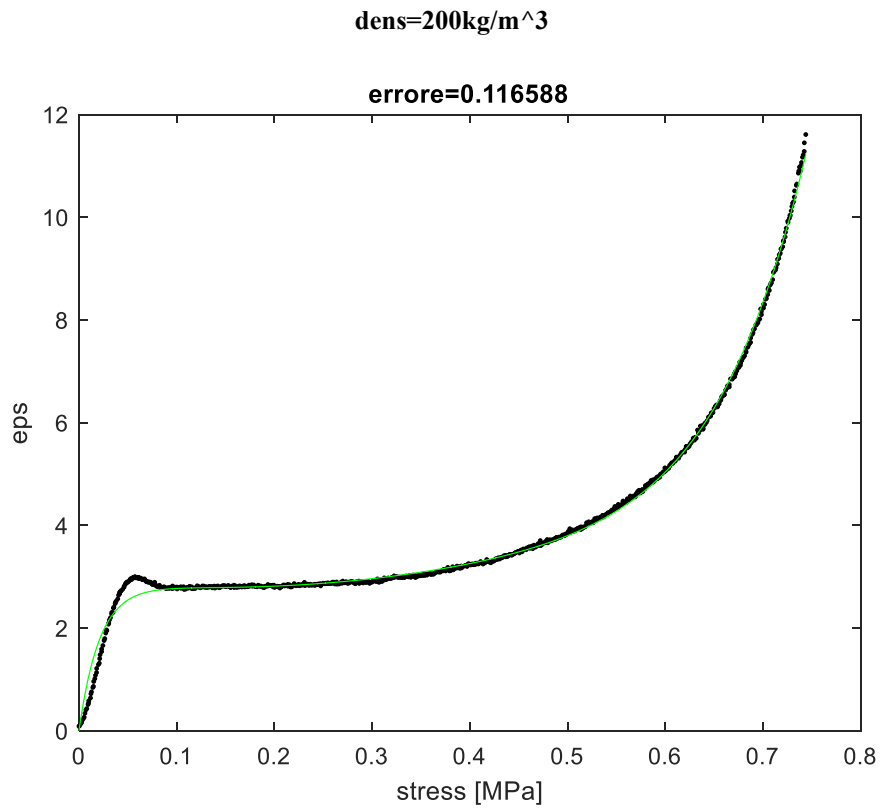


Figura 33: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione B e con dens =200 kg/m³.

