



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

**Tesi di Laurea Magistrale in
Ingegneria dei Materiali**

*Studio dei fattori che influenzano le performance dei
tessuti-non tessuti in poliestere per applicazioni di
thermoacustica*

Relatore: Ch.mo. Prof. Michele Modesti

Correlatore: Dott.ssa Francesca Beltrame

Dott.ssa Silvia Zanatta

Laureando: Simone Targa

Anno Accademico 2022/2023

Riassunto

La crescita economica e il moltiplicarsi delle attività antropogeniche hanno portato negli anni ad effetti quali il riscaldamento globale e l'inquinamento acustico. L'intensificarsi di questi fenomeni ha reso necessario lo studio di materiali fonoassorbenti e termo-isolanti, tra i quali spiccano in letteratura i tessuti-non tessuti (TNT). Si tratta di materiali ad elevata porosità costituiti da fibre, legate con tecniche chimiche, termiche o meccaniche, che hanno la capacità di ostacolare i fenomeni di trasporto del calore e di assorbire l'energia sonora trasformandola in calore.

Grazie alla collaborazione con l'azienda O.R.V. Manufacturing è stato sviluppato questo studio che ha come obiettivo quello di mettere in luce i principali fattori che influenzano le capacità di pannelli in tessuto-non tessuto termolegato in fibra di poliestere, di assorbire le onde acustiche e di isolare termicamente. Lo studio è supportato da un'analisi sperimentale che utilizza la tecnica di progettazione degli esperimenti (DoE – *Design of Experiments*) e altre tecniche statistiche come la verifica di ipotesi e le tecniche di regressione. Si è realizzata una prima campagna di esperimenti per indagare il ruolo di alcuni parametri quali il diametro delle fibre, la densità, lo spessore e la loro interazione sulla risposta acustica e termica, che ha confermato la rilevanza di ciascun parametro esaminato sulle proprietà obiettivo. È stata poi sviluppata una ANOVA (*Analysis of Variance*) per il fattore porosità che si è rivelato influente solo marginalmente per le proprietà termoacustiche dei TNT. Successivamente, si è verificata la correlazione tra grammatura e permeabilità all'aria rispetto alle *performance* termoacustiche. La grammatura è determinante sia per l'assorbimento sonoro che per la resistenza termica mentre non sussistono tendenze in relazione alla conducibilità del calore. In una fase seguente è stata verificata l'esistenza di una correlazione tra assorbimento acustico e resistenza termica, precedentemente ipotizzata a seguito di una ricerca in letteratura, determinando una funzione di correlazione con un elevato livello di affidabilità. Lo studio successivo è stato rivolto alla verifica dell'ipotesi che la finitura superficiale del materiale, lisciata o irregolare, influenzi l'assorbimento acustico. L'esito di questa analisi ha negato l'influenza di questo parametro sulla risposta analizzata. Infine, a seguito di una ricerca bibliografica sull'effetto della geometria delle fibre sull'assorbimento acustico dei tessuti-non-tessuti, è risultato interessante verificare l'influenza di questo parametro non solo sulla risposta acustica ma anche su quella termica; solo per la seconda è stata osservata una tendenza, in particolare una ridotta conducibilità nei campioni realizzati con fibre a sezione cava.

Indice

INTRODUZIONE.....	11
CAPITOLO 1 I TESSUTI-NON TESSUTI.....	15
1.1 INTRODUZIONE AI TNT	15
1.2 MATERIE PRIME	17
1.2.1 Fibre bicomponenti di tipo splittabile	19
1.2.2 Proprietà delle fibre.....	24
1.2.3 Agenti leganti	26
1.3 METODI DI FORMAZIONE DEL VELO DI FIBRE.....	27
1.3.1 Tecnica dry-laid	27
1.3.2 Tecnica wet-laid.....	30
1.3.3 Tecnica polymer-laid	30
1.4 TECNICHE DI INTERLACCIATURA.....	30
1.4.1 Interlacciatura meccanica.....	31
1.4.2 Interlacciatura termica.....	32
1.4.3 Interlacciatura chimica	34
1.5 OPERAZIONI DI FINITURA	35
1.6 L'AZIENDA: <i>O.R.V. MANUFACTURING</i>	36
CAPITOLO 2 L'ASSORBIMENTO ACUSTICO DEI TESSUTI-NON TESSUTI	39
2.1 BASI DI ACUSTICA APPLICATA	39
2.1.1 Sensazione sonora	42
2.1.2 Onda sonora in un nuovo mezzo	42
2.1.2.1 La riflessione del suono	43
2.1.2.2 Assorbimento del suono	43
2.1.2.3 Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico con il metodo della Funzione di Trasferimento [28].....	45
2.1.3 Principi dell'assorbimento del suono	47
2.1.3.1 Assorbimento per risonanza di cavità[24][27][31]	48
2.1.3.2 Assorbimento per risonanza di pannello[24][27][31].....	49
2.1.3.3 Principi di assorbimento dei materiali porosi	50

2.2	L'IMPORTANZA DEL COMFORT ACUSTICO E L'APPLICAZIONE DI TESSUTI-NON TESSUTI PER REALIZZARLO	52
2.3	FATTORI CHE INFLUENZANO L'ASSORBIMENTO ACUSTICO NEI TESSUTI NON TESSUTI.....	53
2.3.1	Caratteristiche delle fibre	54
2.3.1.1	Materiale.....	54
2.3.1.2	Titolo	54
2.3.1.3	Forma della sezione	55
2.3.2	Proprietà del tessuto-non tessuto	56
2.3.2.1	Resistività al flusso d'aria.....	56
2.3.2.2	Porosità	57
2.3.2.3	Tortuosità.....	57
2.3.2.4	Spessore	58
2.3.2.5	Densità	58
2.3.2.6	Grammatura	58
2.3.3	Altri fattori.....	58
2.3.3.1	Processo produttivo.....	59
2.3.3.2	Finitura superficiale e applicazione di <i>layer</i>	59
2.3.3.3	Geometria superficiale del materiale	60
2.3.3.4	Distanza materiale-parete.....	60

CAPITOLO 3 L'ISOLAMENTO TERMICO DEI TESSUTI-NON TESSUTI.63

3.1	FONDAMENTI DEL TRASPORTO DI ENERGIA TERMICA [46]–[50]	63
3.1.1	Irraggiamento	64
3.1.2	Conduzione.....	65
3.1.3	Convezione.....	67
3.2	I FENOMENI DI TRASPORTO TERMICO NEI MATERIALI FIBROSI	69
3.2.1	Un modello teorico sulla conduzione e l'irraggiamento [50], [52], [54].....	73
3.2.1.1	Irraggiamento.....	73
3.2.1.2	Conduzione attraverso le fibre	75
3.2.1.3	Conduzione attraverso il gas nei pori.....	75
3.3	L'IMPORTANZA DELL'ISOLAMENTO TERMICO E L'UTILIZZO DEI TESSUTI-NON TESSUTI PER REALIZZARLO	77
3.4	FATTORI CHE INFLUENZANO LA CONDUCIBILITÀ TERMICA DI UN TESSUTO-NON TESSUTO	79

3.4.1	Caratteristiche delle fibre	79
3.4.1.1	Materiale.....	79
3.4.1.2	Titolo	80
3.4.1.3	Forma della sezione	81
3.4.2	Proprietà del tessuto-non tessuto.....	81
3.4.2.1	Porosità.....	81
3.4.2.2	Spessore.....	81
3.4.2.3	Densità.....	82
3.4.2.4	Grammatura.....	82
3.4.3	Altri fattori	82
3.4.3.1	Processo produttivo e orientazione delle fibre.....	82
3.4.3.2	Applicazione di <i>layer</i>	83
3.5	CORRELAZIONE TRA ASSORBIMENTO ACUSTICO E ISOLAMENTO TERMICO DEI TESSUTI-NON TESSUTI.....	83
CAPITOLO 4 MATERIALI.....		87
4.1	POLIETILENE TEREFTALATO [65].....	87
4.2	FIBRE E TESSUTI-NON TESSUTI IN PET [15], [67].....	88
4.3	FIBRE BICOMPONENTI <i>SHEATH-CORE</i>	90
4.4	SPECIFICHE DELLE FIBRE UTILIZZATE.....	91
CAPITOLO 5 METODI		97
5.1	METODI STATISTICI [69].....	97
5.1.1	Design of Experiments, 2-level full factorial.....	97
5.1.2	ANOVA ad una via.....	99
5.1.3	Correlation	100
5.1.4	Regressione lineare e polinomiale.....	100
5.1.5	Paired t	101
5.2	VIBROSCOPIO	101
5.3	SPETTROSCOPIA INFRAROSSA IN TRASFORMATA DI FOURIER (FT-IR)	103
5.4	CALORIMETRIA DIFFERENZIALE A SCANSIONE MODULATA (MDSC).....	105
5.5	GUSTIN-BACON MEASURE-MATIC™	107
5.6	TESTER DI PERMEABILITÀ	108
5.7	TUBO DI IMPEDENZA (TUBO DI KUNDT)	109
5.8	TERMOFLUSSIMETRO	110
5.9	ESEM	112

5.10	IMPIANTO PILOTA: CARDA E FALDATORE	115
5.11	TERMOSTUFA DA LABORATORIO	115
CAPITOLO 6 RISULTATI SPERIMENTALI.....		119
6.1	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI TERMOACUSTICI ANALIZZATI.....	119
6.2	ANALISI DELLE PROPRIETÀ TERMOACUSTICHE IN FUNZIONE DI DENSITÀ, SPESSORE E TITOLO MEDIO TRAMITE <i>DESIGN OF EXPERIMENTS</i>	120
6.2.1	Progettazione dell'esperimento	121
6.2.2	Preparazione dei campioni	123
6.2.3	Analisi preliminari.....	125
6.2.4	Risultati delle analisi	129
6.2.5	Elaborazione dei dati raccolti	131
6.2.5.1	Assorbimento acustico alle basse frequenze.....	131
6.2.5.2	Assorbimento acustico alle medie frequenze.....	135
6.2.5.3	Assorbimento acustico alle alte frequenze.....	141
6.2.5.4	Elaborazione dell'ottimo per l'assorbimento acustico	145
6.2.5.5	Confronto dell'assorbimento acustico con il metodo OFAT applicato ai fattori densità, spessore e titolo medio.....	146
6.2.5.6	Conducibilità termica.....	149
6.2.5.7	Resistenza termica	154
6.2.5.8	Elaborazione dell'ottimo delle proprietà termoacustiche.....	157
6.3	ANALISI ANOVA AD UNA VIA DELLE PROPRIETÀ TERMOACUSTICHE IN RELAZIONE ALLA POROSITÀ	159
6.3.1	Campioni analizzati e risultati delle analisi.....	159
6.3.2	Elaborazione dei risultati dell'ANOVA ad una via.....	160
6.4	STUDIO DELL'ESISTENZA DI UNA CORRELAZIONE TRA PROPRIETÀ TERMOACUSTICHE CON GRAMMATURA E PERMEABILITÀ	163
6.4.1	Campioni analizzati.....	163
6.4.2	Risultati delle analisi	164
6.4.3	Elaborazione dei dati relativi alla grammatura.....	165
6.4.4	Elaborazione dei dati relativi alla permeabilità	168
6.5	STUDIO DELL'ESISTENZA DI UNA CORRELAZIONE TRA ASSORBIMENTO ACUSTICO E ISOLAMENTO TERMICO.....	169
6.5.1	Campioni analizzati.....	170
6.5.2	Elaborazione dei dati raccolti	170
6.5.2.1	Equazione di correlazione tra assorbimento acustico e resistenza termica	173

6.6	RUOLO DELLA FINITURA SUPERFICIALE SULL'ASSORBIMENTO ACUSTICO	175
6.6.1	Campioni analizzati.....	175
6.6.1	Risultati delle analisi	176
6.6.2	Elaborazione dei dati raccolti.....	177
6.7	ANALISI PRELIMINARE DELLE PROPRIETÀ TERMOACUSTICHE DI TESSUTI-NON TESSUTI REALIZZATI CON FIBRE CON SEZIONE DI FORMA PARTICOLARE	178
6.7.1	Preparazione dei campioni	179
6.7.2	Analisi preliminari	180
6.7.3	Risultati delle analisi	187
	CONCLUSIONI.....	191
	NOMENCLATURA	195
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	201

Introduzione

Il riscaldamento globale e l'inquinamento acustico sono alcuni degli effetti preoccupanti della crescita economica e delle attività umane. L'utilizzo delle risorse energetiche non rinnovabili e la produzione di gas serra sono oggi temi di rilevanza mondiale. La maggior parte delle nazioni è stata quindi forzata ad adottare strategie volte alla riduzione dei consumi di energia. Ad esempio, gli edifici residenziali e commerciali contano più del 40% del dispendio energetico globale ed il loro rivestimento con appositi pannelli termoisolanti permette una notevole riduzione degli scambi di calore con l'esterno [1]. Lo sviluppo globale è inoltre accompagnato dal moltiplicarsi delle fonti di suoni e rumori, soprattutto per il maggior utilizzo di veicoli, dispositivi elettronici e in generale dalla crescita della popolazione. Oggi il *comfort* acustico degli ambienti è di grande importanza e può essere migliorato attenuando l'intensità sonora. L'esposizione dell'apparato acustico umano ad onde sonore al di sopra di una determinata soglia è infatti pericoloso per la salute perché può causare perdita dell'udito, ipertensione, emicrania e insonnia. Inoltre, un ambiente di lavoro rumoroso riduce le *performance* dei dipendenti e causa stress [2]. Per esemplificare, i suoni non desiderati all'interno dell'abitacolo di una vettura diminuiscono l'intelligibilità dei dialoghi ed esauriscono il guidatore con effetti negativi sulla sicurezza.

Tra i materiali fonoassorbenti e termo-isolanti spiccano in letteratura i tessuti-non tessuti (TNT). Si tratta di materiali ad elevata porosità costituiti da fibre unite con tecniche chimiche, termiche, meccaniche o da una combinazione di queste. Alcune importanti caratteristiche dei TNT sono l'elevata superficie specifica, la bassa densità e il limitato costo. Il punto di forza principale di questi materiali è però la possibilità di ingegnerizzare la loro microstruttura per esaltarne le proprietà desiderate. Tra i parametri che determinano le caratteristiche dei TNT, e quindi le loro possibili applicazioni, vi è la scelta delle fibre (materiale, titolo, lunghezza e forma della sezione), la scelta del processo produttivo, le caratteristiche geometriche del prodotto (quali spessore, grammatura, densità, porosità e tortuosità) e altre variabili quali la presenza di materiali di rivestimento (*layers*). La versatilità di questi manufatti permette di impiegarli per realizzare prodotti nel campo dell'edilizia, dell'auto, dell'arredamento, della sanità, dell'igiene, della filtrazione e dell'abbigliamento.

Secondo EDANA (*“European Disposables and Nonwovens Association”*) il volume di TNT prodotti in Europa nel 2016 era di circa 2,4 milioni di tonnellate mentre nel 2020 è stato di 3 milioni di tonnellate [3]. Il segmento dell'industria tessile di cui fanno parte i

TNT è difatti quello in più rapida crescita e conta per un terzo dell'industria delle fibre[4]. È nel panorama delle industrie dei TNT che è presente *O.R.V. Manufacturing*, azienda italiana che da 70 anni opera a Carmignano di Brenta (PD) e Grantorto (PD). Grazie alla collaborazione con questa realtà di eccellenza è stato sviluppato questo studio che ha come obiettivo quello di analizzare i fattori che influenzano le *performance* di materiali termoacustici in fibra di poliestere. *O.R.V. Manufacturing* produce ogni anno oltre 10,000 tonnellate di TNT con applicazioni nei settori dell'edilizia, dell'*automotive*, dell'abbigliamento, della filtrazione e dell'arredamento. L'azienda trasforma principalmente fibre di poliestere, sia vergini che, adottando nuove soluzioni tecnologiche ecosostenibili, di tipo rigenerato o recuperato dallo smaltimento di bottiglie. I materiali analizzati sono quindi costituiti da poliesteri, famiglia di polimeri che combina bassi costi di produzione e ottimo equilibrio tra le proprietà chimico-fisiche.

Lo scopo principale di questo elaborato è quello di mettere in luce i principali fattori che influenzano le capacità dei TNT di assorbire onde acustiche e di isolare termicamente. Questi materiali sono ampiamente utilizzati nel controllo dei rumori come dimostrato dalla corposa letteratura che li esamina e che evidenzia l'importanza di conoscerne la microstruttura per sviluppare prodotti altamente performanti. I TNT hanno la capacità di assorbire l'energia sonora e trasformarla in calore: quando l'onda sonora penetra nella loro struttura porosa essa viene attenuata per attriti viscosi, dalla perdita di momento e da fluttuazioni termiche dovuti a fenomeni di compressione e rilassamento.

Parallelamente agli studi acustici, sono anche disponibili numerose pubblicazioni scientifiche riguardanti l'applicazione dei TNT come isolanti termici. La capacità termoisolante dei TNT ha origine nella struttura porosa a bassa densità che, con solo il 10% di frazione solida, intrappola l'aria e limita i fenomeni responsabili dello scambio termico. Diversi studi evidenziano come la convezione sia trascurabile attraverso un TNT e che la conduzione e l'irraggiamento siano i soli fenomeni di trasporto termico [5][6][7]. Tipicamente gli isolanti termici e gli attenuatori acustici sono sviluppati separatamente [1]; in questo elaborato si cerca invece di mettere in luce anche la relazione tra i due fenomeni per rispondere alla richiesta di materiali per applicazione termoacustica.

Lo studio è articolato in diverse fasi e verrà supportato da un'analisi sperimentale che utilizza la tecnica di progettazione degli esperimenti (*DoE – Design of Experiments*) e altre tecniche statistiche come la verifica di ipotesi e le tecniche di regressione-correlazione. Il primo capitolo verte sui tessuti-non tessuti, dalle materie prime, alla loro produzione e caratterizzazione. Seguono due capitoli dedicati alla teoria dell'isolamento acustico e termico. Nelle sezioni successive vengono poi descritti i materiali e le metodologie utilizzate e vengono presentati e discussi i risultati che si sono ottenuti.

Capitolo 1

I tessuti-non tessuti

Questo primo capitolo si occupa di inquadrare i materiali oggetto di questo studio: i tessuti-non tessuti. Inizialmente viene fornita la loro definizione, classificazione, applicazione e viene predisposta una panoramica delle materie prime costituenti. Segue la descrizione dei possibili processi produttivi, dalla miscelazione alla formazione del velo di fibre, interlacciatura e finitura. Si analizzerà poi nel dettaglio la produzione che prevede la tecnica del *Dry-laid web formation*, essendo quella utilizzata per la realizzazione dei campioni analizzati. Il capitolo si conclude con una breve panoramica del campo di azione dell'azienda *O.R.V. Manufacturing*, con la quale si è collaborato.

1.1 Introduzione ai TNT

I tessuti-non tessuti sono tra i più antichi materiali tessili, le prime documentazioni del loro utilizzo risalgono a 3500-3000 a.C. Il termine TNT, in lingua anglosassone "*nonwovens*", nasce a metà del diciannovesimo secolo quando questi materiali vengono utilizzati come alternativa a basso prezzo dei tradizionali tessuti. Nel loro processo produttivo si omette infatti la filatura, ottenendo quindi una notevole riduzione dei costi; le fibre vengono in questo caso legate attraverso metodi meccanici, chimici o termici che sostituiscono la lavorazione di intrecciatura tradizionale dei filati. Contrariamente al passato, oggi l'industria dei TNT è sempre più redditizia e in rapida crescita in termini di investimenti, ricerca, sviluppo e utilizzo di sistemi sofisticati. Nel settore dei tessuti il segmento dei TNT è quello con lo sviluppo più rapido e costituisce approssimativamente un terzo dell'industria delle fibre [8]. Secondo EDANA ("*European Disposables and Nonwovens Association*") il volume di TNT prodotti in Europa nel 2000 è di 1,025,900 tonnellate, nel 2016 è stato di 2,378,700 tonnellate mentre nel 2020 si è arrivati al quantitativo di 3,075,614 tonnellate [3]. Il valore della loro produzione nel mondo è invece di € 10-11 bilioni[9].

Una prima definizione dei TNT è quella proposta da EDANA che li descrive come "*a manufactured sheet, web or batt of directionally or randomly orientated fibres, bonded by friction, and/or cohesion and/or adhesion*" e continua escludendo materiali come carta, prodotti tessuti, lavorati a maglia, trapuntati o infeltriti (incorporando filamenti ad

un supporto) [3]. In generale, EDANA classifica come TNT i materiali con più di 30% in massa di fibre con un rapporto lunghezza-diametro maggiore di 300 e densità inferiore a 0.4g/m [9].

INDA, (“North America’s Association of the Nonwoven Fabrics Industry”) invece adotta la seguente definizione: “*sheet or web structures bonded together by entangling fibres or filaments, by various mechanical, thermal and/or chemical processes. These are made directly from separate fibres or from molten plastic or plastic film*”[8].

I TNT sono dunque materiali costituiti da fibre, ad orientazione preferenziale o *random*, unite tra loro con diverse tecniche che verranno approfondite nel paragrafo 1.4. Essi vengono fabbricati in un singolo processo continuo, dalla fibra al prodotto finito, e possono essere ingegnerizzati per ottenere specifiche caratteristiche e funzioni. La struttura e le proprietà dei TNT dipendono da innumerevoli fattori che possono essere controllati: la scelta delle fibre, la tecnologia utilizzata per disporle e il processo applicato per legarle e consolidare il materiale. È possibile ottenere prodotti sottili come un foglio di carta o spessi oltre 10cm, con una mano¹ ruvida od estremamente soffice, con caratteristiche fisico-meccaniche che spaziano dal rigido e tenace all’instabile e debole. La combinazione dei TNT con altri materiali permette inoltre la formazione di compositi e laminati che ampliano notevolmente i campi di applicazione di questi materiali.

In Europa i TNT trovano impiego principalmente nel campo dell’igiene, che conta il 33% dell’intera produzione, e dell’edilizia (17.9%), come riportato nella figura 1-1.

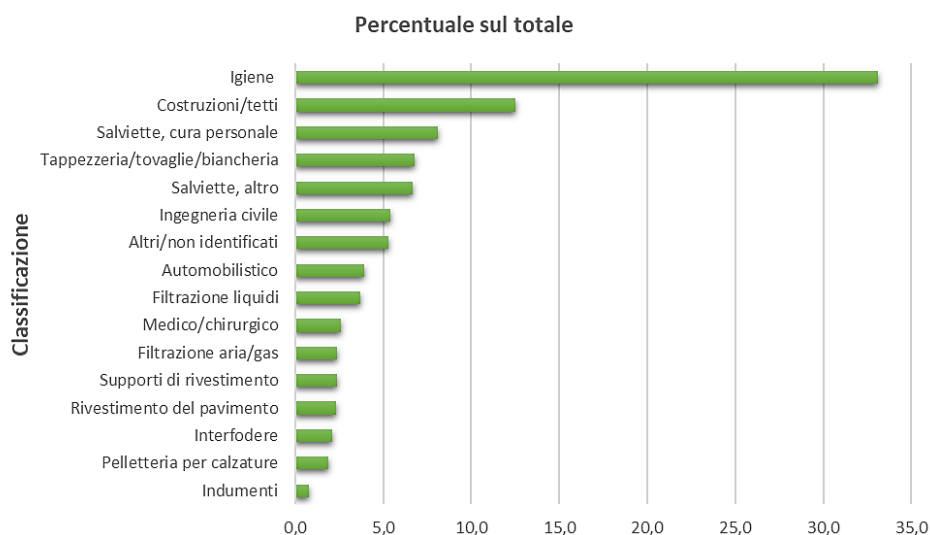


Figura 1-1: produzione di TNT in Europa suddivisa per applicazione secondo EDANA [3].

¹ Mano: Si intende la sensazione che si prova nel contatto della mano con un prodotto tessile (filo, fibre, tessuto, maglia etc.). Questa può essere di genere assai variegato e pertanto difficile da descriversi. Si parla di mano morbida, dura, piena, pagliosa, serica, lanosa etc. La mano dipende dal titolo delle fibre, dalla loro rigidità, dalla torsione del filo e innanzi tutto dal finissaggio.

La classificazione dei tessuti-non tessuti avviene principalmente secondo il tipo di processo produttivo, in base alle materie prime utilizzate, la durata della loro vita media e con la caratterizzazione di specifiche proprietà, come indicato di seguito:

1. Metodo di produzione:
 - Secondo le modalità di formazione del velo:
 - *Dry-laid*
 - *Wet-laid*
 - *Polymer-laid*: spun bond e spun melt
 - Secondo la tecnica di legatura:
 - Meccanica
 - Chimica
 - Termica
2. Materie prime:
 - Fibre in fiocco
 - Fibre in filamento
3. Durata media di vita:
 - Permanenti
 - Semi-permanenti
 - Usa e getta
4. Proprietà specifiche:
 - Con ritardanti di fiamma
 - Idrorepellenti
 - Antibatterici
 - Protettivi UV
 - Olio fobici, etc.

1.2 Materie prime

Per definizione i TNT sono costituiti da fibre, che sono a loro volta definibili come qualsiasi sostanza, naturale o sintetica, con elevato rapporto lunghezza-spessore che possiede caratteristiche che la rendono processabile per ottenere dei tessuti. La scelta della fibra riveste un ruolo chiave perché, combinata con il giusto processo produttivo, permette di ottenere le proprietà desiderate. La fibra contribuisce quindi alle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del TNT.

Alla base della scelta della fibra vi è il materiale di cui è costituita, poiché questo ne influenza la resistenza meccanica, la facilità di tintura, il comportamento alla fiamma,

l'impermeabilità e molte altre proprietà del TNT risultante. Teoricamente qualsiasi fibra può essere utilizzata per produrre un TNT ma la scelta dipende dal rapporto costo-funzionalità, la tecnica di lavorazione richiesta e dalle proprietà che deve avere il prodotto finito. Generalmente la produzione di un TNT prevede di utilizzare una miscela di diverse fibre, ciò permette di ottenere caratteristiche del prodotto finito migliori. Il mix di fibre può essere naturale/naturale, sintetico/sintetico o anche naturale/sintetico.

Le fibre più utilizzate sono quelle sintetiche, che coprono il 90% di quelle utilizzate; esse sono prodotte a partire da polimeri naturali, polimeri sintetici o sostanze inorganiche. Tra di loro vengono impiegati principalmente fibre in poliestere (PES), polipropilene (PP), poliammidi (PA), rayon, carbonio e silicee. Le principali peculiarità delle fibre in PES sono il basso costo, buona resistenza meccanica specifica, la facilità con cui è possibile tingerele, una buona stabilità geometrica, resistenza all'usura e al lavaggio. Inoltre, per quanto riguarda la loro sezione, sul mercato sono disponibili in un'ampia varietà di finiture superficiali e di diverse forme come quella trilobata, cava o a lobi. Le fibre in PP sono attualmente le più utilizzate perché presentano buone caratteristiche meccaniche specifiche, stabilità chimica, capacità coprente e facilità di pulizia. Inoltre, le sue caratteristiche meccaniche, mano, comportamento alla fiamma, idrofobia e colorazione possono essere modificate con l'aggiunta di agenti chimici e sottoponendole ad diversi tipi di condizionamento[9].

Possono poi essere utilizzate anche fibre naturali come il cotone, la juta, il lino e la lana. Queste però, per la presenza di impurità e per i costi di produzione, sono molto meno utilizzate delle fibre sintetiche. Tra le fibre naturali la più utilizzata è il cotone che trova principalmente applicazione nei prodotti per la cura personale e per il settore sanitario[4]. Infine, esistono delle fibre chiamate "speciali" e tra queste si distinguono le fibre bicomponenti, che prevedono la coesistenza di due diversi polimeri all'interno della stessa fibra. Più nel dettaglio si distinguono per morfologia in *sheath-core* e splittabili (Figura 1-2), dove le *sheath-core* sono costituite da un *core* in polimero altofondente e da un mantello in polimero bassofondente, mentre le splittabili hanno la sezione denominata "a torta" o "ad agrume" in cui gli spicchi sono alternativamente costituiti da polimeri diversi, ad esempio Nylon e PES.

Le fibre *sheath-core* sono principalmente utilizzate nei mix fibra che devono subire una fase di legatura termica, come per le tecniche *dry-laid* e *polymer-laid*, infatti la *shell* bassofondente, a seguito di riscaldamento, fonde legando le fibre con cui è in contatto, lasciando inalterate le caratteristiche del polimero costituente il *core*.

Le fibre splittabili sono invece utilizzate principalmente nel processo di legatura con l'ausilio di idrogetti che contemporaneamente dividono tra loro gli spicchi e consolidano il materiale attraverso l'interlacciatura di tipo meccanico. In questo modo è possibile ottenere un TNT costituito da fibre con titolo 0.2 denari a partire da una fibra

bicomponente con titolo 3 denari, più facilmente lavorabile nella fase di formatura del velo di fibre [10].



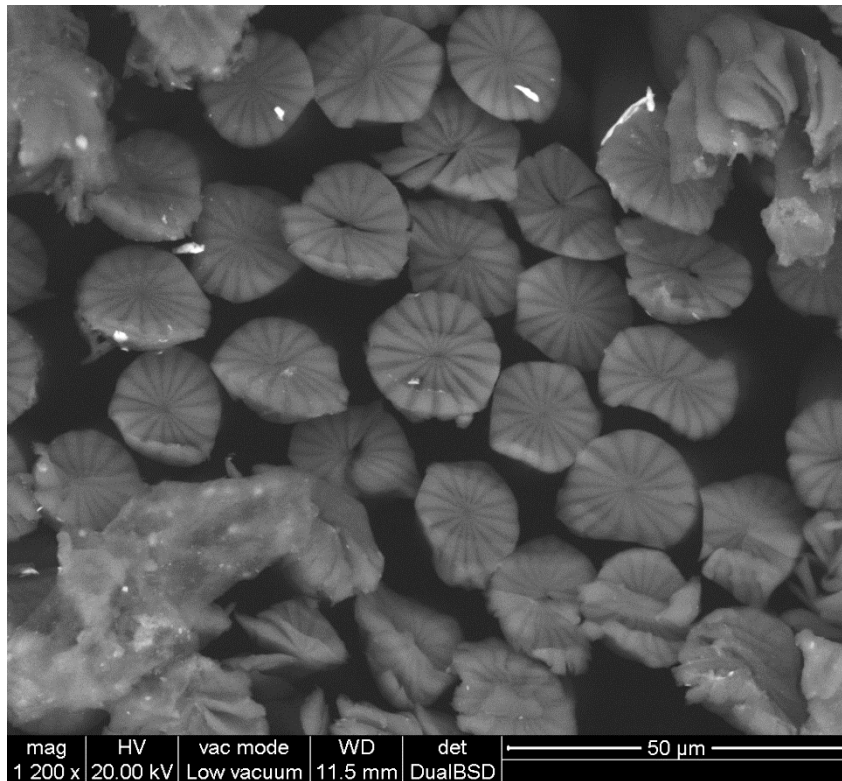
Figura 1-2: Rappresentazione schematica della sezione di una fibra bicomponente di tipo a) *sheath-core* e b) *splittabile*.

