

INDICE

INTRODUZIONE	4
0.1 <i>Le fibre sintetiche nel mondo dell'abbigliamento come alternativa alle fibre naturali</i>	4
0.2 <i>Definizione e processo produttivo di ovatte e tessuti non-tessuti</i>	4
0.2.1 <i>Apertura e cardatura</i>	5
0.2.2 <i>Faldatura</i>	5
0.2.3 <i>Agugliatura</i>	6
CAPITOLO 1 – CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE FIBRE.....	6
1.1 <i>Sezione</i>	6
1.2 <i>Titolo</i>	7
1.3 <i>Cretto</i>	8
CAPITOLO 2 – PROPRIETÀ MECCANICHE DELLE FIBRE.....	8
2.1 <i>Curva sforzo vs allungamento</i>	8
2.2 <i>Tenacità</i>	8
2.3 <i>Definizione di comportamento elastico e plastico</i>	9
CAPITOLO 3 – CARATTERISTICHE TECNICO-MECCANICHE DI UN TESSUTO NON-TESSUTO	9
3.1 <i>Proprietà richieste per un tessuto non-tessuto destinata al mondo dell'abbigliamento</i>	9
3.1.1 <i>Il concetto di confort e lo Skin Model</i>	9
3.1.2 <i>Il miglior compromesso</i>	10
3.2 <i>Caratteristiche del tessuto non-tessuto</i>	11
3.2.1 <i>Grammatura, densità e porosità</i>	11
3.3 <i>Prove di compressione, resilienza e portanza</i>	11
CAPITOLO 4 – ISOLAMENTO TERMICO	12
4.1 <i>Meccanismi di trasporto del calore</i>	12
4.1.1 <i>Conduzione</i>	12
4.1.2 <i>Convezione</i>	13
4.1.3 <i>Irraggiamento</i>	13
4.2 <i>Modello per la stima del trasporto di calore attraverso un mezzo fibroso</i>	14
4.2.1 <i>Giustificazione della complessità di un modello analitico per l'irraggiamento</i>	17
CAPITOLO 5 – PERMEABILITÀ.....	17
CAPITOLO 6 – STRUMENTAZIONE E METODI DI ANALISI.....	18
6.1 <i>Vibroscopio</i>	18
6.2 <i>Misuratore di spessore</i>	18
6.3 <i>Termoflussimetro</i>	18
6.4 <i>Tester di permeabilità</i>	19
6.5 <i>Microscopio elettronico</i>	19

CAPITOLO 7 – I PRODOTTI	21
7.1 I prodotti destinati all'abbigliamento della O.R.V. Manufacturing	21
CAPITOLO 8 – RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE	21
8.1 Discussione sulle immagini a microscopio elettronico	21
8.1.1 Depositi di TiO_2 sulla superficie della fibra	21
8.1.2 Imperfezioni nel poliestere riciclato	22
8.1.3 Le fibre bicomponente	23
8.2 Tabulazione e discussione dei risultati delle prove meccaniche	24
8.3 Le relazioni tra le proprietà del tessuto non-tessuto e l'isolamento termico	25
8.3.1 Relazione tra densità e conducibilità	25
8.3.2 Relazione tra spessore e conducibilità	26
8.3.3 Relazione tra titolo medio della fibra e conducibilità	27
8.4 Tabulazione e discussione dei risultati della prova di permeabilità	28
8.4.1 Relazione tra densità e permeabilità	28
8.4.2 Relazione tra titolo medio e permeabilità	28
CONCLUSIONI	29
BIBLIOGRAFIA	30

INTRODUZIONE

0.1 Le fibre sintetiche nel mondo dell'abbigliamento come alternativa alle fibre naturali

Nel panorama dell'industria tessile, il costante evolversi delle esigenze di mercato e la ricerca di soluzioni sostenibili hanno portato ad un crescente interesse nei confronti delle fibre sintetiche come alternativa alle tradizionali fibre naturali nel settore dell'abbigliamento.

Nel 2021 la produzione globale di fibre ha raggiunto i 113 milioni di tonnellate, di cui solo il 36% è di origine "naturale" (sono comprese anche le fibre semi-artificiali come viscosa, acetato, modal, etc.) ma il dato più interessante è la direzione del mercato verso le fibre riciclate rispetto alle controparti vergini: dei 113 milioni di tonnellate prodotte, 10 milioni di tonnellate sono state riciclate nel 2021, ovvero l'8.9% del totale rispetto al 8.4% del 2020 e del 7.8% del 2019 [1].

Tuttavia, per quanto il mercato occidentale richieda sempre di più la produzione di fibre green, sulle sponde orientali si continua a preferire l'utilizzo di fibre vergini andando così a promuovere oltre le ingenti emissioni di gas serra anche l'inquinamento delle acque e dei terreni a causa del pessimo smaltimento dei rifiuti generati dai consumatori. Il problema dell'utilizzo di un materiale riciclato infatti risiede non solo nei costi per la sua produzione ma anche nella degradazione delle proprietà intrinseche della fibra che, per ottenere le stesse prestazioni della controparte vergine, necessita di particolare attenzione nel suo processo di lavorazione.

Tra i protagonisti di questo scenario abbiamo il poliestere grazie alle sue qualità intrinseche di resistenza, versatilità, facilità di produzione e semplicità di riciclo, che trova applicazioni sia come tessuto che come ovatta, in particolare nelle imbottiture delle giacche.

La progettazione di questi materiali tuttavia richiede, come anticipato, una comprensione approfondita delle loro caratteristiche fisico-meccaniche, sia come singole fibre che come sistema macroscopico di fibre (ovatta) poiché queste proprietà andranno ad influenzare direttamente le prestazioni del capo finito.

Il focus principale di questa relazione consiste nel quantificare, confrontare e discutere le proprietà intrinseche di vari prodotti destinati al settore dell'abbigliamento progettati e commercializzati dalla O.R.V. Manufacturing al variare di particolari parametri che possono riguardare la fibra considerata come singolo componente o come insieme di fibre nell'ovatta.

0.2 Definizione e processo produttivo di ovatte e tessuti non-tessuti

I tessuti non-tessuti sono materiali che differiscono dai classici modelli di tessuto poiché fabbricati attraverso processi di legatura meccanica, termica e/o chimica delle fibre rispetto al tradizionale processo di tessitura tramite ordito e trama. Nel caso di una normale tessitura, infatti, le fibre vengono filate e intrecciate in due direzioni ortogonali tra di loro, al contrario del tessuto non-tessuto dove non c'è una struttura ordinata e di conseguenza le fibre presentano un andamento casuale. Noti anche come *non-woven fabrics*, o con l'acronimo TNT (*Textile Non-Textile*), negli anni hanno trovato largo utilizzo in tantissimi settori differenti, tra cui l'automobilistica, l'abbigliamento, l'edilizia e il filtraggio.

L'ovatta per definizione è un materiale fibroso costituito da filamenti sottili disposti in modo disordinato così da formare una struttura morbida e soffice. Questa, prima di poter essere consegnata alla sua ultima destinazione, deve essere lavorata attraverso dei processi meccanici conosciuti come apertura, cardatura, faldatura e agugliatura così da ottenere delle spesse lastre con un preciso spessore e grammatura capaci di valorizzare le proprietà fisico-meccaniche intrinseche della fibra.

0.2.1 Apertura e cardatura

L'apertura, come suggerisce il nome, consiste nello sfaldare la massa compressa di fibre che arriva nello stabilimento con la formazione di un primo velo semi-omogeneo pronto alla vera e propria lavorazione. Le fibre vengono trattate attraverso rulli rotanti con punte metalliche, noti come cardini. Il movimento rotatorio dei cardini genera dunque un'azione di pettinatura, separando le fibre e rimuovendo piccole impurità presenti nel materiale come in fig. 0-1. I due meccanismi sopra citati sono quindi complementari e con lo stesso obiettivo; non a caso nell'industria dei tessuti si dice che *un carico ben aperto è già mezzo cardato*.

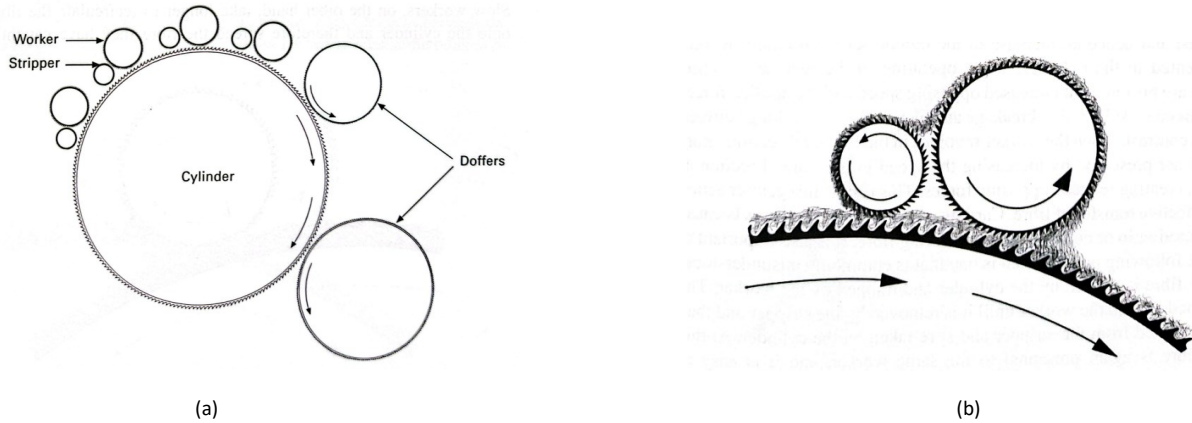


Figura 0-1: a) Schema di una cardatrice e b) funzionamento [2]

0.2.2 Faldatura

Vi è poi la faldatura, processo in cui i veli vengono distesi su un nastro con un rullo che si muove avanti e indietro e li distribuisce in direzione perpendicolare rispetto al nastro che li trasporterà allo step successivo. Durante questo movimento, le fibre vengono disposte in strati sovrapposti, ma in direzioni ortogonali tra loro come in figura (*cross-lapping*).

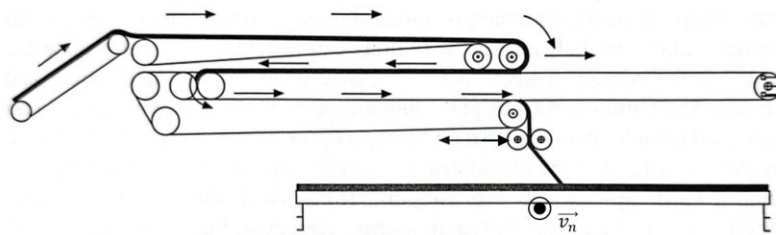


Figura 0-2: Faldatrice (il vettore \vec{v}_n indica la direzione su cui si deposita il velo, in questo caso uscente dal piano) [2]

Infine, una volta che gli strati di fibre sono stati sovrapposti e incrociati, può essere applicata una leggera pressione o una legatura per unire le fibre tra di loro per essere poi mandati all'agugliatrice.

