

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria chimica e dei materiali
A.a. 2021/2022



**Politecnico
di Torino**

**Comfort ergonomico di zaini da trekking: introduzione
all'analisi FEM del contatto con la spalla**

Relatori:

Prof.ssa Ada Ferri
Prof.ssa Francesca Dotti
Prof. Nicolò Zampieri

Candidato:

Paolo Pulina

*Se non credi in te stesso,
nessuno lo farà per te*

RINGRAZIAMENTI

La parte più personale e meno oggettiva che un futuro ingegnere possa scrivere è sempre la più difficile, aggiungendo il mio carattere super indiretto ed implicito dovrò sforzarmi il più possibile per cercare di lasciare, sul documento che lo completa, quello che rimane dopo un percorso di questo tipo.

Rimane la consapevolezza di dover individuare nel proprio percorso persone che sappiano condividere, consigliare, riprendere, gioire e supportare e quindi in poche parole vivere insieme e viverti. Le difficoltà evidenziano questa umana necessità dell'altro, che per mia fortuna è arrivata e spero continuerà ad arrivare sempre spontaneamente.

Ecco che quindi è giusto ricordare e dare merito a tutti coloro che mi hanno vissuto nei vari ambiti di questo percorso.

Un Grazie a coloro che hanno permesso di completare questo percorso, in primis alla professoressa Ada Ferri, che ha accettato la mia volontà del progetto e ha assecondato le mie richieste tecniche lasciandomi provare, sbagliare, correggendomi e consigliandomi l'iter da percorrere, ingaggiando il resto del team: a partire dalla dottoressa Eleonora, Ele, e la professoressa Francesca Dotti, Franci, che hanno condiviso le giornate di lavoro, accompagnato e insegnato con leggerezza tutto ciò che era utile per raggiungere i risultati che mi ero posto come obiettivo; infine, un ringraziamento per la parte operativa e fortemente da me voluta, al professor Nicolò Zampieri e al dottore Lorenzo Crosetta, che con le loro idee e competenze hanno aperto la strada verso risultati altrimenti per me difficili da individuare.

Un secondo grande ringraziamento va a coloro che invece mi hanno sopportato e supportato durante questi anni di "intenso" studio ma soprattutto di risate, chiacchierate e ahimè poche serate. Grazie ai futuri dottori Marco, Ale, Matti e Tom per aver condiviso con me questi anni, aver alleggerito il peso dello studio e aver conosciuto parte della mia monotona vita, fatta di basket, basket, basket e forse ancora basket, di avermi fatto assaporare il mondo a me sconosciuto di film e musica, e tanto trash... Non credo che senza il vostro aiuto, le spiegazioni e momenti di svago potessi raggiungere questo risultato, all'inizio tanto lontano e poco sicuro.

Un Grazie enorme va a tutti i miei amici che hanno condiviso con me tutto il resto della vita attorno al mondo dell'università, distraendomi o alleggerendo tutte le preoccupazioni che vagano ancora purtroppo nella mia testa. Chi con una chiacchierata, chi con una festa, chi con una semplice ma altrettanto soddisfacente birra, chi con una riflessione mi ha accompagnato, sostenuto e posso dire vissuto per quello che sono e che continuerò ad essere, sperando di migliorare sempre. Grazie Giova, Albi, Ema, Beja, Borgi, Logiu, Gianca.

Ed ecco arrivare alla personcina più dolente... Un Grazie enorme a te, Giulia, che forse più di nessun'altro mi ha vissuto e conosciuto proprio in tutto questo periodo. Non mi hai mai fatto mancare la tua vicinanza e il tuo supporto assecondando i miei impegni, i miei "grilletti" e ricordandomi quanto stessi già facendo per il mio presente e futuro. Non è la sede adatta per scrivere cose intime e private quindi aimè, con tanto dispiacere, mi dovrò limitare a dire che ma senza i tuoi allenamenti con i bigliettini non sarei riuscito a scrivere queste righe.

Un Grazie va invece a qualcuno che non si può definire ma so che c'è sempre stato come obiettivo e come ancora per la mia salute fisica e mentale, regalandomi tanti momenti di gioia, spensieratezza, svago a fronte di tanti altrettanti pensieri, sacrifici e rinunce. Non so come sei sempre stato lì, forse perché sei sempre risultato forse solo alla mia mente composto, in mezzo a mille impegni, ma mai di troppo e mai di peso e mi hai regalato un mondo di speranze e sogni, sempre lì pronto ad aspettarmi a fine giornata con quella palla arancione, quel campo e quei tanti amati e odiati canestri. La fortuna è quella di avere sempre trovato tanti compagni e amici che condividessero e seguissero con me questa passione.

E infine, un Grazie infinito alla mia famiglia che non ha fatto niente di speciale o meglio non ha fatto passare nulla come speciale, ma bensì come normale per quello che posso oggi considerare per un figlio e per una famiglia, ovviamente quando sarà il momento. Non saprei neanche descrivere questo status perché per me è la quotidianità, ma non è mancato nulla nel percorso in cui mi avete sempre accompagnato, dandomi fiducia, spingendomi a vedere le cose come una possibilità e non un ostacolo insormontabile, facendomi trovare tutto in ordine, al proprio posto per rendere il tutto ancora una volta più normale. La costanza fa la differenza, essendoci tutti i giorni, in qualsiasi caso e in qualsiasi modo, avere cura è diverso da prendersi cura. Grazie a tutti voi “El Paso” & N.

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
1 STATO DELL'ARTE DELLO ZAINO: DESIGN E DISTRIBUZIONE DEL MERCATO.....	3
1.1 CENNI STORICI RELATIVI AL DESIGN DELLO ZAINO	3
1.2 IL MERCATO ECONOMICO DEGLI ZAINI	7
2 COSTRUZIONE DELLO ZAINO MODERNO: MATERIALI E TECNOLOGIE	11
2.1 CARATTERISTICHE TECNICHE E ASPETTI COSTRUTTIVI DEGLI ZAINI	11
2.2 CLASSIFICAZIONE TRADIZIONALE DEGLI ZAINI OUTDOOR.....	11
2.3 COMPONENTI COMUNI NEGLI ZAINI OUTDOOR.....	12
2.3.1 CORPO	12
2.3.2 SPALLACCI.....	13
2.3.3 CINGHIA PETTORALE.....	13
2.3.4 CINTURA LOMBARE	13
2.3.5 CINGHIE DI COMPRESSIONE.....	13
2.3.6 CINGHIE DI BILANCIAMENTO DEL CARICO.....	14
2.3.7 TELAI DI SUPPORTO	14
2.3.8 SCHIENALI RIGIDI	16
2.4 MATERIALI DI COSTRUZIONE DI UNO ZAINO.....	17
2.4.1 TESSUTI.....	17
2.4.2 RIVESTIMENTI WATER RESISTANT O WATERPROOF	23
2.4.3 CUCITURE.....	30
2.4.4 CERNIERE	31
2.4.5 SCHIUME.....	31
2.4.6 RETE.....	40
2.4.7 INNOVAZIONI PER INTERAZIONE UOMO-ZAINO IN TERMINI DI MATERIALI, MESH DEGLI SPALLACCI, ALTRI COMPONENTI.....	41
2.5 COMFORT MECCANICO E TERMOFISICO	45
2.5.2 ZONE SOLLECITATE E STUDI MEDICI.....	46
3 ANALISI FEM O FEA DELLO SPALLACCIO	51
3.1 TIPOLOGIE DI ANALISI FEM	51
3.2 PRINCIPI DELL'ANALISI FEA.....	51
3.3 COME FUNZIONA L'ANALISI FEA	51
3.4 ANALISI FEM NEL SETTORE ZAINI	52
4 DESCRIZIONE DEL PROTOCOLLO SPERIMENTALE	55
4.1 ACQUISIZIONE DATI SPERIMENTALI.....	55
4.2 ACQUISIZIONE E GESTIONE DEL SISTEMA.....	60
4.3 ANALISI FEM.....	61

5	RISULTATI	67
5.1	RISULTATI PROVE SPERIMENTALI.....	67
5.2	RISULTATI DELLA DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA.....	72
5.3	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI FEM.....	75
6	CONCLUSIONI.....	87
	APPENDICE	89
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	101

INTRODUZIONE

Il settore di interesse del lavoro di tesi si pone a cavallo tra diversi rami dell'ingegneria, in quanto l'obiettivo finale di tale lavoro risulta essere l'implementazione di un ambiente FEM, puramente meccanico, per la determinazione delle pressioni indotte sul corpo umano durante l'utilizzo statico di uno zaino da trekking, adottando un approccio di reverse engineering basato sulla digitalizzazione del sistema fisico per mezzo di uno scanner 3D. La finalità di questo primo approccio ricade poi nella possibilità di modificare le condizioni di simulazione FEM, i materiali utilizzati a contatto con il corpo al fine di avere un'indicazione del comfort ergonomico dello zaino che viene progettato.

Grazie alla collaborazione con l'azienda Ferrino & C. S.p.a. è stato utilizzato il modello Mizar 18, in Figura 1, come oggetto di studio e utilizzato per ottenere sia dati sperimentali riguardanti le proprietà meccaniche dell'insieme dei materiali che lo compongono, sia per test di valutazione del contatto con il corpo umano, rappresentato da un manichino standard commerciale. Questa scelta è stata fatta in modo da semplificare la trattazione del contatto, omettendo perciò l'influenza della reale deformazione dei tessuti molli del corpo e l'interazione con il vestiario normalmente indossato dall'utilizzatore.



Figura 1: Zaino Ferrino Mizar 18¹

Il lavoro di tesi, pertanto, è definito in due sezioni principali: la prima legata alla digitalizzazione e gestione delle geometrie degli elementi in contatto e alla misurazione di alcuni dati sperimentali di contatto che poi sono stati utilizzati nella seconda fase di simulazione FEM al fine di ottenere un modello FEM che potesse replicare la situazione reale e verificare i risultati sperimentali acquisiti.

La prima parte del lavoro è stata svolta principalmente nei laboratori del Politecnico di Torino nella sede di Biella, nei quali sono state acquisite le geometrie dello spallaccio e del manichino con lo scanner 3D Artec EvaLite e gestite con l'utilizzo di software CAD come Rhinoceros7 e Ansys SpaceClaim 2020, valutati i punti e l'entità delle

pressioni di contatto con gli strumenti Picopress e Boditrak2 Pro, mentre sono stati condotti nella sede di Torino, nei laboratori del dipartimento DIMEAS, i test di trazione dello spallaccio e di indentazione trasversale. Le simulazioni FEM sono state condotte con l'utilizzo di Ansys Workbench 2020 R2, con il supporto del team del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'università di Bologna.

Per raggiungere l'obiettivo prefissato sono state seguite due vie analoghe, ma con l'utilizzo di geometrie dello spallaccio ottenute con diverso approccio: il primo è stato la scannerizzazione 3D mentre il secondo, più tradizionale, è stato condotto con la creazione di un file 3D a partire da un design 2D fornito dall'azienda Ferrino &C S.P.A. perciò è stato possibile anche effettuare una valutazione sull'efficacia del processo di reverse engineering in termini di complessità di gestione dei file, gestione delle simulazioni FEM e differenza di risultati ottenibili. In tali termini, perciò, è stato verificato che la geometria derivante dalla scannerizzazione risulta complessa da gestire sia per l'importazione nell'ambiente FEM sia per la gestione delle simulazioni stesse a causa della complessità dei dettagli acquisiti.

La verifica del contatto è stata invece valutata facendo riferimento a studi scientifici presenti in letteratura, seppur non confrontabili in modo preciso con il sistema in esame per la mancanza di un protocollo normato unico: per tale considerazione è stato valutato che le zone di maggiore pressione esercitata dallo zaino, individuate come la zona tra spalle e clavicola e pettorale, siano in linea con i dati in letteratura.

Il lavoro di seguito presentato si compone di 3 sezioni principali:

la prima relativa alle motivazioni di tale progetto con la discussione dello stato dell'arte del prodotto "zaino" e degli studi scientifici relativi al comfort ergonomico e ad alcuni problemi fisici comuni rilevati durante l'utilizzo di esso; infine viene mostrata una breve introduzione al metodo dell'analisi FEM, fulcro del progetto. Pertanto, nel primo capitolo viene presentata una panoramica relativa all'evoluzione del design e dei materiali utilizzati per gli zaini, dai primi prototipi di laboratorio fino ai modelli attualmente sul mercato e una panoramica sullo sviluppo economico che questo prodotto ha avuto negli ultimi decenni e avrà nel più prossimo futuro.

Nel secondo capitolo viene presentata una panoramica tecnica degli zaini outdoor da trekking, trattando materiali e tecnologie per le varie parti che li costituiscono e alcune innovazioni tecniche che vengono studiate o già attualmente brevettate e utilizzate nei prodotti commerciali.

Nella seconda parte di questo capitolo vengono anche trattati gli aspetti relativi al comfort ergonomico, riportando studi scientifici sull'effetto dello zaino durante l'attività sportiva sia dal punto di vista biomeccanico sia per i relativi problemi riscontrati e nuove soluzioni tecniche atte a migliorare il comfort dell'utilizzatore.

Infine, vengono presentati i concetti dell'analisi FEM, fulcro dell'analisi sperimentale condotta e le ricerche scientifiche già pubblicate che trattano il sistema corpo-zaino oggetto della tesi.

Nella sezione centrale del lavoro, composta dai capitoli 4 e 5 viene presentata la parte sperimentale del progetto con la discussione del metodo utilizzato per lo svolgimento, indicando e descrivendo gli step effettuati e gli strumenti utilizzati. Il capitolo si compone quindi nella prima parte dell'acquisizione dei dati sperimentali e nella seconda delle simulazioni FEM.

L'ultima parte riporta nel capitolo 5 i risultati ottenuti e sono presentate le modifiche degli step del progetto inizialmente ideati al fine di poter spiegare alcuni problemi riscontrati o per perseguire altre vie indotte da risultati inattesi. Infine, nel capitolo 6 vengono riassunti i principali risultati posti come obiettivo iniziale e messi in relazione con quelli prodotti da lavori intermedi o esterni alle analisi principali.

1 STATO DELL'ARTE DELLO ZAINO: DESIGN E DISTRIBUZIONE DEL MERCATO

1.1 CENNI STORICI RELATIVI AL DESIGN DELLO ZAINO

Lo zaino è oggi uno degli strumenti personali più utilizzato per il trasporto di oggetti di piccole-medie dimensioni. Tale dispositivo è lo stadio più evoluto dei numerosi sistemi di trasporto personale inventati nel corso dei secoli e ancora utilizzati per assecondare nel miglior modo possibile la conformazione tipica e l'entità dei carichi da trasportare in relazione alla morfologia del territorio interessato sulla base delle conoscenze possedute nelle varie aree geografiche. Nella società moderna anche tale strumento ha subito e continuerà ad essere oggetto di modifiche e adattamenti per soddisfare sempre più le diverse esigenze di ogni settore ed utilizzatore.

I metodi di trasporto del carico si sono evoluti nel corso della storia per adattarsi a diversi tipi di carichi, forme, economie e aree geografiche. Dai facchini in Nepal alle donne del centro Africa fino ai soldati dell'esercito americano, l'uomo ha sempre cercato di sviluppare i metodi più efficaci per il trasporto di carichi pesanti che potessero aiutarlo nelle attività quotidiane.

Ad esempio, a causa della complessa morfologia del territorio, in Nepal si è sempre dovuto fare affidamento sulla forza umana come mezzo principale di trasporto del carico. Infatti, quella del facchino è una professione popolare sia per gli uomini che per le donne in tutto il Nepal. A seconda degli ambienti si utilizzano metodi per il trasporto di carichi pesanti. I più comuni utilizzati per la movimentazione del carico nelle diverse aree del Nepal, sono quattro: sopra la testa, tramite carretto, con cesti appesi sulle spalle e sul dorso mediante un arco, come viene riportato in Figura 2.²

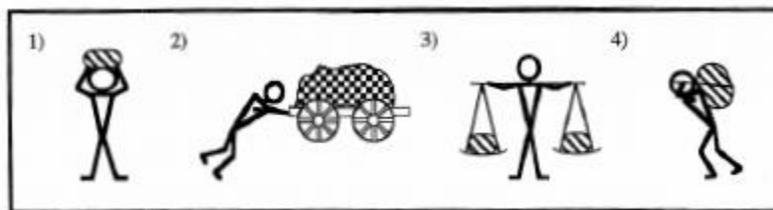


Figura 2: Illustrazione dei quattro metodi di trasporto più comuni in Nepal 1. Parte superiore della testa 2. carrello a mano 3. Giogo (tokma) 4. tumpline o namlo²

L'uso del tumpline o namlo, ovvero l'imbragatura con cinturino che collega la fronte a un cesto, o doko, che è sostenuto dalla schiena e si appoggia su un bastone a forma di T chiamato tokma, è il più tipico maggiormente impiegato nelle regioni montuose.

Un altro metodo molto comune e diffuso è quello utilizzato in molte regioni dell'Africa composto da un supporto per la testa per bilanciare il carico. Infatti, una tecnica prevalentemente femminile implica il posizionamento del carico in equilibrio sul capo. Una modifica a questa tecnica consiste nell'uso di una cinghia sulla fronte per trasportare carichi più voluminosi. Uno dei più grandi misteri del caricamento della testa è la capacità di queste donne di trasportare carichi pesanti senza rilevare un aumento del tasso di energia consumata.

Ancora oggi alcuni metodi tradizionali sono largamente utilizzati in alcune aree del mondo meno sviluppate, la tecnica nepalese della cesta assicurata con fibbie tessili attorno al capo, per esempio, viene tutt'oggi utilizzata in alcune spedizioni alpinistiche, come mostra la Figura 3.



Figura 3: Sherpa con il caratteristico sistema di trasporto nepalese tumpline²

Volendo fare un excursus storico nell'epoca moderna dello zaino è possibile considerare come suo antenato più prossimo il cosiddetto knapsack. Ripercorrendo la storia e l'evoluzione dell'uomo è possibile identificare dei sistemi di trasporto assimilabili ad uno zaino già nell'era preistorica a seguito del ritrovamento di alcuni accessori contenuti in una sorta di marsupio in pelle dei resti di Otzi risalenti al 3100-3300 a.C.³

Di seguito si riportano gli sviluppi storici più rilevanti che hanno portato alla definizione dei parametri costruttivi tipici dei moderni zaini

1878: Merriam knapsack

Si trattava di uno zaino semplice con spallacci, ma privo di qualsiasi struttura. Henry Merriam presentò un brevetto nel 1877 (concesso solo l'anno seguente) per l'esercito statunitense che utilizzava lamiera per separare la borsa dal corpo dell'utilizzatore. Secondo Merriam⁴ il brevetto avrebbe compattato i diversi oggetti in un unico prodotto, diminuito il peso da trasportare e, allo stesso tempo, assicurato una disposizione più uniforme senza numerosi fissaggi e cinghie esterne. Il prototipo, mostrato in Figura 4 non venne poi utilizzato perché considerato eccessivamente scomodo.

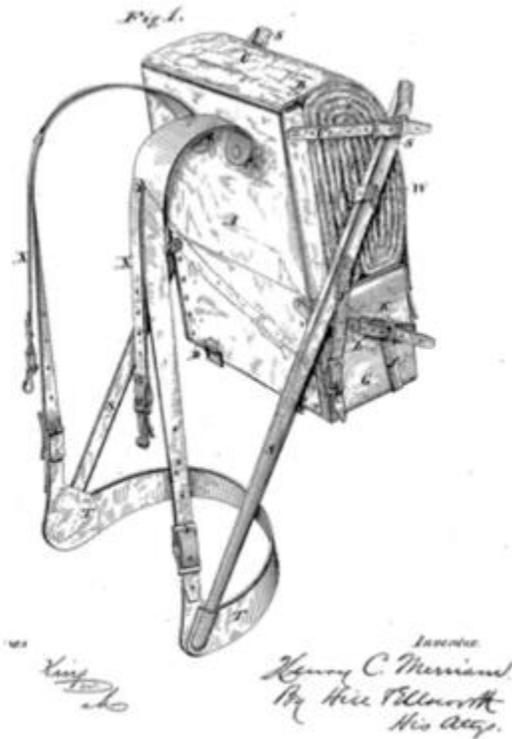


Figura 4: Knapsack⁵

1882: Duluth

Camille Poirier di Duluth si fece avanti nel 1882⁴ per provare qualcosa di diverso che si adattasse alle escursioni in canoa di forma rettangolare che potesse essere posizionato sul fondo della canoa per stabilizzarla durante la navigazione. Questa soluzione presentava una larghezza solitamente maggiore degli zaini più tradizionali e anche una fascia per la testa (tumpline) per il bilanciamento

1904: Prima testimonianza dell'uso della parola “backpack”

1908: Zaino Bergans of Norway

Ole F. Bergan decise di combinare la tradizionale struttura in legno norvegese con il materiale morbido di un sacco. L'idea era quella di sostituire la betulla precedentemente utilizzata con un tubolare d'acciaio leggero che seguisse la forma del dorso. La sua proposta resistette sul mercato per 25 anni, durante i quali i suoi zaini viaggiarono in tutto il mondo.

1924: Trapper Nelson Pack

Si trattò del primo zaino con telaio esterno prodotto in serie.

Nelson riprodusse gli zaini in legno e pelle di foca realizzati dagli Inuit che vide per la prima volta durante una visita in Alaska nel 1920. Il design rivoluzionario di questo zaino prevedeva un telaio stabilizzante in legno con fasce di tela che avevano lo scopo di ammortizzare il carico, una borsa di tela era fissata al telaio di legno con perni in acciaio in modo che potesse essere facilmente rimossa da chi lo indossasse. Il prototipo rimase popolare per anni.

1938: zaino con cerniera Cunningham

Fino al 1938 cinturini e fibbie erano comuni per i sistemi di chiusura degli zaini. Gerry Cunningham creò uno zaino con due sezioni con cerniera. È stato in grado di ottenere una maggiore leggerezza del carico essendo pensato essenzialmente per l'arrampicata su roccia.

1950: Fjällräven

Nel 1950, Åke Nordin, il fondatore di Fjällräven®, creò una struttura in legno, che avrebbe tenuto il carico alto e vicino alla sua schiena, alla quale fosse fissata una borsa tramite cinture in cuoio. Questo prototipo fu ciò che ispirò Nordin a fondare la sua ancora affermata azienda.

1952: Zaino Kelty

Dick e Nena Kelty iniziarono a creare zaini con struttura esterna in alluminio aeronautico, spallacci imbottiti, cinture in vita segnando così il passaggio all'era moderna, impattando fortemente sul settore ed impiegando tessuti tecnici derivanti dalla costruzione dei paracadute del tempo, come il nylon. Si trattò dei primi zaini moderni sebbene la cintura non trasferisse il carico dello zaino sui fianchi.

1967: telaio interno Lowe

Greg Lowe, fondatore di Lowepro®, creò il primo zaino con telaio interno.

Gli zaini senza telaio erano troppo piccoli per trasportare grandi carichi e gli zaini con telaio esterno erano troppo sbilanciati su terreni impervi. Questo zaino aveva un telaio abbastanza rigido da trasferire il carico alla cintura, ma abbastanza flessibile da adattarsi alla forma del corpo di chi lo indossava. Lowe aggiunse una cinghia sullo sterno e cinghie di compressione laterali, rendendolo più simile a quelli attuali.

1970: cintura in vita a sgancio rapido Kelty

L'azienda dal 1952 continuò ad innovare nel design degli zaini producendo nel 1970 la prima fibbia per cintura in vita a sgancio rapido, era realizzata in acciaio inossidabile e questa atto a fissare saldamente lo zaino intorno alla vita. Questo sviluppo consentì di trasferire il peso dello zaino sui fianchi, una caratteristica degli zaini moderni.

1979: Lowe Alpine® First Women's Pack

Nel 1979, Lowe Alpine® iniziò a rendere i suoi grandi zaini regolabili per corporature più esili adattandoli anche ad un fruitore femminile. Nel 1981 con la linea "Nanda Devi Series" vennero offerti per la prima volta degli zaini progettati per il mondo femminile. Nel corso del 1980 l'azienda è stata la prima ad introdurre il concetto di design ergonomico per gli spallacci.⁶

1984: Deuter Aircomfort®

Al fine di evitare le sempre più impattanti problematiche legate alla sudorazione degli zaini tradizionali, Deuter® brevettò nel 1984 l'idea di un supporto in rete⁷. La rete permetteva di creare uno spazio ventilato tra la schiena e lo zaino, consentendo il flusso d'aria e riducendo la sudorazione aumentando il comfort termico degli escursionisti.

1989: Zaino idratazione CamelBak®

Nel 1989 il paramedico Micheal Eidson attrezzò un prototipo con una sacca per flebo e una cannucchia chirurgica. Il sistema era alloggiato in una calza a tubo cucita alla sua maglia.⁸

1998: Zaino GoLite® Breeze

Demetri e Kim Coupounas svilupparono il primo zaino in Dyneema®, il Breeze, leggero e super resistente. L'innovazione apportata da questo zaino segnò un cambiamento nell'industria dell'outdoor che iniziò a utilizzare materiali più leggeri e performanti.

2005: Tecnologia Osprey® Custom Moulding Hipbelt

Osprey nel 2005 trasformò il mercato proponendo prodotti che consentivano, di modellare le cinture in base alla specifica anatomia dei singoli clienti per una vestibilità più confortevole e personalizzata.

Nello stesso anno venne anche presentato il sistema “Protector Integrator”, definito come il primo sistema di schienale rigido protettivo per la colonna vertebrale.

2013/2014: Active Lift system e Active Zone system

In due anni consecutivi l'azienda LowePro® presentò due tecnologie simili che garantiscono una migliore distribuzione dei punti di contatto con la schiena al fine di aumentare il comfort dell'utente.

Nel corso dell'ultimo decennio è difficile individuare innovazioni sostanziali nella struttura degli zaini outdoor in quanto la struttura dello schienale e dello spallaccio è ormai definita.

Le più recenti innovazioni si osservano nei materiali sempre più leggeri e performanti, nelle regolazioni possibili e nelle tecnologie degli elementi di contatto utilizzate, in modo da migliorare il comfort dell'utente. Le innovazioni che verranno riportate nel capitolo seguente infatti riguardano sistemi innovativi di regolazione, design di schienali, formatura di elementi di contatto che amplifichino il comfort termofisico e tecnologie di produzione innovative per materiali di contatto come stampa 3D e processi di nucleazione controllata per garantire proprietà più omogenee. Inoltre, le richieste sempre più specifiche di ogni settore sportivo inducono le aziende a proporre zaini sempre più personalizzati per ogni disciplina, con accessori e tecnologie ad hoc.

1.2 IL MERCATO ECONOMICO DEGLI ZAINI

Il mercato globale degli zaini nel 2022 viene valutato in circa 23 milioni di dollari, di cui il continente di maggior interesse è l'Europa, seguita da Cina, Nord America, Asia pacifica (APAC) e l'area denominata “Rest of World” (ROW) come mostrato in Figura 5.

Complessivamente il mercato globale ha riportato una crescita delle vendite definita dal parametro di “Compounded Average Growth Rate (CAGR) globale del 8,1% tra il 2013 e il 2018, ma i mercati che maggiormente hanno influenzato questa espansione sono quelli di ROW e quello asiatico con tassi di crescita rispettivamente del 13,3 % e 11,5% come mostrato nella “Figura 7”.

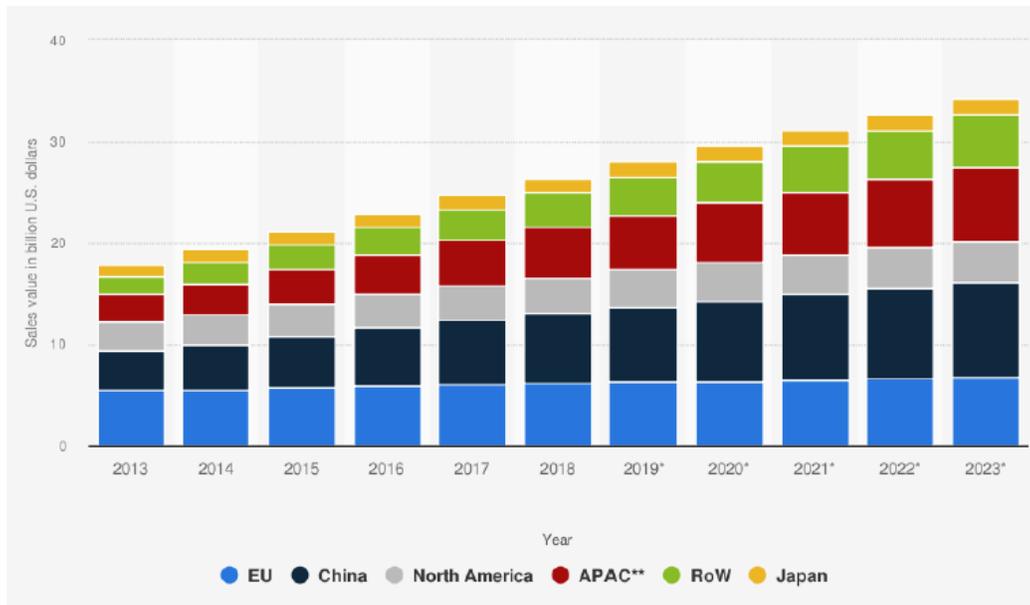


Figura 5: Valore delle vendite del mercato globale degli zaini dal 2013 al 2023, per regione (in miliardi di dollari USA)⁹

La prospettiva di incremento del mercato mondiale prevista per il 2027 è già stata quasi raggiunta nel 2022 come riportato nella Figura 5 dove si dimostra come il trend crescente sia stato e risulterà lineare e costante anche nei prossimi anni.

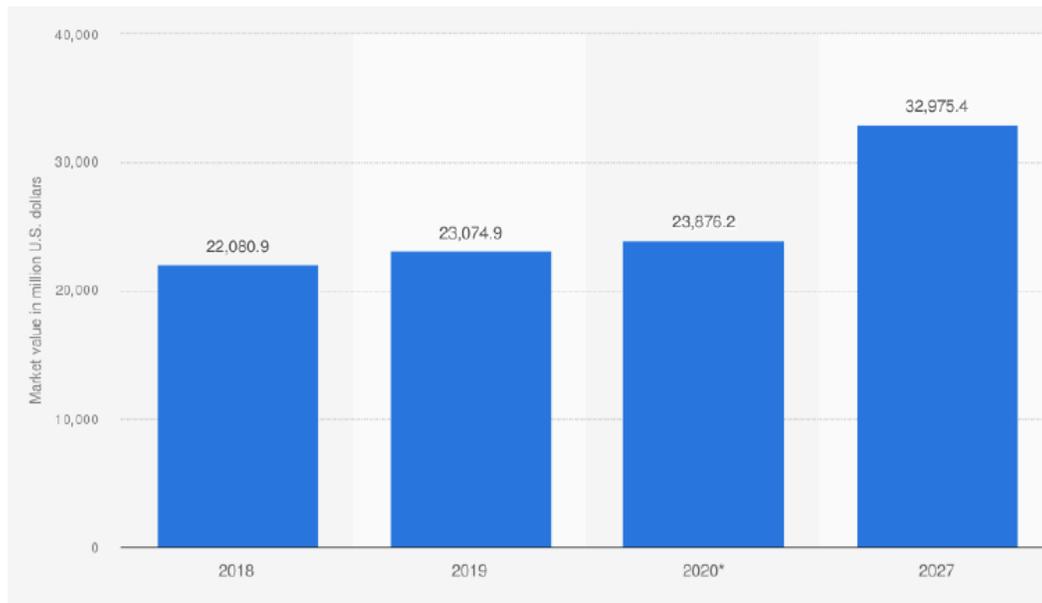


Figura 6: Valore del mercato globale dello zaino dal 2018 al 2020, con una previsione per il 2027 (in milioni di dollari USA)¹⁰

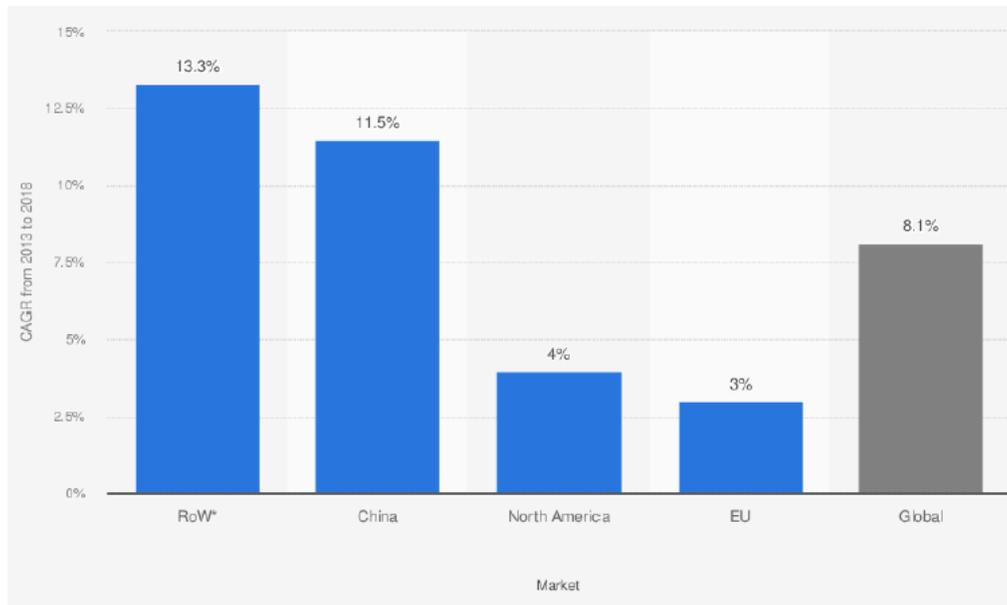


Figura 7: Tasso di crescita annuale composto (CAGR) delle vendite al dettaglio del mercato globale degli zaini in tutto il mondo tra il 2013 e il 2018, per mercato selezionato¹¹

Per quanto riguarda il fatturato del settore dell'outdoor a livello europeo, quello relativo allo zaino è confrontabile con quello di tutti gli accessori e segue quello dell'abbigliamento e delle calzature, ma il numero di beni venduti risulta essere al di sotto della metà rispetto alla categoria degli accessori. ("Figura 8 e Figura 9").

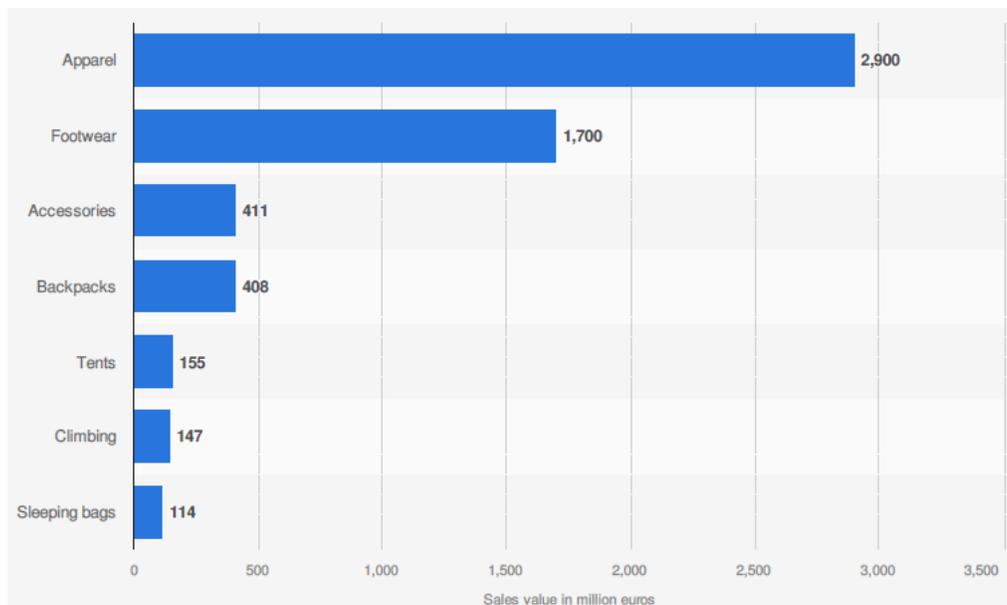


Figura 8: Valore del mercato degli articoli sportivi outdoor in Europa nel 2019, per categoria (in milioni di euro)¹²

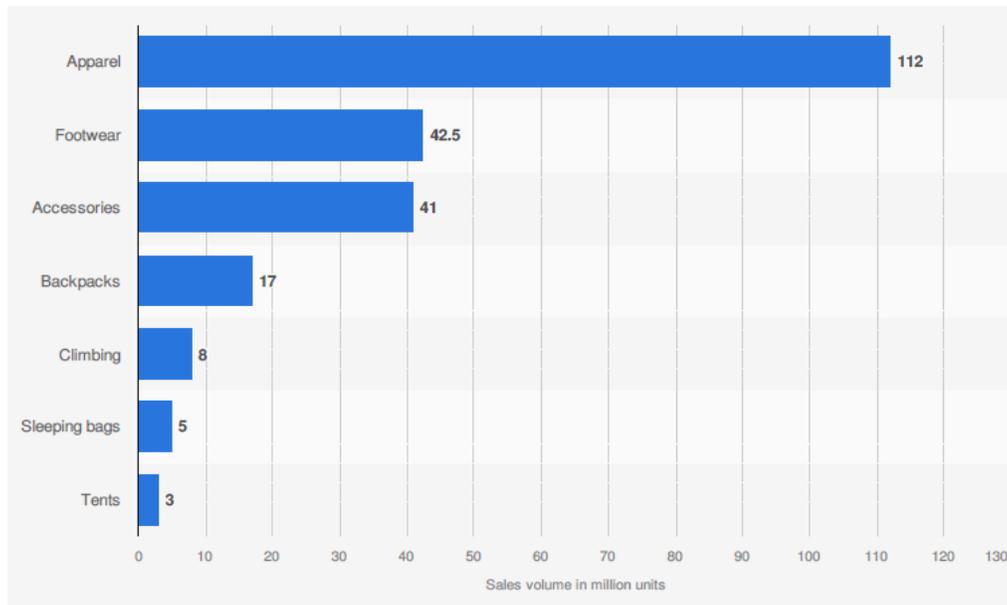


Figura 9: Vendite unitarie di articoli sportivi outdoor in Europa nel 2019, per categoria (in milioni di unità)¹³

La continua espansione di questo settore comporta un interesse sempre crescente per le aziende al fine di incrementare la propria vendita con nuovi prodotti sempre più accattivanti e tecnicamente superiori alla concorrenza. Con lo scopo di progettare prodotti sempre più performanti, la costruzione degli zaini ha alla base attività di ricerca ingegneristica incentrate sull'ottimizzazione del design e dei materiali per cercare di incrementare il comfort e ridurre al minimo l'abbassamento della performance dell'utilizzatore indotta dal carico da trasportare. A tal fine è spesso opportuno avere una correlazione tra evidenze mediche e approcci meccanici per la definizione della miglior configurazione per l'incremento dell'ergonomia e il mantenimento corretto della postura senza quindi andare incontro a scompensi o aumenti dello stress nelle zone di maggior apporto del carico.