1.2.1 Fibre bicomponenti di tipo splittabile

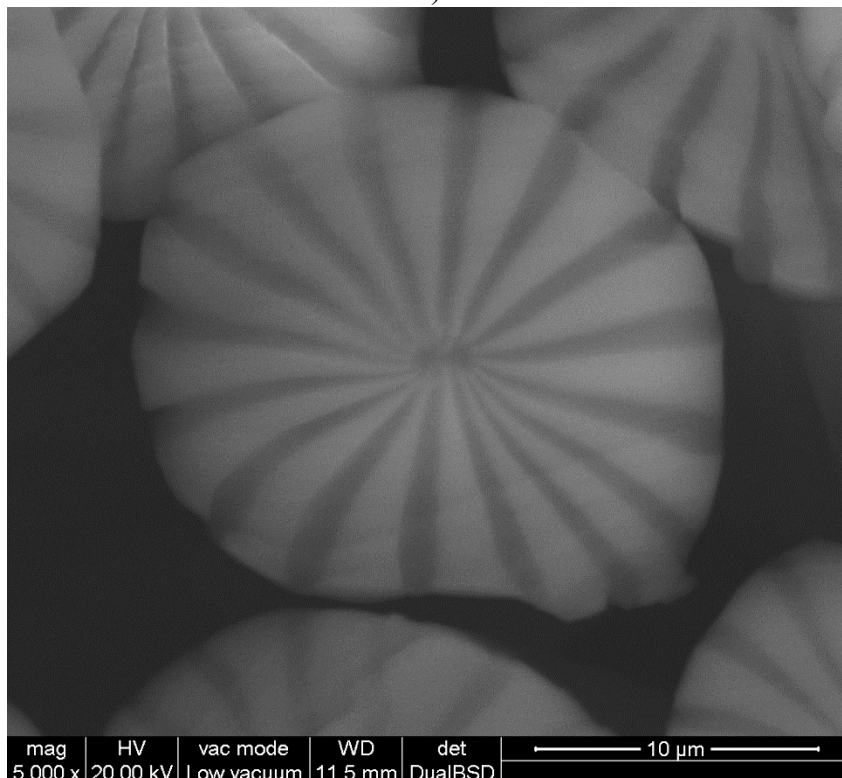
Utilizzando un microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) è possibile verificare le caratteristiche morfologiche e composizionali di fibre bicomponenti di tipo splittabile.

Dalle immagini ottenute da un'analisi degli elettroni retrodiffusi si visualizzano, a diverse tonalità di grigio, le zone costituite dai diversi polimeri. Studiando una fibra bicomponente Nylon-PES è possibile distinguere, nella fotografia della sezione della fibra in fig. 1-3, gli spicchi di poliammide e poliestere. Le zone a tonalità di grigio più scuro sono date dalla presenza dell'azoto nelle catene polimeriche mentre quelle più chiare sono costituite da poliestere.

Effettuando una microanalisi *spot* con sistema EDX, dei diversi spicchi che costituiscono la sezione della fibra, si ottengono spettri con picchi corrispondenti agli elementi presenti. Gli spicchi della poliammide presenteranno il picco caratteristico dell'azoto, non presente nelle zone del poliestere come si può osservare dalla fig. 1-4. Con l'analisi EDX è inoltre possibile ottenere mappe della composizione dell'area analizzata e quantificare la presenza percentuale di ciascun elemento. Un'altra conferma, di quali spicchi sono in nylon e quali in PES, è data dalla percentuale di ossigeno, maggiore nel secondo polimero rispetto al primo. (Fig. 1-5).

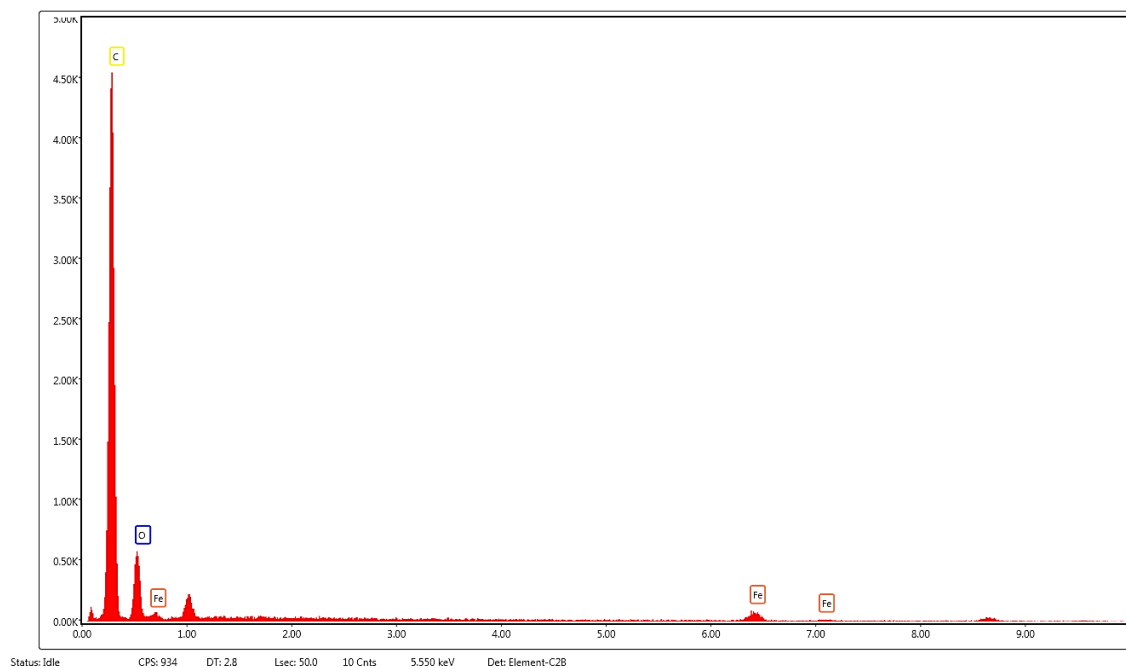


a)

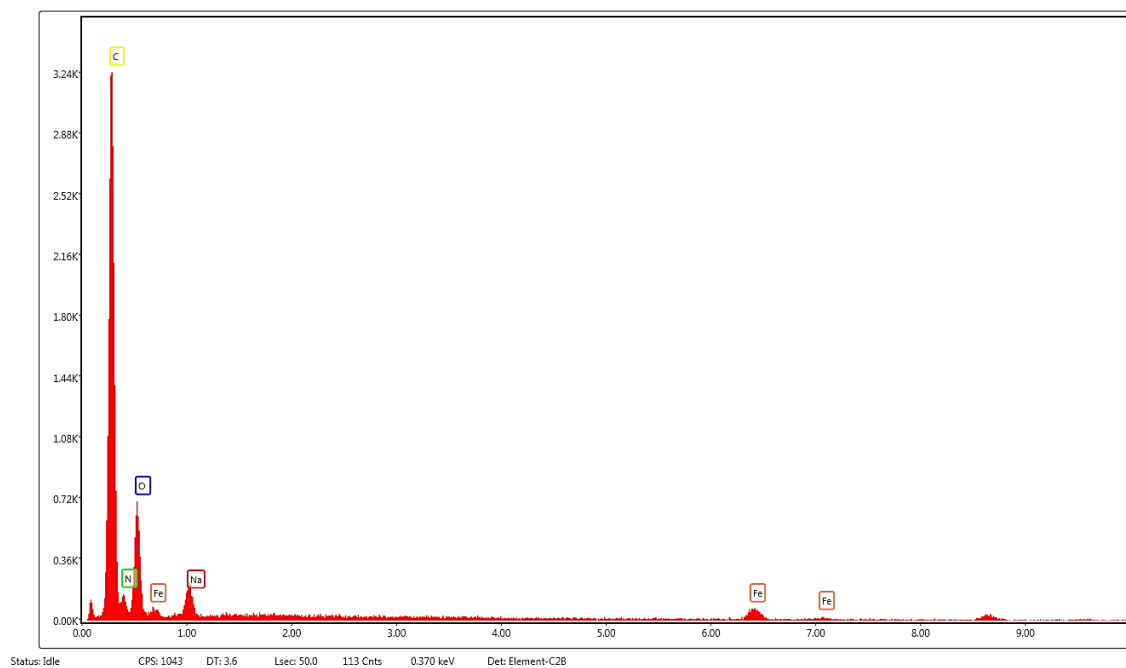


b)

Figura 1-3: Immagini realizzate con ESEM con analisi degli elettroni retrodiffusi. Sezione di fibra bicomponente *splittable* nylon-poliestere. Ingrandimenti a) 1200x b) 5000x. Le zone a gradazione di grigio più scura sono quelle costituite da Nylon.

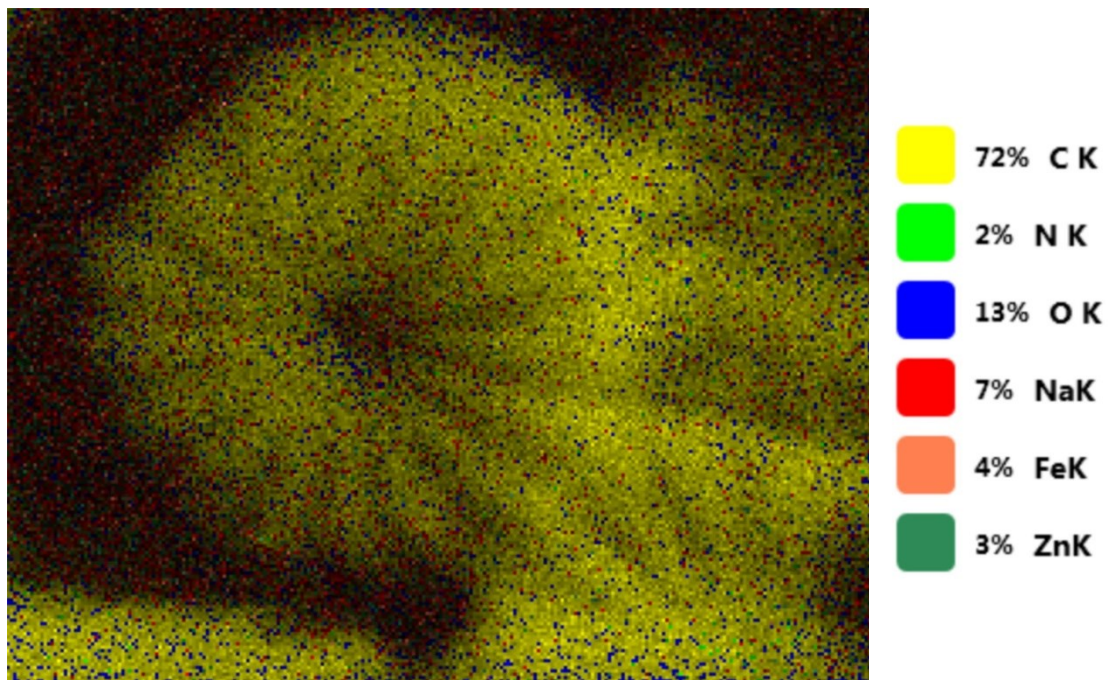


a)

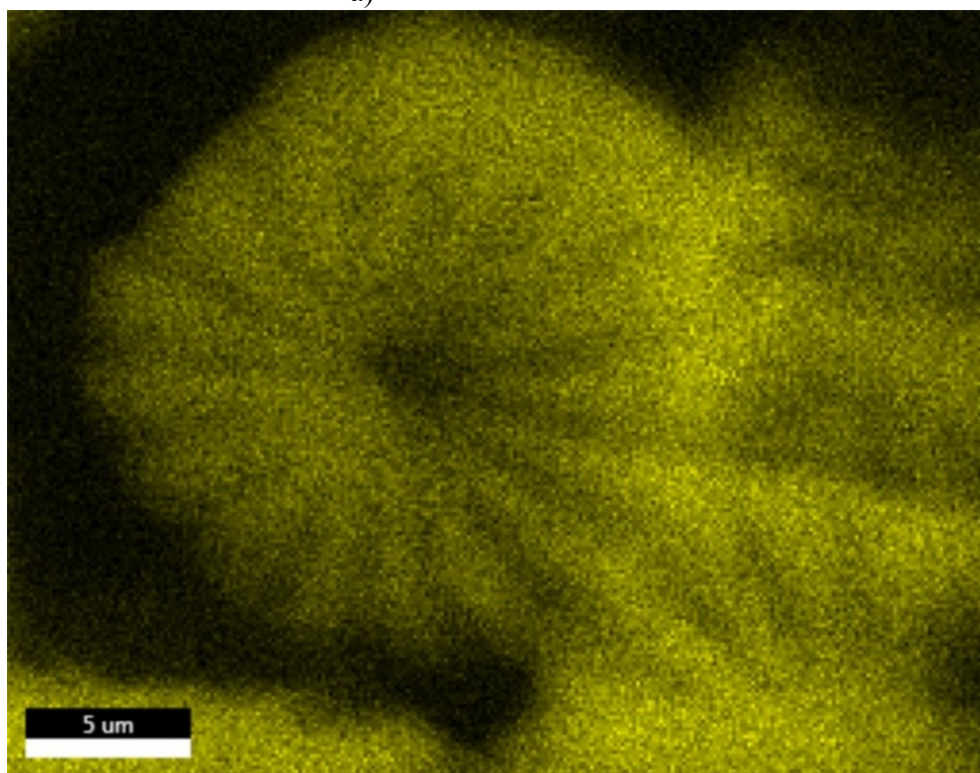


b)

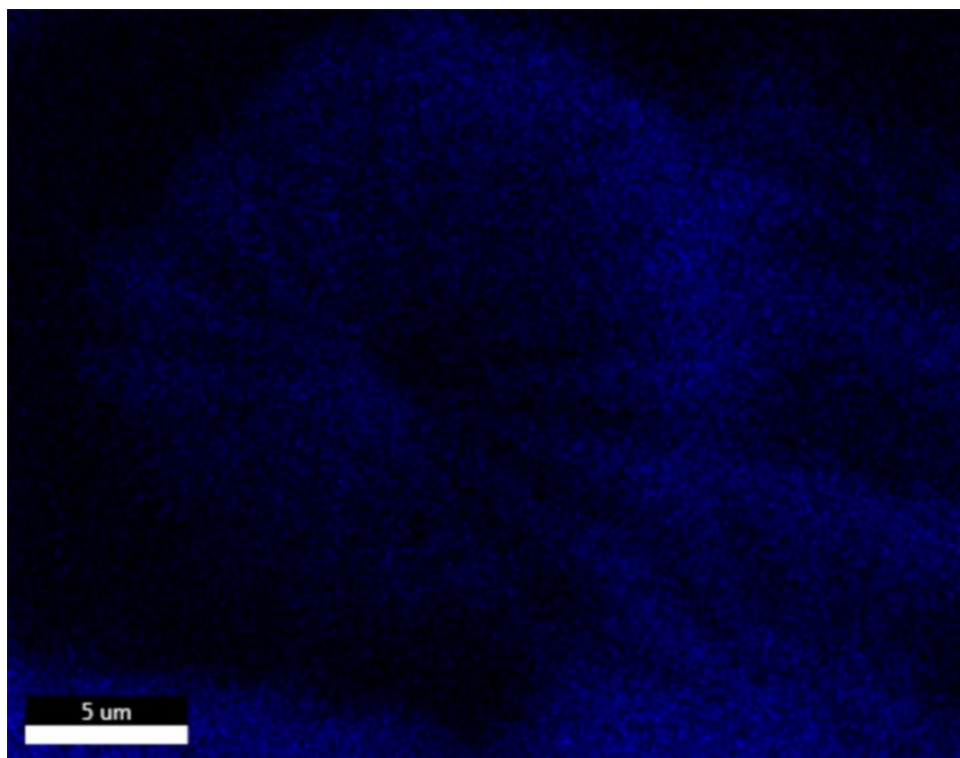
Figura 1-4: Spettri ottenuti con microanalisi EDX di una fibra bicomponente *splittable* nylon-poliestere. Zona analizzata a) poliestere b) poliammide; la seconda si distingue dalla prima per la presenza del picco caratteristico dell'azoto.



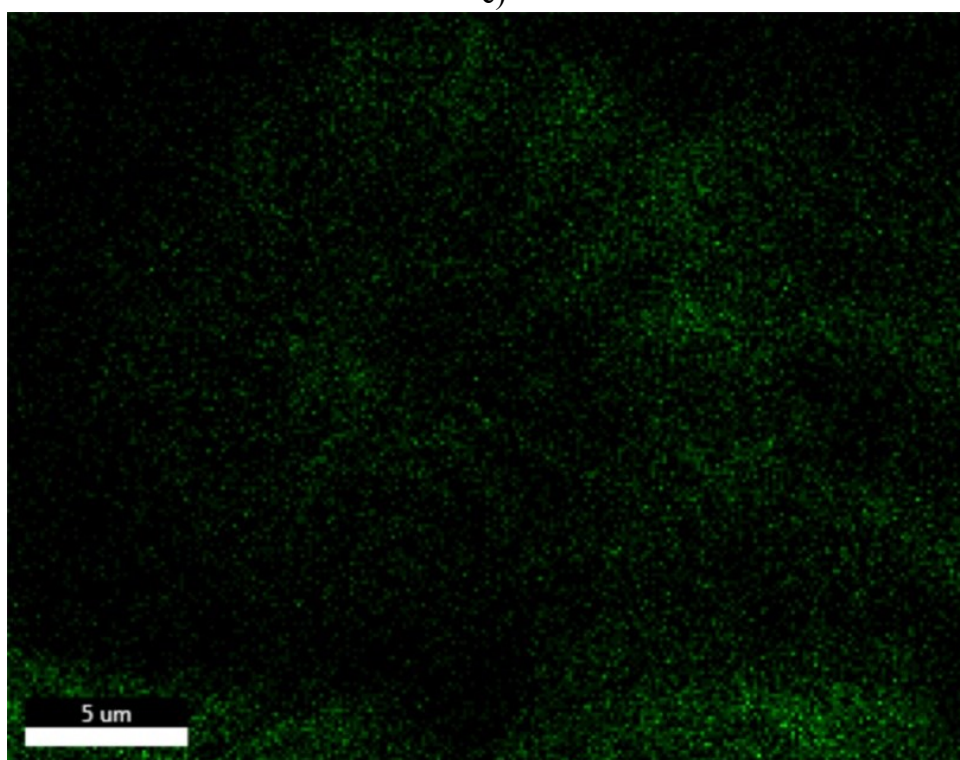
a)



b)



c)



d)

Figura 1-5: Mappe degli elementi contenuti in una fibra bicomponente *splittable* nylon-poliestere ottenuti con microanalisi EDX. Rappresentazione di a) tutti gli elementi e le loro percentuali, b) solo del carbonio, c) solo dell'ossigeno e d) solo dell'azoto.

1.2.2 Proprietà delle fibre

Le proprietà dei TNT sono strettamente connesse a quelle che sono le caratteristiche delle fibre utilizzate. Inoltre, anche il processo produttivo ne è fortemente influenzato. Tra i fattori che descrivono una fibra vi è la lunghezza, la densità lineare, il cretto, la forma della sezione e la finitura.

La lunghezza delle fibre da utilizzare dipende dalla tipologia di linea produttiva e dall'attrezzatura utilizzata per la loro lavorazione. Esistono le fibre in fiocco, con lunghezza tra 2 e 46 cm, utilizzate nei processi di formazione del velo di tipo *dry-laid* e *wet-laid*. I filamenti sono invece fibre con lunghezza indefinita perché prodotte in continuo nel processo *polymer-laid*. Da osservazioni sperimentali o empiriche si è capito che le caratteristiche meccaniche dei TNT non migliorano all'aumentare della lunghezza delle fibre costituenti e che all'aumentare di questa si riduce la velocità di produzione. Fibre troppo lunghe per un determinato processo produttivo risultano in un TNT di bassa qualità [11].

La densità lineare delle fibre, detta anche "titolo", è descritta dalla misura dei denari (den) o dei dtex. Il denaro è il peso in grammi di 9,000 metri di fibra mentre il dtex di 10,000 metri. Data, per esempio, la densità del PES pari a 1.38 g/cm^3 , se si considera una sua fibra a sezione circolare con titolo 1.7 dtex questa ha un diametro di $12.5 \mu\text{m}$, se invece i dtex sono 11.0 il diametro è di $32 \mu\text{m}$. I denari di una fibra dipendono dal diametro della sua sezione e influenzano le *performance* e la mano di un TNT; la scelta di questo parametro è quindi 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 maggior capacità coprente. Titoli elevati sono più facilmente processabili e permettono di ottenere un velo di fibre più uniforme. Per la produzione dei TNT generalmente viene scelta una miscela di fibre di diverso titolo questo per ragioni economiche (le fibre con titolo molto alto o molto basso hanno un costo maggiore), di processabilità e per ottenere buone *performance* per una certa applicazione.

Il cretto è la presenza nella lunghezza della fibra di ondulazioni, torsioni e curve. La sua frequenza (cretti/cm) e la sua forma vengono conferite dal processo produttivo della fibra, se sintetica, mentre esso è già presente in quelle di origine naturale. Non è possibile processare un TNT a partire da fibre completamente rette e più è limitato il cretto, più difficile è la lavorazione della materia prima, viceversa, un cretto maggiore permette di ottenere un TNT con buon volume, uniformità, resilienza e ritorno elastico dopo compressione[12]: inoltre, in fase di formatura del velo un cretto elevato permette di avere una buona coesione tra le fibre.

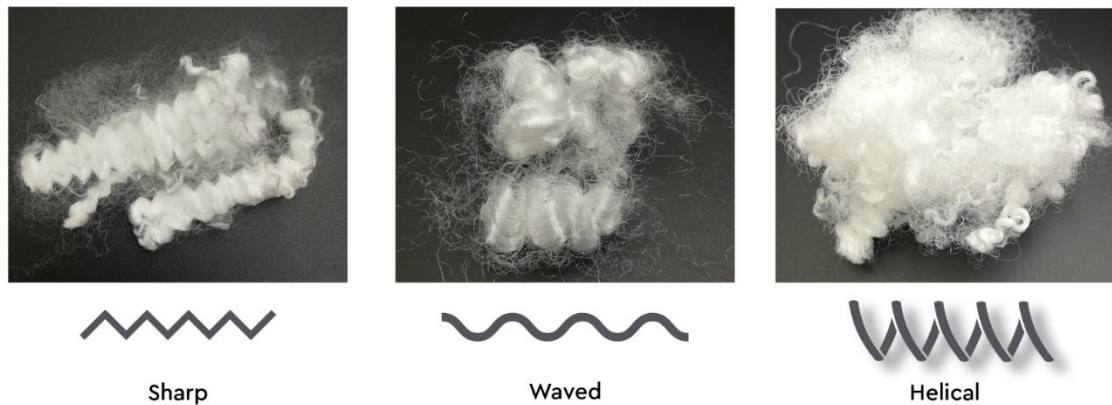


Figura 1-6: Alcuni esempi di fibre caratterizzate da diversa forma del cretto.

Nel mercato sono disponibili, anche per uno stesso materiale, fibre con geometria di sezione diversa. Questa deriva, nelle fibre naturali, dal processo di formazione della cellulosa durante la crescita della pianta, dalla sagoma del follicolo animale o dalla fisionomia dell'orifizio da cui l'insetto estrude il filamento; le fibre sintetiche invece hanno la geometria della sezione che dipende dal profilo degli orifizi di estrusione [13]. La produzione di fibre a sezione particolare ha principalmente lo scopo di ottenere specifici effetti ottici (controllo della luce riflessa e assorbita dalla fibra) che influenzano il prodotto finito di cui sono costituite. Inoltre, se si pensa che ciascuna fibra può essere schematizzata con un modello a trave, la sezione influenza la rigidità della stessa con conseguenze nella *texture* e volume del materiale che le contiene. Tra le forme più comuni quella circolare, ovale, multilobata, triangolare, serrata, a fagiolo, ad osso di cane, cava e quadrata[14]. Alcuni esempi sono riportati nella fig. 1-3. La sagoma della sezione influenza l'aspetto, la *texture* e la mano del tessuto. Di maggior interesse per questa ricerca invece è il rapporto superficie-volume della fibra che aumenta all'aumentare dell'irregolarità della sezione.

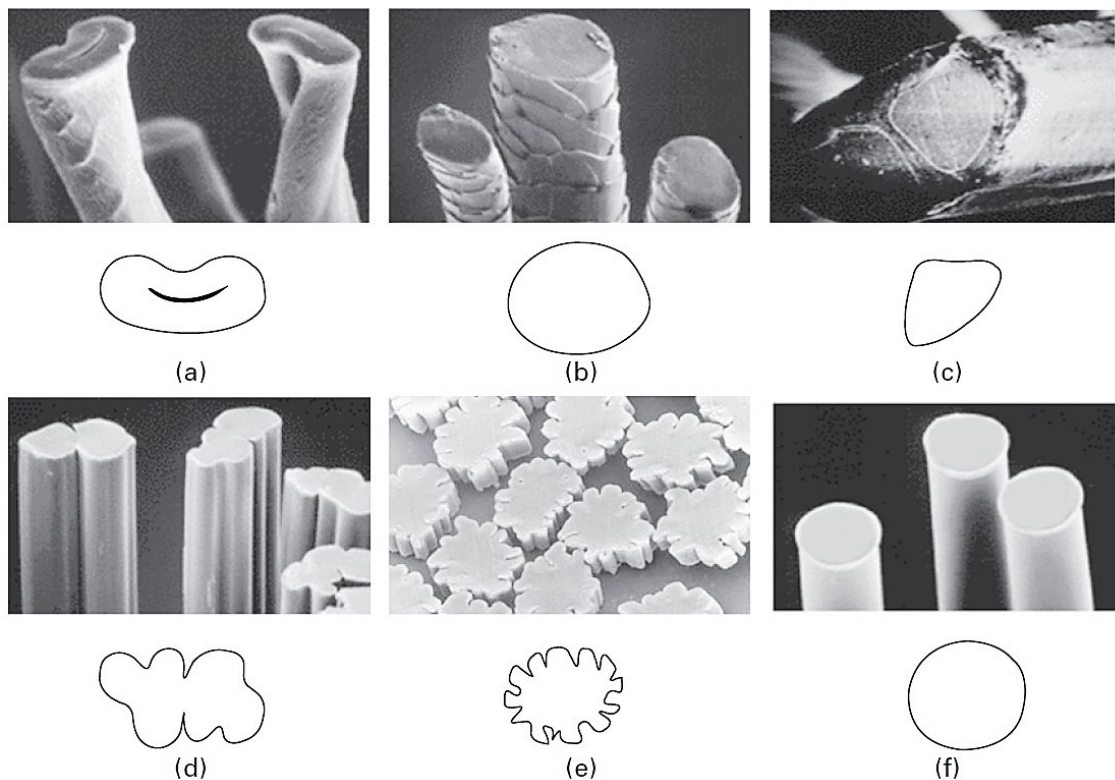


Figura 1-7: sezioni di fibre a geometria diversa. (a) cotone, (b) lana, (c) seta, (d) acetato, (e) rayon e (f) poliolefina.

Per concludere la descrizione di una fibra è inoltre necessario includere l'aspetto dato dalla finitura superficiale; esistono infatti fibre lucide, opache e semi-opache che influenzano direttamente la loro lucentezza e l'aspetto. Sulla superficie delle fibre è inoltre possibile trovare scanalature, irregolarità o conformazione a scaglie.

1.2.3 Agenti leganti

Tra le tecniche di legatura e consolidamento del velo di fibre vi è quella di tipo termico o chimico. Entrambe prevedono l'utilizzo di un agente che costituisca il collante per la formazione del TNT; questo può essere liquido o in forma di fibre, polvere o pasta. La scelta del legante dipende innanzitutto dalle fibre da connettere, infatti vi deve essere un'adeguata compatibilità con l'agente chimico. Il legame che si viene a formare è il risultato di forze di natura fisica o chimica e influenza numerose proprietà del TNT tra cui la resistenza meccanica, la resilienza, la durabilità, resistenza chimica, resistenza al fuoco, idrofobia etc. Tra le tecniche di applicazione del legante vi è lo *spraying*, la distribuzione con spazzole e l'utilizzo di schiumatura.

Le sostanze usate per la termo-legatura sono sostanzialmente polimeri termoplastici. La varietà di composti che invece possono essere utilizzate come agente liquido per la

legatura chimica è molto ampia; tra i polimeri utilizzati a questo scopo i più importanti sono i polimeri e copolimeri vinilici, acrilici, uretanici, elastomerici; sono utilizzate poi le resine termoindurenti e leganti naturali come l'amido, la gomma naturale e proteine rigenerate [9]. L'agente legante più utilizzato è il lattice ovvero una soluzione acquosa di micelle, costituite da molecole di emulsionante, al cui interno sono presenti oligomeri radicalici; il lattice viene disperso tra le fibre del TNT dove viene fatto coagulare per evaporazione dell'acqua. Gli oligomeri radicalici reagiscono dunque con i polimeri che costituiscono le fibre generando legami covalenti e quindi reticolazione che riduce la mobilità delle fibre.

1.3 Metodi di formazione del velo di fibre

La produzione di un TNT inizia con la formazione di un velo costituito da fibre caratterizzato da una bassa resistenza meccanica in quanto non ancora consolidato da alcuna tecnica di legatura. Durante questa prima fase di processo è possibile condizionare alcune caratteristiche del prodotto finito, come la grammatura e l'orientamento delle fibre. Tre sono le tecniche utilizzate per formare un velo di fibre: *dry-laid*, *wet-laid* e *polymer-laid*. Considerando che i campioni analizzati durante questo lavoro di ricerca sono stati ottenuti con il metodo *dry-laid*, questo verrà discusso più nel dettaglio.

1.3.1 Tecnica *dry-laid*

Il metodo *dry-laid* per la formazione del velo di fibre prevede l'utilizzo di fibre in fiocco naturali o sintetiche, con titolo 1-300 dtex e lunghezza media 15-250 mm [9]. L'unico limite all'utilizzo di questa tecnica è la compatibilità fibra-carda². Questo processo avviene interamente a secco e consiste in tre fasi principali: la preparazione delle fibre, la cardatura e la stesura del velo di carda.

Quando la miscela di fibre è stata selezionata questa viene miscelata e omogenizzata grazie a sistemi pneumatici, box di miscelazione e altri sistemi che possono anche pulire la materia prima dalla presenza di sostanze estranee. La successiva fase è la cardatura, tra le più importanti del processo produttivo dei TNT. Questa operazione consiste nel miscelare ulteriormente e districare le ciocche di fibra separandole; le fibre sono quindi allineate lungo la direzione della macchina e disposte a formare uno o due leggeri strati di fibre detti "veli di carda". Il macchinario che svolge questa operazione è la cardatrice, costituita da un tamburo centrale attorno al quale sono presenti cilindri di diametro inferiore, disposti a coppie ed artefici del processo macchina (Fig. 1-4). Le caratteristiche

² Carda: macchinario utilizzato nell'industria tessile per lavorare le fibre in fiocco; queste vengono pettinate ed allineate.

geometriche della serie di rulli con guarnizione dentata (scardassi) presenti nella cardatrice, assieme ad altri parametri di lavoro, determinano quali tipi di fibre (materiale, cretto, titolo e lunghezza) possono essere trattate. Il processo di cardatura comincia con l'alimentazione della macchina per mezzo del cilindro convogliatore, con diametro maggiore, che trasporta la fibra sul tamburo fino al cilindro scaricatore, dal quale viene distaccato il velo di carda. Il principio alla base della cardatura è l'alternanza di un'operazione di lavorazione (“*working*”) e di una di spogliatura (“*stripping*”).

