

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN BIOINGEGNERIA**

**PROVE SPERIMENTALI SU
SCHIUME POLIMERICHE E
MODELLAZIONE COSTITUTIVA**

Relatore:

Prof. Chiara Giulia Fontanella

Correlatrici:

Prof. Alice Berardo

Dott.ssa Ilaria Toniolo

Laureando:

Matteo Varsori

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Data di laurea 18/07/2022

Sommario

Il lavoro di questa tesi ha riguardato lo svolgimento di prove sperimentali per la valutazione delle caratteristiche meccaniche di schiume polimeriche utilizzate nelle scarpette interne degli scarponi da sci. Le caratteristiche meccaniche sono state successivamente definite tramite modelli costitutivi in grado di descriverne la corretta risposta meccanica. I parametri costitutivi sono stati identificati mediante la minimizzazione di una funzione costo, in grado di comparare i risultati di modello con i risultati sperimentali. Infine, mediante l'analisi computazionale, si è proceduto alla validazione del modello costitutivo e dei parametri costitutivi scelti. I risultati ottenuti permettono di implementare le schiume studiate all'interno di modelli computazionali delle scarpette interne dello scarpone da sci.

Nel primo capitolo vengono introdotti i materiali oggetto di questa analisi, attraverso una descrizione della loro microstruttura, delle caratteristiche fisiche e chimiche che li contraddistinguono e dal conseguente impiego in ambito industriale e commerciale.

Di seguito, sono presentate nel dettaglio le prove di trazione, compressione e indentazione che saranno effettuate sui campioni. Si parte dall'enunciare le peculiarità di ciascuna prova come strumentazione necessaria, geometria tipica dei provini, per poi specificare i protocolli svolti e gli standard o le normative applicate.

Nel terzo capitolo si parla dell'analisi costitutiva, viene descritto il modello associato ai campioni utilizzati definendone il comportamento al verificarsi di determinate condizioni al contorno. Quindi viene esposta la procedura eseguita per identificare i parametri costitutivi, la generazione della geometria del modello e la descrizione del materiale all'interno di Abaqus.

Nel quarto capitolo vengono presentati i risultati, prima quelli sperimentali e successivamente un confronto tra computazionali e sperimentali, sotto forma di grafici e tabelle per una migliore comprensione e visualizzazione.

A questo segue la discussione dei risultati e le conclusioni, con l'analisi di ciò che è stato ottenuto, evidenziando aspetti attesi e peculiarità presenti nell'intera esperienza.

Indice

1. Schiume polimeriche		
1.1	Struttura	4
1.2	Caratteristiche	6
1.3	Impieghi dei materiali	8
2. Prove sperimentali		
2.1	Trazione	26
2.2	Compressione	30
2.3	Indentazione	33
2.4	Elaborazione dati sperimentali	34
3. Analisi costitutiva		
3.1	Formulazione costitutiva	37
3.2	Identificazione dei parametri costitutivi	38
3.3	Modelli computazionali	39
	3.3.1 Geometria	
	3.3.2 Materiali	
	3.3.3 Mesh e condizioni al contorno	
4. Risultati		
4.1	Prove sperimentali	42
4.2	Confronto tra prove sperimentali ed analisi computazionali	43
4.3	Discussione dei risultati	49
Conclusioni		51
Bibliografia e sitografia		53

CAPITOLO 1

SCHIUME POLIMERICHE

1.1 Struttura

I materiali espansi, detti anche schiume, sono composti formati da soluzioni di natura polimerica e caratterizzati da una struttura a cella aperta o chiusa, che conferisce estrema leggerezza al materiale, rispetto al materiale compatto da cui deriva. Tra i campioni testati ci sono materiali come schiume poliuretaniche, composti in etilene vinil acetato (EVA), micropile ed elastomero.

I poliuretani termoplastici (TPU) sono una classe versatile di copolimeri a blocchi, la cui catena polimerica è formata da legami uretanic che sono rappresentati dalla formula chimica NH-(CO)-O-. La loro struttura morfologica tipica consiste di catene contigue contenenti segmenti *soft* (SS) e segmenti più rigidi chiamati *hard segment* (HS) (Figura 1.1). La disposizione su scala nanometrica di queste catene conduce alla formazione di regioni dure e molli, con una variazione di impaccamento e densità. I poliuretani sono ottenuti per reazione tra un diisocianato e un poliolo, con l'impiego di catalizzatori per incrementare la velocità di reazione, tensioattivi per diminuire la tensione superficiale, facilitando la formazione della schiuma ed agenti espandenti. Le tre componenti del TPU sono il dibenzile diisocianato (DBDI), il polietilene adipato (PEA) e l'etilene glicole (EG) [1].

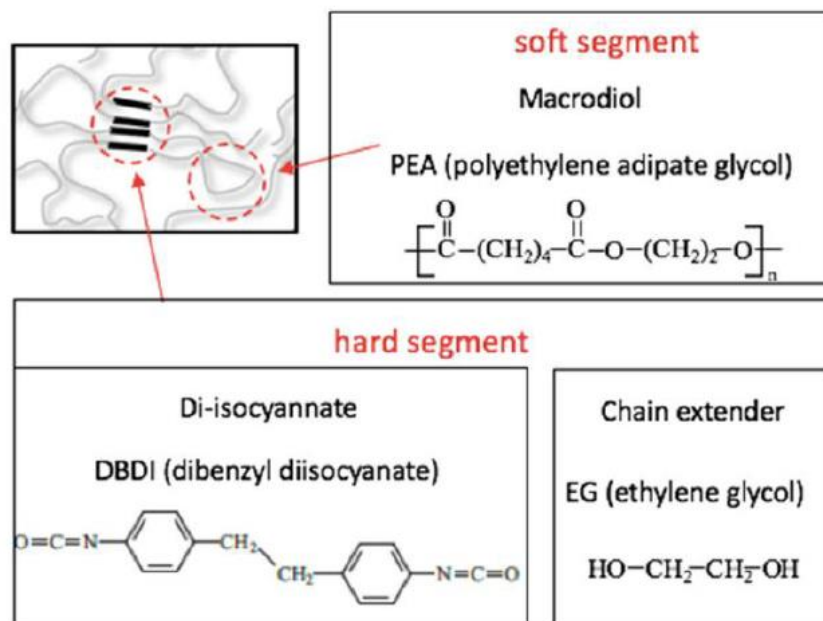


Figura 1.1 – Struttura morfologica dei poliuretani termoplastici.

L'etilene vinil acetato (EVA) è un composto copolimerico formato da etilene e acetato di vinile. Esso esibisce unità di etilene che vanno a creare una catena polimerica satura di gruppi pendenti di acetato, la sua formula chimica risulta essere $(C_2H_4)_n(C_4H_6O_2)_m$. È possibile avere diversi gradi di EVA modificando il contenuto di acetato di vinile o la viscosità del polimero.

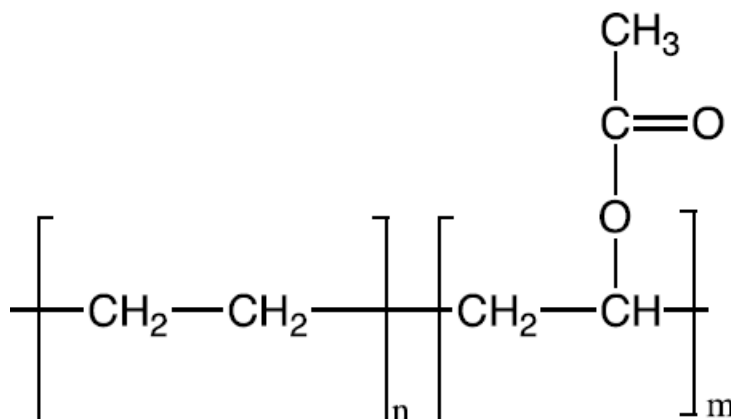


Figura 1.2 – Formula chimica etilene vinil acetato

Un altro elemento che fa parte nella famiglia delle schiume e ricopre un ruolo importante è il micropile. Esso si ottiene dalla lavorazione di fibre di poliestere, le quali vengono tessute per creare una base a maglia grossa dove si immettono un gran numero di filamenti di poliestere (Figura 1.3). Grazie a questo metodo l'intreccio della fibra presenterà molta aria al suo interno, fungendo da isolante termico [2].

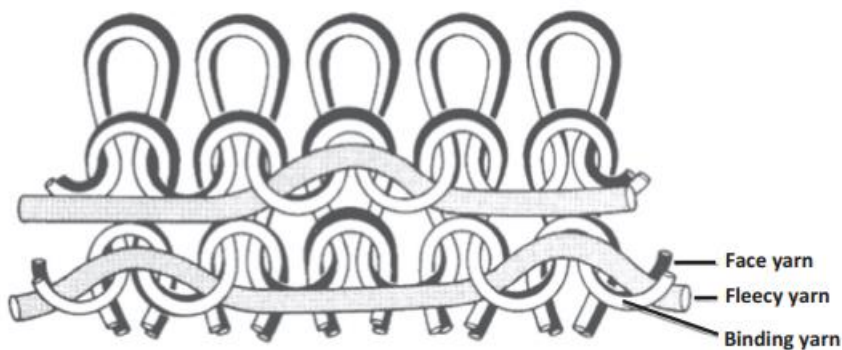


Figura 1.3 – Struttura 3D del micropile.

Un elastomero è un polimero allo stato gommoso dove sono presenti legami, deboli o forti che ne rafforzano la struttura. I termoplastici di solito sono formati da stirene e butadiene, poliolefine e copoliesteri. Quando vengono portati alla temperatura di transizione vetrosa diventano estremamente malleabili e possono essere rimodellati. Per mostrare elasticità, le catene devono essere connesse le une alle altre da legami chimici chiamate reticolazioni, le quali impediscono il districarsi delle catene e lo scorrimento reciproco quando sono soggette a

un carico (Figura 1.4). Gli elastomeri, una volta reticolati, perdono la loro intrinseca viscoelasticità a favore di un comportamento iperelastico, senza il sopraggiungere di deformazioni plastiche [3].

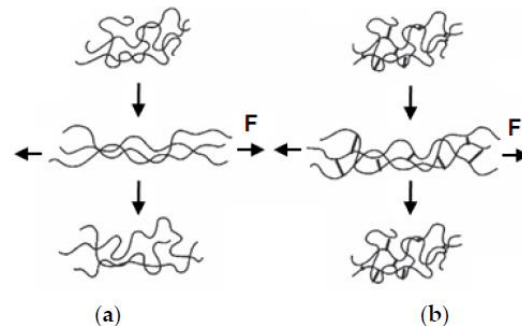


Figura 1.4 – (a) Deformazione plastica di un elastomero non reticolato. (b) Recupero elastico di un elastomero reticolato.

1.2 Caratteristiche

I poliuretani termoplastici presentano delle proprietà chimiche, meccaniche, fisiche e termiche peculiari che si tramutano in una lunga durata, una grande leggerezza, una resistenza agli agenti chimici e biologici, fornendo un isolamento termico e sicurezza in quanto non contengono o rilasciano componenti pericolosi. Tali caratteristiche derivano dalla separazione di fase su nanoscala della frazione di volume relativa di HS e SS e delle proprietà intrinseche di ciascuna delle fasi (Figura 1.5). La richiesta di elevate prestazioni per i poliuretani ha condotto a una maggior attenzione nello studiarne le caratteristiche strutturali e le funzioni, in particolare, le risposte termomeccaniche attraverso scale di lunghezza multiple [1].

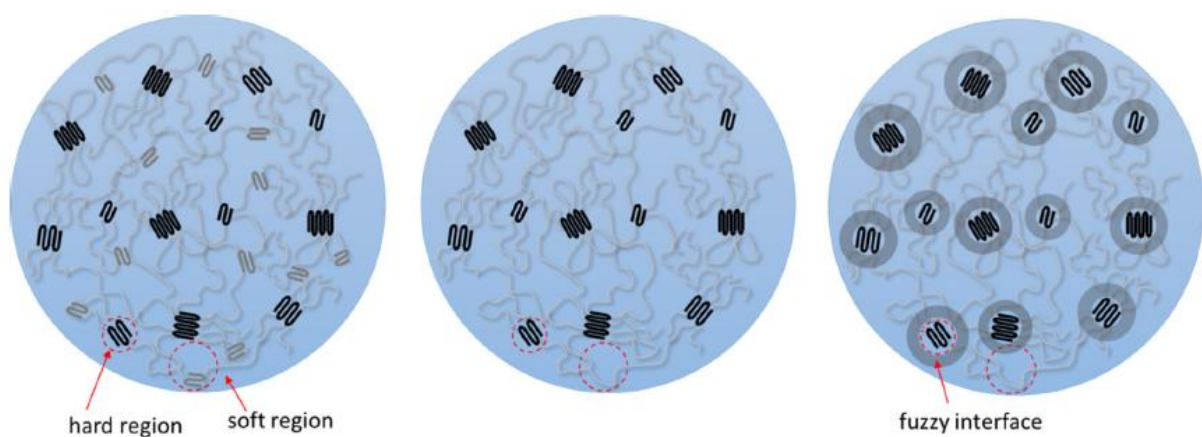


Figura 1.5 – Illustrazione dell'evoluzione strutturale delle regioni dure e molli.

L'EVA è un materiale reticolato espanso chimicamente, la cui struttura a celle completamente chiuse favorisce l'impermeabilità all'acqua, oltre alle caratteristiche termoisolanti. la presenza

di una catena principale completamente satura indica che l'EVA è un polimero estremamente stabile; infatti, la sua degradazione avviene solo a temperature molto elevate e a bassa velocità. Esso ha una temperatura di impiego di 175°C, con una bassissima temperatura di saldabilità, aspetto che gli permette di essere utilizzato nella realizzazione di prodotti flessibili ed elastici.

Il micropile a differenza del pile è molto più sottile, di conseguenza vengono esaltate le caratteristiche di leggerezza e traspirabilità, sfavorendo la capacità di isolare termicamente. La sua superficie, se sottoposta a sfregamento, è soggetta al fenomeno del pilling cioè alla formazione di piccole palline o microfilamenti del materiale stesso (Figura 1.6). La permeabilità di questo tessuto è influenzata da diversi fattori quali l'orientamento delle fibre, la struttura morfologica, il materiale fibroso, l'appiattimento del filato e lo spessore dell'intreccio. Le interazioni tra questi materiali e i liquidi variano in base alla struttura chimica della fibra e dipendono da proprietà come viscosità e tensione superficiale. L'energia superficiale in un tessuto dipende principalmente dalla struttura chimica della superficie esposta della fibra, dove le fibre idrofiliche presentano un'elevata energia superficiale, raccogliendo l'umidità con maggior facilità delle fibre idrofobiche [4].



Figura 1.6 – Analisi al microscopio elettronico di un micropile.

Un elastomero è un polimero allo stato gommoso nel quale ci sono legami, deboli o forti, che ne rafforzano la struttura, esaltandone le prestazioni meccaniche. Una delle proprietà caratteristiche risulta essere la capacità di subire grosse deformazioni elastiche; infatti, essi possono essere allungati diverse volte per spostamenti finiti, ritornando alla propria configurazione di partenza una volta eliminato il carico. Gli elastomeri vengono ottenuti mediante le tecniche di estrusione o di stampaggio a caldo e una volta stampati, portandoli alla temperatura di transizione vetrosa possono essere modellati nuovamente. La densità di reticolazione è un parametro strutturale che caratterizza le reti elastomeriche tridimensionali. È definito come il numero di reticolazioni per unità di volume in una rete polimerica. La densità

di reticolazione influenza, in modo molto accentuato, varie proprietà tra cui la resistenza a trazione, il modulo meccanico, la durezza, la temperatura di transizione vetrosa e la stabilità termica.

1.3 Impieghi dei materiali

Uno dei principali impieghi di questi materiali, specialmente all'interno di questo studio, riguarda l'ambito dello sci alpino. Le prestazioni degli scarponi da sci sono state notevolmente migliorate negli ultimi anni utilizzando nuovi materiali e design. Per comprendere a fondo la radice di queste migliorie, è necessaria un'analisi dell'evoluzione degli scarponi da sci; infatti, con lo sviluppo di nuovi attacchi da sci che consentivano un maggior controllo delle lamine, le prime modifiche sono state apportate per incrementare la rigidità dello scarpone e per consentire un maggiore controllo utilizzando pellami più rigidi e spessi, immergendo lo scarpone in acqua prima dell'uso [5].

Gli scarponi risultano essere composti dai seguenti costituenti: il gambetto, lo scafo (dove si trova la suola), l'alzo del tallone, la scarpetta (dove è presente il plantare) e la clip di chiusura. I plantari sono realizzati con una schiuma di poliuretano espanso con degli inserti funzionali per essere adattati alla forma del piede e minimizzare la pressione su di esso, in combinazione con la suola arcuata. La lunghezza della suola coincide con la dimensione esterna dello scarpone e solitamente viene indicata in millimetri. Il design del tallone a forma di U protegge l'articolazione della caviglia, assorbendo gli urti.