0.2.3 Agugliatura

Nel processo di agugliatura (*needlepunching*) le fibre sono interlacciate dal movimento di aghi con barbe. Centinaia di questi aghi sono fissati ad una tavola che oscilla verticalmente e che, attraversando lo strato di fibre, trasporta alcune di queste attraverso lo spessore del materiale garantendo quindi che queste si interallaccino tra di loro. Le caratteristiche del prodotto finito dipendono principalmente dalla densità di punzonature e dalla profondità di penetrazione degli aghi. Aumentando la densità di punzonature aumenta la densità e resistenza del tessuto non-tessuto (fig. 0-3). Nel settore dell'abbigliamento, infatti, l'agugliatura non deve essere troppo marcata così da garantire un prodotto che sia morbido e che si adatti alla forma del corpo senza andare a creare una struttura rigida e limitare i movimenti di chi andrà ad indossare il capo finito.

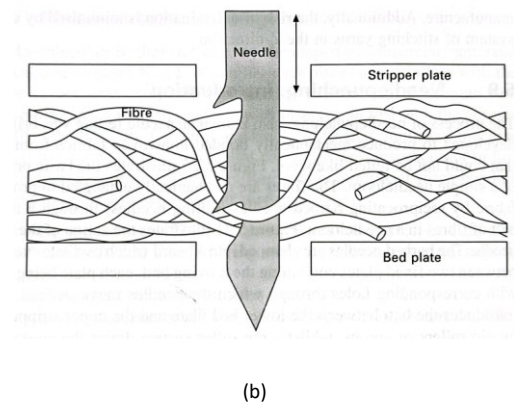
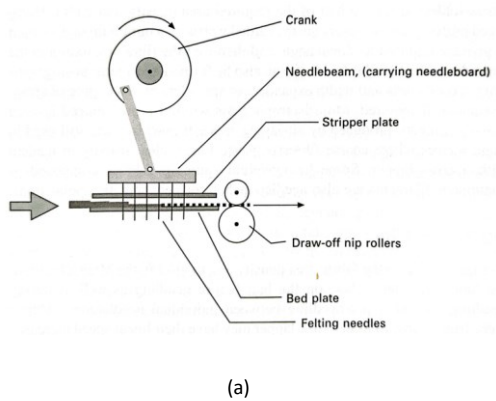


Figura 0-3: a) Schema di un'agugliatrice e b) funzionamento [2]

CAPITOLO 1 – CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE FIBRE

Per comprendere e prevedere al meglio le proprietà di un tessuto non-tessuto bisogna in primis ragionare sulle proprietà della singola fibra e sulle grandezze ad essa correlate.

1.1 Sezione

Il primo parametro da osservare in una fibra è la sua sezione sia come forma che come struttura. Le fibre con una sezione trasversale più compatta o densa tendono ad avere una maggiore conducibilità termica rispetto a quelle con una sezione trasversale più aperta o cava ad esempio.



(a)



(b)

Figura 1-1: Alcune possibili sezioni di una fibra di PES in base alla forma del foro d'estrusione a) trilobata b) cilindrica piena

La sezione trasversale può anche influenzare la resistenza meccanica delle fibre: sezioni trasversali più compatte garantiscono alla fibra una maggiore resistenza e una maggiore capacità di sopportare lo stress meccanico senza mostrare deformazioni in campo plastico anche se soggette a grandi sforzi di trazione o di compressione.

La sezione trasversale poi può influenzare la capacità della fibra di assorbire e rilasciare l'umidità se questa ne permette un aumento della superficie specifica. Fibre con sezioni trasversali più aperte o cave, come nel caso del cotone, possono avere una maggiore capacità di assorbire l'umidità rispetto a quelle con sezioni più compatte come nel caso della maggior parte delle fibre sintetiche in commercio. Infine, la produzione di fibre a sezione particolare ha lo scopo di ottenere specifici effetti ottici nel prodotto finito in base a come la luce incidente sulla fibra tende ad essere assorbita e riflessa.

1.2 Titolo

Il secondo parametro è la densità lineare della fibra, conosciuta come titolo. Le unità di misura comunemente utilizzate per il titolo sono il tex, il dtex (decitex) o il denaro:

$$1 \text{ tex} = 1 \frac{\text{g}}{\text{km}} = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$
$$1 \text{ den} = \frac{1 \text{ g}}{9 \text{ km}}$$

Per quanto riguarda la discussione di come il titolo influisce sulle proprietà fisico-meccaniche della fibra e del tessuto rimando alla discussione dei risultati sperimentali (capitolo 8). A prescindere dalle specifiche sulla questione, la scelta di questo parametro è direttamente connessa con l'applicazione del prodotto finito. In generale, l'uso di fibre più fini permette di ottenere un TNT più denso, resistente, soffice e con maggiore capacità coprente. Titoli più elevati invece sono più facilmente processabili e permettono di ottenere un velo di fibre più uniforme quindi si utilizzano spesso per materiali che dovranno avere minore densità.

La stima del titolo medio di una fibra può essere condotta sia tramite una particolare strumentazione (vibroscopio) che tramite un'indagine al microscopio, nel caso sia regolare ed omogenea, nota la sezione della fibra e la densità del materiale che la compone:

$$t = \frac{m}{l} = \rho A$$

m = massa fibra [kg]

l = lunghezza fibra [m]

ρ = densità della fibra [kg/m³]

A = sezione della fibra [m²]

In caso di una sezione cilindrica, o approssimabile come tale, con diametro D :

$$t = \rho A = \rho \cdot \pi \frac{D^2}{4}$$

1.3 Cretto

Il cretto o *crimp* si riferisce alla forma che assumono le fibre lungo la loro stessa lunghezza. In generale le fibre naturali hanno un proprio crimp intrinseco mentre su quelle artificiali, spesso prodotte tramite estrusione della massa polimerica viscosa, deve essere applicato tramite stampaggio a caldo in quanto, a causa del loro processo produttivo, vengono formate come lunghi filamenti rettilinei privi di cretto. Il *crimp* è fondamentale per garantire alla fibra un'ottima resilienza, in quanto permette a questa di comportarsi come una molla e quindi di garantire una risposta elastica molto più pronunciata.

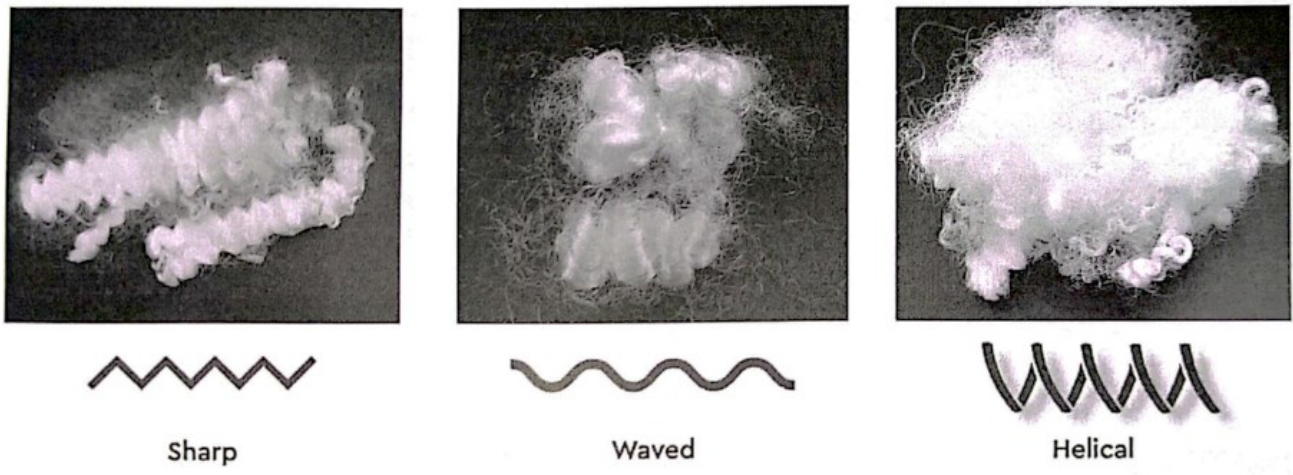


Figura 1-2: Alcune forme possibili per il cretto su una fibra artificiale [2]

CAPITOLO 2 – PROPRIETÀ MECCANICHE DELLE FIBRE

2.1 Curva sforzo vs allungamento

In meccanica uno degli strumenti più utilizzati per le prove di trazione sono le curva sforzo/allungamento (c. r. ch. 8). Lo sforzo in fisica viene definito come la forza agente su unità di superficie (N/m^2) mentre l'allungamento (ε), in genere, si considera come percentuale della lunghezza finale del campione (L) rispetto a quella iniziale (L_0):

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100$$

2.2 Tenacità

Nel caso delle curve necessarie a descrivere la risposta meccanica di una fibra ad uno sforzo di trazione è buona norma considerare al posto dello sforzo la tenacità della fibra (*Ten*), che corrisponde all'energia immagazzinata e/o dissipata dalla fibra (quindi un lavoro (W)) su unità di massa (m) che possiamo riscrivere come la forza su unità di titolo così da normalizzare le curve e renderle indipendenti dalla variazione di titolo:

$$\text{Ten} = \frac{W}{m} = \frac{F \cdot l}{m} = \frac{F}{t} \quad \left[\frac{N}{\text{tex}} \right]$$

2.3 Definizione di comportamento elastico e plastico

All'inizio della curva possiamo notare che qualsiasi sia il materiale, la deformazione è direttamente proporzionale alla forza applicata. Definiamo questa fase come zona elastica, ossia la zona tale per cui esiste una relazione lineare tra lo sforzo applicato e l'allungamento con coefficiente di proporzionalità pari al modulo di Young (E). In questa zona il materiale immagazzina il lavoro generato dallo sforzo sotto forma di energia elastica senza che vi sia dissipazione di energia sotto forma di calore ceduto all'ambiente. In altri termini, se andassimo a rimuovere il carico applicato, si potrebbe osservare che il materiale recupera completamente la sua forma iniziale.

Se lo sforzo applicato continua ad aumentare, il materiale può raggiungere un valore limite alla dipendenza lineare tra tenacità e allungamento, oltre il quale inizia a deformarsi in regime plastico fino alla rottura. Questo punto è noto come punto di snervamento e al suo superamento il materiale comincerà a dissipare energia sotto forma di calore e quindi, per le considerazioni fatte in precedenza, al punto di snervamento corrisponde la massima energia elastica accumulabile dal materiale o resilienza della fibra.