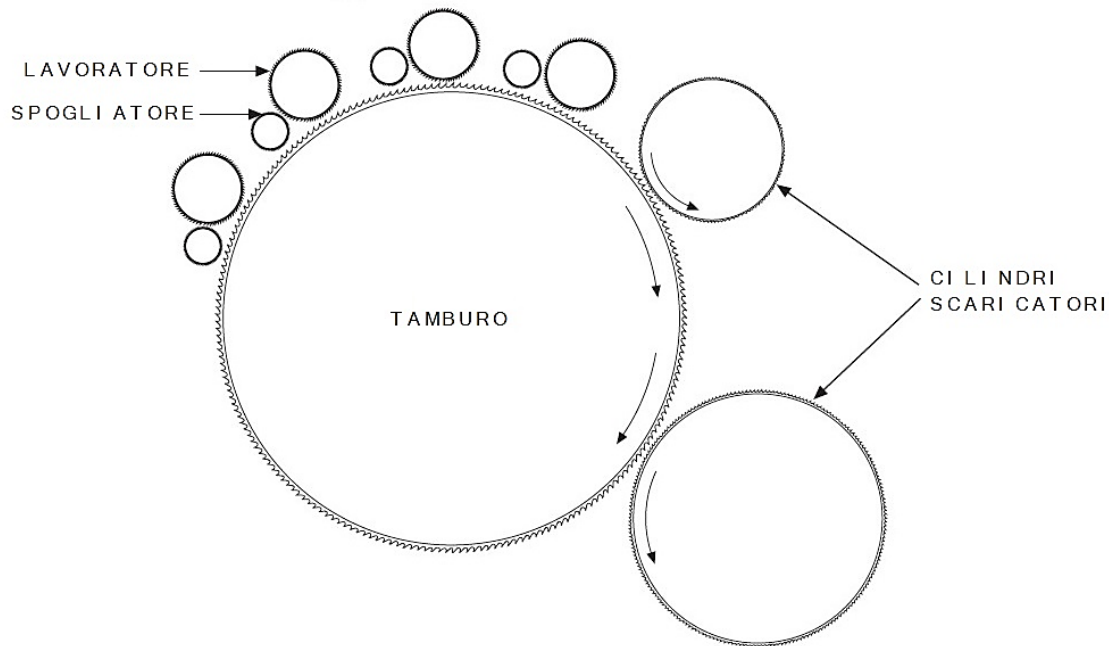


Figura 1-8: disposizione dei cilindri all'interno di una cardatrice

Il tamburo ha la velocità rotativa maggiore tra i cilindri e distribuisce le fibre; i cilindri lavoratori e spogliatori hanno invece una velocità inferiore e la duplice funzione di cardatura e miscelazione. Parte della fibra trasportata dal tamburo viene prelevata dai denti del cilindro lavoratore che ruota in senso contrario rispetto al cilindro principale ma con medesimo verso della velocità tangenziale. La fibra in lavorazione è quindi intrappolata dai denti del cilindro lavoratore che, ruotando più lentamente del tamburo, ha un effetto pettinante e districante. Le fibre attaccate ai denti del cilindro lavoratore vengono poi restituite al tamburo grazie al cilindro spogliatore. [9][15] Attraverso la successione di diverse coppie lavoratore-spogliatore le fibre vengono separate dai ciuffi, allineate e distribuite uniformemente a formare un velo che fuoriesce dall'impianto.

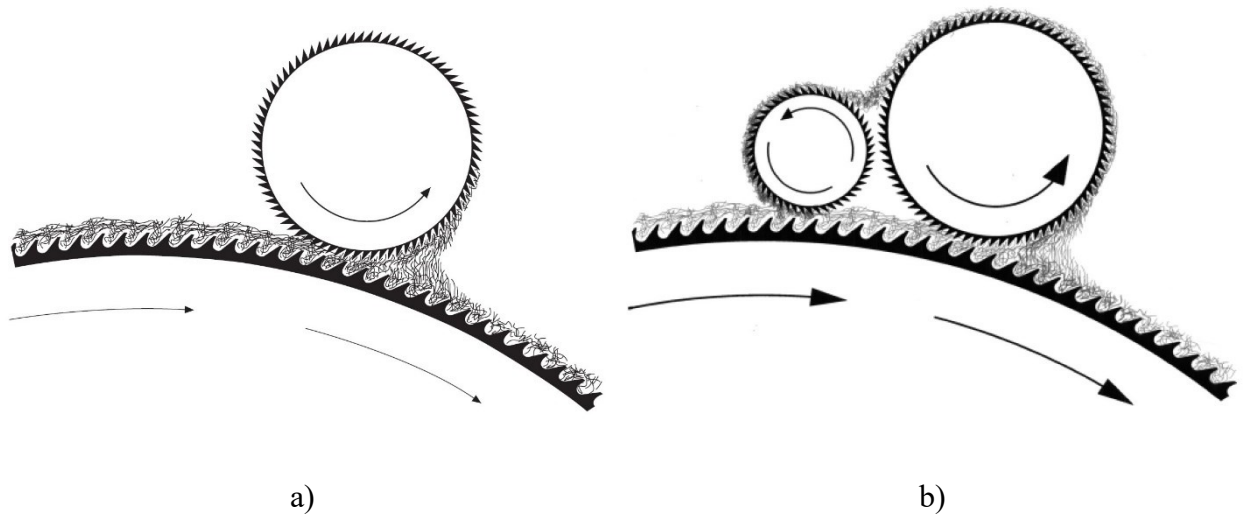


Figura 1-9: a) passaggio delle fibre dal tamburo al cilindro lavoratore b) trasporto delle fibre tra i cilindri tamburo-lavoratore-spogliatore

Il velo di carda è molto sottile e fragile e viene utilizzato per la successiva fase di formazione di un “materassino” di fibre. Questo può essere realizzato con tecnica *parallel-laid*, *cross-laid* o *randomly-laid (air-laid)*. Per il *parallel laid* sono necessarie diverse cardatrici poste in linea dove ognuna deposita il proprio velo di fibre su di uno stesso nastro trasportatore creando una disposizione multistrato. Le principali caratteristiche del materassino ottenuto sono una larghezza massima pari a quella delle cardatrici (minore di 5m, solitamente 2.5m), spessore (grammatura) limitato ad un massimo di 12 starti per ragioni economiche (dato dal numero elevato di cardatrici necessario) e l’orientamento preferenziale delle fibre dovuto alla cardatura, che si riflette su una resistenza meccanica anisotropa sei volte maggiore nella lunghezza rispetto della larghezza. [11] La tecnica *cross-laid* prevede diversamente che la cardatrice (o le cardatrici) sia disposta perpendicolarmente alla direzione della linea. Il velo di fibre entra nel faldatore, macchinario che si muove trasversalmente al nastro trasportatore principale disponendo il velo a zig-zag. A differenza del metodo *parallel-laid* quello *cross-laid* permette di ottenere materassini di larghezza maggiore della dimensione della cardatrice ed è possibile ottenere spessori (grammature) anche molto elevati rallentando il nastro trasportatore principale permettendo una maggior stratificazione di veli. Inoltre, il movimento a zig-zag dato dal faldatore influenza la direzione delle fibre che può essere quindi controllata variando l’angolo di disposizione dei veli di carda. In questo modo il rapporto della resistenza meccanica nella direzione di linea e ad essa trasversale può essere controllato ottenendo una maggior capacità del TNT finito di recuperare le deformazioni[16]. Un’alternativa ai due metodi appena descritti è quello *randomly-laid (air-laid)*, in questo caso le fibre in uscita dalla cardatrice vengono trasportate da un

sistema pneumatico che poi le dispone a formare un materassino. Peculiarità di questa tecnica sono in primo luogo la possibilità di ottenere una gamma di spessori molto ampia (è l'unico metodo che permette di ottenere TNT con grammatura molto bassa), in secondo luogo l'isotropia delle proprietà meccaniche grazie ad un orientamento aleatorio delle fibre ed infine una minor lavorazione e quantità di legante richieste dal materassino per essere consolidato [16].

1.3.2 *Tecnica wet-laid*

La tecnica *wet-laid* trova origine nel processo produttivo dell'industria cartaria. Questo è stato riadattato per produrre TNT e prevede quindi l'utilizzo di fibre in fiocco disperse in un liquido (solitamente acqua). La soluzione è quindi filtrata a formare il materassino di fibre che è quindi asciugato dal liquido rimanente. Le peculiarità del metodo *wet-laid* sono l'orientamento delle fibre che è aleatorio e il basso costo per produzioni in larga scala. Con questa tecnica si producono quindi TNT con durabilità limitata come fazzoletti, tovaglioli, grembiuli, guanti, garze etc.

1.3.3 *Tecnica polymer-laid*

La tecnica *polymer-laid* utilizza fibre in filamento e può essere del tipo *spun-laid* o *spun-melt*. Nel primo caso una soluzione fusa del polimero è estrusa e viene depositata su di un supporto da un flusso di aria ad elevata velocità. L'orientamento dei filamenti che formano il TNT può essere quindi controllato a seconda della direzione del flusso. Con questo metodo si ottengono prodotti finiti con bassa porosità e buone caratteristiche meccaniche adatti alla realizzazione, per esempio, di filtri, indumenti protettivi e tessuti geotessili. La tecnica *spun-melt* si differenzia da quella *spun-laid* perché i getti di aria utilizzati sono più forti e causano quindi la rottura dei filamenti durante la disposizione sul supporto.

1.4 Tecniche di interlacciatura

Il materassino di fibre ottenuto con una delle tecniche descritte precedentemente necessita di una o più operazioni volte a consolidarne la struttura. Le tecniche di interlacciatura hanno questo scopo. Queste, inoltre, permettono di controllare le caratteristiche del TNT: le proprietà meccaniche, la porosità, lo spessore etc. L'interlacciatura può avvenire con metodo meccanico, termico, chimico o attraverso un processo combinato di questi. Le tecniche disponibili e le loro declinazioni sono numerose, quindi nei seguenti sotto capitoli ci si concentrerà su quelle più utilizzate, dando maggiore spazio a quelle adoperate per realizzare i TNT oggetto delle analisi termoacustiche.

1.4.1 Interlacciatura meccanica

Con il termine interlacciatura meccanica si intende il consolidamento del materassino di fibre tramite agugliatura, cucitura o con l'utilizzo di idrogetti.

Nel processo di agugliatura (*needlepunching*) le fibre sono interlacciate dal movimento reciproco di aghi con barbe. Centinaia di questi sono fissati ad una tavola che oscilla verticalmente tra altre due fisse che sono forate in corrispondenza della posizione degli aghi e tra cui è alimentato il tessuto in lavorazione. L'agugliatura è utilizzata per consolidare materassini ottenuti con le tecniche *dry-laid* e *polymer-laid*. Gli aghi, attraversando lo strato di fibre, trasportano alcune di queste attraverso il materiale dove poi rimangono. La sezione degli aghi è solitamente triangolare e ci sono tre barbe su ogni faccia disposte a diversa distanza. Alcune agugliatrici presentano due diverse tavole di aghi, una che lavora il materiale da sopra, l'altra da sotto. 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 TNT, anche se il fenomeno tende ad un valore limite oltre al quale si ha la diminuzione delle proprietà meccaniche del manufatto[11].

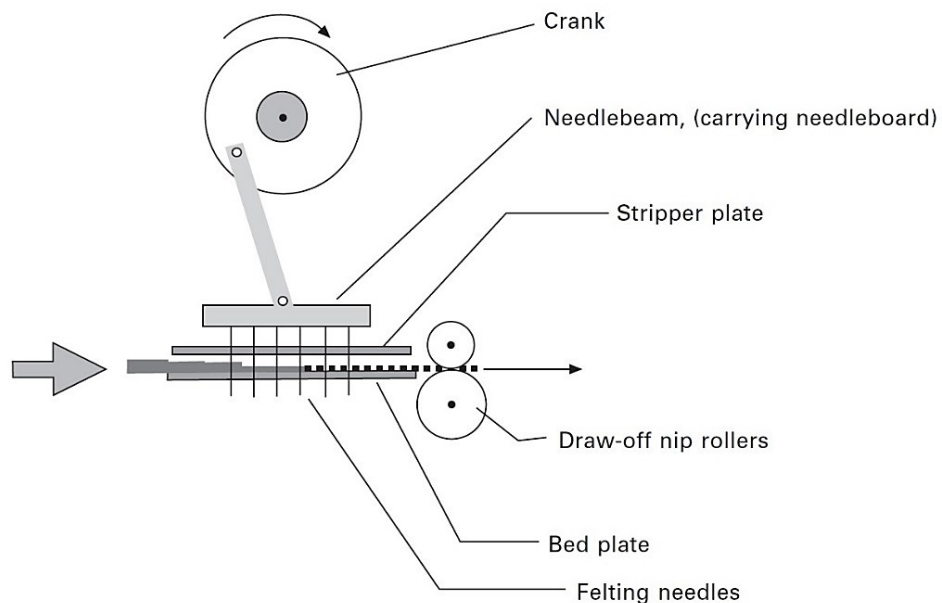


Figura 1-10: schema di funzionamento di un'agugliatrice

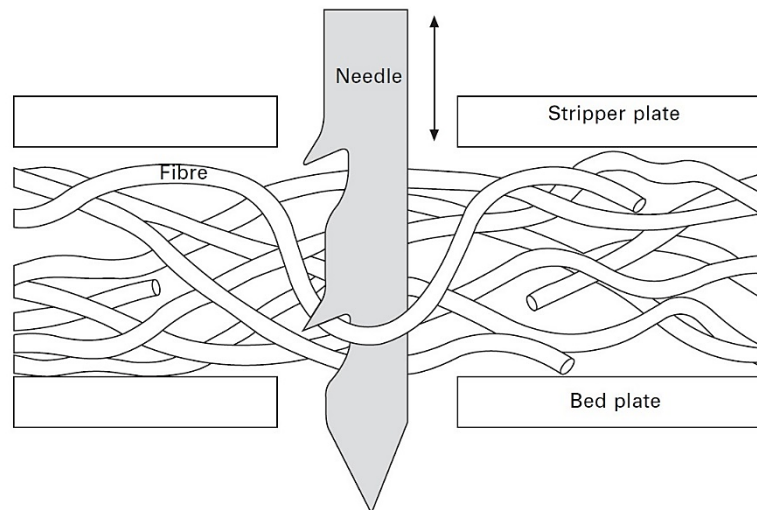


Figura 1-11: Azione di un ago con barbe.

Il processo di cucitura (*stitching*) è applicato principalmente su fibre disposte con metodo *cross-laid* che vengono legate attraverso serie di punti macchina. Il materiale così ottenuto soffre di usura che determina nel tempo la perdita di fibre dal materiale, ciò può essere limitato attraverso leggera agugliatura o andando ad interlacciare il TNT con anche altre tecniche. Tra i parametri su cui è possibile lavorare vi è la tensione dei fili di cucitura e la larghezza dei punti.

L'interlacciatura per mezzo di idrogetti (*hydroentanglement* o *spunlacing*) consiste nel legare fibre corte o filamenti sfruttando l'azione di potenti getti d'acqua che le spostano e le riarrangiano. Più ugelli spruzzano sul TNT e l'acqua è parzialmente rimossa da un sistema a vuoto al di sotto di un nastro poroso che supporta il materiale in lavorazione. L'azione dell'acqua sulle fibre è sia in corrispondenza dell'idrogetto che nella zona ad esso circostante, in cui il fluido penetrato nel materiale si muove con moto turbolento. Questa tecnica non permette sempre di ottenere un prodotto completamente consolidato ed è per questo spesso combinata ad altre operazioni di interlacciatura. Vantaggi di questo metodo sono invece l'ottenimento di una buona omogeneità, uniformità e mano del materiale. (Fig. 1-8).

1.4.2 Interlacciatura termica

La legatura termica è efficace nel consolidare qualsiasi materassino di fibre e spesso è accoppiata con altre tecniche. Condizione necessaria per il processo è che nel materiale sia contenuto un agente che, attraverso riscaldamento e successivo raffreddamento, funga da legante. L'agente legante è un polimero termoplastico nella forma di fibra, polvere, film o presente come mantello di fibre bicomponente. Il materassino di fibre viene riscaldato ad una temperatura che rende viscoso o che fonde l'agente legante. Il polimero

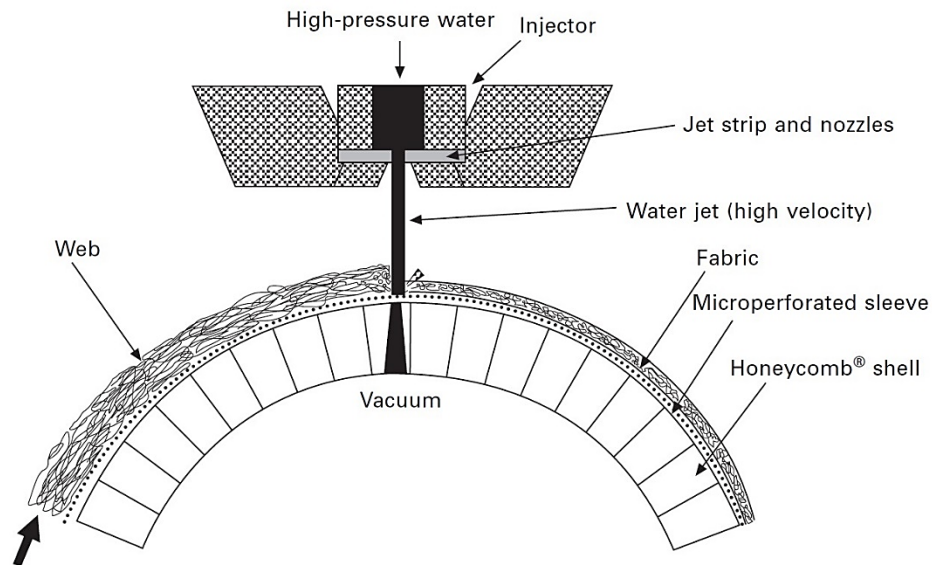


Figura 1-12: Schema del processo di interlacciatura per mezzo di idrogetti.

fluisce sottoposto a forze capillari e superficiali verso i punti di contatto tra le varie fibre dove va a costituire punti di fissaggio. Questi ultimi vengono solidificati dal successivo raffreddamento del manufatto. Nell'interlacciatura termica non avvengono dunque reazioni chimiche ma l'ancoraggio delle fibre è di natura adesiva o meccanica. La percentuale in peso di agente legante è variabile e normalmente compresa nel range 5-50% a seconda delle caratteristiche richieste dal TNT finito. Il polimero legante ha una T_m significativamente più bassa delle fibre alla base del tessuto, ciò per prevenire la loro degradazione termica. L'utilizzo di polvere prevede che essa sia distribuita sul materassino di fibre, questo metodo è dunque limitato dalla difficoltà di ottenere particelle di polimero sufficientemente piccole per penetrare uniformemente nel materiale. Le polveri sono dunque utilizzate su TNT di spessore limitato e struttura molto aperta. Migliori risultati sono ottenibili con l'utilizzo delle fibre bicomponenti, il quale mantello è costituito dall'agente legante che fonde lasciando inalterato il cuore. Con queste fibre è possibile consolidare efficacemente e uniformemente anche elevati spessori lasciando la struttura fibrosa sostanzialmente inalterata.

L'interlacciatura termica è ampiamente utilizzata in quanto permette elevate produzioni e una riduzione dei consumi energetici rispetto la legatura chimica. Questo perché non è necessario evaporare acqua durante il consolidamento. Inoltre, è possibile ottenere TNT con caratteristiche molto variabili, i materassini voluminosi sono legati uniformemente ed è possibile ottenere prodotti finiti completamente riciclabili. [9][15]

1.4.3 Interlacciatura chimica

L'interlacciatura chimica prevede l'utilizzo di un agente che costituisca la "colla" per la formazione del TNT e che è quindi capace di formare legami chimici con il substrato da consolidare. Questa tecnica è molto diffusa per l'ampia varietà di sostanze che possono essere utilizzate come elemento adesivo, per la durabilità dei prodotti che si ottengono e per la possibilità di ingegnerizzare i TNT per la loro applicazione. La scelta dell'agente legante è di cruciale importanza perché questo influenza numerose proprietà del prodotto finito e permette di aggiungervi specifiche funzionalità. Esso, infatti, può essere miscelato con altri composti come ritardanti di fiamma, ceramici, metalli etc. Alcuni fattori che sono condizionati dal tipo di legante sono la resistenza meccanica, la resilienza, la durabilità, resistenza chimica, resistenza al fuoco, idrofobia e le caratteristiche superficiali del TNT. Materiali legati termicamente o meccanicamente sono spesso soggetti ad una seconda legatura chimica che permette di modificarne le proprietà e l'aspetto.

Gli agenti leganti si presentano in forma di fibre, polvere, pasta o liquidi. Nell'ultimo caso possono essere disciolti in un solvente (spesso acqua) o dispersi in un'emulsione. I principali composti chimici utilizzati sono presentati nel sotto capitolo 1.2.2 e tra loro i più utilizzati sono i lattici, dispersioni di particelle molto piccole in acqua, dette micelle. Queste miscele hanno una viscosità simile a quella dell'acqua che permette una loro rapida ed efficace penetrazione anche nei materassini di fibre più densi e spessi. I leganti, dopo la loro applicazione, migrano all'interno del tessuto mossi da forze superficiali e capillari. Per evaporazione poi questi coagulano soprattutto nei punti di contatto tra le varie fibre dove gli oligomeri radicalici, contenuti nelle micelle, reticolano la struttura fibrosa andando a consolidarla.

Tipicamente la quantità di legante che viene applicato è pari al 5-15% del peso del peso a secco del materiale fibroso. La distribuzione del composto chimico può essere controllata per incontrare le richieste del prodotto finito, ad esempio applicandolo solo in alcune aree o creando una variazione della sua concentrazione lungo lo spessore del TNT. [9][15]

Tra le tecniche di applicazione del legante liquido vi è la saturazione, la schiumatura, lo *spraying* (resinatura) e il *print bonding*.

L'uso del metodo di saturazione prevede la completa immersione del materassino di fibre in una vasca di legante e successiva rullatura per eliminarne la quantità in eccesso. Questo permette un elevato e uniforme consolidamento della struttura del TNT che può assumere quindi rigidità elevate.

L'applicazione dell'agente legante tramite schiumatura ha il vantaggio di accelerare la fase di asciugatura del TNT. L'adesivo è infatti miscelato con aria e non solo con acqua.

La tecnica dello *spraying* o resinatura permette un controllo accurato della quantità di agente legante che viene distribuito ad una faccia del TNT dopo essere stato nebulizzato da ugelli; è inoltre possibile applicarlo ad entrambe le superfici del materassino di fibre dopo asciugatura e un'operazione di capovolgimento. Tra gli svantaggi il poco controllo dell'uniformità del legante lungo lo spessore del materiale e il suo limitato potere penetrante.

Con il *print bonding* l'adesivo è distribuito solo in determinate zone; questa tecnica è di solito richiesta per ottenere un materiale con buone proprietà meccaniche e con aree a maggior permeabilità per permettere l'assorbimento o il passaggio di un fluido.

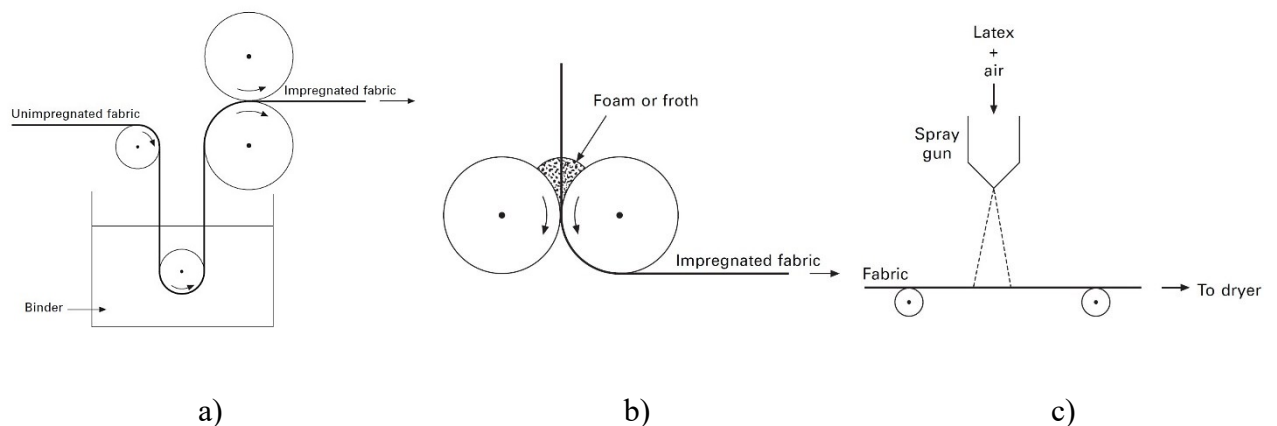


Figura 1-13: Interlacciatura chimica, distribuzione del legante per a) immersione, b) schiumatura e c) *spraying*.

1.5 Operazioni di finitura

La finitura di un TNT è di fondamentale importanza perché vi aggiunge valore, funzionalità tecniche e ne migliora l'apparenza e le caratteristiche per la sua applicazione specifica. Non è presente, infatti, una sequenza di operazioni standard ma questa è determinata dalle specifiche proprietà che sono richieste dal prodotto finito. Le operazioni di finitura sono innumerevoli e vengono classificate in processi a secco, a umido e di laminazione. Fanno parte dei processi a umido i lavaggi, l'impregnazione con agenti chimici, la tintura, lo stampaggio e l'applicazione di *coating*. Tra i processi a secco alcuni esempi sono la calandratura, la rimozione di distorsioni, la compattazione, lisciatura, lo stampaggio, il taglio e la calibrazione. È quindi possibile ottenere TNT con innumerevoli proprietà, ne sono esempio le finiture idrorepellenti, antimacchia, ritardanti di fiamma, antistatiche, oleo fobiche, autopulenti, antibatterica, stabilizzanti agli UV etc. [15][16] Considerata la numerosità dei trattamenti disponibili vengono brevemente descritti solo quelli applicati ai campioni che vengono analizzati in questo studio.

La laminazione è la giunzione di due o più TNT o di un TNT con altri materiali quali *film*, tessuti e altri supporti. Lo scopo di questa operazione è solitamente quello di modificare le proprietà barriera del TNT, quelle acustiche, la sua permeabilità, la conducibilità termica, la natura della superficie, la stabilità dimensionale o altre caratteristiche meccaniche. L'accoppiamento di diversi materiali permette di ottenere proprietà uniche non ottenibili con un singolo tessuto. [16] Per ottenere un laminato è necessario che uno o entrambi i materiali da accoppiare abbiano proprietà adesive, in alternativa un mezzo legante deve essere interposto ai diversi strati. Il consolidamento della struttura avviene per applicazione di calore e pressione. [9] La laminazione può avvenire a secco o ad umido. Quella ad umido utilizza sostanze adesive disperse o dissolte in un solvente; queste vengono distribuite sulle superfici da unire e vengono attivate in seguito all'evaporazione del solvente e il riscaldamento. Solitamente la giunzione ad umido avviene in macchine ad aria calda in cui sono presenti rulli o tappeti volti a comprimere i materiali. La laminazione a secco invece utilizza leganti polimerici termoplastici che sono applicati nell'interfaccia dei tessuti da unire e che consolidano il materiale quando vengono riscaldati fino ad uno stadio di rammollimento o fusione; il riscaldamento del materiale avviene tipicamente per calandratura o utilizzo di tappeti o piatti caldi. [15] È infine possibile ottenere l'accoppiamento del composito con l'utilizzo delle tecniche di interlacciatura per agugliatura, con l'ausilio di idrogetti e per cucitura. I TNT laminati sono sempre più richiesti per le applicazioni tecniche come per il settore medico, dell'*automotive*, dell'edilizia e della filtrazione [16].

La lisciatura è un'operazione meccanica che permette di ottenere un prodotto finito calibrato, con una superficie liscia, più resistente alla delaminazione e con meno porosità superficiale di un TNT non trattato. Questo si realizza facendo passare il materiale, ad esempio, attraverso due tappeti caldi che lo comprimono e poi lo raffreddano. Il processo inoltre può essere utilizzato contemporaneamente per aggiungere un *layer* (laminare) o per consolidare il TNT facendo reagire composti leganti come agenti chimici termoattivati o fibre bicomponente.

1.6 L'azienda: **O.R.V. Manufacturing**

L'azienda O.R.V. Manufacturing è un'azienda italiana con settanta anni di esperienza specializzata nella produzione di tessuto non tessuto, ovatte e feltri principalmente in poliestere. O.R.V. fa parte del Gruppo I.M.P. che ha sedi in Italia, Polonia, Romania e Brasile. L'azienda O.R.V. Manufacturing vanta di 180 dipendenti ed ha due stabilimenti, uno a Carmignano di Brenta (PD) e l'altro a Grantorto (PD) in cui vengono realizzati più di 10,000 tonnellate di prodotto finito. O.R.V. è certificata ISO 9001:2015: tutti i processi

produttivi sono gestiti secondo procedure codificate che garantiscono prodotti finiti di alta qualità e con elevate prestazioni. Il gruppo di ricerca e sviluppo si inserisce in quest'ottica e ha come obiettivo il continuo miglioramento e innovazione dei prodotti e una risposta dinamica al mercato in continua evoluzione.

Tra le tecnologie utilizzate da O.R.V. Manufacturing vi è l'interlacciatura meccanica, chimica, termica e tramite idrogetti. I TNT possono poi essere arricchiti da supporti e trattati con sostanze ritardanti di fiamma, idro-olio-diesel fobici, antistatiche, etc.

Tra i settori applicativi dei prodotti O.R.V.:

- Abbigliamento: imbottiture per garantire leggerezza, traspirabilità, resilienza e coibenza superiori per far fronte alle condizioni climatiche più estreme;
- Arredamento: imbottiture in ovatte in grado di sostenere il peso, garantendo ad ogni seduta traspirabilità, resilienza e morbidezza;
- Filtrazione: medie filtranti testate secondo le normative europee più restrittive, garantiscono affidabilità, qualità e sicurezza superiori, abbattendo i contaminanti;
- Automotive: O.R.V. è partner storico delle principali aziende automobilistiche italiane ed estere per le quali vengono prodotti rivestimenti per garantire il massimo del comfort all'interno dell'abitacolo, isolamento termico e acustico;
- Edilizia: pannelli per l'isolamento termoacustico e impermeabilizzanti per garantire condizioni abitative più confortevoli;
- Coagulazione e spalmatura: tessuti-non tessuti agugliati ed interlacciati ad acqua ideali come base per coagulazione e spalmatura (PU, PVC).

Tra i punti di forza dell'azienda vi è l'approccio *green*, che prevede il recupero e la rigenerazione degli scarti tessili e parallelamente la produzione di fibra in poliestere utilizzando la scaglia ottenuta da bottiglie in PET.

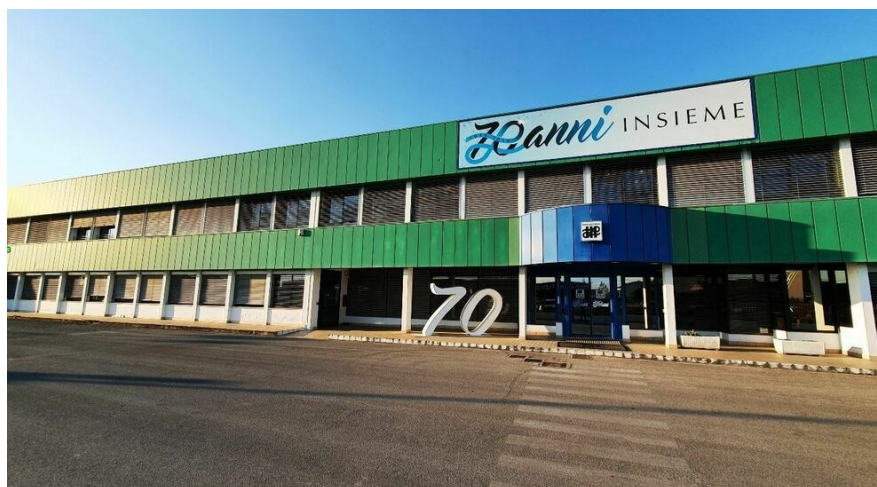


Figura 1-14: L'azienda O.R.V. Manufacturing

Capitolo 2

L'assorbimento acustico dei tessuti-non tessuti

Il secondo capitolo di questo elaborato verte sull'acustica ed in particolare sull'utilizzo di tessuti non tessuti come assorbitori di suoni e rumori. Si spiegano inizialmente i concetti alla base della propagazione del suono, l'origine della sensazione uditiva e l'effetto del cambio di mezzo sulla propagazione dell'onda acustica. In particolare, ci si sofferma sui concetti teorici dell'assorbimento acustico e del calcolo del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale. Successivamente si trattano concisamente i principali meccanismi e sistemi che possono essere usati per modulare il rumore. In particolare, sono presentati i principi che spiegano come i materiali porosi, di cui i TNT fanno parte, riescono ad interagire con le onde sonore ed attenuarle. Successivamente è descritta brevemente l'importanza del controllo dell'acustica degli ambienti e come i TNT possono essere impiegati a questo scopo. Infine, vengono esaminati i fattori che influenzano le proprietà acustiche dei TNT attraverso una revisione della letteratura.

2.1 Basi di acustica applicata

È essenziale, per affrontare un problema di controllo del suono, conoscere e capire i concetti che stanno alla base della natura e propagazione delle onde acustiche.