2 COSTRUZIONE DELLO ZAINO MODERNO: MATERIALI E TECNOLOGIE

2.1 CARATTERISTICHE TECNICHE E ASPETTI COSTRUTTIVI DEGLI ZAINI

I tradizionali metodi di trasporto personale delle varie aree geografiche, riportati nel capitolo introduttivo, utilizzavano materiali naturali disponibili a livello locale. Oggi la richiesta di leggerezza, resistenza, performance e design abbinata alle sempre più aggiornate tecnologie di lavorazione ha fatto sì che si producano zaini molto diversi, con diversi materiali e tecnologie di impiego e fabbricazione.

Il focus principale della progettazione è quello di offrire una sempre migliore interazione zaino-soggetto, assecondando le diversità morfologiche dei clienti e le richieste delle varie discipline: infatti, la domanda di questo prodotto deriva da numerosi settori come scuola e lavoro, turismo, outdoor, ma soprattutto dalle singole discipline che richiedono prodotti sempre più specifici e diversi, per soddisfare le varie e complesse esigenze degli atleti. Considerando solamente quello che viene definito “backpack” si possono però individuare alcune caratteristiche peculiari sulle quali è possibile effettuare una classificazione. La differenza principale negli zaini sportivi deriva dalla forma degli stessi. Infatti, alcune discipline con maggior dinamismo richiedono zaini più compatti quali mountain bike (MTB) e sci mentre zaini più tradizionali da escursione permettono una distribuzione migliore del carico grazie ad un’estensione maggiore su tutta la lunghezza della schiena. Si riscontrano diverse configurazioni che integrano particolari accessori interni ed esterni specifici per ogni disciplina per cui sono stati concepiti ad esempio fascette esterne per il trasporto di sci, bastoncini, piccozze, caschi o sistemi di sicurezza, ad esempio, airbag (antivalanga).

Solitamente gli zaini sportivi/outdoor presentano uno schienale con forma anatomica che può essere integrato da sistemi rigidi per le discipline più gravose (MTB, SCI), una fascia lombare più o meno consistente a seconda della tipologia e della capacità dello zaino e una fascia pettorale anch’essa regolabile.

2.2 CLASSIFICAZIONE TRADIZIONALE DEGLI ZAINI OUTDOOR

Per effettuare una classificazione generale viene solitamente utilizzato come parametro la capienza degli zaini:

- zaini con capacità fino a 10 litri utili soprattutto come sacche idriche e contenitore di piccoli oggetti;
- zaini piccoli fino a 25-35 litri per uscite giornaliere o di un paio di giorni;
- zaini medi fino a 50 litri per uscite di più giorni;
- zaini di grandi dimensioni con capacità superiore a 50 litri.

Gli altri elementi che si possono comunemente trovare in tutti gli zaini sportivi vengono elencati nella sezione 2.3 riportata di seguito.

2.3 COMPONENTI COMUNI NEGLI ZAINI OUTDOOR

Nella Figura 10 vengono indicati i principali componenti di uno zaino moderno a telaio interno, che sono poi spiegati di seguito.



Figura 10: Componenti comuni in uno zaino da trekking-immagine modificata¹

2.3.1 CORPO

È il componente che contiene principalmente il carico. È costituito da tessuti tecnici e può presentare diverse aperture a seconda della voluminosità dello zaino e delle richieste specifiche della disciplina per il quale ne è previsto l'utilizzo. Solitamente è composto da un'unica sacca centrale e alcune sacche laterali o inferiori.

2.3.2 SPALLACCI

Gli spallacci dello zaino sono gli elementi comunemente usati per sostenere il carico. Ne esistono di molteplici tipologie e lunghezze ma se ne possono individuare tre macrocategorie: dritte, con profilo a J o a S¹⁴⁻¹⁶ che permette di limitare un affaticamento eccessivo sulle spalle per distribuirlo maggiormente sulla zona pettorale, essendo così la configurazione maggiormente utilizzata negli zaini sportivi. Gli spallacci sagomati hanno una curvatura che segue il percorso naturale sulla spalla, lontano dal collo, lungo il fianco del corpo fino alla zona del torace e poi lontano dal corpo sotto le braccia. Anche la posizione e l'angolo del punto di ancoraggio degli spallacci alla base dello zaino contribuiscono alla funzionalità e al comfort complessivo.

Gli spallacci sono costituiti da due fasce imbottite in schiuma che poggiano sulle spalle e tengono lo zaino attaccato alla zona superiore del corpo. Esistono poi spallacci specifici per l'anatomia femminile che consentono di copiarne la naturale curvatura in corrispondenza del busto.

2.3.3 CINGHIA PETTORALE

La cinghia pettorale deve essere fissata correttamente tra i due spallacci ed è essenziale per il posizionamento e il comfort. Le principali funzioni di questa sono¹⁷:

- distribuire parte del peso dello zaino sul torace;
- posizionare gli spallacci in piano contro il petto, in modo da avere tutta la superficie dello spallaccio a contatto;
- posizionare gli spallacci lontano dalle articolazioni delle spalle.

2.3.4 CINTURA LOMBARE

La cintura lombare è costituita da due ali imbottite posizionate ai lati dell'appoggio lombare alla base dello zaino.

Si tratta di una configurazione importante dal momento che i fianchi e la parte inferiore della schiena sostengono in genere buona parte del peso dello zaino. La fascia lombare inoltre permette l'avvicinamento dello zaino alla schiena limitando le oscillazioni di questo.

La fascia lombare, insieme alle cinghie di stabilizzazione del carico inferiore, sostiene il peso dello zaino e protegge la schiena. Negli zaini di taglia inferiore questo accessorio è rimpiazzato da una singola fascia in tessuto che ha la funzione di aumentare solamente la stabilità del carico.

A tal proposito quindi, si possono trovare zaini sprovvisti di questo importante accessorio solitamente per utilizzi comuni/turismo, zaini di piccola dimensione con solamente una fascia di piccola dimensione o zaini di piccola media e grande dimensioni con doppia fascia, più adatti per le discipline outdoor e sportive.

Questa caratteristica influenza notevolmente l'effettiva distribuzione del carico.

2.3.5 CINGHIE DI COMPRESSIONE

Le cinghie di compressione sono una caratteristica essenziale di uno zaino a telaio interno per modularne l'ingombro complessivo in relazione al volume del carico in modo da limitare l'inerzia prodotta da carichi posti lontano dai punti di appoggio. Esse consentono di comprimere lo zaino attorno al carico per garantire una configurazione stabile e compatta. Quando l'equipaggiamento non è sufficiente per riempire lo zaino al massimo

della sua capacità, le cinghie di compressione riducono lo spazio vuoto impedendo oscillazioni indesiderate. Le cinghie di compressione si trovano su entrambi i lati dello zaino e di solito sono costituite da fettucce in tessuto da 25 mm con sistemi di bloccaggio, sganci laterali o una combinazione di essi. Gli zaini sono dotati di tre o più cinghie di compressione su entrambi i lati, mentre gli zaini con caricamento dall'alto hanno anche due cinghie di compressione che corrono lungo la parte anteriore dello zaino e fissano la chiusura superiore contro lo zaino. Sono presenti spesso anche delle cinghie di compressione specifiche per alcuni oggetti come sacchi a pelo o materassini, posizionati solitamente nella parte bassa dello zaino.

Esistono infine anche delle cinghie di compressione interne con lo stesso fine di quelle esterne consentendo però di comprimere il carico dall'interno, facilitando la chiusura di uno zaino a pieno carico.

2.3.6 CINGHIE DI BILANCIAMENTO DEL CARICO

Negli zaini a telaio interno, le cinghie di stabilizzazione del carico superiore sono cinghie regolabili cucite tra la parte superiore dello spallaccio e un punto di attacco della parte superiore dello zaino. Queste cinghie di stabilizzazione del carico consentono di regolare la distanza tra la schiena e lo zaino e avvicinare pertanto il baricentro di questo a quello del corpo.

Le cinghie di stabilizzazione del carico inferiore si trovano su ciascun lato della fascia lombare e sono fissate al corpo dello zaino nella parte inferiore. Le cinghie di stabilizzazione del carico inferiore attirano lo zaino nella parte bassa della schiena e riducono al minimo l'oscillazione dello zaino, fornendo una posizione statica per un efficace trasferimento del peso alla parte inferiore della schiena.

È importante che le cinghie di stabilizzazione del carico inferiore siano allentate prima di regolare la fascia lombare, altrimenti questa non avvolgerà completamente i fianchi.

2.3.7 TELAI DI SUPPORTO

Un sistema di supporto unisce spallacci, sistema schienale e cintura in vita. Alcuni modelli integrano anche una lastra in polietilene ad alta densità e/o un cuscinetto lombare. Questo elemento permette di avere un'ulteriore classificazione possibile separando perciò zaini con o senza un telaio di supporto del carico: questo è presente ed efficace per lo più negli zaini più grandi per il trasporto di grossi carichi, superiori al 30% del peso corporeo (BW), al fine di limitare oscillazioni del carico. Due esempi di questi sono i brevetti militari del sistema ALICE (1973) e il sistema MOLLE (anni 2000).²

Altri telai di supporto basati su mesh polimeriche sono utilizzati su zaini di minor volumetria con il principale scopo di aumentare la traspirabilità e la sensazione di comfort termico.

I sistemi di supporto utilizzati sono di due tipologie: telaio esterno o interno

Gli zaini con telaio esterno sono progettati in modo che il telaio sia completamente esposto all'esterno del corpo che risulta attaccato ai lati del telaio con cinghie o perni di alluminio. Il materiale scelto è l'alluminio per via della sua leggerezza, anche se esistono telai esterni costituiti interamente da materiale plastico che offrono flessibilità durante la camminata. Gli spallacci e la cintura per i fianchi sono fissati al telaio mediante una fettuccia fatta passare attraverso lo stesso, in modo da garantire un soddisfacente grado di regolazione. Alcuni dei modelli migliori consentono di regolare gli spallacci verso l'alto o verso il basso per compensare le diverse lunghezze del busto.

Negli zaini con telaio esterno le barre verticali sono leggermente curvate a forma di S, con elementi trasversali che collegano i due lati. Alcuni modelli hanno un ripiano sul fondo, che offre una sporgenza per il sacco a pelo. Il telaio separa generalmente lo zaino dalla schiena, offrendo un ampio spazio per la circolazione dell'aria tra la schiena e lo zaino. A causa di questa distanza dalla schiena, gli zaini con telaio esterno sono generalmente considerati più freschi da trasportare nei periodi caldi, ma allo stesso tempo determinano una peggiore stabilizzazione sulla schiena

Alcuni zaini a telaio esterno, un esempio viene riportato in Figura 11, possono anche includere un'estensione superiore del telaio stesso composta da un'aggiuntiva traversa. Questa "estensione della traversa" può essere utilizzata per fissare l'attrezzatura supplementare in cima allo zaino o per facilitare la rimozione dello zaino, fornendo un altro punto di presa per sollevarlo dalla schiena.

Lo zaino a telaio esterno di base è rimasto invariato per molti anni e questo design è perfettamente adatto al trasporto. Tuttavia, un telaio completamente rigido con punti di fissaggio permanenti e non flessibili è contrario al movimento naturale del corpo rendendo così questo design più stancante per l'utente e aumentando il potenziale di indolenzimento dei muscoli delle spalle, della schiena e dei fianchi.

I più raffinati zaini a telaio esterno sono oggi costruiti interamente in materiale plastico, questo garantisce una certa flessibilità nel movimento di torsione e un maggior grado di comfort. La flessibilità è la chiave del comfort ergonomico dello zaino, più uno zaino si muove sinergicamente con il movimento del corpo e migliore sarà il comfort.



Figura 11: esempio di telaio esterno¹⁸

Il telaio interno è costituito da due profili in alluminio, plastica, fibra di vetro o materiale composito che corrono verticalmente dalla parte superiore a quella inferiore dello zaino. In alcuni zaini viene incorporata una lastra rigida in HDPE per una maggiore stabilità e protezione della schiena. Il telaio interno costituisce il principale mezzo di supporto per gli spillacci e la cintura lombare, nonché una struttura per sostenere la sacca dello zaino.

Gli utilizzatori abituali di zaini a telaio interno possono trovare questi zaini eccessivamente imbottiti e più caldi da trasportare nella stagione calda. Tuttavia, i miglioramenti apportati al design dei telai interni garantiscono anche una maggiore ventilazione della zona posteriore.

Tali zaini, come ad esempio quello riportato in Figura 12 prevedono di essere indossati con un appoggio maggiore sulla parte lombare della schiena, risultando quindi con un baricentro dello zaino più in basso che ne aumenta ulteriormente l'equilibrio e riduce al minimo le possibilità che lo zaino si agganci ad alberi e rami. Questa tipologia di zaino permette di avere una maggiore aderenza con la schiena avendo una superficie maggiore di trasferimento del peso tra zaino e corpo mentre negli zaini con telaio esterno, il peso è generalmente trasportato in soli quattro punti del telaio dello zaino, i fianchi e le spalle.



Figura 12: Esempio di zaino a telaio interno¹⁹

Le considerazioni sulla elevata libertà di movimento dell'utilizzatore sono il motivo per cui gli zaini a telaio interno hanno dominato la maggior parte del mercato degli zaini, in particolare nelle situazioni di off trail, sci alpinismo e arrampicata.

Il telaio interno deve

- garantire il trasferimento di una frazione del peso dello zaino alla parte bassa della schiena. Il telaio interno assicura una ridotta deformazione dello zaino e garantisce una distanza ridotta tra il corpo e lo zaino;
- impedire allo schienale dello zaino di arrotondarsi: un fenomeno comune negli zaini meno tecnici o senza telaio che vengono riempiti eccessivamente;
- lavorare in armonia con il corpo, con una flessione sufficiente a seguire i movimenti del corpo dell'utilizzatore secondo le necessità e a consentire un movimento naturale senza distorsioni eccessive. Se il telaio interno è troppo morbido o troppo rigido, non può fornire la sinergia dinamica necessaria. Il risultato di un telaio interno scadente sarebbe la perdita di equilibrio e conseguente affaticamento.

2.3.8 SCHIENALI RIGIDI

Spesso gli schienali sono parte costituente dei telai interni garantendo quindi sostegno allo zaino in modo che il carico interno non alteri il contatto con la schiena. Soprattutto per gli zaini di più piccola dimensione privi di un vero e proprio telaio, lo schienale rigido è il componente che permette di evitare pressioni locali non confortevoli: per questi ultimi si può trovare anche come elemento separato e removibile in uno scomparto in rete.

Questi possono essere anche modificati ad hoc per discipline specifiche diventando pertanto sistemi di sicurezza come schienali protettivi per la colonna vertebrale in caso di caduta come avviene per la MTB o per lo sci.

Due elementi importanti che spesso sono componenti di uno schienale rigido, o più genericamente di un telaio interno, risultano essere due barre rigide che corrono verticalmente dalla parte superiore a quella inferiore dello zaino, generalmente posizionate in un punto in corrispondenza della colonna vertebrale, più strette alla base e più larghe verso le spalle. Esse possono essere in alluminio, HDPE o PP, fibra di vetro o materiale composito e la loro sagomatura è essenziale per una corretta vestibilità e funzionalità dello zaino. La loro funzione è quella di dare supporto alla sacca zaino ma la sagomatura ad hoc di questi componenti consente di simulare l'azione di flessione della colonna vertebrale e di trasferire efficacemente del peso alla parte bassa della schiena, ai lati dell'osso sacro, alla base della colonna vertebrale. La tipica forma di queste viene mostrata in nero in Figura 13.



Figure 13: Schienale rigido²⁰

2.4 MATERIALI DI COSTRUZIONE DI UNO ZAINO

I materiali che vengono utilizzati nella costruzione della maggior parte degli zaini sportivi appartengono a due macro-famiglie: tessuti polimerici e schiume. I primi vengono impiegati principalmente per la costruzione del corpo principale, per stringhe, cordoni di chiusura e accessori mentre per le parti di contatto con l'utilizzatore vengono inseriti pannelli o strisce di schiume polimeriche morbide per limitare le pressioni di contatto e aumentare la traspirabilità. Infine, la questione traspirabilità nelle zone di contatto con il corpo viene spesso affidata a materiali particolari quali membrane microporose.

2.4.1 TESSUTI

Gli zaini comuni di utilizzo quotidiano, dalle contenute proprietà tecniche, sono solitamente composti in tessuti di cotone (ormai obsoleto), canvas o pelle naturale o sintetica, mentre gli zaini sportivi vengono spesso costituiti da tessuti a base di fibre polimeriche cucibili e compatibili con cerniere termosaldate. Presentano caratteristiche molto diverse e le famiglie di tessuti utilizzati sono principalmente: poliammidi e poliestere rivestiti da film impermeabilizzanti. Le proprietà comuni che vengono considerate nella costruzione sono la resistenza all'abrasione, al taglio e allo strappo e la resistenza alla cucitura. Inoltre, vengono anche valutate la resistenza alla trazione, resistenza ai raggi UV e variazione delle prestazioni meccaniche citate a condizioni di umidità e freddo. La tipologia di tessuti normalmente utilizzata per la costruzione degli zaini prevede solitamente filati tra i 100 e i 600 Denier²¹. Nei prodotti commerciali si riscontra una quantità notevole di tessuti utilizzati come si può evincere

dal catalogo dei tessuti utilizzati da Deuter®. Spesso la catalogazione dei tessuti è espressa secondo il filato utilizzato e quindi viene utilizzata l'unità di misura dei Denier (D)(g/9000m) per retaggi provenienti dal mondo della moda, mentre per i settori più tecnici viene anche utilizzata l'unità di misura del Tex (T) (g/1000m); entrambe le unità di misura esprimono un rapporto massa-lunghezza e la relazione tra di esse è facilmente ottenibile considerando $1T=9D$. Inoltre, anche il tipo di fibra decreta il maggiore utilizzo di una piuttosto che dell'altra unità di misura; infatti, ad esempio per il poliestere si utilizza preferibilmente il Tex perché solitamente sono tessuti più spessi e quindi classificati da valori troppo elevati in Denier, cosa che invece non accade per i tessuti in nylon.

Di seguito nella Figura 14 viene mostrata una panoramica dei tessuti commerciali utilizzati da Deuter® per tutta la loro gamma di zaini da trekking



Figura 14: Esempi di tipologie di tessuti utilizzati²²

COTONE

I primi esempi di tessuti utilizzati per gli zaini erano tele di cotone impermeabilizzate con un pesante rivestimento di cera, che forniva alcune caratteristiche di resistenza alle condizioni atmosferiche avverse. Questi tessuti erano però pesanti, soggetti ad abrasione e non del tutto impermeabili. A causa della mancanza di impermeabilità e della pronta capacità di assorbire acqua, la tela di cotone non è uno dei materiali più performanti nella produzione degli zaini. Il suo principale vantaggio risiedeva nei costi contenuti e gli zaini realizzati con questo materiale erano di conseguenza più economici, prima dell'avvento delle fibre sintetiche come il poliestere. Sebbene oggi si producano pochissimi zaini tecnici in tela di cotone, ne esistono alcuni che promuovono la combinazione con materiali sintetici per migliorare la resistenza e l'impermeabilità del tessuto di cotone. Un esempio di questi è il policotone in cui fibre di poliestere sono tessute insieme alle fibre naturali per produrre materiale con proprietà miste. Le miscele cotone-poliestere possono essere forti e resistenti allo strappo senza avere restringimenti tipici dei tessuti con fibre naturali.

NYLON

Le fibre di poliammide sono filate da polimeri termoplastici lineari aventi gruppi ammidici costituiti da diammine e acidi dicarbossilici (CON-H R NHCO R') o lattami (RCONH)_n. Le poliammidi sono generalmente indicate come nylon quando R e R' sono essenzialmente alifatiche, alicicliche e meno dell'85% dei legami ammidici sono attaccati direttamente a due anelli aromatici.²³ Ogni anno in tutto il mondo vengono prodotte circa 4 milioni di tonnellate di fibra di nylon; di cui il nylon-6 e il nylon-6,6 rappresentano circa il 98% della produzione totale. Le fibre di nylon sono utilizzate nei settori della pavimentazione, dell'abbigliamento, dell'industria e dei trasporti. I vantaggi delle fibre di nylon rispetto ad altre fibre sintetiche sono alta resistenza, durabilità, resilienza, facilità nella tintura e basso peso specifico. Le fibre sintetiche più utili per le applicazioni tessili sono derivanti da polimeri lineari, semicristallini e orientati, le cui proprietà sono definite dalla chimica, dalla struttura e dall'organizzazione molecolare. Il primo livello di organizzazione molecolare è dettato dalla struttura chimica che definisce la struttura dell'unità ripetitiva nel polimero di base e la natura del legame polimerico. Ciò si ripercuote direttamente sulla reattività chimica, sulla facilità di tintura, all'assorbimento di umidità e alle caratteristiche di rigonfiamento e indirettamente a tutte le proprietà fisiche. La struttura macromolecolare, il secondo livello, riguarda l'organizzazione delle catene polimeriche nei termini di lunghezza della catena, distribuzione della lunghezza della catena, rigidità della catena, dimensione e forma molecolare. Il terzo livello, infine, definito supramolecolare, considera la disposizione delle catene nello spazio tridimensionale e viene descritto da cristallinità, orientamento della fase cristallina e amorfa e ripiegamento delle macromolecole.²³

Le proprietà fisiche che derivano dalle caratteristiche delle macromolecole nei tre livelli descritti possono essere modificate attraverso un processo di trattamento termico o anche solo dalle condizioni atmosferiche.

Nylon-6 e nylon-6,6, le cui formule chimiche sono riportate in Figura 15, sono isomeri che condividono quindi la stessa formula bruta, C₆H₁₁NO e alcune proprietà come densità e indice di rifrazione. Tuttavia, differiscono nel punto di fusione a causa delle differenze nell'allineamento delle catene molecolari e nel comportamento di cristallizzazione. Questi parametri sono importanti nella formazione delle fibre durante la filatura allo stato fuso, ma non sono così significativi quanto la temperatura di transizione vetrosa T.

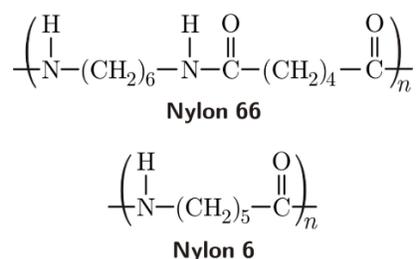


Figure 15: Formule chimiche del Nylon 6,6 e Nylon 6²⁴

L'effetto che può essere indotto dalle diverse condizioni atmosferiche è rilevante per l'assorbimento di acqua da parte delle fibre in Nylon che ne provoca il rigonfiamento, l'alterazione delle dimensioni e talvolta la modifica della forma, la rigidità e la permeabilità di filati e tessuti. Inoltre, ne altera l'attrito statico della lavorazione dei filati nonché le prestazioni dei tessuti durante l'uso. L'acqua, un potente plastificante per il nylon, penetra preferenzialmente nelle regioni amorfe, lega prontamente l'idrogeno all'ammide e aumenta la mobilità della catena molecolare. Di conseguenza, l'acqua assorbita abbassa il modulo di trazione, il lavoro necessario per lo stiramento e per il ritorno elastico, e inoltre, abbassa anche la temperatura di transizione vetrosa. Data la maggior mobilità

delle catene e la rottura dei legami idrogeno tra di esse, l'assorbimento di umidità aumenta anche la cristallinità del nylon consentendo ai segmenti della catena degli idrocarburi di compattarsi meglio.

Normalmente i tessuti in nylon utilizzati vengono definiti erroneamente resistenti all'umidità e all'acqua in quanto in realtà le fibre di nylon possono assorbire l'umidità e l'acqua; all'atto pratico però esse rigonfiano fino al 3,5%²¹, diminuendo quindi gli interstizi tra i fili di trama e ordito rendendo pertanto i fitti tessuti utilizzati maggiormente impenetrabili all'acqua e igroscopici.

Le tipologie di Nylon 6-6 e Nylon 6, le cui proprietà vengono riassunte in Tabella 1, vengono impiegati nell'ambito tessile pur differendo per alcune proprietà come il punto di fusione ma presentano un'elasticità simile, una facile tintura, con metodo batch ad esaurimento o metodi di tintura diretta della fibra, e facile lavaggio, poiché igroscopico. Il Nylon 6-6 però è preferito al 6 per la produzione di zaini grazie alla sua maggiore resistenza e tenacità (circa il 20 % in più in resistenza all'abrasione e 15% in resistenza a trazione e allo strappo), mentre il Nylon 6 è utilizzato comunemente nell'industria tessile per la produzione di abbigliamento, corde, fili, reti e capi d'abbigliamento.

Property	Nylon-6		Nylon-6,6	
	Regular tenacity	High tenacity	Regular tenacity	High tenacity
Breaking tenacity, N/tex^c				
Standard	0.35–0.64	0.57–0.79	0.20–0.53	0.52–0.86
Wet	0.33–0.55	0.51–0.72	0.18–0.48	0.45–0.71
Loop	0.34–0.49	0.45–0.89	0.18–0.45	0.44–0.67
Knot	0.34–0.48	0.42–0.59	0.18–0.45	0.44–0.67
Tensile strength, MPa^d	503–690	703–862	275–731	593–924
Breaking elongation, %				
Standard	17–45	16–20	25–65	15–28
Wet	20–47	19–33	30–70	18–32
Average modulus (stiffness), N/tex^c	1.6–2.0	2.6–4.2	0.44–2.1	1.9–5.1
Average toughness, N/tex^c	0.06–0.08	0.06–0.8	0.07–0.11	0.07–0.11
Elastic recovery, %	98–100 at 1–10%	99–100 at 2–8%	88 at 3%	89 at 3%
Moisture regain at 21°C, %				
65% RH	2.8–5.0	2.8–5.0	4.0–4.5	4.0–4.5
95% RH	3.5–8.5	3.5–8.5	6.1–8.0	6.1–8.0

^aConditioned at 65% RH and 21°C.

^bRef. 21.

^cTo convert N/tex to g/den, multiply by 11.33.

^dTo convert MPa to psi, multiply by 145.

Tabella 1: Tabella riassuntiva proprietà di fibre in Nylon 6 e Nylon 6,6²³

L'elevato numero di filati disponibili permette di ampliare la scelta nella composizione dei tessuti, infatti, si possono trovare zaini ripiegabili di piccole dimensioni composti in tessuti anche al di sotto di 11 T(100D) mentre zaini più complessi e grandi utilizzano anche tessuti molto resistenti e pesanti tra i 66 e i 186 T (800D e 1680D), definiti come nylon balistici. Altri fattori importanti sono il tipo di fibra, la dimensione e le caratteristiche di tessitura; in tal senso è comune l'utilizzo di tessuti Ripstop. Questo è un tessuto in cui i fili di rinforzo sono intrecciati a intervalli regolari in uno schema a tratteggio incrociato (crosshatch).

Il nylon Ripstop, quindi, è caratterizzato dalla particolare modalità di intreccio dei fili nella quale fili di rinforzo più forti (e spesso più spessi) vengono intrecciati a intervalli regolari in uno schema a tratteggio incrociato. Gli intervalli sono in genere da 5 a 8 millimetri. I tessuti Ripstop sottili e leggeri hanno una struttura tridimensionale a causa dei filati più spessi intrecciati in un tessuto più sottile, che grazie alle tecniche di tessitura moderne riesce anche a conferire una finitura estetica apprezzabile anche per le titolazioni minori, come mostra la Figura 16. Questo particolare sistema di tessitura crea resistenza allo strappo, al disfacimento se il tessuto viene forato e aumenta anche l'impermeabilità. La struttura Rip-Stop, quindi, può fornire una protezione extra per evitare che lo zaino si disintegri a causa di un piccolo strappo.

Date queste sue caratteristiche questo sistema viene anche utilizzato anche in tessuti per altre applicazioni come vele, paracadute e mongolfiere.



Figura 16: Metodo di tessitura Ripstop²⁵

Per quanto riguarda il Nylon balistico si tratta di nylon spesso e resistente, originariamente sviluppato da DuPont® per l'abbigliamento militare durante la Seconda guerra mondiale per proteggere gli aviatori dai detriti volanti e dalla frammentazione causata dagli impatti di proiettili. Anche se da allora il Kevlar ha sostituito questa funzione, il nylon balistico tra i 66 e i 186 T (600D-1680D)²¹ è ancora utilizzato oggi per molti zaini pesanti. Il nylon balistico era una materia prima specifica prodotta dalla sola DuPont®, ma ora è più un termine generico, in quanto rientrano in questa famiglia diversi tessuti.

Un altro tessuto a base Nylon noto e riconosciuto in molti settori tecnici risiede nella tipologia di tessuti Cordura.

Il termine “Cordura” non indica tecnicamente un materiale, ma è diventato un marchio associato a tessuti di alta qualità, con buone proprietà di resistenza alle abrasioni, strappi e graffi e alcuni anche considerati impermeabili.

Cordura quindi è il nome del marchio di una serie di tessuti utilizzati in un'ampia gamma di prodotti, tra cui valigie, zaini, pantaloni, abbigliamento militare. Originariamente sviluppato e registrato come marchio da E.I. DuPont de Nemours and Company (DuPont) nel 1929, è ora di proprietà di Invista®. I tessuti Cordura ® oggi sono prodotti principalmente con filati in Nylon 6,6 di diversa tipologia e resistenza, ma alcuni tessuti prevedono anche l'utilizzo di fibre di diverso tipo.

Questi materiali sono tra i tessuti più ricercati e popolari oggi in uso per gli zaini di alta qualità, nelle declinazioni di 55-110T (500 o 1000 D). Rispetto ai tradizionali tessuti in nylon questi presentano una maggiore durabilità e resistenza alle abrasioni e pertanto è possibile confrontare tecnicamente un tessuto Cordura 500D con uno tradizionale in nylon 1000D che però prevederà un peso circa doppio rispetto al primo.²¹

Un altro nome commerciale utilizzato nel settore outdoor è “VX-21” di Dimension-Polyant® ha una costruzione multistrato che combina diverse proprietà del nylon 23T (210 D) resistente all'abrasione all'esterno con un sottile strato di poliestere-taffetà all'interno e robuste fibre X-PLY® in poliestere nel mezzo: la composizione tipica risultante di questa tipologia di tessuti, perciò, è 60% Nylon e 40% poliestere. Questo rende il tessuto molto resistente allo strappo, durevole e impermeabile al 100% e gli conferisce un'ottima stabilità strutturale, soddisfacendo così la maggior parte delle richieste tecniche per la costruzione di uno zaino tecnico.²⁶

POLIESTERE

Il termine poliestere si riferisce a una vasta famiglia di polimeri che contengono il gruppo estere (—O—CO—) come parte ricorrente della catena del polimero. I poliesteri lineari, utilizzati come fibre tessili, sono termoplastici saturi, mentre i poliesteri insaturi a bassa massa molare forniscono polimeri termoindurenti per corde, materiali di rinforzo, adesivi, bottiglie e film. Le fibre in poliestere (PES) sono definite come fibre composte da macromolecole lineari aventi, nella catena, almeno l'85% in massa di un estere di un diolo e acido tereftalico. Il notevole successo e la continua popolarità del PES come fibra tessile sono attribuibili non solo alle eccellenti caratteristiche tessili della fibra e all'elevatissima resistenza chimica in condizioni tipiche di tintura e finissaggio, ma anche alla capacità dei produttori di fibre di produrre fibre praticamente in qualsiasi forma, finezza, consistenza, lunghezza, ecc., per adattarsi alle diverse richieste dei mercati e per la miscelazione con altri tipi di fibre, in particolare cotone e altre fibre cellulosiche. Più comunemente, le fibre PES sono materiali semicristallini, sebbene possano essere prodotte con qualsiasi grado di cristallinità; sono anche caratteristicamente altamente orientate²⁷. Le fibre PES sono prodotte in un'ampia varietà con diverso carattere estetico e funzionale che ne consente la miscelazione con altri tipi di fibre. Oltre alla variazione delle proprietà delle fibre che può essere raggiunta durante la preparazione tramite modifiche nella filatura, trafilatura, testurizzazione le fibre PES sono polimeri semicristallini, il grado di cristallinità e l'orientamento delle regioni amorfe sono fortemente influenzati dalle particolari condizioni di lavorazione delle fibre impiegate, in particolare dalla velocità di filatura. Con l'aumentare della velocità di filatura, i filati PES cambiano da materiali amorfi a basso orientamento a materiali cristallini altamente orientati. Sebbene la fibra estrusa inizialmente sia essenzialmente amorfa, la successiva lavorazione (stiro) sviluppa cristallinità, con il risultato che le fibre commerciali raggiungono valori del 40–50%. L'interazione tra acqua e fibre di poliestere ha ricevuto relativamente poca attenzione perché l'assorbimento d'acqua è caratteristicamente molto basso, essendo comunemente attorno a valori dello 0,4%²⁷, e inoltre l'acqua ha scarso effetto sulle proprietà delle fibre. Queste caratteristiche possono essere attribuite ad una scarsità di gruppi idrofili all'interno della fibra, insieme all'elevata cristallinità e all'alto orientamento delle catene molecolari che limitano ancora l'accessibilità delle molecole d'acqua. La struttura fine delle fibre PES è stata ampiamente interpretata in termini di due modelli: con un modello a due fasi sviluppato da Peterlin e uno a tre fasi suggerito da Prevorsek; ciascuno di questi modelli presuppone che il principale componente strutturale della struttura della fibra sia la microfibrilla che si forma durante la filatura e lo stiro che consiste in regioni cristalline e amorfe alternate, con cristalliti uniti insieme da molecole di legame all'interno delle regioni amorfe. Tuttavia, mentre il modello a due fasi presuppone che la fibra comprenda regioni cristalline e amorfe, il modello trifase considera che la fibra contenga regioni cristalline e regioni non cristalline che comprendono due tipi di materiale amorfo, ovvero fase amorfa organizzata in modo casuale e fase amorfa orientata. Sia il modello a due fasi che il modello a tre fasi sono stati sviluppati per descrivere la struttura delle fibre filate allo stato fuso in generale. Nonostante la grande attenzione della ricerca, la natura precisa della struttura fine delle fibre PES rimane irrisolta.²⁸

Il poliestere è probabilmente la fibra per zaini più comunemente usato dopo il nylon. Rispetto a quest'ultimo, il poliestere ha un costo inferiore, un rapporto resistenza/peso inferiore e una maggiore resistenza alla degradazione ai raggi ultravioletti (UV).²⁷ La caratteristica fondamentale del suo utilizzo è il costo minore rispetto al nylon e pertanto i materiali in poliestere e poliestere testurizzato sono maggiormente presenti per i prodotti di fascia bassa.

Nella Tabella 2 vengono riassunte alcune caratteristiche delle principali classi di fibre in poliestere.