CAPITOLO 3 – CARATTERISTICHE TECNICO-MECCANICHE DI UN TESSUTO NON-TESSUTO

3.1 Proprietà richieste per un tessuto non-tessuto destinata al mondo dell'abbigliamento

La perdita dei peli del corpo rappresenta una pietra miliare nella storia evolutiva umana: a differenza del resto dei mammiferi le prime forme di ominide svilupparono la sudorazione per ottenere la possibilità di comunicare grazie al linguaggio anche quando faceva molto caldo o durante uno sforzo intenso. Tuttavia, la capacità di sudare è veramente efficace solo se non ci sono peli corporei a limitare la circolazione dell'aria quindi, nel corso del tempo, l'evoluzione ha prediletto quel modello che l'*Hohenstein Institute* [3] definisce come *scimmia nuda*. La colonizzazione delle aree più fredde del pianeta terra, quindi, diventò possibile solo attraverso l'invenzione di un dispositivo capace di moderare lo scambio di materia e calore tra corpo e ambiente: l'abbigliamento.

3.1.1 Il concetto di confort e lo Skin Model

Sebbene la ricerca del confort abbia una storia che risale a più di 10.000 anni fa, solo nell'ultimo secolo si è cominciato a sviluppare un modello capace di descrivere e quantificare questo concetto. Durante la seconda guerra mondiale, infatti, si sono cominciati a sviluppare dei prototipi di strumenti capaci di simulare la normale risposta del corpo umano agli stimoli dell'ambiente esterno con il fine di progettare ed ingegnerizzare dei capi d'abbigliamento capaci di adattarsi e migliorare il feedback dell'organismo al variare dei parametri fisici dell'ambiente circostante. Grazie allo sviluppo tecnologico si è individuata l'ottimale distribuzione della temperatura dei vari segmenti che compongono il corpo umano: nel testo [3] si parla ad esempio di 30 °C circa sulla testa, 34 °C sul tronco e 32 °C sull'avanbraccio. Lo stesso discorso si applica anche alla traspirabilità che il capo d'abbigliamento deve presentare in base alle zone a maggiore e minore sudorazione.

L'*Hohenstein Institute* è stato citato più volte in questo capitolo proprio perché ha fissato quelli che sono degli standard globali per la valutazione del confort di un tessuto attraverso lo *Skin Model*. Il sistema ha come obiettivo quello di simulare il comportamento della pelle umana in un ambiente controllato e quindi di monitorare come il tessuto reagisce al flusso di vapor d'acqua.

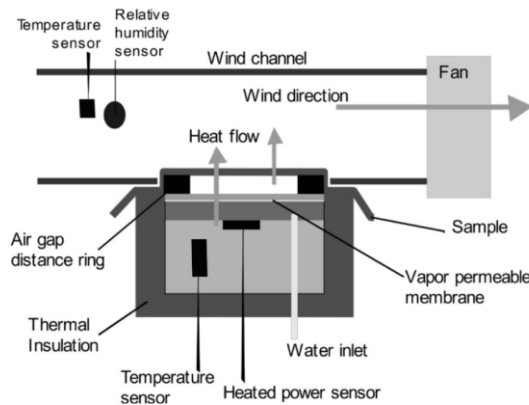


Figura 3-1: Schema di funzionamento dello Skin Model [4]

I due parametri più importanti per la valutazione del comfort sono la resistenza termica (R_{ct}) e la resistenza al vapore d'acqua (R_{et}). Per la determinazione dell' R_{ct} non viene fornita acqua e la provetta è posta direttamente sulla piastra forata mantenuta ad una temperatura di 35°C. La temperatura dell'aria è invece di 20°C, con una umidità relativa del 65%. Per la determinazione dell' R_{et} sia la temperatura della cella di misura sia quella dell'aria sono mantenute a 35°C, con umidità relativa del 40%. In questo caso una membrana di cellophane, permeabile al vapore acqueo ma impermeabile all'acqua liquida, viene collocata al di sopra della piastra porosa. Il tessuto da sottoporre alla prova viene posto sopra la membrana con il lato solitamente a contatto del corpo umano posto a contatto con l'unità di misura. Quando la provetta viene posta sulla membrana, il flusso di calore necessario per mantenere la piastra ad una temperatura costante, rappresenta una misura del flusso di evaporazione dell'acqua e se ne deduce il valore della resistenza al vapore d'acqua della provetta [5]. A livello pratico i due parametri si calcolano come:

$$R_{ct} = \frac{d}{\lambda} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \qquad R_{et} = \frac{d}{\delta} \quad \left[\frac{m^2 Pa}{W} \right]$$

d = spessore del campione [m]

λ = conducibilità [W/m K]

δ = permeabilità al vapore d'acqua [W/m Pa]

3.1.2 Il miglior compromesso

Per trovare un ottimo compromesso tra i due fattori introduciamo il parametro adimensionale i_{mt} calcolabile come il rapporto tra la resistenza al flusso di calore e la resistenza al flusso di vapore d'acqua:

$$i_{mt} = S \frac{R_{ct}}{R_{et}}$$

R_{ct} = resistenza al flusso termico [$m^2 K/W$]

R_{et} = resistenza al flusso di vapore d'acqua [$m^2 Pa/W$]

S = fattore di conversione = 60 Pa/K

Il suo valore è compreso tra 0 e 1: un valore di 0 implica che il materiale sia impermeabile al vapore d'acqua mentre un materiale che ha un valore di 1 presenta a sua volta la resistenza termica e la resistenza al vapore d'acqua di uno strato d'aria di un uguale spessore. Il compromesso ottimale si ottiene quindi per valori prossimi allo 0.5.

3.2 Caratteristiche del tessuto non-tessuto

3.2.1 Grammatura, densità e porosità

A differenza della singola fibra per cui il titolo la forma sono i due parametri costruttivi su cui è possibile intervenire, per il tessuto non-tessuto bisogna ragionare su due grandezze: grammatura e porosità. La prima è la densità di superficie della lastra di TNT, spesso misurata in g/m^2 , mentre la seconda rappresenta il rapporto tra il volume dei vuoti esistenti in una determinata porzione di un materiale e il volume complessivo e quindi può essere calcolata come:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{pori}}}{V_{\text{tot}}} = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

ρ = densità del materiale poroso [kg/m^3]

ρ_s = densità della parte solida del materiale poroso [kg/m^3]

Dato che nel tessuto non-tessuto non vi è una struttura regolare ma piuttosto casuale e disordinata non vi è da stupirsi se nella maggior parte dei prodotti si parla di porosità comprese tra 0.9 e 1.

3.3 Prove di compressione, resilienza e portanza

Le prove di compressione per un materiale elastico consistono nel sottoporre il campione a diversi cicli di compressione per valutarne la capacità di ritorno. Nel campo dell'abbigliamento è necessario avere dei prodotti che presentino un ottimo ritorno elastico, in quanto soggetti a costanti deformazioni date dai costanti movimenti della persona che indossa il capo. Al contempo il materiale deve anche essere capace di mostrare in seguito ad un riscaldamento non solo una notevole stabilità di struttura (inerzia chimico-fisica al riscaldamento) ma anche una netta ripresa, poiché nella fase di lavaggio del capo è ottima cosa che il tessuto si ravvivi, ossia che l'imbottitura riprenda uno spessore simile al suo spessore originale (prima dei vari sforzi a cui è stato soggetto).

Due sono quindi le grandezze che giocano un ruolo chiave in un buon TNT per l'abbigliamento: la resilienza, energia immagazzinata dal materiale sotto forma di energia elastica e quindi restituibile all'ambiente come tale, e la portanza sia a freddo che a caldo, ossia la caratteristica che si riferisce alla capacità del materiale di supportare un carico o di resistere alla deformazione sotto carichi applicati, come una forza concertata in un punto o una forza distribuita su tutta la superficie (pressione).

La resilienza di un TNT non può essere valutata, come nel caso della singola fibra, calcolando l'integrale della curva sforzo-deformazione sul tratto elastico poiché il metodo di analisi meccanica di una lastra spessa di tessuto riporta delle misure di spessore e non un grafico a meno di strumentazioni specifiche. Si dovrà quindi andare a valutare la resilienza non come energia, ma come differenza di spessore prima e dopo i cicli di compressione:

$$R_m = \frac{d_0 - d_1}{d_0}$$

R = resilienza dopo n cicli di compressione

d_0 = diametro originale

d_1 = diametro dopo cicli di compressione

Allo stesso modo posso esprimere la portanza come:

$$P_m = \frac{d_{m=0} - d_m}{d_{m=0}}$$

P_n = portanza sotto un carico di un valore di pressione m in Pa

d_0 = diametro a carico nullo

d_n = diametro sotto un carico di un valore di pressione m in Pa

Questi valore deve essere valutato sia a “caldo” (dopo il ravvivamento in stufa) che a “freddo” (prima del ravvivamento), sia prima che dopo i cicli di compressione (vedi cap. 8).

CAPITOLO 4 – ISOLAMENTO TERMICO

4.1 Meccanismi di trasporto del calore

Il terzo capitolo viene dedicato completamente al tema dell'isolamento termico. La prima parte si occupa dei concetti teorici alla base dei fenomeni di trasporto del calore: conduzione, convezione ed irraggiamento mentre la seconda presenta un ottimo modello teorico per la stima del coefficiente di conducibilità termica in un materiale fibroso sottolineandone pregi e difetti.

4.1.1 Conduzione

La conduzione è il meccanismo di trasporto termico che avviene a livello atomico/molecolare.

Joseph Fourier nel suo libro *Théorie Analytique de la Chaleur* presenta la legge fenomenologica per il flusso di calore in notazione vettoriale:

$$q = -k \nabla T$$

q = flusso termico [W/m^2]

∇T = gradiente di temperatura [K]

k = conducibilità del mezzo [$W/m K$]

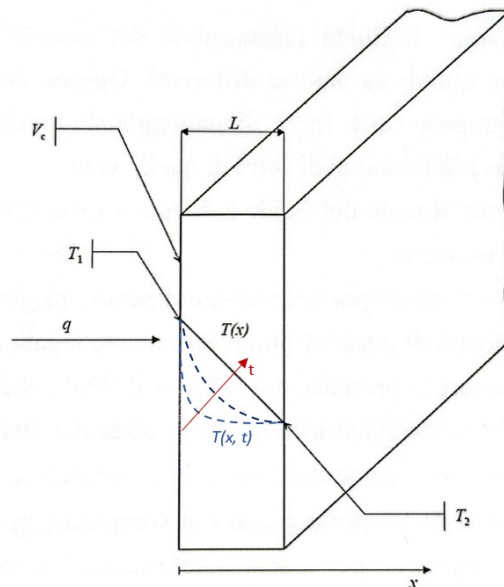


Figura 4-1: Conduzione attraverso una lastra e profilo della temperatura al variare di x e t

Il segno meno indica che il calore viene trasferito in direzione opposta a quella del gradiente termico e k rappresenta la conducibilità termica del mezzo, uguale nelle tre direzioni in caso di mezzo isotropico.