Gli obiettivi dello scarpone sono quelli di garantire un'efficiente trasmissione dei carichi, favorire un veloce rilascio dagli agganci in caso di caduta, assorbire gli urti, proteggere il piede e la caviglia da sovraccarichi in condizioni non convenzionali e prediligere una pressione uniforme per evitare rischi dovuti a concentrazione delle sollecitazioni. I parametri da tenere in considerazione nella progettazione di uno scarpone sono lo spessore delle diverse parti del polsino e del guscio, il massimo spessore della parte interna del guscio cioè la larghezza massima, la geometria della suola, l'altezza e l'angolo del polsino (in quanto dei valori scorretti andrebbero a influenzare negativamente il comfort del piede) e il punto di cerniera tra guscio e polsino. La forma interna del guscio e del polsino deve essere modellata in modo da seguire la forma anatomica del piede.

La suola era realizzata con materiali più duri poiché lo scarpone era bloccato sullo sci. Tuttavia, queste modifiche lo hanno reso estremamente scomodo. Il primo tentativo di utilizzare materiali

diversi dalla pelle fu quello di inserire elementi realizzati in resina epossidica rinforzata con fibre di vetro, mentre il primo scarpone completamente in plastica, fu creato con polimeri di acrilonitrile butadiene stirene (ABS); la scarsa resistenza alle basse temperature della plastica utilizzata ha dato origine a diversi guasti meccanici (Figura 1.7). Questi problemi vengono parzialmente risolti con l'utilizzo dell'adiprene, un poliuretano termoplastico che ha reso possibile produrre gli scarponi mediante stampaggio ad iniezione. Quindi vengono introdotti sul mercato i primi scarponi realizzati completamente in materiale composito, con resine epossidiche e fibra di vetro, per formare uno scafo realizzato da due parti separate per consentire l'inserimento del piede.



Figura 1.7 – Primo scarpone da sci in plastica.

Nella progettazione di uno scarpone da sci, i due principali design più utilizzati sono: il design *Overlap*, che fornisce il perfetto fit nella parte frontale del guscio e il restringimento delle fibbie diminuisce il volume interno creando una configurazione estremamente precisa, che permette di ottenere performance molto elevate; infatti, questo è il modello che viene utilizzato dagli atleti professionisti che gareggiano nella coppa del mondo di sci. Il design *Cabrio* (utilizzato dall'azienda Dalbello che ci ha fornito lo scarpone) presenta una parte in più, la linguetta che funge da molla; ciò implica che l'applicazione della forza sia progressivo e che lo scarpone torni nella sua struttura originale quando viene disapplicato il carico. Questo design consente un accesso estremamente facilitato al piede, ma crea una grande difficoltà ad adattare il piede alla forma del guscio, anche chiudendo le fibbie. In sostanza, il design *Overlap* risulta indirizzato ad un pubblico che necessita di elevate prestazioni, in cui il guscio dello scarpone sia più aderente possibile al piede per garantire una miglior precisione; mentre il design *Cabrio* è preferibile per chi cerca maggior comfort, facendo qualche compromesso dal punto di vista prestazionale.

La produzione in serie di scarponi da sci in plastica iniziò con il design *Overlap*, composto da due parti, quella inferiore chiamata scafo e quella superiore chiamata gambetto. Inizialmente gli scarponi con ingresso posteriore avevano conquistato il mercato, ma con il passare del tempo la loro produzione è andata diminuendo, tanto che al momento essi vengono utilizzati principalmente per il noleggio e per la fascia d'età più giovane. Una delle ragioni di questo cambiamento è da attribuire alla forza necessaria per togliere il piede da uno scarpone ad ingresso posteriore che è maggiore rispetto ad un design *Overlap*, fattore molto pericoloso in caso di infortunio alla caviglia (Figura 1.8). Un altro motivo può essere connesso alla difficoltà di adattare la forma della parte anteriore dello scafo alla forma del piede e quindi avere un controllo preciso degli sci.

A causa di questi limiti è stato progettato uno scarpone che presenta una linguetta aggiuntiva, deputata a controllare la flessione dello stivale che prende il nome di design *Cabrio*. Negli ultimi anni sono stati introdotti diversi nuovi modelli, ma sono tutti legati ai design iniziali. Gli scarponi sono composti da più parti assemblate utilizzando viti e bulloni, altre parti come la pedana (una parte in plastica o gomma tra lo scafo e la suola della fodera interna) e la linguetta possono essere presenti nello scarpone. Ciascuna parte è realizzata in un diverso materiale e assemblate grazie a connettori metallici e plastici.

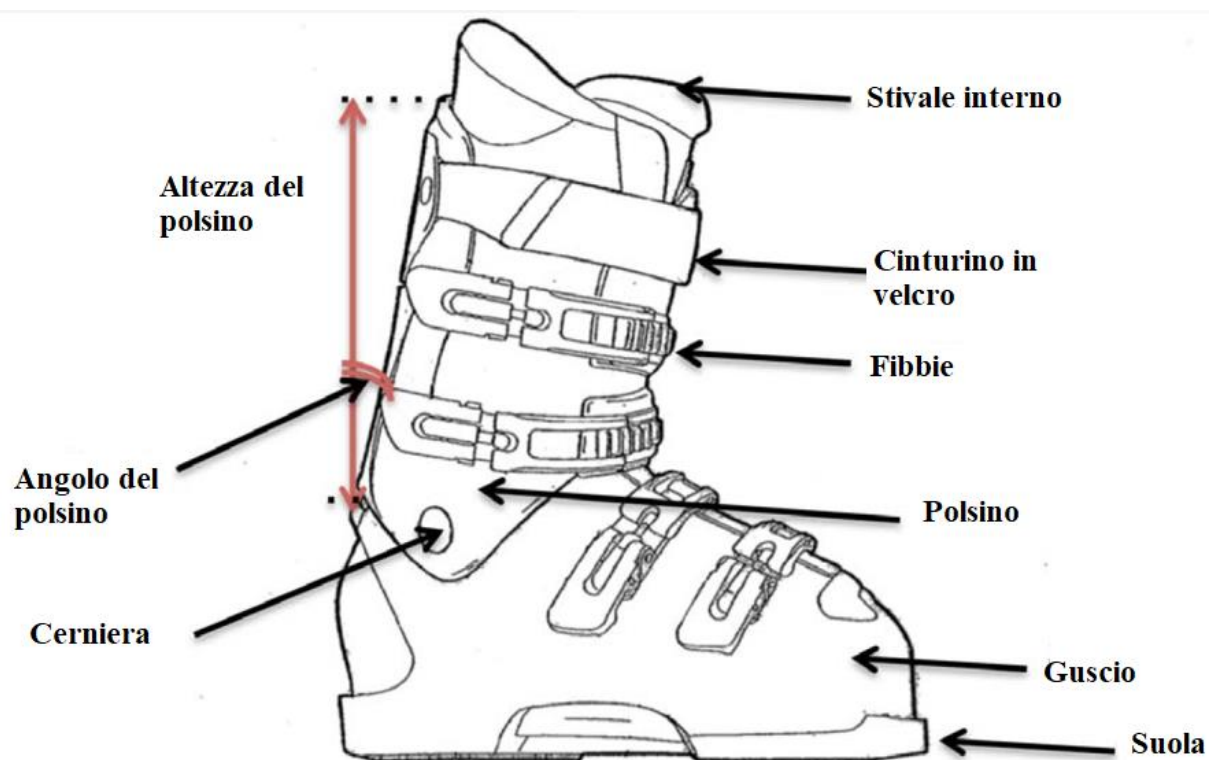


Figura 1.8 – Scarpone con design *Overlap*.

La forma interna dello scafo e del gambetto deve essere sagomata per seguire la forma anatomica del piede; tuttavia, poiché le forme del piede sono diverse da persona a persona, una forma a conchiglia che può adattarsi a tutti i piedi non esiste. Perciò i produttori di scarponi creano forme diverse a seconda del loro target di consumatori, in genere si va da un minimo di 95 mm a un massimo di 105 mm. Il guscio può essere modificato correggendo la plastica nei punti di pressione o combinando pressione e calore.

I due principali modelli di scarponi presenti sul mercato sono gli *Overlap*, formati da due parti e i *Cabrio* che invece sono costituiti da tre pezzi (Figura 1.9). Da ciò si può notare che il primo è composto da una parte inferiore (guscio) collegata da viti metalliche alla parte superiore (cuffia). La flessione in avanti dello scarpone è regolata dalla flessione della parte superiore dello scafo e per compressione dalla parte inferiore del gambetto sullo scafo. Questo design offre una migliore vestibilità nella parte anteriore dello scafo, in quanto le due parti si sovrappongono e il serraggio delle fibbie diminuisce il volume interno fornendo una vestibilità aderente e precisa, garantendo una rapida trasmissione della potenza dallo sciatore alla lamina dello sci. Questa configurazione può presentare problemi di entrata e uscita del piede dallo stivale in condizioni di freddo, soprattutto se si utilizzano plastiche rigide.

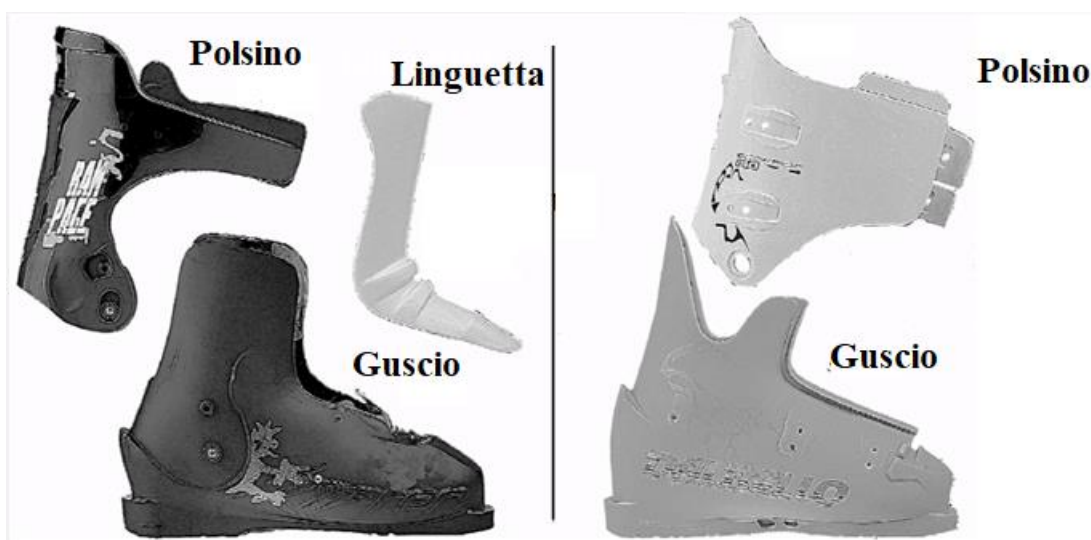


Figura 1.9 – Scarpone *Cabrio* (sx) e *Overlap* (dx) disassemblati.

Il design *Cabrio* è meno utilizzato rispetto all'*Overlap*, anche se per alcuni produttori e per determinate discipline sciistiche è il design perfetto. Esso non utilizza l'attrito per resistere alla flessibilità, ma con un pezzo di plastica separato (la linguetta) che funge da molla. Tale struttura rende l'applicazione della forza progressiva, permettendo allo stivale di ritornare alla sua posizione originale una volta disapplicato il carico, assicurando che la forza di flessione stia sempre sotto controllo anche in caso di una flessione estrema. Quando è chiusa, la fibbia

centrale tira il piede all'indietro, fattore che aiuta a mantenere la caviglia nella tasca posteriore dello stivale. La possibilità di muovere la linguetta permette un più comodo ingresso e uscita del piede dallo scafo rispetto alla costruzione *Overlap*.

Lo svantaggio principale di questo design è dovuto alla difficoltà di adattare la forma dello scafo al piede dello sciatore chiudendo le fibbie. Questo ha un effetto negativo sul controllo degli spigoli con la parte anteriore dello scarpone, motivo per cui non vengono impiegati nelle competizioni agonistiche. L'applicazione di fodere termoformabili consente l'utilizzo di fusti con forma più stretta, senza compromettere il comfort e permettendo un controllo di spigolo più preciso. Essendo che l'indice di flessione è principalmente regolato dalla linguetta, basterà sostituirla con una di diversa rigidità.

Tutti i materiali che compongono lo scarpone devono rispettare delle caratteristiche minime come ad esempio devono resistere agli impatti, ai graffi e non diventare troppo rigide a basse temperature, devono mantenere una stabilità a lungo termine in presenza di alte o basse temperature, deve essere in grado di combattere il fenomeno dell'invecchiamento dovuto ai raggi UV e quello dell'idrolisi, presentare ottime proprietà viscoelastiche e tornare alla configurazione indeformata una volta tolta la sollecitazione.

Diversi parametri di progettazione sono fondamentali per migliorare le prestazioni e ridurre sollecitazioni e lesioni [6]. Tra i principali responsabili degli infortuni ci sono gli angoli e la pressione della tibia e del piede rispetto alla base dello scarpone. I danni più frequenti vengono riscontrati al ginocchio a causa di un eccessivo sforzo legamentoso, mentre le lesioni alla caviglia e al piede sono dovute alla dinamica dello sci e alla postura. Il meccanismo di lesione per la rottura del legamento crociato anteriore coinvolge il movimento in valgo combinato con la rotazione esterna. Essa si verifica quando lo sciatore cerca di alzarsi in piedi dopo o durante una caduta. In ogni caso è chiaro che spostandosi dall'angolo fisiologico si aumentano le forze tangenziali sul piatto tibiale, diminuendo la stabilità del ginocchio. Da ciò si può dedurre che il design Cabrio risulta meno pericoloso per le lesioni al ginocchio rispetto agli scarponi *Overlap* grazie al loro indice di flessione più progressivo.

Le uniche due norme ISO per la progettazione degli scarponi da sci definiscono l'area dello scarpone a contatto con l'attacco per lo sci. È necessario un comportamento efficiente da parte dell'attacco nello sgancio dello scarpone durante una caduta, aspetto che viene molto influenzato dalla geometria e dalla rigidità dello scarpone a contatto con lo sci. Per questo

motivo essi devono rispettare limiti e prescrizioni in termini di dimensioni e design all'interfaccia. Le due norme sono la ISO 5355 e la ISO 9593, oltre che la ASTM F944-97 che riporta gli standard per le proprietà degli scarponi. La ISO 9593 richiede un valore minimo di area a contatto con la superficie d'appoggio del 25% nella punta e del 40% nel tallone. Per quanto riguarda i materiali usati, entrambe le norme esigono che la durezza del materiale all'interfaccia non sia inferiore a 50 Shore D a 23°C e che il coefficiente di attrito dinamico sia minore di 0.1.

Le principali classi di materiali che vengono adoperati nella realizzazione degli scarponi sono i poliuretani termoplastici TPU, copolimeri come poliolefine, poliammidi (Nylon), polieteri (Pebax). I TPU presentano le migliori caratteristiche, mentre le poliolefine sono utilizzate nei prodotti più economici. Polietilene e polipropilene sono le 2 poliolefine maggiormente impiegate insieme con gomme sintetiche come SBR (stirene-butadiene-rubber) e SEBS (stirene-etilene-butadiene-stirene). La poliammide più adottata è il Nylon 12 che esibisce le migliori proprietà a fatica, minor densità e assorbimento d'acqua rispetto ai più comuni poliammidi come il Nylon 6 e il Nylon 6,6.

Ulteriori parametri importanti nella scelta dei materiali appropriati sono la densità, la trasparenza e la possibilità di essere lavorati. Il materiale ideale da utilizzare dovrebbe essere leggero, avere ottime proprietà viscoelastiche, essere resistente agli urti, al degrado e mantenere le stesse proprietà nella più ampia gamma di temperature (Tabella 1). In vari casi vengono impiegati materiali diversi per la calotta, il polsino e, se presente, per la linguetta. La scelta del materiale adatto viene effettuata con una procedura per tentativi a seguito di prove sperimentali su neve con sciatori professionisti.

Tabella 1: Esempi di proprietà dei materiali termoplastici [5]:

<i>Material</i>	<i>Elastic modulus at 23 °C [Mpa]</i>	<i>Elastic modulus at 0 °C [MPa]</i>	<i>Elastic modulus at -20 °C [MPa]</i>	<i>Hardness Shore D</i>	<i>Impact Resistance</i>	<i>Density [g/cm³]</i>	<i>Melting Temp [°C]</i>	<i>HDT [°C]</i>
TPU	200	490	970	60	Charpy 16 kJ/m ²	1.18	230	62
Polyolefin	270	387	857	52	Izod 105 J/m	0.89	140	75
Nylon 12	450	846	1113	64	Charpy 8 kJ/m ²	1.01	178	115
Pebax	390	741	1000	69	Charpy no break	1.01	172	97

Una delle più importanti proprietà della plastica da tenere in considerazione quando si progetta uno scarpone da sci è la resistenza agli urti alle basse temperature, la quale viene misurata mediante i metodi *Charpy* (ISO 179) e *Izod* (ASTM D256) con provini dentellati, in quanto la rottura della plastica in genere è avviata dalla presenza di tagli e imperfezioni sulla superficie. Il secondo parametro fondamentale è il modulo elastico che viene misurato da ISO 178 per il modulo a flessione e ISO 527 per il modulo a trazione. I materiali di comune utilizzo nel campo degli scarponi hanno un modulo elastico a 23°C compreso tra 100 e 500 MPa, anche se alcune parti possono essere realizzate con plastiche più rigide. Una misura indiretta del modulo elastico può essere data dallo *Shore D*, infatti questo dato esprime la rigidità della plastica direttamente sullo scarpone, solitamente si aggira tra 52 e 62 Shore D a 23°C.