Fiber	Break tenacity, N/tex	Elongation, %	Elastic recovery, % at X% elong	Stiffness, N/tex
PET staple				
regular tenacity	0.3–0.5	40–60	75–80% at 2% ELO	1–2
high tenacity	0.5–0.6	20–30	90 % at 5% ELO	5–6
PET filament				
POY	0.2–0.3	110–250		0.2–0.5
regular tenacity	0.4–0.5	20–40	88–93% at 5% ELO	1–3
high tenacity	0.6–0.9	10–25	90 % at 5% ELO	5–7
PBT filament				
regular tenacity	0.3–0.4	25–35		1.5–2.5
PTT filament				
regular tenacity	0.3–0.4	25–40		1.5–2.5
CHDM fiber				
staple	0.2–0.3	25–35	85–95% at 2% ELO	
regular tenacity filament	0.1–0.3	25–35	80–90% at 2% ELO	1–3
high tenacity filament	0.4–0.5	10–12	80% at 2% ELO	1–3

Tabella 2: Tabella riassuntiva delle proprietà delle fibre della famiglia dei poliesteri²⁸

TESSUTI RICICLATI

Questi tessuti, come Nylon e Poliesteri, sono sempre più in voga dal punto di vista commerciale per i settori dell'outdoor in quanto rispecchiano le direttive di sostenibilità ecologica sempre più presenti nelle aziende del settore. Tali tessuti sono composti da fibre riciclate derivanti da prodotti e imballaggi plastici piuttosto che da tessuti, in quanto spesso questi ultimi presentano un'elevata eterogeneità delle fibre stesse.

2.4.2 RIVESTIMENTI WATER RESISTANT O WATERPROOF

Le proprietà desiderabili di un tessuto possono essere integrate utilizzando un rivestimento che ne riduce la porosità, protegge il tessuto dall'ambiente chimico (acqua, acido o base, solventi) e fisico (temperatura, stress, flessione) e, in alcuni casi, fornisce effetti decorativi, senza alterare le proprietà fisiche del tessuto di base.

In un certo numero di settori sportivi, tra cui quello degli zaini outdoor, spesso viene richiesta una maggiore resistenza all'umidità o addirittura completamente waterproof. I materiali che permettono di soddisfare intrinsecamente questi obiettivi sono ad esempio il PU e PVC, altamente sconsigliato per questioni di impatto ambientale del prodotto a fine vita. Questi vengono già utilizzati come vero e proprio componente principale dello zaino oppure come film esterno al tessuto di base.

I parametri presentati nella discussione della resistenza alla bagnabilità²⁹ del tessuto interessano sia la fibra stessa ma anche caratteristiche globali come tipologia di tessitura e finitura superficiale e sono:

- Chimica della fibra: presenza di gruppi polari e non polari
- Geometria e rugosità della fibra
- Dimensione delle capillarità del tessuto
- La presenza di tensioattivi o impurità sulla superficie
- La temperatura del liquido bagnante

I trattamenti per rendere il materiale waterproof permettono di ridurre la dimensione delle porosità in superficie, attorno ai 100 μm per un tessuto tradizionale, rendendo i pori “non wettable”, incrementando l’angolo di contatto, o ricoprendo il tessuto con uno strato non poroso o microporoso (ordine di grandezza dei pori 1 μm). Esistono diversi metodi che possono essere utilizzati per ottenere tessuti che sono entrambi traspiranti e impermeabili. Questi possono essere suddivisi in tre gruppi³⁰:

- tessuti a trama fitta
- membrane
- rivestimenti.

TESSITURA STRETTA

L’esempio migliore per questa tipologia è il tessuto prodotto da “Shirley Institute Research of England” sotto il nome “Ventile”^{29,31}: il meccanismo si basa sullo swelling delle fibre di cotone a contatto con l’acqua che permette di ridurre la dimensione delle porosità da 10 μm a 3-4 μm , come mostra la Figura 17, e pertanto il tessuto risulta bagnabile solo a più alte pressioni di vapore. Tale tessuto presenta qualche difficoltà di combinazione con coating impermeabilizzanti in quanto quest’ultimo limita il meccanismo di base delle fibre.

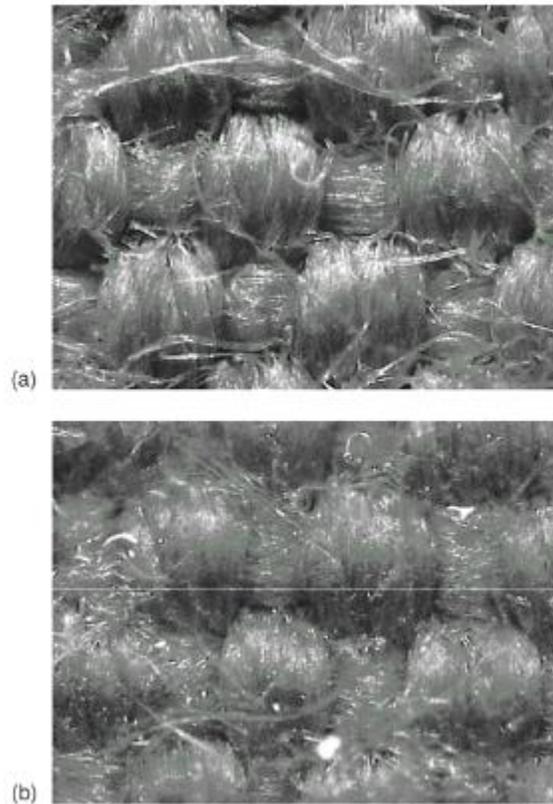


Figura 17: Tessuto Ventilante a) asciutto, b) bagnato³⁰

Il tessuto a trama fitta può anche essere realizzato con filati di microfilamenti sintetici. I singoli filamenti hanno un diametro inferiore a $10\ \mu\text{m}$. I microfilamenti possono essere realizzati in poliammide o poliestere, le due fibre principali nell'ambito degli zaini. La resistenza alla penetrazione dell'acqua del tessuto è migliorata dall'applicazione di finitura con un polimero fluorurato.

L'uso di fibre e filamenti molto fini e una costruzione densa (set) si traduce in tessuti con dimensioni dei pori molto ridotte rispetto ai tessuti convenzionali. la dimensione tipica dei pori di un tessuto impermeabile è di circa $10\ \mu\text{m}$ rispetto ai $60\ \mu\text{m}$ di un tessuto convenzionale. Nello specifico date le proprietà igroscopiche delle fibre in poliestere la tessitura stretta permette comunque di avere una ridotta penetrazione all'acqua data l'impossibilità per tali fibre di sfruttare il meccanismo dello swelling.

Nella Tabella 3 viene mostrata la relazione tra densità del tessuto e quindi finezza della maglia e resistenza all'acqua nel caso di diversi tessuti in Nylon.

Material	Grams/1000m thread	Avg. Fabric density	Water resistance (Hydrostatic Head)
7D Nylon	0.8	19 g/m ²	1000-2000mm
10D Nylon	1.1	25 g/m ²	1000-2000mm
15D Nylon	1.7	30 g/m ²	2000mm
20D Nylon	2.2	34 g/m ²	3000-4000mm
30D Nylon	3.3	47 g/m ²	4000-5000mm
40D Nylon	4.4	54 g/m ²	5000mm
210D Nylon	23.3	70 g/m ²	15000mm
400D	44.4	100 g/m ²	20000mm

Tabella 3: water resistance di tessuti in nylon²¹

MEMBRANE

Le membrane sono film estremamente sottili realizzati in materiale polimerico e ingegnerizzati in modo tale da avere una resistenza molto elevata alla penetrazione dell'acqua ma consentendo il passaggio del vapore acqueo. Una membrana tipica ha uno spessore di soli 10 µm circa e, pertanto, deve essere laminata su un tessuto tessile convenzionale per avere la necessaria resistenza meccanica. Possono essere di due tipi, microporose e idrofile.

Per la prima categoria, probabilmente la più conosciuta è nota come Gore-Tex, sviluppata e introdotto nel 1976 da W Gore. Questo è un film sottile di polimero di politetrafluoroetilene espanso (PTFE) contenente 1,4 miliardi di minuscoli fori per centimetro quadrato³². Questi pori sono molto più piccoli rispetto alle gocce di pioggia più piccole (2–3 µm rispetto a 100 µm), ma molto più grandi di una molecola di vapore acqueo (40*10(-6) µm)³¹. La natura idrofobica del polimero e la piccola dimensione dei pori richiedono una pressione molto alta per causare la penetrazione dell'acqua. Un problema di queste deriva dalla possibile contaminazione della membrana da vari materiali, tra cui oli per il corpo, sporco particolato, residui di pesticidi, repellente per insetti, crema solare, sale e detersivo residuo e tensioattivi utilizzati nelle pulizie che possono ridurre l'impermeabilizzazione e la permeabilità del vapore acqueo della membrana. Per questo motivo le membrane microporose hanno solitamente uno strato di poliuretano idrofilo per ridurre gli effetti della contaminazione.

La categoria delle membrane idrofile comprende film molto sottili di poliestere modificato chimicamente o poliuretano prive di pori. Il polimero poliestere o poliuretano è modificato incorporando fino al 40% in peso di ossido di etilene, che costituisce la parte idrofila della membrana formando parte delle regioni amorfe del sistema polimerico. Questo fornisce una bassa affinità energetica con le molecole d'acqua che è essenziale per una rapida diffusione del vapore acqueo. Queste regioni amorfe vengono definiti come pori intermolecolari che consentono alle molecole di vapore acqueo di passare ma prevengono la penetrazione trazione di acqua liquida a causa della natura solida della membrana, come mostra la Figura 18.

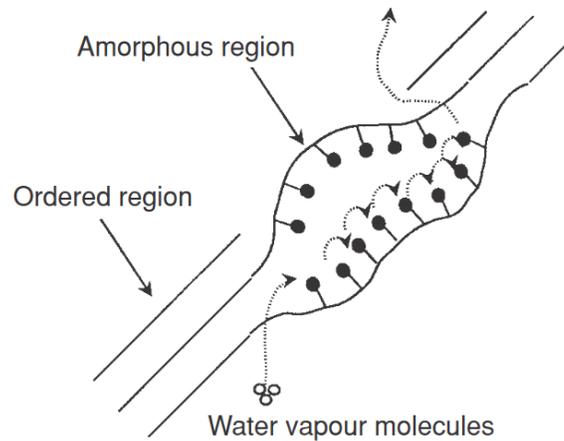


Figura 18: Meccanismo di funzionamento delle membrane idrofile³⁰

Le membrane devono essere incorporate nei prodotti tessili in modo da esplicare la loro funzione senza intaccare il tessuto. È possibile sfruttare 4 diversi metodi che vengono mostrati in Figura 19.

- Laminazione della membrana e tessuto esterno: la membrana è laminata con la parte esterna del tessuto per produrre un sistema a due strati. Questo ha lo svantaggio di ridurre le proprietà estetiche del tessuto ma assicura una protezione molto efficace. Questo metodo viene utilizzato principalmente per la realizzazione di indumenti protettivi.
- Processo di inserimento: –La membrana viene laminata in un sottile tessuto a maglia o a rete e tagliata e cucita insieme con cuciture rese impermeabili con un speciale nastro sigillante. La struttura viene quindi inserita liberamente tra il tessuto esterno e la fodera. I tre materiali (esterno, laminato e rivestimento) sono uniti tra loro con cuciture a punto. Se è richiesto un elevato isolamento termico, il supporto leggero per la membrana è sostituita da un tessuto di cotone, lana o ovatta. Questo metodo ha il vantaggio di conferire una finitura morbida.
- Laminazione della membrana e tessuto di rivestimento: il laminato è attaccato al materiale di rivestimento. Lo strato funzionale è incorporato come uno strato separato, indipendente dal tessuto esterno. Questo metodo ha un vantaggio estetico rispetto agli altri processi
- Laminazione con tessuto esterno, membrana e fodera: questo produce un sistema a tre strati, che conferisce una finitura più grossolana, quindi, non è comunemente usato.

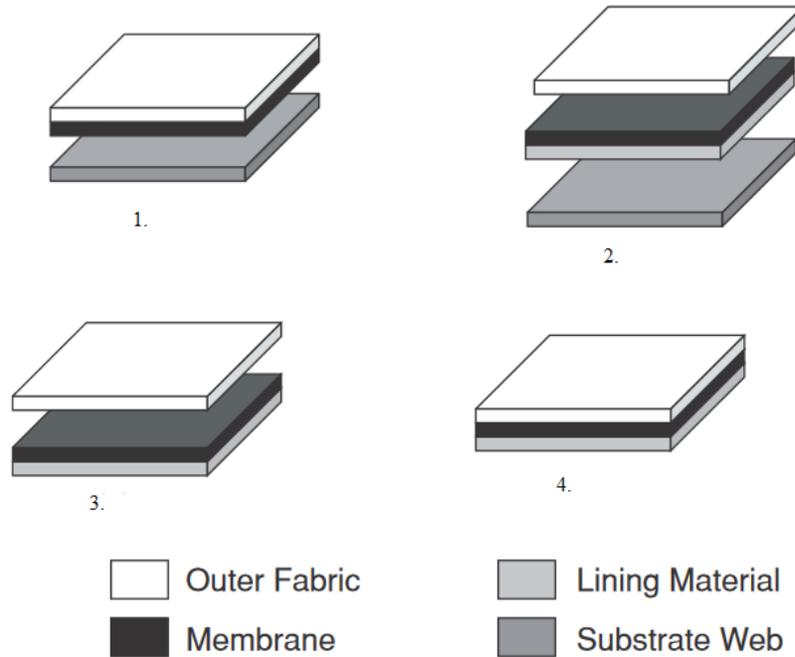


Figura 19 : Metodi di incorporamento delle membrane in prodotti tessili³⁰

COATING

Questi sono costituiti da uno strato di materiale polimerico applicato sulla superficie del tessuto. Il poliuretano è il principale materiale di rivestimento. Come le membrane, i rivestimenti sono di due tipi; microporoso e idrofilo, ma risultano più spessi.

I rivestimenti microporosi hanno una struttura simile alle membrane microporose. Il rivestimento contiene canali interconnessi molto fini, molto più piccoli dei delle più piccole gocce d'acqua ma molto più grande di una molecola di vapore acqueo, come mostra la Figura 20. Il materiale polimerico più utilizzato è il PTFE seguito dal poliuretano ma si ritrovano anche acrilici, poliolefine e acidi poliamminici

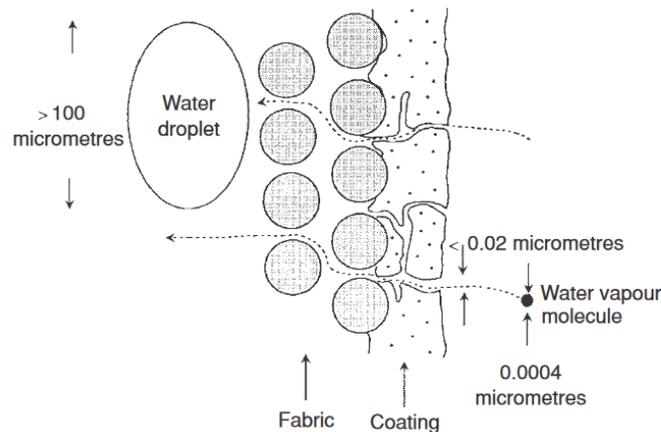


Figura 20: Meccanismo di funzionamento dei coating microporosi³⁰

Una nota di merito occorre spenderla per i DWR ovvero DURABLE WATERREPELLENT in quanto si tratta della tecnica più diffusa in termini di impermeabilizzazione. DWR è un rivestimento chimico funzionale,

contenente pfc (perfluorocarburi), che viene spalmato all'esterno del tessuto per limitare la penetrazione dell'acqua.³³

Il problema di queste tecnologie risiede nel deterioramento nel tempo, seppur lento, a causa di abrasione, sole e altri fattori e inoltre risulta non biodegradabile, in quanto risulta un materiale composito con la presenza di composti fluorurati altamente dannosi dal punto di vista ambientale. Quindi, sebbene l'acqua possa gocciolare esternamente ai primi utilizzi, lentamente questo effetto si riduce fino a perdere la sua funzione.

La deposizione dei rivestimenti microporosi può avvenire con diversi metodi:

- **Coagulazione a umido:** il polimero poliuretano viene sciolto nel solvente organico (dimetilformammide) per produrre una soluzione insolubile in acqua. Questa, quindi, viene spalmata sul tessuto e viene fatto passare attraverso una camera di condizionamento contenente vapore acqueo. Poiché il solvente organico è miscibile in acqua, viene diluito per far precipitare il poliuretano solido. Il tessuto viene quindi lavato per rimuovere il solvente, che lascia lacune vuote nel rivestimento e infine essiccato. Questo metodo non è molto popolare in quanto richiede macchinari costosi e elevati costi per il recupero del solvente.
- **Termocoagulazione:** il poliuretano viene sciolto in un solvente organico e la soluzione risultante viene mescolata con acqua per produrre un'emulsione. L'emulsione viene spalmata su un lato del tessuto, per poi passare attraverso un processo di essiccazione in due fasi: Il primo stadio impiega una bassa temperatura per rimuovere il solvente organico, facendo precipitare il poliuretano, mentre il secondo stadio a temperatura più alta fa evaporare l'acqua lasciando i pori nel rivestimento.
- **Rivestimento in schiuma:** una miscela di esteri di poliuretano e di poliuretano/acido poliacrilico viene dispersa in acqua e quindi schiumata. La schiuma è stabilizzata con l'ausilio di additivi e spalmata su un lato del tessuto. Il rivestito del tessuto viene asciugato per formare un rivestimento microporoso. È importante che la schiuma sia cella aperta per consentire la penetrazione del vapore acqueo ma con celle abbastanza piccole per impedire la penetrazione dell'acqua liquida. Il tessuto viene infine calandrato a bassa pressione al fine di comprimere il rivestimento. Poiché le celle di schiuma sono relativamente grandi, un polimero a base di fluoro idrofobico viene applicato per migliorare la resistenza all'acqua. Questo tipo di produzione di rivestimenti non prevede un eccessivo trattamento del solvente in quanto è di tipo organico.

Per quanto riguarda i rivestimenti idrofili essi si basano sullo stesso meccanismo di permeabilità al vapore acqueo delle membrane idrofile. La differenza tra materiali microporosi e materiali idrofili è che con i primi il vapore acqueo passa attraverso la struttura permeabile mentre gli idrofili sfruttano un meccanismo molecolare che coinvolge adsorbimento-diffusione e desorbimento. Questi i rivestimenti sono tutti a base di poliuretano, che è stato modificato chimicamente con alcoli polivinilici e ossidi di polietilene che consentono la diffusione del vapore acqueo attraverso le regioni amorfe del polimero. L'equilibrio tra idrofilia e i componenti idrofobici del sistema polimerico devono essere ottimizzati per ottenere un compromesso tra permeabilità al vapore, flessibilità, durabilità e insolubilità in acqua e solventi per la pulizia. Il rigonfiamento della membrana è incoraggiato per favorire la diffusione del vapore acqueo, tuttavia, deve anche essere limitata per prevenire la dissoluzione o la rottura in acqua o negli altri solventi con cui è probabile che il polimero venga a contatto.

I rivestimenti e le membrane in poli(etere-uretano) sono i principali coating idrofili in quanto hanno un'eccellente integrità. Questo può essere conferito in due modi:

- da un alto grado di legame idrogeno, principalmente tra gruppi polari nei segmenti idrofobici di catene polimeriche adiacenti;

- formando reticolazioni covalenti tra catene polimeriche adiacenti la lunghezza e la densità della reticolazione sono variabili e influenzano il rigonfiamento del polimero e quindi la permeabilità al vapore.

Il metodo convenzionale per applicare i rivestimenti al tessuto consiste nell'utilizzare l'applicazione diretta utilizzando la tecnica "Blade roll"²⁹ ovvero una lama controlla lo spessore del coating rilasciato sul tessuto da un rullo asportandone l'eccesso. Lo spessore del rivestimento è determinato dalla dimensione dello spazio tra la lama e la superficie del tessuto. Il tessuto rivestito viene poi fatto passare attraverso un essiccatore per la solidificazione del rivestimento. Altri metodi utilizzati sono ad esempio l'estrusione, la laminazione, colata, tramite rotocalco diretto, a schermo rotante o per trasferimento³¹.

Un ultimo recente approccio per quanto riguarda i rivestimenti water resistant o waterproof ricade nel campo della biomimetica, ovvero l'imitazione di meccanismi biologici al fine di produrre utili oggetti artificiali. Un esempio applicato di tale approccio risiede negli studi scientifici condotti da "The British Defense Clothing and Textile Agency" che ha ottenuto un potenziale miglioramento della permeabilità al vapore dei rivestimenti in tessuto incorporando un meccanismo simile alle foglie, ovvero con stomi che si aprono quando la pianta ha bisogno di aumentare la traspirazione del vapore acqueo e si chiude quando è necessario ridurla. Hanno modellato una composizione dei pori con apertura ad alette con due materiali laminati con diversi assorbimenti di umidità. Un'altra idea di successo commerciale. Akzo Nobel con il nome commerciale di Stomatex® commercializza per il settore calzaturiero un isolante in schiuma a celle chiuse in neoprene che incorpora una serie di cupole convesse ventilate da una minuscola apertura all'apice. Queste cupole imitano il processo di traspirazione posto all'interno di una foglia, fornendo un rilascio controllato di vapore acqueo per fornire caratteristiche di comfort stabili³¹. Altri esempi sono legati allo studio dei pinguini che attraverso l'interazione muscoli-piume possono modificare la resistenza all'acqua e l'isolamento termico della loro pelle: quando i muscoli sono contratti ottengono una completa protezione dell'acqua mentre a riposo sono protetti da uno strato windproof: la tecnologia derivante presenta una struttura a due layer che permette di regolare l'isolamento termico variando il volume d'aria intrappolato all'interno; sono stati prodotti poi dei veri indumenti ma non era garantita un completo isolamento. Un altro approccio deriva dalle foglie di loto che sono state utilizzate dall'azienda Tejiin .co® per la produzione del tessuto super-microsoft con superficie microporosa rivestita da un coating con una sostanza simile alla cera.²⁹

Tali tecniche possono anche essere utilizzate contemporaneamente per lo stesso componente; infatti, è comune trovare l'utilizzo di un rivestimento assieme ad una membrana (come il goretex) in modo che anche l'esterno del tessuto sia idrofobico e pertanto non risulta essere bagnato al tatto.

L'altro aspetto fondamentale per l'impermeabilità è legato alle cuciture e alle cerniere

2.4.3 CUCITURE

I rivestimenti elencati impediscono all'acqua di penetrare attraverso il tessuto, ma non impediscono all'acqua di entrare nello zaino attraverso le cuciture e le cerniere. E da tener presente che gli zaini di qualità inferiore hanno una densità di cuciture minore con un filo di minore qualità che limita la possibilità di avere fili sufficientemente tesi per ridurre gli spazi vuoti con i materiali adiacenti quando l'area è posta in trazione.; perciò la presenza di tali lacune consente una maggiore penetrazione dell'acqua. Uno zaino con un filo di qualità superiore, cucito e teso per evitare fessure, impedirà all'acqua di penetrare eccessivamente nello zaino, soprattutto se in accoppiamento con una fettuccia in nylon rivestito in PU o materiale impermeabile cucito interamente sulla cucitura esposta.

La maggior parte degli zaini è cucita con 6-10 punti per pollice (circa 2-4 punti per cm).¹⁷ L'opinione generale è che, se le cuciture vengono aumentate oltre il valore massimo indicato, la resistenza del tessuto inizia a diminuire per aumento degli stress locali derivanti dai punti di cucitura, mentre al di sotto del range proposto si potrebbe assistere a perdita di resistenza della cucitura stessa. Un altro fattore caratteristico e presente praticamente in tutti

gli zaini tecnici è il metodo delle cuciture doppie, in cui tutte le cuciture sono raddoppiate per una maggiore resistenza, compreso l'attacco della cerniera allo zaino. L'uso, su zaini meno costosi, di cuciture singole può causare facilmente il disaccoppiamento con la cerniera o con la parte di tessuto adiacente, decretando pertanto uno strappo o rottura della parte. La questione "cucitura" è dettata poi dalle correlazioni tra il tipo e la dimensione del filo, il tipo e il peso del materiale, la dimensione dell'ago e il tipo di cucitura. Il filo utilizzato nella fabbricazione degli zaini è un fattore importante, spesso trascurato e infatti molti zaini meno costosi, realizzati comunque con tessuti di buona qualità, si rompono sotto carico semplicemente perché il prodotto finito è stato realizzato con un filo inadeguato.

2.4.4 CERNIERE

La maggior parte dei produttori di zaini utilizzano cerniere in plastica "a spirale". Una cerniera a spirale è fondamentalmente un pezzo continuo di plastica che è stato formato a spirale e cucito su un pezzo di tessuto. Il vantaggio principale della cerniera a spirale è che se il tessuto si impiglia nei denti, può essere estratto delicatamente senza strapparsi. Questo è sicuramente un aspetto da tenere in considerazione, dato che lo zaino sarà talvolta stipato di indumenti, sacchi a pelo e tessuti in generale.

Alcuni zaini possono avere cerniere normali a denti solidi che non si staccano facilmente dal tessuto, ma sono più resistenti delle cerniere a spirale.

Altri zaini molto economici possono utilizzare cerniere a dente di metallo, in acciaio o in alluminio, che vengono solitamente evitate per problemi di peso, poca flessibilità ed eventualmente per acciai di basso valore con elevate % di C anche ricorrere a problemi di ruggine.

Le cerniere impermeabili sono disponibili, ma sono molto costose e possono più che raddoppiare il prezzo dello zaino finito e pertanto non vengono in genere utilizzate.

Tuttavia, è bene scegliere con attenzione, poiché queste cerniere hanno generalmente delle limitazioni di installazione, alcune sono soggette a danni causati da oggetti pesanti posizionati sulla stessa, richiedono un uso attento per evitare danni e disallineamenti dei denti (è necessario evitare bruschi piegamenti o torsioni).

2.4.5 SCHIUME

Le schiume polimeriche sono materiali cellulari polifase, cioè presentano almeno due fasi differenti: una matrice polimerica solida ed una fase gassosa; se la fase gassosa è continua la schiuma si dice a cella aperta, se le celle sono isolate dall'ambiente circostante, la schiuma viene definita a cella chiusa³⁴. Questi sono i due casi estremi, ma in realtà esistono schiume polimeriche che sono una media delle due con connessioni tra una certa quantità di cellule. Questo può essere un primo metodo di classificazione delle schiume ma ne esistono anche altri ad esempio:

- termoplastici (PE, polipropilene e così via) e termoindurenti (come PU o PU epossidico, epossidico);
- rigide o flessibili sulla base del loro comportamento meccanico;
- In base alla loro densità relativa (il rapporto tra densità della schiuma e densità del polimero); le schiume possono essere classificate in basse ($\rho R < 0,3$), medie ($0,3 < \rho R < 0,6$) o schiume ad alta densità ($\rho R > 0,6$)

Le proprietà della schiuma dipendono principalmente dal polimero di base, dalla microstruttura (tipo di cella, orientamento delle dimensioni ed altri parametri) e dalle condizioni del processo produttivo che determinano l'espansione permettendo di ottenere schiume con caratteristiche molto diverse. Proprio questo step di formatura è il principale responsabile della dimensione cellulare che si riferisce al diametro medio cellulare. Il modo più comune per determinare questo parametro è seguendo la procedura descritta dalla norma ASTM D3576. L'altro

metodo per misurare le dimensioni delle cellule dei solidi cellulari si basa sull'analisi dell'immagine con software di acquisizioni per determinare parametri come dimensione cellulare e sua distribuzione, la densità delle celle (cioè il numero di cellule per unità di volume) o il rapporto di anisotropia (R).

La dimensione delle celle e la densità della schiuma sono strettamente correlate a molte tecnologie di produzione. In molti casi si può affermare che minore è la densità maggiore è la dimensione della cellula, ma per esempio, questo non è vero per il caso del processo di dissoluzione del gas in cui si può raggiungere la stessa densità relativa con diverse dimensioni delle celle.

I parametri fondamentali per la determinazione delle caratteristiche meccaniche vengono di seguito presentati:

- **Distribuzione della dimensione cellulare:** Per qualsiasi schiuma, la dimensione delle celle è il risultato del valore medio della distribuzione statistica di ogni singola dimensione cellulare. La distribuzione delle cellule dipende dai materiali e dal processo utilizzato per la produzione. In termini generali, si ammette che più ristretta è la distribuzione, migliori saranno le proprietà fisiche;
- **Rapporto di anisotropia(R):** l'allungamento cellulare è la causa più comune di anisotropia. Esso viene definito come il rapporto tra la dimensione massima e quella minima le proprietà meccaniche di tali schiume saranno migliori nella direzione del principale orientamento dell'asse maggiore delle cellule, come anche per la conducibilità termica. Il controllo dell'anisotropia delle celle è uno degli altri parametri fondamentali per il controllo delle proprietà;
- **Frazione di materiale negli Struts. (f_s):** la frazione della massa presente nei montanti (frazione di solido nei bordi e nei vertici delle celle) per una schiuma polimerica è il rapporto tra la quantità di polimero presente nei bordi (intersezioni delle facce) e alla massa totale del polimero e può essere ottenuto misurando una sezione piana. Il modo in cui il materiale è distribuito nei montanti e nelle facce (l'architettura della schiuma) ha un enorme impatto sulle proprietà fisiche e deve essere quantificata;
- **Contenuto di celle aperte:** il contenuto di celle aperte di un materiale cellulare è definito come il rapporto tra il volume del gas contenuto nelle celle interconnesse (relativo alla schiuma esterna) e il volume totale di gas. Questo parametro può essere determinato utilizzando un picnometro di gas seguendo la procedura descritta nella norma ASTM D6226-10.

Infine, data la frequente condizione di compresenza di celle aperte e chiuse è utile anche valutare il rapporto tra la quantità di materiale cellulare a struttura aperta e a struttura chiusa: tale parametro è positivo per applicazioni come assorbimento o attenuazione delle onde sonore o in vaschette food grade destinate a contenere l'umidità, dove è necessario un certo numero di cellule aperte per controllare l'assorbimento dei liquidi attraverso i capillari della schiuma. La presenza di cellule aperte è positiva anche nei sistemi in cui è necessario un materiale a elevata resilienza dopo ripetute compressioni (sedili, materassi e così via) o per l'utilizzo in filtri selettivi. D'altra parte, un alto grado di interconnessione tra le celle è dannoso per la stabilità dimensionale in temperatura, la rigidità e la capacità di isolamento termico in quanto l'aria intrappolata nelle celle possiede una costante di conducibilità termica più alta del polimero. L'aumento del contenuto di gas significa una diminuzione delle proprietà meccaniche della schiuma. In altre parole, è previsto che le proprietà meccaniche diminuiscono al diminuire della densità della schiuma. Maggiore è la densità, maggiore è la rigidità della schiuma. In generale, una riduzione nella frazione di massa negli struts, cioè il polimero si trova principalmente nelle pareti cellulari, è una buona strategia per migliorare il modulo elastico senza modificare la densità. Inoltre, per le schiume a cellule chiuse (o semiaperte), l'aumento del contenuto di celle aperte è generalmente associato a una diminuzione delle proprietà meccaniche. Infine, l'anisotropia delle celle della schiuma ha un enorme effetto sulle proprietà elastiche della schiuma.

In breve, per applicazioni statiche di compressione a cui sono destinate le schiume per lavorare in regime elastico, una buona schiuma deve essere rigida, a celle chiuse, ad alta densità, e basso f_s (massa negli struts) e con elevato orientamento della cella nella direzione del carico. Per applicazioni dinamiche di compressione in cui sono destinate le schiume lavorare in regime elastico (carichi ripetuti), la schiuma scelta deve essere flessibile. La necessità di rimanere sempre nel campo di comportamento elastico durante l'utilizzo risiede in una perdita notevole di proprietà meccaniche delle schiume se sottoposte a sforzi ripetuti che eccedono dal campo elastico; infatti, come riporta la Figura 21 si nota una variazione della curva sforzo deformazione notevole all'aumentare del numero di cicli di carico che eccedono dalla zona elastica.

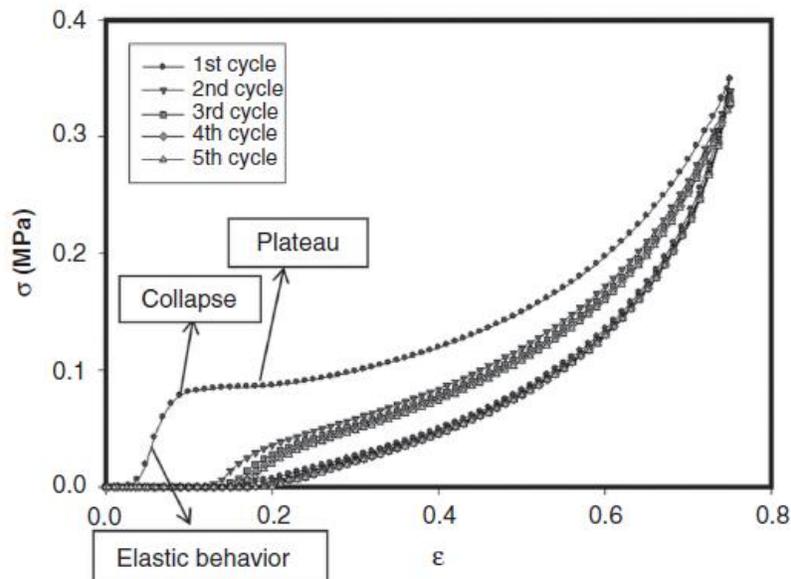


Figura 21: Andamento tipico della curva sforzo-deformazione in compressione di una schiuma soggetta a ripetuti cicli di applicazione dello sforzo³⁴

MECCANISMI DI SCHIUMATURA

Il processo di schiumatura si compone di 4 fasi principali:

- Dissoluzione di un gas in un polimero (mediante mezzi chimici o fisici, allo stato solido o fuso);
- Nucleazione cellulare: è il meccanismo responsabile della generazione delle cellule. Rappresenta il cambiamento tra due stati dinamici di equilibrio e corrisponde a un cambiamento improvviso delle variabili termodinamiche. In generale, le teorie della nucleazione considerano fondamentalmente due possibilità: nucleazione omogenea ed eterogenea. La termodinamica governa tutte le principali equazioni per descrivere il meccanismo di nucleazione. La nucleazione omogenea avviene senza la presenza di impurità che possono favorire la segregazione del gas e formare cavità gassose. Tuttavia, il tipo più comune di nucleazione nelle schiume polimeriche è la nucleazione eterogenea poiché i polimeri di solito contengono particelle e impurità. Secondo la teoria della nucleazione eterogenea, una cella con raggio maggiore di un certo raggio critico tende a crescere spontaneamente mentre una cella con raggio più piccolo collassa e il gas in essa contenuto viene nuovamente distribuito nella matrice fusa. La tensione superficiale del fuso polimerico gioca un ruolo critico nella nucleazione;
- Crescita e degenerazione cellulare: in questo step la fase gassosa aumenta di dimensioni dissipando energia per raggiungere eventualmente un nuovo equilibrio termodinamico. I tre principali meccanismi di

degenerazione cellulare sono il drenaggio, la coalescenza e l'ingrossamento. Il drenaggio avviene durante la formazione di schiuma a livello microscopico poiché la fase liquida scorre leggermente nelle celle di separazione dei film sottili. Come conseguenza di un drenaggio microscopico, il liquido accumulato nei montanti defluisce verso il basso a causa delle forze di gravità, che spesso portano a gradienti di densità macroscopici del materiale che spesso si concentra sul fondo della schiuma. Il secondo meccanismo di "coalescenza" è il risultato naturale dell'eccessivo assottigliamento della parete cellulare dovuto al drenaggio microscopico. Le pareti cellulari possono raggiungere fino a pochi nanometri in sistemi molto stabili con una tensione superficiale molto bassa. Ciò si traduce in una successiva rottura delle cellule, che è chiamata coalescenza. Il terzo meccanismo di degenerazione consiste nel movimento del gas promosso dalla diffusione dalle celle più piccole a quelle più grandi. La pressione è maggiore nella cella più piccola che in quella più grande; quindi, il gas tende a diffondersi e le celle più piccole tendono a scomparire a beneficio di quelle più grandi. La maggior parte dei problemi principali di qualsiasi processo di schiumatura sono associati alla terza fase (crescita e degenerazione cellulare). È necessario che il polimero di base (fuso o allo stato gommoso) sia in grado di allungarsi senza rompersi per effetto della pressione del gas. Questo comportamento è governato dalla reologia del polimero che, nella maggior parte dei casi, deve essere adattato utilizzando agenti reticolanti (chimici o fisici) per migliorare il comportamento sotto deformazione;

- Solidificazione del polimero e fissaggio della struttura: la tensione superficiale, il raffreddamento e la resistenza del materiale con la temperatura sono problemi critici in questa fase che aiutano a evitare distorsioni geometriche della schiuma a breve termine. A lungo termine, la permeabilità sbilanciata dei gas può essere un problema nel mantenimento della struttura della schiuma.

Di seguito vengono presentati alcuni dei processi di formatura industriali utilizzati per la creazione delle schiume.

ESTRUSIONE

L'estrusione di schiuma è un processo continuo utilizzato per polimeri termoplastici che consente di produrre film, fogli, profili e tubi di schiume a base polimerica con un'elevata produttività. Il gas coinvolto nella schiumatura può provenire da un agente espandente chimico miscelato con il polimero di base o da un agente espandente fisico (gas inerti, idrocarburi o idrofluorocarburi) aggiunto direttamente nell'estrusore, come mostra la Figura 22.