Per comprenderne il principio si consideri un fluido in quiete compreso tra due lastre a temperatura differente ($T_1 > T_2$). Le particelle del fluido a contatto con la parete calda possiamo considerare che si trovino alla temperatura T_1 e che, negli urti con le altre particelle, possano trasferire la loro energia agli strati successivi del fluido. Nello scorrere del tempo il profilo della temperatura lungo l'intera lastra di fluido tenderà quindi a diventare sempre più omogeneo fino a raggiungere, a stato stazionario, un profilo lineare.

Quindi, per un flusso termico stazionario, monodirezionale, che attraversa perpendicolarmente un materiale, ossia il caso osservabile in fig 4.1, è possibile semplificare l'equazione generale nella seguente:

$$q_x = -k_x \frac{dT}{dx} = -k_x \frac{T_c - T_h}{L}$$

q_x = flusso termico lungo x [W/m²]

k_x = conducibilità del mezzo lungo x [W/m K]

T_c = temperatura della superficie fredda [K]

T_h = temperatura della superficie calda [K]

L = spessore della lastra [m]

4.1.2 Convezione

La convezione è il meccanismo di trasporto termico in presenza di un moto macroscopico del fluido. In generale questa interessa lo scambio tra un solido ed un fluido in movimento che lambisce la superficie del solido e può essere di due tipi: forzata o naturale. Nella prima il moto del fluido è determinato da una forza esterna e quindi il moto può essere valutato a prescindere dalla distribuzione di temperatura del sistema. Nella seconda, invece, è la differenza di temperatura tra le diverse regioni del fluido a determinare una differenza di densità e quindi un moto dovuto all'azione di forze di galleggiamento. L'equazione che descrive questo meccanismo di trasporto è la seguente:

$$q = h (T_s - T_\infty)$$

h = coefficiente di scambio termico per convezione [W/m²K]

T_s = temperatura della parete [K]

T_∞ = temperatura del fluido oltre lo strato limite termico [K]

4.1.3 Irraggiamento

L'irraggiamento è un fenomeno di trasporto di energia tra due corpi per mezzo di onde elettromagnetiche e che, di conseguenza, non necessita di un mezzo di propagazione ma si può osservare anche nel vuoto. La lunghezza d'onda delle radiazioni elettromagnetiche responsabili dello scambio termico ha valore compreso tra $10e^{-2} \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$, che corrisponde allo spettro infrarosso e parte di quello del visibile/ultravioletto. Tutti i corpi sono caratterizzati da una certa radiosità, ovvero emettono energia sottoforma di onde elettromagnetiche a seconda della loro temperatura e dalla natura della loro superficie. La massima potenza termica che una superficie può emettere è quantificata dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$q_{eN} = \sigma \cdot T_s^4$$

q_{eN} = flusso di calore emesso da un corpo nero [W/m²]

σ = costante di Stefan-Boltzmann = $5.670374e^{-8}$ W/m²K⁴

T = temperatura della superficie del corpo [K]

Questa relazione vale solo per un corpo ideale detto corpo nero, un sistema in grado di assorbire tutte le onde che lo irradiano. Nella realtà il fenomeno è molto più complesso e il flusso di calore emesso è inferiore a quello del corpo nero di un fattore ε detto emissività, un numero compreso tra 0 e 1 che è funzione della lunghezza d'onda λ .

Analogamente, il flusso di calore assorbito da un corpo è quantificato dall'equazione:

$$q_a = \alpha \cdot I$$

q_a = flusso di calore assorbito [W/m²]

I = intensità di radiazione [W/m²]

α = assorbanza [Adm]

Che, in caso sia un corpo nero ad emettere la reazione incidente diventa:

$$q_a = \alpha \cdot I = \alpha \cdot \sigma T_e^4$$

Lo scambio termico per radiazione è dunque dato dalla differenza tra q_e e q_a e con l'ipotesi di corpo grigio posso dire non solo che ε sia costante rispetto la lunghezza d'onda ma anche, grazie alle valutazioni di Kirchhoff sull'irraggiamento, che α sia circa uguale a ε e concludere quindi con la seguente equazione:

$$q_{irr} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_e^4)$$

4.2 Modello per la stima del trasporto di calore attraverso un mezzo fibroso

La trasmissione di calore attraverso un mezzo fibroso è un fenomeno molto complesso dal punto di vista ingegneristico in quanto è il risultato della combinazione dei tre meccanismi discussi nei paragrafi precedenti. La trattazione di tale fenomeno è stata soggetta a diversi studi a causa delle ottime proprietà che un mezzo fibroso ad elevata porosità ($\varepsilon > 0.9$) presenta nei confronti dell'isolamento termico. Dobbiamo quindi inizialmente scindere il meccanismo nei singoli fenomeni di trasporto coinvolti: conduzione tra fibra e fibra, conduzione e convezione del gas presente nei pori e irraggiamento all'interno della complessa struttura (apprezzabili in figura 4-2). Definisco quindi la conducibilità data dalla somma dei singoli contributi che tuttavia rappresenta solo una relazione concettuale per comprendere la complessità del fenomeno ma non ha nessun riscontro matematico:

$$k_{tot} = k_F + k_G + k_{conv} + k_{irr}$$

k_G = conducibilità del gas presente nei pori

k_F = conducibilità del sistema fibra-fibra

k_{conv} = conducibilità legata ai moti convettivi all'interno dei pori

k_{irr} = conducibilità dovuta all'irraggiamento

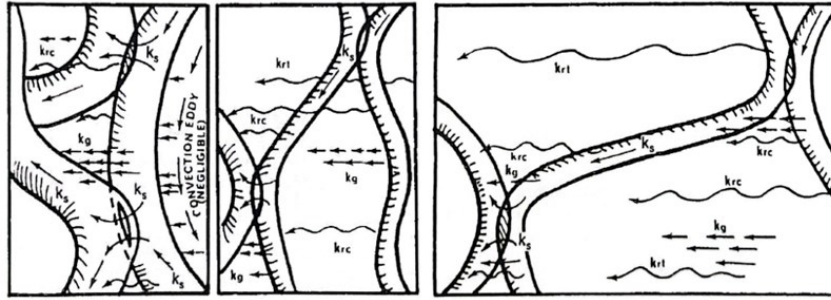


Figura 4-2: Schema dei diversi meccanismi di trasmissione del calore in un mezzo fibroso

Nella trattazione del fenomeno i diversi studi che andrò a citare sono concordi nel trascurare il contributo dovuto alla convezione del gas nei pori. Ciò accade perché le dimensioni delle cavità sono troppo piccole perché si instauri un moto macroscopico di materia. Sarebbe necessaria una struttura con percentuale volumetrica di fibre molto bassa (porosità superiori al 99,9 %) e dimensione dei pori di diversi millimetri. Si pensi che un materiale con densità di solo 8 kg/m^3 e fibre di diametro $4 \mu\text{m}$ e porosità del 99,4 % presenta una dimensione media dei pori di 1 mm, comunque non è sufficiente all'instaurarsi del fenomeno. Considerando che si sono studiati materiali con densità superiori agli 8 kg/m^3 e fibre con titolo medio superiore a $15 \mu\text{m}$, anche nella presente trattazione non verrà considerato il contributo convettivo.

Per quanto riguarda i termini conduttivi, quello legato alla parte solida (fibre) ha un valore limitato rispetto a quello dato dal gas poichè dipende dal numero dei punti di contatto e dalla superficie di scambio che questi comportano ma che in genere, in un TNT, è di dimensioni trascurabili. Tra i testi in letteratura più interessanti sulla questione spicca quello di *Claes G. Bankvall* [6] che, per il calcolo di k_F e k_G , considera mezzo fibroso come un sistema di fibre in serie e in parallelo rispetto la direzione del flusso di calore come in fig. 4-3 e quindi come un sistema dove posso considerare la resistenza allo scambio termico della parte gassosa e solida come resistenze di un circuito (fig. 4-4).

È necessario quindi introdurre tre parametri strutturali adimensionali: la percentuale di materiale considerabile in parallelo con il flusso di calore (α), la porosità delle sezioni considerabili come in serie (ε_S) e in parallelo (ε_P) (fig. 4-5). Dagli schemi a pagina seguente è facile ricavare le seguenti relazioni, la prima che lega i parametri strutturali alla porosità del sistema e due rimanenti che permettono di calcolare la conducibilità nel caso in serie e in parallelo:

$$\varepsilon = (1 - \alpha) \cdot \varepsilon_S + \alpha \cdot \varepsilon_P$$

$$k_P = k_S \cdot (1 - \varepsilon) + k_g \cdot \varepsilon$$

$$k_S = \frac{k_s k_g}{\varepsilon \cdot k_s + (1 - \varepsilon) \cdot k_g}$$

k_P = conducibilità per la parte considerabile in parallelo [W/m K]

k_S = conducibilità per la parte considerabile in serie [W/m K]

k_g = conducibilità della fase gas [W/m K]

k_s = conducibilità termica della fase solida [W/m K]

Dalla somma di queste equazioni ponderate sulla percentuale di materiale considerabile in parallelo con il flusso di calore (α) e in serie con questo ($1 - \alpha$) è facile ricavare quindi il contributo della conduzione dovuta al contatto solido-solido e quella dovuta al gas:

$$k_{\text{cond}} = \alpha \cdot k_p + (1 - \alpha) \cdot k_s = \alpha \cdot (k_s \cdot (1 - \varepsilon) + k_g \cdot \varepsilon) + (1 - \alpha) \cdot \frac{k_s k_g}{\varepsilon \cdot k_s + (1 - \varepsilon) \cdot k_g}$$

$$k_F = \alpha \cdot (1 - \varepsilon_p) k_s$$

$$k_G = \alpha \cdot \varepsilon_p k_g + (1 - \alpha) \cdot \frac{k_s k_g}{\varepsilon_s \cdot k_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot k_g}$$

k_{cond} = conducibilità del sistema fibroso [W/m K]

k_F = conducibilità del sistema fibra-fibra [W/m K]

k_G = conducibilità del gas nei pori [W/m K]

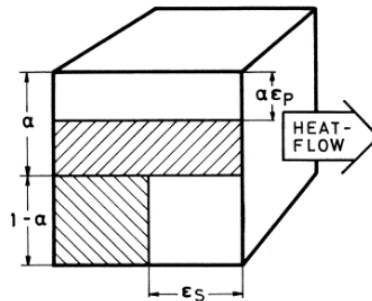


Figura 4-3: Schema che mostra il significato dei parametri strutturali introdotti da Bankvall [6]