La stabilità ai raggi UV è uno dei maggiori problemi che affligge i termoplastici, può provocare discolorazione del prodotto e scollatura delle catene, con diminuzione del peso molecolare che porta alla riduzione delle proprietà meccaniche e termiche, oltre che alla resistenza agli urti a basse temperature. I polimeri termoplastici possono essere fusi e riformati perché non mostrano legami permanenti come i termoindurenti. Le soles degli scarponi da sci sono rigide e fatte dello stesso materiale del guscio. Lo spessore e la durezza delle soles sono regolati dagli standard ISO, per un miglior grip vengono applicate gomme naturali o sintetiche vulcanizzate che possiedono miglior resistenza all'usura rispetto agli elastomeri termoplastici. Le soles sono attaccate al guscio mediante viti metalliche, inoltre negli ultimi anni sono state progettate delle soles ibride con una parte rigida per lo sci e una zona morbida per avere presa sul ghiaccio.

In questo ambito, il modulo elastico più che a temperatura ambiente dovrebbe essere preso in considerazione a temperature minori, dove c'è un aumento di quest'ultimo. La rigidità di uno scarpone dipende dalla geometria e dal materiale; essendo lo sci uno sport in cui la temperatura non è costante e con picchi fino a -40°C, è evidente la necessità di un materiale che non alteri eccessivamente la sua rigidità, mantenendo un comportamento più uniforme possibile in diverse condizioni. Tutti i materiali plastici diventano più rigidi al diminuire delle temperature a causa della ridotta mobilità delle catene polimeriche, ma l'aumento della rigidità dipende anche dalla struttura e dall'unità ripetitiva dei materiali polimerici.

Da queste analisi si possono ottenere diversi fattori, infatti dal componente in fase con la forza applicata si può misurare il modulo elastico E' (componente elastica), mentre utilizzando il componente non in fase è possibile determinare il loss modulus E'' (componente viscosa). Il rapporto tra E' ed E'' è chiamato $\tan\delta$ e fornisce un'indicazione del comportamento di

smorzamento del materiale. Maggiore è E'' , meno elastico sarà il materiale e più tempo sarà necessario per tornare alla posizione iniziale dopo la flessione dello scarpone durante una curva. Per questo motivo, la linguetta del design *Cabrio* è costituita di materiali come le poliammidi, con bassi valori di E'' , in quanto un materiale più smorzante non avrebbe il comportamento elastico consono a riportare lo scarpone alla posizione iniziale.

Le fibbie forniscono una chiusura più semplice ed efficiente di guscio e gambetto. Il numero di fibbie su un singolo stivale varia a seconda della geometria e dell'uso finale. Gli scarponi ad alte prestazioni con design *Overlap* presentano quattro fibbie, due sullo scafo e due sul polsino, mentre quelli con design *Cabrio* ne hanno tre, di cui quella centrale è collegata allo scafo e non al polsino. Questo fa sì che la pressione sulla linguetta rimanga costante quando lo stivale è flesso e mantiene il tallone nella tasca posteriore. Al contrario, quando la fibbia è attaccata al gambetto, la pressione della chiusura varia durante il movimento che si verifica durante l'azione di sciata. Le fibbie sono generalmente realizzate con materiali metallici come titanio o leghe di alluminio per garantire un peso ridotto.

L'unico materiale plastico adatto alla costruzione di fibbie è il polycarbonato bisfenolo A, il quale è un materiale che mostra buone proprietà meccaniche fino a 100°C , grande resistenza all'impatto a basse temperature, grazie alla capacità di assorbire energia, dovuta alla temperatura di transizione vetrosa pari a -105°C (Figura 1.10). Il principale problema nell'uso del polycarbonato risiede nella sua scarsa resistenza ai solventi che possono innescare una cristallizzazione parziale e causare una drastica diminuzione della resistenza all'urto. La parte superiore del gambetto di solito è chiusa da un cinturino in velcro per esercitare una maggiore trasmissione della potenza.

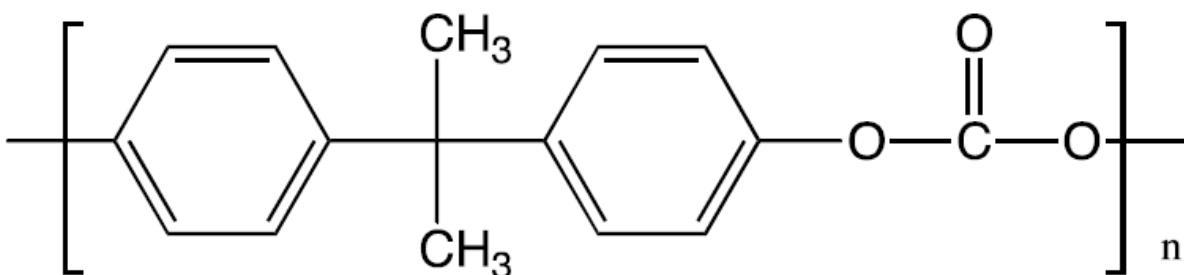


Figura 1.10 – Struttura chimica del polycarbonato bisfenolo A.

Diverse schiume elastomeriche sono considerate per quanto riguarda la suola, l'intersuola e gli strati del sottopiede. Le proprietà meccaniche sono descritte da una formulazione di iperschiuma, che spiega il comportamento tipico di questi materiali. In generale vengono

utilizzati diversi materiali e sono per lo più composti da schiume polimeriche espanse morbide, come il poliuretano e l'EVA [7].

Nello sci alpino la suola dello scarponne è rigida e realizzata dello stesso materiale dello scafo. Lo spessore e la durezza sono regolati da norme ISO che devono avere una distanza massima tra la suola e la base del tacco di 45 mm, i piatti di plastica vengono solitamente aggiunti sotto il guscio per ottenere l'altezza desiderata. I materiali rigidi che vengono utilizzati negli scarponi da sci non hanno una buona presa sul ghiaccio e superfici bagnate, per questo si adoperano soles in gomma vulcanizzata naturale o sintetica che garantisce una migliore resistenza all'usura rispetto agli elastomeri termoplastici (Figura 1.11). L'impiego di questo materiale va a diminuire il controllo degli sci, in quanto la suola tende a piegarsi quando viene applicato un carico e ciò si traduce in una mancanza di trasferimento di potenza dallo sciatore allo sci.



Figura 1.11 – Suola dello scarponne da sci (sx) e suola ibrida con parti in gomma (dx).

Le fodere sono realizzate per fornire isolamento termico, ammortizzazione e comfort. Gli scarponi interni sono generalmente formati da diverse parti incollate o cucite. La parte superiore è aperta per consentire l'ingresso del piede e può essere chiusa mediante lacci. Solitamente è presente una linguetta di materiale più rigido, che trasferisce la forza dello sciatore allo scafo e

allo sci. La parte superiore della fodera interna è più dura, in quanto è esterna al gambetto di plastica (Figura 1.12). Le parti più morbide all'interno dello stivale sono realizzate in materiale espanso che garantiscono isolamento e ammortizzazione. Possono essere impiegati diversi materiali espansi con morfologie a cella aperta o chiusa.



Figura 1.12 – Fodera del design *Overlap* (sx) e del design *Cabrio* (dx).

Il materiale più usato è l'EVA parzialmente reticolato, poiché presenta la capacità di essere modellato e sagomato sulla forma del piede grazie al punto di rammollimento di 90°C, ma quando la temperatura torna a 25°C le regioni fuse tornano ad uno stato cristallino, mantenendo la forma desiderata. Le proprietà dei diversi tipi di EVA sono legate alla loro densità e al tipo di gas di espansione utilizzato. A seconda della morfologia delle celle, il materiale può essere termoformato con diversa efficienza per mantenere la stabilità dimensionale dopo l'uso. I materiali a celle chiuse garantiscono una migliore resistenza a compressione e termoformabilità. Nelle diverse parti dello stivale sono utilizzati materiali con varie densità e spesso si creano dei sandwich di materiali.

CAPITOLO 2

PROVE SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno trattate le prove sperimentali nella sua interezza, partendo dalla scelta dei materiali da un determinato numero di campioni disponibili, passando per la preparazione di essi e infine arrivando alle prove vere e proprie.

Le prove meccaniche forniscono indicazioni sull'attitudine di un materiale a resistere a sollecitazioni esterne che tendono a deformato. Le caratteristiche sono dedotte mediante prove standardizzate che mirano a definire delle specifiche relative a diversi aspetti come la geometria dei provini, la modalità di applicazione del carico e le condizioni fisiche. L'applicazione degli standard garantisce la ripetibilità della prova, per cui soggetti differenti sono in grado di ottenere risultati tra loro compatibili. Le normative si suddividono in base all'area geografica in cui agiscono, in norme internazionali ISO (International Organization for Standardization), in norme europee EN (European Standards) ed infine normative nazionali come, ad esempio, quella che vige in Italia ossia la UNI.[8]

Avendo a disposizione una serie di materiali che vanno a costituire i componenti di uno scarpone da sci (forniti dall'azienda Dalbello) e su questi sono stati analizzati i diversi comportamenti a seconda del tipo del materiale e dell'impiego che ricopriranno all'interno dello scarpone. Da una tabella contenente tutte le caratteristiche essenziali di ciascuna parte come nome, materiale, codice identificativo e colore, quali regioni prendere in considerazione tra quelle disponibili.

Tabella 2: Caratteristiche campione 1, imbottitura della fodera di rivestimento:

Parametri	Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore	UNI EN ISO 5084	mm	4.0 ± 0.3
Peso totale	UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	375 ± 40
Densità	ISO 845:2006	kg/m ³	65 ± 7
Set di compressione	ISO 844:2006	kg	12 ± 2
Adesione	PC 033 Rev. A	kg	≥ 0.7

Deformazione rimanente dopo compressione	UNI 6352:1	%	Non misurato
Altezza dei rulli		cm	≥ 140
Grani			Omogenei senza parti dure
Durezza	PC 034 Rev. A	ShA	Non misurato
Composizione			PU
Resistenza a temperatura		°C	-20 / 80
Distribuzione di gluina	PC 033 Rev. A		Omogeneo
Rivestimento			Omogeneo

Tabella 3: Caratteristiche campione 2, imbottitura del tacco:

Parametri	Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore	UNI EN ISO 5084	mm	2.0 ± 0.3
Peso totale	UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	150 ± 30
Densità	ISO 845:2006	kg/m ³	35 ± 15
Set di compressione	ISO 844:2006	kg	Non misurato
Adesione	PC 033 Rev. A	kg	≥ 0.7
Deformazione rimanente dopo compressione	UNI 6352:1	%	≤ 15
Altezza dei rulli		cm	≥ 140
Grani			Omogenei senza parti dure
Durezza	PC 034 Rev. A	ShA	Non misurato
Composizione			PU
Resistenza a temperatura		°C	-20 / 80
Distribuzione di gluina	PC 033 Rev. A		Omogeneo
Rivestimento			Omogeneo

Tabella 4: Caratteristiche campione 3, imbottitura esterna del malleolo:

Parametri	Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore	UNI EN ISO 5084	mm	4.0 ± 0.3
Peso totale	UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	200 ± 30
Densità	ISO 845:2006	kg/m ³	40 ± 5

Set di compressione	ISO 844:2006	kg	6.5 ± 2
Adesione	PC 033 Rev. A	kg	≥ 0.7
Deformazione rimanente dopo compressione	UNI 6352:1	%	Non misurato
Altezza dei rulli		cm	≥ 140
Grani			Omogenei senza parti dure
Durezza	PC 034 Rev. A	ShA	Non misurato
Composizione			PU
Resistenza a temperatura		°C	-20 / 80
Distribuzione di gluina	PC 033 Rev. A		Omogeneo
Rivestimento			Omogeneo

Tabella 5: Caratteristiche campione 4, fodera del colletto laterale:

Parametri		Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore totale		UNI EN ISO 5084	mm	4.0 ± 0.3
Spessore schiuma		UNI EN ISO 5084	mm	Non misurato
Peso totale		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	375 ± 40
Peso schiuma		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	Non misurato
Peso tessuto		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	Non misurato
Densità schiuma		PC 031	kg/m ³	Non misurato
Resistenza a trazione:	Trama	UNI EN ISO 13934-1	kg	≥ 50
	Deformazione			≥ 80
Forza di allungamento:	Trama	PC 012	%	≤ 1
	Deformazione			≤ 10
Allungamento a rottura:	Trama	UNI EN ISO 13394-1	%	≥ 80
	Deformazione			≥ 30
Allungamento a rottura:	Trama	PC 032	cm	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza a strappo:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	≤ 15
	Deformazione			≤ 15

Delaminazione:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	≥ 0.8
	Deformazione			≥ 0.8
Resistenza ad abrasione		PC 016	N° CY	> 100 CY/1 kg
Durezza del rinforzo		PC 034	ShA	Non misurato
Resistenza a temperatura			°C	-20 / 80
Adesione		PC 034		Non misurato
Altezza dei rulli			cm	≥ 140
Distribuzione di gluina		PC 034		Non misurato
Solidità del colore al sudore		UNI EN ISO 105-E04	Scala di grigi	Acido > 4
				Alcalino > 4
Trattamento tessuto				Non misurato
Solidità alla luce		UNI EN ISO 105-B01		Secondo il campione
Migrazione del colore		UNI EN ISO 105- A08		Secondo il campione
Colore				Secondo il campione
Colore del tessuto				Secondo il campione
Colore di supporto				Secondo il campione

Tabella 6: Caratteristiche campione 5, tomaia posteriore:

Parametri	Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore totale	UNI EN ISO 5084	mm	4.8 ± 0.3
Spessore schiuma	UNI EN ISO 5084	mm	Non misurato
Peso totale	UNI EN ISO 2286-1- 2-3	gr/m ²	580 ± 60
Peso schiuma	UNI EN ISO 2286-1- 2-3	gr/m ²	Non misurato
Peso tessuto	UNI EN ISO 2286-1- 2-3	gr/m ²	200 ± 10
Densità schiuma	PC 031	kg/m ³	90 ± 10

Resistenza a trazione:	Trama	UNI EN ISO 13934-1	kg	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza di allungamento:	Trama	PC 012	%	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento a rottura:	Trama	UNI EN ISO 13394-1	%	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento a rottura:	Trama	PC 032	cm	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza a strappo:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Delaminazione:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	≥ 1
	Deformazione			≥ 1
Resistenza ad abrasione		PC 016	N° CY	>100 CY/1kg
Composizione				PVC
Durezza del rinforzo		PC 034	ShA	Non misurato
Resistenza a temperatura			°C	-20 / 80
Adesione		PC 034		Non misurato
Altezza dei rulli			cm	≥ 145
Distribuzione di gluina		PC 034		Non misurato
Solidità del colore al sudore		UNI EN ISO 105-E04	Scala di grigi	Non misurato
				Non misurato
Trattamento tessuto				Non misurato
Solidità alla luce		UNI EN ISO 105-B01		Secondo il campione
Migrazione del colore		UNI EN ISO 105-A08		Secondo il campione
Colore				Secondo il campione
Colore del tessuto				Secondo il campione
Colore di supporto				Secondo il campione

Tabella 7: Caratteristiche campione 6, punta superiore:

Parametri		Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore totale		UNI EN ISO 5084	mm	4.5 ± 0.2
Spessore schiuma		UNI EN ISO 5084	mm	3.0 ± 0.2
Peso totale		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	650 ± 50
Peso schiuma		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	450 ± 50
Peso tessuto		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	200 ± 20
Densità schiuma		PC 031	kg/m ³	150 ± 20
Resistenza a trazione:	Trama	UNI EN ISO 13934-1	kg	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza di allungamento:	Trama	PC 012	%	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento a rottura:	Trama	UNI EN ISO 13394-1	%	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento a rottura:	Trama	PC 032	cm	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza a strappo:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Delaminazione:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Resistenza ad abrasione		PC 016	N° CY	>100 CY/1kg
Composizione				PA/EA+PU+PA
Durezza del rinforzo		PC 034	ShA	Non misurato
Resistenza a temperatura			°C	-20 / 80
Adesione		PC 034		Non misurato
Altezza dei rulli			cm	≥ 140
Distribuzione di gluina		PC 034		Non misurato
Solidità del colore al sudore		UNI EN ISO 105-E04	Scala di grigi	Non misurato
				Non misurato
Trattamento tessuto				Non misurato

Solidità alla luce	UNI EN ISO 105-B01		Secondo il campione
Migrazione del colore	UNI EN ISO 105-A08		Secondo il campione
Colore			Secondo il campione
Colore del tessuto			Secondo il campione
Colore di supporto			Secondo il campione

Tabella 8: Caratteristiche campione 7, fodera interna della punta superiore:

Parametri		Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore totale		UNI EN ISO 5084	mm	5.0 ± 0.6
Peso totale		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	350 ± 35
Peso tessuto		UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	Non misurato
Spessore HLC		ISO 845:2006	mm	Non misurato
Densità HLC		ISO 845:2006	kg/m ³	Non misurato
Spessore MTP		ISO 845:2006	mm	Non misurato
Resistenza a trazione:	Trama	UNI EN ISO 13934-1	kg	≥ 20
	Deformazione			≥ 35
Forza di allungamento:	Trama	PC 012	%	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento manuale	Trama	PC 032	mm	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Allungamento a rottura:	Trama	UNI EN ISO 13394-1	%	≥ 110
	Deformazione			≥ 45
Allungamento a rottura:	Trama	PC 032	cm	Non misurato
	Deformazione			Non misurato
Forza a strappo:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	≥ 20
	Deformazione			≥ 20

Delaminazione:	Trama	UNI EN ISO 4674-1	kg	≥ 0.8
	Deformazione			≥ 0.8
Resistenza ad abrasione		PC 016	N° CY	>100 CY/1kg
Solidità del colore al sudore		UNI EN ISO 105- E04	Scala di grigi	Acido > 4
				Alcalino > 4
Trattamento tessuto				No trattamento
Solidità alla luce		UNI EN ISO 105- B01		Secondo il campione
Migrazione del colore		UNI EN ISO 105- A08		Secondo il campione
Altezza dei rulli			cm	≥ 145
Resistenza a temperatura			°C	-20 / 80
Composizione				80%PL 20%PU
Colore				Secondo il campione
Colore del tessuto				Secondo il campione
Colore schiuma				Bianco
				Grigio

Tabella 9: Caratteristiche campione 8, imbottitura del polsino anteriore:

Parametri	Normativa	Unità di misura	Valore
Spessore	UNI EN ISO 5084	mm	4.0 ± 0.3
Peso totale	UNI EN ISO 2286-1-2-3	gr/m ²	650 ± 97
Densità	ISO 845:2006	kg/m ³	140 ± 21
Set di compressione	ISO 844:2006	kg	62 ± 7
Adesione	PC 033 Rev. A	kg	≥ 0.7
Deformazione rimanente dopo compressione	UNI 6352:1	%	15
Altezza dei rulli		cm	≥ 140
Grani			Omogenei senza parti dure
Durezza	PC 034 Rev. A	ShA	Non misurato
Composizione			PU

Resistenza a temperatura		°C	-20 / 80
Distribuzione di gluina	PC 033 Rev. A		Omogeneo
Rivestimento			Omogeneo

2.1 Prove a trazione

Per prima cosa, una volta scelti i materiali da utilizzare, è necessario tagliare i pezzi in modo da creare i provini per le prove sperimentali che saranno illustrate in seguito. Per la prova a trazione bisogna avere dei provini a forma di osso di cane di una lunghezza utile, cioè con una distanza che va da una rastremazione all'altra, pari a 108 mm.