Il processo di espansione (crescita cellulare) in questo caso è rapido (si verifica nello stampo quando la pressione diminuisce bruscamente passando dal valore interno del cilindro alla pressione atmosferica) e corrisponde a un'elevata velocità di deformazione.

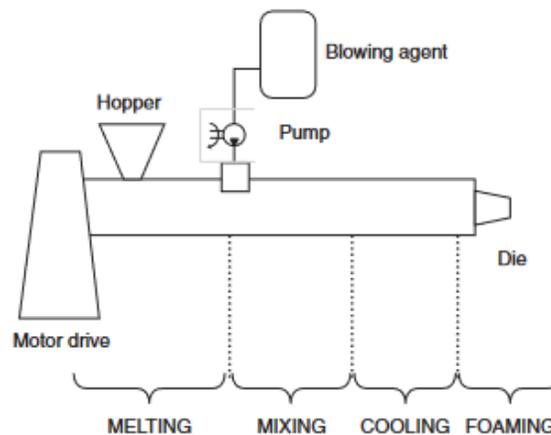


Figura 22: Schema del processo di estrusione per schiume³⁴

STAMPAGGIO AD INIEZIONE

Questa tecnica, utilizzata principalmente per polimeri termoplastici, è ben nota in diversi settori come quello automobilistico o degli elettrodomestici. I due metodi principali consistono nell'iniezione a bassa pressione, in cui una piccola quantità di gas/polimero viene iniettata all'interno dello stampo che viene riempito completamente per espansione raggiungendo la densità desiderata; invece nell'iniezione ad alta pressione, invece, il sistema polimero/gas riempie completamente uno stampo appositamente studiato che in una fase successiva permette di aumentare il suo volume interno, riducendo così la densità del materiale e promuovendo l'espansione. Come nel caso dell'estrusione, per la maggior parte dei polimeri termoplastici dissolvendo un gas nel polimero la temperatura di transizione vetrosa e la viscosità diminuiscono e ciò consente un flusso dello stampo e schemi di riempimento ottimali. Il processo di espansione (crescita cellulare) in questo caso è condizionato dalle dimensioni e dalla forma dello stampo. In questo caso, è consuetudine progettare stampi con fori di sfiato per ottenere una diminuzione controllata della pressione corrispondente a una deformazione a velocità di deformazione media del polimero di base.

SCHIUMATURA REATTIVA

La schiuma reattiva, utilizzata principalmente per i polimeri termoindurenti, è il metodo più popolare utilizzato oggi nell'industria delle schiume polimeriche. Secondo il processo di schiumatura reattiva, i prodotti finali di schiuma sono prodotti da una serie di reazioni chimiche (almeno due) che controllano, da un lato, la reologia del polimero e, dall'altro, il rendimento dell'espansione. Il processo di espansione (crescita cellulare) in questo caso è lento ed è la fase critica. Di solito, la finestra di schiumatura è stretta e le formulazioni devono essere adattate con attenzione utilizzando catalizzatori per regolare la cinetica dei due gruppi di reazione in modo da gestire la diminuzione della viscosità in contemporanea all'espansione per ottenere la densità target della schiuma.

SCHIUMATURA DI DISSOLUZIONE

Questa tecnologia si basa sulla dissoluzione di un gas (azoto o anidride carbonica) in una matrice polimerica utilizzando pressioni e temperature elevate in autoclave. La nucleazione della struttura cellulare è ottenuta mediante un rapido calo di pressione e successivo riscaldamento del polimero contenente gas ad alte temperature per espandere il materiale.

La dissoluzione del gas non è un processo industriale molto popolare (a causa dei grandi investimenti necessari in autoclave) ma è molto promettente. Con l'aiuto della reticolazione per irraggiamento, la dissoluzione del gas consente di schiumare quasi tutti i polimeri su scala di laboratorio, anche quelli noti come plastiche per alte temperature (amorfe come poliimmidi, polisolfoni o semicristalline come PTFE, PVDF) che altrimenti non potrebbero essere reticolati con i normali mezzi chimici.

STAMPAGGIO A COMPRESSIONE

Lo stampaggio a compressione è un processo di tipo batch in grado di produrre schiume spesse (fino a 120 mm). In questo metodo, la reticolazione e la decomposizione dell'agente espandente vengono eseguite in uno stampo chiuso solitamente sotto pressione in una pressa a caldo. L'espansione può avvenire in uno o due step a seconda del grado di espansione e quindi densità finale ricercata. In questo processo a due stadi, prima viene prodotto un precursore preespanso con agente espandente chimico, che nel secondo passaggio consente alla quantità rimanente di decomporsi inducendo espansione fino a 40 volte del volume di partenza e riempiendo completamente uno stampo preriscaldato. Lo stampaggio a compressione viene utilizzato industrialmente per produrre schiume poliolefiniche reticolate flessibili a bassa densità (principalmente a cellule chiuse), destinate ai mercati dell'isolamento termico o dell'assorbimento di energia, ma è anche in grado di produrre schiume in PVC reticolato rigido a bassa densità con applicazioni in pannelli strutturali e nel cuore delle strutture sandwich.

IL MERCATO DELLE SCHIUME

Secondo il rapporto “The Future of Polymer Foams 2019”³⁴ il mercato globale delle schiume polimeriche era nel 2013 di circa 19,1 milioni di tonnellate, corrispondenti a quasi 87 miliardi di dollari comprese le schiume utilizzate nelle applicazioni di costruzione, imballaggio, automotive e comfort. Nel 2019, il mercato si aggirava attorno a 25 milioni di tonnellate.

Il primo posto in base al consumo appartiene alle schiume PU, che rappresentano circa il 50% del mercato globale, contraddistinte da un'ampia gamma di densità, strutture cellulari e rigidità controllate da aggiustamenti formulativi.

La schiuma PU flessibile viene utilizzata principalmente nei trasporti (cuscinetti, anima paraurti, fodere, moquette e così via), mobili (biancheria da letto e imbottiture), applicazioni ricreative (giocattoli e sport principalmente) e packaging. Le schiume PU rigide sono utilizzate principalmente come isolanti termici nell'edilizia e negli elettrodomestici.

Il secondo posto è occupato dalle schiume di polistirene (PS) che vengono utilizzate principalmente nei mercati dei vassoi per alimenti, nell'isolamento nell'edilizia e nelle applicazioni di imballaggio (EPS di polistirene espanso). Le schiume PS combinano capacità di isolamento termico, modellabilità, ampia gamma di rigidità e buone proprietà di contatto con gli alimenti.

Il terzo posto appartiene alle schiume di polivinilcloruro (PVC) che hanno buone caratteristiche proprietà di isolamento termico e ottima resistenza meccanica

le schiume poliolefiniche (polipropilene, polietilene-PE e miscele) sono in costante aumento a causa del loro ampio spettro di applicazioni: imballaggio, ammortizzazione, galleggiabilità, automotive, sport. Le schiume poliolefiniche sono morbide e resiliente agli urti e presenta una buona resistenza chimica.

Le tipologie più comuni di schiume nel settore degli zaini sono EVA, poliuretani e PE ma ci possono essere anche altre formulazioni più specifiche. L'utilizzo di schiume serve per conferire morbidezza nella zona di contatto, pertanto, le proprietà ricercate sono la resistenza alla compressione, la velocità di ritorno elastico e la resistenza a trazione in quanto la schiuma e più in generale lo spallaccio non deve subire un significativo allungamento che comprometterebbe il posizionamento dello zaino sull'utilizzatore inducendo l'instabilità del carico. Quindi, è fondamentale che queste schiume lavorino il più possibile con un comportamento elastico in modo da garantire nel tempo lo stesso comportamento meccanico ed evitare alcuna alterazione definitiva di forma e spessore.

EVA

La schiuma EVA (etilene-vinil acetato) è la famiglia più utilizzata negli zaini più tecnici ma viene anche confusa anche dall'ugualmente utilizzato copolimero PEVA (PE-EVA).

Tra i tanti polimeri, i copolimeri di etilene vinil acetato (EVA) hanno una buona combinazione di proprietà come la resistenza agli agenti chimici e abrasione, flessibilità e gommosità che lo rendono a candidato idoneo per la preparazione di schiume polimeriche. Tuttavia, sono state condotte solo ricerche limitate sulla produzione di schiume EVA a causa della sua debole resistenza a fusione. Durante la formazione di schiuma, l'EVA non è in grado di resistere alle sollecitazioni di allungamento che agiscono sulle pareti cellulari poiché le bolle nucleate continuano a crescere fino a rottura con conseguente perdita del gas in espansione. Un metodo utilizzato per rallentare l'aumento di temperatura del vinil acetato VA in fase di espansione risiede nel crosslinking con perossido o per mezzo di radiazioni al fine di migliorare le proprietà meccaniche e la resistenza al calore. Sebbene le schiume EVA reticolate possano essere preparate utilizzando radiazioni ionizzanti, il metodo di reticolazione chimica ha trovato più applicabilità commerciale. La reticolazione aumenta la temperatura di fusione dell'EVA assicurando che le singole celle non possano né collassare né coalescere alla temperatura di lavorazione. Inoltre, la reticolazione normalmente conduce ad un miglior controllo sulla nucleazione e formazione delle cellule generando dimensioni

più uniformi. Quindi, si può preparare schiuma con alta qualità e bassa densità. Perciò con tale meccanismo di reticolazione si riesce a produrre un materiale schiumoso duro e resistente all'abrasione, particolarmente adatte per applicazioni sportive e calzature; le proprietà tipiche di tali schiume vengono presentate in Tabella 4 prendendo come esempio la schiuma Braskem PN2021 EVA Foam Copolymer.

Physical Properties	Metric
Density	0.940 g/cc
Vinyl Acetate Content	19 %
Melt Flow	2.1 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 190 °C
Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore A	89
Hardness, Shore D	38
Tensile Strength at Break	19.0 MPa
Elongation at Break	750 %
Secant Modulus	0.0330 GPa

Tabella 4: Tabella riassuntiva delle proprietà di Braskem PN2021 EVA Foam Copolymer³⁵

L'EVA, a volte chiamato commercialmente anche gomma espansa o gommapiuma, può variare nella quantità di acetato di vinile utilizzato, il che consente di vari copolimeri utili per gli zaini in durezze diverse (25/35/45 in durezza Shore), con spessori tipici di 3-14 mm¹. L'EVA è un ottimo materiale da utilizzare per costituire l'imbottitura in quanto ha una densità elevata rispetto alle altre schiume, è durevole e ha un veloce ritorno elastico.

Viene utilizzata anche a vista in quanto presenta una buona finitura superficiale e una pregevole rigidità strutturale. Lo svantaggio è dato dalla struttura a celle chiuse che ne limita la traspirabilità, ma è possibile lavorarla per creare fori che aumentino un possibile passaggio di aria (fustellatura).

POLIURETANO

Le schiume flessibili sono il più grande settore per i polimeri poliuretanicici in quanto il volume mondiale per le schiume poliuretanicche flessibili è circa la metà del volume totale dei tutti i prodotti poliuretanicci divisi circa equamente tra schiume rigide e rivestimenti, adesivi, sigillanti ed elastomeri.

La produzione delle schiume poliuretanicche, aventi come formula base quella mostrata in Figura 23, può avvenire con due metodi principali: la formatura di lastre e il successivo taglio per la forma voluta o attraverso stampa ad iniezione

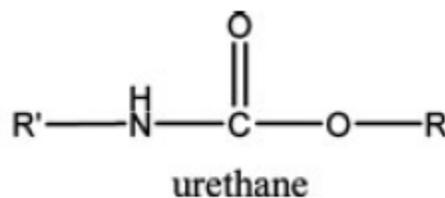


Figura 23: Formula chimica generica degli uretani³⁶

Il primo processo permette di ottenere lastre omogenee che rappresentano circa il 70% del volume prodotto. Le lastre continue di schiuma polimerizzano durante il trasporto su un nastro trasportatore ventilato. Durante il transito del nastro trasportatore, le reazioni del poliuretano avanzano e la schiuma prende forma. Alla fine del trasportatore la schiuma viene tagliata e sollevata in una zona di stoccaggio ben ventilata dove le reazioni di polimerizzazione possono procedere al completamento e l'interno della schiuma può raffreddarsi. I vantaggi della produzione di schiuma per lastre sono l'elevata produttività, i costi di manodopera sono relativamente bassi poiché il processo può essere facilmente automatizzato e non si necessita di particolari stampi per il taglio ad hoc della forma finale voluta. Uno dei principali svantaggi della produzione di schiuma per lastre è l'elevato tasso di scarto derivante dalla necessità di tagliare le lastre di schiuma di grandi dimensioni in pezzi più piccoli e poi in parti.

La seconda più recente tecnologia rappresenta solo circa il 30% dei volumi prodotti in lastre. Le schiume derivanti da stampo sono in genere più dense, più durevoli e dalle migliori proprietà meccaniche ma anche più costose. Il concetto di produzione della schiuma modellata è semplice: i componenti della schiuma vengono miscelati e quindi iniettato o versato in uno stampo. La schiuma ha un tempo di permanenza e successivamente viene tolta dallo stampo dove può continuare il processo di curing. La tecnologia della schiuma modellata è altamente ottimizzata in modo tale che il prodotto abbia un'elevata riproducibilità nella lavorazione e nelle proprietà finali.

Le proprietà medie delle schiume poliuretatiche vengono riportate in Tabella 5.

Physical Properties	Metric
Density	0.00800 - 1.39 g/cc
	0.159559 - 0.161321 g/cc @Temperature 121 - 177 °C
Water Absorption	0.010 - 72 %
Moisture Absorption at Equilibrium	2.0 %
Water Absorption at Saturation	0.30 - 20 %
Viscosity	23 - 27500 cP
	310 - 17000 cP @Temperature 15.6 - 48.9 °C
Thickness	27.9 - 12700 microns
Linear Mold Shrinkage	0.00080 - 0.011 cm/cm
Outgassing - Total Mass Loss 	0.30 - 1.73 % @Temperature 125 - 125 °C
	0.30 - 1.73 % @Time 86400 - 86400 sec

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore A	3.0 - 60
Hardness, Shore D	3.5 - 95
Hardness, Shore O	2.0 - 65
Hardness, Shore OO	10 - 45
Tensile Strength, Ultimate	0.0207 - 1900 MPa
	0.799792 - 1.24795 MPa @Temperature 121 - 177 °C
Tensile Strength, Yield	0.0814 - 103 MPa
Film Elongation at Break, MD	78 %
	74 - 74 % @Temperature 66.0 - 66.0 °C
	74 - 74 % @Time 346000 - 346000 sec
Film Elongation at Break, TD	32 %
	66 - 66 % @Temperature 66.0 - 66.0 °C
	66 - 66 % @Time 346000 - 346000 sec
Elongation at Break	3.2 - 760 %
Elongation at Yield	301 - 409 %
Modulus of Elasticity	0.000138 - 3.45 GPa
	0.000287511 - 0.0145893 GPa @Temperature 71.1 - 71.1 °C
Flexural Yield Strength	0.207 - 56.5 MPa
Flexural Modulus	0.00376 - 1.93 GPa
Compressive Yield Strength	0.00172 - 48.0 MPa
	0.0689476 - 44.1195 MPa @Temperature -53.9 - 177 °C
	0.124106 - 0.124106 MPa @Temperature 65.6 - 65.6 °C
	0.124106 - 0.124106 MPa @Strain 25.0 - 25.0 %
Compressive Modulus	0.0000276 - 1.28 GPa
	0.00169611 - 0.556862 GPa @Temperature -53.9 - 177 °C
Resilience	29 - 52
Rebound	19 - 31 %
Poissons Ratio	0.30 - 0.75
Shear Modulus	0.00152 - 8.01 GPa
Shear Strength	0.0896 - 30.2 MPa
	1.08937 - 1.40653 MPa @Temperature 121 - 177 °C
Izod Impact, Unnotched	0.347 - 0.972 J/cm
Charpy Impact Unnotched	0.378 - 1000 J/cm ²
Charpy Impact, Notched	0.380 - 1.40 J/cm ²
Coefficient of Friction	0.40 - 1.4
Tear Strength Test	30 - 137
Tear Strength	0.140 - 10.5 kN/m
Peel Strength	0.438 - 0.892 kN/m
Compression Set	0.00 - 87.3 %
Seal Strength	9.40 g/25 mm
	10.6 - 10.6 g/25 mm @Temperature 66.0 - 66.0 °C
	10.6 - 10.6 g/25 mm @Time 346000 - 346000 sec
Film Tensile Strength at Break, MD	207 MPa

Tabella 5: Tabella riassuntiva delle proprietà di una generica schiuma poliuretenica³⁵

Le schiume flessibili poliuretatiche vengono ampiamente utilizzate nella realizzazione di zaini da trekking in quanto riescono a garantire morbidezza e traspirazione, grazie alla loro struttura a celle aperte. Queste però non garantiscono tuttavia adeguate proprietà meccaniche e pertanto spesso viene accoppiato con schiume a maggior rigidità come quelle in EVA.

Schiume rigide

Le schiume rigide rappresentano circa il 25% del poliuretano totale volumi chimici. Molti dei componenti utilizzati sono uguali a quelli delle schiume flessibili, ma le condizioni di processo permettono l'ottenimento di proprietà fisiche diverse. Le schiume rigide sono generalmente utilizzate per la loro proprietà di isolamento, avendo principalmente una struttura a celle chiuse.

PE ESPANSO

La struttura cellulare e le proprietà della resina svolgono un ruolo importante nel controllo delle proprietà meccaniche e fisiche. Inoltre, l'orientamento cellulare indotto dal processo e il diverso numero di celle per direzione può rendere la schiuma anisotropa.

Le celle in genere hanno finestre poliedriche e sono strettamente imballate. Nella schiuma PE, si osserva una struttura cellulare chiusa e le cellule hanno confini cellulari distinti. Commercialmente si producono schiume con cellule di diametro compreso tra 0,5 e 1 mm. Le principali proprietà fisiche delle schiume di polietilene prodotte in varie densità da Ethafoam sono elencate nella Tabella 6.

Physical properties	Test method	Ethafoam® 150	Ethafoam® 180	Ethafoam® 220	Ethafoam® 400	Ethafoam® 600	Ethafoam® 900
Approx. Density (kg/m ³)	ASTM D3575-14	24	29	35	64	96	140
Compression Strength, psi 25%/50%	ASTM D3575-14	7/14	8/16	10/18	17/28	28/45	60/90
% Creep	ASTM D3575-14	< 10% @ 1.3 psi	< 10% @ 2 psi	< 10% @ 2.5 psi	< 10% @ 5 psi	< 10% @ 10 psi	< 10% @ 20 psi
Tensile Strength, psi	ASTM D3575-14	23	24	31	43	65	120
Tear resist., lb./inch	ASTM D3575-14	7	7.5	10	17	22	35
Cell size, mm		2.5	2.0	1.5	1.4	1.2	1.1
Thermal stability (%)	ASTM D3575-14	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Thermal Conductivity k, Btu-in/hr ² .°F	ASTM C518-91	0.49	0.49	0.43	0.43	0.43	0.43
Thermal resistivity R, Hr.ft ² .°F/Btu	ASTM C518-91	2.0	2.0	2.3	2.3	2.3	2.3

Tabella 6: Proprietà schiuma Ethafoam a diversa densità relativa³⁷

Nel settore zaini solitamente questa schiuma non viene utilizzata dai costruttori per parti in vista date le sue basse proprietà estetiche. Inoltre, presenta una struttura a celle chiuse e pertanto il ritorno elastico dovuto alla compressione risulta spesso non essere completo. Date le più basse proprietà rispetto alle schiume in EVA o poliuretatiche spesso viene utilizzata in zaini di minor pregio e livello tecnico.

2.4.6 RETE

La rete è una forma a maglia aperta di costruzione del tessuto che è tenuta insieme da nodi o fili termoplastici fusi in ogni punto in cui i fili si incrociano. Esistono diverse mesh geometriche: quadrate, esagonali e ottagonali. La rete può essere realizzata con qualsiasi tipo di fibra e può essere sia morbida che rigida. I tessuti a rete sono relativamente fragili e richiedono cura nella manipolazione e pulizia. I tessuti a rete strappati non possono essere

riparati in modo soddisfacente perché la riparazione sarebbe evidente. Le reti sono classificate come a bobina, tulle, fishnet, a filetto.

- Bobina: è una rete esagonale che può essere molto sottile sia trasparente che ruvida e opaca a seconda del titolo del filo del materiale utilizzato per produrla;
- Tulle: è una rete esagonale fine e rigida realizzata con filati di seta o nylon. È molto simile a una bobina ma più leggera. Viene generalmente utilizzato per rifinire articoli di abbigliamento;
- Fishnet: è una costruzione a maglia aperta grossolana creata annodando la rete in un modo simile al nodo di un pescatore;
- A filetto: è una costruzione a maglia quadrata. È un tessuto fine e sottile e ha una forma a diamante aperto con fori simili a un esagono.

Questi tipi di materiali sono quelli preferiti dalle aziende per gestire l'interazione con il corpo in quanto garantisce un'elevata traspirabilità del sistema.

Nel campo sportivo le reti utilizzate risultano essere costituite da fili a titolazione maggiore rispetto a quelli del campo della moda al fine di poter garantire una maggiore resistenza durante l'utilizzo. Per questo tipo di applicazioni spesso le reti utilizzate sono anche di tipo 3D, in modo da avere un miglior ricircolo d'aria a contatto con l'utilizzatore al fine quindi di aumentare il comfort termico ma anche per amplificare la morbidezza della schiuma. La geometria strutturale tipica è quella a nido d'ape.

Queste reti possono essere anche utilizzate per telai morbidi negli zaini più piccoli; infatti, a lungo termine sono inclini ad allungarsi e poi alla fine a collassare se sottoposti a carichi importanti. Queste reti vengono però anche utilizzate per la produzione di sistemi di supporto (backsystem) per zaini tecnici per migliorare la ventilazione.

2.4.7 INNOVAZIONI PER INTERAZIONE UOMO-ZAINO IN TERMINI DI MATERIALI, MESH DEGLI SPALLACCI, ALTRI COMPONENTI

L'azienda Zotefoam utilizza una particolare tecnica di espansione che permette di ottenere un migliore controllo sulle singole celle sia in termini di dimensione che di distribuzione, come riporta la Figura 24, creando così una schiuma più densa e con una maggiore resistenza a compressione utile negli zaini Evergoods® EV50.

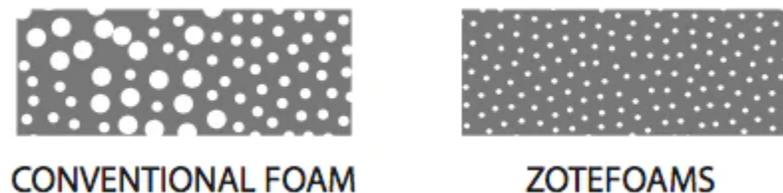


Figura 24: Schiuma convenzionale vs schiuma Zotefoam³⁸

Questa tecnologia³⁹ è basata su 3 step di processo:

- Estrusione e crosslinking: dopo aver estruso il polimero in una lastra continua: questi passano in un forno dove viene attivato il processo di crosslinking, successivamente avviene il raffreddamento ed il taglio;
- Saturazione in azoto: è il cuore della tecnologia. i pannelli ottenuti dallo step precedente vengono posti in autoclave, riscaldati sopra il punto di fusione (fino a 250°C) e pressurizzati con azoto (675 bar) in modo che questo diffonda nel materiale: una rapida depressurizzazione favorirà la destabilizzazione dell'azoto

che nuclerà in celle. Successivamente, le singole lastre saranno raffreddate sotto pressione mantenendo così l'azoto intrappolato nelle piccole celle formate nelle lastre ma non ancor espanse;

- **Espansione:** con il terzo stage in un'autoclave più grande, le lastre ricche di azoto sono riscaldate a 250°C e sottopressione (17 bar): successivamente si riduce la pressione in modo da favorire l'espansione omogenea e isotropa.

I sistemi che saranno presentati sono studiati per distribuire il carico in diverse regioni ma nessuno di questi è studiato per ridurre il carico verticale totale: questo sarebbe un aspetto molto importante in quanto si ridurrebbe il carico su ogni articolazione interessata e inoltre si potrebbero ridurre le sollecitazioni indotte anche nei casi in cui questi risultano meno efficaci cioè quando l'inclinazione del busto supera i 30° (quando il carico super il 30% BW)².

I sistemi più comuni, uno dei quali è riportato nella Figura 25, sono quelli che rendono possibile la regolazione del punto di ancoraggio tra “telaio/imbragatura” e spallaccio in modo da consentire ad utilizzatori di altezze diverse di trovare la migliore stabilità del carico. Esistono pertanto diversi sistemi a seconda della casa produttrice e comprendono sia zaini con telaio esterno che interno.



Figura 25: Esempio di sistemi di regolazione¹⁹

L'altro tipo di sistema ricorrente è la presenza di una rete o di un tessuto in mesh traspirante a contatto con la schiena dell'utente: come si evince dalla Figura 26 questa è collegata al corpo e agli spallacci dello zaino e ha la funzione di separare la schiena dal retro dello zaino in modo da favorire la circolazione d'aria e ridurre la sudorazione, ma comporta ai fenomeni precedentemente descritti di instabilità per allontanamento del carico dal baricentro del corpo. Per ridurre il più possibile la perdita di stabilità del carico data dalle basse proprietà meccaniche e conseguente cedimento a trazione delle reti questi cuciti con tessuti rigidi che possano mediare la rigidità del componente



Figura 26: Sistema di supporto a rete¹⁹

Un altro metodo per aumentare il comfort termico che si sta sperimentando in questi ultimi anni è l'utilizzo di parti in schiuma alternate a zone cave, sia per quanto riguarda gli schienali che per gli spallacci, come viene mostrato in Figura 27.

L'ottenimento di un buon compromesso tra comfort termico ed ergonomico è un argomento altamente discusso e molto soggettivo a seconda dell'utilizzatore: pertanto ogni produttore prevede diversi tipi di supporti, schienali e imbottiture (back system) in modo da soddisfare al meglio la diversa richiesta da parte dei clienti.



Figura 27: Esempi della modellazione innovativo di una schiuma per lo schienale e per lo spallaccio di uno zaino da trekking¹⁹

Un nuovo componente che viene proposto è la presenza di un binario di rigidità laterale lungo l'asse maggiore dello zaino che si congiunge nella parte inferiore alla fascia lombare: questo permette di trasferire fino al 40% del carico verticale dalle spalle alle anche riducendo l'inclinazione in avanti incrementando il momento estensore attorno all'asse medio-laterale delle vertebre L4 e L5.⁴⁰

Un sistema meccanico definito "Floating Suspension" composto da un supporto dotato di due guide laterali a cui viene agganciato il corpo dello zaino: in tale modo il carico è libero di muoversi in verticale a seconda delle oscillazioni indotte dall'andatura o dal terreno.¹⁹ Altri test condotti basati su un sistema prototipale simile indicano una significativa riduzione del consumo metabolico, per i soggetti presi in esame, durante la camminata e la corsa del 8,81% e 6,99% rispetto allo zaino tradizionale⁴¹. Rispetto alla configurazione con telaio rigido esterno si è registrata una riduzione dello stesso parametro ancora maggiore rispettivamente del 15,25 in camminata e del 12,53% durante la corsa.

Un'altra innovazione possibile è stata studiata per l'impiego di leghe metalliche a memoria di forma per andare a smorzare le vibrazioni indotte dal carico durante la camminata. Dal momento che le leghe a memoria di forma (SMA) possiedono stabilità geometrica maggiore e proprietà pseudoplastiche, vengono impiegate come ammortizzatori a temperature superiori alla loro temperatura di fine austenitizzazione, utilizzabili in assorbitori di energia SMA per gli spallacci. Queste particolari leghe, infatti, presentano trasformazioni strutturali e geometriche diverse a seconda della storia termica e della sollecitazione meccaniche a cui sono sottoposte. Tale tecnologia risulta ancora acerba e pertanto Ulteriori studi saranno necessari per migliorare la robustezza e renderla integrabile nei prodotti commerciali.⁴¹

Osprey® è il primo produttore di zaini a utilizzare la tecnologia Carbon, mostrata in Figura 28. Il supporto lombare ideato "Fitscape" stampato in 3D di Osprey UNLTD offre ventilazione, supporto ottimizzato e una superficie antiscivolo per mantenere i carichi saldamente in posizione. La struttura reticolare è prodotta con la tecnologia Digital Light Synthesis (DLS) con resina poliuretanic elastomerica EPU 41 di Carbon, sfruttando la proiezione della luce su resine liquide per produrre parti polimeriche con un buon compromesso di proprietà meccaniche, risoluzione e finiture superficiali. Inoltre, il design a traliccio viene proposto dall'azienda come una combinazione di zone di comfort, che alternano supporto e ammortizzazione. A differenza della schiuma, che tende a trattenere il calore, la struttura reticolare dissipa lo stesso, aumentando la traspirazione. Questa tecnologia è stata successivamente anche utilizzata da altre aziende come Adidas®, Rawlings® e Specialized® nel settore delle calzature, dei caschi e delle selle di biciclette.²⁵



Figura 28: Osprey® fitscape UNLTD⁴²

2.5 COMFORT MECCANICO E TERMOFISICO

Come indicato in precedenza gli studi di ricerca sono indirizzati verso l'interazione uomo-zaino al fine di evidenziare le problematiche fisiche indotte dallo zaino e successivamente progettare design sulla base di tali evidenze scientifiche. In questo capitolo si vuole quindi fornire una panoramica dei problemi riscontrati.

Al fine di poter individuare gli aspetti tecnici funzionali e costruttivi influenti sul comfort, numerosi studi di ricerca si sono interessati degli eccessivi carichi a cui quotidianamente gli alunni sono sottoposti, in quanto questo è da molto tempo indicata come una delle cause di problemi alla colonna vertebrale degli adolescenti: infatti^{43,44} si stabilisce come peso limite il 10-15 % del peso corporeo (BW), ma normalmente la media dei carichi che viene sostenuta quotidianamente da essi è superiore e raggiunge anche il 30%BW o addirittura per alcuni corpi militari fino al 75%BW⁴⁵. Nella Figura 29 viene riportata una serie di valori indicativi dei pesi massimi che uno studente dovrebbe trasportare quotidianamente.

Shruti's recommendation of 10% of body weight	
Student weighing 30 kg (66 lb)	3 kg
Student weighing 40 kg (88 lb)	4 kg
Student weighing 50 kg (110 lb)	5 kg
Student weighing 60 kg (132 lb)	6 kg
US Army ²	
In combat	
Recommended	22 kg
Actual	40 kg
While marching	
Recommended	33 kg
Actual	69 kg
Load allowed by Italian labor laws for workers older than 18 y ³	
Women	20 kg
Men	30 kg

Figura 29: Comparison of weight recommendations for carrying or lifting⁴⁶

2.5.1 CARICAMENTO ZAINO- INFLUENZA DEL SUPPORTO CON TELAIO

Un altro aspetto fondamentale che è una delle cause principali di dolori, assenza di comfort e modifica della postura è il caricamento e la rispettiva distribuzione dei pesi nello zaino: a tal proposito si propongono in letteratura differenti posizioni ottimali del baricentro del carico tra adulti e bambini⁴⁷. Più specificatamente viene indicato che lo zaino si dovrebbe trovare sopra i fianchi con la parte inferiore all'altezza delle vertebre lombari con il baricentro sulla vertebra T12.⁴⁸

Inoltre, è indicato come l'uso di spallacci lunghi con zona di contatto attorno alla vertebra S1, produce un'area di contatto ridotta concentrando il carico dello zaino su entrambe le spalle, ma un minor interessamento muscolare a livello cervicale che a lungo termine può causare dolori cronici del trapezio superiore a causa di un maggiori pressioni.⁴⁹

Invece, spallacci più corti incrementano la zona di contatto distribuendo maggiormente alcune forze sulla schiena e diminuendo lo stress sulle spalle.

Anche se una maggior lunghezza degli spallacci provoca una minor attivazione muscolare a livello cervicale, a lungo termine può causare dolori cronici del trapezio superiore a causa di un aumento della componente compressiva del peso dello zaino.⁴⁹

Tali posizioni influenzano notevolmente la presenza di oscillazioni del carico che amplificano le forze in gioco che l'utente deve bilanciare causando così un aumento dell'attività muscolare, riducendo ancora l'efficienza metabolica.⁵⁰

Tale questione viene ancora discussa indicando come la posizione ottimale che minimizza la distanza tra centro di massa del corpo e centro di massa dello zaino: pertanto a seconda della struttura fisica dell'utilizzatore è consigliato un posizionamento maggiormente spostato verso la zona superiore della schiena per limitare l'inclinazione in avanti del tronco e per ridurre infortuni ai piedi, oppure un abbassamento del baricentro dello zaino^{2,47}.

Inoltre, l'utilizzo di telai di supporto, composti da un sistema mobile montato su una struttura rigida, è benefico solamente se l'inclinazione del busto non supera i 30°. I telai di supporto sono utili per andare a ridurre le oscillazioni dello zaino durante il ciclo di camminata fino all'80%, infatti parte del carico sarà presente costantemente per tutto il ciclo mentre una componente dinamica avrà un andamento periodico concorde alle diverse fasi della camminata. Questi sistemi sono risultati efficaci per andature tra i 3 e 6 Km/h e carichi maggiori al 25% del BW, ovvero le condizioni di camminata più popolari per utilizzatori esperti.²

La questione del corretto caricamento è l'aspetto più ricorrente nella preparazione dello zaino e solitamente viene condivisa da video esplicativi o dimostrazioni direttamente dalle aziende o molto più spesso ai giorni d'oggi viene spiegata nei vari siti divulgativi di outdoor; nella Figura 30 viene riportato un esempio di come dovrebbe essere distribuito il carico all'interno dello zaino.

Le cinghie di stabilizzazione si sono rivelate meno utili durante attività di scalata o arrampicata, in quanto allentandole si facilita il movimento dell'anca richiedendo però uno sforzo maggiore da parte delle spalle. Invece, per escursioni su un sentiero uniforme, risulta comodo tirare contemporaneamente le due cinghie di stabilizzazione del carico inferiore per avvicinare lo zaino alla schiena e alla parte bassa della schiena allentando gli spillacci, in modo da avere una maggiore distribuzione del peso sulla parte bassa della schiena.¹⁷



Figura 30: Consiglio caricamento zaino⁵¹

2.5.2 ZONE SOLLECITATE E STUDI MEDICI

Durante l'utilizzo corretto dello zaino vengono rilevate come zone maggiormente sollecitate e dove si riscontrano maggior dolori quella delle spalle (70% degli intervistati) seguita da quella della schiena con solo il 18% dei casi.⁵²

Le zone maggiormente sollecitate vengono studiate in primo luogo per andare a misurare l'effettiva pressione e la relativa insorgenza di dolore^{44,45}. I dolori riscontrati sono dovuti ad una maggiore sensibilità sub cutanea dell'area delle spalle con potenziali irritazioni e appunto insorgenza di dolori: dal punto di vista medico irritazioni superficiali e interne vengono già indicate con pressioni tra i 9 e 14 kPa per esposizioni di 1 ora e 32 kPa per esposizioni fino a 2 ore ore.^{45,53,54}

Le effettive sensazioni di discomfort vengono registrate con pressioni superiori ai 20 kPa e massimo livello accettabile di 45 kPa⁵⁵. Le maggiori pressioni che sono state registrate sono di 140 kPa.^{2,56}

Il trasporto continuativo di carichi eccessivi può interessare anche parti del corpo non propriamente adiacenti allo zaino, quali piedi, gambe e ginocchia, come riporta la Figura 31, che possono risentire fortemente di un aumento del peso da sorreggere, risultando nei casi più gravi in fratture da stress, sulla base dei risultati ottenuti da alcuni test effettuati in reparti militari confrontando diversi carichi, diverse configurazioni di carico e a diverse attività svolte con o senza carico per entrambi i sessi.⁵⁷

L'altra zona direttamente a contatto con lo zaino è la zona lombare. Le forze di carico si sviluppano quindi lungo la colonna vertebrale e sono principalmente forze di compressione, ma contengono anche una componente di taglio che ha dimostrato di avere una maggiore influenza significativa sullo sviluppo del generico "mal di schiena". Il corpo ha due meccanismi per alleviare queste forze: cambiando la curvatura della colonna vertebrale e aumentando l'inclinazione in avanti.

È stato dimostrato che gli zaini tradizionali inducono problemi di lordosi, una condizione in cui la colonna lombare si curva in modo convesso; questo avviene per spostare il baricentro del corpo più avanti per tenere conto dell'aumento del carico nella zona posteriore. Tale condizione, come già indicato negli studi precedenti, aumenta le sollecitazioni di torsione e taglio nei dischi spinali con conseguenti danneggiamenti. Questi meccanismi concorrono tutti allo sviluppo dei dolori in questa regione.