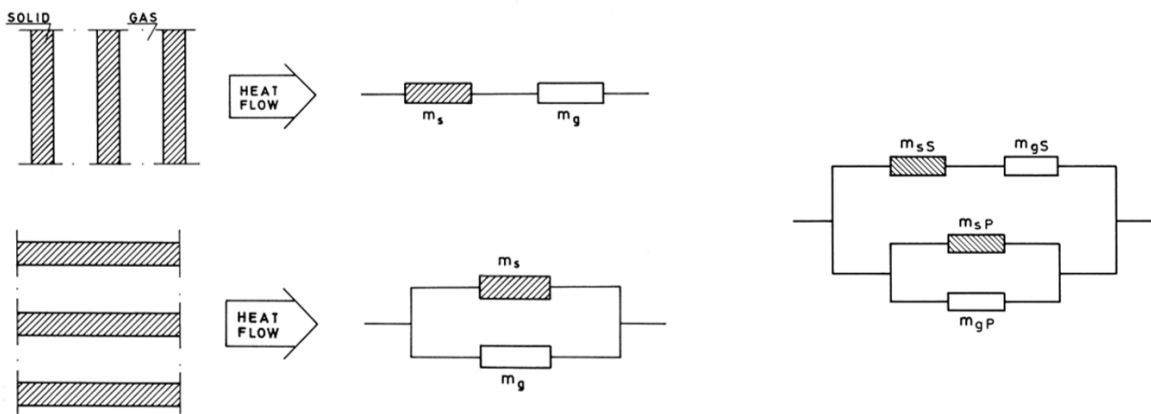


Figura 4-4: Schema del mezzo fibroso considerato come un circuito (m_s è la resistenza termica del solido e m_g del gas) [6]

4.2.1 Giustificazione della complessità di un modello analitico per l'irraggiamento

Per l'analisi del fenomeno di irraggiamento in un mezzo fibroso la comunità scientifica ha proposto diversi modelli semplificativi molto complessi che variano in base alla tipologia di materiale e che necessitano di particolari coefficienti determinabili solo attraverso apparecchiature specifiche. Questa complessità deriva dall'intricata combinazione di assorbimento, riflessione e scattering che intercorre nel sistema di fibre. Per ulteriori approfondimenti, quindi, rimando a testi con link in bibliografia tra cui l'analisi di *Bankvall* [6], quella di *M. Bomberg* [7] o di *Xingrong Lian et al* [8].

CAPITOLO 5 – PERMEABILITÀ

La permeabilità di un tessuto non tessuto viene in genere misurata in termini di velocità di un fluido attraverso il tessuto in mm/s [9], in relazione a una differenza di pressione o di concentrazione tra i due lati del materiale. Nel caso della permeabilità all'aria viene montato un aspiratore per generare la differenza di pressione e si va a misurare il flusso volumetrico d'aria, a regime stazionario, che permea attraverso il materiale. L'unità di misura di una portata su superficie, flusso volumetrico appunto, corrisponde proprio a quella di una velocità e quindi è concorde con la definizione. La permeabilità, dunque, può essere calcolata come:

$$P_a = k \frac{\dot{V}}{S}$$

P_a = permeabilità all'aria [mm/s]

\dot{V} = portata volumetrica d'aria [dm³/min]

S = superficie del campione [cm²]

$k = 167$ = fattore di conversione [adm]

Il discorso si complica invece per quanto riguarda la permeabilità all'acqua: i tessuti non-tessuti destinati all'abbigliamento, infatti, devono garantire una buona traspirabilità per il vapore d'acqua ma, al contrario, impedire la diffusione della fase condensata. Come descritto nel capitolo relativo allo *skin model* per valutare la permeabilità al vapore d'acqua si utilizza l' R_{et} (o meglio il suo reciproco), calcolato nelle condizioni descritte dalla ISO 11092 come rapporto tra la differenza di pressione del vapore acqueo su entrambi i lati del tessuto e il flusso di calore per mantenere la temperatura della piastra costante (c.r. fig. 3-1) per unità di area del tessuto:

$$R_{et} = \frac{\Delta P}{Q}$$

R_{et} = resistenza al vapore d'acqua [m²Pa/W]

Q = flusso di calore [W/m²]

ΔP = differenza di pressione del vapore d'acqua [Pa]

6.1 Vibroscopio

Prima di qualsiasi operazione sui TNT è necessario determinare il titolo delle fibre secondo la norma ISO 1973:2021. Lo strumento che utilizza la O.R.V Manufacturing è il Lenzing Vibroskop 400™. Il principio di funzionamento è legato al moto oscillatorio di un segmento di fibra di lunghezza nota. Un'onda vibrazionale è applicata alla fibra in modo da valutare la sua frequenza di risonanza. Per effettuare l'analisi è necessario prelevare singole fibre con l'utilizzo di una molletta di massa nota che le pretensiona in modo da rimuovere il cretto. Le fibre sono poste, una per volta, all'interno dello strumento dove vengono agganciate e sottoposte all'analisi.

Il calcolo della densità lineare è quindi il seguente:

$$\rho = \frac{N}{4f_r^2 \cdot l^2}$$

ρ = densità lineare [dtex]

N = forza di pretensionamento [N]

f_r = frequenza di risonanza [Hz]

l = lunghezza testata [m]

6.2 Misuratore di spessore

Per la determinazione dello spessore dei campioni è stato utilizzato il Gustin-Bacon Measure-Matic™ della Certaineed Machine Works. Lo strumento è stato progettato per determinare lo spessore dei tessuti-non tessuti superando il problema della loro facile comprimibilità. Il dispositivo si presenta composto da due piastre, una superiore mobile e una inferiore fissa, tra le quali viene posto il campione da analizzare. La piastra superiore, nel suo movimento, rimane sempre parallela a quella inferiore e la loro distanza è calcolata da uno spessimetro con punzone; la piastra superiore è parte di un sistema a leva che ne bilancia il peso. Quando si posiziona il campione la piastra mobile viene fatta poggiare con pressione trascurabile su di esso.

6.3 Termoflussimetro

Il termoflussimetro è uno strumento che genera un gradiente di temperatura tra due piastre interne e misura il flusso termico che li attraversa. Il test si conclude quando si raggiunge la condizione di flusso stazionario, alla quale si determina la conducibilità attraverso la legge di Fourier calcolata sul valore di conducibilità apparente (k_{app}), somma algebrica dei diversi valori di conducibilità derivati dai tre fenomeni in gioco: conduzione, convezione e irraggiamento (c.r. cap. 4). Il trasduttore misura quindi una differenza di potenziale, che è proporzionale al flusso di calore secondo un fattore di calibrazione (N) valutato tramite un test su un campione di conducibilità nota:

$$Q = N \Delta V = k_{app} A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Q = potenza termica scambiata [W]

N = fattore di calibrazione dello strumento [W/V]

A = area testata [m^2]

ΔV = differenza di potenziale misurata [V]

ΔT = differenza di temperatura impostata [$^{\circ}C$]

Δx = spessore del provino [m]

Per le analisi svolte per questo lavoro è stato utilizzato lo strumento Netzsch Heat Flow Meter 436/3 Lambda™. Questo può lavorare in un intervallo di 0-100 $^{\circ}C$ ed effettua la misura su un'area di 103.23 cm^2 (quadrato di lato 10.16 cm). Il range di conducibilità misurabile è 0.1 – 8 W/mK. In tutte le misurazione effettuate la temperatura della piastra superiore è $T_{p,sup} = 25^{\circ}C$ e quella della piastra inferiore è $T_{p,inf} = 15^{\circ}C$ con temperatura media e un ΔT di 10 $^{\circ}C$.

6.4 Tester di permeabilità

La prova di permeabilità all'aria è stata realizzata con SCHRÖDER Air Permeability Tester L14DC con un porta-campione a tazza con superficie di analisi di 20 cm^2 e una differenza di pressione applicata pari a 20 mbar. Per realizzare il test viene fustellato un campione cilindrico di diametro 100 cm^2 che viene poi posto nel porta-campione, sigillato con guarnizioni e sottoposto alla differenza di pressione.

6.5 Microscopio elettronico

Per il presente lavoro è stato utilizzato un microscopio elettronico Leica modello DVM6

Con lo strumento sono state osservate anche le sezioni trasversali delle fibre. Per fare ciò si è utilizzata una piccola piastra metallica forata dove, in ciascun foro, sono state sezionate delle fibre grazie ad una lametta.

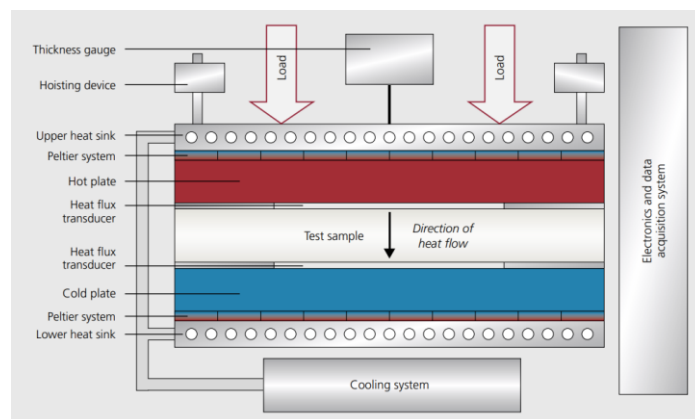


Figura 6-1: Schema di funzionamento del Netzsch Heat Flow Meter 436/3 Lambda™



Figura 6-2: Lenzing Vibroskop 400™



Figura 6-3: Netzsch Heat Flow Meter 436/3 Lambda™



Figura 6-4: Pressa per cicli di compressione



Figura 6-5: Gustin-Bacon Measure-Matic™



Figura 6-6: Tester di permeabilità



Figura 6-7: Leica DVM6™

CAPITOLO 7 – I PRODOTTI

7.1 I prodotti destinati all'abbigliamento della O.R.V. Manufacturing

L'azienda O.R.V. Manufacturing è specializzata nella produzione di tessuti non-tessuti tecnici e nei suoi 70 anni di attività ha portato nel mercato soluzioni sempre più innovative e performanti senza però trascurare le problematiche ambientali di cui il mondo dei tessuti è da sempre protagonista. Tutti i prodotti delle linee destinate all'abbigliamento, infatti, prevedono l'utilizzo di poliestere riciclato e soddisfano con grande margine tutti gli standard previsti dalle normative europee ed italiane.

In questo settore i loro cavalli di battaglia sono i prodotti delle linee Valtherm, Zero Down e Hi Therm: la prima consiste in tessuti più adatti a capi casual e streetwear mentre le altre due si propongono come alternative alla piuma d'oca nelle imbottiture di piumini e giacche per un utilizzo più tecnico-sportivo.