Figura 2.1 – Macchina per tagliare campioni a osso di cane.

Per fare ciò, in laboratorio, è stato utilizzato il macchinario (Figura 2.1) che è costituito da una base, fatta di un materiale che impedisce l'usura e la rottura dello stampo, dove posizionare il pezzo da tagliare. Per ottenere provini precisi si fa affidamento su stampi di dimensioni standard: i campioni da uno a quattro possiedono un'altezza della parte centrale uguale a 10 mm e delle estremità pari a 20 mm (Figura 2.2), mentre i campioni da cinque a otto presentano un'altezza, rispettivamente, di 5 mm e 25 mm.

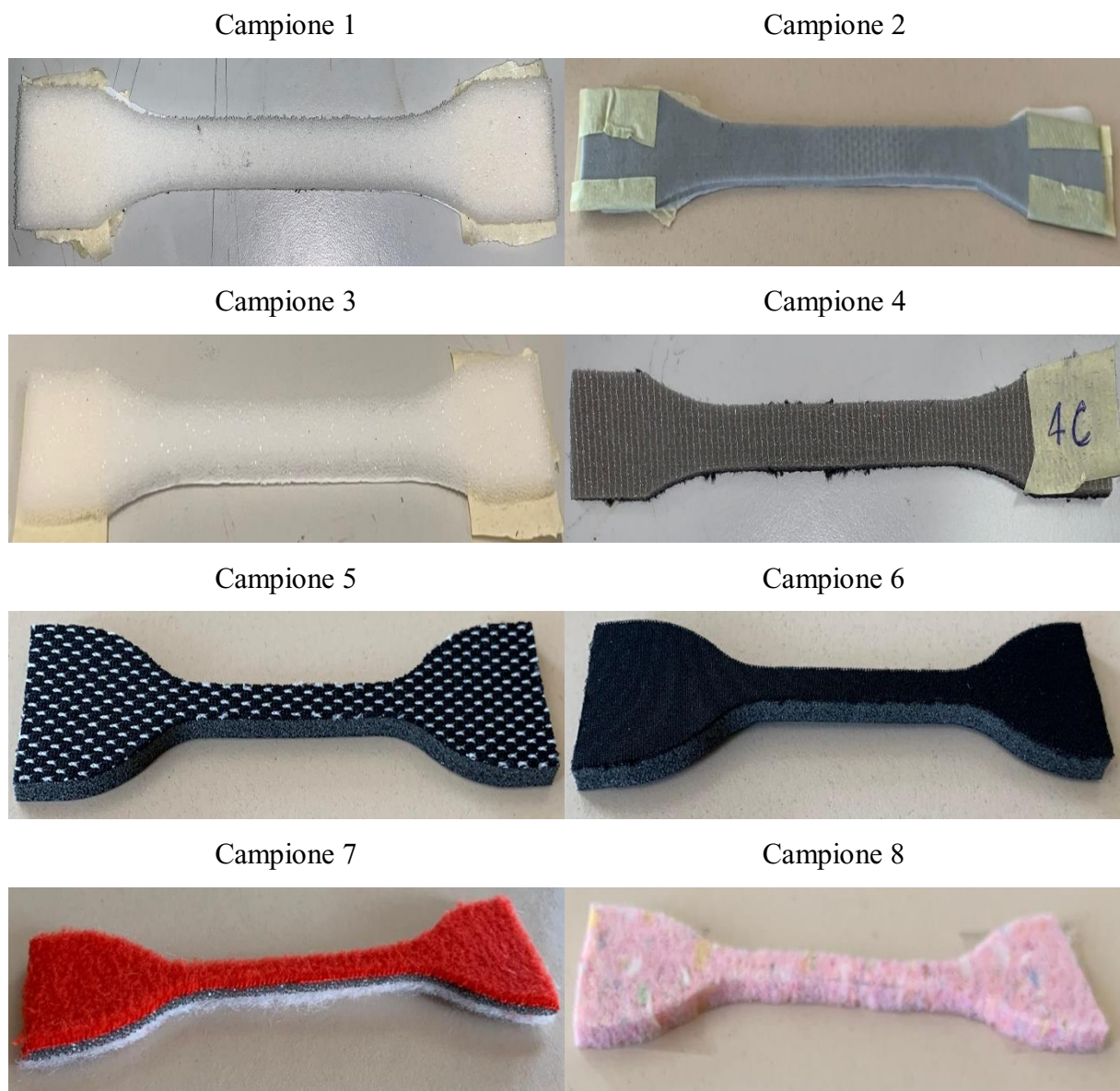


Figura 2.2 – Campioni per prove a trazione.

Una volta creati tre provini per ciascun campione, si sono cominciate le prove di trazione vere e proprie. Il macchinario (Figura 2.3) utilizzato permette di effettuare prove a trazione e a compressione, la cella di carico è un sistema che misura forze applicate in specifiche direzioni che stanno nell'intorno di 10^{-2} N ÷ 100 kN (in questo caso la cella di carico è di 25 kN). La cella è composta da un elemento elastico, sul quale sono posizionati degli estensimetri che misurano gli effetti delle forze in termini di deformazione.



Figura 2.3 – Macchinario per prove a trazione e compressione [9].

La geometria dei provini a osso di cane è funzionale, in quanto lo stato di tensione al suo interno non è omogeneo; infatti, nella zona di misura la tensione è omogenea e in direzione parallela all'asse della sollecitazione, mentre nelle zone di estremità la distribuzione delle tensioni è più complessa. Se il provino non fosse costituito da più materiale alle estremità si romperebbe in corrispondenza degli afferraggi. Per questo motivo, la geometria dei provini è normata da standard come la UNI EN ISO 6892-1:2009 per i materiali metallici, o da analoghe per altri tipi di materiali [10].

Per le prove a trazione, si è utilizzata una cella di carico Galdabini con dinamometro Sun 2500, una cella da 25 kN con velocità comprese tra 0.1 e 500 mm/min. Per eseguire le prove, si è posizionato il provino facendo attenzione a mettere le estremità in corrispondenza degli afferraggi e attraverso il computer si è andati a modificare l'altezza della trasversa mobile in modo da inserire il provino ideale senza causare una deformazione prima dell'inizio della prova (Figura 2.4).

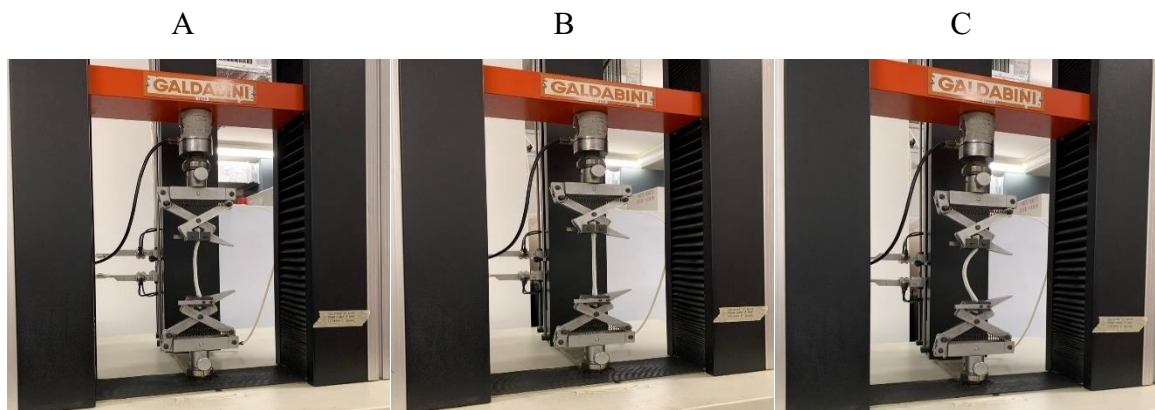


Figura 2.4 – Trazione a riposo (A), deformazione massima (B), a fine ciclo (C).

I passaggi da eseguire per la prova di trazione consistono nell'andare a posizione il provino a osso di cane sugli afferraggi del macchinario in modo che le morse siano in corrispondenza delle rastremazioni. A questo punto bisognava collocare la traversa mobile affinché il campione fosse nella condizione ideale per far partire la trazione, ponendo quella situazione come lo zero, ovvero il caso privo di sollecitazioni.

Successivamente era necessario deformare il provino, che presentava una lunghezza iniziale di 108 mm, fino al 30% di deformazione, cioè di 32.4 mm con una velocità di deformazione dell'1% pari a 64.8 mm/min. Questa iterazione doveva essere ripetuta per quattro cicli, ma il programma li considerava come otto in quanto separava salita e discesa del ciclo (Figura 2.5).

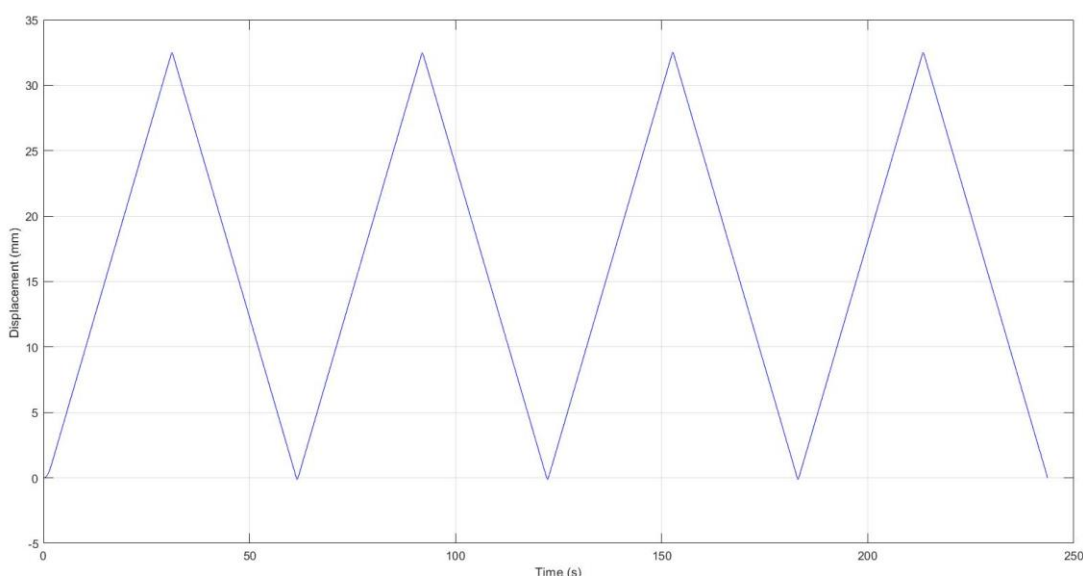


Figura 2.5 – Protocollo seguito per le prove di trazione.

A questo punto, si è ripetuta la prova sui tre provini di ciascun campione, ma per il quarto e il quinto è stato necessario creare altri tre provini in quanto essi presentavano caratteristiche anisotrope dovute alla loro trama (Figura 2.6) (Figura 2.7).

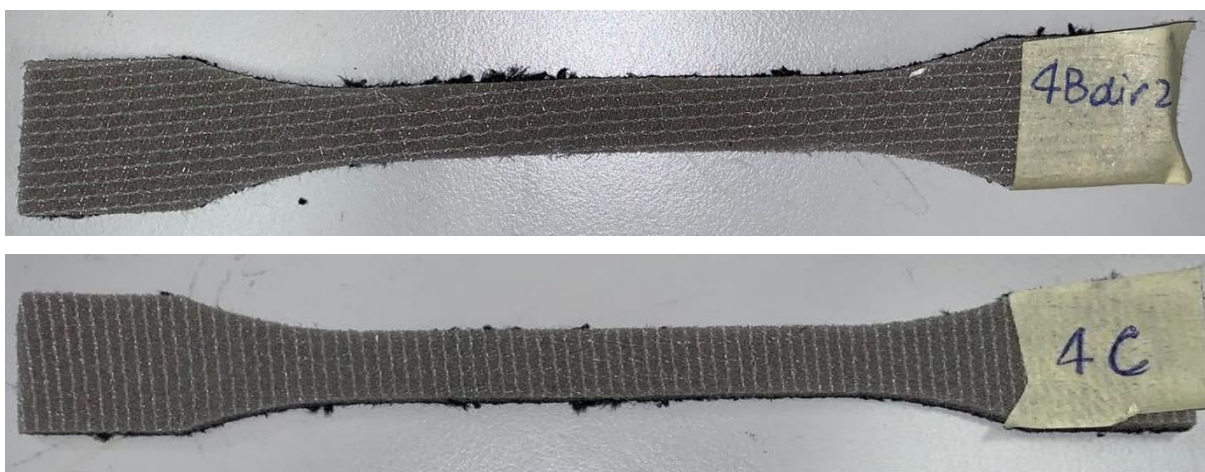


Figura 2.6 – Campioni quattro anisotropi direzione uno (sopra) e direzione 2 (sotto).



Figura 2.7 – Campioni cinque anisotropi direzione uno (sopra) e direzione 2 (sotto).

2.2 Prove a compressione

Le prove di compressione sono affiancate a quelle di trazione quando si ritiene che il comportamento meccanico del materiale sia differenziato a trazione e a compressione in termini di resistenza o rigidità.

In molte lavorazioni per deformazione plastica, essa si ottiene principalmente tramite un'azione di compressione esercitata sul pezzo da deformare. Le prove di compressione riproducono uno stato di tensione paragonabile a quello impresso al pezzo durante le lavorazioni e sono quindi indicative ai fini del comportamento del materiale. Le prove di compressione vengono eseguite comprimendo un provino di forma quadrata fra due superfici piane e parallele.

Il macchinario, per funzionare in condizioni ideali (seguendo le normative BS EN ISO 527-1:2012, BS EN ISO 3386-1:1987, BS EN ISO 1788: 2008), necessita di uno spessore minimo pari a 10 mm, di conseguenza per ciascun campione sono stati sovrapposti diversi strati dello stesso materiale in modo da raggiungere l'altezza richiesta. Di seguito, si presentano i vari spessori dei campioni, con annesse le deformazioni e velocità applicate per eseguire la prova di compressione in maniera corretta.

Tabella 10: Caratteristiche campioni per prove di compressione:

Campione	Spessore singolo strato	Spessore totale	Numero strati	Deformazione al 50%	Velocità dell'1%/s
1	4 mm	12 mm	3	6 mm	7.2 mm/min
2	2 mm	10 mm	5	5 mm	6 mm/min
3	4 mm	12 mm	3	6 mm	7.2 mm/min

4	3.5 mm	10.5 mm	3	5.25 mm	6.3 mm/min
5	4.8 mm	14.4 mm	3	7.2 mm	8.6 mm/min
6	4.5 mm	13.5 mm	3	6.75 mm	8.1 mm/min
7	5 mm	10 mm	2	5 mm	6 mm/min
8	4 mm	12 mm	3	6 mm	7.2 mm/min

Il *setup* della prova di compressione è costituito da due piastre piane e parallele, su cui viene poggiato il campione che deve subire la sollecitazione. Dopodiché si va a posizionare la piastra in modo che sia a contatto con la superficie del provino, senza però andare a deformato (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Test a compressione tra piastre parallele [8].