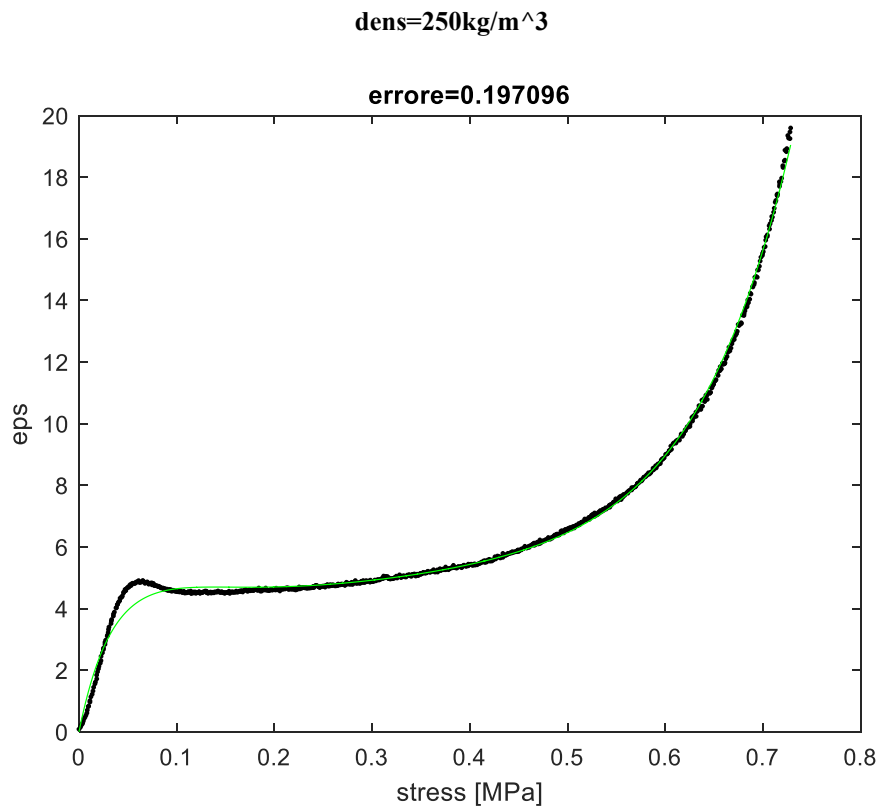


Figura 34: curva tensione deformazione dell'andamento reale e teorico del pvc, valutato nella direzione B e con dens =250 kg/m³.

5. CONCLUSIONI

In conclusione possiamo osservare come il modello di Ogden si presta molto bene nell'approssimazione dei dati reali per materiali polimerici e cellulari. Il modello segue molto bene il comportamento nei tratti plastici, alcune discrepanze si osservano invece per il tratto elastico, dove sarebbe conveniente adottare un modello più congruo per questo tipo di deformazione. In materiali come il sughero possiamo concludere come in realtà siano sufficienti solo sei coefficienti per approssimare le curve, riconducibili a 4 se consideriamo i valori di β_1 e β_2 posti uguale a zero. Anche il tentativo di determinare una dipendenza dei parametri: $\mu_1, \alpha_1, \alpha_2$ con la densità è andata a buon fine, come visibile dalle curve riportate nelle figure che vanno dalla 23 alla 28. Per ogni direzione di carico è stato, infatti, possibile trovare una espressione lineare, che dipendesse dalla densità, per ognuno dei tre parametri. In questo modo abbiamo la possibilità di conoscere a priori il valore dei coefficienti da utilizzare nel modello, semplicemente conoscendo il valore di densità utilizzato per quel provino e la direzione di carico che stiamo considerando. Per il pvc gli studi, invece, ci hanno condotto ad osservare come per lo studio del suo comportamento sono necessari almeno nove coefficienti per ottenere una buona approssimazione dei dati, anche se per tutto il campo elastico le differenze tra dati reali e teorici rimangono, comunque, molto pronunciate. Diverso, invece, il discorso per il tratto plastica, dove l'approssimazione è molto buona.

6. BIBLIOGRAFIA

A. Costa, H. Pereira, A. Oliveira. *Forest Ecology and Management, Biomech*, Volume 175, Issues 1–3, 3 March 2003, Pages 239-246

Baptista APM and Vaz MDC. Comparative wear testing of flooring materials. *Wear*. 1993;162:990–995.

Barberis, Antonio, Sandro Dettori, and Maria Rosaria Filigheddu. "Management problems in Mediterranean cork oak forests: post-fire recovery." *Journal of arid Environments* 54.3 (2003): 565-569.

Bernards, Mark A., and Norman G. Lewis. "The macromolecular aromatic domain in suberized tissue: a changing paradigm." *Phytochemistry* 47.6 (1998): 915-933.

Chen, L., Hoo Fatt, MS Proprietà meccaniche trasversalmente isotropiche della schiuma di PVC sotto carico ciclico. *J Mater Sci* 48, 6786–6796 (2013).

Cordeiro, Nereida, et al. "Characterization of the cork surface by inverse gas chromatography." *Journal of colloid and interface science* 174.1 (1995): 246-249.

Cumbre, F. et al. "L'effetto dell'acqua che bolle sulla larghezza dell'anello annuale e sulla porosità del sughero." *Wood and Fiber Science* 32 (2000): 125-133.