Per le analisi termiche ho prestato particolare attenzione ad uno dei prodotti più all'avanguardia nel settore, Valtherm Micro, che sfrutta fibre con titolo minore di 2 dtex per ottenere maggiori prestazioni nell'isolamento termico e garantire una morbidezza al tatto degna di nota. L'interlacciatura di questo particolare prodotto, dato che il diametro delle fibre raggiunge valori di pochi micron, non può essere condotta mediante i classici aghi con barba quindi si utilizza la tecnica conosciuta come *water jet entanglement*: il substrato di fibre viene esposto a getti d'acqua ad alta pressione provenienti da ugelli montati su un rullo che colpiscono la superficie dell'ovatta con forza sufficiente da penetrare tra le fibre e i filamenti, creando una sorta di intreccio meccanico.

CAPITOLO 8 – RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

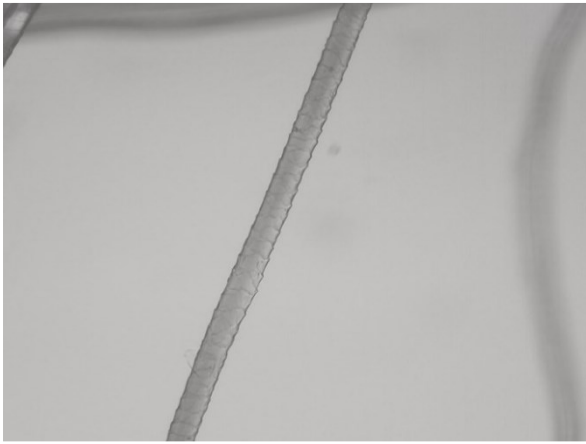
8.1 Discussione sulle immagini a microscopio elettronico

8.1.1 Depositi di TiO_2 sulla superficie della fibra

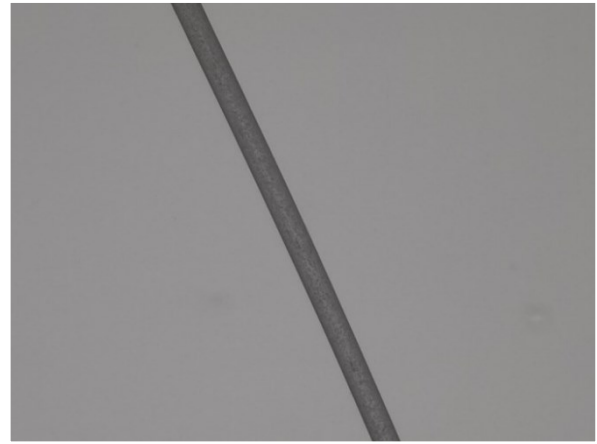
In figura 8.1b sono mostrati dei depositi di biossido di titanio lungo l'asse longitudinale della fibra. Questi vengono aggiunti alla miscela per diversi scopi:

Il primo scopo è opacizzare la superficie della fibra poiché fibre sintetiche come il poliestere tendono a riflettere la luce in modo marcato con il risultato di una colorazione poco uniforme e una lucentezza poco gradevole alla vista. Il secondo è la protezione dai raggi ultravioletti che garantisce il biossido. Queste radiazioni ad alta frequenza, infatti, provocano la rottura delle catene polimeriche e promuovono la formazione di gruppi funzionali indesiderati che tendono a degradare le proprietà fisico-meccaniche del materiale e conferirgli un colore giallognolo. Infine, il biossido di titanio riesce anche a semplificare il processo di cardatura garantendo ai denti della carda un maggiore grip sulla liscia superficie della fibra polimerica.

Le fibre naturali presentano spesso irregolarità sulla propria superficie e dunque non è necessario applicare prodotti poiché mostrano sia buon attrito che una buona opacità. In figura 8.1a, ad esempio, vengono mostrate le cuticole caratteristiche della lana.



(a)

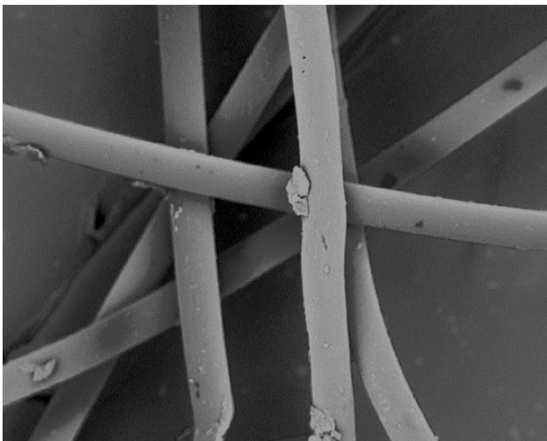


(b)

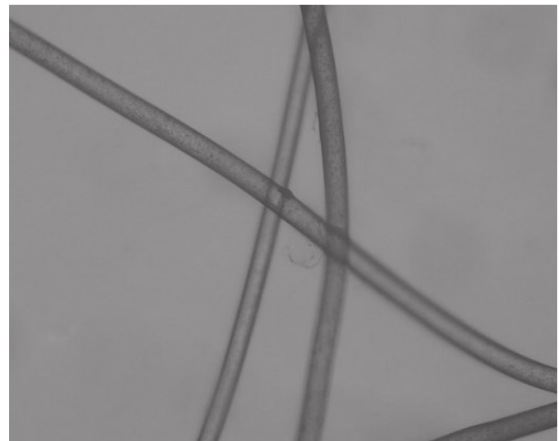
Figura 8-1: Vista longitudinale di una fibra di (a) lana (b) poliestere

8.1.2 Imperfezioni nel poliestere riciclato

Per quanto il PES riciclato risulti un'alternativa *eco-friendly* non si può trascurare che l'utilizzo di un fuso riciclato comporti una degradazione della regolare struttura della fibra in estrusione. Rispetto al poliestere vergine, quello riciclato presenta catene più corte e gruppi ossigenati che provocano un diretto peggioramento di proprietà meccaniche. La soluzione migliore risulta quindi utilizzare un blend con percentuale controllata di fibre vergini e riciclate come nel caso dei prodotti selezionati. In figura 8-3 si può osservare che all'aumentare della differenza in percentuale tra i due polimeri in miscela, le proprietà meccaniche peggiorano drasticamente poiché si formano fasi poco interconnesse. È essenziale, di conseguenza, lavorare con blend a basso contenuto di una delle due fibre, vergine o riciclata.



(a)



(b)

Figura 8-2: Vista longitudinale di fibre in poliestere riciclato con imperfezioni (a) *Polartec®* fleece in 1500x [10] (b) prodotto della *O.R.V. Manufacturing* in 200x

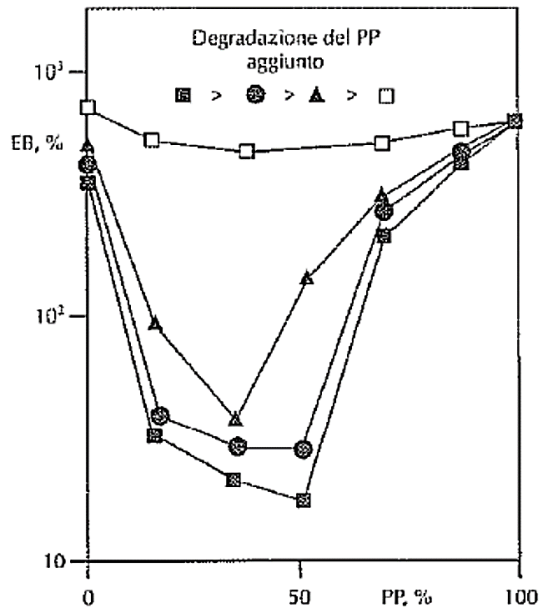


Figura 8-3: Allungamento a rottura (EB) in funzione del contenuto in polipropilene vergine (PP) [11]

8.1.3 Le fibre bicomponente

La maggior parte dei prodotti in analisi ha una certa percentuale di fibre bicomponente, ossia fibre prodotte a partire dalla simultanea estrusione di due polimeri con diversa temperatura di fusione in un unico filamento. L'utilizzo di fibre bicomponente permette da una parte di garantire una maggiore adesione nel prodotto finito mentre dall'altro di facilitare la lavorazione di fibre a basso titolo. Ciò è possibile poiché, in seguito ad un riscaldamento dell'ovatta ad una temperatura compresa tra la T_m del primo polimero e quella del secondo, ho la fusione di uno dei due componenti e quindi, previo raffreddamento, la formazione di un complesso reticolo che lega le fibre del polimero altofondente (materiali termolegati).

In figura 8-4 si può osservare la sezione longitudinale di una fibra bicomponente durante il riscaldamento su piastra. In questo caso la fibra si dice di tipo *sheath-core* poiché è costituita da una calotta esterna di un materiale bassofondente e un nucleo interno che costituisce la fibra vera e propria. La maggior parte dei prodotti O.R.V. utilizza fibre bicomponente con nucleo interno in poliestere e camicia esterna in co-PES, così da ottenere una calotta a più bassa temperatura di fusione.

Come anticipato, le fibre bicomponente vengono utilizzate non solo per creare un supporto per la struttura interna attraverso la reticolazione del polimero esterno ma anche, nel caso della tipologia *splittable* ad esempio, per ottenere fibre con titolo molto ridotto (0.2 - 0.5 denari) a partire da fibre bicomponente a titolo più elevato (3 denari), più facilmente lavorabili nella fasi di formatura del velo di tessuto.

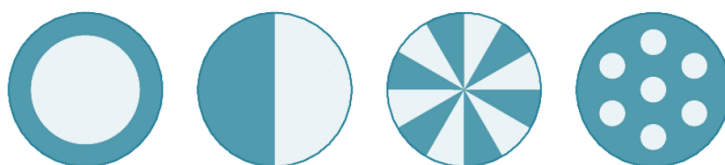


Figura 8-4: Rappresentazione della geometria della sezione di fibre bicomponenti: a) *sheath-core*, b) *side-by-side*, c) *splittable* e d) *islands-in-the-sea*



Figura 8-5: Vista longitudinale di una fibra bicomponente PES - coPES in seguito a fusione parziale del mantello

8.2 Tabulazione e discussione dei risultati delle prove meccaniche

Nelle prove meccaniche effettuate si valuta la diversa risposta del materiale a 500 cicli di compressione con un carico di 20 N. I valori che si vanno a calcolare sono espressi come differenza tra spessore finale e spessore iniziale del prodotto con diverse condizioni.