Il protocollo di carico della prova a compressione è dato da quattro cicli di carico e scarico, ognuno con una velocità di deformazione dell'1%/s, fino a raggiungere una deformazione del 50% (Figura 2.9). Il provino è un parallelepipedo di sezione quadrata con un'altezza minima di 10 mm (Figura 2.10).

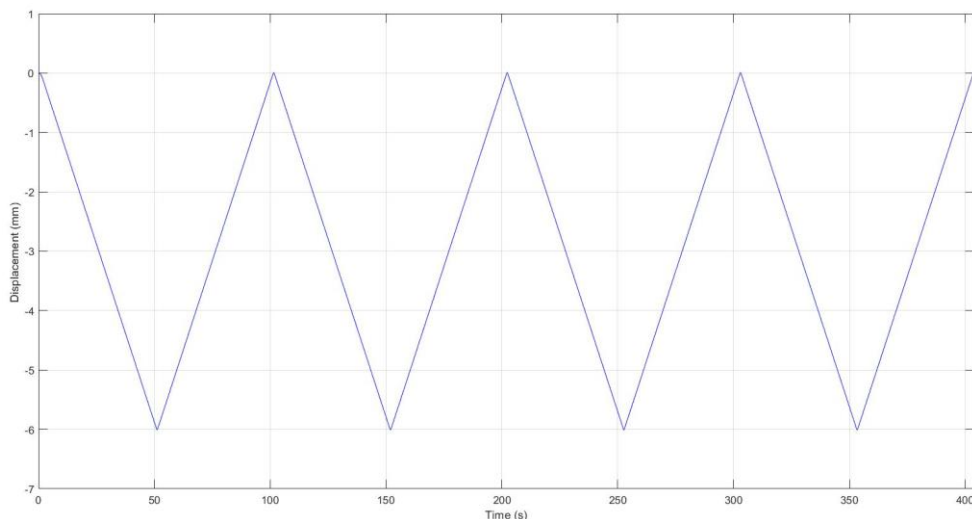


Figura 2.9 – Protocollo seguito per le prove di compressione.



Figura 2.10 – Campioni per prove a compressione.

Per quanto riguarda il campione quattro, dato che le due superfici sono estremamente diverse tra loro era necessario stabilire su quale faccia applicare il carico. Tale aspetto viene documentato nella (Figura 2.11).

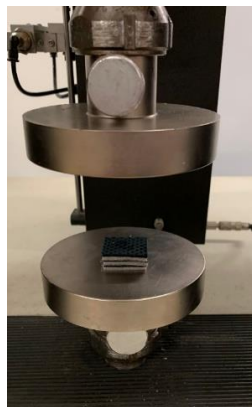


Figura 2.11 – Verso di applicazione del carico a compressione per il campione quattro.

2.3 Prove di indentazione

Per eseguire le prove di indentazione, innanzitutto sono stati ricavati i campioni come dei quadrati 50x50 mm, costituiti da un singolo strato, a eccezione per il provino due in cui sono stati sovrapposti due strati per ottenere lo spessore minimo necessario alla macchina per operare senza causare problemi. Di seguito vengono mostrati nella tabella 11 gli spessori delle varie schiume per il caso specifico di questa prova:

Tabella 11: Caratteristiche campioni per prove di indentazione:

Campione	Spessore singolo strato	Spessore totale	Numero strati
1	4 mm	4 mm	1
2	2 mm	4 mm	2
3	4 mm	4 mm	1
4	3.5 mm	3.5 mm	1
5	4.8 mm	4.8 mm	1
6	4.5 mm	4.5 mm	1
7	5 mm	5 mm	1
8	4 mm	4 mm	1

Il macchinario utilizzato per queste prove è il Biomomentum Mach-1 (Figura 2.12), esso è un sistema di test micromeccanico con un sistema multiasse che ha la capacità di svolgere test di compressione, tensione, taglio e torsione in varie modalità. Il Mach-1 include un sistema informatico e un software che permettono di effettuare test di indentazione tramite penetratori. Presenta una cella di carico di 250 N con una risoluzione di 1.2 grammi, le forze vengono misurate in grammi per cui successivamente vanno convertite [11].



Figura 2.12 – Biomomentum Mach-1.

Il raggio dell'indentatore deve essere, al massimo, il 25% dello spessore del campione. Con questo macchinario sono state fatte due tipologie principali di test per un totale di diciotto misure, ottenute eseguendo tre punti per ciascuno dei tre campioni, moltiplicati per le due prove. L'indentazione consiste in tre punti sullo stesso campione. I punti sono stati scelti in modo da creare una maglia con una distanza di almeno due volte lo spessore, per non avere influenze tra un punto e l'altro. Per questo si è deciso di porre i punti a una distanza reciproca di 1 cm sull'orizzontale e sulla verticale.

La prova uno, denominata rampa, è formata da un test in cui si applica un certo spostamento massimo e poi lo si scaricava a zero, ripetendolo per quattro volte. Ciascuna rampa raggiungeva una deformazione, nel primo ciclo fino al 20%, nel secondo ciclo al 30 %, nel terzo ciclo al 40 % e nel quarto ciclo al 50 %. A seconda della schiuma trattata l'indentatore si abbassava di un determinato valore in relazione al suo spessore, ma sempre a una velocità costante pari a 0.08 mm/s.

La prova due, detta stress-relaxation, è caratterizzata anche qui da una deformazione dal 20 al 50 %, ma in modo incrementale. Ciò significa che nel primo ciclo, una volta raggiunta la deformazione voluta, l'indentatore rimaneva in posizione per trenta secondi prima di proseguire con il ciclo successivo. Anche in questo caso c'è una deformazione al secondo costante uguale al 2%/s per tutti i campioni.

2.4 Elaborazioni dati sperimentali

Una volta terminate le prove sperimentali, è necessario raccogliere e analizzare la grande mole di dati ottenuti, in quanto bisogna capire se questi sono coerenti con ciò che è stato fatto.

I dati sono stati ricavati dalle prove a trazione di ciascun campione. Essi erano distribuiti in cinque colonne che rappresentavano, in ordine: la forza in Newton, lo spostamento approssimato in millimetri, lo spostamento reale sempre in millimetri, il tempo in secondi e il numero della fase nel ciclo di carico-scarico.

Per quanto riguarda i dati di compressione, i valori di forza e spostamento, in questo caso, sono negativi in quanto siamo davanti a una prova di compressione.

I dati riscontrati dalle prove di indentazione variano a seconda della prova che è stata svolta. Essi vengono rappresentati in due colonne per ciascun ciclo, costituite dal tempo, misurato in secondi e dalla forza, misurata in grammo-forza.

Tutte le prove di indentazione presentano i grammo-forza come unità di misura per le componenti di sollecitazione, ma per mantenere un'uniformità nelle notazioni, questi valori sono stati poi convertiti in Newton.

Partendo dal campione uno, si è considerata la compressione. La prima mossa da fare era quella di caricare nello script i dati grezzi ricavati dai test di laboratorio, per cui attraverso il comando load sono stati richiamati i file contenenti le tre prove a compressione dei provini del campione uno. Questi file si presentano come una matrice costituita da circa tredici mila righe e sei colonne, dove ciascuna colonna possiede un significato fisico come forza, spostamento, tempo e fase, mentre le righe coincidono con i valori associati alle colonne.

Dopo aver caricato i dati da utilizzare per l'intero processo bisognava andare a impostare le dimensioni standard (caratteristiche per ciascun campione) per quanto riguarda lo spessore in millimetri, il lato del quadrato e la conseguente area in millimetri quadrati. Per le prove di compressione l'area dei campioni era fissa in quanto ogni provino presentava una sezione quadrata di lato 25 mm, mentre lo spessore variava da campione a campione ed era ottenuto dalla sovrapposizione di diversi strati dello stesso materiale come si può notare dalle tabelle e dalle immagini precedenti.

A questo punto si è andati a considerare lo spostamento associato a tutte le fasi e successivamente la forza applicata, per andare a comprendere l'andamento di queste due variabili. Da qui inizia il vero *post-processing* dei dati in quanto si stabilisce il modello da seguire in una deformazione che va da zero al 50% con un incremento dell'1%.

Una volta conclusa la parte attinente alla compressione, bisognava trattare la trazione. Per le prove non si usa più un campione a sezione quadrata, bensì un provino a osso di cane. L'area risultante sarà ottenuta mediante il prodotto tra spessore e larghezza e misurata in millimetri quadri. In questa situazione si utilizzava un modello con una deformazione da zero al 30% con un incremento dell'1%. Per risolvere il problema è stata utilizzata una funzione y_0 necessaria per eseguire il *fit* esponenziale.

Nel curve fitting tool sono stati inseriti in x i dati di deformazione e in y quelli di tensione. Quindi è stata selezionata un'equazione in modo da creare un modello lineare e un modello esponenziale, valutando l'RMSE per capire se i modelli fossero appropriati. Utilizzando nel

curve fitting delle equazioni complesse si ottenevano curve molto precise che approssimavano perfettamente i dati, ma ciò aumentava drasticamente la complessità e di conseguenza l'onere computazionale. Al contrario di un'equazione troppo semplice che andava a causare una grande perdita di dati e generare un modello non rappresentativo della realtà.

Estratti i parametri del *fit*, si è creata una matrice facendo la trasposta del modello appena definito e, avendo tutti gli strumenti per fare il plot dei modelli di tensione e deformazione, si è potuta fare la media dei valori di stress per ottenere una miglior visualizzazione.

Questi procedimenti sono stati ripetuti per gli altri provini in modo da ricavare dei valori da poter mediare per acquisire dei dati univoci in grado di rappresentare l'intero campione indipendentemente dal provino utilizzato, per fare in modo di avere dei parametri di riferimento che siano caratteristici del materiale e allo stesso tempo ottenuti mediante diverse prove sperimentali, garantendo così una miglior affidabilità e ripetibilità dei risultati.

Concluso il *post-processing* per le prove di trazione e compressione per i campioni, le variabili sono state modificate in modo da essere adatte per subire ulteriori manipolazioni oppure essere esportate e successivamente impiegate all'interno di altri programmi.

CAPITOLO 3

ANALISI COSTITUTIVA

Concluse le prove sperimentali in laboratorio e dopo aver analizzato i dati grezzi ottenuti da quest'ultime era il momento di cominciare a trattare questi dati in modo da effettuare il *processing*. Per fare ciò, si è utilizzato Abaqus al fine di implementare la formulazione materiale dei campioni testati partendo da una prova sperimentale (trazione/compressione) per validarne i parametri e la formulazione costitutiva, confrontando con i dati sperimentali e computazionali di una seconda prova sperimentale indipendente (indentazione).

3.1 Formulazione costitutiva: modello *hyperfoam*

Il modello *hyperfoam* è isotropo e non lineare, è valido per solidi cellulari la cui porosità consente variazioni volumetriche molto ampie consentendo la dissipazione di energia e gli effetti di *softening* dello stress. Un'iperschiama può deformarsi elasticamente a grandi sollecitazioni, fino al 90% di deformazione in compressione; inoltre richiede che si tenga conto della non linearità geometrica durante la fase di analisi, per applicazioni a deformazione finita.

Le schiume sono formate da cellule poliedriche che si impacchettano nelle tre dimensioni. Le celle possono essere aperte come nel caso di una spugna o chiuse come per una schiuma flottante. Esempi comuni di materiali elastomerici espansi sono polimeri cellulari che utilizzano le eccellenti proprietà di assorbimento dell'energia delle schiume: infatti, l'energia assorbita dalle schiume è sostanzialmente maggiore di quella assorbita dai normali materiali elastici rigidi per un certo livello di sollecitazione [12].

Durante la compressione si possono distinguere tre fasi: a piccole sollecitazioni ($< 5\%$) la schiuma si deforma in modo elastico lineare a causa della flessione della parete, la fase successiva è costituita da un plateau di deformazione a stress quasi costante, causato dall'instabilità elastica degli elementi che formano i bordi o le pareti delle celle. Nelle celle chiuse la pressione del gas racchiuso e l'allungamento della membrana aumentano il livello e la pendenza del plateau. Infine, si verifica una regione di densificazione, in cui le pareti si schiacciano, determinando un rapido aumento dello stress di compressione. Di solito si trattano deformazioni nominali di compressione comprese tra 0.7 e 0.9 (Figura 3.1).

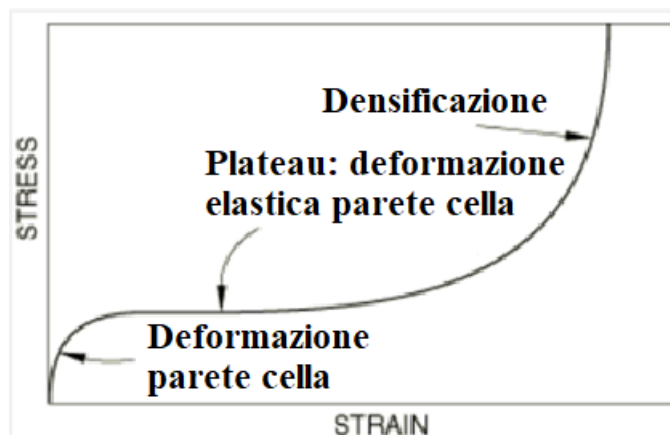


Figura 3.1 – Tipica curva di compressione tensione-deformazione [12].

Ci sono due fasi durante la trazione: a piccole sollecitazioni, la schiuma si deforma in modo lineare ed elastico a causa della flessione della parete cellulare, simile a quella della compressione. Le pareti cellulari ruotano e si allineano, con conseguente aumento della rigidità. Un ulteriore allungamento provoca un aumento delle deformazioni assiali nelle pareti. La produzione di schiume si traduce spesso in celle con dimensioni principali diverse. Questa anisotropia di forma si traduce in differenti risposte di carico in direzioni diverse, anche se il modello *hyperfoam* non tiene conto di questo tipo di anisotropia iniziale. I meccanismi di deformazione a trazione per piccole deformazioni sono simili ai meccanismi di compressione, ma differiscono per grandi deformazioni (Figura 3.2).

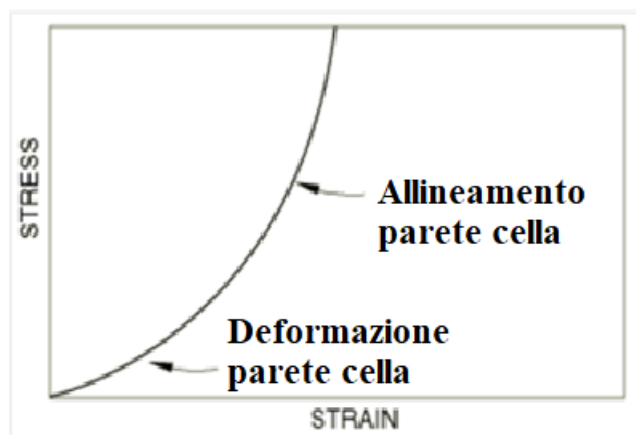


Figura 3.2 - Tipica curva di trazione tensione-deformazione [12].

3.2 Procedura per identificazione dei parametri del modello *hyperfoam*

Per ottenere le caratteristiche del materiale si può ricorrere a due metodi: è possibile scrivere direttamente i parametri del materiale *hyperfoam* oppure andare ad inserire i dati sperimentali in modo da permettere ad Abaqus di calcolare autonomamente i parametri del materiale. Nell'analisi costitutiva di un materiale, l'essere in grado di ricavare i parametri costitutivi risulta di fondamentale importanza, in quanto essi giocano un ruolo chiave nella formulazione

matematica del modello e vanno a caratterizzare le proprietà meccaniche del materiale analizzato.

Una volta definito il modello costitutivo e di conseguenza i parametri in esso presenti, l'identificazione dei parametri ha luogo mediante l'analisi di dati da prove meccaniche sperimentali (analisi inversa). L'unicità dei parametri individuati dipende dalla tipologia di prove sperimentali considerate. La validazione è necessaria per verificare l'effettiva capacità del modello e dei parametri identificati nell'interpretazione del comportamento meccanico del materiale. La funzione costo è costituita da un contributo che presenta la discrepanza tra risultati di modello e dati sperimentali e da termini introdotti per garantire il soddisfacimento di ulteriori requisiti. Per giungere ai sopracitati parametri è necessario svolgere un'analisi inversa delle prove sperimentali che sono state effettuate sul materiale preso in considerazione. La possibilità di sviluppare determinate prove sperimentali e l'interpretazione del comportamento meccanico del materiale hanno condotto ad una determinata complessità del modello hyperfoam, dovuta a una mediazione tra gli aspetti precedenti.

3.3 Generazione modello computazionale

La formulazione costitutiva impiegata per descrivere la risposta meccanica dei materiali, presenta i parametri che sono stati ricavati attraverso prove di trazione e successivamente validati grazie alle prove di indentazione.

3.3.1 Geometria

Nella prova di indentazione sono stati utilizzati campioni costituiti da un singolo strato di sezione quadrata 50x50 mm, ciascun provino presenta uno spessore caratteristico (Tabella 10) ed è soggetto alla sollecitazione di un indentatore con raggio pari al 25% dello spessore del campione fino al raggiungimento di una deformazione massima del 50%. Il modello è composto da due parti, il campione descritto da un parallelepipedo a sezione quadrata e dall'indentatore rappresentato come una sfera di raggio 1 mm.