L'acustica è quella parte della fisica che studia la generazione e la propagazione del suono e di effetti quali la riflessione, rifrazione, assorbimento, diffrazione e interferenza. Il suono è il moto vibratorio (perturbazione) di molecole spostate in un mezzo elastico quale un gas, un liquido o un solido. È un fenomeno ondulatorio generato dalla locale compressione di un mezzo, quale l'aria, seguito da una fase di rarefazione; le molecole dell'aria, essendo un vettore elastico, tendono a tornare nella loro posizione originale permettendo la propagazione delle onde di pressione. Il suono quindi si diffonde sottoforma di onde meccaniche necessitando di un mezzo per propagarsi; queste sono di tipo longitudinale perché le particelle vengono spostate temporaneamente in direzione parallela a quella di avanzamento della perturbazione. Le onde acustiche quindi

trasportano energia attraverso successivi cambi di pressione del mezzo corrispondenti a compressioni e rarefazioni delle molecole che lo compongono. [17][18][19][20]

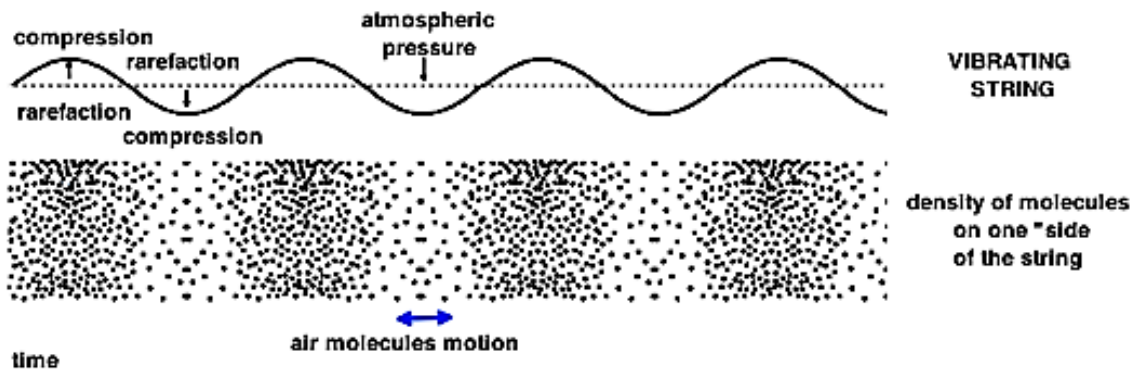


Figura 2-1: Compressioni e rarefazioni delle particelle del mezzo come origine della propagazione di onde sonore.

La variazione dinamica della pressione $p(t)$ per un tono puro ³è un'onda sinusoidale e può essere descritta dall'equazione

$$p(t) = p_o \sin(2\pi f)t \quad (2.1)$$

dove

p = pressione sonora, è lo scostamento della pressione attorno al suo valore di equilibrio che generalmente è rappresentato dalla pressione atmosferica (N/m^2)

p_o = massima ampiezza dell'onda di pressione (N/m^2)

f = frequenza, numero di volte che l'onda si ripete nell'unità di tempo (Hz)

t = tempo (s). [21]

L'ordine di grandezza della pressione sonora varia tra 1 e $10e^{-5}$ Pa. Quella generata da un martello pneumatico che dista 1 m è di 2 Pa, quella di un'automobile è tra $2e^{-2}$ e $2e^{-1}$, mentre la pressione sonora del parlato a 1 m è tra $2e^{-3}$ e $2e^{-2}$ e quella legata al suono del respiro di $6e^{-5}$. [22]

È bene ricordare poi che il reciproco della frequenza è una quantità detta periodo (T)

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

dove

T = periodo (s)

e che esiste un'importante relazione tra frequenza e velocità del suono (c)

$$c = \lambda f \quad (2.3)$$

dove

³ un suono si dice puro quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico o sinusoidale.

λ = lunghezza d'onda, la distanza lineare tra due picchi di pressione p_o (m)

c = velocità del suono nell'aria (m/s), che in condizioni standard è pari a 331.5 m/s. [23]

Il confronto tra le lunghezze d'onda del suono ed il cammino libero medio delle molecole d'aria, che è di $0.066\mu\text{m}$ in condizioni standard, permette di capire che le molecole d'aria compiono uno spostamento molto piccolo prima di collidere con un'altra molecola. Sono queste collisioni, e non il movimento complessivo dell'aria, a trasferire l'energia dell'onda sonora [23].

Un'altra variabile importante per caratterizzare un'onda è il numero d'onda (k_o) la cui unità di misura è il m^{-1} , il cui valore è solitamente un numero complesso e la cui espressione è

$$k_o = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.4)$$

Nella realtà la maggior parte dei casi i suoni non sono puri (periodici) ma possono essere anche impulsivi, a banda larga o combinazione di questi. È possibile dimostrare matematicamente che le variazioni di pressione possono essere in ogni caso descritte dalla somma (teoricamente anche infinita) di due o più onde sinusoidali, equazione che è una forma delle serie di Fourier [17].

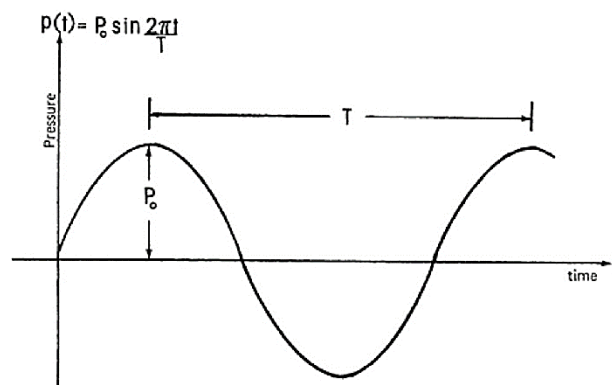


Figura 2-2: rappresentazione grafica di un'onda sinusoidale.

Si definiscono poi:

- W = potenza sonora, detta anche indice di emissione di energia acustica, che è l'energia sonora emessa da una sorgente nell'unità di tempo (W);
- I = intensità del suono, che è il flusso di potenza che passa nell'unità di tempo, attraverso una superficie unitaria e che percorre la direzione di propagazione (W/m^2). [24]

Il range di pressione sonora di interesse per l'udito umano ricopre dieci ordini di grandezza ed è quindi condensato dal concetto di livello sonoro, una scala logaritmica, che è definito:

$$L = 10 \log \left[\frac{p(t)}{p_{ref}} \right]^2 \quad (2.5)$$

dove

L = livello sonoro (dB)

p_{ref} = pressione sonora di riferimento, standardizzata a $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

2.1.1 Sensazione sonora

Il suono è la sensazione prodotta dall'interazione tra l'orecchio umano e le vibrazioni meccaniche dell'onda di pressione. Lo spettro delle frequenze udibili è compreso tra 20 e 20,000 Hz. Onde sonore con frequenza inferiore sono dette infrasoniche, se hanno frequenza maggiore sono dette ultrasoniche. L'orecchio umano ha la sensibilità massima nel range 3000-6000 Hz mentre le frequenze importanti per l'intellegibilità del parlato sono nel range 500-2050 Hz. [23]

Come è stato detto nel sotto capitolo 2.1, i suoni percepiti nella realtà sono molto complessi e costituiti da più frequenze. Solitamente lo spettro sonoro udibile viene suddiviso in bande raggruppando le frequenze in intervalli $[f_i, f_s]$ di:

- 1/1 ottava se $f_s = 2 \cdot f_i$
- 1/3 ottava se $f_s = 2^{1/3} f_i$

Le bande di ottava suddividono la gamma di frequenze udibili in 8 intervalli non sovrapposti centrati sulle frequenze: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Mentre quella dei terzi di banda di ottava è una suddivisione più fine in 24 intervalli non sovrapposti centrati sulle frequenze: 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000 Hz.

Il rumore è un suono indesiderato che disturba, provoca fastidio e danni alla salute. Ad esempio, il DPCM 5.12.97 classifica gli ambienti abitativi e ne definisce i requisiti acustici minimi in termini di livello sonoro massimi ammissibili. Compito di chi si occupa di acustica è fare in modo che i rumori in un ambiente siano sufficientemente attenuati o eliminati.

2.1.2 Onda sonora in un nuovo mezzo

Quando un'onda di pressione incontra un nuovo mezzo una porzione dell'energia sonora viene riflessa, una parte viene assorbita e una viene trasmessa. Per caratterizzare l'acustica di un materiale si definiscono i seguenti coefficienti adimensionali:

$$- \text{ Coefficiente di assorbimento} \quad \alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (2.5)$$

$$- \text{ Coefficiente di trasmissione} \quad \tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (2.6)$$

$$- \text{ Coefficiente di riflessione} \quad \rho = \frac{W_r}{W_i} \quad (2.7)$$

dove

W_i = potenza sonora incidente (W)

W_a = potenza sonora assorbita (W)

W_t = potenza sonora trasmessa (W)

W_r = potenza sonora riflessa (W).

2.1.2.1 La riflessione del suono

La riflessione del suono, se si considerano per semplicità una superficie piana e rigida, trova spiegazione nel principio di Huygens secondo il quale ogni elemento del fronte di un'onda di pressione può essere considerato come una sorgente secondaria. Conseguenza di questo principio è che le onde riflesse preservano la forma e le caratteristiche di propagazione. Inoltre, l'angolo di riflessione sarà pari a quello incidente. [17] L'onda riflessa non viene dunque dissipata in alcun modo dal nuovo mezzo e, nell'ottica di attenuare i rumori, questa porzione della potenza incidente andrebbe minimizzata [21].

2.1.2.2 Assorbimento del suono

Per comprendere l'assorbimento (e la trasmissione) del suono da parte di un mezzo è necessario considerarne l'impedenza acustica, una misura della resistenza che esso offre alla propagazione di un'onda acustica. Per un'onda che attraversa un mezzo 1 ed incontra un mezzo 2, il coefficiente di riflessione definito nella (2.7) può essere espresso con la seguente relazione [23]:

$$\rho = \left(\frac{\bar{\rho}_1 c_1 - \bar{\rho}_2 c_2}{\bar{\rho}_1 c_1 + \bar{\rho}_2 c_2} \right)^2 \quad (2.8)$$

dove

$\bar{\rho}$ = densità del mezzo (kg/m³).

La quantità $\bar{\rho}c$ è detta resistenza acustica specifica (\hat{r}) del materiale e si misura, nel sistema MKS, in rayls (Pa·s/m). Questa costituisce la parte reale dell'impedenza acustica specifica (Z), definita dal rapporto complesso tra la pressione sonora e la velocità della particella che attraversa il mezzo [17]:

$$Z = \frac{p}{u} = \hat{r} + jx \quad (2.9)$$

dove

Z = impedenza acustica specifica (rayls)

u = velocità della particella (m/s)

x = reattanza acustica specifica (rayls)

$j = \sqrt{-1}$.

Per un suono che si propaga in uno spazio aperto l'impedenza è un numero reale pari alla resistenza acustica specifica e in questo caso Z è detta impedenza caratteristica. L'impedenza caratteristica dell'aria a 22°C e 0.76 mHg è di 407 rayls, per l'acqua $1.48 \cdot 10^6$ rayls mentre per l'acciaio è di $4.0 \cdot 10^7$ rayls [17].

Dalla (2.8) si capisce che maggiore è la differenza tra la resistenza acustica specifica tra due mezzi, maggiore sarà l'energia di pressione che viene riflessa. Materiali meno densi e in cui la velocità del suono è bassa, hanno coefficienti di riflessione minori. Le performance dei materiali atti all'assorbimento del suono dipendono quindi anche dal *match* o *mismatch* tra le loro impedenze acustiche specifiche e quella del mezzo in cui si sta propagando l'onda.

Le proprietà assorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acustico α definito nella (2.5) come rapporto tra potenza sonora assorbita ed incidente. α rappresenta quindi la frazione di energia di pressione acustica assorbita da un determinato mezzo e assume valori compresi tra 0, nel caso in cui tutta l'energia incidente è riflessa, e 1, nel caso in cui tutta l'energia incidente è assorbita. Pertanto, se il valore di α è pari a 0,7 significa che il 70% dell'energia incidente sulla superficie del materiale è assorbita. Tuttavia, per un medesimo materiale il valore di α varia al variare delle frequenze e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica, quindi i coefficienti di assorbimento acustico sono espressi in funzione delle frequenze in banda d'ottava o terzi di ottava e solitamente sono misurati con strumenti ad onda incidente normale. Solo i materiali con $\alpha > 0.2$ sono detti materiali fonoassorbenti [25]. Inoltre, nelle schede tecniche dei materiali compare spesso un unico valore di assorbimento acustico, l'NRC (*Noise Reduction Coefficient*) che è calcolato mediando i valori di α alle frequenze di 250, 500, 1000 e 2000 Hz. L'impiego di questo descrittore semplificativo, seppur utile per un rapido confronto dei diversi materiali, non rappresenta completamente le loro proprietà acustiche. Considerando due materiali caratterizzati dallo stesso NRC, questi non necessariamente performano allo stesso modo, potrebbero essere infatti contraddistinti da assorbimenti diversi a frequenze diverse. Materiali con $\text{NRC} > 0.2$ sono detti materiali fonoassorbenti, se $\text{NRC} > 0.4$ sono materiali fonoassorbenti con valore applicativo e se $\text{NRC} > 0.56$ sono detti materiali fonoassorbenti ad elevata efficienza [26].

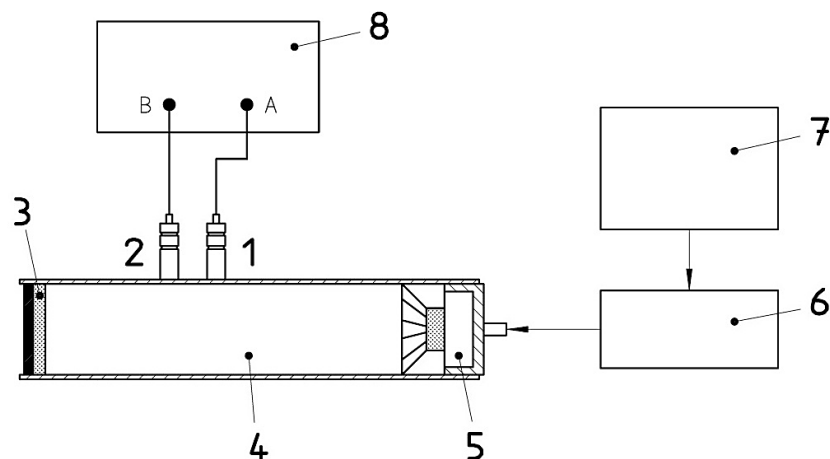
La misura dei valori dei coefficienti di assorbimento acustico avviene, di norma, con due metodi:

- metodo delle onde stazionarie in tubo, per incidenza normale del suono, per campioni di piccole dimensioni secondo la UNI EN ISO 10534;
- metodo per incidenza casuale, eseguito in camera riverberante per campioni di grandi dimensioni (almeno 10 m² di superficie) secondo la ISO 354.

Il metodo per incidenza casuale è quello che meglio approssima i casi reali, poiché le onde sonore incidono sulla superficie della partizione (pavimento, solaio, pareti) secondo diversi angoli. [27] Con questo metodo il valore di α è calcolato a partire dal tempo di riverbero, con il quale è legato da una proporzionalità inversa.

2.1.2.3 Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico con il metodo della Funzione di Trasferimento [28]

La misura del coefficiente di assorbimento acustico con la tecnica delle onde stazionarie in tubo utilizza come metodo di calcolo quello della Funzione di Trasferimento (*Transfer-function method*). Lo strumento utilizzato è detto Tubo di Impedenza o Tubo di Kundt. In particolare, la misura determina il coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale, visto che le onde sonore incidono perpendicolarmente al campione. Il materiale è montato all'estremità di un Tubo di Impedenza, vengono generate delle onde piane ed è misurata la pressione sonora da due microfoni posti vicini alla superficie del campione (piano di riferimento). Possono essere così calcolati, in funzione della frequenza, la Funzione di Trasferimento, α e l'impedenza acustica.



Key

- | | | |
|-----------------|------------------|-----------------------------|
| 1 Microphone A | 4 Impedance tube | 7 Signal generator |
| 2 Microphone B | 5 Sound source | 8 Frequency analysis system |
| 3 Test specimen | 6 Amplifier | |

Figura 2-3: Schema dei principali componenti di un tubo di Kundt.

Si definiscono il fattore di riflessione ad incidenza normale (r), la funzione di trasferimento acustica (complessa) (H_{12}), la funzione di trasferimento per la sola onda incidente (H_I) e la funzione di trasferimento per la sola onda riflessa (H_R):

$$r = r_r + jr_i = |r| \cdot e^{j\Phi_r} \quad (2.10)$$

$$H_{12} = H_r + jH_i = |H_{12}| \cdot e^{j\Phi} \quad (2.11)$$

$$H_I = e^{-jk_o(x_1-x_2)} \quad (2.12)$$

$$H_R = e^{jk_o(x_1-x_2)} \quad (2.13)$$

dove

r = fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)

r_r = parte reale del fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)

r_i = parte immaginaria del fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)

Φ_r = angolo di fase del fattore di riflessione ad incidenza normale (rad)

H_{12} = funzione di trasferimento (adim.)

H_r = parte reale della funzione di trasferimento (adim.)

H_i = parte immaginaria della funzione di trasferimento (adim.)

Φ = angolo di fase (rad)

H_I = funzione di trasferimento per la sola onda incidente (adim.)

H_R = funzione di trasferimento per la sola onda riflessa (adim.)

x_1 e x_2 = distanze della superficie del campione ($x = 0$) dal microfono 1 e 2 (m).

Determinate le pressioni sonore in corrispondenza dei due microfoni (p_1 e p_2) è possibile calcolare la funzione di trasferimento in funzione di r :

$$H_{12} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{e^{jk_o x_2} + r \cdot e^{-jk_o x_2}}{e^{jk_o x_1} + r \cdot e^{-jk_o x_1}} \quad (2.14)$$

Dalla (2.14) si ricava r da cui è possibile calcolare il coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale e l'impedenza acustica specifica con le espressioni:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.15)$$

$$Z = \bar{\rho}c \frac{1+r}{1-r} \quad (2.16)$$

2.1.3 Principi dell'assorbimento del suono

Con l'isolamento acustico si vuole ridurre il rumore trasmesso attraverso le pareti ad un ambiente diverso da quello in cui si è prodotto il suono. L'assorbimento acustico riguarda invece la correzione acustica dell'ambiente stesso, anche se questo ha effetto anche isolante perché viene ridotta la componente di energia sonora trasmessa. In questo lavoro si affronterà principalmente il tema dei materiali porosi per l'assorbimento acustico, che sono in grado di convertire l'energia delle onde in energia termica.

Un sistema sonoro può essere scomposto in tre elementi: sorgente, ovvero l'elemento che produce le perturbazioni di pressione, il percorso delle onde, che rappresenta il mezzo attraverso il quale il suono si propaga, ed il ricevitore, cioè la persona che percepisce il rumore. Per controllare un fenomeno acustico è quindi necessario intervenire su almeno una delle tre parti del sistema: agire sulla sorgente riducendone l'emissione sonora non è sempre possibile o risulta molto costoso, intervenire sul ricevitore è l'opzione meno desiderabile in quanto ogni individuo andrebbe trattato disgiuntamente; il metodo che solitamente è utilizzato è quindi quello di localizzare nel percorso delle onde un materiale capace di ridurre il livello suono. Questo tipo di materiale è detto materiale fonoassorbente. Durante il processo di assorbimento del suono, il moto ordinato delle onde acustiche è convertito nel moto disordinato del calore. C'è quindi un trasferimento da una forma di energia legata al moto delle particelle che, sottoposte a pressione e depressione, trasferiscono le onde sonore e un'energia termodinamica[29][30].

I principi attraverso cui un sistema assorbe energia sonora sono:

- Assorbimento per risonanza di cavità;
- Assorbimento per risonanza di pannello;
- Assorbimento per porosità.

Ciascun materiale che risponde ad uno di questi principi ha buone caratteristiche fonoassorbenti in un range di frequenze. Per le alte frequenze si adoperano materiali porosi, per le medie frequenze quelli risuonatori e per le basse frequenze i pannelli. Talvolta è utile ricorrere a sistemi misti, che presentano un maggior range applicativo.

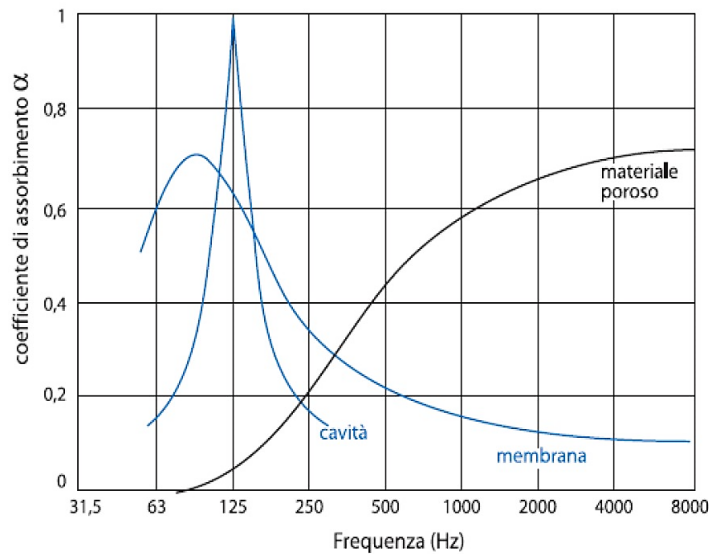


Figura 2-4: Curve di assorbimento acustico di materiali porosi, con cavità e di pannelli (membrane).

Ai primi due principi verranno dedicati ora due brevi sotto capitoli, mentre l'assorbimento da parte di materiali porosi verrà trattato più approfonditamente considerando che i TNT studiati fanno parte di questa categoria.

2.1.3.1 Assorbimento per risonanza di cavità[24][27][31]

Le strutture di risonanza sono costituite da pannelli di materiale non poroso sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni e che vengono montati ad una determinata distanza dalla superficie da trattare. Un siffatto sistema produce un effetto di fonoassorbimento fondato sul principio di Helmholtz: il suono incidente nelle aperture del materiale, dette colli, fa vibrare l'aria che vi è contenuta; questa si comporta come un sistema massa-molla dotato di una propria frequenza di risonanza, in corrispondenza della quale il materiale forato è in grado di assorbire una considerevole parte di energia. Un pannello forato con una cavità retrostante è quindi un insieme di risuonatori di Helmholtz. L'assorbimento di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi fra 50 e 400 Hz. È possibile calcolare la frequenza di risonanza con la relazione:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{F}{ds}} \quad (2.17)$$

dove

f_r = frequenza di risonanza (Hz)

F = frazione della superficie del risuonatore forata (adim.)

d = spessore dell'intercapedine (o del materiale poroso) (m)

s = lunghezza del collo dei risonatori (fori) (m).

È possibile realizzare dei sistemi misti in cui un risonatore viene completato da un riempimento della cavità in materiale poroso, in questo modo il valore del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace.

2.1.3.2 Assorbimento per risonanza di pannello[24][27][31]

Nel caso di pannelli flessibili montati su appositi telai, che li mantengono distanziati dalla superficie da trattare fornendo un'intercapedine d'aria, questi si comportano come dei diaframmi. L'assorbimento acustico è in funzione della loro elasticità in quanto le onde sonore incidenti, che creano una serie di pressioni e depressioni, li fanno vibrare. In particolare, un sistema di questo tipo può essere analizzato con lo stesso metodo utilizzato per il risonatore di Helmholtz, ossia il pannello si comporta come una massa vibrante, mentre l'aria contenuta nella cavità come una molla acustica caratterizzata dalla sua rigidità. Anche questo sistema è molto selettivo ed è utile per assorbire suoni incidenti caratterizzati da basse frequenze (200÷300 Hz), dove i materiali fonoassorbenti sono poco efficaci e i risonatori di Helmholtz assumerebbero dimensioni troppo grandi.

La frequenza di risonanza dei pannelli vibranti è data da:

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad (2.18)$$

dove

m = massa per unità di area del pannello (kg/m^2).

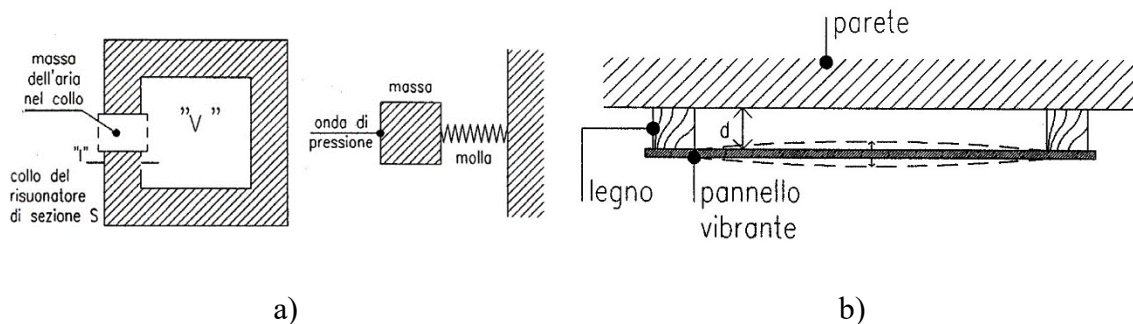


Figura 2-5: Schema di un a) risonatore di Helmholtz e b) di un pannello risonante.

2.1.3.3 Principi di assorbimento dei materiali porosi

Un materiale fonoassorbente poroso è un materiale costituito da una struttura solida contenente cavità, canali o interstizi. In base alle diverse configurazioni microscopiche, possono essere classificati in: cellulari, fibrosi e granulari. Della categoria dei materiali cellulari fanno parte la resina melamminica e il poliuretano espanso a celle aperte. Tra i materiali fibrosi maggiormente utilizzati nelle applicazioni acustiche vi sono la lana di vetro, la lana di roccia, le fibre in poliestere e le fibre metalliche. Appartengono, invece, alla categoria dei materiali granulari, alcuni materiali metallici e ceramici sinterizzati e alcuni tipi di argilla.

Tipicamente i materiali fonoassorbenti porosi presentano cavità interconnesse e di dimensione inferiore al millimetro, ossia molto meno delle lunghezze d'onda di interesse acustico.

Nei materiali con porosità la dissipazione dell'energia acustica, e quindi la sua conversione in calore, avviene principalmente per tre meccanismi:

- Frizione;
- Perdita di momento;
- Fluttuazioni di temperatura.

Quando l'onda sonora penetra nella struttura porosa, le molecole d'aria in essa contenute vengono messe in oscillazione con una frequenza pari a quella dell'onda. Questa vibrazione porta ad attriti e frizioni tra molecole e le pareti dei pori, con conseguente trasferimento di energia termica alla struttura del materiale. Inoltre, all'interno delle porosità il suono è sottoposto a numerosi cambi di direzione (*scattering*) e le contrazioni e rarefazioni dell'aria causate dalle onde di pressione avvengono in modo irregolare per la tortuosità delle cavità. Questi fenomeni risultano in una perdita di momento del suono. Le compressioni e rarefazioni delle molecole d'aria provocano invece delle fluttuazioni di temperatura. In particolare, lo scambio termico alle basse frequenze avviene in condizioni isoterme, per l'elevato rapporto superficie-volume della struttura porosa, per la sua conducibilità e per il lungo periodo dell'onda; alle alte frequenze invece i cambi di pressione avvengono in modo adiabatico in quanto le oscillazioni dell'onda avvengono troppo rapidamente; a frequenze intermedie alla condizione isoterma e adiabatica, avviene la perdita di energia della maggior parte delle onde acustiche. Infine, è ragionevole trascurare le dissipazioni per vibrazioni meccaniche dello scheletro dei materiali porosi in quanto la rigidità dei diaframmi (pareti, fibre) che definiscono i pori è elevata rispetto all'aria e quindi si comportano sostanzialmente come dei corpi rigidi. [18][19] [21][32]

Quanto appena spiegato segue la premessa secondo la quale l'onda acustica deve penetrare nella struttura porosa per essere attenuata; è dunque di fondamentale importanza capire come questo può essere possibile. È stato descritto come un'onda

incidente su un materiale non poroso può essere dissipata se questo viene messo in vibrazione o se presenta cavità risonanti, e se ciò non si realizza la potenza sonora incidente viene riflessa e rimane confinata nell'ambiente in cui è stata prodotta. Diversamente, se la superficie del materiale ha una porosità sufficientemente elevata una quota parte delle onde di pressione sonora riesce a penetrare nel materiale; in questo modo la riflessione dell'onda avviene nelle cavità della struttura, luogo in cui vi è un'elevata probabilità che l'energia riflessa incontri nuovamente un solido facente sempre parte del materiale. Dunque, il suono è intrappolato dal materiale e subisce molteplici riflessioni prima di riuscire ad attraversarlo completamente o di tornare nell'ambiente in cui si trova l'emettitore. Come è stato spiegato, durante queste riflessioni interne la vibrazione acustica è attenuata. Al diminuire della dimensione dei pori in superficie di un materiale, meno energia è accolta nelle parti interne dello stesso e ciò ne diminuisce il coefficiente di assorbimento, questo perché una più grande porzione di potenza sonora incidente è riflessa. È chiaro quindi che non tutti i materiali porosi siano buoni assorbitori.

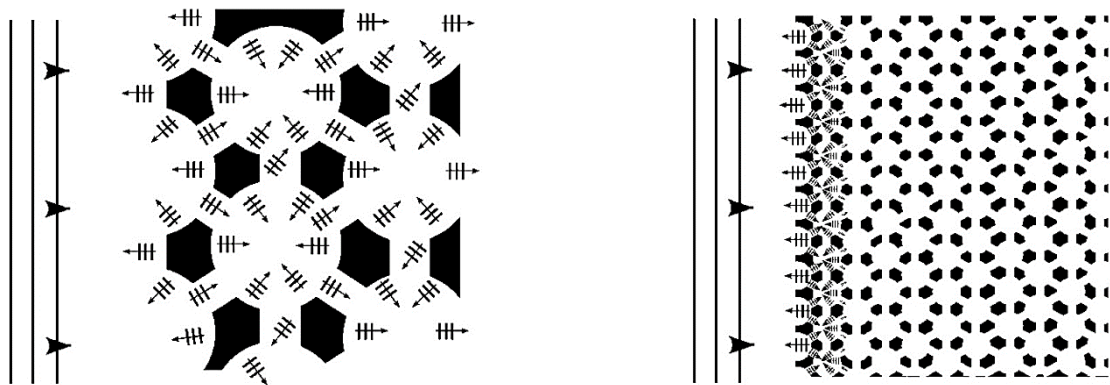


Figura 2-6: Diminuzione dell'energia che penetra in un materiale poroso al diminuire della dimensione dei pori superficiali (da sinistra a destra).

Se il cammino libero medio dell'aria è nell'ordine di grandezza della distanza tra le pareti dei pori le onde sonore non sono in grado di penetrare efficacemente nella struttura e quindi non verranno dissipate. Questo è legato al regime di flusso all'interno delle porosità che dipende dalla dimensione dei pori e può essere quantificato dal numero di Knudsen, definito dal rapporto:

$$k_n = \frac{l_{fluid}}{l_{char}} \quad (2.19)$$

dove

k_n = numero di Knudsen (adim.)

l_{fluid} = cammino libero medio del fluido contenuto nei pori (m)

l_{char} = lunghezza caratteristica (m)

La lunghezza caratteristica, in questo caso specifico, è pari alla distanza media tra le pareti dei pori che nel caso abbiano forma sferica è pari al diametro degli stessi. Il cammino libero medio del fluido contenuto nei pori è per definizione la distanza media percorsa da una particella fra due urti successivi. Il regime di flusso nei pori è dunque caratterizzato da:

- Flusso viscoso: $k_n \ll 1$;
- Flusso molecolare: $k_n \gg 1$;
- Flusso misto se $k_n \approx 1$.