Il primo valore ($\Delta SP1$) rappresenta la pura risposta del materiale ai diversi cicli senza alcuna condizione aggiuntiva

Il secondo ($\Delta SP2$) prevede il calcolo della differenza di spessore sotto un preciso carico, costante (non ciclico) ma uguale in modulo a quello dei cicli (20 N).

Infine il terzo ($\Delta SP3$) è calcolato come differenza tra spessore iniziale e dopo un trattamento post-cicli in stufa a 120 °C per 3 minuti.

Questi ultimi due, in particolare, sono valori che risultano molto interessanti per i prodotti destinati all'abbigliamento poiché rappresentano le condizioni che un capo deve sopportare durante il suo ciclo di vita. I capi per utilizzo tecnico-sportivo, infatti, devono mostrare un ottimo ritorno dopo trattamenti di tipo termico – meccanico, come la lavorazione industriale, e lavaggi del capo finito ($\Delta SP3 \leq 0$) ma anche in seguito a forti ripiegamenti in spazi contenuti (ad esempio uno zaino da trekking o negli stessi rulli destinati all'imballaggio) ($\Delta SP2 \cong 0$).

Prodotto	n° strati [adm]	Gramm. [g/m ²]	Spess. in (carico 0 N) [cm]	Spess. in (carico 20 N) [cm]	$\Delta SP0$ [cm]	$\Delta SP1$ [cm]	$\Delta SP2$ [cm]	$\Delta SP3$ [cm]
A	3	97,90	46,60	6,7	39,90	9,6	1,3	-7,8
A	3	97,30	46,90	6,8	40,10	9,4	1,4	-8
B	5	96,18	32,47	6,04	26,43	2,5	0,25	-10,75
B	5	95,20	33,29	6,2	27,09	0,9	0,46	-10,4
C	3	114,52	50,03	5,1	44,93	5,7	0,32	-3,34
D	6	99,11	31,40	7,9	23,50	2,9	0,4	-13,4
E	5	99,56	44,90	9,49	35,41	4,7	0,56	-6,71

In particolare, nel primo caso, è utile anche tener conto che un eccessivo ritorno in stufa provoca deformazioni nella struttura del capo finito; ad esempio: se l'imbottitura di una giacca presenta un eccessivo aumento di spessore rispetto alla condizione iniziale allora, in seguito a trattamenti ad alte temperature, avrò una diretta tensione sulle cuciture e, di conseguenza, una contrazione in lunghezza del capo finito. Nell'ultimo caso, invece, è utile valutare quanto sia comprimibile il prodotto calcolando, previo cicli, la differenza di spessore a carico nullo e sotto carico costante di 20 N (definito in questa relazione come ΔSPO di valore ottimale se $\gg 0$).

In questo caso il confronto tra i risultati delle analisi e le proprietà fisiche del prodotto (titolo, densità, etc.) è di influenza minima quindi non si andrà ad approfondire l'argomento. Si nota piuttosto che le ovatte C ed E presentano i valori che meglio rispecchiano le condizioni sopra descritte sia per quanto riguarda la comprimibilità che il ritorno in stufa.

8.3 Le relazioni tra le proprietà del tessuto non-tessuto e l'isolamento termico

Nelle analisi sulla risposta termica di un tessuto non-tessuto i tre parametri su cui conviene intervenire sono, in ordine di rilevanza: densità, spessore e titolo medio della miscela di fibre.

8.3.1 Relazione tra densità e conducibilità

Densità e grammatura sono i primi fattori su cui è utile soffermarsi. Dalla figura 8-4 è possibile osservare una dipendenza quadratica tra conducibilità e densità del tessuto non-tessuto. Come è possibile osservare dalle analisi condotte da Bankvall su lana di vetro (fig. 8-5), per quanto sembri intuitivo imputare l'andamento parabolico alla conduzione del gas, questo è invece strettamente determinato dal contributo dell'irraggiamento.

Per densità minori il percorso delle radiazioni risulta meno tortuoso e intricato; quindi, il cammino libero medio delle radiazioni aumenta con un conseguente minor assorbimento e scattering delle stesse. Al crescere della densità però si osserva prima un minimo e poi un'inversione di tendenza poiché entra in gioco il contributo della conduzione fibra-fibra mentre l'irraggiamento tende asintoticamente a zero.

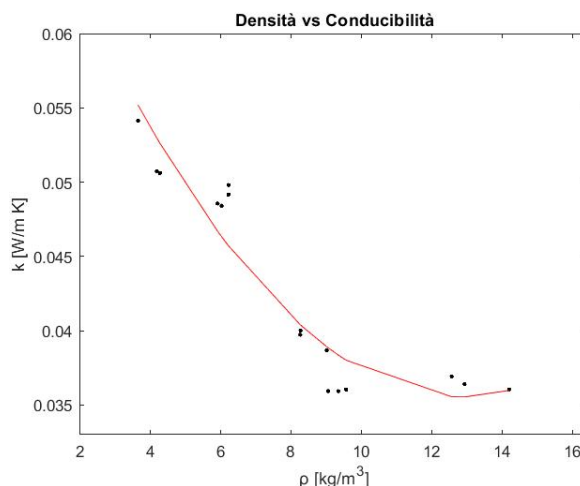


Figura 8-6: Risultati dell'analisi termica al variare della densità del TNT

Se consideriamo anche la traspirazione del capo, per un determinato prodotto esistono valori di densità ottimali e di conseguenza, a spessore fissato, range di grammature della lastra tale per cui posso minimizzare la conducibilità e massimizzare la resistenza termica del tessuto. Bisogna però tener presente che all'aumentare della grammatura ho anche una vertiginosa diminuzione della permeabilità al vapor d'acqua del prodotto e quindi un netto peggioramento della sensazione di confort fornita dal capo finito (c.r. a capitoli 8.4 - 8.5).

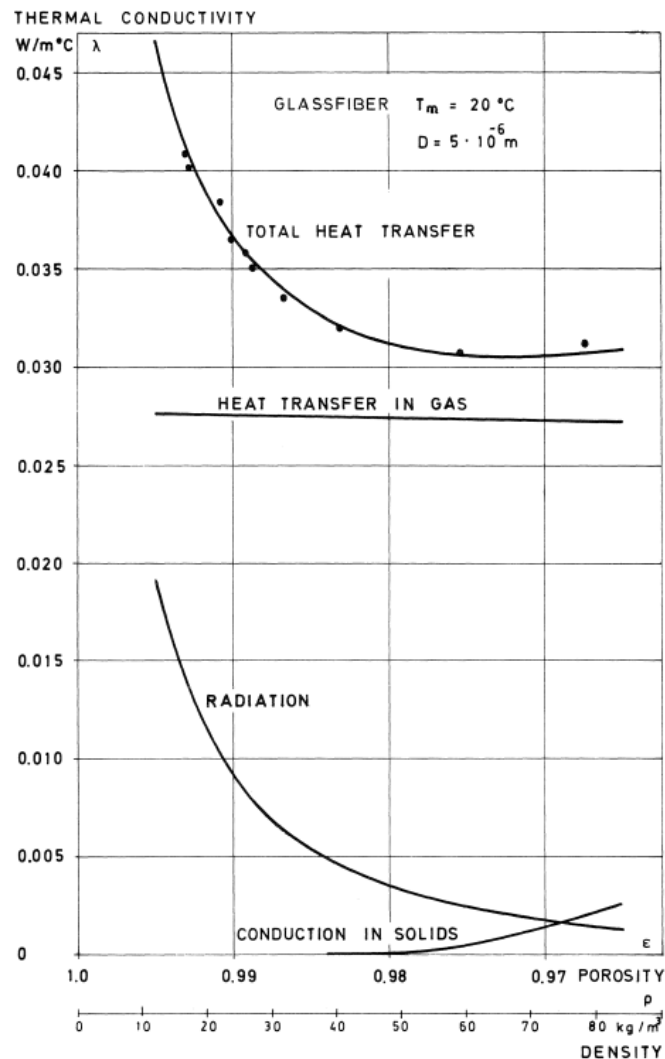


Figura 8-7: valori ottenuti da Bankvall su lana di vetro [6]

8.3.2 Relazione tra spessore e conducibilità

La risposta più insolita è la dipendenza che vi è tra spessore del campione e conducibilità. Questo parametro influenza solo il trasporto per irraggiamento quindi ci si aspetterebbe che, all'aumentare dello spessore, si osservi un calo della conducibilità poiché, per una radiazione, una maggiore distanza da percorrere comporta una maggior probabilità che questa venga assorbita o subisca scattering. Tuttavia come si può osservare in figura 8-6a, l'aumento dello spessore comporta un aumento della conducibilità secondo una relazione lineare.

È interessante osservare che il fenomeno si presenta anche a parità di densità del materiale come si può dedurre dalla figura 8-6b.

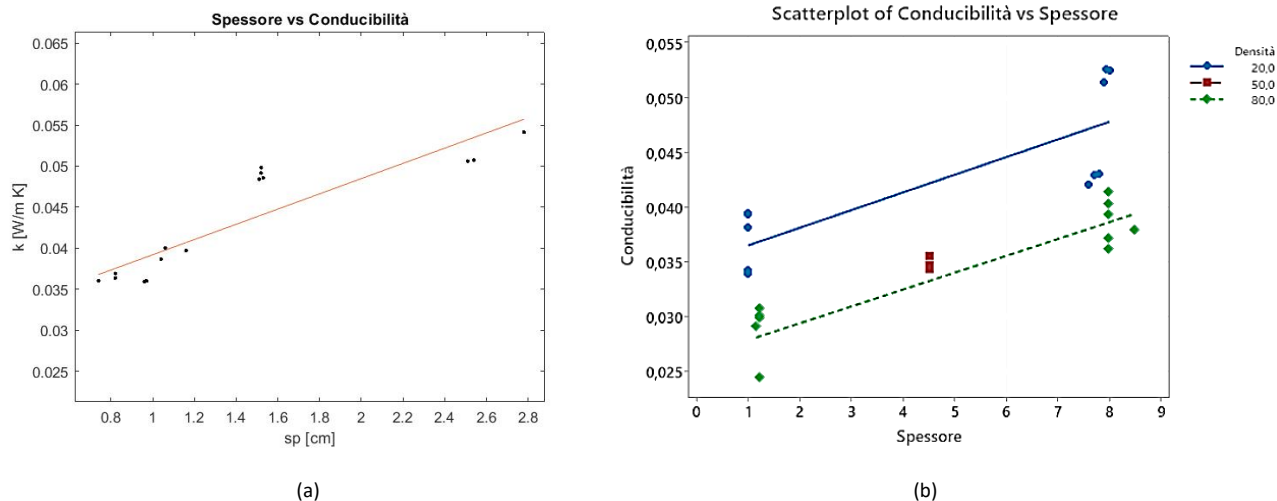


Figura 8-8: conducibilità (a) al variare dello spessore (b) al variare dello spessore ma parametrico a diverse densità

8.3.3 Relazione tra titolo medio della fibra e conducibilità

Il titolo medio di un tessuto corrisponde alla media dei titoli delle singole fibre presenti in miscela pesata nella percentuale in cui queste sono presenti. Si può osservare in figura 8-7 che, all'aumentare del titolo, aumenta debolmente la conducibilità del tessuto.