Altre conseguenze riscontrate sono causate dall'aumento del carico sull'articolazione lombosacrale anche per coloro che utilizzano lo zaino per brevi tragitti come avviene per gli studenti, senza però fornire una correlazione precisa tra modifica dell'attività sinergica muscoli-articolazioni e dolore.⁵⁸

Sempre a livello lombare viene anche registrata una diminuzione dei volumi intervertebrali già solo dopo alcune ore di utilizzo, per una maggior perdita di liquido da essi.⁵⁹

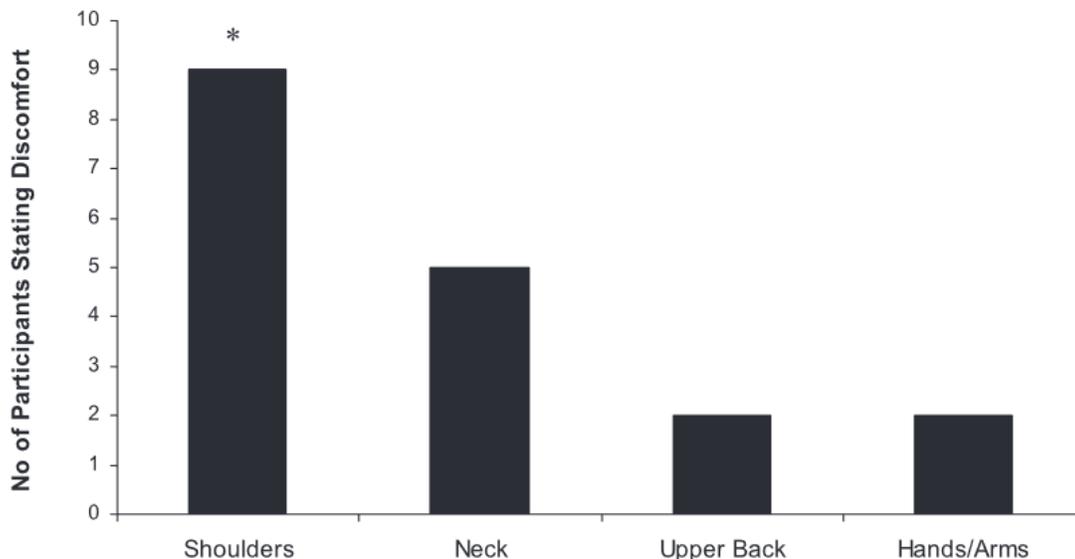


Figura 31: Zone maggiormente influenzate dall'utilizzo di uno zaino⁶⁰

La collaborazione di enti di ricerca ed enti gestori di parchi naturali, sedi di una notevole attività escursionistica, permette di avere numerosi dati sulla base di questionari e sondaggi relativi ad infortuni e problemi riscontrati durante tali attività. Nello specifico questi sono correlati all'utilizzo prolungato di pesanti zaini su terreni accidentati ⁶¹. Le cause principali sono: carico eccessivo, problemi di obesità e infortuni precedenti non completamente recuperati. ⁶² I tassi di infortunio riscontrati sono dell'ordine del 10% ma se si considerano anche perdita o assenza di comfort allora queste percentuali possono salire fino all' 80% degli intervistati. ^{63,64}

Le parti del corpo maggiormente citate dai backpackers sono ginocchia, piedi con sindrome da stress tibiale mediale, Tendinite di Achille, sindrome della fascia ileo-tibiale o fratture da stress, come mostra la Figura 32. ⁶⁵

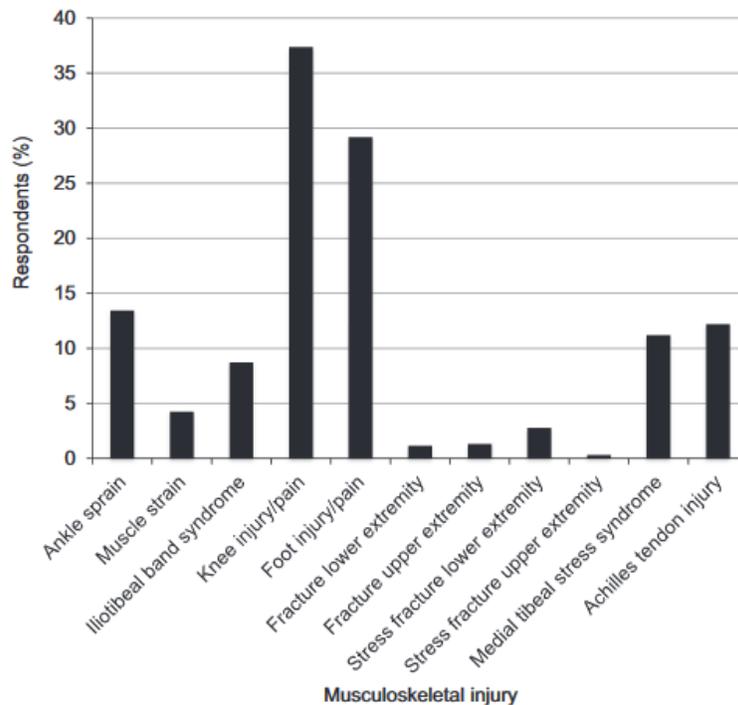


Figura 32: Esempio di alcuni dei principali infortuni indotti dall'utilizzo prolungato di uno zaino da trekking⁶⁵

Altre ricerche invece utilizzano come oggetto di studio i corpi militari che spesso presentano una condizione fisica media più prestante, ma sono sottoposti a sforzi maggiori e di maggior durata.⁵⁷ Sempre in ambito militare viene riscontrata la cosiddetta paralisi dello zaino (BPP) sia una problematica non indifferente nei reparti militari americani e coreani, oggetto di test: molti più soldati sottoposti a prolungate attività con zaini risentono di parestesia negli arti superiori con intorpidimento o formicolio prevalente all'anulare o mignolo, solamente durante la marcia per poi svanire finita l'attività ⁶⁶⁻⁶⁸. In altri casi questa problematica può continuare con altri sintomi come quelli della BPP. Tali problemi si pensa possano essere causati prevalentemente da stiramenti nei punti C6 e C5 dei "nerve roots, piuttosto che dall' intrappolamento vero e proprio del nervo toracico ⁴⁵. Dai risultati ottenuti monitorando diverse entità di carico⁶⁹, si evidenzia come tali effetti siano proporzionali al carico supportato, con un incremento della numerosità di casi per le categorie di carico tra i 4.5 e i 9 Kg (30%), tra i 9.5 e i 13.5 del 50 % e superiore ai 14 Kg del 68%.

Un'altra tipologia di malessere riscontrato è data dalla pressione indotta dall'Hip belts che può portare ai sintomi di intorpidimento della parte esterna della coscia, tipici della meralgia parestetica o sindrome di Bernhardt-Roth.⁷⁰ L'utilizzo e le conseguenze dei diversi accessori dello zaino sono presentati anche in altri studi dove però l'utilizzo di un telaio di supporto e la cintura lombare risultano benefici sia in termini di performance che di comfort ^{45,71,72}. Tale fattore viene evidenziato in soli 10 min di utilizzo grazie al monitoraggio di valori di VO2 (Oxygen

consumption , rating of perceived exertion (RPE), respiratory exchange ratio (RER), and heart rate (HR)⁷³. Ci sono dati in letteratura contrastanti sulla percentuale di carico che può essere effettivamente trasferita alla zona dei fianchi con l'utilizzo della hipbelt tra il 30 % e l'80%.^{74,75}

Inoltre, permette una maggiore rotazione trasversale e incremento della stabilità tra bacino e torace, soprattutto quando il carico è superiore al 40% del peso corporeo. La combinazione della fascia lombare con un telaio di supporto può ridurre l'incidenza dell'insorgenza dei fenomeni di paralisi. Per tale argomento quindi la maggior parte dei dati è coerente tra i vari studi nonostante l'uso di diversi modelli di zaini, la variabilità dei partecipanti e la differenza delle procedure di test adottate. Durante l'utilizzo di una cintura in vita aumentano le pressioni e il disagio in questa zona ma si nota che a parità di pressioni la zona lombare sia meno sensibile rispetto alle spalle aumentandone pertanto il comfort.

Gli stessi problemi riscontrati nei test militari citati vengono riscontrati anche tra gli alpinisti.²

Il comfort ergonomico ricercato non è l'unico aspetto che viene studiato durante la progettazione in quanto gli utenti richiedono anche una condizione di comfort termico durante l'utilizzo: la soddisfazione di tale aspetto risiede spesso nella progettazione di schienali e spallacci che prevedano un sistema di ventilazione o un'area di contatto zaino-utente minore al fine di limitare lo scambio termico. I sistemi più moderni presentano solitamente dei pad in schiuma o in rete che forniscono supporto nei punti di contatto ma al contempo riescono a separare la schiena dal corpo principale dello zaino; lo svantaggio della maggior parte di questi, in termini di comfort ergonomico, risiede nell'aumento della distanza tra il baricentro del corpo e il baricentro dello zaino, aumentandone così l'instabilità del carico e delle oscillazioni con conseguente aumento dell'attività muscolare dell'utilizzatore.^{76,77}

2.5.3 MODIFICHE BIOMECCANICHE INDOTTE DALL'UTILIZZO DELLO ZAINO

Altre influenze indotte dall'utilizzo dello zaino si hanno per la biomeccanica della camminata e l'effettivo aumento dell'indice metabolico- ad esempio l'utilizzo dello zaino modifica la posizione del busto, del collo e dell'andatura: in particolare l'utilizzo dello zaino arretra il baricentro del sistema corpo-zaino decretando quindi l'avanzamento della testa e l'irrigidimento dei muscoli cervicali.^{47,78,79} Alcuni dati raccolti come battito cardiaco, test VO₂, pressione del sangue e respirazione e indice biomeccanici come posizione del tronco vengono poi utilizzati per valutare l'aumento del metabolic rate in diverse attività e terreni.⁷¹

Inoltre, l'utilizzo dello zaino va a limitare la stabilità del centro di massa del corpo andando ad aumentare l'attività muscolare necessaria per mantenere l'equilibrio.⁷⁹

Numerose differenze numeriche di dati sperimentali si riscontrano nei vari articoli citati in quanto le condizioni di test sono molto differenti in termini di carico, zaino utilizzato e tester, limitando perciò la facilità di confronti e possibili correlazioni diretti tra i diversi studi. Il fattore "tester" induce notevoli discrepanze in quanto l'effettiva zona di contatto e problemi indotti varia molto per differenze antropometriche e caratteristiche fisiche dei tester. Si può dedurre infatti che persone molto magre possiedono aree di contatto minori e quindi pressioni locali maggiori rispetto a soggetti di corporatura più robusta.

3 ANALISI FEM O FEA DELLO SPALLACCIO

FEM Finite Element Method o FEA Finite Element Analysis indicano lo stesso approccio ad un tipo di analisi computerizzata comunemente utilizzata nell'ambito dell'ingegneria meccanica, aerospaziale, automobilistica e civile, nonché biomeccanica.

L'utilizzo dell'analisi agli elementi finiti può ridurre il numero di prototipi fisici creati e di esperimenti eseguiti, ottimizzando al contempo tutti i componenti durante la fase di progettazione. I software di analisi agli elementi finiti sono emersi negli anni '70 con programmi come Abaqus®, Adina® e Ansys®. Oggi, è comune trovare test virtuali e ottimizzazione del design integrati nel ciclo di sviluppo del prodotto per migliorare la qualità del prodotto finale e ridurre il tempo necessario per l'immissione sul mercato.

3.1 TIPOLOGIE DI ANALISI FEM

Durante l'analisi agli elementi finiti possono essere simulati diverse condizioni di sollecitazione, come ad esempio:

- Analisi statica strutturale: questo tipo di FEA analizza un modello in scala basato su proporzioni. Il test sostiene che qualsiasi struttura solida su piccola scala sarà in grado di gestire le stesse interazioni con la struttura a scala reale e produrre gli stessi risultati;
- Analisi termiche: questo test è utile per valutare le sollecitazioni indotte da variazioni di temperatura;
- Analisi modale: ogni oggetto vibra a una frequenza, quindi è importante utilizzare l'analisi modale per testare in che modo le vibrazioni esterne influiscono sulla struttura del prodotto;
- Ingegneria dei calcoli sismici: questo test aiuta gli sviluppatori a comprendere le prestazioni del prodotto quando si tratta di varie frequenze di terra e vibrazioni, garantendo robustezza per la struttura finale.

3.2 PRINCIPI DELL'ANALISI FEA

L'analisi degli elementi finiti si basa su principi che includono condizioni al contorno, come forze e pressioni, nonché tre equazioni di governo:

- Equazioni di equilibrio;
- Relazioni deformazione-spostamento, che misurano la deformazione che la geometria subisce sotto ogni dato impatto esterno;
- Equazioni costitutive, che sono relazioni tra due quantità fisiche, specifiche per un determinato materiale, che predicono la risposta del materiale agli stimoli esterni.

3.3 COME FUNZIONA L'ANALISI FEA

Affinché l'analisi agli elementi finiti porti al risultato finale cercato, è necessario creare una mesh, composta da elementi 3D che insieme formano la struttura. I calcoli matematici vengono quindi eseguiti su ogni singolo elemento; la combinazione di ciascuna di queste singole risposte fornisce il risultato finale per l'intera struttura e pertanto maggiore sarà l'infittimento della mesh e maggiore sarà la precisione di calcolo, ma anche il costo computazionale e quindi il tempo di risoluzione.

Questo processo può essere ulteriormente suddiviso in tre fasi: il pre-processo, il processo e il post-processo.

Durante la fase di preelaborazione, all'utente viene chiesto di selezionare il tipo di analisi, come l'analisi modale o l'analisi statica strutturale, nonché il tipo di elemento. Successivamente, devono essere definite le proprietà del materiale e devono essere creati i nodi per il calcolo. Gli elementi vengono quindi costruiti assegnando la connettività ai nodi. Infine, vengono applicate le condizioni al contorno e i carichi.

Il computer esegue il secondo passaggio, il processo. Durante questa fase, il computer risolve il problema numericamente e presenta i risultati all'utente.

Durante la fase di post-elaborazione, l'utente rivede i risultati generati quali, ad esempio:

- Spostamento
- Temperatura
- Storia del tempo
- Fatica
- Sforzo
- Frequenza naturale

L'analisi agli elementi finiti fornisce solamente una simulazione del reale comportamento e pertanto è utile considerare errori intrinseci del calcolo indotti ad esempio dalla semplificazione della geometria e l'uso di tecniche di integrazione di base; errori di calcolo derivanti da difficoltà numeriche o approssimazioni di calcolo.

Le simulazioni FEM pur essendo molto versatili e quindi utilizzate in molti campi ingegneristici non riscontrano un grande successo nella progettazione di attrezzature sportive quali gli zaini; ciò è dovuto in parte alla complessità sia delle geometrie sia per la presenza di numerosi materiali diversi accoppiati o in relazione l'uno con l'altro. Dal punto di vista strutturale inoltre è doveroso considerare che in questo settore si ha spesso a che fare con tessuti e materiali morbidi che permettono una grande libertà di movimento e pertanto difficili da gestire step by step da calcoli matriciali definiti per ogni elemento rigido che mal approssimano la situazione reale di grandi spostamenti e deformazioni. Nonostante tali difficoltà alcuni studi in letteratura simulano la relazione meccanica tra corpo e zaino.

3.4 ANALISI FEM NEL SETTORE ZAINI

Modellazioni FEM⁸⁰ riportano come l'aumento del carico incida sull'inclinazione del tronco del soggetto e decreti pertanto un aumento delle forze simulate del 60% sulla colonna vertebrale tra una posizione neutra e con inclinazione di 20° che simula la condizione sotto carico. Questo aspetto è quindi nuovamente riconducibile all'insorgenza di dolori anche nella zona della schiena. Un lavoro simile per definire gli stress indotti dagli spallacci viene proposto utilizzando scansioni MRI che permettono di definire geometricamente il sistema spalla-spallaccio: in tale studio viene però posto il focus sul corpo utilizzando una modellazione neo-hooken iperelastica per muscoli, grasso, arterie e pelle mentre per i tessuti cartilaginei e ossei viene adottato un comportamento omogeneo, isotropico lineare elastico.⁸¹

L'utilizzo di tecniche di acquisizione sempre più specifiche e attendibili nel campo medico ha dato modo di poter combinare esse con approcci di tipo ingegneristico, andando quindi a modellare e definire le diverse proprietà meccaniche dei tessuti corporei.^{45,82,83}

Tali ricerche hanno portato dunque a poter definire e simulare meccanicamente in modo sufficientemente preciso e reale gli stress indotti da diversi carichi nei tessuti epiteliali e correlarli alle situazioni di non comfort o dolore evidenziate dalle campagne di test sul campo. Questo è stato possibile ricostruendo il sistema con scansioni MRI e acquisizione delle pressioni tra spallaccio e spalla.

Da simulazioni FEM sulla colonna vertebrale di un adolescente sollecitata dal carico di uno zaino. I risultati di questa analisi portano ad individuare come zone maggiormente sollecitate i 4 dischi intervertebrali D1, D2, D3, D4.⁸⁴

L'azienda Cobalt® indica come la progettazione del suo zaino ONE299 sia stata supportata da test iterativi e l'analisi simulata (FEA) per fornire una comprensione dettagliata delle prestazioni sotto carico, per l'utilizzo di esso da parte delle forze armate australiane. In questo modo si è riuscito a portare avanti lo studio ottenendo come risultato finale l'ottimizzazione della resistenza, del peso, della producibilità e del comfort dell'utente. Tale analisi meccanica è stata supportata da test fisici interni e prove sul campo dell'Australian Defence Force che hanno fornito input e feedback durante lo sviluppo e hanno convalidato i risultati di resistenza, comfort e usabilità del prodotto finale.

L'analisi FEM è stata utilizzata anche per andare ad indagare le sollecitazioni presenti sul telaio metallico di uno zaino a telaio esterno.⁸⁵

Tali tipi di analisi non sono molto comuni sugli zaini, in quanto elementi deformabili e dalle proprietà meccaniche miste data la complessità della struttura e della presenza di numerosi materiali con proprietà meccaniche molto diverse tra loro.

4 DESCRIZIONE DEL PROTOCOLLO SPERIMENTALE

Il progetto descritto nell'introduzione della tesi è stato sviluppato in tre sezioni principali:

- la prima, descritta nel punto 4.1 relativo all'acquisizione di dati sperimentali relativi al posizionamento dello zaino Mizar 18 di Ferrino, sul corpo del manichino rigido utilizzato come corpo umano standard e all'acquisizione di alcuni dati del comportametto meccanico globale dello spallaccio.
- la seconda, riportata al punto 4.2, è stata condotta secondo un approccio di reverse engineering composta dall'acquisizione e dalla gestione della digitalizzazione delle geometrie del sistema in esame
- la terza al punto 4.3 per la quale sono stati utilizzati i dati e le geometrie ottenute dai primi due step descritti per riprodurre il sistema in un ambiente di simulazione FEM con il software Ansys WB 2020, al fine di comprendere l'interazione meccanica tra il corpo e lo spallaccio dello zaino.

4.1 ACQUISIZIONE DATI SPERIMENTALI

4.1.1 RILEVAMENTO PRESSIONI

La questione del contatto tra corpo e spallaccio è stata presentata nel Capitolo 2 introduttivo e dipende da notevoli aspetti legati alla corporatura dell'utilizzatore, la tipologia di zaino, il carico da trasportare e altri fattori di costruzione dello zaino stesso (profilo dello spallaccio, materiali). Per avere un quadro completo dello zaino Ferrino Mizar 18 in studio sono stati condotti due test con strumenti di rilevamento pressioni più un test preliminare per determinare le zone interessate dal contatto. Per queste tre prove è stato quindi definito un protocollo di caricamento dello zaino in modo da eliminare l'influenza sul contatto delle variabili carico e della sua distribuzione.

PROTOCOLLO DI CARICAMENTO DELLO ZAINO FERRINO MIZAR 18

La linea guida che è stata seguita⁵¹ fa riferimento al reale caricamento di uno zaino da trekking e raccomanda di limitare il carico che l'utente deve sopportare al 20 % del proprio peso corporeo. Nella Tabella 7 sono riportati i carichi comuni in relazione alla classificazione degli zaini secondo il volume interno a disposizione.

Tipo di zaino	Volume	Peso
Zaino da escursionismo (gite giornaliere)	15-20 litri	3-6 kg*
Zaino da escursionismo (gite di più giorni)	20-35 litri	5-10 kg*
Zaino da arrampicata / alpinismo	30-50 litri	7-13 kg*
Zaino da trekking / Backpacking	60-80 litri	10-18 kg*

Vista da 1 a 4 di 4 elementi

◀ Precedente Successivo ▶

*zaino con carico medio, basato su valori empirici

Tabella 7: Classificazione degli zaini da trekking e relativi carichi⁵¹

Il carico utilizzato è stato così distribuito:

- massa complessiva zaino 5kg;
- zaino= 0.545kg

Per l'operazione di caricamento, pertanto, è stata utilizzata la Bilancia TFWX 150 (Orma, Italia) e gli oggetti che sono stati utilizzati per il caricamento sono stati imballaggi di plastica, bottiglie acqua accoppiate di 1960g, abbigliamento misto (pantaloni, felpa, t-shirt) secondo la distribuzione indicata in Figura 33.

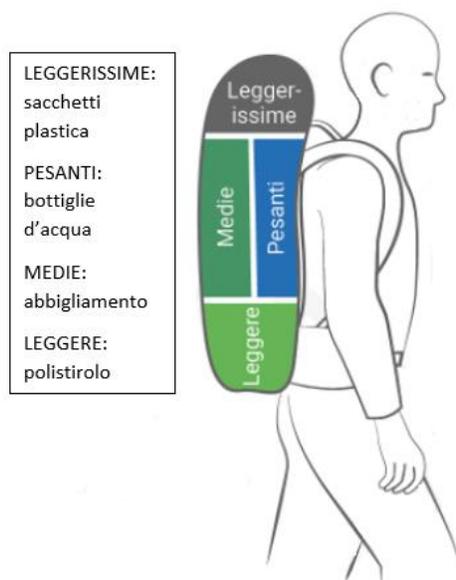


Figura 33: Caricamento dello zaino Ferrino Mizar18 durante i test: immagine modificata⁵¹

In via preliminare, è stata condotta una prova che esula dal reale sistema statico, oggetto dello studio. È stato pertanto definito un test in camera climatica su un tester umano per evidenziare macroscopicamente le zone del corpo a contatto o adiacenti allo zaino. È stata quindi sfruttata la termografia per monitorare le aree del corpo del tester a maggiore sudorazione dopo aver condotto un test dinamico, con lo zaino caricato, indossato e regolato sul tester, definito dal seguente protocollo di test in camera climatica a 30°C su treadmill High Muster T540 Pro.

- Camminata in piano per 5 min a 4 km/h
- Camminata in piano per 5 min a 6 km/h
- Camminata con inclinazione di 15° a 6km/h
- Apertura del laccio lombare e pettorale e rimozione zaino
- Acquisizione della mappa di temperature con termocamera Nec Avio g100ex (effettuate su manichino per eliminare la componente termica di tutto il corpo del tester)

Dopo aver ottenuto un'indicazione delle zone di contatto con lo zaino dal test preliminare in camera climatica ci si è concentrati sul sistema statico del progetto definito da zaino e manichino standard. La struttura dello spallaccio a contatto con il manichino viene mostrata in Figura 34 e i dati del tessuto di cui è composto sono riportati in Tabella 8.

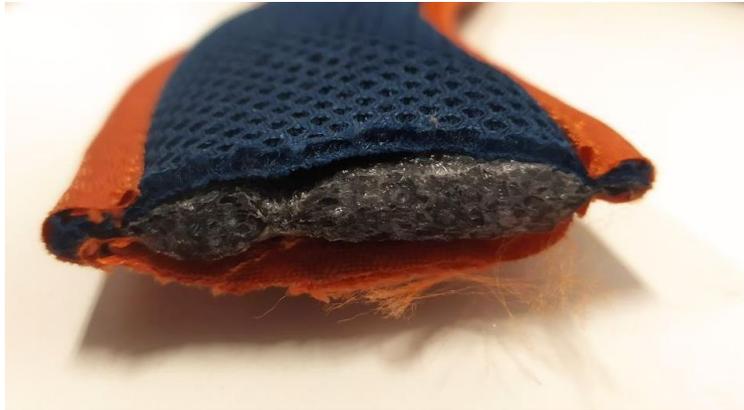


Figura 34: Sezione trasversale dello spallaccio con definizione dei materiali di costruzione: in arancione il tessuto Poliestere invisibile Ripstop 210D, in grigio la schiuma PE celle chiuse spessore 10 mm, in blu il tessuto in rete 3D NET Poliestere 200g/m²

DATI TECNICI:

- Massa nominale 500 g
- Capacità (l) 18 l
- Dimensioni (cm) 50x29x15 cm
- Tessuti: Poliestere invisibile Ripstop 210D
- 3D NET poliestere 200g/m²
- Schiuma: PE celle chiuse spessore 10 mm

Fabric Spec	Tested sampel Color	Color fastness to light		Tensile strength		Tearing strength		water repellency		Water proof		weight		weight details		Thread count(Per inch)		Yarn(denier)				Abrasion		Pilling	
		ISO 105 B02-1994(Amd1:1998), (Amd2:2000), Xenon-Arc Lamp		ISO 1421-1998, 5-cm Cut Strip Test, Tensile Testing Machine, CRE		ISO 13937-1:2000, Elmendorf Tear Tester		UNI 4920		ISO 811-1981, Pressure Gradient At 60 mbar/min Water Pressure		Weight ISO 3801-1977		ISO 7211/2-1984		ISO 7211/5-1984				ISO 12947-2:1998, Martindale Abrasion And Pilling Tester, 12 kPa Total Weight .					
		Grade 4-5		+/-10%		+/-10%		Grade 4-5		+/-10%		-5%/+7%		Warp +/- 2 - Weft +/- 2		+/- 10% - Weft +/- 10%									
		Warp		Weft		Warp		Weft				g/m2		g/m2		g/m2		g/m2		Warp		Weft			
																		Coarse		Fine		Coarse		Fine	
Poly 200D Waffle Check		Grade 4-5		800	550	25	20	Grade 4-5	1000mm	105,00					60	48	200	200	over 100000 revs	4-5					

Tabella 8: Scheda tecnica tessuto poliestere Ripstop 210 D

Il primo test effettuato per conoscere localmente le pressioni indotte sul manichino dallo zaino carico è stato svolto con l'utilizzo dello strumento Picopress che dispone di un singolo terminale di acquisizione di raggio di 50 mm che misura un singolo valore di pressione. Sono stati valutati quindi 10 punti di contatto tra lo spallaccio e il manichino, rappresentativi di tutta la lunghezza dello spallaccio, per un totale di 5 cicli di misurazioni. Il metodo di prova seguito viene descritto di seguito:

- Posizionamento dello zaino sul manichino prendendo come punto di riferimento iniziale la linea di giunzione stampo sopra la spalla del manichino;
- Regolazione dello zaino sul manichino: è stato marcato il profilo dello spallaccio sul manichino al fine di poter replicare correttamente la regolazione dello zaino nelle misurazioni successive. La regolazione del laccio pettorale è stata impostata a 4 cm dal fine guida superiore;
- Definizione punti di posizionamento dello strumento Picopress dividendo lo spallaccio in 10 aree congruenti: 3 aree posteriori (da riferimento della spalla del manichino a scapola) e 7 anteriori (da riferimento della spalla del manichino a zona ascellare) come viene mostrato in Figura 35. Ulteriori punti di pressioni considerati sono quello centrale in corrispondenza del gancio di chiusura pettorale e della zona lombare (definiti come “sternum” e “waist”);
- Posizionamento del terminale dello strumento seguendo i segni di mappatura sul manichino, mostrati in Figura 36;
- Annotazione del valore misurato dallo strumento.



Figura 35: Suddivisione dello spallaccio in 10 aree - immagine modificata¹

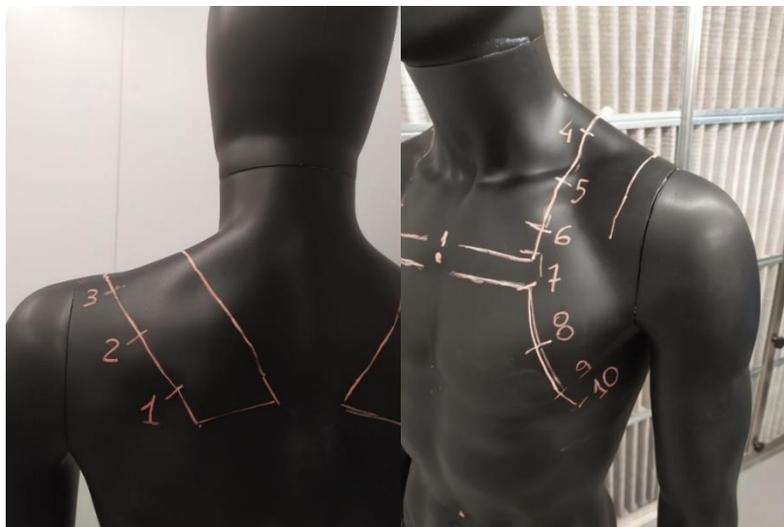


Figura 36: Posizioni di acquisizione delle pressioni per il test con Picopress

Il secondo test atto a misurare le pressioni tra zaino e manichino è stato condotto con l'utilizzo dello strumento BODITRAK2 PRO al fine di valutare le pressioni nella zona posteriore, tra le spalle e la zona lombare del manichino. Lo strumento è composto da un terminale di acquisizione quadrato (45x45 cm) dotato di 1024 sensori e pertanto permette di ottenere una mappa di pressioni per ogni misurazione effettuata.

Lo strumento è quindi stato disposto tra la schiena del manichino e lo zaino, tra la regione sacrale e scapolare, senza nessun ausilio per il mantenimento della posizione ma solamente sfruttando il contatto tra i due corpi; ci si è assicurati di non avere eccessive distorsioni dello strumento per evitare misurazioni non corrette.

Mediante questa prova si è ricercato una conferma dei dati sperimentali ottenuti nella regione scapolare con il test locale per mezzo del Picopress e una comprensione degli effettivi punti di appoggio nella zona sacrale del manichino.

4.1.2 PROVA DI TRAZIONE DELLO SPALLACCIO

Per quanto riguarda invece la parte di acquisizione dei dati di costruzione dello spallaccio è stato condotto un test a trazione sull'intero spallaccio.

Lo spallaccio è stato scucito dal corpo principale dello zaino e sono state eliminate le fasce di regolazione. È stata fissata la lunghezza utile di test tra i due afferraggi del macchinario di test Instron® 8801 marcando sullo spallaccio i due riferimenti sotto la zona di presa. Il test è stato condotto impostando una velocità di spostamento della traversa del macchinario di test Instron 8801 e monitorando i valori di forza rilevati dalla cella di carico che garantiscono gli spostamenti impostati. I test sono stati condotti in successione con un crescente range di spostamenti senza rimozione dello spallaccio del macchinario ma riportando il macchinario nelle condizioni iniziali di test ad ogni fine misurazione. In questo modo, si è ricreata la situazione di comune utilizzo, in cui lo spallaccio risulta già essere caricato più volte: questa è una pratica di test che viene comunemente utilizzata per i prodotti commerciali, per ottenere la cosiddetta "saturazione del tessuto".⁸⁶

Le condizioni di test comuni vengono riportate di seguito.

- Velocità di prova: 20 mm/min
- Spostamento traversa max impostato: 70 mm
- Provino 1: L0=350 mm
- Provino 2: L0=330 mm

4.2 ACQUISIZIONE E GESTIONE DEL SISTEMA

4.2.1 SCANNERIZZAZIONE 3D

L'acquisizione della geometria solida dello spallaccio dello zaino Ferrino Mizar 18 e della parte di manichino interessata al contatto con esso è stata realizzata mediante l'utilizzo del pacchetto Artec® composto dallo strumento scanner Artec EvaLite e il software Artec 3D Studio 16. Lo strumento ha permesso di acquisire diverse immagini 3D del sistema, al fine di poter ottenere tutte le possibili angolazioni della geometria. È stato pertanto opportuno gestire successivamente, attraverso il software, le diverse acquisizioni. La ricostruzione della struttura dello spallaccio e del manichino è stata sviluppata attraverso i comandi di selezione delle parti interessate, di unione manuale e la finale trattazione automatica da parte del software per la creazione della struttura finale completa. Infine, si è ricorso alla modifica della superficie creata con i tool forniti dal software per il riempimento delle parti vuote, cioè non acquisite, e rimozione delle regioni involontariamente acquisite non facenti parte degli oggetti.

I file di immagine così prodotti dal software Artec Studio sono file di superficie di tipo .ply.

4.2.2 GESTIONE DELLE SCANNERIZZAZIONI 3D

La fase successiva prevede la conversione dal file .ply prodotto dallo scanner 3D in un file compatibile con il software FEM Ansys Workbench 2020 R2, il quale riesce a gestire solamente elementi solidi, derivanti tipicamente da un disegno CAD 3D. La procedura eseguita perciò ha previsto l'utilizzo di alcuni software CAD come Rhinoceros 7 e Autodesk SpaceClaim 2020 per poter convertire i file nelle estensioni informatiche opportune.

I file ottenuti come output dal software Artec Studio 16 sono opportunamente stati modificati in estensione informatica con il software CAD Rhinoceros7, per ottenere l'estensione .Stl. Questa tipologia di formato di superfici è molto più comune essendo molto utilizzato per la stampa 3D e perciò risulta essere compatibili con la maggior parte dei software CAD. Successivamente è stato utilizzato Autodesk MeshMixer per la correzione geometrica 3D; con questo software di modifica del design, ideato per la stampa 3D, è stato possibile limitare le sporgenze degli accessori presenti sullo spallaccio (guide, fascette, cuciture estetiche), eliminare spike provenienti dalla scannerizzazione per avere superfici più regolari e omogenee. Al fine di ottenere un file solido gestibile dai software FEM è stato poi utile convertire il file .stl in un file 3D solido con l'utilizzo dei tool "ANURBS" di Rhinoceros 7 per lo spallaccio e i tool manuali di "reverse engineering" di Autodesk Spaceclaim 2020 per il busto del manichino. I comandi "anurbs" hanno permesso di creare automaticamente un file 3D solido composto da numerose superfici che poi, per mezzo dei tool di reverse engineering di unione superfici di SpaceClaim, sono state appunto unite ottenendo un file 3D più semplice per la futura importazione e gestione nell'ambiente FEM. In questo modo si è prodotto file 3D .stp o .igs gestibili dal software di simulazione Ansys Workbench 2020 R2 per lo spallaccio. Per il file stl del busto del manichino invece l'operazione di conversione in un file solido è stata eseguita manualmente andando a definire aree contigue l'una all'altra sulle superfici del file .stl nell'ambiente CAD del software Autodesk Spaceclaim 2020 e non si è ricorso alla modifica superficiale tramite Autodesk MeshMixer.

Il file dello spallaccio così prodotto risulta essere un solido pieno mentre il file del busto è composto da un insieme di elementi solidi di spessore infinitesimale che sono stati infine uniti per creare un unico elemento.

4.2.3 CREAZIONE DELLA SECONDA GEOMETRIA 3D DELLO SPALLACCIO

Per l'elemento spallaccio è stato considerato anche un approccio più tradizionale con la creazione di un file 3D a partire dal file 2D fornito dall'azienda Ferrino® contenente il profilo 2D della schiuma dello spallaccio, in Figura 37. Con l'utilizzo del CAD Rhinoceros7 è stata costruita una geometria che rispecchiasse il più possibile il file scannerizzato, con superfici il più regolari possibili. Sono stati dunque seguiti i profili della geometria scannerizzata e con l'utilizzo dei comandi "estrusione, sweep, loft, srfcurve e unione" di Rhinoceros7 è stato creato un secondo file dello spallaccio. Infine, è stato confrontato il volume totale dei due solidi per avere geometrie simili sia per quanto riguarda la forma che per le dimensioni. Il file solido così ottenuto risulta essere definito come una "polisuperficie chiusa" per il software CAD Rhinoceros7 o un solido per il software Space Claim 2020, gestibile quindi nuovamente come .stp o .igs.

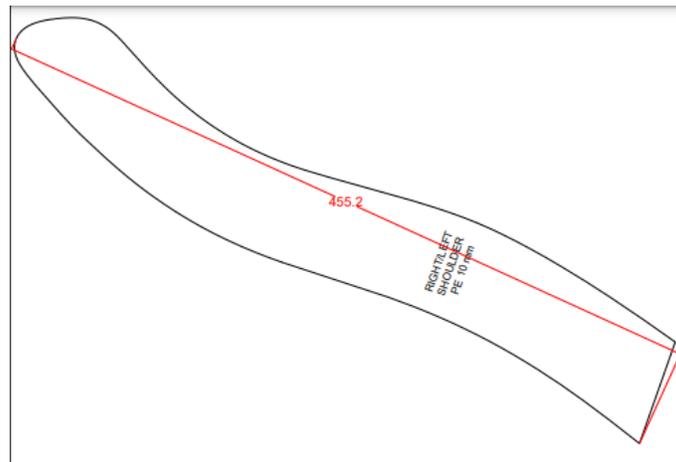


Figura 37: Design 2D della schiuma interna

4.3 ANALISI FEM

4.3.1 IMPORTAZIONE DELLE GEOMETRIE PRODOTTE NELL'AMBIENTE DI SIMULAZIONE FEM

Il software di simulazione FEM permette la gestione di elementi solidi esterni al proprio ambiente di modellazione geometrica. Pertanto, gli elementi solidi descritti precedentemente sono stati importati come geometria esterna e successivamente attraverso la sezione "Model" sono stati definiti i parametri in input delle diverse simulazioni. La scelta dell'utilizzo del software CAD Autodesk Spaceclaim 2020 per la costruzione della geometria disegnata dello spallaccio e per le geometrie scannerizzate del manichino e dello spallaccio è stata indotta al fine di limitare eventuali problemi di importazione delle geometrie in quanto viene utilizzato anche come software CAD interno al software FEM Autodesk Workbench 2020.