Quando il regime di flusso viscoso è quello dominante, le onde di pressione sonora riescono a penetrare nel materiale a sufficienza perché questo sia un buon assorbitore acustico. Se invece quello che domina è il flusso molecolare l'onda acustica incidente sul materiale verrà principalmente riflessa senza essere attenuata. [23]

2.2 L'importanza del comfort acustico e l'applicazione di tessuti-non tessuti per realizzarlo

Per comfort acustico si intende quella condizione psicofisica di benessere nella quale si trova un individuo immerso in un campo sonoro, in relazione all'attività che sta svolgendo. Purtroppo ad oggi milioni di persone devono invece tollerare un ambiente di lavoro rumoroso; l'assenza di comfort acustico diventa fastidiosa sopra i 55dB e pericolosa per la salute sopra i 120dB [15].

Oggi, l'inquinamento acustico è quindi un tema di crescente importanza e che desta l'attenzione di scienziati, tecnologi e della popolazione in generale. Nella società moderna il numero delle sorgenti di suoni e rumori è aumentato, ad esempio per la maggior presenza di veicoli, dispositivi elettronici, macchinari sempre più potenti, sistemi di ventilazione, elettrodomestici, etc. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, l'inquinamento sonoro è una presenza preoccupante in quanto ha effetti avversi sulla salute degli esseri umani: un'eccessiva esposizione a rumori, con livello sonoro al di sopra di una determinata soglia, provoca perdita di udito, ipertensione, emicranie, disturbi durante il sonno, riduzione delle performance/produzione/apprendimento negli ambienti di scuola/lavoro e peggioramento della sanità psico-fisica in generale. Ad esempio, relativamente alla qualità acustica degli ambienti destinati all'ascolto della parola, è necessario garantire l'assenza di disturbo e la buona ricezione; il raggiungimento di tali requisiti porta al conseguimento di condizioni ottimali di intelligibilità della parola,

definita come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un oratore.

Tra gli ambienti in cui è richiesto il maggior controllo del livello sonoro e quindi un comfort acustico ci sono le automobili, i teatri, le sale concerti, gli impianti industriali, gli uffici, gli aerei e i mezzi di trasporto in generale.

Il comfort acustico è anche un *plus* nelle caratteristiche di un prodotto nel mercato. Si pensi ad un'automobile: la riduzione dei rumori nell'abitacolo concorre ad aumentare la percezione della qualità della vettura.

I tessuti-non tessuti, essendo materiali porosi, possono comportarsi efficientemente da materiali fonoassorbenti e questo è riconosciuto dall'ampia letteratura che li ha riguarda. Tra i principali vantaggi dell'uso di TNT anziché altri sistemi per l'attenuazione dei rumori vi è il loro basso peso specifico, l'elevata porosità e il basso costo di produzione. Diversamente delle schiume in poliuretano, ad esempio, i TNT hanno un processo produttivo con minor impatto ambientale.

Sebbene i TNT realizzati con fibre inorganiche (silicee, lana di roccia) abbiano elevate capacità fonoassorbenti, queste fibre sono potenzialmente pericolose per la salute se inalate o se entrano in contatto con la pelle. Una valida alternativa sono le fibre sintetiche o naturali, la cui maggior parte è efficacemente riciclabile. Inoltre, è possibile ottenere queste fibre attraverso il recupero e la rivalorizzazione di materiali tessili.

I materiali porosi costituiti da fibre assorbono principalmente nel range delle alte frequenze mentre il coefficiente di assorbimento è limitato nelle medio-basse. Questo è uno svantaggio per certe applicazioni ma la banda di frequenze assorbite efficacemente può essere aumentato ricorrendo a sistemi misti (vedasi capitolo 2.1.3) oppure ingegnerizzando il tessuto realizzando per esempio una struttura multistrato.

[2], [19], [25], [29], [30], [33]–[40].

2.3 Fattori che influenzano l'assorbimento acustico nei tessuti non tessuti

Le *performance* acustiche dei tessuti-non tessuti dipendono da numerose caratteristiche della loro struttura fibrosa e da altri parametri che devono essere considerati in fase di progettazione. Alla base della scelta delle caratteristiche del materiale vi è lo spettro sonoro della sorgente del rumore, punto di partenza di ogni problema di controllo dell'acustica di un ambiente. Compito di chi deve lavorare con il confort sonoro è quello di determinare la combinazione dei fattori che devono caratterizzare un TNT perché abbia la massima efficienza per un'applicazione specifica.

Questo sottocapitolo si occupa quindi di mettere in evidenza quelli che sono i fattori determinanti l'assorbimento acustico nei tessuti-non tessuti attraverso una revisione della letteratura.

2.3.1 Caratteristiche delle fibre

I tessuti-non tessuti sono, per definizione, materiali costituiti da fibre. Le loro caratteristiche sono quindi dei primi parametri che giocano un ruolo nella determinazione delle capacità fonoassorbenti.

2.3.1.1 Materiale

Sul mercato sono disponibili un elevato numero di fibre naturali e sintetiche e il materiale di cui sono costituite le contraddistingue in termini di rigidità, proprietà superficiali, allungamento e resilienza. *S. Sengupta* [39] ha studiato le proprietà fonoassorbenti di TNT ottenuti con la tecnica dell'agugliatura. Prendendo in considerazione provini costituiti da fibre in juta, PP, PES e juta-PP al 3:1, ha osservato che i diversi materiali con cui sono realizzate le fibre risultano in tessuti di diversa densità e porosità. In particolare, il TNT in juta è stato quello con le peggiori *performance* per la sua struttura compatta (maggiormente densa) rispetto agli altri materiali; il mix fibra juta-PP invece è quello che ha presentato le migliori capacità fonoassorbenti, probabilmente perché i due materiali sono molto diversi e la loro combinazione ha un più ampio spettro di assorbimento. Anche *N. D. Yilmaz et al.* [2] hanno preso in considerazione TNT ottenuti sovrapponendo *layers* costituiti da fibre di materiali diversi. In particolare, campioni monofibra in acido polilattico (PLA) erano più permeabili all'aria di quelli in PP, e questo, come verrà spiegato in seguito, risulta in un diverso comportamento acustico. La *review* della letteratura effettuata da *S. Paknejad et al.* [41] riporta invece che numerosi studi non hanno evidenziato apprezzabili variazioni del coefficiente di assorbimento sonoro nei TNT costituiti da fibre di diverso materiale.

2.3.1.2 Titolo

Numerosi articoli scientifici evidenziano come il titolo delle fibre, utilizzato per produrre un materiale fonoassorbente, sia uno dei fattori che ne influenza maggiormente le *performance*. In generale, al diminuire del diametro delle fibre utilizzate il coefficiente di assorbimento acustico aumenta, soprattutto se le sue dimensioni sono nell'ordine di grandezza inferiore al micron. Questo è spiegato da diverse osservazioni al diminuire del titolo delle fibre:

- È necessario un maggior numero di fibre per realizzare un TNT con pari densità di uno costituito da fibre più grossolane, ciò risulta in un materiale con più

elementi che interagiscono con le onde sonore e che possono quindi dissiparne l'energia [19][42];

- Al crescere del numero delle fibre, inoltre, cresce la resistenza al flusso d'aria e la tortuosità del TNT [19][18][36][42];
- Si ha maggiore facilità di movimento delle fibre colpite dalle onde di pressione sonora ed è dunque possibile una dissipazione meccanica dell'onda vibrazionale [18][36][42];
- Diametro minore significa maggior area superficiale delle fibre che quindi interagiscono di più con le onde sonore [38][43].

2.3.1.3 Forma della sezione

La geometria della sezione delle fibre ne influenza la morfologia della superficie laterale. Forme più complesse e meno serrate risultano in un'elevata superficie specifica della fibra che interagisce maggiormente con l'onda incidente aumentando generalmente l' α del materiale [29]. L'analisi statistica condotta da *M. Varun* [19] su fibre con diversa forma di sezione ha evidenziato come questa influenza la resistività all'aria del materiale e il coefficiente di assorbimento acustico. In particolare, in corrispondenza delle basse frequenze (500-1600 Hz) fibre con sezione circolare sono più efficienti di fibre multilobate. Nel range delle alte frequenze (1600-5000 Hz), diversamente, il comportamento è inverso, mentre alle frequenze ancora maggiori la sezione non influenza più le proprietà acustiche. *K. A. Jayaraman* [18] ha messo a confronto fibre in PES cave e fibre in PES multilobate (4DG) notando che le seconde hanno maggiore capacità di assorbimento sonoro. Questo troverebbe spiegazione per un maggior scattering delle onde all'interno del TNT dovuto alla morfologia a lobi delle fibre. Inoltre, confrontando fibre 4DG 6.7 dtex con fibre a sezione circolare 4.7 dtex, l'autore constata che nonostante il titolo maggiore, le fibre 4DG hanno migliori proprietà acustiche; quindi, la forma della sezione gioca un ruolo preponderante rispetto al diametro delle fibre. Nello studio di *M. Tascan et al.* [43] sono state confrontate fibre in PET di pari titolo ma con diversa sezione: otta lobata, circolare e trilobata. Le fibre a otto lobi presentano una superficie tre volte maggiore di quelle circolari, quelle a tre lobi rappresentano una situazione intermedia. Confrontando campioni di pari densità, spessore e titolo fibre, i ricercatori hanno potuto osservare come la forma con più lobi sia quella con le migliori caratteristiche fonoisolanti. Questo sarebbe dovuto alla capacità delle fibre di forma irregolare di variare maggiormente la direzione delle onde che vi incidono aumentando la probabilità che un'onda deviata interferisca in modo distruttivo con un'altra. L'effetto della forma della sezione delle fibre è stato osservato anche variando la densità dei campioni: quelli che la hanno maggiore hanno riascoltato i più significativi risultati.

2.3.2 Proprietà del tessuto-non tessuto

Il coefficiente di assorbimento acustico dei materiali porosi dipende, in modo sostanziale, dalle proprietà del TNT. Questo è il motivo per il quale numerosi modelli di previsione delle proprietà fonoassorbenti hanno come variabili queste caratteristiche del materiale.

2.3.2.1 Resistività al flusso d'aria

Una tra le più importanti quantità che influenzano l'assorbimento acustico di un TNT è la resistività al flusso d'aria. Questa grandezza quantifica quanto facilmente l'aria penetra in una struttura porosa e vi si muove all'interno. La resistività è definita come il rapporto tra la differenza di pressione applicata alle facce di un materiale e il prodotto tra la velocità di flusso e lo spessore del materiale. La resistività è calcolabile se il flusso d'aria generato dalla differenza di pressione è sufficientemente lento per avere un regime di flusso laminare all'interno dei pori; altrimenti si parla di permeabilità all'aria.

Analogamente ad un flusso d'aria, quando il suono penetra in un TNT entra in contatto con la struttura fibrosa e questo genera attriti viscosi che dissipano energia: maggiore è questa perdita di energia, maggiore è l'attenuazione acustica; di conseguenza, per l'analogia dei comportamenti flusso d'aria-suono, maggiore è la resistività, maggiore energia sonora è assorbita dal materiale. [18][19][23][29][34][36] Esiste però un limite a questo fenomeno, al di sopra del quale la riflessione delle onde acustiche prepondera e l'assorbimento viene meno [19] [29]. La resistività al flusso d'aria dipende soprattutto dalla densità del materiale, dal titolo delle fibre, dalla forma della loro sezione e dalla dimensione e numero dei pori. Una maggiore massa per unità volumetrica è legata ad un maggior impaccamento che causa una maggiore difficoltà di passaggio del flusso. Similmente, al diminuire del diametro delle fibre la resistività aumenta perché, a parità di volume, ci sono un maggior numero di elementi all'interno della struttura che interagiscono con il fluido. Secondo *K.A.Jayaraman* [18] la resistività è inversamente proporzionale al quadrato della dimensione media dei pori; per un materiale con una determinata porosità questo equivale a dire che la proporzionalità inversa è anche con il quadrato del titolo delle fibre. *N.D.Yilmaz et al.* [2] hanno invece constatato come anche la porosità del materiale sia rilevante, soprattutto se il materiale da studiare è costituito da una miscela di fibre di diverso titolo il cui solo valore medio non sarebbe sufficiente a caratterizzare la resistività al flusso d'aria, che aumenta con il volume dei pori. Infine, una forma della sezione delle fibre più convoluta diminuisce la capacità di penetrazione di un flusso perché aumenta la superficie che determina l'attrito viscoso.

Nello studio condotto da *K.O.Ballagh* [44] si è determinato il valore ottimale di resistività per massimizzare l'assorbimento acustico di campioni in lana; al di sopra di questo valore le *performance* aumentano solo in corrispondenza delle basse frequenze ma si riducono per quelle alte. Lo stesso comportamento è stato rilevato da *I.Prasetiyo et al.* [34] in TNT

costituiti da fibre riciclate; il team di ricerca spiega come talvolta, un materiale con resistività maggiore del valore ottimale sia utile per estendere la banda di frequenze con buon assorbimento, anche se questo è a discapito di suoni ad elevata frequenza.

2.3.2.2 Porosità

Il numero, la dimensione e la tipologia di pori sono parametri che influenzano l'assorbimento acustico dei TNT, come già discusso nel paragrafo 2.1.3.3. Per consentire alle onde di entrare nel materiale per dissiparvi energia, è necessaria la presenza di numerosi pori in superficie. Per quanto concerne la dimensione invece, pori troppo grandi interagiscono poco con l'onda mentre, se troppo piccoli, questa non penetra nella struttura porosa per l'elevata riflessione della potenza sonora incidente in superficie.

La porosità è definita dalla relazione:

$$\phi = \frac{V_{pori}}{V_{tot}} = 1 - \frac{\bar{\rho}_a}{\bar{\rho}_m} \quad (2.20)$$

dove

ϕ = porosità (adim.)

V_{pori} = volume dei pori (m³)

V_{tot} = volume totale del materiale poroso (m³)

$\bar{\rho}_{tot}$ = densità del materiale poroso (kg/m³)

$\bar{\rho}_m$ = densità della parte solida del materiale poroso (kg/m³).

La porosità è quindi un coefficiente compreso tra 0 e 1 e, in generale, ha un valore attorno 0.95 per i materiali fibrosi.

Da diversi studi è emerso che un elevato coefficiente di assorbimento acustico è ottenibile realizzando un materiale con porosità crescente nella direzione di propagazione delle onde sonore all'interno del TNT [18][19][29]. Nello studio di *N.D. Yilmaz et al.* [2] viene affermato che la resistività al flusso d'aria aumenta al diminuire della porosità, di conseguenza quando la seconda cala la prima aumenta. Confrontando campioni in PP e PLA con rispettive porosità di 0.88 e 0.91, è stato rilevato un maggiore assorbimento acustico per quelli in PP.

2.3.2.3 Tortuosità

La tortuosità misura l'incremento della lunghezza del percorso attraverso i pori di un materiale rispetto al suo spessore (tragitto retto, senza deviazioni). È quindi il fattore di forma della struttura di un TNT che tiene in considerazione l'irregolarità delle cavità in esso contenute. All'aumentare della tortuosità, aumenta la lunghezza del percorso che un'onda acustica deve percorrere per attraversare il materiale. Le onde quindi vengono maggiormente riflesse all'interno delle cavità, aumenta il loro tempo di permanenza nel

TNT e quindi la loro perdita di energia e momento. Il valore di questo parametro strutturale dipende dalla frequenza e diminuisce all'aumentare di questa. La sua influenza sull'assorbimento riguarda invece principalmente le alte frequenze. [18][19][29][30][36]

2.3.2.4 Spessore

Numerosi studi sulle proprietà acustiche dei materiali porosi hanno concluso che l'assorbimento delle onde a bassa frequenza aumenta all'aumentare dello spessore, mentre alle alte frequenze questo parametro geometrico non influenza il fonoassorbimento. Un'altra considerazione è che all'aumentare dello spessore, aumenta la resistività al flusso d'aria. Queste due caratteristiche hanno quindi un effetto sinergico sull'acustica di un TNT. [18][19][29][30][34][36]

2.3.2.5 Densità

La densità di un TNT è un altro parametro importante da considerare quando si analizza un materiale fonoassorbente. All'aumentare del rapporto massa-volume un numero maggiore di fibre si trovano nell'unità di spazio, è dunque maggiore la dissipazione di energia delle onde sonore per attriti viscosi. L'effetto della densità è correlato a quello di resistività al flusso d'aria e porosità: al di sopra di un determinato valore ottimale le proprietà fonoassorbenti del materiale diminuiscono per una maggiore riflessione dell'onda incidente. [29][30][42][43]

È stato determinato che il coefficiente di assorbimento acustico aumenta in corrispondenza delle frequenze medio-alte all'aumentare della densità, in particolare al di sopra dei 2000Hz. È dunque bene utilizzare materiali meno densi e con struttura più aperta a frequenze basse (minori di 500Hz) e altri più compatti per frequenze alte (maggiori di 2000Hz). [18][19][36]

2.3.2.6 Grammatatura

Con grammatatura (G) si intende il peso di un metro quadro di TNT, ha dunque unità di misura g/m^2 . È quindi una grandezza correlata a densità e spessore del materiale. Di conseguenza, solitamente viene valutato l'effetto sul coefficiente di assorbimento acustico della densità o della grammatatura.

2.3.3 Altri fattori

Dalla letteratura analizzata è emerso che le proprietà acustiche dipendono anche da altri fattori in aggiunta a quelli elencati fino ad ora. Non essendoci numerosi studi su questi nuovi parametri sarebbero necessarie altre ricerche per quantificarne gli effetti. In questo

paragrafo ci si limiterà quindi a dare soltanto degli accenni sulla letteratura reperita, in quanto di elevato interesse per futuri sviluppi di questo tema.

2.3.3.1 Processo produttivo

Il processo produttivo attraverso il quale viene realizzato un materiale poroso gioca un ruolo importante nell'aggiungere fattori che concorrono alle proprietà acustiche.

Durante la formazione del materassino di fibre, come descritto nel paragrafo 1.3, può essere controllata la loro orientazione: il processo *parallel-laid* permette di ottenere parallelismo tra le fibre, quello *cross-laid* lascia libertà di definire l'angolo di faldata, mentre quello *randomly-laid (air-laid)* non conferisce alcuna direzionalità preferenziale. *M.Varun* [19] spiega come siano stati rilevati coefficienti α maggiori su TNT ottenuti con tecnica *randomly-laid*, probabilmente perché questo conferisce al materiale maggiore resistività al flusso d'aria, pori di dimensione piccola e maggiori punti di contatto tra le fibre.

Nell'interlacciatura meccanica per agugliatura le variabili di processo sono numerose ma sembrerebbe che la più rilevante sia il numero di battute effettuate dagli aghi per unità di superficie del tessuto. *T.S.Kumar et al.* [37] hanno confrontato provini ottenuti con tre diversi valori di battute (250, 300 e 450 battute/m²) evidenziando come il valore più basso sia quello che ha dimostrato le migliori *performance* acustiche. Un risultato contrario è stato ottenuto da *F.Shahani et al.* [42], che hanno rilevato un aumento di α con i provini agugliati con 300,000, 600,00, 900,000 e 105,000 battute/m². Probabilmente i risultati discordanti tra i due studi trovano spiegazione per il valore ben diverso delle battute nei provini analizzati, essendo invece grammature e spessori dello stesso ordine di grandezza.

2.3.3.2 Finitura superficiale e applicazione di layer

I TNT, prima di uscire dalla linea produttiva, possono subire un processo di lisciatura superficiale attraverso un tappeto caldo. Questo processo riduce la porosità superficiale e quindi potrebbe influire a svantaggio della percentuale di potenza sonora che penetra nel materiale. In letteratura però un'analisi di questo fattore non è stata trovata. Diversamente, l'applicazione di *layer* alla superficie e internamente al materiale poroso è stata presa in considerazione. È possibile accoppiare il TNT con film perforati, tessuti e altri *layers* soprattutto per ridurre la delaminazione e contaminazione. Considerando però che un film è tipicamente un elemento a bassa permeabilità all'aria, questo può influire notevolmente sulla riflessione delle onde sonore incidenti. Inoltre, il *layer* si comporta come una membrana risonante producendo elevati assorbimenti alle basse frequenze. Quindi la sua presenza gioca a sfavore della penetrazione dell'onda nel TNT, che agirebbe soprattutto sulle alte frequenze, ma favorisce un effetto simile ai risuonatori a membrana attenuando quelle basse. [18][30][36] *Y.Lee et al.* [38] hanno esaminato

campioni in fibra di PES a cui è stato applicato in superficie o all'interno un *layer* di PP, *spun-bond* TNT e alluminio. Dalle analisi è risultato un forte incremento del coefficiente di assorbimento acustico alle basse frequenze per tutti i campioni. Quelli con il film applicato in superficie hanno però dimostrato un drastico calo delle *performance* alle alte frequenze. Nei campioni con *layer* interno hanno invece dimostrato che le capacità assorbenti alle frequenze maggiori rimanevano sostanzialmente inalterate. Nello studio termico-acustico di E. T. Dömez [45] sono stati studiati dei pannelli con applicazione in edilizia ottenuti da materie prime di riciclo; alcuni campioni di diversa densità sono stati accoppiati con un foglio di alluminio spesso 14 μm e dai risultati è emerso che la presenza del *layer* aumenta leggermente l'assorbimento acustico soprattutto alle alte frequenze.

2.3.3.3 Geometria superficiale del materiale

La forma del materiale gioca un ruolo importante nell'acustica in quanto può offrire una più estesa superficie di contatto con l'onda incidente, favorendo la dissipazione di una maggiore quantità di energia sonora. La soluzione più diffusa è quella in cui un lato del materiale è ricoperto da protuberanze a forma piramidale. [27]

2.3.3.4 Distanza materiale-parete

Se durante il posizionamento di pannelli fonoassorbenti viene lasciato un'intercapedine tra materiale e superficie da trattare, questa ne aumenta le capacità acustiche soprattutto alle basse frequenze. Questo perché il pannello si comporta come una membrana con una certa massa, l'aria contenuta nella cavità retrostante invece si comporta come una molla acustica e la combinazione dei due è un pannello di risonanza. [19][29]

Capitolo 3

L'isolamento termico dei tessuti-non tessuti

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. Vengono poi descritti i fenomeni di trasporto termico che avvengono nei materiali termoisolanti fibrosi e presentato un modello teorico sulla loro capacità di conduzione e irraggiare. Si introducono poi brevemente il concetto di comfort termico e le principali classi di materiali termoisolanti, tra cui viene enfatizzato il ruolo dei tessuti-non tessuti. Il capitolo poi riporta un'analisi della letteratura sui fattori che influenzano la conducibilità termica dei tessuti-non tessuti. Infine, l'ultimo paragrafo prende in considerazione l'esistenza di una correlazione tra assorbimento acustico e conducibilità e tra assorbimento acustico e resistenza termica, essendo entrambi influenzati da un numero considerevole di parametri strutturali in comune.

3.1 Fondamenti del trasporto di energia termica [46]–[50]

Il calore è la forma di energia che viene trasferita quando tra due parti di un sistema esiste un gradiente di temperatura o quando due sistemi a differente temperatura interagiscono tra di loro, ad esempio per contatto. Ciascun sistema è dotato di una determinata energia termica data dalla somma delle energie cinetiche degli atomi e delle molecole che lo costituiscono. Le particelle, infatti, possiedono una certa agitazione termica: si muovono nello spazio od oscillano entro un reticolo tanto più la loro temperatura è elevata. Quando avviene una trasmissione del calore, l'energia interna di un sistema varia. I processi di scambio termico seguono il primo e secondo principio della termodinamica che li descrive, se si considerano variazioni tra stati di equilibrio ideali. Diversamente, da un punto di vista più ingegneristico, è di fondamentale importanza la variabile tempo, ovvero considerare l'esistenza di processi irreversibili e parlare di potenza termica trasmessa o velocità di scambio di calore piuttosto che di energia o calore.

Se esiste un gradiente di temperatura questo costituisce la forza motrice di uno o più meccanismi di trasporto di energia termica. In letteratura si trovano, in genere, tre

modalità fisiche di scambio termico: radiazione elettromagnetica (irraggiamento), moto atomico o molecolare (conduzione) e trasporto di materia (convezione). Il primo meccanismo si differenzia sostanzialmente dagli altri perché è l'unico che, per mezzo di onde elettromagnetiche, avviene anche in assenza di un mezzo (nel vuoto). La conduzione e convezione invece sono accumulate dagli stessi principi perché legate al moto di materia, a livello atomico (conduzione) o macroscopico (convezione).

3.1.1 Irraggiamento

Si parla di irraggiamento quando si ha trasferimento di energia tra due corpi per mezzo di onde elettromagnetiche, fenomeno che può avvenire anche nel vuoto. La lunghezza d'onda delle radiazioni elettromagnetiche responsabili dello scambio termico ha valore compreso tra $10e^{-2} \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$, corrispondenti allo spettro infrarosso e parte di quello del visibile e dell'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:

$$q_{eN} = \sigma \cdot T^4 \quad (3.1)$$

dove

q_{eN} = flusso di calore emesso da un corpo nero (W/m^2)

σ = costante di Stefan-Boltzmann = $5.670374e-8 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

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 q_e è inferiore a q_{eN} di un fattore ε detto emissività che è un numero compreso tra 0 e 1 e che è funzione della lunghezza d'onda λ .

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

$$q_a = \zeta \cdot \mathcal{G} \quad (3.2)$$

dove

q_a = flusso di calore assorbito (W/m^2)

ζ = assorbanza (adim.)

\mathcal{G} = irradiazione, energia che giunge al corpo (W/m^2).

Lo scambio termico per irradiazione globale (q_{irr}) è dunque dato dalla differenza tra q_e e q_a . Nel caso in cui il corpo irradiato abbia una superficie molto minore del sistema

emettitore (E) allora quest'ultimo risentirà poco della sua presenza e si comporterà come un corpo nero con \mathcal{G} pari a q_{eN} . Dunque, il calore scambiato per irradiazione da un corpo è quantificato dalla:

$$q_{irr} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_E^4) \quad (3.3)$$

dove

q_{irr} = flusso di calore totale per irradiazione (W/m²)

T = temperatura del corpo considerato (K)

T_E = temperatura del sistema emettitore (K).

In molti problemi ingegneristici, l'irraggiamento è presente assieme alle altre modalità di scambio termico. Perciò per l'analisi globale dei fenomeni termici si ricorre alla conducibilità termica per l'irraggiamento (k_I) e alla resistenza termica per l'irraggiamento (R_I) così definiti:

$$k_I = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_E^4)}{T - T_E} \quad (3.4)$$

$$R_I = \frac{1}{k_I} \quad (3.5)$$

dove

k_I = conducibilità termica per l'irraggiamento (W/m²·K)

R_I = resistenza termica per l'irraggiamento (m²·K/W).

È infine necessario precisare che spesso, per sistemi a temperature non elevate e che non sono in uno spazio sottovuoto, lo scambio di calore per irraggiamento è trascurabile rispetto agli altri meccanismi di trasporto termico. [46]–[49]

3.1.2 Conduzione

La conduzione è il meccanismo di trasporto termico che avviene a livello atomico o molecolare. Per comprenderne il principio si consideri un gas macroscopicamente in quiete e compreso tra due lastre a temperatura differente. Le particelle che compongono il gas prossimo alla parte calda del sistema avranno una temperatura ed energia cinetica maggiore che trasferiscono, in parte, quando collidono con altre a temperatura minore. Queste a loro volta trasferiranno la loro energia ad altre particelle con il medesimo meccanismo, e così via. Il moto delle particelle, responsabile della conduzione, è a livello atomico e di dimensioni pari al cammino libero medio. Questo determina il trasporto del calore dalle zone a temperatura maggiore a quelle a temperatura minore. Nei liquidi, il meccanismo di trasporto è analogo, mentre nei solidi, seppur il principio sia il medesimo, i fenomeni a livello atomico dipendono dal tipo di materiale. In quelli conduttori, la

trasmissione è legata ai moti diffusivi della nuvola elettronica, mentre, in quelli costituiti da una struttura reticolare, alle vibrazioni degli atomi costituenti il reticolo.

Più si trovano vicine le particelle di un corpo, più queste trasferiscono facilmente il calore; quindi, gli aeriformi sono meno conduttivi dei liquidi, che lo sono dei solidi.

Joseph Fourier nel suo libro *Théorie Analytique de la Chaleur* presenta la legge fenomenologica che prende il suo nome: *il flusso conduttivo è proporzionale al gradiente di temperatura e ad esso opposto come segno*. La relazione di Fourier per un flusso monodirezionale a livello locale è la seguente:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

dove

q = flusso termico (W/m^2)

k = conducibilità termica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente di temperatura nella direzione del flusso termico (K)

il segno meno indica che il calore viene trasferito in direzione opposta a quella del gradiente termico.

I materiali di impiego comune hanno valori di k che variano da un minimo di 0.03 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, per i materiali isolanti, ad un massimo di 420 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, valore della conducibilità dell'argento [48].

Per un flusso termico stazionario, monodirezionale, che attraversa perpendicolarmente un materiale, è possibile l'integrazione della (3.4) in un range di x pari al suo spessore (l) ottenendo:

$$q = -k \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (3.7)$$

dove

T_1 = temperatura della superficie calda (K)

T_2 = temperatura della superficie fredda (K)

l = spessore del materiale che conduce (m).

La conducibilità è dunque la quantità di calore trasferito in direzione perpendicolare da una superficie di area unitaria, a causa di un gradiente di temperatura unitario e in condizioni stazionarie. In sostanza è l'attitudine di una sostanza a trasmettere calore. La conducibilità dipende dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale e non dalla sua geometria.

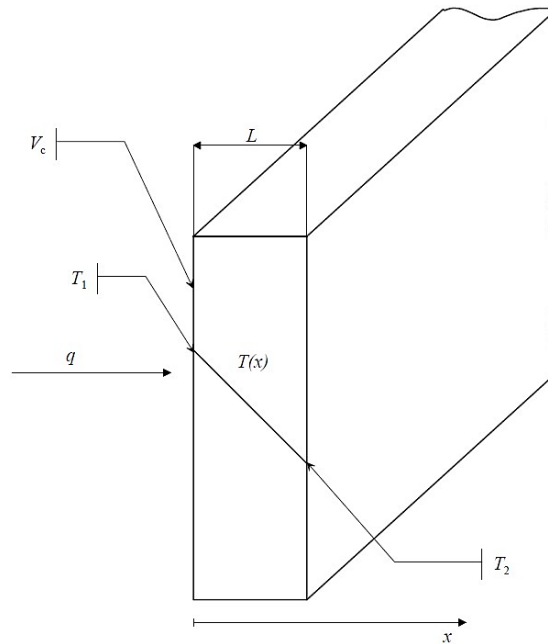


Figura 3-1: conduzione monodimensionale stazionaria.

Nella progettazione di un materiale per isolamento termico, si fa utilizzo di altre grandezze: conduttanza termica (U) e resistenza termica (R). Queste sono così definite:

$$R = \frac{L}{k} \quad (3.8)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (3.9)$$

dove

R =resistenza termica ($m^2 \cdot K/W$)

U = conduttanza termica ($W/ m^2 \cdot K$).

Si sottolinea che le equazioni riportate sono valide solo in regime stazionario; qualora sia necessario progettare un materiale che deve avere performance isolanti nei confronti di flussi non stazionari, è necessario ricorrere all'equazione di variazione del flusso termico. In questo caso entra in gioco una nuova variabile, la diffusività termica, che descrive la velocità con la quale viene trasportato il calore e che è legata alla conducibilità dalla densità e dal calore specifico del materiale considerato.

3.1.3 Convezione

La convezione è il meccanismo di trasporto termico che prevede il moto macroscopico di materia. È il più importante processo di trasporto di calore quando un fluido lambisce una superficie di un solido. La convezione può essere di due tipi:

- Convezione naturale: il fluido responsabile del trasporto è caratterizzato da gradienti termici, quindi da densità differenti. Questa situazione genera il suo moto perché sottoposto alle forze di galleggiamento che si generano e che spingono il fluido più freddo al di sotto di quello caldo.
- Convezione forzata: il moto del fluido è dovuto a forze esterne a prescindere dei gradienti termici esistenti.