3.3.2 Materiale

In questa sezione è possibile andare a caratterizzare il comportamento del materiale, definendo diverse caratteristiche generali o le componenti meccaniche che lo contraddistinguono. Ciascun campione è stato descritto tramite la sua densità (Tabella 12), che in questo caso è misurata in tonne/mm^3 , e il comportamento meccanico che lo rappresenta, cioè quello di un *hyperfoam*.

Tabella 12: Densità campioni prove indentazione:

Numero campione	Densità [tonne/mm ³]
1	6.5E-11
2	3.5E-11
3	4E-11
4	6.4E-11
5	9E-11
6	15E-11
7	6E-11
8	14E-11

Per permettere il corretto sviluppo di questo modello sono stati inseriti nel materiale i parametri costitutivi relativi a ciascun campione presenti nella (Tabella 14). Per quanto riguarda l'indentatore, esso possiede un modulo di Young molto basso, pari a 10 MPa e un coefficiente di Poisson uguale a 0.49, in confronto alla schiuma risulta molto più rigido, infatti, nella simulazione è stato considerato come un corpo rigido indeformabile. È stato mantenuto sempre lo stesso indentatore, di conseguenza questi valori saranno costanti per tutte le prove di indentazione.

3.3.3 Mesh e condizioni al contorno

Nella prova di indentazione i campioni sono soggetti a deformazioni fino al 50%, di conseguenza si sta parlando di grandi deformazioni e nello *Step* sarà necessario attivare la non linearità per geometria. Nel caso del modello che simula la compressione il tipo di *Step* è statico, generale con un *time period* pari a 1 e lo spostamento è stato applicato con una velocità di 1%/s. Per quanto riguarda gli incrementi, si è scelto un numero massimo alto in modo da non incorrere in uno stop prima della naturale conclusione dello *Step*, con un incremento iniziale pari a 0.01, con un minimo di 10E-9 e un massimo di 1.

In questa situazione si verifica il contatto tra il campione e l'indentatore; perciò, bisogna descrivere le interazioni che rappresentano il contatto tra le due superfici, dopo aver imposto l'indentatore come superficie *master* e la sezione del campione come superficie *slave*. Il contatto è una proprietà di interazione in cui si può descrivere il comportamento tangenziale, in questo caso è stato posto senza attrito, e il comportamento normale caratterizzato da un'interazione di tipo *hard contact*.

Successivamente sono stati inseriti dei vincoli a incastro sulla faccia opposta a dove è applicato l'indentatore, in modo da fissare il campione e non generare dei moti rigidi; inoltre, è stato imposto all'indentatore uno spostamento in modo da garantire una deformazione *epsilon* pari al 50%. Ciascun campione avendo uno spessore caratteristico, sarà soggetto a spostamenti differenti rispetto agli altri materiali (Figura 3.3).

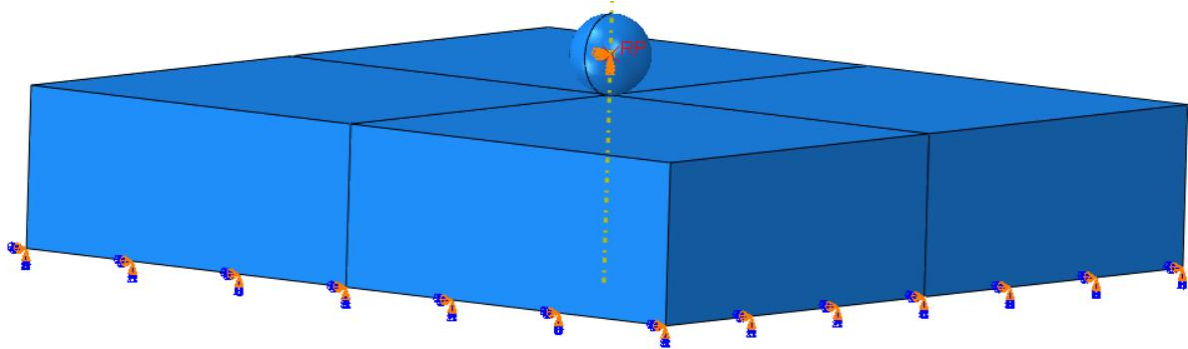


Figura 3.3 – Vincoli e carico imposto nella prova di indentazione.

La *mesh* dell'indentatore è formata da quadrilateri mediante una tecnica libera, la sfera presenta un *seed* globale pari a 0.15 mm che va a discretizzare in maniera appropriata il pezzo. Per quanto riguarda il campione, esso è costituito da elementi esaedrici generati tramite una tecnica strutturata. Il parallelepipedo esibisce un *seed* globale di 0.6 mm che diminuisce andando dal bordo verso il centro del campione fino a un valore di 0.1 mm, per avere una *mesh* più fitta dove c'è il contatto (Figura 3.4).

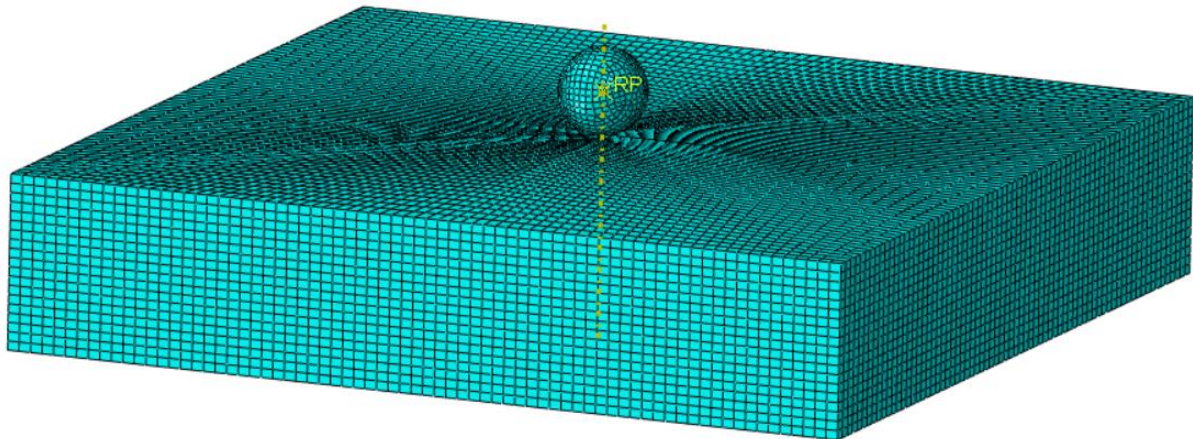


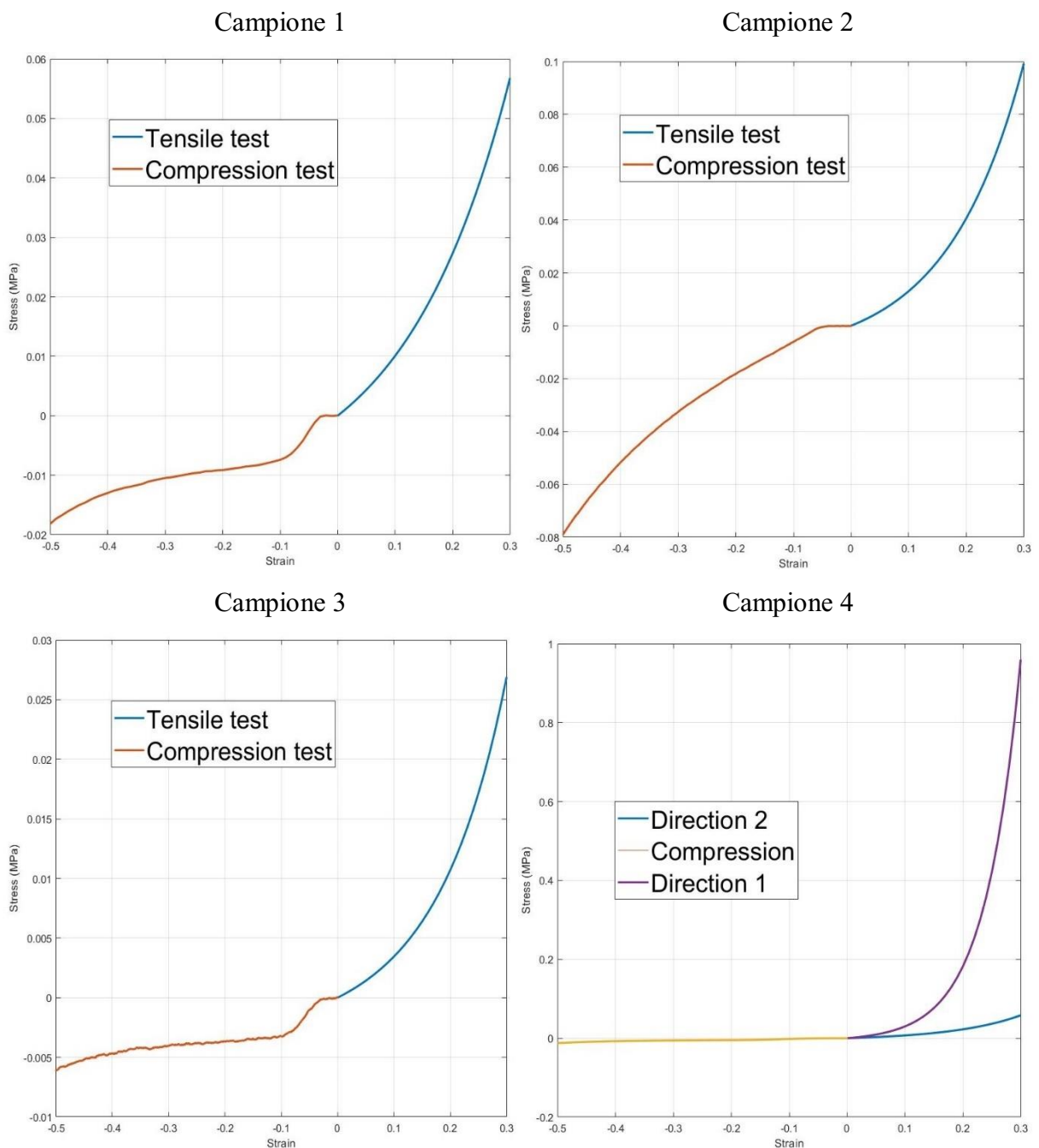
Figura 3.4 – Mesh del campione e dell'indentatore.

CAPITOLO 4

RISULTATI

4.1 Prove sperimentali

Il protocollo di carico della prova a compressione è dato da quattro cicli di carico e scarico, ognuno con una velocità di deformazione dell'1%/s, fino a raggiungere una deformazione del 50%. Per la prova a trazione sono stati utilizzati dei provini a forma di osso di cane che dovevano essere deformati fino al 30%, con una velocità di deformazione dell'1%. Da queste prove è stato possibile ricavare il modulo di Young nel corso dell'intero intervallo (Figura 4.1).



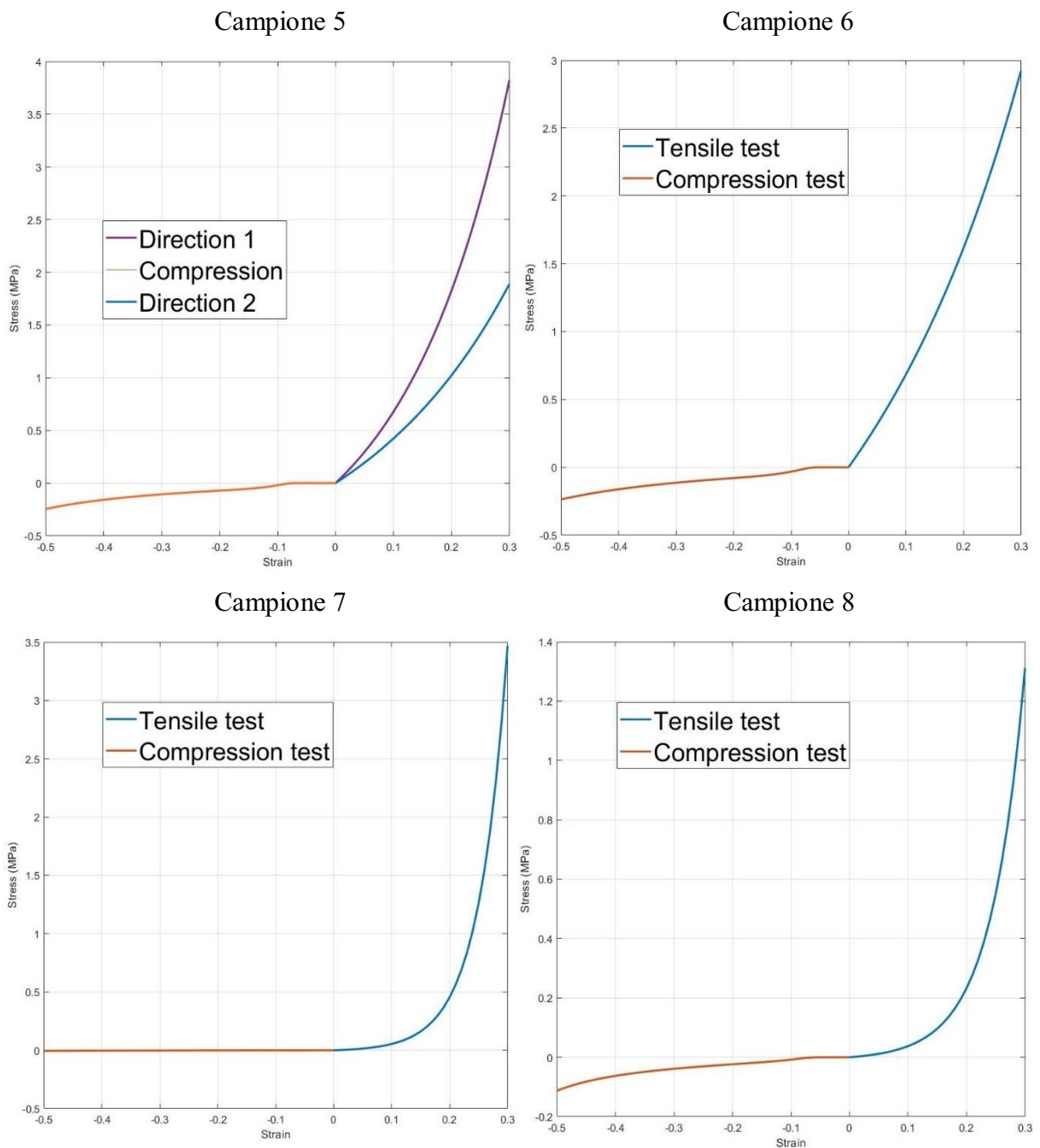
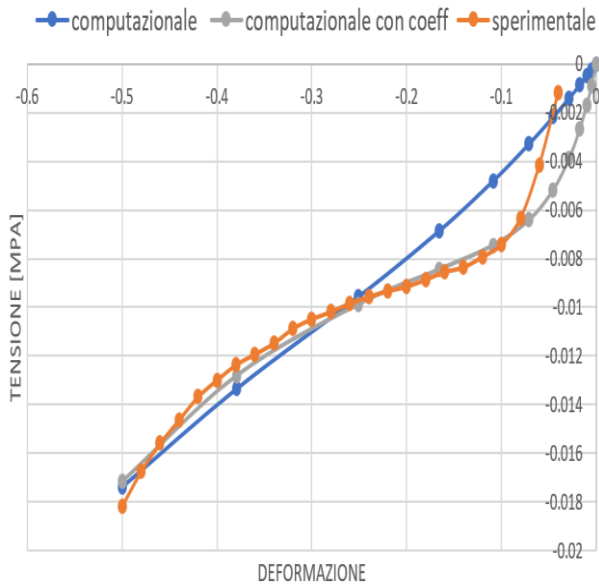


Figura 4.1 – Grafico stress/strain per prove di compressione e trazione.

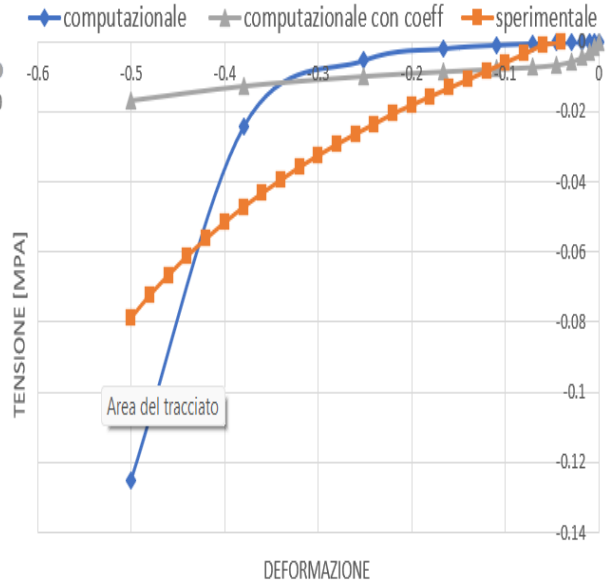
4.2 Confronto tra prove sperimentali ed analisi computazionali

In Abaqus è stata riprodotta la prova di compressione con un campione a sezione quadrata, costituito dalla sovrapposizione di vari strati per garantire un'altezza minima. A questo si sono andati ad aggiungere le caratteristiche dei materiali, le forze e i vincoli presenti che hanno permesso di svolgere un'analisi sul comportamento delle schiume. Nella seguente figura si possono vedere in arancione i dati sperimentali, in blu i risultati computazionali ottenuti inserendo in Abaqus i dati sperimentali di compressione con TestData, mentre in grigio ci sono i risultati computazionali ricavati tramite i coefficienti (Figura 4.2).