4.3.2 STEPS DI PROGETTAZIONE DELLE SIMULAZIONI FEM

L'ambiente FEM è composto da diverse sezioni di progetto.

La prima legata alla descrizione dei materiali dell'elemento "Engineering Data" dove è opportuno inserire i dati dei materiali utilizzati nel caso in cui si tratti con materiali già presenti nelle librerie del software, oppure definire

un nuovo materiale attraverso proprietà o curve sperimentali. Una schermata tipica della sezione viene presentata in Figura 38.

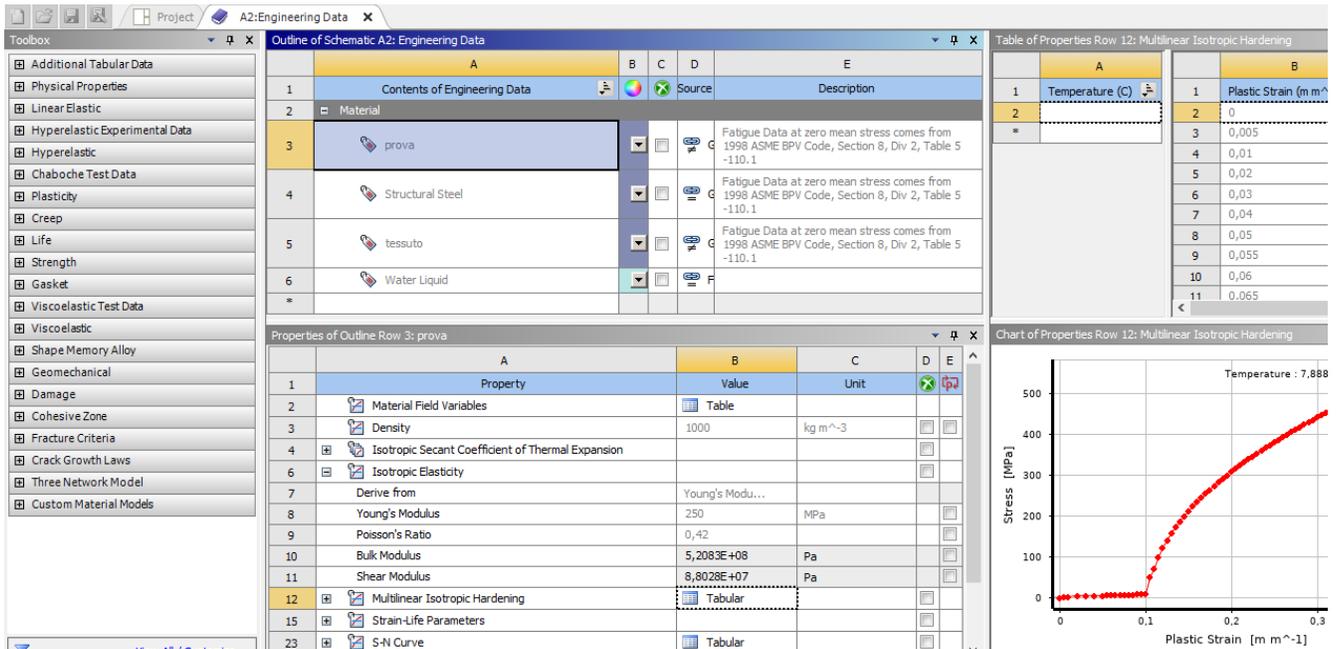


Figura 38: Sezione "Engineering data" del software Ansys Workbench 2020 R2

In tale sezione si è dunque definito in primis un materiale fittizio che potesse avere delle proprietà indicative della struttura in modo da poter proseguire con l'importazione della geometria e i successivi step di processo nella sezione "Model": in questa sezione sono stati definiti di eventuali sistemi di riferimento aggiuntivi, la generazione della mesh e la successiva configurazione delle forze o spostamenti in gioco.

Per la creazione della mesh è stato stabilito un metodo oggettivo di valutazione della mesh sia per il file scannerizzato che disegnato: in pratica in alcune semplici simulazioni di trazione preliminari sulle due geometrie dello spallaccio è stata costruita una mesh che producesse un valore dell'errore energetico della soluzione inferiore al 10%: questo parametro che indica una discrepanza ridotta delle tensioni degli elementi in cui è suddiviso il corpo in esame è stato utilizzato per poter ottenere una buona qualità numerica del risultato ma, allo stesso tempo, limitare il costo computazionale delle simulazioni e quindi i relativi tempi di esecuzione.

Successivamente sono stati applicate le condizioni fisiche di prova, come forze, spostamenti, vincoli al sistema nelle diverse simulazioni effettuare, dalla sezione "Static Structural". Infine, si sono definiti gli output da visualizzare al termine delle varie simulazioni, nella sezione "Result".

Le simulazioni FEM che sono state svolte in questo lavoro sono 3 e per ognuna di queste è stato dunque necessario seguire gli step fino ad ora descritti.

- Test a trazione
- Contatto spallaccio – spalla del manichino

Per ogni simulazione è stato quindi necessario definire il risultato ricercato in output ma soprattutto il set dei diversi parametri in input di simulazione anche attraverso metodi empirici e tentativi, a partire dalle condizioni fisiche che i test sperimentali reali prevedono.

4.3.3 SIMULAZIONE FEM DELLA PROVA DI TRAZIONE

La simulazione del test a trazione è stata condotta per determinare le proprietà meccaniche medie dell'unico materiale con cui si intende definire lo spallaccio, attraverso un confronto con il test di trazione sperimentale fisico descritto nella sezione 4.1.2. perciò, l'approccio seguito è di tipo iterativo, con la modifica dei parametri relativi alla rigidità materiale del modello fino all'ottenimento dello stesso risultato forza-spostamento della prova sperimentale. Per tutti i materiali utilizzati è stato scelto 0,42 come valore del coefficiente di Poisson e una trattazione isotropa del materiale, come semplificazione: il valore 0,42 è stato scelto per lavori precedenti svolti dal gruppo dell'Università di Bologna con cui si è collaborato.

È stata definita la geometria, riportata in Figura 39, modificando la geometria totale dello spallaccio eliminando le porzioni esterne agli afferraggi della prova sperimentale, in modo da riprodurre effettivamente solo la parte sottoposta al test di trazione sperimentale. Tutte le geometrie considerate rispecchiano ampiamente l'elemento reale dello spallaccio ma non è stato possibile riprodurre esattamente la geometria distorta per effetto della compressione nella zona degli afferraggi.

Per quanto riguarda la mesh si è utilizzato lo stesso metodo utilizzato nelle simulazioni preliminari, adattandolo alla geometria modificata.



Figura 39: Geometria tagliata spallaccio utilizzata per il test di trazione

Sono state quindi riprodotte le condizioni della prova sperimentale vincolando la sezione superiore dello spallaccio (cucita con il corpo dello zaino) con un supporto fisso “fixed support” contrassegnata dalla A in Figura 40, mentre alla faccia opposta è stato imposto uno spostamento “displacement” che ricoprisse il range di spostamento della prova sperimentale con direzione perpendicolare alla faccia vincolata dal fixed support indicata dalla freccia gialla in Figura 40.

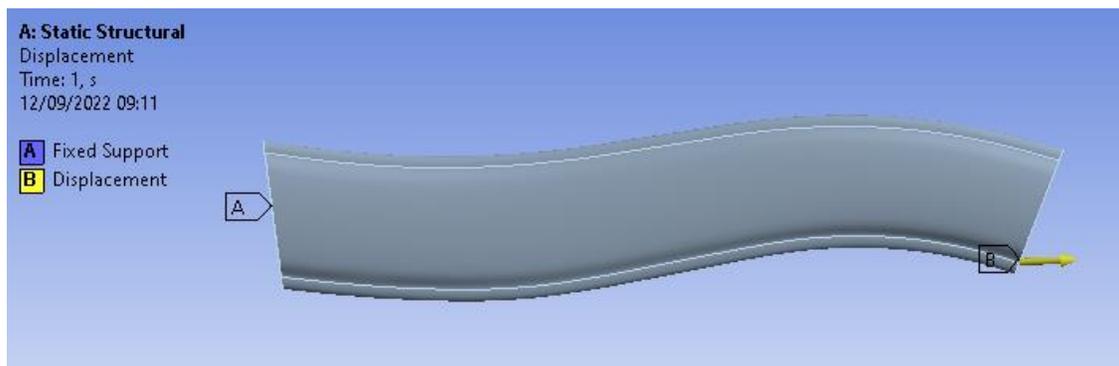


Figura 40: Definizione della geometria e del sistema della simulazione del test di trazione dello spallaccio

4.3.4 SIMULAZIONE FEM DEL CONTATTO SPALLACCIO-SPALLA

La simulazione del contatto ideata prevede il posizionamento dei due elementi di interazioni posti in contatto solamente nella zona centrale in corrispondenza de centro della spalla del manichino, come mostrato nella Figura 41.

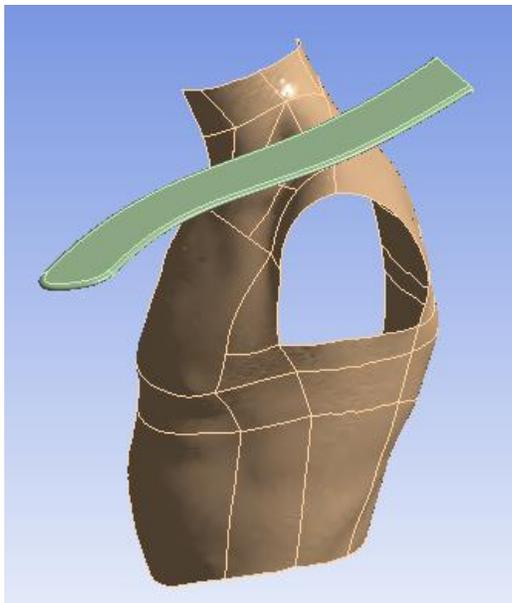


Figura 41: Sistema del contatto tra manichino e spallaccio

Si è dovuta definire nuovamente la mesh, utilizzando lo stesso metodo della simulazione del test a trazione preliminare sulla geometria completa.

Per il completo contatto tra la superficie interna dello spallaccio e la spalla sono state imposte due forze concordi alle estremità dello spallaccio in modo da deformare la struttura. È stato utile inserire alcuni vincoli al sistema fissando la superficie del manichino con un “fixed support” in modo che non potesse muoversi nello spazio a causa delle forze agenti sul sistema complessivo; infine, la faccia superiore dello spallaccio è stata vincolata con un “displacement” nullo nelle direzioni non interessate dalla piegatura sul cilindro. In Figura 42, viene riportato lo schema utilizzato sostituendo il corpo del manichino con un elemento cilindrico per evidenziare meglio i vincoli imposti sul sistema.

I parametri del contatto tra i due componenti in questione sono stati definiti come “friction less”, ovvero senza considerare l’attrito presente tra i due corpi e omettendo perciò anche le tensioni tangenziali. Nel contatto così descritto viene definito dal software FEM che nella direzione normale, la superficie può separarsi l'una dall'altra, ma non è ammessa penetrazione, mentre in direzione tangenziale, le superfici possono scivolare l'una sull'altra senza alcuna restrizione. Nella descrizione del contatto, secondo la linea guida del contatto di Ansys⁸⁷, è stato definito elemento di contatto, lo spallaccio in quanto presenta una superficie convessa, una mesh più fitta e una rigidità superficiale minore, mentre lo spallaccio viene definito come elemento target. Il metodo matematico utilizzato durante le simulazioni è stato invariato rispetto a quello standard utilizzato da Ansys Workbench 2020 ovvero “Augmented Lagrange” ed è stato scelto un contatto di tipo asimmetrico con cui si intende che tutti gli elementi di contatto siano posti su una superficie e tutti gli elementi target sull’altra superficie. Questo è talvolta chiamato “contatto one-pass”. In sostanza è una tipologia di contatto che può essere utilizzata quando la regione del contatto e i due corpi interagenti siano ben definiti. Successivamente, si sono dovuti settare i parametri del contatto che vengono descritti di seguito.

- Normal stiffness: è il parametro che gestisce la facilità di penetrazione tra i due corpi in contatto; più alto è il valore e minore sarà la penetrazione. Questo parametro, quindi, interpreta la rigidità delle superfici degli elementi in contatto. Valori di rigidità bassi possono portare a una certa entità della penetrazione e produrre una soluzione imprecisa. Si desidera una rigidità sufficientemente alta in modo da ottenere una penetrazione accettabilmente piccola, ma una rigidità sufficientemente bassa in modo da facilitare la convergenza della soluzione ai nodi superficiali interessati dal contatto;
- Stabilization damping factor: è un parametro puramente legato alla convergenza della soluzione; quindi, non ha nessuna teoria fisica di base. Questo valore pertanto deve essere sempre minimo rispetto al valore delle tensioni del sistema reale;
- Pinball region: è il fattore che determina la distanza alla quale secondo il software è possibile creare un elemento di contatto al posto che mantenere due nodi dei due elementi separati.

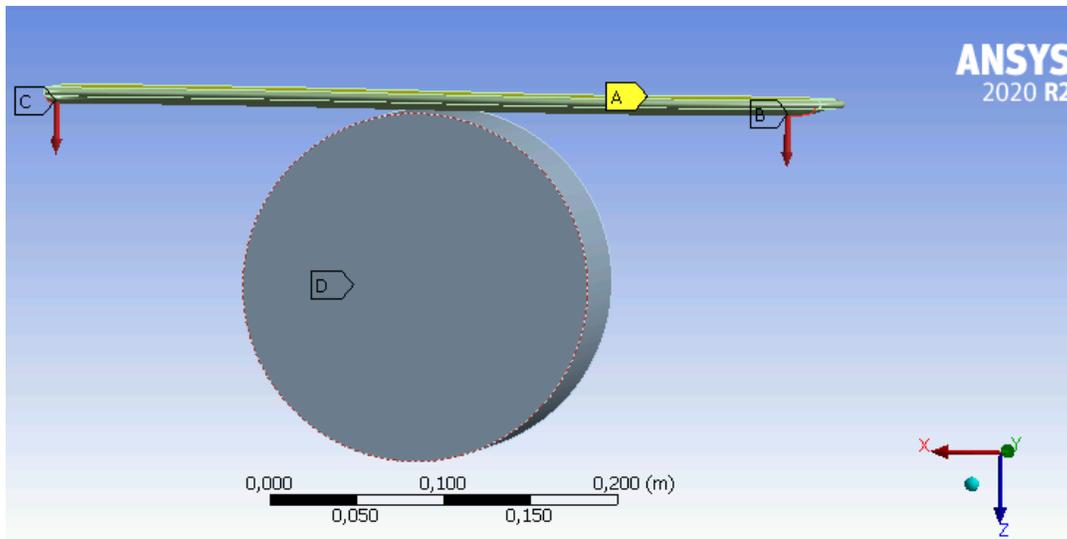


Figura 42: Definizione della geometria e del sistema della simulazione del contatto con la spalla

5 RISULTATI

5.1 RISULTATI PROVE SPERIMENTALI

5.1.1 TEST RELATIVI ALLE PRESSIONI TRA ZAINO E MANICHINO

I test condotti attraverso l'utilizzo degli strumenti Picopress e Boditrak2 Pro sono stati utili per determinare l'entità delle pressioni nelle zone di contatto predette dalle immagini ottenute per via termografica; con questa tecnica è stato infatti possibile avere una prima macroscopica indicazione delle aree di contatto valutando la differente temperatura tra le varie aree del busto del tester subito dopo la fine dell'attività fisica del tester, come viene indicato nella Figura 43. La rilevazione termografica in realtà è stata condotta sia a fine attività direttamente inquadrando il busto del tester sia andando a posizionare la t-shirt sopra il manichino, registrando così come aree di contatto le zone più fredde ovvero quelle maggiormente impregnate dal sudore prodotto durante la prova. Le due acquisizioni sono state utilizzate in quanto la termografia diretta sul copro umano risultava essere molto influenzata dalla temperatura corporea.

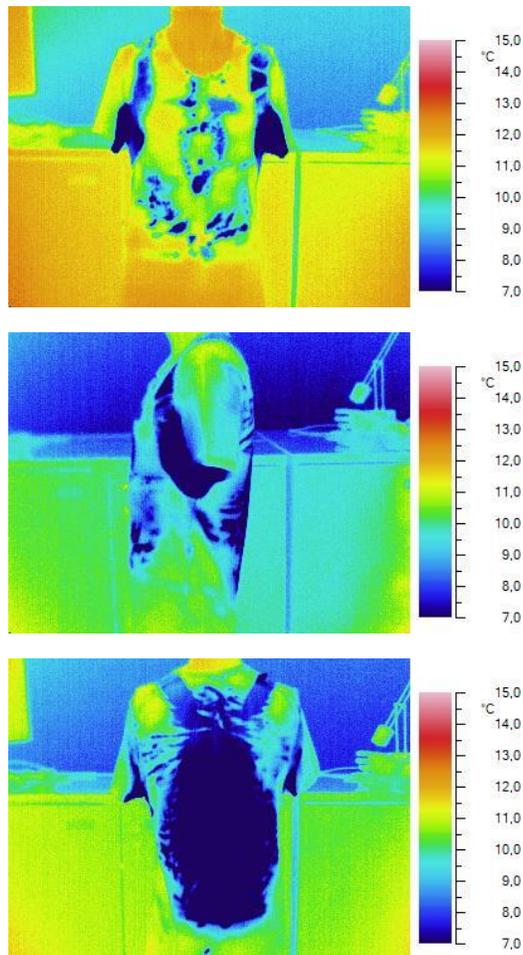


Figure 43: Termografie preliminari ottenute con la termocamera Nec Avio G100EX

Dalle immagini riportate si può riconoscere facilmente il contorno dello zaino. Le aree più fredde, ovvero quelle in cui si è registrata una maggiore sudorazione sono quelle a contatto con lo zaino ovvero la zona della schiena, delle spalle, del petto e delle ascelle a contatto con gli spallacci. Le altre zone interessate in maniera minore sono invece quelle dello sterno e della vita in cui sono presenti le due fasce di chiusura. È rilevabile un'intensa sudorazione anche nella zona ascellare interessata sia dall'estremità dello spallaccio sia da una maggiore quantità di ghiandole sudoripare che ne amplificano l'effetto legato solamente alla vicinanza con lo zaino, come mostra la Figura 44.



Figura 44: Aree corporee a maggiore sudorazione⁸⁸

Il test è risultato di tipo qualitativo in quanto la gestione della temperatura corporea è influenzata da altri fattori biologici e non solamente dalla presenza dello zaino. Inoltre, non è stato possibile definire precisamente i punti di contatto poiché anche le zone vicine a questi sono soggetti ad una più intensa attività sudoripara per un fattore di schermatura del calore umano prodotto da parte dello zaino.

Per quanto riguarda i test specifici per il rilevamento delle pressioni di contatto si può osservare, dai dati ottenuti, presentati in Tabella 9 e in Figura 45, come le zone di maggiore pressione siano quelle contrassegnate dai numeri 3-4 e 8 corrispondenti alla zona superiore delle spalle a livello trapezoidale e pettorale. Inoltre è possibile osservare una non completa simmetria che può essere spiegata da alcuni fattori intrinseci della prova come l'utilizzo di un manichino commerciale non simmetrico ma con postura "greca" e una non perfetta e costante simmetria del carico durante le misurazioni: infatti, è opportuno considerare anche alcuni aspetti pratici del metodo di misura come il sollevamento e il posizionamento dello zaino sul manichino per permettere lo spostamento del terminale del Picopress nella zona di misurazione successiva. La prima causa di asimmetria descritta viene anche rilevata dal test con Boditrak2 Pro nel quale si evidenzia una maggiore area di contatto nella zona lombare destra e nella zona scapolare sinistra, dove effettivamente il manichino presenta sporgenze più importanti. I risultati relativi alla zona scapolare misurati da Boditrak2 Pro vengono anche confermati dalle prove Picopress nelle zone corrispondenti 1-2-3. Le restanti zone interessate dalla prova Picopress, indicate in Tabella 9, sono relative alla zona della clavicola e pettorale.

RISULTATI

	dx	sx
zona	media	media
1	0,6	0,8
2	7,4	9,4
3	24,2	26
4	34,6	24,4
5	2,8	1
6	1	0,2
7	7,6	2,8
8	32,8	33,8
9	0,2	0,8
10	0	0
chest	1,2	
waist	2,8	2

Tabella 9: Valori medi delle pressioni misurate con lo strumento Picopress

Frame: 158

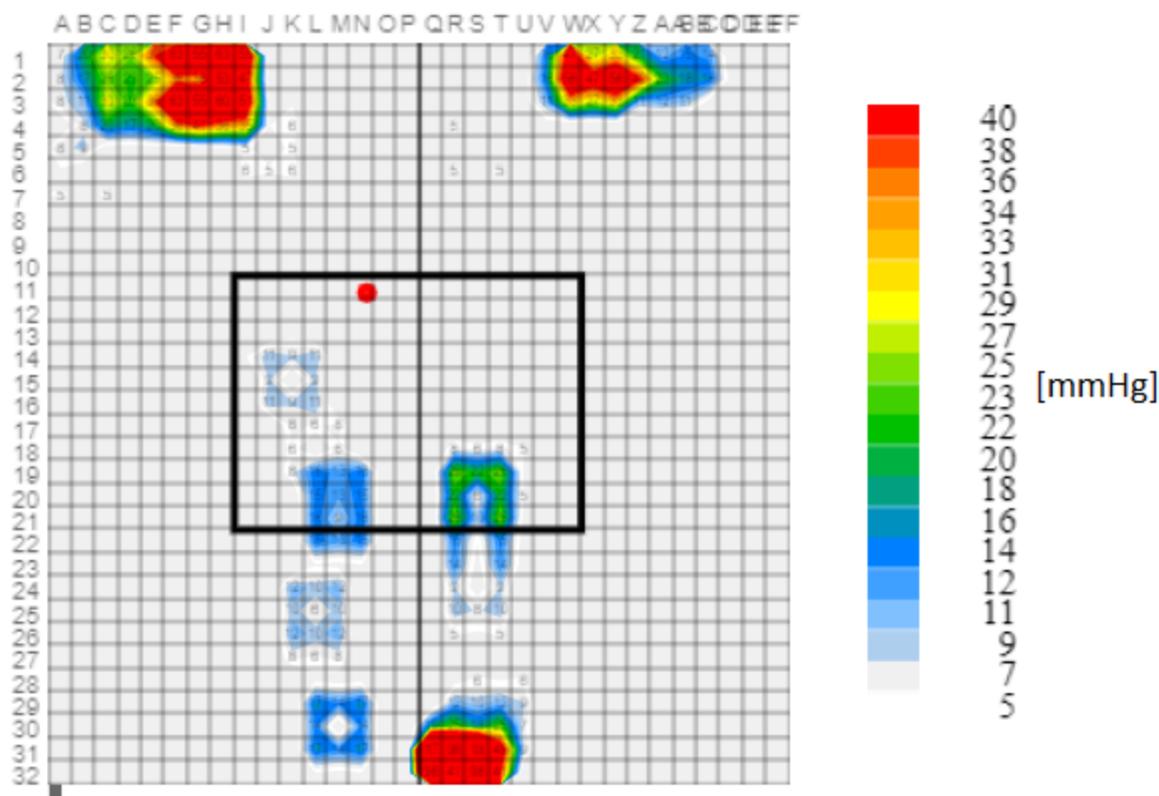


Figura 45: Distribuzione delle pressioni misurate con lo strumento Boditrak2 Pro

Le pressioni rilevate sia dal Picopress sia da Boditrak2 Pro sono ampiamente al di sotto dei valori soglia consigliati⁴⁵, oltre i quali si assiste alle sensazioni di assenza di comfort e primi dolori. I valori registrati inoltre risultano però essere confrontabili come ordine di grandezza con gli studi presenti in letteratura^{45,52}. Una relazione più precisa tra gli studi effettuata risulta essere non utile in quanto le condizioni di prova sono differenti.

5.1.2 PROVA DI TRAZIONE

Il test a trazione, i cui parametri di prova sono stati descritti nel capitolo 4.1.2, sono stati successivamente trattati con l'utilizzo di Excel (pacchetto Office 365). È stato quindi possibile dai dati registrati dallo strumento Instron® 8801 risalire al valore nullo di forza applicata; il dato di spostamento della traversa (corsa) corrispondente è stato fissato come valore iniziale della effettiva prova di trazione assegnandogli, quindi, il valore di corsa nullo. Considerando questo come dato di inizio prova sono stati calcolati i valori di corsa relativi. Con tale metodo è stato quindi possibile eliminare i valori di Forza-Corsa precedenti alla vera e propria trazione dello spallaccio, dovuti al posizionamento di quest'ultimo nello strumento. I dati così ottenuti dell'ultima prova sono riportati nel Grafico1 seguente.

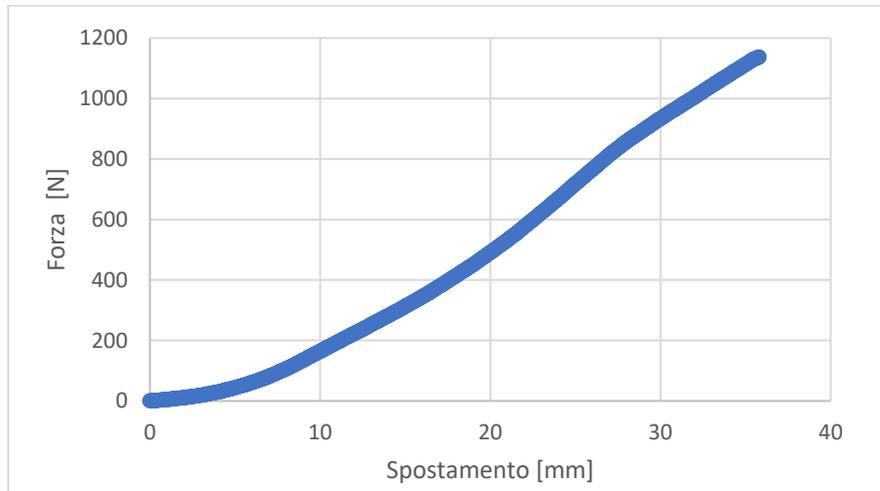


Grafico 1: Curva Forza-corsa sperimentale di spallaccio Ferrino Mizar 18 ottenuta con prova di trazione su Instron 8801

Viene riportato solo il grafico del secondo spallaccio testato in quanto il primo non risulta indicativo del test poiché il punto di afferraggio inferiore risultava essere corrispondente ad una cucitura strutturale tra tessuto schiuma e rete 3D, con conseguente lacerazione nel punto di afferraggio, evidenziato in bianco in Figura 46: tale punto è risultato essere il primo segno di cedimento della prima prova in quanto presenta due cuciture trasversali e l'inserimento di un accessorio di regolazione della cinghia pettorale che sono evidentemente risultati elementi di concentrazione dello sforzo oltre ad essere la zona di presa della prova. La condizione verificatasi infatti risulterebbe essere una condizione di annullamento del test per una tradizionale prova normata a trazione, in cui i provini sono opportunamente sagomati per evitare questo fenomeno.



Figura 46: Zona di rottura del campione 1 dello spallaccio durante il test di trazione

Il Grafico 1 mostra un comportamento a trazione non lineare. Tale andamento deriva da un primo raddrizzamento della geometria curva ad S dello spallaccio a cui corrisponde una maggiore facilità di deformazione e successivamente si può notare un incremento della pendenza della curva riportata per la continua trazione della geometria ormai rettilinea; la deformazione reale della geometria si può visualizzare nelle Figura 47. Il test è stato infine fermato per lacerazione del tessuto esterno con taglio a 45° rispetto all'asse di trazione tra due punti dello spallaccio che presentano accessori cuciti che inducono delle concentrazioni di sollecitazioni locali, come si evidenzia nella Figura 48; pertanto è stato raggiunto il valore massimo di spostamento della traversa di 48,9 mm corrispondente al valore di corsa calcolata di 35,08 mm senza quindi superare il valore di spostamento massimo della traversa inferiore di 70 mm. I valori di Forza registrati dallo strumento relativi al cedimento del tessuto sono di 1137,05 N.



Figura 47: Test a trazione sperimentale: (1) spallaccio scarico: geometria iniziale (2) spallaccio in tensione con raddrizzamento della geometria curva iniziale



Figura 48: Fine prova di trazione con rottura tessuto con taglio a 45°

Un'ulteriore considerazione è stata effettuata considerando l'allungamento prodotto dal test di trazione a fine prova. Si è riscontrato che la sollecitazione di trazione imposta ha prodotto un allungamento della zona di test di 2 cm, contrassegnata dai due marker neri sullo spallaccio: questa variazione dimensionale è stata misurata grossolanamente con un metro da sarto sia a fine prova che dopo 30 secondi e 1 minuto, riscontrando una deformazione elastica in quanto l'ultima misurazione corrispondeva nuovamente alla lunghezza misurata a inizio prova (330 mm). Tale dato non è del tutto affidabile poiché al fine di definire il comportamento elastico occorrerebbe definire una metodologia di misurazione più precisa. Dall'osservazione del provino testato però è possibile definire che la schiuma interna dello spallaccio abbia un'influenza trascurabile sul comportamento a trazione in quanto con un semplice allungamento manuale la schiuma iniziava a creparsi e rompersi; allo stesso modo è possibile verificare che la chiusura degli afferraggi dello strumento ha prodotto una deformazione permanente sulla schiuma in direzione trasversale, riducendone lo spessore.

5.2 RISULTATI DELLA DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA

Prima di considerare le singole simulazioni FEM svolte è stato opportuno discutere delle parti comuni tra di esse. In tal senso, infatti, è stata una prerogativa del progetto la decisione di come affrontare le simulazioni FEM e il loro possibile confronto: come indicato nel capitolo 4 si dispone di 2 geometrie diverse dello spallaccio e l'approccio iniziale consiste nell'utilizzo di entrambe le strutture e un successivo confronto tra di esse. Di seguito viene discussa la motivazione riguardante la tipologia di analisi che è stata possibile effettuare.

La fase di acquisizione della geometria dello spallaccio e del busto del manichino non ha avuto particolari problemi, se non un'iniziale richiesta di manualità e coordinazione per generare immagini il più complete possibili e alcuni supporti per facilitare gli spostamenti. La scannerizzazione dello spallaccio ha richiesto un supporto fisico che ne consentisse una posizione distesa e sospesa stabile in modo da poter effettuare l'acquisizione completa sia della parte esterna che interna; per quanto riguarda invece il busto del manichino è stato utilizzato un supporto

girevole ed è stato conveniente smontare le braccia in modo da avere una scansione continua e fluida di tutta la zona interessata.

Sia per il componente spallaccio che per la porzione del manichino è risultato fondamentale l'utilizzo del prodotto spray "Aesub 100% scannable blue (Microservice 3D metrology solutions)" in modo da avere una migliore finitura superficiale del bordo dello spallaccio, altrimenti difficilmente rilevabile, e del manichino in quanto colori scuri non possono essere rilevati dallo strumento che lavora attraverso l'emissione e ricezione di fasci di luce. Questo prodotto permette di ottenere uno strato sottile biancastro (8-15 μm) che aumenta il contrasto dell'oggetto con il resto dell'ambiente. Infine, per le fasi di gestione descritte nel capitolo 4.2.2 è stato richiesto un notevole sforzo di conversione da una tipologia di file ad un altro e l'utilizzo di 3 software di modellazione CAD al fine di ottenere delle geometrie omogenee nelle estensioni richieste da software di simulazione FEM.

Anche il secondo approccio relativo al disegno dello spallaccio a partire dallo schema 2D è stato laborioso al fine di riuscire a creare un unico elemento solido: infatti, la costruzione dei vari componenti dello spallaccio è stata eseguita con i comandi di estrusione e loft per la parte interna e la superficie convessa della schiuma con gli strumenti sweep e srfcurve per la cucitura esterna perimetrale. La difficoltà riscontrata è stata poi quella di unione delle varie superfici in modo da creare un unico solido, definito come "polisuperficie chiusa" da Rhinoceros7, per incongruenza dei punti di controllo delle diverse geometrie curve create.

Pur avendo compiuto diversi step di conversione, modifica superficiale e unione delle parti il lavoro di simulazione successivo è stato vincolato da alcuni problemi legati alle due geometrie 3D con cui si intendeva lavorare in partenza. In primo luogo, per entrambe le geometrie dello spallaccio è stato utile definire un metodo per la scelta della mesh secondo il parametro dell'errore energetico, ovvero andando a calcolare la discontinuità delle tensioni presenti tra gli elementi adiacenti. Una prima considerazione approssimativa tra le due geometrie 3D prodotte mostrate in Figura 49 e in Figura 50 è stata condotta con un metodo di mesh definito tramite "body sizing", che consiste nella suddivisione del componente in elementi di uguale dimensione a prescindere dalla complessità dell'area interessata. Un secondo approccio è stato definito per l'elevata complessità della geometria, in modo da limitare il numero di nodi ed elementi per ridurre il costo computazionale delle simulazioni; per questa tipologia non è stato possibile definire un metodo di costruzione della mesh ma, per contenere il valore dell'errore energetico, si è dovuto ricorrere ad un metodo di mesh manuale, ovvero creando una segmentazione delle varie regioni di cui il file 3D si compone, attraverso i comandi di "edge sizing". Il file scannerizzato presenta una quantità di elementi di mesh molto più elevata sia in caso di utilizzo del metodo di edge sizing che di body sizing per avere comunque una suddivisione dell'elemento simile a quella del file disegnato e in linea con i dati trovati in letteratura⁴⁵. Si è scelto quindi il metodo di mesh manuale determinato dagli edge sizing imposti che permette di contenere l'errore energetico al di sotto del 10%. Tale parametro però è stato determinato senza attivare il comando "large deflection" in quanto viene valutato globalmente e non step by step.

Dopo aver ottenuto per entrambi le geometrie una mesh simile tra le due geometrie 3D a livello di dimensione degli elementi, da una preventiva simulazione del test di trazione si sono ottenuti i primi problemi con la geometria 3D scannerizzata, molto più complessa e articolata rispetto a quella disegnata; pertanto in questa fase è stato deciso che per le simulazioni future ci si sarebbe solamente interessati della geometria 3D disegnata con mesh definita tramite edge sizing in quanto quella scannerizzata risultava molto più complessa da gestire già nelle prime semplici simulazioni di prova, con conseguenti problemi di convergenza della soluzione.

Per questo motivo le successive simulazioni sono state solamente condotte con la geometria disegnata e sue derivazioni, con una mesh ottenuta tramite edge sizing che nella prima versione presenta 41059 nodi e 22835 elementi.

La questione relativa al processo di reverse engineering, perciò, non è stata possibile completarla o svilupparla come inizialmente previsto ma è stata una linea guida per la creazione della geometria 3D disegnata: in tal senso,

infatti, all'interno del software di disegno Rhinoceros7 è stato possibile utilizzarla come modello di riferimento durante gli step di costruzione e successivo confronto geometrico. Il risultato ottenuto da tale confronto è stato relativo alla mesh generata e ai volumi dei due sistemi che vengono riassunti nella Tabella 10.