L'efficacia dello scambio termico per convezione dipende, in gran parte, dal moto del fluido analizzato. La velocità di quest'ultimo è fortemente legata alla sua viscosità ed è quindi necessario considerare la presenza, tra solido e il fluido che lo lambisce, non solo dello strato limite idrodinamico (cioè legato alla velocità del fluido), ma anche di uno strato limite termico, zona che risente dell'interazione termica con la parete. Per queste ragioni questo meccanismo di trasporto è ben più complesso di quelli già affrontati e necessiterà di relazioni empiriche per essere quantificato. La relazione comunemente utilizzata è la legge di Newton:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (3.10)$$

dove

h = coefficiente di scambio termico per convezione ($W/m^2 \cdot K$)

T_s = temperatura del solido lambito (K)

T_∞ = temperatura indisturbata al limite dello strato termico (K).

Il coefficiente h andrà valutato di volta in volta, calcolandolo con relazioni sperimentali che fanno uso di numeri adimensionali.

Analogamente a quanto fatto per l'irraggiamento e conduzione, è possibile definire una conducibilità termica per convezione (k_C) e una resistenza termica per convezione (R_C):

$$k_{CV} = h \quad (3.11)$$

$$R_{CV} = \frac{1}{k_{CV}} \quad (3.12)$$

dove

k_{CV} = conducibilità termica per convezione ($W/m^2 \cdot K$)

R_{CV} = resistenza termica per convezione ($m^2 \cdot K/W$).

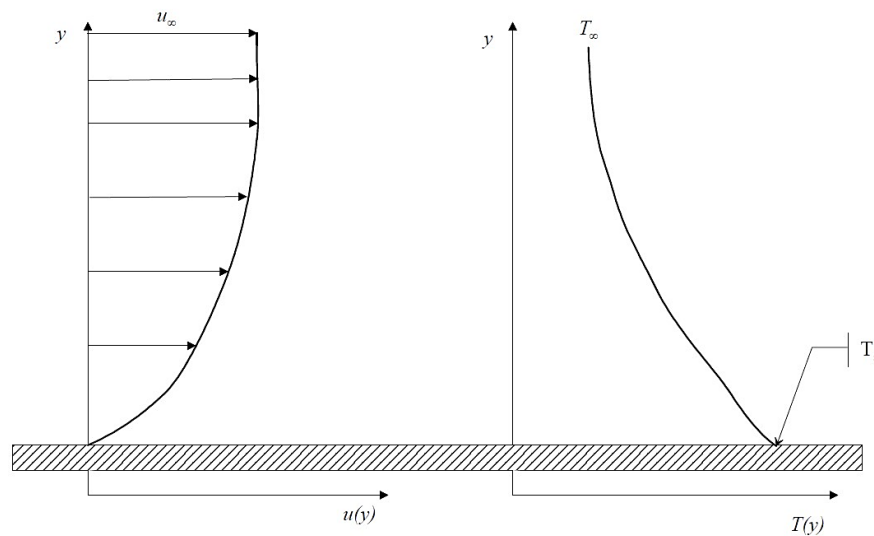


Figura 3-2: strato limite idrodinamico e termico

3.2 I fenomeni di trasporto termico nei materiali fibrosi

La trasmissione del calore attraverso un materiale poroso è un fenomeno molto complesso perché è il risultato della combinazione di diversi meccanismi di trasporto termico. La sua trattazione è stata oggetto di numerosi studi, spinti dalla diffusione dei materiali isolanti ad elevata porosità, dal settore edile a quello più ingegnerizzato dell'*aerospazio*. Le proprietà isolanti dei materiali fibrosi, intesi come solidi costituiti da fibre e aria ad elevata porosità (maggiore del 90%), sono correlate principalmente alla loro abilità nel ridurre la trasmissione del calore per irraggiamento e conduzione, la convezione infatti non avviene nella maggior parte di questi materiali. È necessario poi considerare che l'importanza del contributo dei diversi meccanismi di trasporto alla trasmissione totale del calore, varia considerevolmente con la temperatura e le condizioni di flusso.

Per analizzare le proprietà isolanti di un materiale fibroso, è necessario tenere conto che i fenomeni di trasporto coinvolti sono: conduzione attraverso le fibre, conduzione e convezione dell'aria (o gas) presente nelle porosità e irraggiamento all'interno della struttura. È possibile definire una conducibilità termica apparente (k_{APP}) che descriva in modo semplificato il contributo dei diversi flussi di calore. Quella che segue non è un'equazione matematica, ma solo una relazione concettuale per meglio comprendere la complessità del fenomeno:

$$k_{APP} = k_{GAS} + k_F + k_{IRR} + k_{CONV}$$

dove

k_{GAS} è la conducibilità legata al gas all'interno dei pori ($\sim T^{0.5}$)

k_F è la conducibilità delle fibre, la parte solida del materiale ($\sim T$)

k_{IRR} è la conducibilità legata all'irraggiamento ($\sim T^3$)

k_{CONV} è la conducibilità dovuta ai moti convettivi all'interno dei pori.

Una rappresentazione dei diversi contributi alla conducibilità apparente è presente nella fig. 3-3.

In questa trattazione, sulle orme di diversi studi, [5], [51]–[53], il termine legato alla convezione (k_{CONV}) non è considerato in quanto questa sostanzialmente non ha luogo all'interno dei 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%) e dimensione dei pori di diversi millimetri. Si pensi che un materiale con densità di solo 8 kg/m^3 e fibre di diametro $4 \text{ }\mu\text{m}$ presenta porosità del 99,4% e una dimensione media dei pori di 1 mm che comunque non è sufficiente all'instaurarsi del fenomeno. Considerando che si sono studiati materiali con densità superiori a 20 kg/m^3 e titolo medio superiore a $15 \text{ }\mu\text{m}$, 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 e dipende sostanzialmente dalla numerosità dei punti di contatto tra le diverse fibre. Il termine legato all'irraggiamento è quello più complesso perché subentrano fenomeni di assorbimento, riflessione, scattering e rifrazione delle singole fibre. Inoltre, questo meccanismo di trasporto è influenzato dalle dimensioni delle fibre, dalla loro orientazione, dalla loro interazione con un'onda elettromagnetica e dalla porosità del materiale. Il contributo dell'irraggiamento è talvolta suddiviso in due quote: irraggiamento per assorbimento-emissione (“*radiation conductivity*”) e irraggiamento conseguente a riflessioni e scattering (“*radiation transmission*”). L'importanza del contributo dell'irraggiamento è molto rilevante alle alte temperature, quando la densità del materiale è inferiore a 30 kg/m^3 o quando il gradiente termico a cui è sottoposto il materiale è grande. Si sottolinea però che il confine dato dai valori di queste grandezze non è ben definito dalla letteratura esaminata, che ha evidenziato discordanze sull'argomento.

Un TNT ottenuto con una tecnica *parallel-layd* o *cross-layd* presenta un comportamento anisotropo nei confronti di un flusso di calore, questo trova la maggior resistenza termica quando è perpendicolare alle fibre. Inoltre, Sang S. Woo et al. [5] riportano che anche la conducibilità termica della singola fibra è anisotropa, dieci volte maggiore lungo l'asse della fibra rispetto che nella direzione trasversale.

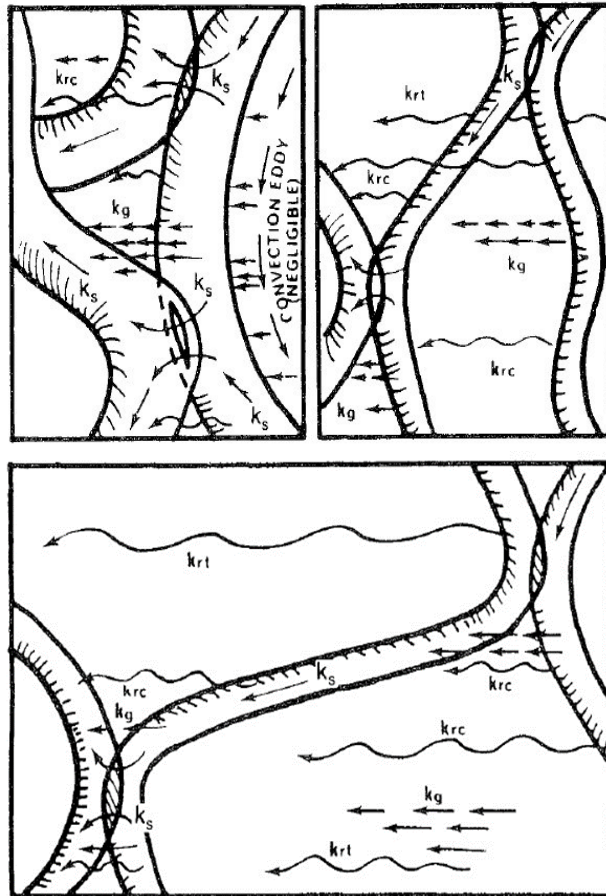
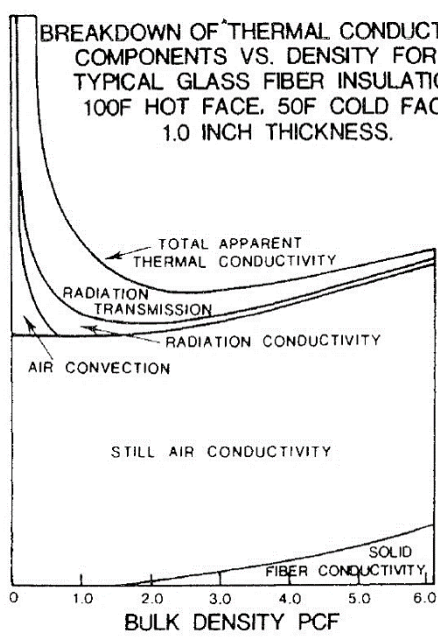
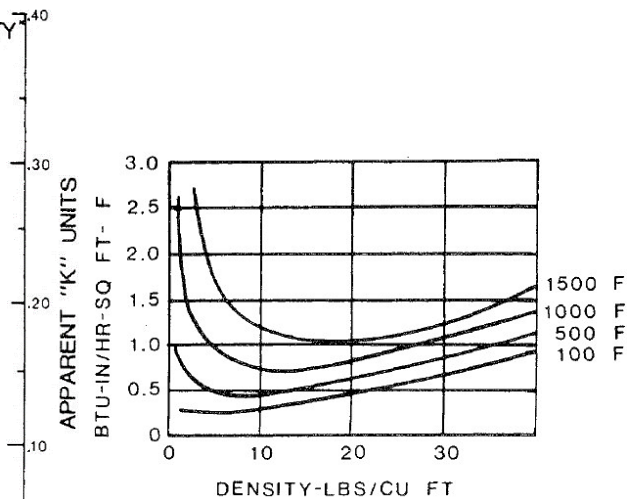


Figura 3-3: Rappresentazione dei diversi contributi alla conducibilità apparente: K_g conduttivo del gas, K_{cv} convettivo, K_s conduttivo delle fibre, K_{rc} e K_{rt} sono i contributi della conduzione per irraggiamento dovuti rispettivamente a processi di assorbimento-emissione e per fenomeni di sola riflessione e scattering.



a)



b)

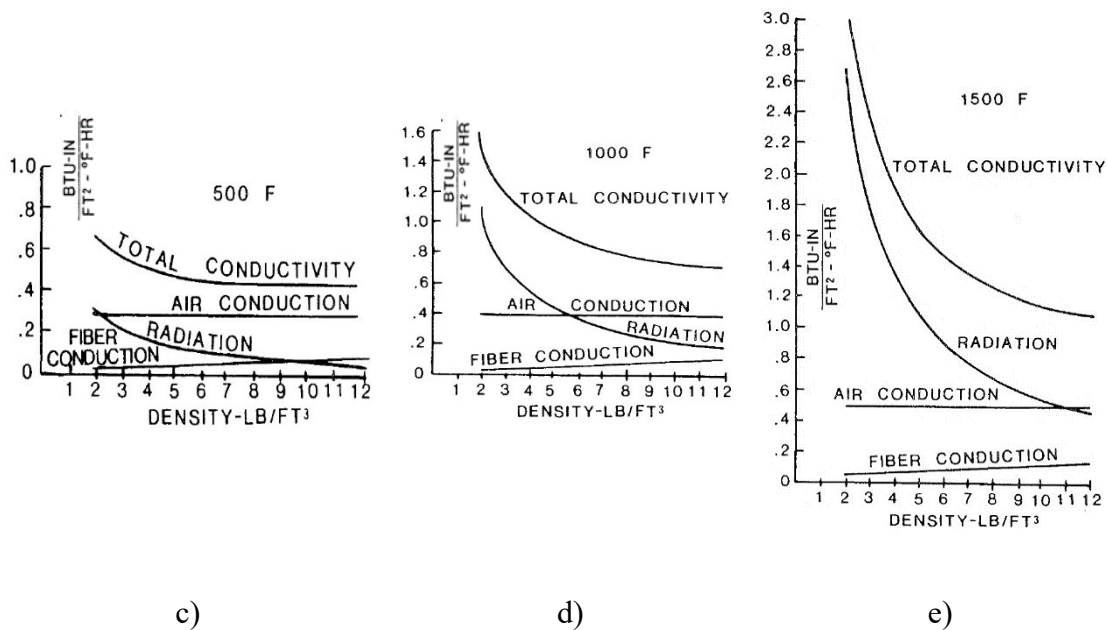


Figura 3-4: Grafici relativi ad un materiale fibroso in lana di vetro. a) conducibilità apparente vs densità, contributo dei diversi meccanismi di trasporto calcolato con un delta di temperatura di 27°C. b) conducibilità vs densità, parametrico nella temperatura. c), d) e e), diversi contributi alla conducibilità vs densità alle temperature di 500, 1000 e 1500°F (260, 540 e 815°C).

Nella fig. 3-4 è possibile comprendere che la conducibilità totale, data dalla sovrapposizione dei vari contributi di trasporto termico, varia sensibilmente con la densità del materiale e la temperatura. È utile fare le seguenti considerazioni:

- La conduzione nelle fibre è molto limitata rispetto agli altri meccanismi di trasporto. I maggiori apporti sono dati dalla conduzione del gas all'interno dei pori e dall'irraggiamento.
- Al crescere della temperatura la conduzione della fase gassosa aumenta ma molto meno di quanto non cresca l'irraggiamento, che è il meccanismo dominante alle alte temperature. Questo perché la conducibilità del gas è in relazione con la temperatura con una potenza di esponente 0.5, quando per l'irraggiamento questo vale 3.
- Il contributo dell'irraggiamento, a bassa temperatura (temperatura ambiente), cala drasticamente all'aumentare della densità del materiale perché al crescere di questa vi è maggior assorbimento da parte della struttura fibrosa che si fa più compatta. A temperatura ambiente il contributo dominante è la conduzione termica del gas.
- Esiste un minimo di conducibilità totale al variare della densità del materiale e della temperatura, in particolare, al crescere della seconda sono più efficaci

materiali più densi. Al contrario, a temperatura ambiente sono più idonei quei materiali che sono meno densi.

- Il contributo convettivo, come già spiegato, è presente solo in strutture particolarmente porose e poco dense.

3.2.1 Un modello teorico sulla conduzione e l'irraggiamento [50], [52], [54]

In questo sotto capitolo si vuole presentare una trattazione teorica sui due meccanismi principali di trasporto del calore in un materiale fibroso ad elevata porosità. In letteratura si trovano numerose pubblicazioni che hanno come oggetto i materiali porosi, assumendo però spesso l'ipotesi della loro isotropia, non verificata nel caso dei TNT. Le altre esposizioni sul tema sono state confrontate e, sulla base della pertinenza con l'obiettivo di questo studio e considerando le difficoltà date dalla complessità dei fenomeni di trasporto, è stato scelto di riportare dei concetti presentati nell'articolo redatto da *Siu-Chun Lee and George R. Cunningham* [52]. Nel loro studio, viene descritto lo sviluppo e la convalida sperimentale di un modello teorico sul trasporto termico da parte di un materiale fibroso ad elevata porosità. I meccanismi termici presi in considerazione sono l'irraggiamento e la conduzione nella fase solida e gassosa. La maggior parte dei materiali fibrosi utilizzati per l'isolamento termico presenta una porosità superiore al 90% e la distanza tra due fibre è mediamente più grande del loro diametro e delle lunghezze d'onda dell'infrarosso. Queste condizioni sono favorevoli ad un buon assorbimento delle radiazioni che irradiano il materiale per fenomeni di scattering e assorbimento. Secondo i ricercatori è necessario considerare, per comprendere la conducibilità totale di un materiale poroso, anche i contributi conduttivi delle fibre e del gas intrappolato nei pori, anche se la trasmissione del calore per mezzo di onde elettromagnetiche è il meccanismo di trasporto dominante.

3.2.1.1 Irraggiamento

I materiali fibrosi ad elevata porosità con spessore maggiore di 1 cm sono materiali *optically thick* (spessi nel campo dell'elettromagnetismo), ovvero con uno spessore ottico (Y) molto maggiore dell'unità. Lo spessore ottico di un materiale è così definito:

$$Y = \ln \frac{\mathcal{W}_i}{\mathcal{W}_t} \quad (3.13)$$

dove

Y = spessore ottico (adim.)

\mathcal{W}_i = potenza della radiazione incidente (W)

\mathcal{W}_t = potenza della radiazione trasmessa (W).

Dunque, Y rappresenta il potere schermante di un materiale, maggiore è il suo valore, minore è la frazione delle onde elettromagnetiche incidenti sul corpo che riescono ad attraversarlo completamente e ad essere trasmesse. Questa definizione è importante perché per un materiale per cui $Y \gg 1$ vale l'approssimazione di Rosseland, utile perché può essere usata per semplificare la descrizione del fenomeno dell'irraggiamento di un corpo. Quando vale l'approssimazione di Rosseland, il trasporto termico per mezzo di onde elettromagnetiche può essere quantificato da una relazione simile a quella di Fourier, definendo una conducibilità termica per l'irraggiamento opportuna:

$$q_{irr} = -k_r \frac{dT}{dy} \quad (3.14)$$

dove

q_{irr} = flusso termico per l'irraggiamento (W/m^2)

k_r = conducibilità termica per l'irraggiamento ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

$\frac{dT}{dy}$ = gradiente di temperatura nella direzione del flusso termico (K).

La k_r è calcolata modificando la relazione valida per i materiali in cui non vi è scattering, l'equazione di partenza è la seguente:

$$k_r = \frac{16\sigma T^3}{3} \int_0^\infty \frac{1}{\zeta_\lambda} \cdot \frac{dI_{b\lambda}(T)}{dI_b(T)} d\lambda \quad (3.15)$$

dove

ζ_λ = coefficiente di assorbimento alla λ (m^{-1}), pari al reciproco del cammino medio di un fotone prima di essere assorbito

$I_{b\lambda}(T)$ = legge di Planck⁴ (W/m^2)

$I_b(T) = \sigma T^4$, massima potenza emessa alla temperatura T , pari a quella di un corpo nero (W/m^2).

Le fibre sono però corpi in cui le radiazioni subiscono scattering e per tenerne conto è necessario modificare le (3.15) sostituendo il coefficiente di assorbimento ζ_λ con un coefficiente di assorbimento modificato (Γ_λ) definito come:

⁴ La legge di Planck quantifica la potenza emessa da un corpo alle differenti frequenze per unità di superficie del corpo. La sua espressione in funzione della lunghezza d'onda è:

$$I_{b\lambda} = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{\hbar c}{\lambda\sigma T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

dove \hbar è la costante di Planck pari a $1.054571817... \times 10^{-34}$ J·s.

$$\Gamma_\lambda = K_\lambda(1 - G_\lambda) + \zeta_\lambda \quad (3.16)$$

dove

Γ_λ = coefficiente di assorbimento modificato (m^{-1})

K_λ = coefficiente di estinzione nella direzione del flusso di calore (m^{-1}), pari alla somma del coefficiente di assorbimento e a quello di scattering (pari al reciproco del cammino medio di un fotone prima di subire scattering)

G_λ = fattore di asimmetria dello scattering (adim.)

3.2.1.2 Conduzione attraverso le fibre

La conduzione del calore attraverso lo scheletro di fibre che costituiscono il materiale poroso è strettamente connessa alle caratteristiche di questa struttura. Ruolo importante è giocato dalla morfologia del reticolo e dai punti in cui le fibre si toccano o legano. Uno sviluppo teorico esatto sulla conduzione della parte solida dei materiali fibrosi è estremamente complesso, data la miriade di possibili percorsi che può seguire il calore, la variabilità nella lunghezza e sezione delle fibre e la determinazione della conducibilità dei punti di connessione tra le fibre. È dunque necessario un approccio semi-empirico al problema. La relazione proposta da *Siu-Chun Lee and George R. Cunningham* è:

$$k_f(T) = F_s \bar{\rho}_s k_s(T) \quad (3.17)$$

dove

$k_f(T)$ = conducibilità termica dello scheletro di fibre ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

F_s = fattore geometrico (m^3/kg), tiene conto delle lunghezze dei possibili cammini termici, della disposizione delle fibre, dimensione dei punti di contatto delle fibre etc., determinabile sperimentalmente

$\bar{\rho}_s$ = densità del materiale che costituisce le fibre (kg/m^3)

$k_s(T)$ = conducibilità termica del materiale che costituisce le fibre ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

3.2.1.3 Conduzione attraverso il gas nei pori

La conducibilità termica del gas nei pori di un materiale fibroso dipende dalla dimensione dei pori e dal cammino libero medio delle molecole del gas. Questo può essere quantificato dalle relazioni:

$$k_g(T, p) = \frac{k_{g0}(T)}{1 + 2\beta \ell_m / P} \quad (3.18)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \frac{9\gamma - 5}{\gamma - 1} \cdot \frac{2 - \alpha_m}{\alpha_m} \quad (3.19)$$

$$\alpha_m = \frac{4m_g m_s}{(m_g + m_s)^2} \quad (3.20)$$

$$\ell_m = \frac{\sigma T}{\sqrt{2} \cdot \Lambda \cdot p} \quad (3.21)$$

dove

$k_{g0}(T)$ = conducibilità termica del gas, dipendente dalla pressione (W/m·K)

ℓ_m = cammino libero medio del gas alla temperatura T

P = diametro medio dei pori (m)

β viene definito nella (3.19) (adim.)

γ = coefficiente di dilatazione adiabatico (adim.), pari al rapporto tra il calore specifico a pressione e volume costante del gas

α_m definito nella (3.20) (adim.)

m_g = massa molecolare del gas (u)

m_s = massa molecolare del materiale delle fibre (u)

Λ = area della sezione delle molecole del gas (m)

p = pressione del gas nei pori (Pa).

Riducendo la dimensione dei pori del materiale o utilizzando il gas a pressione molto bassa, si ha il così detto effetto Knudsen: il cammino libero medio del gas è molto più grande della dimensione media dei pori e la conducibilità è quasi nulla. Questo perché la probabilità di collisione delle molecole del gas con le fibre è molto maggiore che quella tra le molecole del gas, che è alla base della conduzione; le collisioni molecole-fibre non trasferiscono sostanzialmente alcuna energia. [51][54] In questa condizione l'andamento della conducibilità del gas al variare della dimensione media dei pori e della pressione in scala logaritmica è una funzione sigmoidea. Lo si può osservare nelle fig. 3-5 e 3-6.

Da queste considerazioni si comprende che per limitare la conduzione del calore in un materiale fibroso è vantaggioso che il gas nelle porosità abbia un elevato valore di ℓ_m , che esso si trovi a bassa p o che la dimensione media dei pori del materiale sia piccola.

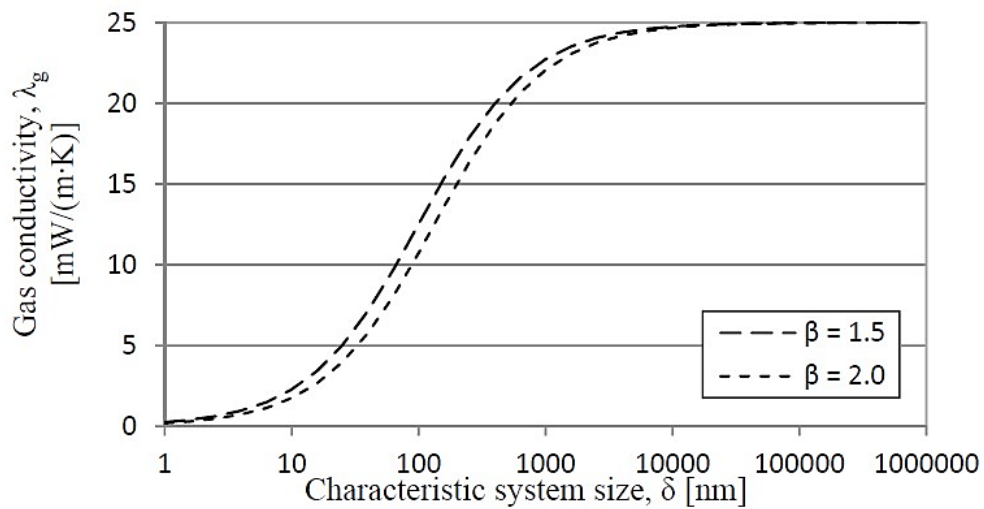


Figura 3-5: Conducibilità dell'aria in funzione della dimensione media dei pori alla temperatura di 20°C e alla pressione di 100kPa.

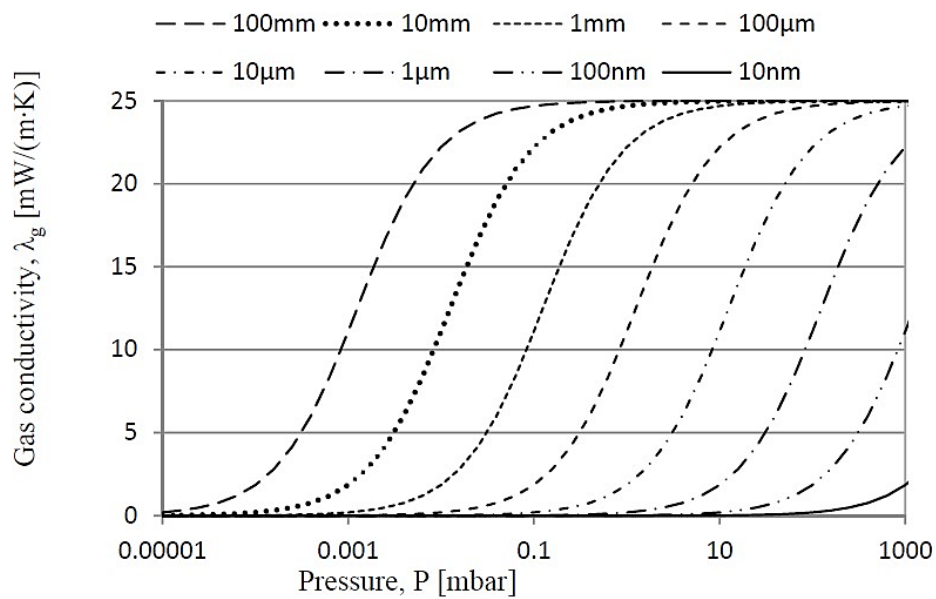


Figura 3-6: Conducibilità dell'aria a 20°C in funzione della sua pressione e per diversi valori di dimensione media dei pori.

3.3 L'importanza dell'isolamento termico e l'utilizzo dei tessuti-non tessuti per realizzarlo

Con *comfort* termico si intende la sensazione generata da una situazione in cui gli aspetti fisici che caratterizzano l'aria che entra in contatto con il corpo umano creano un microclima termicamente confortevole che suscita una sensazione di benessere. In questo stato il soggetto non avverte sensazioni né di caldo né di freddo. La ricerca di questo microclima ottimale avviene in molti settori: edilizia, *automotive*, arredamento,

abbigliamento, trasporti etc. La maggior parte della popolazione trascorre molto tempo all'interno degli edifici lamentando spesso disagi per assenza di comfort termico. Per gli individui che si trovano ad affrontare attività all'aria aperta, in climi rigidi o particolarmente caldi, il corretto isolamento termico, da parte degli indumenti che indossano, può rappresentare una condizione di sopravvivenza.

La direttiva europea 2018/844/UE definisce propositi di miglioramento dell'efficienza energetica dei paesi membri dell'Unione. Tra gli obiettivi che si leggono nel documento, vi è il miglioramento delle performance di isolamento termico degli edifici, responsabili del 40% del consumo globale di energia. Il totale deve infatti essere ridotto del 50% entro il 2050 rispetto al 1990. [54] Anche per questa ragione il mercato dei materiali per l'isolamento termico ha visto negli ultimi decenni un incremento della ricerca per sviluppare proposte innovative ed efficienti.

I materiali isolanti termici, se opportunamente progettati, presentano numerosi vantaggi per la maggior parte delle applicazioni:

- Riducono l'impatto ambientale in quanto è necessaria meno energia per il riscaldamento/raffreddamento degli spazi
- Un ridotto consumo energetico rappresenta un risparmio economico
- Migliorano la salute e il benessere delle persone attraverso la realizzazione della situazione di *comfort* termico
- Possono proteggere ciò che isolano, ad esempio, una costruzione dal danneggiamento da parte dagli agenti atmosferici e dagli sbalzi termici.
- Possono migliorare il comportamento in caso di incendio dell'ambiente in cui sono presenti.

Tra i materiali isolanti più diffusi ci sono i materiali inorganici (fibra di vetro o roccia e materiali cellulari in silicato di calcio e ceramici), materiali organici (fibrosi in cellulosa, cotone, lana e polimeri sintetici o a celle di sughero, gomma, PES, PE, PU e altri polimeri) e materiali metallici o metallizzati a formare membrane e pannelli riflettenti (specifici per ridurre la conduzione per irraggiamento). [54]–[56]

I tessuti-non tessuti, essendo materiali porosi, possono comportarsi efficacemente da materiali coibentanti. Tra i principali vantaggi, nell'utilizzare un TNT anziché altri sistemi per l'isolamento termico, c'è il loro basso peso specifico, l'ampia gamma di densità e spessori realizzabili e il basso costo di produzione. Diversamente delle schiume in poliuretano, ad esempio, i TNT hanno un processo produttivo con minor impatto ambientale.

Sebbene i TNT realizzati con fibre inorganiche (vetro, lana di roccia) siano ampiamente utilizzati per l'isolamento, queste fibre sono potenzialmente pericolose per la salute se inalate o se entrano in contatto con la pelle. Una valida alternativa sono le fibre sintetiche

o naturali, la cui maggior parte è anche efficacemente riciclabile. Tra i materiali fibrosi più diffusi e utilizzati con quest'ottica, ci sono quelli realizzati in PES, che trova il maggior impiego nel settore edile e dell'auto. Ciò è dovuto alle buone caratteristiche del polimero: meccaniche, di resistenza all'umidità, di stabilità all'esposizione solare e bassa reattività chimica con acidi e basi a temperatura ambiente. Uno studio condotto da R. Petkova-Slipets et al. [57] ha rilevato che due TNT in PES, ottenuti con due tecniche differenti di interlacciatura (chimica e termica), hanno dimostrato conducibilità termica confrontabile con materiali come il PES e PU espanso.

3.4 Fattori che influenzano la conducibilità termica di un tessuto-non tessuto

La capacità coibentante dei tessuti-non tessuti può essere controllata andando ad agire sulle caratteristiche della loro struttura fibrosa. Alla base della scelta del materiale per migliorare l'isolamento termico di un ambiente, è necessario considerare l'applicazione per la quale è destinato. Fattori che vanno considerati sono il gradiente termico a cui il materiale è sottoposto in esercizio, l'esposizione ad agenti atmosferici, le regolamentazioni in tema di sicurezza e la richiesta in termini di conduttanza termica che si deve ottenere. Compito di chi deve lavorare con il *confort* termico è quello di determinare la combinazione dei fattori che devono caratterizzare un TNT perché abbia la massima efficienza per un'applicazione specifica.

Questo sotto capitolo si occupa quindi di mettere in evidenza quelli che sono i fattori determinanti per la conducibilità termica dei tessuti-non tessuti attraverso una revisione della letteratura.