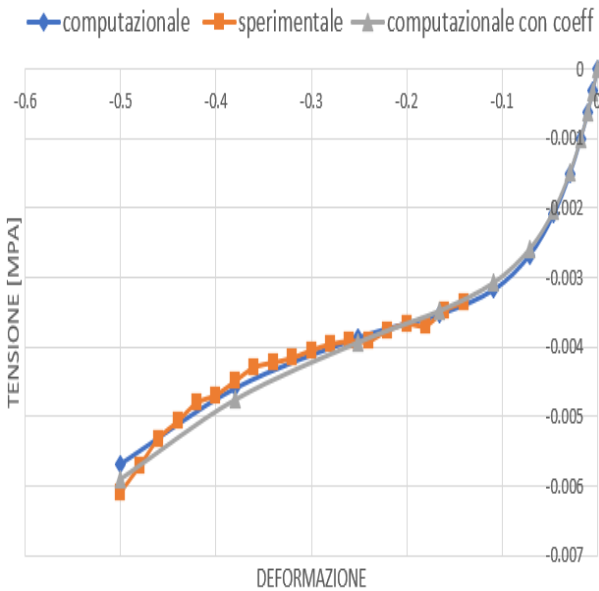
Campione 1



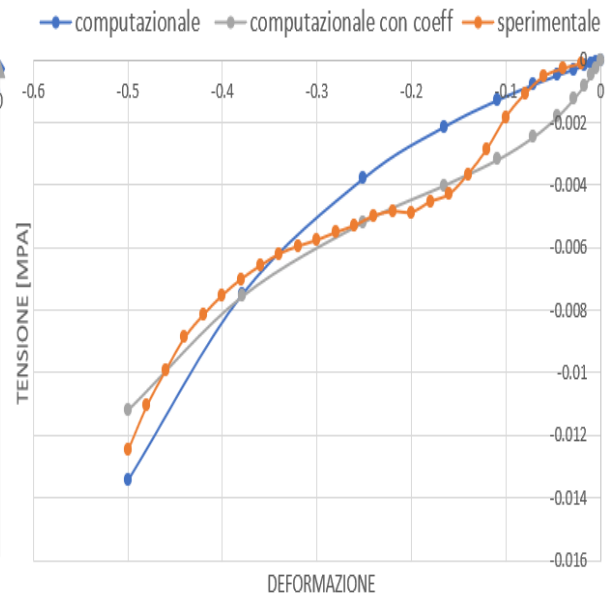
Campione 2



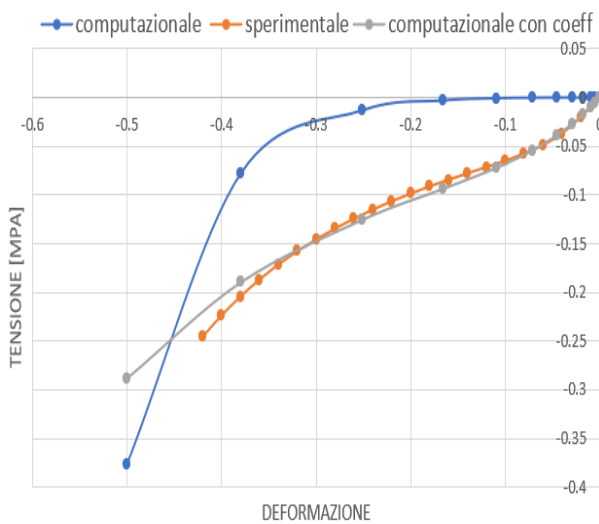
Campione 3



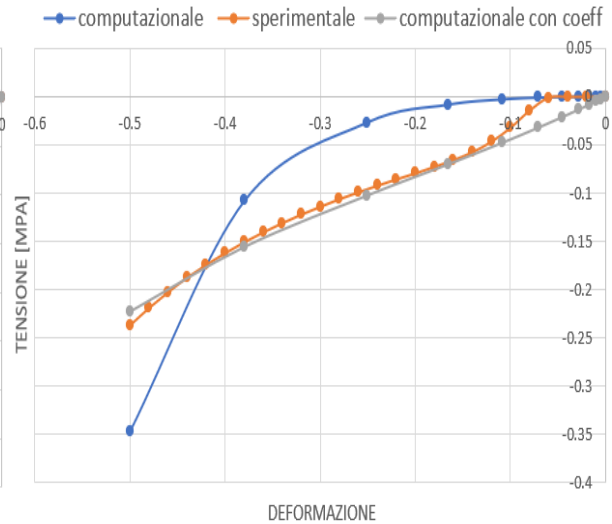
Campione 4



Campione 5



Campione 6



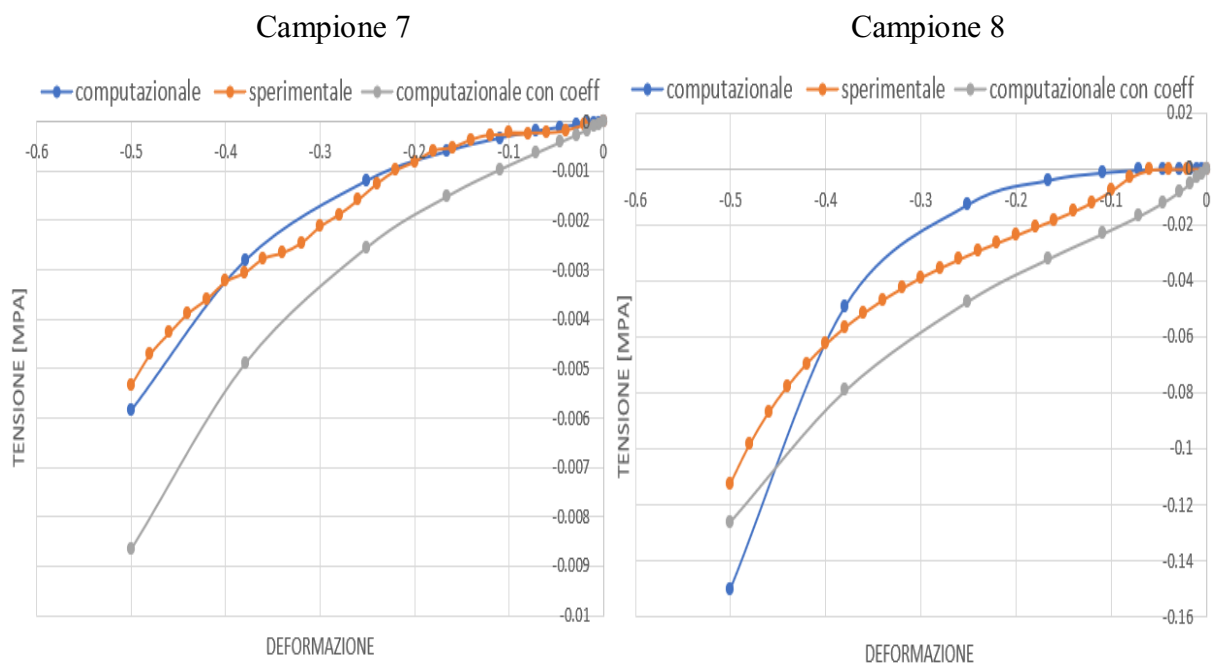


Figura 4.2 – Confronto tra risultati di prove a compressione sperimentali e computazionali.

Tabella 13: RMSE tra curva di compressione sperimentale e computazionale:

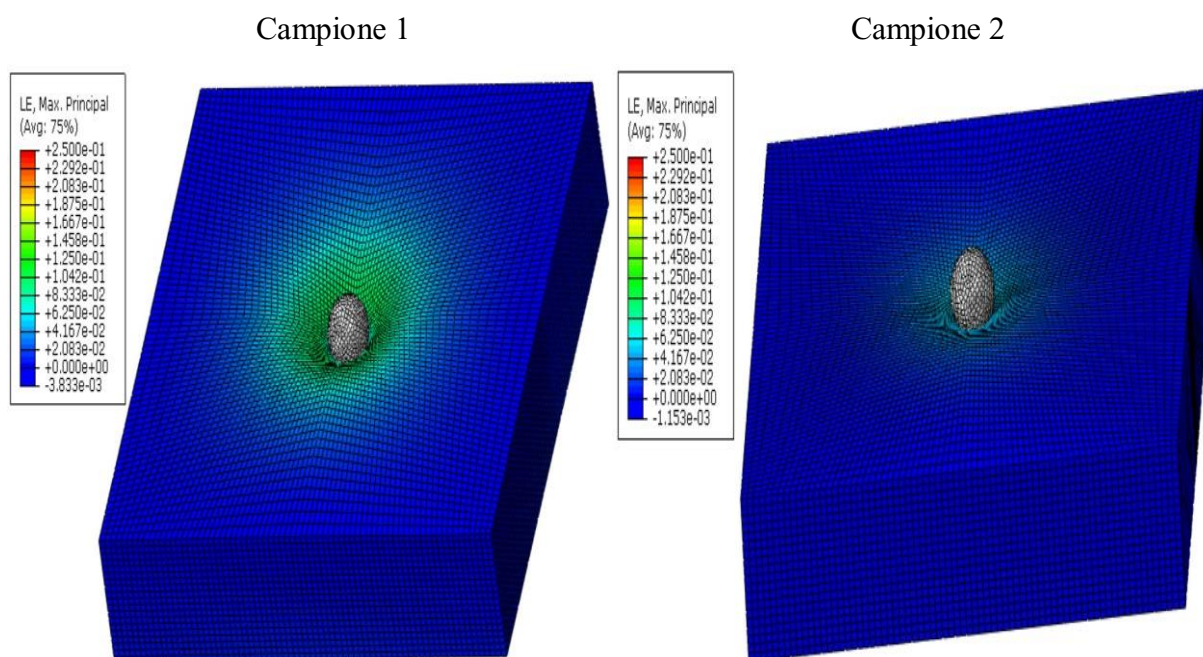
Numero campione	RMSE [MPa]
1	0.0377
2	0.1458
3	0.0139
4	0.022
5	0.4395
6	0.4282
7	0.0088
8	0.2277

I parametri costitutivi sono stati ricavati attraverso leggi matematiche interpretative dei risultati sperimentali tensione-deformazione, grazie ad una minimizzazione della funzione costo. Tale operazione consiste nell'identificare un set di parametri costitutivi che sia capace di interpretare, in maniera termodinamicamente ammissibile e coerente al comportamento meccanico del tessuto, i dati minimizzando la funzione e identificando il minimo assoluto. La minimizzazione è stata possibile mediante specifici algoritmi di ottimizzazione basati sull'accoppiamento di metodi stocastici e deterministici, a causa della complessità delle formulazioni costitutive e dell'andamento multimodale della funzione che rappresentava la discrepanza.

Tabella 14: Parametri costitutivi modello *hyperfoam*:

Campione	μ_1 (MPa)	α_1 (-)	μ_2 (MPa)	α_2 (-)
1	9.30E-02	2.84E+01	1.47E-03	7.24E-05
2	1.91E-01	5.75E+01	1.24E-03	5.20E-05
3	3.38E-02	2.29E+01	1.15E-05	2.35E+02
4	2.42E-02	1.80E+01	2.10E-03	1.57E-04
5	4.82E-01	1.63E+01	6.14E-02	2.10E-03
6	2.14E-01	5.58E+00	2.64E-02	5.23E-02
7	2.14E-03	2.26E+01	2.98E-03	2.75E-04
8	1.27E-01	2.23E+01	4.54E-02	5.93E-01

In Abaqus, oltre alle prove di compressione sono state svolte anche quelle di indentazione. Dopo aver creato la geometria del modello e imposto le proprietà sia dei campioni che dell'indentatore, è stato possibile giungere ai risultati come si può notare nella (Figura 4.3). Per completezza si è andati a confrontare gli esiti appena ottenuti con le curve ricavate dalle prove sperimentali di indentazione precedentemente svolte, generando i grafici di (Figura 4.4).



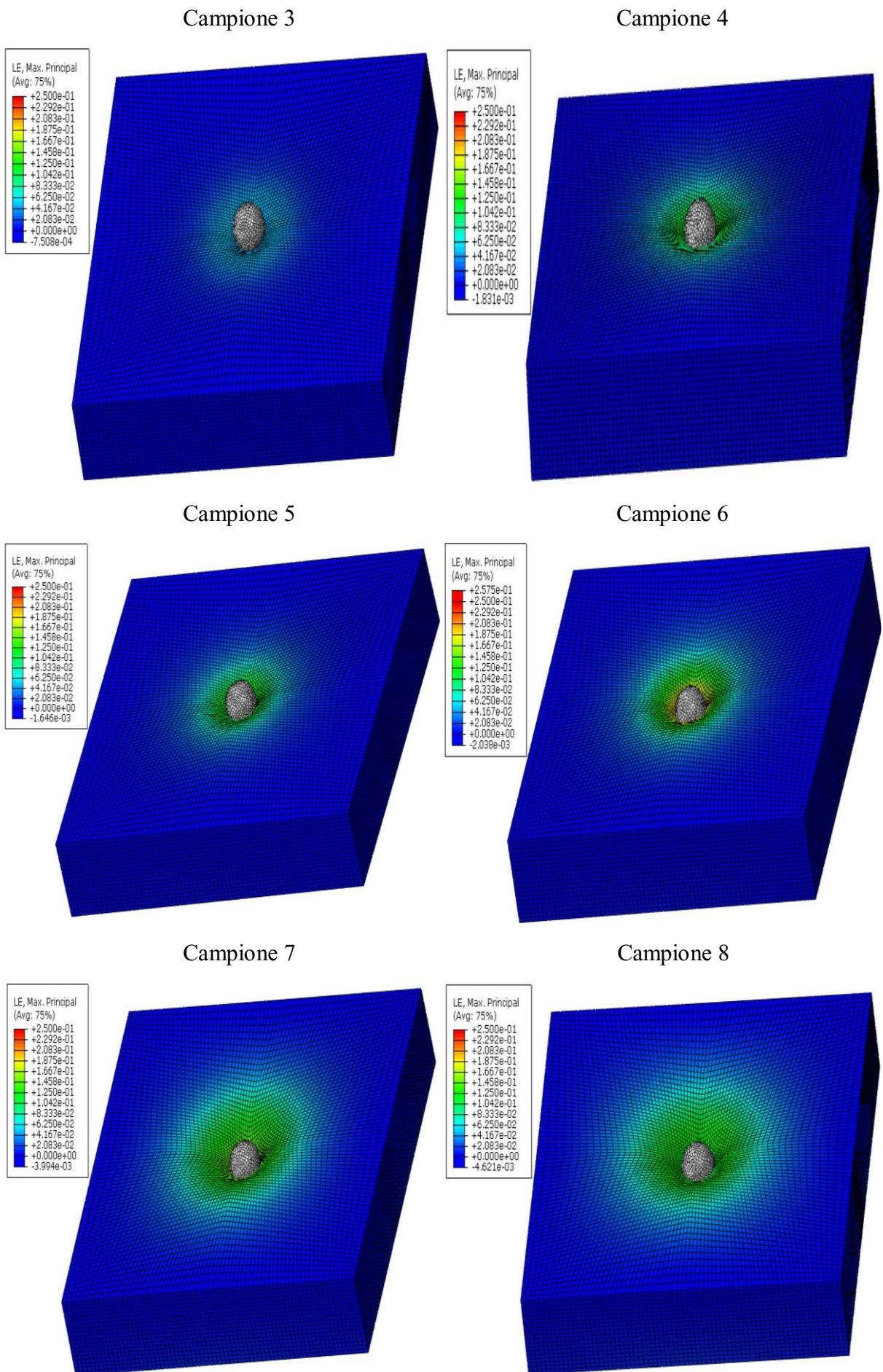
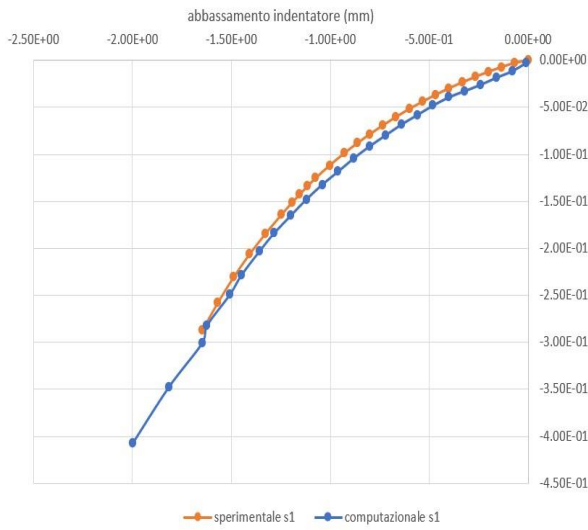
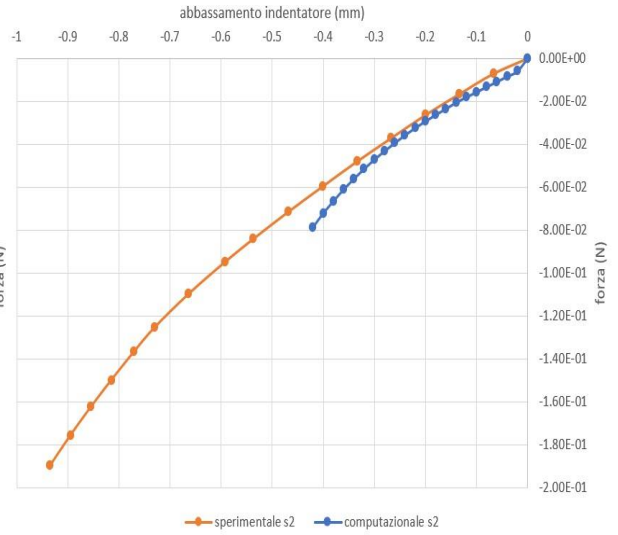


Figura 4.3 – *Contour* delle prove di indentazione.