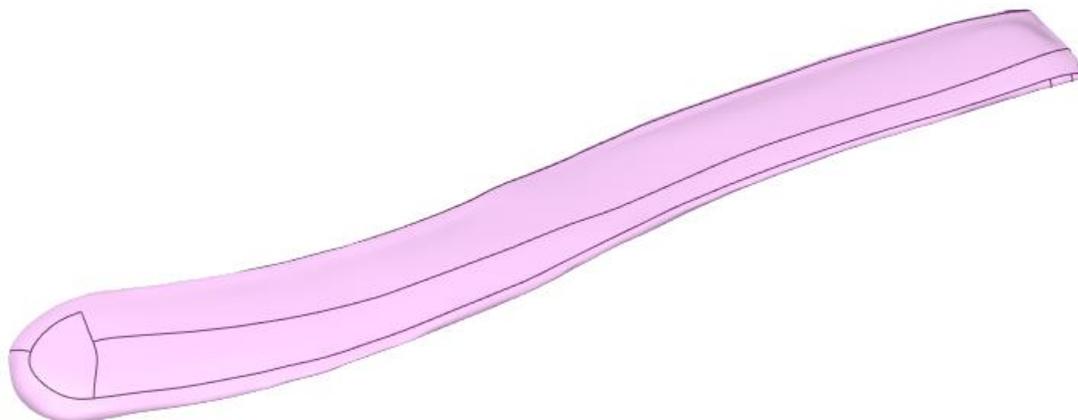


Figura 49: Geometria dello spallaccio scannerizzata

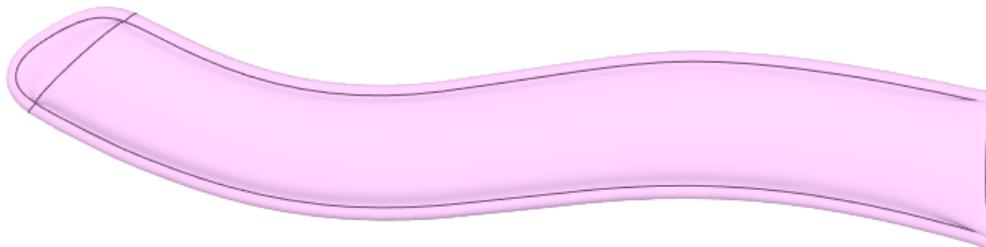


Figura 50: Geometria disegnata dello spallaccio

	volume [mm ³]	nodi	elementi
scan	225137	50315	26929
disegnato	211546	41059	22835

Tabella 10: Dati di confronto tra le mesh ottenute con metodo degli "edge sizing" tra le geometrie dello spallaccio

5.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI FEM

5.3.1 PROVA DI TRAZIONE

Riproducendo il test sperimentale con la simulazione descritta al punto 4.3 è stato possibile definire esattamente lo stesso range di dati in input (“displacement”) e impostare come risultato della simulazione il dato di “reaction Force” all’estremità fissa dello spallaccio, corrispondente alla forza registrata dallo strumento di trazione nella prova sperimentale. Durante la simulazione non è stato condotto il test esattamente con lo stesso numero di dati registrati nella prova sperimentale in quanto solamente con 50 step di iterazione progressivi si riesce ad ottenere una buona convergenza della soluzione, limitando così il costo computazionale e i tempi della simulazione. La scelta del numero di step e quindi il conseguente rate di crescita dello spostamento è stato decretato per tentativi a partire dal range sperimentale impostato sullo strumento Instron® 8801. In Tabella 11 vengono riportati i valori di displacement imposti.

step n°	x [mm]	y [m]	z[m]
1	0	0	0
2	7,16E-04	0	0
3	1,43E-03	0	0
4	2,15E-03	0	0
5	2,86E-03	0	0
6	3,58E-03	0	0
7	4,30E-03	0	0
8	5,01E-03	0	0
9	5,73E-03	0	0
10	6,44E-03	0	0
11	7,16E-03	0	0
12	7,88E-03	0	0
13	8,59E-03	0	0
14	9,31E-03	0	0
15	1,00E-02	0	0
16	1,07E-02	0	0
17	1,15E-02	0	0
18	1,22E-02	0	0
19	1,29E-02	0	0
20	1,36E-02	0	0
21	1,43E-02	0	0
22	1,50E-02	0	0
23	1,58E-02	0	0
24	1,65E-02	0	0
25	1,72E-02	0	0
26	1,79E-02	0	0
27	1,86E-02	0	0
28	1,93E-02	0	0
29	2,00E-02	0	0
30	2,08E-02	0	0
31	2,15E-02	0	0
32	2,22E-02	0	0
33	2,29E-02	0	0
34	2,36E-02	0	0
35	2,43E-02	0	0
36	2,51E-02	0	0
37	2,58E-02	0	0
38	2,65E-02	0	0
39	2,72E-02	0	0
40	2,79E-02	0	0
41	2,86E-02	0	0
42	2,94E-02	0	0
43	3,01E-02	0	0
44	3,08E-02	0	0
45	3,15E-02	0	0
46	3,22E-02	0	0
47	3,29E-02	0	0
48	3,37E-02	0	0
49	3,44E-02	0	0
50	3,51E-02	0	0

Tabella 21: Steps del "displacement" impostato per la simulazione della prova di trazione sulla base del range di spostamenti del test sperimentale

La prima simulazione effettuata è stata condotta sulla geometria tagliata, in Figura 39 riportata al punto 4.3.3, utilizzando un materiale lineare elastico con un modulo elastico fittizio che potesse riprodurre quello dell’elemento più esteso dello spallaccio, ovvero la schiuma. Si è poi provato ad incrementare il modulo elastico in modo da tener conto degli altri materiali presenti, come la bordatura cucita e il tessuto che sicuramente possiedono una rigidità maggiore e pertanto gestiscono principalmente le tensioni interne. Il risultato di queste prime simulazioni, mostrati nel Grafico 2, in arancione-geometria piena, però risulta essere completamente lineare senza nessuna evidenza della non linearità, indotta principalmente dalla geometria ad S, e con un risultato forza-spostamento molto distante dai valori indicati: la curva arancione riportata è stata ottenuta utilizzando come valore di modulo

elastico 25 MPa. Infine, è stato implementato un comportamento non lineare del materiale per poter definire se il risultato globale potesse essere almeno influenzato dalla non linearità del materiale. In qualsiasi caso il comportamento totale rimane comunque lineare: tale risultato, può essere giustificato osservando la distribuzione degli stress indotti sulla geometria così modellata, in Figura 51. Infatti, la simulazione FEM indica zone di maggior tensione quelle interne alle 2 curve dei due profili esterni che però vengono poi unite da una zona centrale di sollecitazione passante per l'anima della geometria: questo non è realistico in quanto né la schiuma né la rete né il tessuto di unione possono offrire tale resistenza alla deformazione.

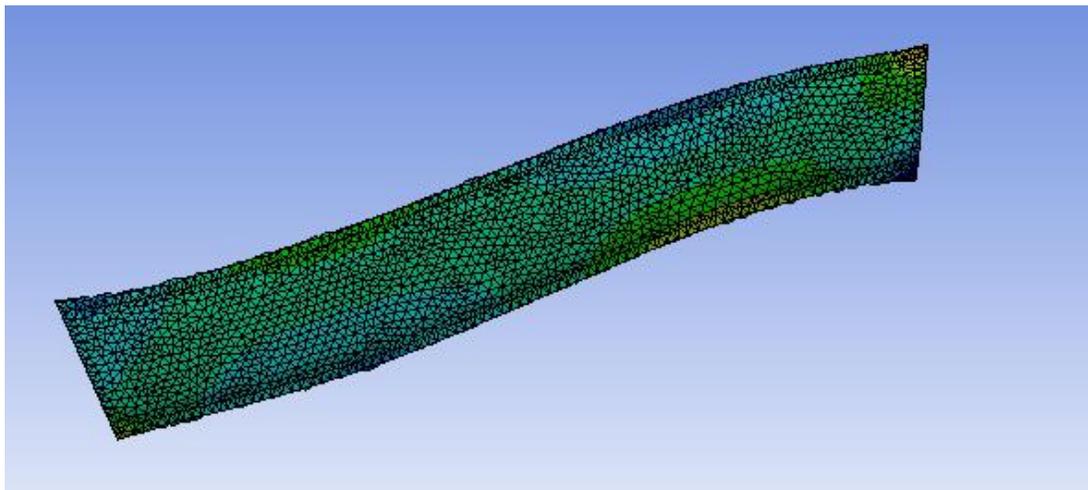


Figura 51: Distribuzione delle tensioni locali nella geometria piena

Ecco allora che con tale modellazione dello spallaccio il comportamento globale risulta completamente lineare e non coerente con il test di trazione sperimentale. Analizzando solamente le tensioni puntuali sul bordo della geometria, la non linearità delle tensioni è apprezzabile ma il risultato globale Forza-Spostamento ricercato non riproduce i dati sperimentali ottenuti. Al fine di avere una migliore comprensione del fenomeno di non linearità globale proveniente dalla geometria ad S si è provveduto a replicare il test su una geometria il cui design a “S” sia molto più accentuato: con questa simulazione di prova è stato possibile confermare la dipendenza della non linearità del grafico sperimentale dalla curvatura ad S dello spallaccio.

Una seconda tranches di simulazioni è stata effettuata a partire dalla considerazione di non linearità della geometria ad S e considerando le zone a maggior rigidità dello spallaccio. In tali simulazioni è stata derivata, con l'utilizzo del CAD SpaceClaim 2020, una nuova geometria cava dalla geometria principale disegnata, ovvero omettendo i componenti dello spallaccio che hanno una minima influenza sulla resistenza a trazione: la geometria cava utilizzata, in Figura 52, è composta solamente dalla bordatura esterna cucita, senza tener conto della schiuma, del tessuto di interconnessione e della rete 3D di contatto. La nuova geometria testata è composta quindi dai due profili esterni di cucitura e da due traverse di interconnessione, che non esercitano alcuna influenza meccanica ma permettono di ottenere un unico componente. Con tale simulazione è stato possibile rilevare la non linearità sperimentale indotta dalla geometria ottenendo come valore di modulo elastico per via iterativa di 250 MPa, descritta dalla curva grigia, nel Grafico 2. In tale modo si è potuto riprodurre analiticamente la curva sperimentale nel primo tratto corrispondente alla deformazione di 5 mm dello spallaccio: questo risultato è quindi già indicativo del comportamento dello spallaccio in un contesto reale di utilizzo in quanto le forze in gioco a cui normalmente è sottoposto sono dell'ordine di questo valore⁸⁰.

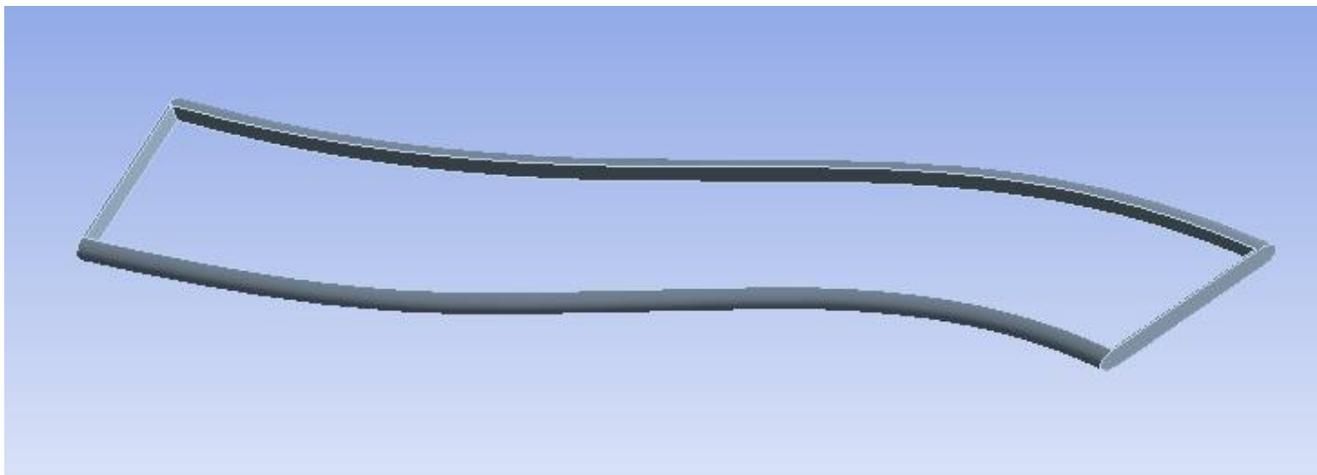


Figura 52: Geometria cava dello spallaccio rappresentante la bordatura cucita perimetrale

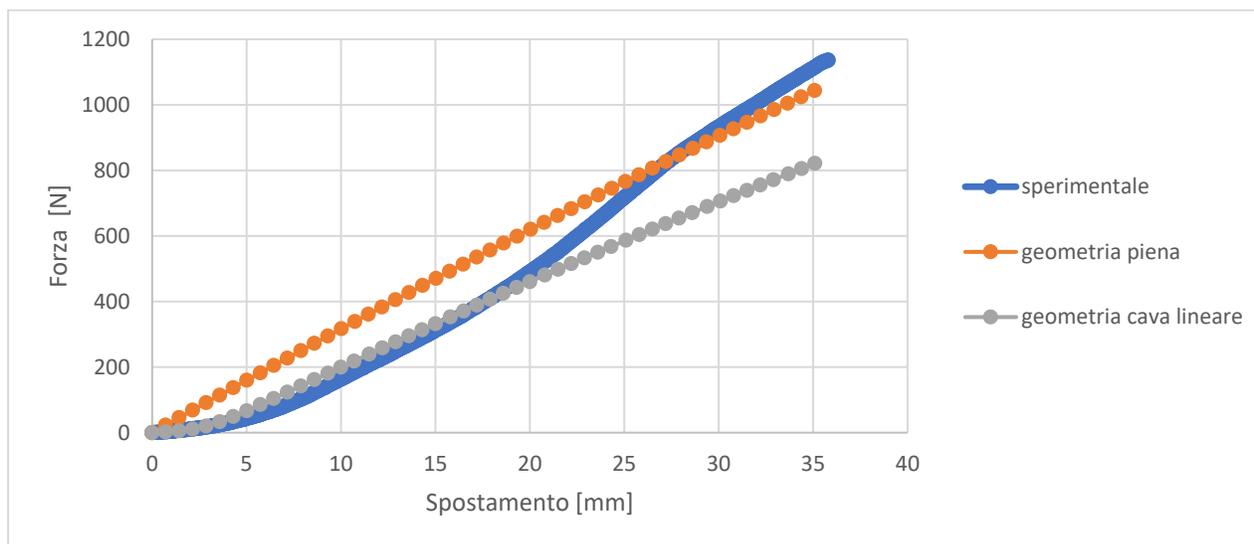


Grafico 2: Risultati delle simulazioni FEM della prova di trazione (1)

Una maggiore chiarezza sulla restante parte della curva Forza-spostamento sperimentale è stata ricercata andando a completare la simulazione a trazione con le restanti componenti dello spallaccio non considerate inizialmente. È stato quindi reintrodotta in primis il tessuto in quanto questo risulta essere un componente con un modulo elastico rilevante rispetto a schiuma e tessuto in rete 3D e sicuramente a stretto contatto (cucito) con la bordatura esterna. Perciò per le simulazioni successive si è utilizzata questa nuova configurazione, come mostra la Figura 53. Tra i due componenti che formano questa struttura è stato imposto un vincolo di contatto definito “Bonded”, in cui i due componenti sono saldati l’uno insieme all’altro senza possibilità di avere movimento relativo.

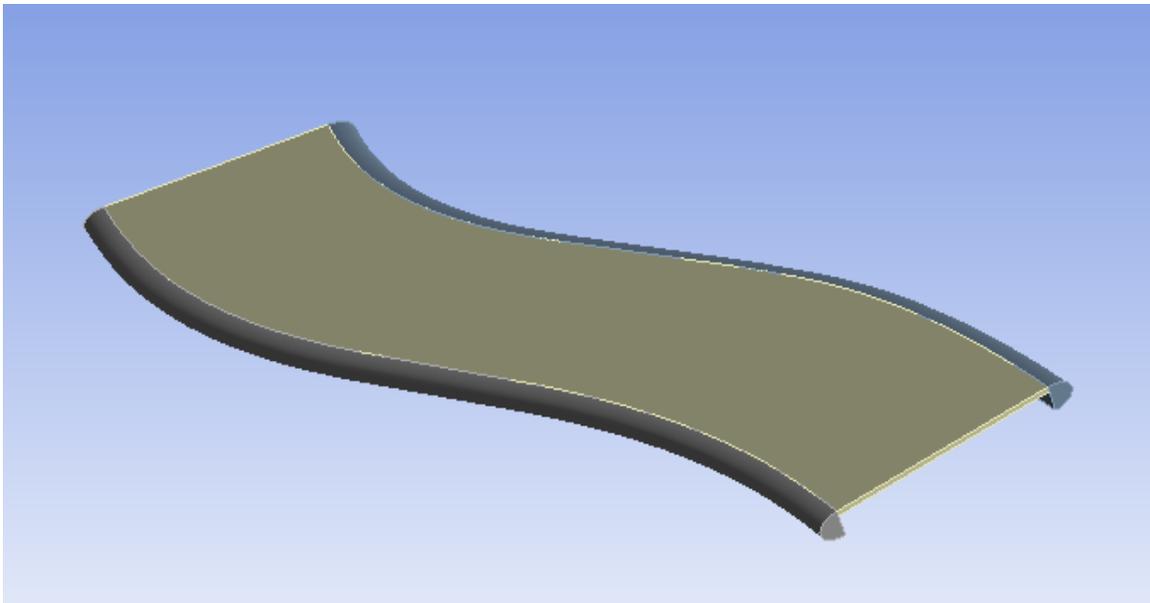


Figura 53: Geometria “bordatura+tessuto” di interconnessione

Avendo così scomposto la struttura dello spallaccio nei vari componenti è stato così implementata la non linearità di entrambi i materiali, riportati nel Grafico 3 e nel Grafico 4: per la bordatura esterna cucita è stato scelto un comportamento “multilinear isotropic hardening” in cui lo sforzo e deformazione sono correlati da una funzione matematica tipo radice quadrata che semplifica il primo tratto della curva sforzo deformazione di un tessuto; per il tessuto si è importato l’andamento tipico di un tessuto in trazione, descritto da un tratto lineare iniziale (prestressing), un plateau centrale (creep under prestressing) e un ultimo tratto ad andamento crescente in cui vengono sollecitate le singole fibre strectate orientate nella direzione di trazione (saturation process of the fabric)⁸⁶. Le caratteristiche del materiale della bordatura sono frutto di una semplificazione della connessione tra il primo e il secondo tratto tipico della curva sforzo-deformazione di un tessuto⁸⁹ e dalla modifica della curva per questioni di convergenza della soluzione. La differenza dei parametri mostrati nel Grafico 3 e nel Grafico 4 è dovuta al processo iterativo scelto al fine di poter fittare al meglio la curva dei risultati sperimentali. La definizione dei vincoli meccanici “fixed support” e “displcement” è stata effettuata in modo che entrambi i componenti siano sottoposti allo stesso “displcement”, risultando così essere in parallelo: perciò il modulo elastico totale della struttura risulta essere la somma di essi. L’utilizzo di materiali non lineari ha determinato un aumento della complessità della soluzione: infatti, per tutte le simulazioni con questa tipologia di materiali la soluzione è stata calcolata includendo automaticamente dal software alcuni substeps in modo da riuscire ad ottenere la convergenza entro i limiti di tolleranza. Il risultato migliore ottenuto per questa serie di simulazioni è presentato dalla curva in giallo definita come “bordatura+tessuto”, nel Grafico 5, con i valori di modulo elastico per la bordatura esterna e per il tessuto rispettivamente di 400 e 50 MPa. Effettuando un confronto con i dati in input di modulo elastico della bordatura esterna si evince che pur avendo inserito un ulteriore componente che gestisce la trazione dello spallaccio il modulo elastico della bordatura nella simulazione “bordatura+tessuto” è stato dovuto incrementare: questo effetto è decretato dalla non linearità del materiale di quest’ultima simulazione descritta.

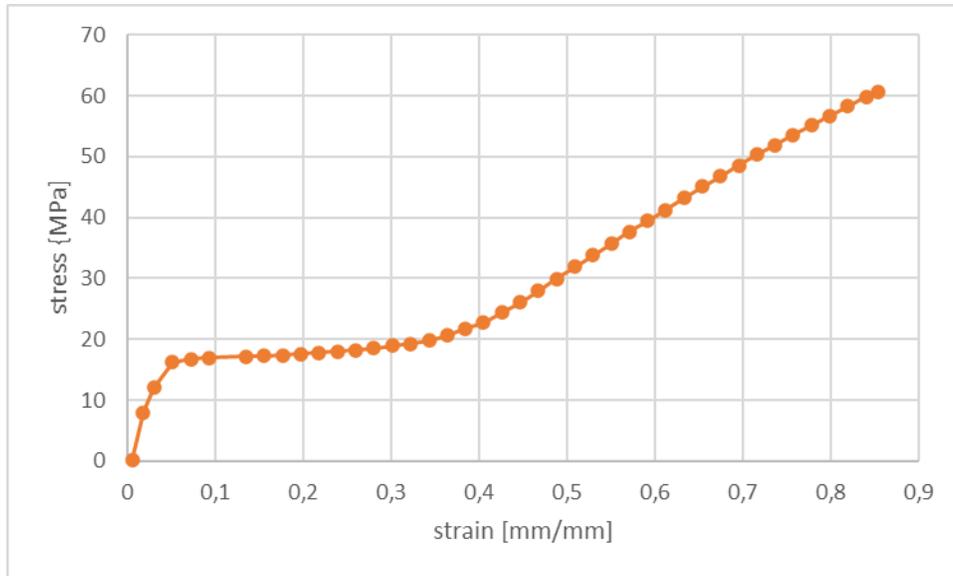


Grafico 3: Andamento del "Multilinear isotropic hardening" del materiale del tessuto di interconnessione

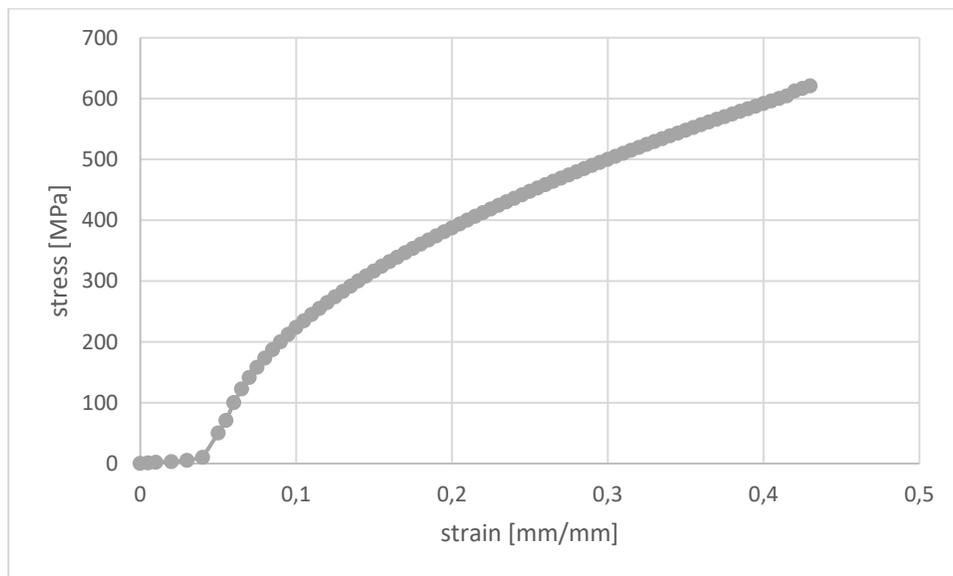


Grafico 4: Andamento del "Multilinear isotropic hardening" del materiale della bordatura esterna

Un'altra prova effettuata su tale geometria è stata condotta imponendo il vincolo di "displacement" solamente alla bordatura esterna, in quanto dall'aspetto del tessuto durante la prova sperimentale questo non risulta così soggetto a trazione, in quanto abbondante o meglio dire in termini meccanici "con gioco": in tale modo perciò si considererebbe solamente la trazione del tessuto indotta dallo stiramento della bordatura esterna, fissata al tessuto con un contatto "bonded". I risultati riportati in colore marrone, nel Grafico 3, presentano un aumento dello stress indotto nel primo tratto di stiramento: questo effetto in realtà non viene mostrato dalla curva sperimentale in quanto la prima zona influenzata dalla sollecitazione risulta la bordatura e la cucitura che fissa il tessuto che può subire anch'essa deformazione con allungamento del filo di cucitura: perciò in questo caso il contatto bonded non riesce a produrre tale situazione andando fin da subito a influenzare lo stiramento della bordatura per mezzo del tessuto adiacente.

Infine, un'ulteriore prova è stata effettuata sulla geometria limitando il modulo elastico dello spallaccio ad un valore minimo e incrementando perciò il valore di modulo elastico della bordatura: si è optato per questa scelta poiché dall'aspetto del tessuto durante la prova sperimentale questo non risulta così soggetto a trazione, in quanto abbondante o meglio dire in termini meccanici "con gioco". Quindi è come fosse stata eseguita una nuova simulazione sulla geometria cava. I parametri di questa simulazione che ha permesso di riprodurre quasi completamente il comportamento a trazione dello spallaccio, come si evince dalla curva verde nel Grafico 5 definita come "geometria cava non lineare" sono riportati nel Grafico 3 e 4. Il fitting del materiale ottenuto non sarà rappresentativo unicamente del tessuto ripiegato e cucito della bordatura ma anche dell'interazione che questo componente principale ha con le restanti parti e la minima influenza che gli altri materiali hanno sul comportamento globale. Sarebbe quindi limitativo indicare come proprietà del materiale della bordatura quello così definito in input, ma si può affermare che il comportamento a trazione dello spallaccio è indotto principalmente da questo componente avente proprietà del materiale simili a quelle ottenute in questa simulazione FEM. dal confronto con le proprietà del tessuto riportate in Tabella 8 al punto 4.1.1 si evince che la forza massima registrata dalla simulazione super di circa 200 N la forza necessaria per la rottura del tessuto nelle condizioni della prova standard nella direzione più resistente: questo dato però è da confrontare ovviamente con l'effettivo carico supportato dal solo tessuto senza considerare l'influenza della cucitura e della bordatura esterna.

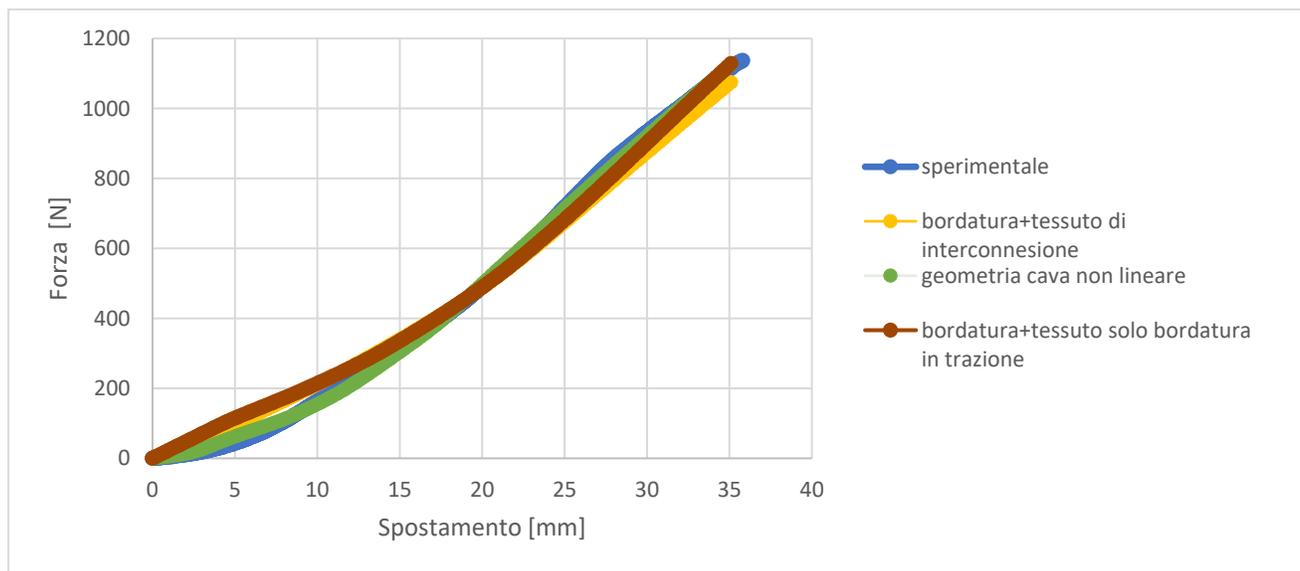


Grafico 5: Risultati delle simulazioni FEM della prova di trazione (2)

Un'ultima simulazione è stata condotta reinserendo tutti i restanti componenti dello spallaccio, schiuma e rete 3D, in modo da riottenere la geometria completa dello spallaccio, mostrata in Figura 54. Per i due componenti aggiunti, che non possiedono proprietà meccaniche che possano influenzare il comportamento meccanico, pertanto, sono stati scelti moduli elastici concordi con la letteratura mostrata nel capitolo 2.4.5 e 2.4.6. La soluzione di questa simulazione però è stata scartata in quanto presentava un costo computazionale elevato e una notevole difficoltà di convergenza per i notevoli elementi in contatto. Inoltre, la definizione dei contatti tra i vari componenti non avrebbe rispecchiato il vero contatto tra gli elementi che non è stato posto come oggetto di studio. Il fine di questa simulazione sarebbe stato solamente di poter definire la geometria completa e poter avere un filo conduttore tra la prova di trazione e la definizione del contatto con il manichino, con l'inclusione della schiuma e della rete 3D.

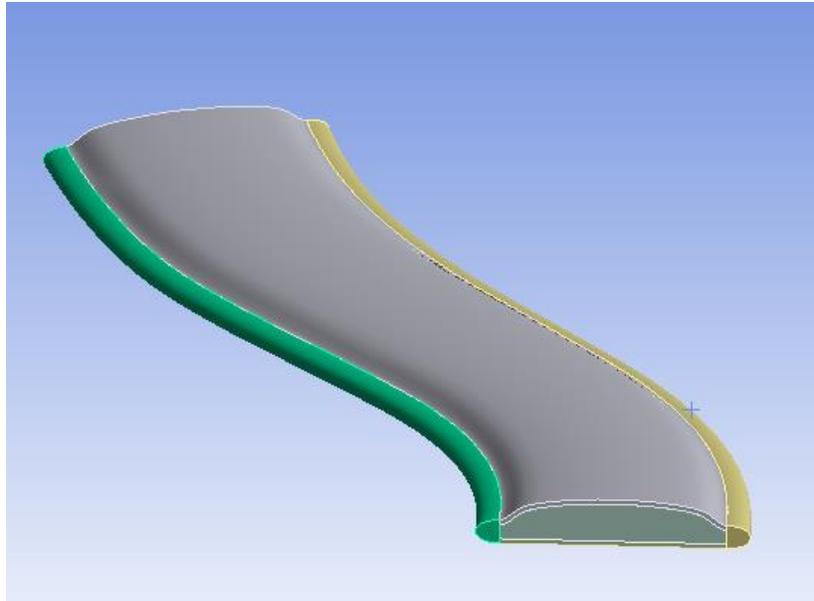


Figura 24: Geometria completa piena suddivisa in bordatura, tessuto di interconnessione, tessuto in rete 3D, schiuma interna

5.3.2 CONTATTO

La simulazione del contatto definita all' inizio del progetto, descritta nel punto 4.4, prevedeva l'utilizzo della geometria del busto scannerizzata in Figura 55, che rispetto alla superficie dello spallaccio risultava essere più omogenea e pertanto, non aveva richiesto la modifica superficiale con il software Autodesk MeshMixer. In sede di simulazione FEM però anche quest'ultima ha evidenziato alcuni problemi di gestione del contatto effettivo con lo spallaccio nel sistema descritto al punto 4.3.4. Nello specifico a partire dalla definizione del contatto iniziale si è dovuto scegliere arbitrariamente la posizione e l'orientazione relativo tra elemento di contatto (spallaccio) e dell'elemento target (busto): questo definisce unicamente il contatto con la superficie obliqua della zona del muscolo del trapezio e quindi la diversa condizione tra la zona interna dello spallaccio, più vicino al collo, in contatto e la zona esterna, più vicino alla spalla, sollevata dal manichino nella parte iniziale. L'insieme di questi problemi di set up iniziali non ha permesso di utilizzare il file del busto scannerizzato per problemi di convergenza delle soluzioni delle simulazioni implementate.

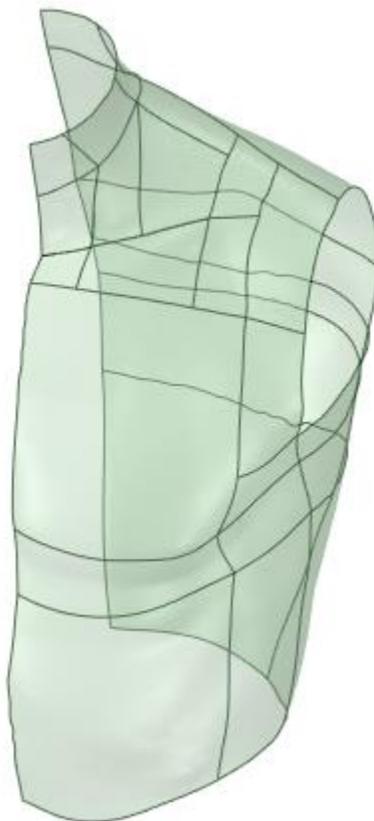


Figura 55: Geometria del busto del manichino scannerizzato

La soluzione adottata per poter comunque simulare il contatto dello spallaccio e quindi la sua deformazione è stata eseguita modificando l'elemento target del contatto: la superficie del manichino scannerizzata è stata rimpiazzata da un elemento cilindrico, semplificando il sistema in esame e rifacendosi così ad altri schemi meccanici utilizzati in letteratura^{90,91}. In tale modo la superficie cilindrica risultava molto più facilmente gestibile dal software FEM sia per la creazione della mesh sia per l'effettivo contatto con lo spallaccio e la convergenza della soluzione. La gestione della mesh dello spallaccio è stata definita come già descritto nel punto 5.2, mentre per il cilindro è stato definito un metodo di "facemeshing" per la superficie di contatto. La geometria dello spallaccio quindi utilizzata è stata definita in termini di materiale come per la prima simulazione della prova di trazione, come materiale omogeneo isotropo lineare, al fine di limitare la complessità della convergenza della soluzione

I parametri del contatto fittati secondo un approccio sperimentale sono riportati in Tabella 22. Il contatto è stato definito come un contatto "frictionless" in cui i parametri su cui si è agito per una migliore piegatura dello spallaccio sul componente di contatto sono riportati nella Tabella 22, evidenziati in giallo. Gli elementi che il software utilizza per la regione del contatto sono definiti in Tabella 23 e in Tabella 24.

RISULTATI

Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Asymmetric
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Off
Detection Method	On Gauss Point
Penetration Tolerance	Value
Penetration Tolerance Value	5,e-005 m
Normal Stiffness	Absolute Value
Normal Stiffness Value	1,e+010 N/m ²
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0,4
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	1,e-004 m

Tabella 22: Definizione dei parametri di contatto tra spallaccio e cilindro

Number of total nodes	83240
Number of contact elements = 13760	13760
Number of spring elements	0
Number of bearing elements	0
Number of solid elements	32438
Number of condensed parts	0
Number of total elements	46199

Tabella 23: Numero di elementi utilizzati per la simulazione del contatto con il cilindro

*** ELEMENT MATRIX FORMULATION TIMES				
TYPE	NUMBER	ENAME	TOTAL CP	AVE CP
1	22967	SOLID187	3.797	0.000165
2	9471	SOLID186	3.484	0.000368
3	10064	CONTA174	0.703	0.000070
4	2778	TARGE170	0.031	0.000011
5	861	CONTA174	0.047	0.000054
6	1	TARGE170	0.000	0.000000
7	27	SURF156	0.000	0.000000
8	30	SURF156	0.000	0.000000

Tabella 24: Tipologia degli elementi della simulazione FEM utilizzati dal software per la risoluzione del contatto

Nella Figura 56 viene mostrata la zona di contatto tra il cilindro e lo spallaccio.

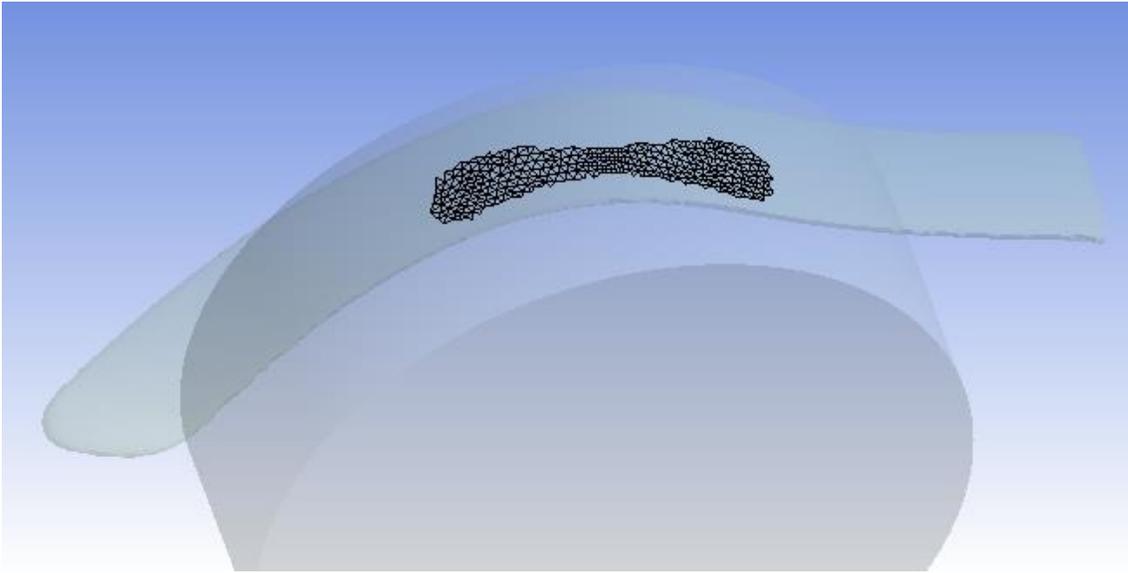


Figura 56: Area di contatto tra lo spallaccio e il cilindro al 445° step corrispondente all'interruzione della simulazione

La simulazione ha richiesto un costo computazionale molto più elevato rispetto alle simulazioni di trazione e i risultati sono stati ottenuti andando a incrementare gradualmente ed empiricamente le forze agenti sullo spallaccio in modo da poter avere una corretta e omogenea piegatura su tutta la superficie cilindrica. La simulazione, quindi, ha richiesto 445 steps ed una forza totale alle estremità dello spallaccio di 435,19 N. I principali problemi di convergenza sono stati indotti dal parametro di “Normal stiffness” per la gestione della facilità di penetrazione nell’elemento target (cilindro).