3.4.1 Caratteristiche delle fibre

I tessuti-non tessuti sono, per definizione, materiali costituiti da fibre. Le loro caratteristiche sono quindi i principali parametri che giocano un ruolo nella determinazione delle capacità dei TNT di ostacolare la trasmissione del calore.

3.4.1.1 Materiale

Sul mercato sono disponibili materiali isolanti costituiti da diversi tipi di fibre. Tra le più utilizzate quelle inorganiche, soprattutto di vetro e lana di roccia, ma hanno ormai preso piede le fibre sintetiche e naturali. Il materiale di cui sono costituite le fibre le contraddistingue in termini di rigidezza, proprietà superficiali, allungamento e resilienza. Per questo è un primo fattore che può avere un ruolo nella conducibilità di questa classe di materiali. Nello studio di Tao Y. Et al. [53] sono utilizzati numerosi modelli per

determinare la conducibilità di TNT caratterizzati da diversi orientamenti delle fibre. I ricercatori parlano dell'importanza, per i modelli di calcolo utilizzati, di conoscere la conducibilità delle singole fibre, che è proprietà intrinseca dei materiali di cui sono costituite. *E. T. Dönmez* [45] ha studiato invece le proprietà termoacustiche di TNT prodotti a partire da scarti di filatura: la composizione dei campioni è stata variata e dai risultati sperimentali è emerso che questa influenzasse solo marginalmente la loro conducibilità; la massima variazione del λ , per campioni di pari densità ma costituiti da mix fibra diversi, è stata infatti di 2.9%.

3.4.1.2 Titolo

Il diametro delle fibre è stato preso in considerazione da numerosi articoli in letteratura che convergono nell'associare un aumento di conducibilità al crescere del diametro delle fibre [1], [5], [51], [58]–[60]. *S. S. Woo et al.* [5] hanno testato TNT di composizione diversa studiando se al variare del titolo delle fibre variano anche i flussi termici dei diversi meccanismi di trasporto termico, conduzione ed irraggiamento. Dagli esperimenti è emerso che l'influenza sulla conducibilità è trascurabile mentre ciò che varia è l'assorbimento del calore irradiato, maggiore nei TNT con fibre più fini. Anche *C. M. Pelanne* [51] e *P. Kaleeswaran et al.* [58] concordano che più piccolo è il diametro delle fibre, maggiore è la superficie delle stesse che può assorbire le radiazioni o causare scattering, e quindi diminuire la conduzione per l'irraggiamento (fig. 3-7). *F. Karimi et al.* [1] hanno invece attribuito l'aumento della conducibilità termica al crescere del diametro delle fibre al minor numero di punti di contatto fibra-fibra che costituiscono altrimenti dei colli di bottiglia per il calore condotto nella struttura fibrosa.

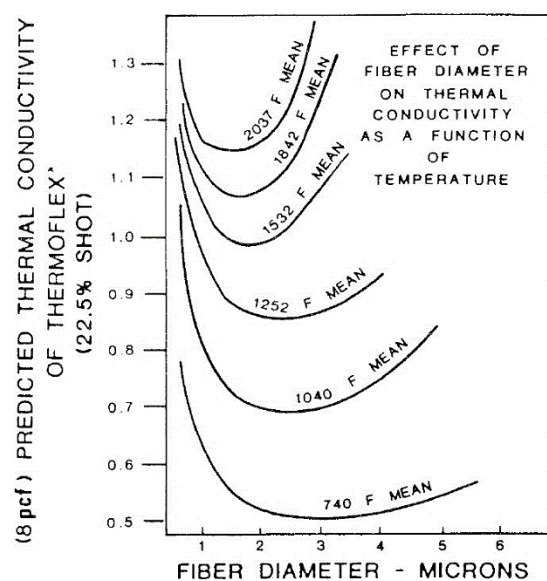


Figura 3-7: Conducibilità termica al variare del diametro delle fibre. Grafico parametrico nella temperatura.

3.4.1.3 Forma della sezione

Lo studio sull'influenza della forma della sezione delle fibre sulla conducibilità di un TNT è stato preso in considerazione solo da pochi articoli nella letteratura consultata. *P. Kaleeswaran et al.* [58] hanno rilevato che la presenza di fibre a sezione cava, nei mix fibra che hanno preparato, riduce la conducibilità termica. Questo sarebbe dovuto al maggior contenuto di aria intrappolato dalla struttura fibrosa. *T. Yang et al.* [53], nella loro trattazione teorica e sperimentale per determinare un modello per la previsione della conducibilità di TNT in PES, prendono in considerazione la conducibilità di fibre a sezione cava che presentano la fase solida e gassosa disposte in parallelo rispetto ad un flusso termico nella direzione della fibra. Gli studiosi propongono una relazione che lega la conducibilità della singola fibra cava con i suoi raggi caratterizzanti (diametro esterno della fibra e diametro interno della cavità) e la conducibilità del materiale che ne costituisce la porzione solida e del gas contenuto nella cavità.

3.4.2 Proprietà del tessuto-non tessuto

La conducibilità termica di un TNT dipende, in modo sostanziale, dalle caratteristiche geometriche e strutturali dello stesso. Questo è confermato dalla letteratura sull'argomento.

3.4.2.1 Porosità

Considerando che la conduzione tramite le fibre e l'aria intrappolata nei pori è tra i principali fenomeni di trasporto termico nei materiali porosi, la porosità, secondo *F. Karimi et al.*[1], ha un ruolo importante nella determinazione della loro conducibilità totale. In particolare, la conducibilità diminuisce all'aumentare della porosità perché si ha maggior frazione di fase gassosa, che ha un k molto minore della frazione solida. Lo stesso andamento è stato osservato da *T. Yang et al.*[61] che hanno anche verificato l'esistenza di una proporzionalità tra porosità e resistenza termica. *S. S. Woo et al.* [5] spiegano che la convezione e l'irraggiamento sono rilevanti, come meccanismi di trasporto termico, solo per porosità rispettivamente superiori al 99% e 97%. La conduzione della fase solida (fibre) invece ha un ruolo trascurabile fintantoché la porosità non è inferiore all'80%. Il meccanismo di trasporto termico principale sarebbe dunque la conduzione del gas contenuto nei pori con valore minimo in corrispondenza di una porosità del 97%.

3.4.2.2 Spessore

Diversi articoli reperiti affermano che lo spessore di un materiale poroso è il principale parametro che ne controlla le resistività termica. In particolare, questa cresce all'aumentare dello spessore. Questo è dovuto ad un maggior volume di aria intrappolata

nei pori e un maggior effetto schermante nei confronti dell'irraggiamento. [1], [58], [61]–[64].

3.4.2.3 Densità

Studiando le performance termoisolanti di pannelli per l'edilizia realizzati con rifiuti dell'industria tessile, *E. T. Dömez* [45] afferma che la conducibilità dei TNT cresce con la densità. Questo è stato rilevato in campioni con elevate densità (100-300 kg/m³) e sarebbe dovuto alla minor porosità del materiale. La conducibilità termica e la densità hanno dimostrato di essere in proporzionalità diretta con un R² di 0.983. Sempre occupandosi di materiali ad elevata densità, *G. J. Morris* [64] ha riportato che la densità aumenta la conducibilità del TNT ma che se si eccede un certo valore, la proprietà termica diminuisce. *S. Sundaresan et al.* [59] si sono invece occupati di TNT a bassa densità (5-15 kg/m³) e hanno costatato un andamento opposto: la resistività termica aumenta con la densità perché la struttura fibrosa è più tortuosa. Il cammino libero medio delle radiazioni termiche è inferiore con un conseguente maggior assorbimento delle stesse.

3.4.2.4 Grammatura

Il peso in grammi di un metro quadro di TNT influisce sulla conducibilità del materiale: all'aumentare della grammatura il k diminuisce. Questo sarebbe dovuto ad un maggior impaccamento della struttura fibrosa, i maggiori punti di contatto fibra-fibra e una maggior tortuosità delle cavità. [61], [62]. *Kaleeswaran et al.* [58] aggiungono che una densità superficiale maggiore significa più fibre per unità di superficie e quindi un maggiore effetto di scattering delle radiazioni termiche.

3.4.3 Altri fattori

Dalla letteratura analizzata è emerso che le proprietà termiche dei TNT dipendono anche da altri fattori rispetto che a quelli elencati fino ad ora. In questo sotto capitolo ci si limiterà a dare soltanto degli accenni sulla letteratura reperita, non essendo molto corposa ma comunque di interesse per future ricerche sul tema.

3.4.3.1 Processo produttivo e orientazione delle fibre

Nell'articolo redatto da *S. K. Obendorf et al.*[6] sono state confrontate le proprietà termiche di TNT ottenuti con la tecnica di formatura del velo *air-laid* e *cross-laid*. I provini ottenuti con la prima tecnica si sono rilevati efficaci nell'isolamento termico a spessori inferiori di quelli ottenuti da un faldatore. Inoltre, per i materiali *air-laid* la conducibilità aumenta gradualmente con la grammatura mentre per quelli *cross-laid* questa diminuisce rapidamente all'aumentare della densità superficiale. In generale,

provini con fibre con orientazione più aleatoria dimostrano le migliori caratteristiche termoisolanti per la struttura più tortuosa e maggiormente impaccata.

T. Yang et al.[53] hanno indagato l'effetto dell'orientazione delle fibre in TNT in poliestere, grazie ad un software in grado di calcolarne l'angolo medio di inclinazione rispetto al flusso termico. Gli studiosi hanno osservato, come altri ricercatori [1], [61], un evidente aumento della resistenza termica all'aumentare dell'orientazione delle fibre perpendicolarmente al flusso termico. Questo perché le fibre disposte trasversalmente riducono la facilità di conduzione generando un percorso più tortuoso per il calore. Un'ulteriore spiegazione è fornita da *S. S. Woo et al.*[5], secondo i quali esiste una forte anisotropia tra la conducibilità delle fibre lungo il proprio asse e nella direzione trasversale, le due proprietà stanno infatti ad un rapporto di 10:1 e questo divario aumenta se si considerano fibre cave.

3.4.3.2 Applicazione di layer

Nello studio termico-acustico di *E. T. Domez* [45] sono stati studiati dei pannelli con applicazione in edilizia ottenuti da materie prime di riciclo. Alcuni campioni di diversa densità sono stati accoppiati con un foglio di alluminio spesso 14 μm . Dai risultati è emerso che la presenza del *layer* non ha alcun effetto sulla conducibilità termica anche al variare della loro posizione nei confronti della direzione del flusso termico. L'utilizzo del foglio metallico potrebbe però essere a vantaggio di altre proprietà come quelle di schermatura elettromagnetica, senza inficiare l'isolamento termico.

3.5 Correlazione tra assorbimento acustico e isolamento termico dei tessuti-non tessuti

Alcuni articoli scientifici reperiti hanno preso in considerazione contemporaneamente l'assorbimento acustico e l'isolamento termico dei TNT [1], [45], [59], [61]. È possibile notare che la maggior parte dei parametri geometrici e strutturali che caratterizzano un materiale poroso hanno un'influenza su entrambe le proprietà. *T. Yang et al.*[61] hanno analizzato come varia l'efficacia dell'isolamento termoacustico con le proprietà di TNT realizzati in fibra in PES. In particolare, lo spessore del materiale, la sua grammatura e il titolo delle fibre si sono rilevati fattori che hanno un peso nella determinazione delle capacità sia acustiche che termiche. Sono stati quindi presi in considerazione la conducibilità termica, la resistenza termica, l'NRC e un coefficiente di assorbimento acustico medio ($\bar{\alpha}$), calcolato facendo la media aritmetica tra gli α di tutte le frequenze con valore intero compreso tra 25 Hz e 3200 Hz. La prima osservazione dei ricercatori è che non c'è una forte correlazione tra conducibilità e NRC o $\bar{\alpha}$ (R^2 rispettivamente pari a

0.60 e 0.69). Diversamente, come riportato nella fig. 3-8, esiste una buona relazione tra assorbimento acustico e resistenza termica: tra le proprietà esiste una proporzionalità diretta. Maggiore è l'energia acustica assorbita, minore è il calore condotto dal TNT e viceversa.

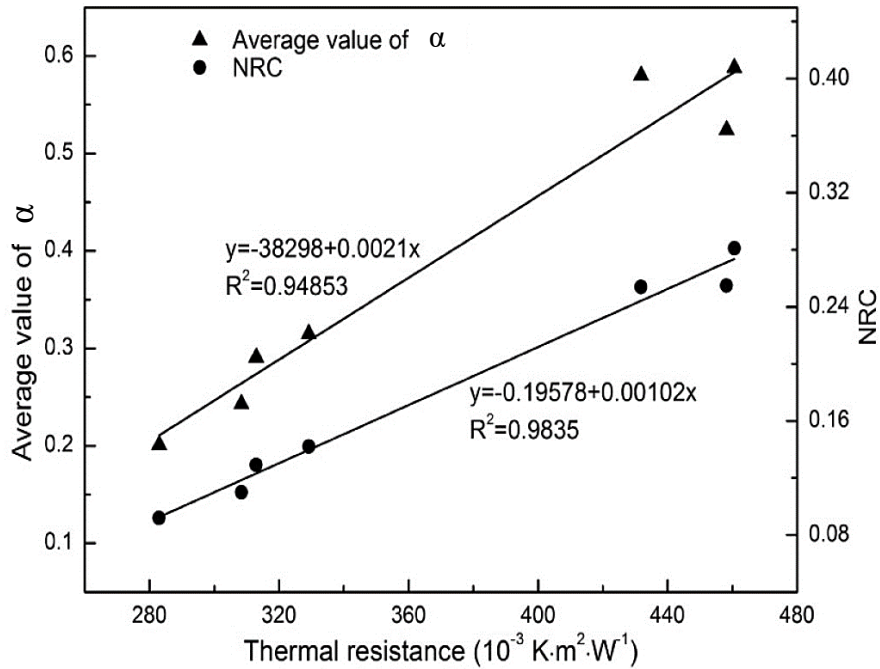


Figura 3-8: Correlazione tra resistenza termica e proprietà acustiche (NRC e $\bar{\alpha}$) di un TNT in fibra di poliestere.

Capitolo 4

Materiali

Questo capitolo si occupa di presentare i materiali utilizzati nelle prove sperimentali. I tessuti-non tessuti analizzati sono costituiti da fibre in polietilene tereftalato (PET) legati con processo termico grazie alla presenza di fibre bicomponenti. Si fornisce quindi una panoramica sul polimero PET, per poi discuterne l'applicazione per la produzione di fibre e quindi di tessuti-non tessuti. Segue una sezione che descrive la tipologia di fibre bicomponenti adoperate, quelle *sheath-core*. Infine, si specificheranno le principali caratteristiche delle fibre utilizzate a partire dalle schede tecniche dei relativi produttori.

4.1 Polietilene tereftalato [65]

Il polietilene tereftalato è un polimero termoplastico aromatico appartenente alla famiglia dei poliesteri, caratterizzata dal gruppo funzionale estere. I PES sono utilizzati principalmente per la produzione di manufatti termoformati, fibre sintetiche e contenitori di bevande e alimenti. Il PET è ampiamente utilizzato perché, dal punto di vista commerciale, combina bassi costi di produzione e ottimo equilibrio tra le sue proprietà. Delle peculiarità del PET è nota la facilità di *processing* allo stato fuso, la buona resistenza meccanica, l'elevato effetto barriera nei confronti dei gas, la trasparenza ottica, la capacità di cristallizzare per stiro, la resistenza termica, il buon comportamento al *creep*, la tingibilità, la resistenza chimica, l'autoestinguenza e la riciclabilità.

La sintesi del PET oggi avviene principalmente tramite reazione di esterificazione diretta tra acido tereftalico (TA) e glicole etilenico (EG) con produzione di acqua (policondensazione). Il processo è termicamente attivato da temperature di 220-260°C (superiori al punto di ebollizione del EG) e pressione di 2.7-5.5 bar. Uno schema della reazione è riportato nella fig. 4-1. Le proprietà fisico-chimiche del PET sono riportate nella tabella 4-1. La struttura del PET è semicristallina se la velocità di raffreddamento del fuso è sufficientemente lenta o se si utilizzano agenti nucleanti, mentre è amorfa se la cristallizzazione è inibita, ad esempio attraverso un processo di stiro.

Tabella 4-1: Principali proprietà fisico-chimiche del PET [66].

<i>Proprietà</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Peso molecolare medio	g/mol	30,000-80,000
Densità	g/m ³	1.33-1.40
Temperatura di transizione vetrosa (T _g)	°C	69-115
Temperatura di fusione (T _m)	°C	265
Entalpia di fusione	kJ/mol	24.1
Sforzo a rottura (trazione)	MPa	50-80
Allungamento a rottura (trazione)	%	30-300
Modulo di Young	MPa	1700
Indice di rifrazione	adim.	1.57-1.58

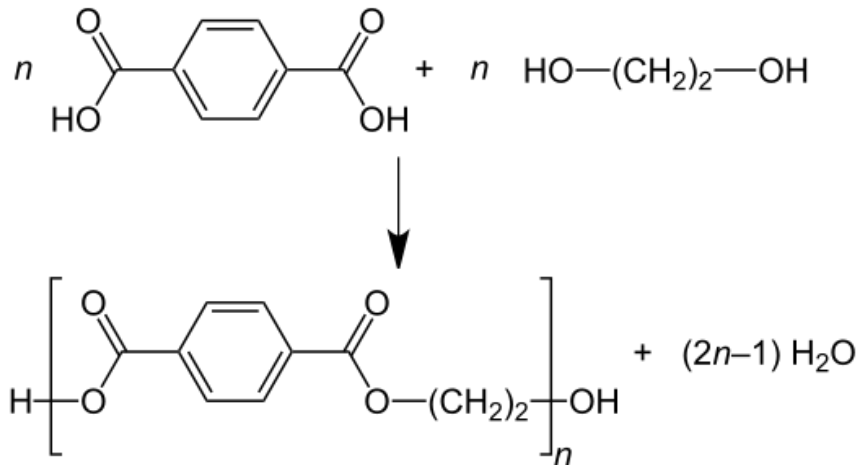


Figura 4-1: Reazione di sintesi del PET per esterificazione.

4.2 Fibre e tessuti-non tessuti in PET [15], [67]

Il 60% della produzione di polietilene tereftalato è destinato alla produzione di fibre e fiocchi, adoperati principalmente nel settore dell'abbigliamento, dell'arredamento, dell'industria, dell'auto, della filtrazione, del geotessile e della tessitura.

Per la produzione di fibre corte in PET è utilizzata una materia prima con viscosità intrinseca di 0.65-0.75. Il polimero in pellet vergine o in scaglia da riciclo subisce una fase preparatoria in cui viene cristallizzato ed essiccato per evitare depolimerizzazione durante le fasi successive. È quindi inserito nell'estrusore che lo riscalda fino alla temperatura di 270-290°C e lo estrude tramite apposite filiere, ognuna delle quali conta innumerevoli orifizi dai quali fuoriescono i filamenti. Questi ultimi sono raffreddati ad aria e raccolti in fasci (*tow*). I fasci entrano in una sezione di stiratura dove vengono allungati da rulli. Il rapporto di stiro è il parametro che governa le caratteristiche meccaniche e il titolo delle fibre. Le molecole di PET durante la stiratura subiscono allineamento nella direzione di stiro, fatto che genera tensioni interne nel materiale che necessita quindi di essere sottoposto a stabilizzazione in forno. Al termine di questi trattamenti il PET è raffreddato. I fasci di filamenti sono guidati all'interno della crettatrice, macchinario che impartisce la forma del cretto. Infine, vengono ottenute le fibre corte con un'operazione di taglio. Le fibre così ottenute possono essere pressate e imballate o essere direttamente utilizzate in impianto per la produzione di TNT.



Figura 4-2: Estrusione di fibre in PES.

Le principali peculiarità delle fibre in PES utilizzate per la produzione di TNT sono il basso costo, la buona resistenza meccanica specifica, la facilità con cui è possibile tingerle, la buona stabilità geometrica, la resistenza all'usura e al lavaggio. Inoltre, per quanto riguarda la loro superficie laterale, sul mercato sono disponibili un'ampia varietà

di finiture. La sezione trasversa può invece avere diverse forme, come quella trilobata, cava o a lobi, ottenibili variando la geometria degli orifizi di estrusione.

4.3 Fibre bicomponenti *sheath-core*

Le fibre bicomponenti sono fibre prodotte a partire dalla simultanea estrusione di due polimeri in un unico filamento. Possono essere classificate in base alla distribuzione dei due polimeri nella sezione trasversale in *side-by-side* (polimeri affiancati), *islands-in-the-sea* (polimero matrice e polimero disperso), *splittable* e *sheath-core*; una loro rappresentazione è presente nella fig. 4-3.

Nel realizzare i TNT oggetto di analisi sono state utilizzate fibre bicomponenti di tipo *sheath-core*; queste presentano un polimero a cuore completamente circondato da una guaina costituita da un polimero differente. Questa morfologia può essere sfruttata per realizzare materiali termo-legati andando ad utilizzare polimeri con differente T_m . Si fa in modo che, se la fibra viene riscaldata ad una temperatura intermedia tra le due T_m , solo il polimero che costituisce la calotta esterna della fibra fonda, creando punti di reticolazione nel materiale; il polimero a cuore rimane invece inalterato.

La produzione delle fibre di tipo *sheath-core* avviene convogliando i due polimeri allo stato fuso in una regione molto prossima agli orifizi della filiera, da cui vengono poi estrusi. Il materiale che deve costituire il *core* della fibra è introdotto al centro dell'orifizio di estrusione mentre quello del *sheath* gli è disposto attorno. Un'altra tecnica per produrre questo tipo di fibre è di estrarre solo il polimero a cuore della fibra e di immergere il filamento così ottenuto in un bagno dell'altro polimero. [68]

Le fibre bicomponenti utilizzate sono realizzate da un *core* in PET ($T_m = 265^\circ\text{C}$) e una calotta esterna in co-poliestere (CoPES) ($T_m = 110-150^\circ$).

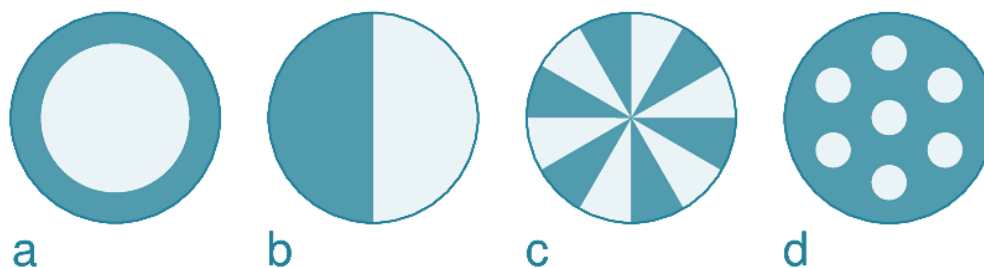


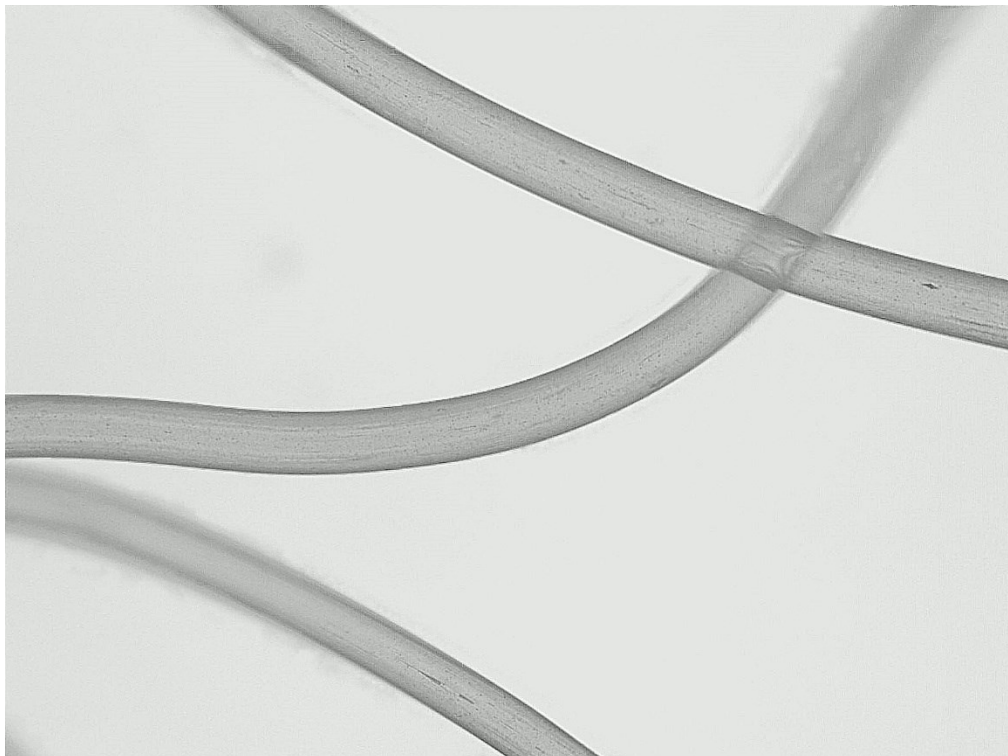
Figura 4-3: Rappresentazione della geometria della sezione di fibre bicomponenti: a) *sheath-core*, b) *side-by-side*, c) *splittable* e d) *islands-in-the-sea*.

4.4 Specifiche delle fibre utilizzate

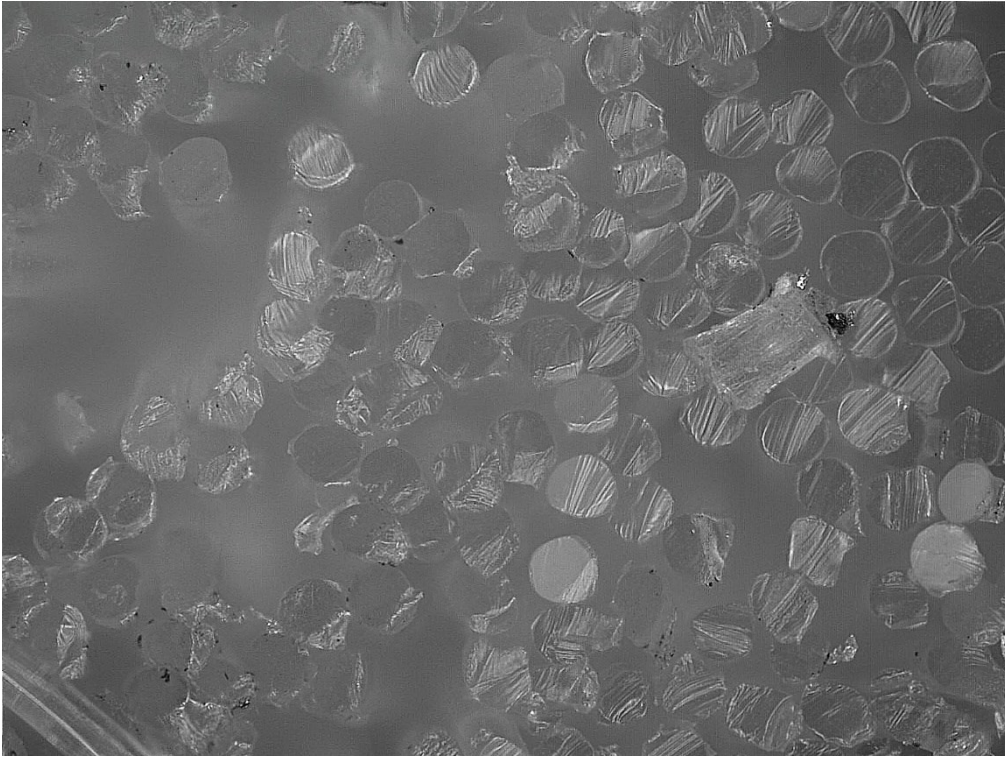
I tessuti non-tessuti che si sono testati sono stati prodotti a partire da fibre in PET. Le loro caratteristiche fisico-meccaniche, dichiarate dai produttori, sono riassunte nella tabella 4-2. Sono poi state utilizzate fibre bicomponente *sheath-core* con nucleo in PET e guaina in co-PES basso fondente. Le loro specifiche si trovano nella tabella 4-3.

Tabella 4-3: Caratteristiche fisico-meccaniche dichiarate dal produttore delle fibre bicomponente *sheath-core* in PET-co-PES.

	<i>Huvis</i>
	<i>Bicomponente 4.4</i>
<i>Tipologia</i>	<i>Sheath-core</i>
<i>Colore</i>	bianco
<i>Densità (kg/m³)</i>	/
<i>Titolo (dtex)</i>	4.7
<i>Lunghezza (mm)</i>	51
<i>Cretto (c/in)</i>	7.0
<i>Tenacità (g/dtex)</i>	3.6
<i>Allungamento a rottura (%)</i>	50
<i>T_m (°C)</i>	260 core-110 sheath

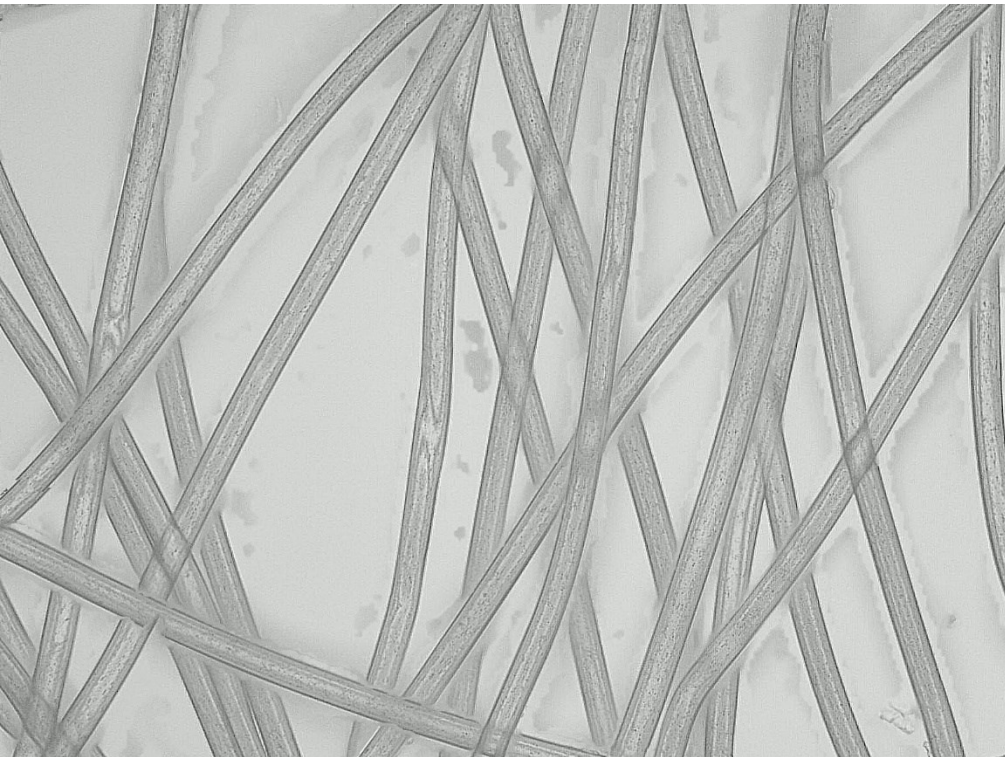


a)

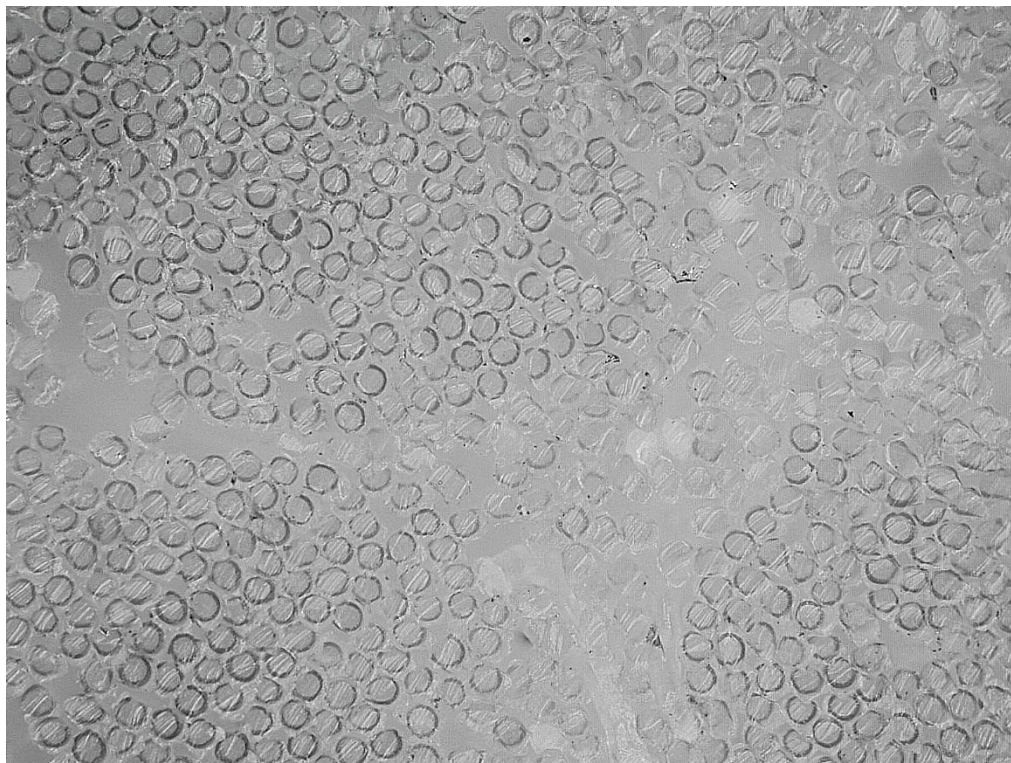


b)

Figura 4-4: Fotografie al microscopio elettronico di una fibra in poliestere (a) e della sua sezione (b) con titolo 17dtex e sezione circolare. Ingrandimento: 1000x.



a)



b)

Figura 4-5: Fotografie al microscopio elettronico di una fibra in poliestere bicomponente (a) e della sua sezione (b) con titolo 4.7 dtex e sezione circolare *sheath-core*. Ingrandimento: 1000x.