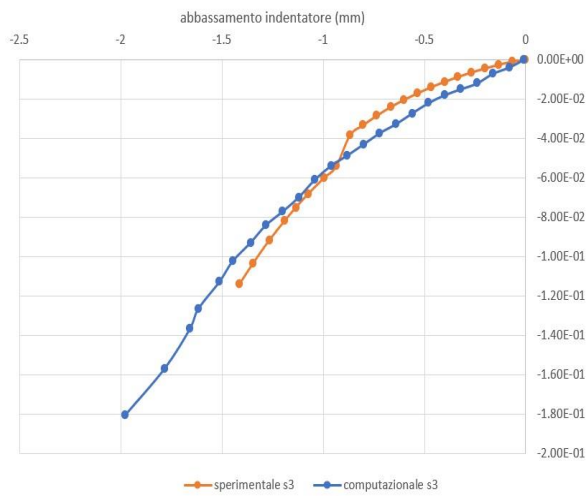
Campione 1



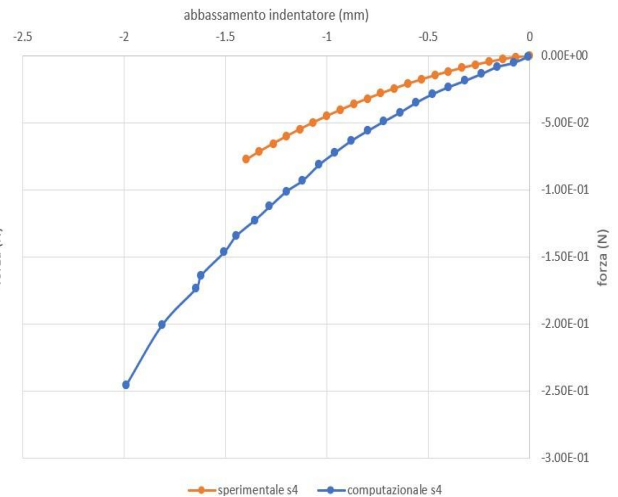
Campione 2



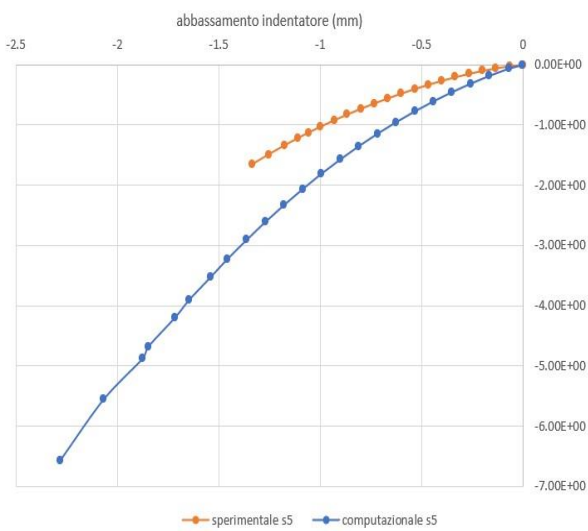
Campione 3



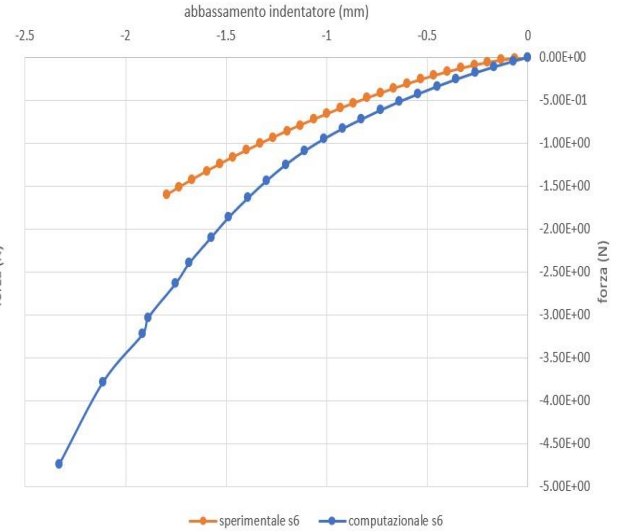
Campione 4



Campione 5



Campione 6



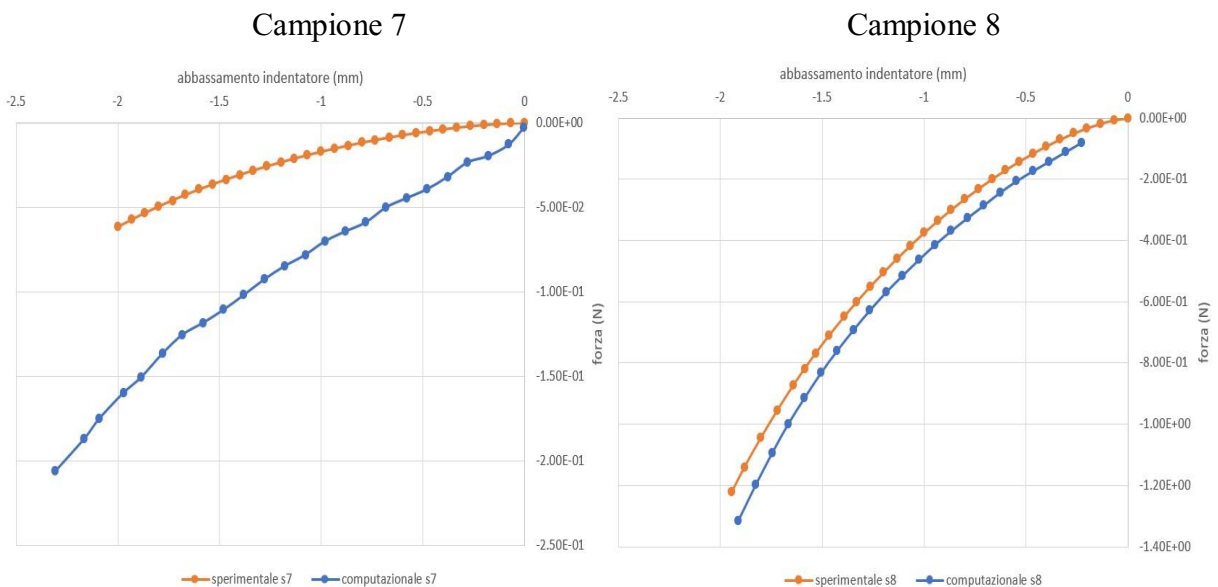


Figura 4.4 – Confronto tra prove di indentazione computazionale e sperimentale.

4.3 Discussione dei risultati

Per quanto riguarda le prove sperimentali, come si può notare dalle figure 4.1, sia nel comportamento a compressione che in quello a trazione, i campioni hanno mostrato un andamento non lineare. In particolare, durante la compressione per tutte le prove si può vedere un iniziale *plateau* fino ad una deformazione del 5%, con una sollecitazione minima si è giunti a un valore importante; tale fenomeno può essere dovuto alla superficie dei campioni che, essendo costituiti di un materiale con un basso modulo di Young, presenta un range elastico molto esteso.

A seguito di questo, la deformazione è cresciuta in modo più lento in corrispondenza dell'aumento della tensione applicata sul centro del campione. Nel caso della prova di trazione, il grafico esibisce un andamento esponenziale con la necessità di tensioni maggiori per raggiungere le deformazioni richieste dal protocollo di carico. Come di consuetudine per materiali che vengono identificati nella categoria *hyperfoam*, a parità di deformazione, la tensione di trazione sarà più grande, in modulo, rispetto alla corrispettiva di compressione.

Nonostante i campioni appartengano tutti alla medesima famiglia di materiali, essi presentano valori tra loro molto diversi dal punto di vista quantitativo. Infatti, a seconda della rigidità dei vari campioni, le diverse prove hanno evidenziato variazioni nelle tensioni per arrivare alle deformazioni desiderate, anche di due ordini di grandezza.

Inoltre, nel caso dei campioni quattro e cinque, dopo aver constatato la presenza di una trama sulla superficie dei pezzi su cui effettuare le prove, è stato necessario svolgere il protocollo di trazione nelle due direzioni. Tale operazione ha messo in luce un comportamento più rigido quando la trama era parallela alla direzione di applicazione del carico (direzione 1), con il conseguente raggiungimento di tensioni più elevate per portare il campione alla deformazione voluta. A differenza del caso in cui la trama si presentava ortogonale rispetto all'applicazione della sollecitazione (direzione 2), dove si sono riscontrate tensioni decisamente minori.

Successivamente è stato effettuato un confronto tra prove sperimentali e computazionali di compressione, in cui in Abaqus sono stati ricreati i vari campioni e le corrispondenti condizioni al contorno. Inizialmente si è deciso di utilizzare i dati sperimentali come valori da inserire in Abaqus, ma in seguito si è notato che tramite l'impiego dei parametri costitutivi presenti nella tabella 14, le curve risultavano molto più simili tra loro.

All'interno dei grafici riportati nelle figure 4.2, si trovano i dati grezzi ottenuti dalle prove sperimentali, l'andamento ricavato attraverso i dati dopo averli inseriti in Abaqus e la curva descritta con l'uso dei parametri. Per evidenziare la discrepanza tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti tramite coefficienti, è stato calcolato il root mean square error (RMSE), come si può notare dalla tabella 13, esso risulta abbastanza contenuto per tutti i campioni a eccezione del quinto e del sesto, dove si trova un valore più importante.

Infine, è stato svolto un confronto tra prove sperimentali e computazionali di indentazione. In questo caso, oltre alla creazione del campione si è creato anche l'indentatore, andando ad aumentare la complessità del modello a causa della necessità di implementare le condizioni riguardanti il contatto tra i due corpi e seguendo il protocollo di carico.

Dalle figure 4.3 si può vedere il *contour* della deformazione logaritmica dei campioni, in quanto sono soggetti a grandi deformazioni. Come da aspettativa, la deformazione si verifica solo nella zona a stretto contatto con l'indentatore, mostrando un andamento decrescente allontanandosi dal centro di applicazione della sollecitazione. Nelle figure 4.4 si nota che grazie all'uso dei parametri costitutivi, le curve computazionali riescono ad approssimare bene quelle sperimentali, attraverso il modello *hyperfoam* che descrive correttamente le caratteristiche dei campioni.

Conclusioni

Questa tesi ha l'obiettivo di andare a valutare il comportamento meccanico di una classe di materiali, in modo da poter avere una visione più ampia e accurata riguardo a questo tipo di componenti, che saranno utilizzati in vari ambiti industriali, tra cui quello d'interesse per questo studio ovvero la progettazione di scarponi da sci. Infatti, tali materiali devono andare a resistere a determinati intervalli di sollecitazione, in condizioni di temperatura molto variabili. Per questi motivi sono state effettuate le prove sperimentali, in modo da conferire una miglior conoscenza per garantire delle prestazioni ben definite in situazioni sportive abituali.

Mediante l'uso di normative e protocolli, sono state effettuate delle prove validate e ripetibili, in grado di fornire una base solida su cui poggiarsi nel caso in cui sorgano delle problematiche di ogni genere. Attraverso lo svolgimento di prove sperimentali in laboratorio è stato possibile ottenere dei dati, che grazie a una manipolazione sono stati impiegati all'interno di software per l'analisi, con lo scopo di ricavare dati utili ad una miglior comprensione del materiale.

Il modello *hyperfoam* utilizzato per descrivere il comportamento dei materiali trattati è isotropo e non lineare, permettendo delle deformazioni elastiche nonostante grandi sollecitazioni. Infatti, l'energia assorbita dalle schiume è maggiore di quella assorbita dai normali materiali elastici rigidi per un certo livello di sollecitazione.

Definito il modello costitutivo con all'interno i parametri, essi vengono identificati mediante l'analisi di dati da prove meccaniche sperimentali (analisi inversa). L'unicità dei parametri individuati è data dalle prove sperimentali svolte.

La validazione viene effettuata per stabilire la capacità del modello e dei relativi parametri all'interpretazione del comportamento meccanico del materiale. I parametri costitutivi sono stati ottenuti attraverso leggi matematiche che descrivono i risultati sperimentali tensione-deformazione, per mezzo di una minimizzazione della funzione costo.

Tale operazione è stata svolta con algoritmi di ottimizzazione basati sul parallelismo di metodi stocastici e deterministici, sfruttando le qualità di ciascuna funzione per giungere all'obiettivo di trovare il minimo assoluto e di conseguenza ridurre la discrepanza.

In conclusione, si può affermare che le prove computazionali, una volta padroneggiati i software e gli aspetti riguardanti la modellazione costitutiva, forniscono uno strumento molto

potente per effettuare dei test su svariate tipologie di materiali, garantendo una semplice ripetibilità attraverso il rispetto di normative e standard universali. Tali prove risultano un metodo di comparazione, o in certi casi addirittura di sostituzione, per le prove sperimentali a patto che la strumentazione utilizzata presenti caratteristiche consone alla situazione che si sta trattando.

Le prove computazionali però, non sono esenti da problematiche, in quanto soprattutto nell'ambito clinico, in condizioni di emergenza, non è sempre possibile aspettare i tempi tecnici necessari per la progettazione e analisi del modello costitutivo, indispensabile per giungere a risultati utili all'utente.

Le prove computazionali prenderanno sempre più piede nel corso degli anni futuri, permettendo di avere uno strumento utile per capire il comportamento di un determinato fenomeno, favorendo una miglior comprensione del problema, così da poter stabilire il miglior procedimento da seguire per giungere all'obiettivo posto, o per confermare e validare quanto svolto già a livello sperimentale.

La caratterizzazione meccanica dei materiali utilizzati nella scarpetta dello scarpone da sci è stata effettuata attraverso la valutazione della risposta meccanica di 8 schiume polimeriche, mediante prove a trazione, compressione e di indentazione; a cui è seguita la definizione di un modello costitutivo Hyperfoam per l'interpretazione della risposta meccanica. Quindi l'identificazione dei parametri costitutivi e la validazione del modello costitutivo e dei parametri costitutivi mediante analisi computazionali. I risultati ottenuti verranno impiegati nello sviluppo di modelli computazionali dello scarpone da sci, al fine di valutare i fenomeni di iterazione tra sci e piede. Le analisi computazionali permettono di studiare problematiche legate alla sovrappressione dei tessuti biologici durante la sciata, come la "gamba fredda", con lo scopo di migliorare il comfort e le prestazioni durante l'attività sportiva.

Bibliografia e sitografia

- [1] T. Sui, E. Salvati, H. Zhang, I.P. Dolbnya, A.M. Korsunsky. Multiscale synchrotron scattering studies of the temperature-dependent changes in the structure and deformation response of a thermoplastic polyurethane elastomer. 2019
- [2] Alaa Arafa Badr, Ashraf El-Nahrawy. Moisture properties of raised 3-thread fleece fabric knitted with different face and fleecy yarns. Alexandria Engineering Journal. 2016
- [3] Katarzyna Bandzierz , Louis Reuvekamp , Jerzy Dryzek , Wilma Dierkes , Anke Blume and Dariusz Bielinski. Influence of Network Structure on Glass Transition Temperature of Elastomers. MDPI Journal. 2016
- [4] <https://robemart.com/blog/fleece-fabric/>
- [5] Martino Colonna, Marco Nicotra, Matteo Moncalero. Materials, designs and standards used in ski-boots for alpine skiing. MPDI Journal Sport. 2013.
- [6] Fausto Panizzolo, Giuseppe Marcolin, Nicola Petrone. Comparative evaluation of two skiing simulator as functional training devices for recreational skiers. Journal of sport science and medicine. 2013.
- [7] C.G. Fontanella, A.Forestiero, E.L. Carniel, A.N. Natali. Analysis of heel pad tissues mechanics at the heel strike in bare and shod conditions. Elsevier. 2012.
- [8] L.A. Pruitt, A.M. Chakravartula. Mechanics of Biomaterials – Fundamental Principles for Implant Design. Cambridge University Press.
- [9] <https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/plastiche/schiume-polimeriche/>
- [10] <https://www.galdabini.it/macchine-prova-universali-materiali/plastica-gomma-compositi>

[11] <https://www.biomomentum.com/mechanical-testers/mach-1-v500c/>

[12] <https://abaqus-docs.mit.edu>