F.A.O. Fernandes, R.J.S. Pascoal, R.J. Alves de Sousa ↑ Modelling impact response of agglomerated cork *Materials & Design* Volume 58, June 2014, Pages 499-507

Fernandes, Fábio & Pascoal, R.J.S. & Alves de Sousa, Ricardo. (2014). Modelling impact response of agglomerated cork. *Materials and Design*. 58. 499-507. 10.1016/j.matdes.2014.02.011.

Fortes, M. A. "Applicability of the Lewis and Aboav-Weaire laws to 2D and 3D cellular structures based on Poisson partitions." *Journal of Physics A: Mathematical and General* 28.4 (1995): 1055.

Fortes, M. A., and M. Teresa Nogueira. "The poison effect in cork." *Materials Science and Engineering: A* 122.2 (1989): 227-232.

George Wypych. *PVC degradation and stabilization* 2020.

Gibson, Lorna J. "Biomechanics of cellular solids." *Journal of biomechanics* 38.3 (2005): 377-399.

Helena Pereira, M. Emília Rosa, and M.A. Fortes. The Cellular Structure of Cork from *Quercus Suber* L. *IAWA Journal*. 01 Jan 1987. In: Volume 8: Issue 3. Page Count: 213–218.

KH Illers (1977) Influenza della storia termica sulle proprietà fisiche del PVC, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 14: 4, 471-482

L. J. Gibson and M. F. Ashby: 'Cellular solids: structure and properties', 2nd edn, 453–467; 1997, Cambridge, Cambridge University Press.

- M. I. d. F. Carrasquinho: Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortic,a, 1987, 583, 17–18
- Mano JF. Le proprietà viscoelastiche del sughero. *Journal of Materials Science* 37, 257–263 (2002).
- Menges, G., and Knipschild, F., 1982, “Stiffness and Strength—Rigid Plastic Foams,” *Mechanics of Cellular Plastics*, N. C. Hilyard, ed., Macmillan, New York, p. 401.
- Mohammad Kazim Naqvi (1985) Structure and Stability of Polyvinyl Chloride, *Journal of Macromolecular Science, Part C*, 25: 1, 119-155.
- Patrick SG. *Practical Guide to Polyvinyl Chloride* ©2005. Rapra Technology.
- Pereira, H. "Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L." *Wood science and technology* 22.3 (1988): 211-218.
- Pereira H and Costa A. "Evolução recente da indústria de cortiça." *Proceedings for the XXII. 2002*
- Pereira, Helena, ed. *Cork: biology, production and uses*. Elsevier, 2011.
- A. Romano and M. A. Martins-Louçã: *Plant Cell Tissue Organ Cult.*, 1999, 59, 155–157
- Rosa, ME and Fortes MA. "Deformation and fracture of cork in tension." *Journal of materials science* 26.2 (1991): 341-348.
- Rosa ME and Pereira H. "The effect of long term treatment at 100° C–150° C on structure, chemical composition and compression behaviour of cork." *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood* 48.3 (1994): 226-232.
- Rosa, M. Emília, and M. A. Fortes. "Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork." *Journal of materials science* 23.3 (1988): 879-885.
- Rosa, M. Emília, Helena Pereira, and M. A. Fortes. "Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork." *Wood and Fiber Science* 22.2 (2007): 149-164.
- Rosa, ME, Fortes, MA *Deformazione e frattura del sughero in tensione. J Mater Sci* 26, 341–348 (1991).
- Vaz, M. Fatima, and M. A. Fortes. "Friction properties of cork." *Journal of materials science* 33.8 (1998): 2087-2093.
- Walter, TR, Richards, AW e Subhash, G. (18 dicembre 2008). "Un modello fenomenologico unificato per la risposta alla trazione e alla compressione delle schiume polimeriche". *COME ME. J. Eng. Mater. Technol.*
- YC Yang & PH Geil (1983) Morfologia e proprietà dei gel PVC / solvente, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 22: 3, 463-488.