Nel caso di sezioni piene, infatti, fibre con titolo più elevato occupano uno spazio maggiore, a causa del maggior diametro, e offrono una maggiore resistenza a flessione, impedendo, in parte, complessi annodamenti della microstruttura. Di conseguenza, in genere, miscele di fibre a titolo medio elevato presentano densità minori rispetto a miscele con titolo medio ridotto.

Risultano quindi valide le stesse osservazioni fatte sulla dipendenza tra conducibilità e densità.

Tuttavia questa giustificazione non basta poiché non vi è una vera e propria dipendenza diretta tra titolo e densità anche perché, a fine di questa verifica, sono stati utilizzati provini con spessori e densità molto simili ($\Delta\rho_{\max} = 8 \text{ kg/m}^3$ per la densità e $\Delta s_{\max} = 0.5 \text{ cm}$ per lo spessore)

Si suppone quindi vi sia un certo riscontro tra titolo medio e flusso di calore per irraggiamento. Ciò è dovuto al fatto che per fibre a titolo maggiore ho una minore superficie specifica che porta ad un minor assorbimento e scattering e quindi ad una schermatura della radiazione meno rilevante.

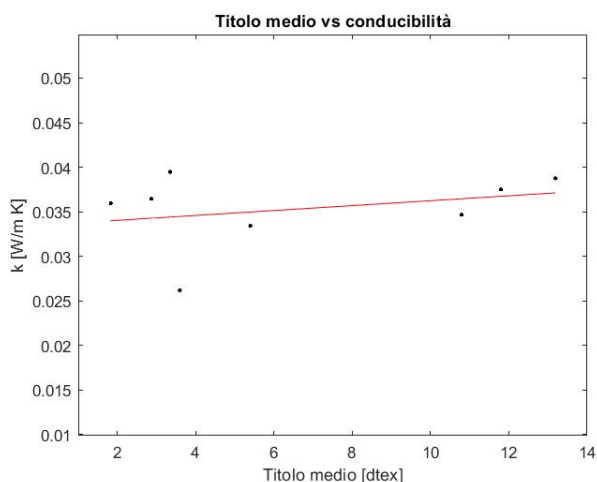


Figura 8-9: Risultati analisi di permeabilità al variare del titolo medio del TNT

8.4 Tabulazione e discussione dei risultati della prova di permeabilità

Come ultima tipologia di analisi, si è trattato il rapporto tra proprietà del tessuto e permeabilità all'aria, in mancanza della strumentazione adeguata alle analisi relative al vapor d'acqua. Queste analisi, per quanto parziali, risultano comunque interessanti quando si tratta la resistenza di una giacca in condizioni estreme, come possono essere le folate in vento in cima ad un monte e trovano comunque un certo riscontro, per quanto lieve, con la diffusione di vapor d'acqua attraverso il tessuto.

Infine, bisogna tener presente che per quanto il diminuire la densità e aumentare il titolo medio del tessuto porti ad un netto aumento della permeabilità e quindi ad una maggiore traspirazione del capo finito (vedi paragrafi successivi), la resistenza al flusso d'aria, quindi le proprietà antivento del capo, ma soprattutto al flusso di calore diminuiscono di molto.

8.4.1 Relazione tra densità e permeabilità

Come viene logico pensare, la portata d'aria che attraversa il tessuto è fortemente influenzata dalla densità del tessuto stesso: un tessuto a più alta densità, infatti, ha una maglia di fibre più fitta che garantisce una resistenza maggiore al flusso d'aria

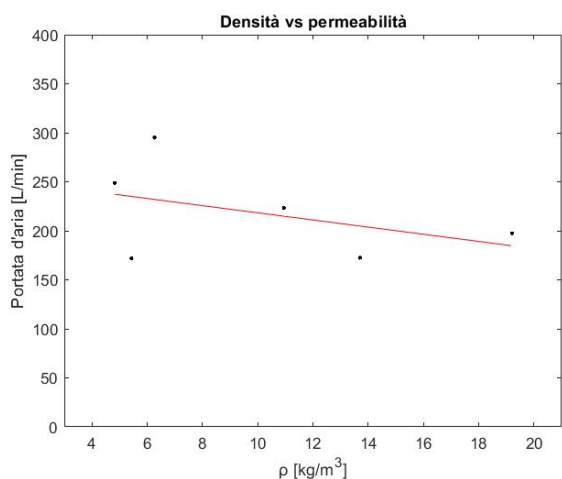


Figura 8-10

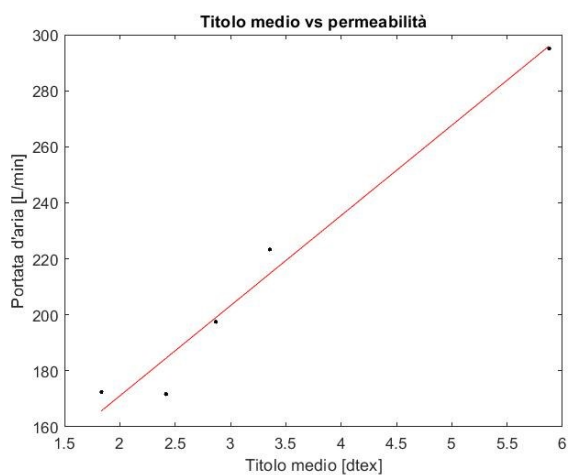


Figura 8-11

8.4.2 Relazione tra titolo medio e permeabilità

La causa di tale andamento è meno intuitiva ma di facile comprensione: il titolo di una fibra si calcola a partire dall'area della sua sezione e quindi dal diametro della fibra stessa; se il diametro della fibra è maggiore questa occuperà una maggiore porzione dello spazio nell'intero sistema che risulterà meno fitto. Un diametro maggiore, inoltre, garantisce una maggiore resistenza a flessione alla singola fibra che impedisce ulteriormente la formazione di un network intricato e annodato. Di conseguenza, le molecole di gas che devono attraversare lo spessore di tessuto trovano vuoti di dimensioni maggiori con percorsi molto più semplici e il loro flusso, quindi, risulta agevolato; motivo per cui si può quindi osservare un marcato aumento della permeabilità nel tessuto all'aumentare del titolo.

Ovviamente questo discorso perde di significato se le fibre confrontate presentano sezioni discordi ma nel nostro caso tutte le fibre in miscela sono di sezione circolare uniforme.

CONCLUSIONI

La presente ricerca ha contribuito a una comprensione approfondita delle proprietà fisico-meccaniche delle fibre di poliestere e delle loro applicazioni nei tessuti non-tessuti. In particolare, nel mondo dell'abbigliamento, questa tipologia di materiale ha permesso di sostituire le classiche imbottiture in piuma d'oca, meno performanti e più costose.

Il protagonista della scena è il poliestere grazie alle sue qualità intrinseche di resistenza, versatilità, facilità di produzione e semplicità di riciclo. Aziende come la *O.R.V. Manufacturing* hanno sfruttato questo particolare polimero per creare prodotti versatili, performanti ma allo stesso tempo eco-friendly grazie all'utilizzo di blend composti da poliestere vergine e riciclato.

Grazie alle osservazioni a microscopio e alla loro corrispondenza con gli interventi in letteratura [10] [11], nella discussione si è messo in evidenza che l'utilizzo di materiali riciclati se da una parte costituisce un gran vantaggio per l'ambiente, dall'altra contribuisce a degradare la struttura del polimero rendendo la fibra meno resistente e performante. Sempre nelle osservazioni a microscopio si è dimostrato il funzionamento delle fibre bicomponente e i vantaggi che queste comportano in seguito alla formazione del reticolo post-fusione.

In seguito, grazie alle analisi termiche e al confronto con i dati presenti in letteratura [6], si è potuto confrontare le dipendenze tra le proprietà del tessuto non-tessuto e la resistenza termica che questo offre. In particolare, si è potuto osservare che esistono valori di densità ottimale che minimizzano la conducibilità del tessuto ma, al contempo, non è garantito che tali valori permettano di avere anche il maggior livello di confort (c.r. paragrafo 3.1).

Per quanto riguarda invece l'analisi di tipo meccanico, attraverso dei test di compressione, sono stati messi in evidenza i principali parametri che deve rispettare un ottimo tessuto non-tessuto con particolare attenzione alla sua resilienza e alla capacità di ritorno in seguito a trattamenti termici.

Infine si è trattato il rapporto tra proprietà del tessuto e permeabilità all'aria, in mancanza della strumentazione adeguata alle analisi relative al vapor d'acqua. I risultati di queste analisi, per quanto parziali, risultano comunque interessanti poiché confrontabili, in parte, con i dati alla diffusione di vapore ma soprattutto poiché la permeabilità al flusso d'aria permette di valutare la resistenza di una giacca in condizione di forte vento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Textile Exchange - Preferred Fiber And Materials Market Report 2021 - 2022
- [2] S. J. Russell - Handbook of nonwovens - Woodhead Publishing Ltd - Leeds - 2006
- [3] Hohenstein Institute - Clothing physiological research in the service of wear comfort - Bönningheim - 2009
- [4] Frederick Fung, Chuansi Gao, Lubos Hes, Vladimir Bajzik - Water vapor resistance measured on sweating thermal manikin and Permetest skin model in the vertical orientation - Communications in Development and Assembling of Textile Products - Vol. 1, ch. 1 - pp. 65/73 - 2020
- [5] UNI EN ISO 11092:2014
- [6] Bankvall, C. - Heat transfer in fibrous materials - Document - Vol. D4:1972 - Bygghörsningsrådet (Building Research Council) - 1972
- [7] M. Bomberg, S. Klarsfeld - Semi-empirical model of heat transfer in dry mineral fiber insulations - National Research Council of Canada - Journal of Thermal Insulation - Vol. 6 - pp. 156/173 - 1983
- [8] Xingrong Lian, Lin Tian, Zengyao Li, Xinpeng Zhao - Thermal conductivity analysis of natural fiber-derived porous thermal insulation materials - International Journal of Heat and Mass Transfer - Vol. 220 - 2024
- [9] UNI EN ISO 9237:1997
- [10] Ivana Markova - Textile Fiber Microscopy - John Wiley & Sons Ltd - Hoboken, NJ, USA - 2019
- [11] Brusatin G. - Materiale fornito durante il corso di Scienze e Tecnologie dei Materiali Polimerici - Università di Padova - a.a. 2022/2023