È stata compiuta un’ulteriore simulazione adottando un contatto di tipo “Frictional” al fine di verificare l’influenza della forza di attrito sulla pressione registrata sullo spallaccio. Come descritto nel punto 4.3.4 la componente di attrito induce in linea teorica anche una sollecitazione tangenziale, che altera anche la pressione normale sulla superficie in contatto. La definizione del contatto è stata effettuata con gli stessi parametri, già descritti nella Tabella 22 e nella Tabella 24 con le stesse condizioni di prova, ma è stato impostato il coefficiente di attrito al valore di 0,5: questo valore è stato scelto arbitrariamente sulla base di dati scientifiche in letteratura riguardanti il contatto diretto tra tessuto e pelle⁹², in quanto non è stata prevista una determinazione sperimentale. Tale scelta è stata effettuata per ottenere una valutazione qualitativa, seppur questo parametro sia soggetto a molte proprietà quali ad esempio tipologia di fibra e sua dimensione, tipologia di tessitura, umidità relativa. I risultati ottenuti da questa simulazione in termini di pressioni di contatto sono molto simili a quelli ottenuti con contatto “Frictionless”, riportati nel Grafico 5, dimostrando così che la semplificazione ideata in precedenza risulta conveniente: infatti per quest’ultima il costo computazionale è risultato maggiore con l’utilizzo di 4 substeps, al fine di ottenere la convergenza.

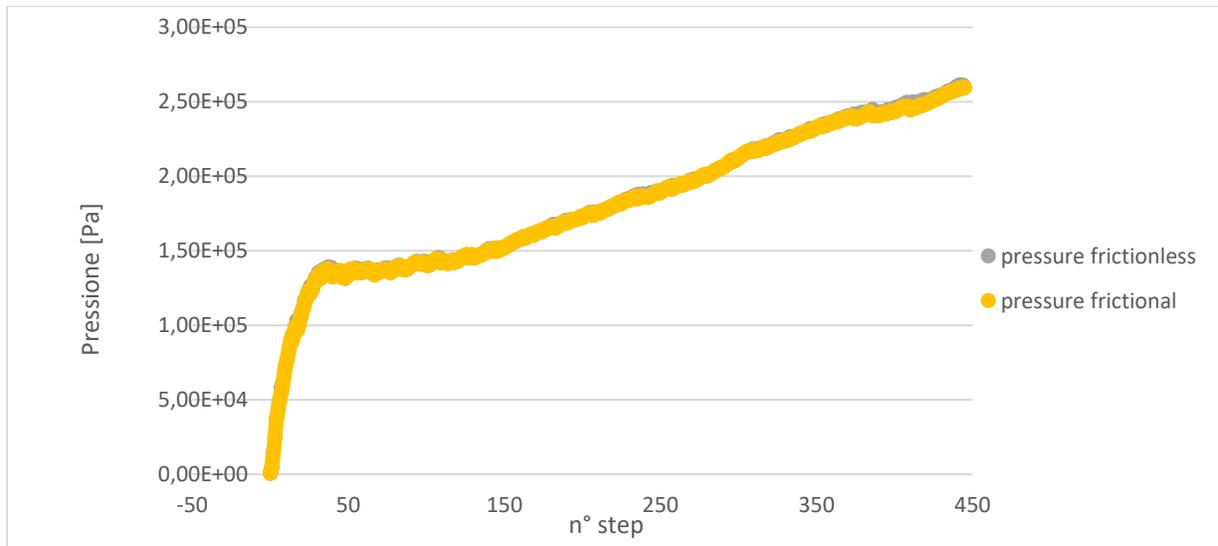


Grafico 3: Pressione di contatto nel caso di contatto Frictionless o Frictional

Una seconda simulazione è stata eseguita anche con la geometria scomposta nei vari elementi, già mostrata in Figura 53, utilizzando il set di parametri dei materiali impostati per la simulazione della prova di trazione. A causa dell'elevato numero di elementi di contatto della geometria dello spallaccio la soluzione risulta troppo complessa per l'analisi FEM, come era già stato riscontrato nel caso della sola trazione.

6 CONCLUSIONI

Il lavoro presentato ha subito alcuni cambiamenti operativi rispetto al metodo ideato ad inizio progetto.

In primo luogo, la scannerizzazione dello spallaccio e del busto ha richiesto l'utilizzo di un sistema di appoggi per mantenere il sistema nella stessa posizione e poter effettuare una scansione completa e omogenea. La scansione del busto non ha richiesto particolare attenzione se non per l'utilizzo dello spray di contrasto, mentre quella dello spallaccio è stata più complessa ma con l'utilizzo dello stesso spray è stato comunque possibile acquisire immagini chiare della bordatura esterna, altrimenti difficilmente rilevabile per il suo spessore ridotto.

Inoltre, la digitalizzazione del sistema ha richiesto un notevole sforzo sia in termini di comprensione della gestione dei vari elementi nei diversi software CAD, sia in termini di tempo. Il motivo principale di queste difficoltà risiede nella complessità della geometria, composta da superfici irregolari, e nella necessità di gestire superfici e curve invece dei tipici elementi solidi: in questo contesto l'utilizzo accoppiato dei CAD Rhinoceros7 e SpaceClaim2020 ha semplificato molto il lavoro, in quanto dispongono di tools ad hoc automatici o di facile utilizzo.

Infine, anche la parte di realizzazione della geometria disegnata a elementi solidi ha richiesto un notevole impegno al fine di poter ottenere una struttura chiusa (definita "polisuperficie chiusa" per Rhinoceros7) che potesse automaticamente essere gestita. Anche questa fase infatti, seppur di più facile gestione, ha richiesto una revisione delle singole parti disegnate, definite come polisuperfici aperte, al fine di ottenere una singola polisuperficie chiusa o elemento solido.

Questi step di digitalizzazione sono stati eccessivamente complessi rispetto al loro reale utilizzo; infatti, non è stato possibile utilizzare nessun componente digitalizzato nell'ambiente FEM, ma sono serviti solamente come linea guida geometrica per la creazione dello spallaccio disegnato. A causa di questo primo risultato inatteso, è stato impossibile fornire un confronto oggettivo delle soluzioni tra la geometria scannerizzata e quella disegnata come previsto dal metodo di lavoro iniziale.

La fase del lavoro più discussa è stata quella di simulazione della prova di trazione. Questo step, infatti, era stato pensato solamente come uno step intermedio al fine di ottenere le proprietà medie dello spallaccio dal confronto con il test sperimentale. La difficoltà riscontrata nel riprodurre il comportamento non lineare della geometria piena con cui si pensava di poter gestire tutte le fasi del progetto è risultata decisiva. La suddivisione della geometria nei diversi componenti era già stata discussa in sede di ideazione del metodo di lavoro, ma era stata scartata in quanto risultava difficile conoscere e poter pertanto definire nell'ambiente FEM l'interazione e il contatto tra le diverse parti, nei termini di deformazioni e attriti tra di essi; inoltre tale approccio avrebbe richiesto una quantità maggiore di test sperimentali in laboratorio per poter definire le singole proprietà di ogni materiale dello spallaccio. La soluzione finale proposta, costituita da un unico elemento perimetrale è risultata essere coerente con i risultati del test sperimentale seppur si tratti di una geometria assai semplice, in cui viene solamente definito un componente dello spallaccio: perciò il miglior risultato è stato raggiunto utilizzando una geometria simile a quella reale, poiché disegnata, e notevolmente semplificata per l'assenza dei materiali interni di schiuma, tessuto e rete 3D. Da questa evidenza delle simulazioni si è potuto decretare che il tessuto esterno in realtà ha un'influenza minima sul comportamento a trazione dello spallaccio, in quanto è sovradimensionato rispetto alle reali proporzioni dello spallaccio: questo aspetto non era stato rilevato nelle prime fasi dello svolgimento della prova sperimentale di trazione, in cui si evidenziavano dei punti del tessuto a ridosso della cucitura esterna con un notevole stiramento. Il fatto che il componente "tessuto" sia stato il primo a cedere nella prova di trazione sperimentale è dovuto quindi alla presenza di cuciture per i componenti di regolazione dello spallaccio che incrementano localmente la tensione all'estremità del tessuto e inducono lo strappo.

Un'ultima considerazione può essere fatta a riguardo alla geometria di partenza utilizzata: il design della geometria è stato scelto confrontando la struttura tra i due afferraggi del macchinario di trazione e definendo così la porzione di materiale utile per le simulazioni FEM. Tutte le geometrie presentate omettono anche la deformazione trasversale dello spallaccio indotta dalla forza di chiusura nella zona degli afferraggi.

La questione del contatto è stata limitata dall'impossibilità di confronto con i dati dei test sperimentali sul manichino, in quanto non è stato possibile replicare il sistema reale nelle simulazioni FEM. Come già avvenuto per la simulazione della prova di trazione anche per il contatto è stato impossibile ottenere dei risultati con la geometria completa disegnata scomposta nei vari componenti. L'unico risultato relativo all'area di contatto con l'elemento cilindrico sia nella definizione di contatto "frictionless" sia "frictional" è stato ottenuto senza una precisa trattazione del comportamento meccanico dello spallaccio in quanto le uniche simulazioni complete sono state generate con l'utilizzo della prima geometria testata a trazione che non risulta coerente con il reale comportamento dello spallaccio.

I risultati ottenuti per le prove effettuate hanno permesso di valutare il comportamento meccanico dello spallaccio ma non di simulare il reale contatto con la geometria del manichino che era l'obiettivo iniziale del lavoro. I principali problemi riscontrati nella gestione delle geometrie scannerizzate suggeriscono, per tale sistema, un approccio più tradizionale e l'utilizzo di queste solo per una linea guida geometrica. L'ottimizzazione della procedura di creazione di un file 3D potrebbe essere implementata con tecniche CAD manuali che richiedono una maggiore competenza e cura, dilatando ancora i tempi di questa fase.

Per quanto riguarda l'approccio FEM la soluzione di modellizzazione dello spallaccio come unico componente non è risultata la soluzione migliore: a tal proposito un secondo approccio più realistico e mirato sui singoli componenti potrebbe favorire risultati più precisi a seguito di una più complessa e completa ricerca dell'interazione tra di essi. Per effettuare un tipo di lavoro basato su ogni singolo componente sarebbe pertanto richiesto una caratterizzazione in laboratorio dei singoli elementi con prove normative sui materiali e una ricerca della meccanica di interazione a livello di attriti, vincoli delle cuciture e deformazioni imposte dal confezionamento del prodotto spallaccio. Pur riuscendo ad ottenere delle informazioni quantitative su questi aspetti sarebbe comunque necessario convertirle in informazioni analitiche gestibili dai software FEM. Al contrario alcuni buoni risultati sono stati ottenuti con una semplificazione notevole della geometria totale e pertanto una modellizzazione semplificata dei restanti elementi e delle loro interazioni potrebbe risultare un approccio più efficace.

APPENDICE

STRUMENTI

BILANCIA TFWX 150 (Orma, Italia)



- Portata 150 kg
- Sensibilità 5 g
- Piatto inox 450×600 mm

TREADMILL High Muster T540 Pro



SCHEDA TECNICA TREADMILL HIGH MUSTER T540 PRO

Larghezza	170 cm
Altezza	139 cm
Profondità	78 cm
Peso	85 kg
Potenza motore	3 CHP continui - 6 HP picco
Inclinazione Elettrica	0 ÷ 15%
Velocità	1 ÷ 20 km/h
Peso massimo utente	135 kg
Nastro	49 x 140 cm
Sistema ammortizzante Elastomeri	

SCANNER Artec EvaLite 3D (US patent NO 7768656)



Lo scanner Artec™ Eva 3D è uno strumento che sfrutta fasci di luce. L'acquisizione in 3D può avvenire fino a 16 fotogrammi al secondo a colori a 24 bit per pixel (bpp) con una risoluzione di 1,3 megapixel (mp).

Durante la scansione, questi frame vengono allineate automaticamente in tempo reale in modo da poter vedere sul monitor del PC collegato la porzione dell'oggetto che si sta acquisendo.

Lo strumento può acquisire ed elaborare simultaneamente fino a 2 000 000 punti al secondo, La velocità di scansione è maggiore di un laser scanner, fornendo al contempo alta risoluzione (fino a 0,02 pollici) e alta precisione (fino a 0,003 pollici). Lo strumento non necessita di nessun marker e nessuna calibrazione.

SCHEDA TECNICA SCANNER ARTEC EVALITE 3D

Specifications		Eva	Eva Lite
Ability to capture texture		•	—
3D resolution, up to	0.02 in.	•	•
3D point accuracy, up to	0.003 in.	•	•
3D accuracy over distance, up to	0.03% over 3 ft	•	•
Texture resolution	1.3 mp	•	—
Colors	24 bpp	•	•
Light source	flash bulb (no laser)	•	•
Working distance	16 - 40 in.	•	•
Linear field of view, HxW @ closest range	8 × 6 in.	•	•
Linear field of view, HxW @ furthest range	21 × 15 in.	•	•
Angular field of view, HxW	30 × 21°	•	•
Video frame rate, up to	16 fps	•	•
Exposure time	0.0002 s	•	•
Data acquisition speed, up to	2 000 000 points/s	•	•
Multi core processing	Yes	•	•
Dimensions, HxDxW	10,3 × 6,2 × 2,5 in.	•	•
Weight	1.9 lb	•	•
Power consumption	12V, 48W	•	•
Interface	1 × USB2.0	•	•
Output formats	OBJ, PTX, STL, WRML, ASCII, AOP, CSV, PLY, E57	•	•
Processing capacity	40'000'000 triangles/1GB RAM	•	•
Supported OS	Windows 7 or Windows 8 – x64	•	•
Minimum computer requirements	I5 or I7 recommended, 8Gb RAM, NVIDIA GeForce 400 series	•	•
Calibration	no special equipment required	•	•

SPRAY Aesub 100% scannable blue (Microservice 3d metrology solutions)



AESUB blue è uno spray per la scansione a scomparsa automatica. Lo spray evapora in poche ore, il che significa che non è necessario pulire la superficie dopo la scansione. Il blu AESUB non contiene pigmenti ed evita così la contaminazione da pigmento di aree sensibili, come laboratori e produzione siti, apparecchiature e utenti. Il blue AESUB ha la funzione di aumentare notevolmente l'efficienza durante l'acquisizione della superficie da digitalizzare, formando un sottile strato di rivestimento bianco omogeneo che crea le condizioni ideali per la scansione ottica

Le caratteristiche del blu AESUB sono:

- evanescente
- consistente, omogeneo ed asciutto
- Risparmio di tempo e costi: nessuna pulizia successiva necessaria
- spessore dello strato di $\sim 8-15 \mu\text{m}$
- privo di pigmenti – la polvere spray non danneggia la compatibilità della superficie acquisita
- eccellente scansionabilità

Aree di applicazione

AESUB blue facilita e consente la digitalizzazione ottica in un'ampia varietà di settori industriali e di una vasta gamma di applicazioni: le principali sono

- reverse engineering
- ingegneria metrologia ottica
- ricerca e sviluppo
- scansione in linea
- architettura
- ispezione di superficie
- archiviazione digitale

BODITRAK2 PRO BT2-3232-200-000218

Il sistema di mappatura della pressione BodiTrak2 Pro è utilizzato per valutare e documentare attraverso dati oggettivi la gestione della pressione, postura e relativo comfort durante la seduta; pertanto, lo strumento è stato utilizzato per un fine diverso da quello per cui è stato ideato. Lo strumento dispone di un'area di acquisizione di 18x18 pollici, equivalenti a circa 45x 45 cm dotata di 1024 sensori.



INSTRON® 8801

Instron® 8801 è un sistema servoidraulico per prove meccaniche di trazione e fatica.

Instron 8801 dispone di un controller digitale 8800MT che fornisce il controllo completo del sistema e della prova in corso.

Caratteristiche tecniche Instron® 8801

FEATURES

- Double-acting servohydraulic actuator with force capacity up to ± 100 kN (± 22 kip)
- High-stiffness, precision-aligned load frame with twin columns and actuator in lower base
- 150 mm (6 in) of usable stroke
- Designed for both dynamic and static testing on a variety of materials and components
- Choice of hydraulic configuration and dynamic performance to suit application
- Extra-height frame option for testing longer load strings
- Adjustable upper crosshead with hydraulic lifts and locks fitted as standard for easy adjustment of daylight
- Patented₁ Dynacell™ advanced load cell technology for faster testing and reduction of inertial errors
- Compact servohydraulic fatigue test system – frame requires less than 0.5 m² (5.4 ft²) of floor space
- Hydrostatic bearing actuators for higher side-load resistance or material critical applications, such as low cycle fatigue (LCF)
- Designed to be used with the 3520 Series of Hydraulic Power Units
- Compatible with a large range of grips, fixtures, chambers, video extensometers, protective shields, and other accessories
- Patented stiffness based tuning algorithm that enables users to tune a variety of specimens in seconds



MICROLAB PICOPRESS

Il dispositivo PicoPress è un dispositivo digitale portatile destinato alla misura locale della pressione.

Il dispositivo PicoPress utilizza un sensore circolare di materiale biocompatibile estremamente sottile, nel quale viene immesso un piccolissimo volume noto di aria. Il sensore viene interposto tra le due superfici a contatto. La pressione rilevata sul sensore viene misurata da un manometro digitale a microprocessore e visualizzata tramite un display alfanumerico che fornisce anche le istruzioni operative essenziali.

Il dispositivo PicoPress incorpora una micro pompa azionata manualmente per l'introduzione del volume noto di aria nel sensore. PicoPress consente la memorizzazione di un massimo di 100 misure e presenta, inoltre, la possibilità di interfacciamento USB con un personal computer.

SCHEDA TECNICA MICROLAB PICOPRESS

Costruttore	Microlab Elettronica s.a.s. di Bergamo Giorgio & C. via G. Rossa, 35 35020 Ponte S. Nicolò (PD) – ITALIA
Caratteristiche elettriche	
Tensione di alimentazione	7.2 V forniti da 6 batterie interne NI-MH da 1.2 V 600 mAh
Corrente max. assorbita	50 mA \pm 5 mA
Fusibile di protezione	500mA interno autoripristinabile
Display	Alfanumerico negativo, 16 colonne, 2 righe, retroilluminato blu
Potenza assorbita a 230V	10W (durante la ricarica delle batterie)
Dimensioni	160 mm x 90 mm x 32 mm
Peso dispositivo	320 grammi
Condizioni ambientali ammesse	
Esercizio	Temperatura: da 10°C a 30°C (vedi nota) Umidità: max. 70% Rh a +30°C Generali: ambiente ambulatoriale
Immagazzinaggio	Temperatura: da -5°C a 40°C Umidità: max. 70% Rh a +30°C
Caratteristiche elettromedicali	
Tipo di dispositivo	Classe di rischio: I secondo 93/42/CE
Parte applicata	Tipo F secondo IEC EN 60601-1
Isolamento	Classe II (durante la ricarica) Alimentazione interna (durante l'uso)
Grado di protezione da liquidi	IPX0
Utilizzo in presenza di gas infiammabili	No
Modalità d'impiego	Funzionamento continuo
Prestazioni	
Intervallo di misura	Da 0 a 189 mmHg
Precisione	\pm 3 mmHg (vedi nota)
Pressione massima ammissibile	300 mmHg



TERMOCAMERA Nec Avio G100EX

Permette di monitorare le differenti temperature superficiali degli oggetti inquadrati. Lo strumento restituisce un'immagine in scala di colori a seconda della temperatura rilevata nelle diverse zone. È dotato di un sensore infrarosso radiometrico da 320 x 240 pixel e di un display da 3,5 pollici.



Alcune altre informazioni sullo strumento sono riportate di seguito:

- Ottica motorizzata con autofocus;
- Autorange temperatura;
- Registrazione immagini termiche automatica temporizzata.
- Temperatura di 5 punti a piacere con singola emissività regolabile;
- Temperatura max. min. e media entro cinque aree regolabili e posizionabili a piacere;
- Ricerca automatica temperatura massima, minima con indicazione della posizione;
- Telecamera nel Visibile incorporata completa di Illuminatore a LED, per registrare e visualizzare le due immagini (IR/Vis) nella modalità Fusion, Affiancata e Picture in Picture.
- Range di funzionamento -15/+50°C

SOFTWARE

- ARTEC16 STUDIO 3D: software SScanner 3D Artec EvaLite
- AUTODESK MESH MIXER (versione 3.5.474)
- BODITRACK16 software Boditrak 2 Pro
- RHINOCEROS 7
- ANSYS SPACECLAIM 2020
- ANSYS WORKBENCH 2020 R2
- OFFICE EXCEL 365

MATERIALE

ZAINO FERRINO MIZAR 18



DATI TECNICI:

- Massa (g) 500 g
- Capacità (l) 18 l
- Dimensioni (cm) 50x29x15 cm
- Tessuti: Poliestere invisible Ripstop 210D
- 3D NET poliestere 200g/m²
- Schiuma: PE celle chiuse spessore 10 mm

MANICHINO - MISMH1NE-EHMNE (soldati.it)



Manichino uomo in pvc antiurto nero completo di testa a uovo.

Base rettangolare in vetro temperato (cm 42x30) con attacco al polpaccio (ingombro complessivo cm 60x30x190h).

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Ferrino: Contemporary Outdoor Since 1870. *Ferrino* <https://www.ferrino.it/>.
2. Kocienski, K. N., Healey, E. N., Pulver, B. D. & Cassidy, D. C. Improved Backpacking Load Carriage System. (2017).
3. Scopri Storica, la rivista di storia di National Geographic. *www.storicang.it* <https://www.storicang.it/>.
4. Parris, A. The History of the Backpack. *Uncommon Path – An REI Co-op Publication* <https://www.rei.com/blog/hike/the-history-of-the-backpack> (2018).
5. Unpacking The History of the Backpack. <https://www.heddels.com/2018/08/unpacking-history-backpack/>.
6. The Origins of the Backpack timeline. *Timetoast timelines* <https://www.timetoast.com/timelines/the-origins-of-the-backpack>.
7. Deuter GB - Rucksacks, Backpacks and Outdoor Equipment from Deuter UK. <https://www.deutergb.co.uk/>.
8. CamelBak® UK | Shop Bottles & Hydration Packs. <https://www.camelbak.co.uk/>.
9. Sales value global backpack market by region 2013 to 2023. *Statista* <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/910249/sales-value-global-backpack-market-by-region/>.
10. Backpacks global market value forecast 2027. *Statista* <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1285131/backpacks-global-market-value-forecast/>.
11. Growth rate of the backpack market by selected market worldwide 2013-2018. *Statista* <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1029532/growth-rate-of-the-backpack-market-by-selected-market-worldwide/>.
12. Outdoor sporting goods market value Europe 2019. *Statista* <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1193784/outdoor-sporting-goods-market-size-in-europe/>.
13. Outdoor sporting goods unit sales Europe 2019. *Statista* <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/1193823/outdoor-sporting-good-units-sold-in-europe-by-category/>.
14. Backpack Materials Guide: Everything You Need To Know * Expert World Travel. <https://expertworldtravel.com/backpack-materials-guide/> (2018).

15. Backpack parts explained – straps, loops and more! | Thule | Switzerland. <https://www.thule.com/en-ch/articles/guides/backpack-parts-explained-straps-loops-and-more>.
16. Backpack Straps 101: The Epicly Cool Guide You Never Wanted (But You Needed). *Gear Up Hiking* <https://gearuphiking.com/what-are-backpack-straps-made-of/> (2021).
17. Ritchie, G. White Mountain Backpacks. <https://www.whitemountain.com.au/>.
18. 24HOURCAMPFIRE. <https://www.24hourcampfire.com/>.
19. Carryology | Exploring Better Ways to Carry. <https://www.carryology.com/>.
20. Make a Plastic Frame Sheet with Aluminum Stay — Stitchback DIY trail gear. <https://www.stitchbackgear.com/articles/frame-sheet-with-stay>.
21. <https://outlifeexpert.com/>.
22. Deuter Material 2016 by Lera SPORT Shop & Service - Issuu. https://issuu.com/lerasport/docs/deuter_material_2016.
23. Anton, A. & Baird, B. R. Polyamides, Fibers. in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (John Wiley & Sons, Ltd, 2005). doi:10.1002/0471238961.0609020501142015.a01.pub2.
24. Nylon - Wikipedia. <https://it.wikipedia.org/wiki/Nylon>.
25. Corporation, R.-M. O. Tessuto in nylon ripstop elasticizzato 70D in 4 direzioni | Produttore di tessuti e tessuti - U-long. *U-Long High-Tech Textile Co., Ltd.* <https://www.u-long.com/it/product/YZK0113.html>.
26. X-Pac - Pack Fabric Designed to Perform From Sea to Summit. *X-Pac* <https://www.x-pac.com/>.
27. Cassidy, T. & Goswami, P. 11.9 Polyester Fabric Dyeing. in *Textile and Clothing Design Technology* (CRC Press).
28. Hansen, S. & Atwood, K. B. Polyester Fibers. in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (John Wiley & Sons, Ltd, 2005). doi:10.1002/0471238961.1615122508011419.a01.pub2.
29. Özek, H. Z. Development of waterproof breathable coatings and laminates. in *Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing* 25–72 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-08-101212-3.00002-2.
30. Holmes, D. Waterproof breathable fabrics. in *Handbook of Technical Textiles* 282–315 (2000). doi:10.1533/9781855738966.282.

31. Teumac, F. M. Fabrics, Coated. in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (John Wiley & Sons, Ltd, 2011). doi:10.1002/0471440264.pst128.
32. Abbigliamento Impermeabile, Antivento e Traspirante | GORE-TEX. <https://www.gore-tex.com/it>.
33. Patagonia Outdoor Clothing & Gear. <https://eu.patagonia.com/gb/en/home/>.
34. Ruiz-Herrero, J. L. & Rodríguez-Perez, M. A. Polymeric Foams. in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* 1–39 (John Wiley & Sons, Ltd, 2015). doi:10.1002/0471440264.pst634.
35. Online Materials Information Resource - MatWeb. <https://www.matweb.com/>.
36. Sonnenschein, M. F. & Koonce, W. Polyurethanes. in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (John Wiley & Sons, Ltd, 2011). doi:10.1002/0471440264.pst295.pub2.
37. Ramesh, N. S. Polyethylene Foam Extrusion. in *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology* 603–636 (John Wiley & Sons, Ltd, 2017). doi:10.1002/9781119159797.ch20.
38. EVERGOODS. EVERGOODS - Crossover Backpacks and Apparel. *EVERGOODS* <https://evergoods.us/>.
39. Technology - Zotefoams. <https://www.zotefoams.com/technology/>.
40. Sturdy, J. T., Sessoms, P. H. & Silverman, A. K. A backpack load sharing model to evaluate lumbar and hip joint contact forces during shoulder borne and hip belt assisted load carriage. *Applied Ergonomics* **90**, 103277 (2021).
41. Mei-ling Lau, S. *et al.* A Shape Memory Alloy Energy Absorber for Backpack Design. *Materials and Manufacturing Processes* **25**, 281–286 (2010).
42. Home | Plastics Machinery & Manufacturing. <https://www.plasticsmachinerymanufacturing.com/>.
43. Brackley, H. M. & Stevenson, J. M. Are children's backpack weight limits enough? A critical review of the relevant literature. *Spine (Phila Pa 1976)* **29**, 2184–2190 (2004).
44. Hadid, A., Gozes, G., Atoon, A., Gefen, A. & Epstein, Y. Effects of an improved biomechanical backpack strap design on load transfer to the shoulder soft tissues. *Journal of Biomechanics* **76**, 45–52 (2018).
45. Hadid, A., Epstein, Y., Shabshin, N. & Gefen, A. Modeling mechanical strains and stresses in soft tissues of the shoulder during load carriage based on load-bearing open MRI. *Journal of Applied Physiology* **112**, 597–606 (2012).

46. Guyer, R. L. Backpack = back pain. *Am J Public Health* **91**, 16–19 (2001).
47. Brackley, H. M., Stevenson, J. M. & Selinger, J. C. Effect of backpack load placement on posture and spinal curvature in prepubescent children. *Work* **32**, 351–360 (2009).
48. Li, S. S. W. *et al.* Effects of backpack and double pack loads on postural stability. *Ergonomics* **62**, 537–547 (2019).
49. Abdelraouf, O. R., Hamada, H. A., Selim, A., Shendy, W. & Zakaria, H. Effect of backpack shoulder straps length on cervical posture and upper trapezius pressure pain threshold. *J Phys Ther Sci* **28**, 2437–2440 (2016).
50. He, L. *et al.* A Backpack Minimizing the Vertical Acceleration of the Load Improves the Economy of Human Walking. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* **28**, 1994–2004 (2020).
51. Bergzeit outdoor shop | Outdoor, sport di montagna e arrampicata. <https://www.bergzeit.it/>.
52. Ramadan, M. Z. & Al-Tayyar, S. N. Development and Experimental Verification of an Ergonomic Backpack. *BioMed Research International* **2020**, 1–13 (2020).
53. Linder-Ganz, E., Engelberg, S., Scheinowitz, M. & Gefen, A. Pressure-time cell death threshold for albino rat skeletal muscles as related to pressure sore biomechanics. *J Biomech* **39**, 2725–2732 (2006).
54. Husain, T. An experimental study of some pressure effects on tissues, with reference to the bed-sore problem. *J Pathol Bacteriol* **66**, 347–358 (1953).
55. Stevenson, J. M. *et al.* A suite of objective biomechanical measurement tools for personal load carriage system assessment. *Ergonomics* **47**, 1160–1179 (2004).
56. Martin, J. & Hooper, R. Military Load Carriage: A Novel Method of Interface Pressure Analysis. 9.
57. *Soldier Mobility: Innovations in Load Carriage System Design and Evaluation (la Mobilité du combattant: innovations dans la conception et l'évaluation des gilets d'intervention)*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA394945> (2001).
58. Suri, C., Shojaei, I. & Bazrgari, B. Effects of School Backpacks on Spine Biomechanics During Daily Activities: A Narrative Review of Literature. *Hum Factors* **62**, 909–918 (2020).
59. Wako, N., Miyake, T. & Sugano, S. Characterization of shoulder load for backpack shoulder strap design based on the relationship between interface pressure and shoulder pain. in *2020 8th IEEE RAS/EMBS*

- International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)* 30–35 (2020).
doi:10.1109/BioRob49111.2020.9224304.
60. Birrell, S. A. & Hooper, R. H. Initial Subjective Load Carriage Injury Data Collected with Interviews and Questionnaires. *Military Medicine* **172**, 306–311 (2007).
 61. Boulware, D. R., Forgey, W. W. & Martin, W. J. Medical risks of wilderness hiking. *The American Journal of Medicine* **114**, 288–293 (2003).
 62. Stoltzfus, K. B. *et al.* Factors Associated with Musculoskeletal Injuries While Hiking with a Backpack at Philmont Scout Ranch. *Wilderness & Environmental Medicine* **33**, 59–65 (2022).
 63. Hamonko, M. T., McIntosh, S. E., Schimelpfenig, T. & Leemon, D. Injuries related to hiking with a pack during National Outdoor Leadership School courses: a risk factor analysis. *Wilderness Environ Med* **22**, 2–6 (2011).
 64. Spano, S. J., Hile, A. G., Jain, R. & Stalcup, P. R. The Epidemiology and Medical Morbidity of Long-Distance Backpackers on the John Muir Trail in the Sierra Nevada. *Wilderness Environ Med* **29**, 203–210 (2018).
 65. Chrusch, A. & Kavin, M. Survey of Musculoskeletal Injuries, Prehike Conditioning, and On-Trail Injury Prevention Strategies Self-Reported by Long-Distance Hikers on the Appalachian Trail. *Wilderness & Environmental Medicine* **32**, 322–331 (2021).
 66. Boulware, D. R. Backpacking-Induced Paresthesias. *Wilderness & Environmental Medicine* **14**, 161–166 (2003).
 67. Kim, K.-E. & Kim, E.-J. Incidence and risk factors for backpack palsy in young Korean soldiers. *J R Army Med Corps* **162**, 35–38 (2016).
 68. Bessen, R. J., Belcher, V. W. & Franklin, R. J. Rucksack Paralysis With and Without Rucksack Frames. *Military Medicine* **152**, 372–375 (1987).
 69. Anderson, L. S. *et al.* The Impact of Footwear and Packweight on Injury and Illness Among Long-Distance Hikers. *Wilderness & Environmental Medicine* **20**, 250–256 (2009).
 70. MD, J. H. Preventing paresthesias when hiking. *Life in the Fast Lane • LITFL* <https://litfl.com/preventing-paresthesias-when-hiking/> (2018).

71. Patel, T., Moraru, R. L., Vidhu, K. P., Kumar, A. & Singh, W. A. Physiological and perceptual responses in the Sherpa method of carrying loads: Role of hip belt and shoulder strap supports. **18**, 9.
72. Lenton, G. K. *et al.* Integrating a hip belt with body armour reduces the magnitude and changes the location of shoulder pressure and perceived discomfort in soldiers. *Ergonomics* **61**, 566–575 (2018).
73. Pigman, J., Sullivan, W., Leigh, S. & Hosick, P. A. The Effect of a Backpack Hip Strap on Energy Expenditure While Walking. *Human Factors* **8**.
74. Why a Hip Belt is a Necessity for a Comfortable Backpack - Tortuga. <https://blog.tortugabackpacks.com/backpack-hip-belt/>.
75. Southard, S. A. & Mirka, G. A. An evaluation of backpack harness systems in non-neutral torso postures. *Appl Ergon* **38**, 541–547 (2007).
76. Michel, F. I., Zelt, S., Krumm, D., Knöchel, A. & Schwanitz, S. EFFECT OF ADDITIVELY MANUFACTURED PADDING ON THE MECHANICAL AND THERMAL COMFORT OF MTB-BACKPACKS. *The Engineering of Sport 2* (2022).
77. Sun, C., Au, J. S., Fan, J. & Zheng, R. Novel ventilation design of combining spacer and mesh structure in sports T-shirt significantly improves thermal comfort. *Appl Ergon* **48**, 138–147 (2015).
78. H, M., A, D. & Sa, K. To Determine the Efficacy of Addition of Horizontal Waist Strap to the Traditional Double Shoulder Strap School Backpack Loading on Cervical and Shoulder Posture in Indian School going Children. *Int J Phys Med Rehabil* **05**, (2017).
79. Oberhofer, K. *et al.* The Influence of Backpack Weight and Hip Belt Tension on Movement and Loading in the Pelvis and Lower Limbs during Walking. *Appl Bionics Biomech* **2018**, 4671956 (2018).
80. Hansraj, K. K. *et al.* Backpack Forces on the Spine. *Surg Technol Int* **33**, 361–365 (2018).
81. Hadid, A., Belzer, N., Shabshin, N., Epstein, Y. & Gefen, A. Deformations in the Shoulder Tissues During Load Carriage: A Computational Model. *J. Strength Cond. Res.* **29**, S144–S148 (2015).
82. Elsner, J. J. & Gefen, A. Is obesity a risk factor for deep tissue injury in patients with spinal cord injury? *J Biomech* **41**, 3322–3331 (2008).

83. Linder-Ganz, E. & Gefen, A. Mechanical compression-induced pressure sores in rat hindlimb: muscle stiffness, histology, and computational models. *J Appl Physiol (1985)* **96**, 2034–2049 (2004).
84. Zahaf, S., Mansouri, B., Belarbi, A. & Azari, Z. The Effects Induced by a Backpack Eccentric Load on the Spine of Children. *Biomedical Science and Engineering* **4**, 6–22 (2016).
85. Filipoiu, I. D., Carutasu, N. L., Radu, G. & Baciuc, F. The tension state--deformations in the metallic structure of a multifunctional backpack. *Annals of DAAAM & Proceedings* 279–281 (2007).
86. Uhlemann, J. *et al.* Saturation of the stress-strain behaviour of architectural fabrics. *Materials & Design* **191**, 108584 (2020).
87. ANSYS Contact Technology Guide. 105.
88. STOP ALLA SUDORAZIONE ECCESSIVA. *Medicinae.it* <https://www.medicinae.it/medicina/il-botox-contro-la-sudorazione-eccessiva/> (2022).
89. Rouette, H.-K. Stress-strain Behaviour. in *Encyclopedia of Textile Finishing* (Woodhead Publishing).
90. Dai, X., Zeng, X., Liu, S. & Hong, Y. Is skin pressure in load carriage over-evaluated? *Journal of Biomechanics* **130**, 110854 (2022).
91. Park, J.-H., Jin, X. & Agrawal, S. K. Second Spine: Upper Body Assistive Device for Human Load Carriage. *Journal of Mechanisms and Robotics* **7**, 011012 (2015).
92. Ramalho, A., Szekeres, P. & Fernandes, E. Friction and tactile perception of textile fabrics. *Tribology International* **63**, 29–33 (2013).