Capitolo 5

Metodi

5.1 Metodi statistici [69]

Per impostare le analisi da svolgere, ed elaborare i dati raccolti, si è utilizzato il supporto del software Minitab® e diverse tecniche statistiche. Queste fanno parte delle tecniche di inferenza statistica, ramo della statistica che si pone l'obiettivo di generalizzare le informazioni ottenute da un campione alla totalità della popolazione di cui fa parte e che non viene osservata. Queste tecniche permettono di controllare e quantificare il grado di incertezza della generalizzazione in termini probabilistici. Alla base dell'inferenza c'è il Teorema del Limite Centrale di Kolmogorou che recita: “quando l'ampiezza del campione casuale è sufficientemente grande, la distribuzione della media campionaria può essere approssimata dalla distribuzione normale indipendentemente dalla forma della distribuzione dei singoli valori della popolazione”.

Di seguito si presenteranno brevemente le statistiche utilizzate.

5.1.1 *Design of Experiments, 2-level full factorial*

Design of Experiments (DOE) è una tecnica statistica che permette di modellare e analizzare uno o più esperimenti con lo scopo di identificare i fattori più impattanti sul valore di una grandezza risposta e di ottimizzarne il valore per raggiungere una risposta obiettivo. Un'analisi DOE prevede una fase di *screening* e una fase di *modeling*. La prima ha l'obiettivo di identificare, se questo non è noto, quanti e quali fattori sono determinanti per la grandezza risposta, particolarmente utile quando questi sono in un numero elevato. La fase di *modeling*, invece, permette di studiare come ottimizzare il livello di ciascun fattore identificato come significativo dalla fase di *screening*. Il vantaggio di utilizzare la tecnica DOE è quello di analizzare una popolazione ristretta di unità statistiche mantenendo una buona rappresentatività dell'intera popolazione non analizzata. Un altro vantaggio è che viene analizzata l'influenza sia dei fattori singoli che della loro interazione.

La risoluzione di un modello DOE identifica il sottoinsieme di interazioni che viene sottoposto all'analisi; maggiore è la risoluzione, maggiore è la qualità dei risultati che si possono ottenere.

Le assunzioni alla base di un'analisi DOE riguardano la dispersione dei residui (stime degli errori). La loro distribuzione deve verificare l'ipotesi di linearità, di distribuzione normale, di omoschedasticità e di indipendenza dei valori.

Per il presente lavoro è stato utilizzato il metodo *2-level full factorial* per analizzare tre variabili sperimentali e delle quantità risposta, tutte grandezze qualitative continue. Questo metodo prevede di analizzare per ciascun fattore il livello massimo e minimo ("*2-level*") con la risoluzione massima ("*full factorial*"). I trattamenti dei fattori (combinazione dei livelli relativi a ciascun fattore) in questo caso possono essere identificati dai vertici di un cubo, rappresentato in figura 5-1. Questo metodo rientra nella classe dei DOE di *modeling*. Il perché di questa scelta è l'ampia descrizione in letteratura dei parametri analizzati che sarebbero determinanti per le variabili risposta considerate.

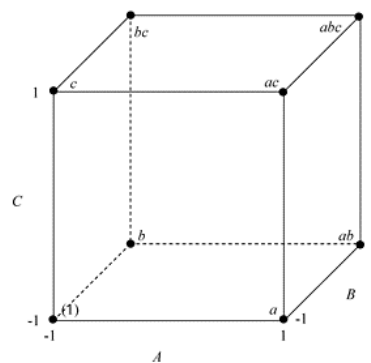


Figura 5-1: rappresentazione geometrica di un *2-level full factorial* applicato ad uno studio DOE di tre fattori (A, B e C). Il livello massimo è indicato da +1 e quello minimo da -1. I vertici del cubo rappresentano i trattamenti sottoposti ad analisi se si imposta la risoluzione massima.

È stato inoltre deciso di aggiungere un "*center point*", un livello intermedio a quello minimo e massimo. In questo modo viene analizzata la presenza di curvatura nella funzione che descrive la variabile risposta. Si inseriscono tre repliche, ovvero test con il medesimo trattamento dei fattori, per aumentare la precisione del modello. Nella creazione del DOE viene indicato che le prove sono eseguite in quattro campagne ("*blocks*") diverse. Questo per tenere conto della variabilità introdotta nell'eseguire le prove sperimentali in momenti differenti, necessario per alcune che richiedono dei tempi lunghi. Infine, per abbassare la componente di errore nella risposta, l'ordine con cui sono eseguiti i test è reso aleatorio.

Il metodo *2-level full factorial* restituisce i trattamenti dei fattori che devono essere sottoposti ad analisi e con quale ordine effettuare i test. Una volta collezionati i risultati il software li elabora producendo i risultati della statistica. In questa fase si applica la procedura *Stepwise backward elimination*, tecnica che permette di mettere in evidenza i fattori che più determinano il parametro risposta eliminando quelli che non sono statisticamente significativi. L'eliminazione avviene per un elemento alla volta,

risaltando così gli effetti di quelli rimanenti. La procedura si ferma quando tutte le variabili risultano significative.

In output si ottiene il grafico a barre “Pareto” che permette di confrontare la significatività e l’importanza dei diversi fattori e delle loro interazioni. Il livello di significatività adottato α , ovvero il rischio di incorrere in una risposta del metodo errata, è pari al 5%. Il grafico è affiancato dai valori dei *p-value* per ciascun parametro o interazione, questi misurano l’evidenza dei dati raccolti rispetto all’ipotesi nulla del metodo, ovvero che la variabile statistica non influenzi la risposta. Se il *p-value* ha valore minore di α allora l’ipotesi nulla è rifiutata. Per valutare la bontà generale del metodo è visualizzato il valore del R^2 aggiustato (R-sq (adj)), un valore nel range 0-100% che è desiderabile massimizzare perché quantifica la variabilità dei parametri risposta spiegata dal modello. È poi indicato il valore del R^2 predetto (R-sq (pred)), che quantifica la capacità del metodo di essere rappresentativo anche per osservazioni sperimentali non sottoposte all’analisi. Un’ analisi DOE permette inoltre di utilizzare il modulo *Response Optimizer*, utile per determinare il miglior trattamento dei fattori, detto *cur*, che massimizza, minimizza o raggiunge un determinato target delle variabili risposta indicate. Il metodo restituisce in output anche i valori di desiderabilità, compresi tra zero e l’unità, che quantificano quanto il trattamento dei fattori indicato come ottimale permette di avvicinarsi all’obiettivo prefissato per i parametri risposta.

5.1.2 ANOVA ad una via

L’ANOVA (*analysis of variance*) è una tecnica di verifica di ipotesi che si applica quando è necessario confrontare, da un punto di vista inferenziale, la media campionaria di più di due gruppi. Se i gruppi in questione sono caratterizzati sulla base di un singolo fattore categoriale, si parla di analisi della varianza a un fattore o a una via.

Tramite ANOVA si elaborano le differenze tra le medie dei diversi gruppi e si verifica l’ipotesi nulla che esse, con un certo livello di significatività, siano uguali tra loro. Nel presente lavoro è fissato un valore di α pari al 5%.

Il test di verifica di ipotesi per l’ANOVA (test F) ha tre ipotesi:

- casualità e indipendenza dei campioni
- normalità della popolazione analizzata
- omogeneità delle varianze.

L’ultima ipotesi stabilisce che i gruppi dei quali si vuole confrontare la media siano omoschedastici. Questo può essere determinato tramite il test di Levene che verifica l’ipotesi nulla che il quadrato delle varianze dei gruppi siano tra loro uguali. In output dal test si ottiene il valore del *p-value* che, se ha valore minore di α , porta a rifiutare l’ipotesi nulla. Se l’ipotesi di omoschedasticità non è verificata è comunque possibile svolgere

l'ANOVA ma il test che viene utilizzato è differente (test Welch) e si parla di ANOVA non standard.

Il test ANOVA restituisce un valore di *p-value* che, se ha valore minore di α , porta a rifiutare l'ipotesi nulla ed affermare che esistono almeno due gruppi che presentano una media campionaria statisticamente differente. In questo caso, per verificare quali sono i gruppi che effettivamente differiscono tra loro, si deve utilizzare un'ulteriore procedura che rientra nei cosiddetti metodi dei confronti multipli. Tra questi metodi, la procedura Tukey-Cramer è applicata nel caso di ANOVA standard (popolazione omoschedastica) e la procedura Games-Howell nel caso di ANOVA non standard. Queste procedure effettuano confronti a due a due tra tutti i gruppi restituendo quali gruppi sono caratterizzati da medie significativamente diverse tra loro e quali, diversamente, sono equiparabili.

5.1.3 Correlation

Il metodo statistico *Correlation* serve per misurare quanto è forte la correlazione tra due variabili, sia essa lineare o monotona. Per il primo caso viene utilizzato il metodo di Pearson (detto metodo *r*) mentre per la seconda quello di Spearman. È necessario considerare che *Correlation* è applicabile solo se è noto, ad esempio visualizzando la dispersione dei dati in un grafico, che esiste una relazione tra le due variabili.

Correlation restituisce il valore del coefficiente di correlazione (*r*), che è compreso tra -1 e +1. Il suo valore assoluto quantifica la relazione (per il metodo di Pearson 1 indica una relazione lineare perfetta, 0 l'assenza di relazione) mentre il suo segno la direzione concorde o discorde (se positivo allora le variabili crescono assieme, negativo se hanno un andamento opposto).

5.1.4 Regressione lineare e polinomiale

Quando è di interesse descrivere la relazione tra due o più parametri e una variabile risposta è possibile utilizzare il modulo *Fit Regression Model*. Questo permette di calcolare la funzione di regressione cercata tramite il metodo dei minimi quadrati, considerando sia i fattori singoli che le loro interazioni. In output dal modello, per valutare la bontà generale della regressione, viene visualizzato il valore del R-sq (adj) e del R-sq (pred) che quantificano la variabilità spiegata da modello (interpolazione) e la sua capacità predittiva (estrapolazione).

Le assunzioni alla base di una regressione riguardano la dispersione dei residui: devono essere verificate l'ipotesi di linearità, la distribuzione normale degli errori, l'omoschedasticità e l'indipendenza degli errori.

Alla procedura di regressione è applicata la procedura *Stepwise backward elimination* che permette di determinare la funzione più parsimoniosa, ovvero quella che mette in relazione i soli fattori che sono statisticamente significativi nel determinare il parametro risposta. La procedura elimina i fattori con un livello di significatività per la risposta minore del 10%, la rimozione è di uno per volta fino a che tutti i rimanenti sono determinanti per il parametro risposta.

5.1.5 Paired t

In una situazione in cui è necessario confrontare campioni appaiati il software utilizza la tecnica *paired t*. I campioni si considerano appaiati se un'unità statistica condivide una certa caratteristica che si suppone possa influenzare il confronto in esame. In questo caso ci si concentra sulle differenze tra i valori dei campioni; la verifica è sull'ipotesi nulla che esse siano pari a zero; se viene rifiutata l'ipotesi nulla (*p-value* minore del livello di significatività α (pari a 5%)) allora esiste una significativa differenza tra i campioni che sono stati appaiati.

5.2 Vibroscopio

Le proprietà dei TNT sono strettamente connesse a quelle che sono le caratteristiche delle fibre utilizzate. La densità lineare delle fibre, detta anche titolo, è descritta dalla misura dei denari (den) o dei dtex e può essere determinata attraverso un vibroscopio. Il denaro è il peso in grammi di 9,000 metri di fibra mentre il dtex di 10,000 metri. I denari di una fibra dipendono dal diametro della sua sezione e influenzano le *performance* e la mano di un TNT. La scelta del titolo è direttamente connessa con l'applicazione del prodotto finito.

Prima di procedere alla produzione dei campioni di TNT necessari alle analisi è stato determinato il titolo delle fibre utilizzate con la LENZING Vibroskop 400 secondo la norma ISO 1973: 2021. Lo strumento misura direttamente il titolo di una singola fibra attraverso il metodo del vibroscopio. Il principio di funzionamento è legato al moto oscillatorio di un segmento di fibra con lunghezza e pretensionamento noti; un'onda vibrazionale è applicata alla fibra che quindi è messa in oscillazione. Il calcolo della densità lineare è il seguente:

$$\bar{\rho} = \frac{F}{4f_r^2 \cdot l^2} \quad (5.1)$$

dove

$\bar{\rho}$ = densità lineare (dtex)

F = forza di pretensionamento (N)

f_r = frequenza di risonanza (Hz)

l = lunghezza testata (m).

Per effettuare l'analisi è necessario prelevare singole fibre con l'utilizzo di una molletta di massa nota che le pretensiona. Le fibre sono poste, una per volta, all'interno dello strumento dove vengono agganciate e sottoposte all'analisi. Al termine delle misurazioni è registrato il valore del titolo medio ed è calcolata la deviazione standard. Le mollette con massa nota per il pretensionamento vengono scelte sulla base del valore del titolo dichiarato dal produttore delle fibre. Vengono utilizzate le masse di pretensionamento riportate nella tabella 5.1:

Tabella 5-1: Peso delle mollette per la determinazione del titolo delle fibre con il metodo del vibroscopio.

<i>Peso molletta per pretensionamento</i>	<i>Range di misura ottimale</i>	<i>Range di misura consentita</i>
50 mg	0.50 ÷ 1.25 dtex	0.42 ÷ 1.75 dtex
70 mg	0.70 ÷ 1.75 dtex	0.59 ÷ 2.45 dtex
100 mg	1.00 ÷ 2.50 dtex	0.85 ÷ 3.50 dtex
200 mg	2.00 ÷ 5.00 dtex	1.70 ÷ 7.00 dtex
300 mg	3.00 ÷ 7.50 dtex	2.55 ÷ 10.50 dtex
500 mg	5.00 ÷ 12.50 dtex	4.20 ÷ 17.5 dtex
700 mg	7.00 ÷ 17.50 dtex	5.90 ÷ 24.50 dtex
1000 mg	10.00 ÷ 25.00 dtex	8.50 ÷ 35.00 dtex
1500 mg	15.00 ÷ 37.50 dtex	12.70 ÷ 52.50 dtex



Figura 5-2: VibroscoPIO LENZING Vibroskop 400.

5.3 Spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR)

La spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR) è una tecnica di analisi spettroscopica non distruttiva, utilizzata principalmente per la caratterizzazione dei materiali organici e inorganici tramite i relativi legami chimici.

Alla base di questo metodo vi è il fenomeno di assorbimento, da parte delle molecole del campione analizzato, di fotoni facenti parte dello spettro infrarosso. Le molecole assorbono quelle lunghezze d'onda che le mettono in vibrazione, con oscillazioni definite di *stretching* (stiramento) e *bending* (piegamento) del legame. Lo strumento rileva le radiazioni assorbite determinando un'analisi qualitativa del campione. Ogni composto presenta uno spettro infrarosso di assorbimento caratteristico che dipende dalla struttura molecolare. L'output dello strumento è uno spettro di assorbanza, che è la frazione di radiazione incidente assorbita, in funzione del numero d'onda del fotone incidente, o di trasmittanza, che è la percentuale di radiazione incidente che passa attraverso il campione senza essere assorbita.

Una radiazione viene assorbita solo se ha un'energia pari a quella di vibrazione di un certo legame. La frequenza e l'energia delle radiazioni sono associate dalla relazione di Planck-Einstein:

$$E = \hbar \cdot f \quad (5.2)$$

dove

E = energia della radiazione elettromagnetica (J)

\hbar = costante di Plank, pari a $6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s

f = frequenza (Hz).

Lo spettrofotometro in trasformata di Fourier sfrutta un dispositivo meccanico chiamato Interferometro di Michelson (fig. 5-3). Questo è costituito da tre specchi: uno centrale semitrasparente (SS), uno fisso (SF) e uno mobile (SM). La radiazione policromatica emessa dalla sorgente arriva allo specchio semitrasparente dove viene suddivisa in due parti: una procede verso lo specchio fisso e l'altra verso lo specchio mobile. Su entrambi avviene quindi la riflessione delle onde. Lo specchio mobile si sposta però lungo il suo asse con velocità costante, ciò permette la scansione di tutte le frequenze dello spettro infrarosso, infatti quando le due radiazioni riflesse si riuniscono avvengono fenomeni di interferenza costruttiva o distruttiva dovuti al movimento dello specchio che introduce una differenza di cammino ottico. La radiazione risultante giunge al campione e la radiazione trasmessa che lo ha attraversato è registrata. Siccome la posizione dello specchio mobile varia nel tempo, anche le interferenze e quindi la radiazione risultante varia nel tempo. Dunque, ciò che il dispositivo genera è un grafico di trasmittanza in funzione del tempo (interferogramma) che, essendo di difficile interpretazione, viene rielaborato matematicamente attraverso la trasformata di Fourier ottenendo la trasmittanza in funzione del numero d'onda. Successivamente, si procede all'interpretazione dello spettro ottenuto, risalendo ai gruppi funzionali presenti nella molecola e alla sua possibile formula di struttura grazie all'utilizzo di una banca dati utilizzata per confronto con lo spettro risultante.

Le analisi sono state svolte con l'ausilio dello strumento NICOLET IS50 Thermoscientific, utilizzato in Riflettanza Totale Attenuata (ATR). Questa tecnica prevede di posizionare il campione sulla superficie di un materiale ad elevato indice di rifrazione in modo tale che il raggio riflesso, prima di essere inviato al detector, sia attenuato dall'assorbimento del materiale. Nello strumento in questione è stato montato l'accessorio Smart iTR, dotato di un cristallo di diamante, che permette una sola riflessione del raggio. Il setup è stato scelto in assorbanza, a 32 scansioni tra 4000 e 650 cm^{-1} , con una risoluzione di 4 cm^{-1} velocità di scansione 0,47 cm/s .

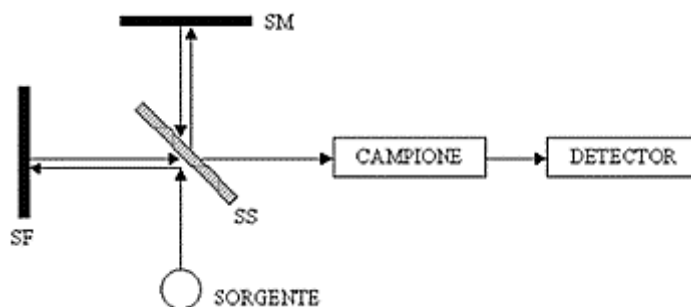


Figura 5-3: Schema delle componenti di un Interferometro di Michelson.



Figura 5-4: Spettrofotometro IR *Nicolet IS50 Thermoscientific*.

5.4 Calorimetria differenziale a scansione modulata (MDSC)

Un calorimetro a scansione differenziale (DSC) misura i flussi di calore associati alle transizioni termiche che si verificano in un campione quando questo è riscaldato o raffreddato (condizioni dinamiche) o mantenuto a temperatura costante (condizioni isoterme) in maniera controllata. Nel caso dei polimeri ciò è particolarmente utile al fine di determinare informazioni quali la temperatura di fusione, il calore di fusione, la percentuale di cristallinità, la temperatura di transizione vetrosa e la cristallizzazione.

La tecnica si basa sulla misura dell'energia necessaria per annullare la differenza di temperatura tra la sostanza analizzata e un campione di riferimento, costituito da un inerte, mentre entrambi sono soggetti ai medesimi regimi di temperatura. Esistono due tipologie di sistemi DSC comunemente utilizzati: la DSC a compensazione di potenza, dove i due campioni si trovano in due fornaci separate e viene misurata l'energia richiesta per

mantenerle alla medesima temperatura, e la DSC a flusso di calore. Quest'ultima prevede campioni posti nella medesima cella e la misurazione della loro differenza di temperatura. Per il presente lavoro è stata utilizzata la DSC a flusso di calore. L'apparecchiatura presenta un riferimento e un porta-campione circondati da un blocco costituito da un corpo a temperatura costante. Il blocco è l'alloggiamento che contiene il sistema di riscaldamento (disco termoelettrico), i sensori e i supporti per i provini. Un sensore di temperatura è posizionato alla base di ogni supporto. Infine, del gas inerte, tipicamente azoto, fluisce all'interno della cella. Il comportamento differenziale del campione e del riferimento viene registrato ed è successivamente utilizzato per determinare le proprietà termiche del campione.

Il principio di funzionamento della DSC si basa sulla relazione che lega il flusso di calore dQ alla variazione di temperatura dT secondo la legge termica equivalente a quella di Ohm:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dT}{\mathcal{R}} \quad (5.3)$$

dove \mathcal{R} è la resistenza elettrica del disco termoelettrico (Ω).

Nella calorimetria differenziale a scansione modulata (MDSC) al convenzionale riscaldamento/raffreddamento lineare viene sovrainposta una modulazione sinusoidale. In questo modo la temperatura del campione cambia continuamente nel tempo e in modo non lineare. Si mantiene così una bassa velocità di riscaldamento/raffreddamento media, associata però a una velocità modulata istantanea elevata. Rispetto a una normale DSC, la tecnica MDSC permette di superare problemi di risoluzione come la separazione tra due segnali vicini.

Le prove sono state eseguite con lo strumento TA Instruments mod. Q200, in atmosfera inerte (azoto), al fine di evitare ogni possibilità di fenomeni ossidativi che potrebbero falsare la rivelazione dei fenomeni transitori. I campioni sono inseriti in capsule ermetiche in alluminio.



Figura 5-5: Calorimetro a scansione differenziale modulata, TA Instruments mod. Q200.

5.5 Gustin-Bacon Measure-Matic™

Per la determinazione dello spessore dei campioni è stato utilizzato il Gustin-Bacon Measure-Matic™ della CERTAINTEED 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 “nulla” su di esso, un piccolo peso da 288g è utilizzato per creare una pressione nota sul materiale di $2\text{g}/\text{in}^2$. Sul display dello spessimetro viene letto lo spessore del provino dopo aver atteso un tempo di almeno dieci secondi per permettere allo strumento di trovare l’equilibrio.



Figura 5-6: Gustin-Bacon Measure-Matic™ della CERTAINTEED MACHINE WORKS.

5.6 Tester di permeabilità

La prova di permeabilità all'aria di un tessuto misura il flusso d'aria che attraversa perpendicolarmente una sua determinata area, quando questa è sottoposta ad una differenza di pressione per un certo tempo. La prova è normata dalla ISO 9237:1995 ed è stata realizzata con SCHRÖDER Air Permeability Tester L 14DC con un porta-campione a tazza con superficie di analisi di 20 cm² e una differenza di pressione applicata pari a 50 Pa. Per realizzare il test viene fustellato un campione cilindrico di diametro 100 cm² che viene poi posto nel porta-campione, sigillato con guarnizioni e sottoposto alla differenza di pressione. Viene letto il valore del flusso d'aria che attraversa il provino. La permeabilità all'aria (P) espressa in metri al secondo è ottenuta con la relazione

$$P = \frac{\bar{q}_v}{A} \times 0.167 \quad (5.4)$$

Dove

\bar{q}_v = media aritmetica dei flussi d'aria (l/min)

A = superficie del tessuto che è analizzata (m²)

0.167 = fattore di conversione da l/min a m/s. [70]

Lo strumento utilizzato è limitato in termini di spessore massimo (8cm) del materiale e velocità minima della pompa per l'aria che limita la differenza di pressione applicabile a certi TNT.

Dalla letteratura scientifica è emerso che la resistività al flusso d'aria, e non la permeabilità, è il parametro che più quantifica la capacità di un materiale di accogliere le onde acustiche e di dissiparne l'energia. La resistività si ricava analiticamente a partire dalle medesime grandezze utilizzate per il calcolo della permeabilità (flusso del gas e differenza di pressione) ma queste devono essere determinate in condizioni di prova differenti. Per definire la resistività è infatti necessario che il flusso d'aria generato dalla differenza di pressione sia sufficientemente lento per avere un regime di flusso laminare all'interno dei pori. Questa condizione non è verificata dalla misura della permeabilità che utilizza velocità di flusso (differenze di pressione) molto maggiori.

5.7 Tubo di impedenza (tubo di Kundt)

Il coefficiente di assorbimento acustico di un TNT al variare della frequenza dell'onda sonora incidente è stato misurato con un Tubo di Kundt. Lo strumento utilizzato è SCS9020B Impedance Tube e viene seguita la norma ISO 10534-2:2001 [28]. L'analisi si basa sulla tecnica delle onde stazionarie in tubo e utilizza come metodo di calcolo quello della Funzione di Trasferimento (*Transfer-function method*). In particolare, la misura determina il coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale, visto che le onde sonore incidono perpendicolarmente al campione. Lo strumento è costituito da due tubi rettilinei, rigidi, lisciati e con chiusure stagne di diverso diametro (100mm e 28mm) e lunghezza 560mm, ciascuno con porta campione ad un'estremità ed un emettitore sonoro dall'altra. I due tubi sono necessari perché quello con diametro maggiore analizza le basse frequenze (range 50-1900Hz) e quello che lo ha minore indaga le alte frequenze (range 450-7100 Hz). I risultati delle analisi dei due tubi sono sovrapposti da un software che restituisce i valori di α in corrispondenza delle frequenze dei terzi di ottava (125, 160, 200, 250, 312.5, 400, 500, 625, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3125, 4000, 5000 e 6250Hz). Ogni tubo presenta diverse porte dove sono collocati due microfoni. Completano l'apparecchiatura un amplificatore, un generatore di segnale e un sistema di analisi delle frequenze. Uno schema è riportato nella figura 2-3.

Il principio di funzionamento del sistema prevede di montare il materiale da testare nel porta-campione, chiudere i tubi ermeticamente ed avviare la generazione delle onde piane e misurare la pressione sonora in corrispondenza dei due microfoni posti vicini alla superficie del campione. Con questa configurazione è possibile calcolare, in funzione

della frequenza, la Funzione di Trasferimento e α . I fondamenti teorici sono stati spiegati nel sotto capitolo 2.1.2.3.

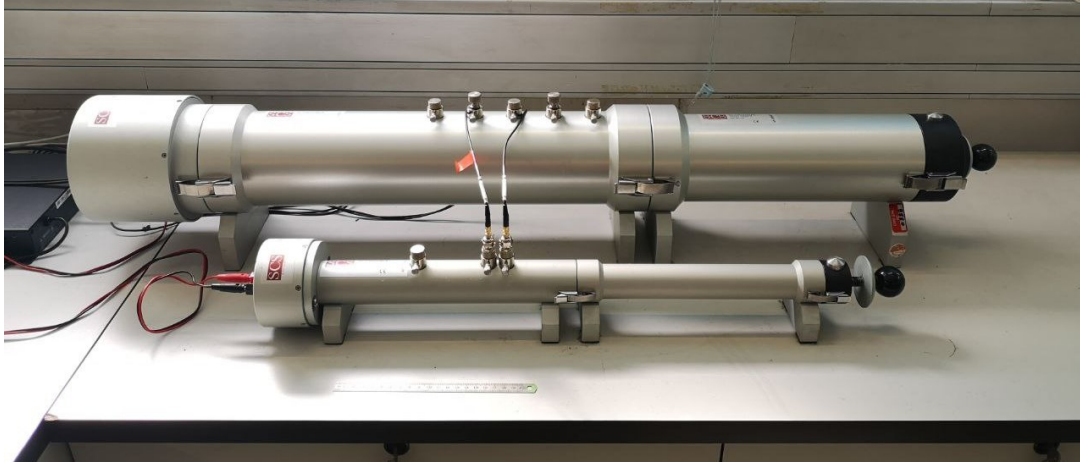


Figura 5-7: Tubo di Kundt. SCS9020B Impedance Tube.

5.8 Termoflussimetro

La determinazione della conducibilità termica per materiali aventi resistenza termica non inferiore a $0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ può avvenire con il metodo della piastra calda con anello di guardia o con quello del termoflussimetro. Entrambi normati dalla UNI EN 12667:2001. Per il presente lavoro è stato utilizzato il secondo metodo.

Il termoflussimetro è uno strumento che accoglie provini con forma di parallelepipedo, genera un gradiente termico tra due delle loro facce e misura il flusso termico che li attraversa. Il campione da analizzare è posto tra due piastre che vengono portate gradualmente a due temperature specifiche. Il flusso termico che è così generato, nota l'area che attraversa, viene misurato da un trasduttore. Il test si conclude quando si raggiunge la condizione di flusso stazionario, alla quale si determina la conducibilità. Il trasduttore misura una differenza di potenziale (in Volt) che è proporzionale al flusso di calore secondo un fattore di calibrazione (N), determinato in fase di calibrazione dello strumento grazie ad un campione a conducibilità nota. Le equazioni alla base del metodo derivano dalla teoria di Fourier e vanno interpretate considerando che le grandezze sono di tipo "effettivo", ovvero date dalla combinazione dei diversi fenomeni di trasporto termico che sono stati presentati nel capitolo 3.2. Le relazioni sono:

$$Q = k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.5)$$

$$Q = N \cdot \Delta V \quad (5.6)$$

$$k = N \frac{\Delta V \cdot \Delta x}{\Delta T} \quad (5.7)$$

dove

Q = potenza termica scambiata (W)

A = area testata (m²)

ΔT = differenza di temperatura impostata tra le due piastre (K)

Δx = spessore del provino analizzato (m)

N = fattore di calibrazione dello strumento (W/Volt)

ΔV = differenza di potenziale misurata (Volt).

Quando si realizza la condizione di flusso stazionario vale la legge di Fourier (eq. 5.5) che mette in relazione i fattori che influenzano il fenomeno termico. La (5.6) esprime la proporzionalità tra potenza termica e differenza di potenziale misurata dal trasduttore. Infine, dalla (5.7) è possibile determinare la conducibilità del materiale testato.

Per le analisi svolte per questo lavoro è stato utilizzato lo strumento NETZSCH Heat Flow Meter 436/3 LambdaTM. Questo può lavorare tra 0 a 100°C ed effettua la misura su un'area quadrata di 10.16 cm di lato. Il range di conducibilità misurabile è 0.1-8 (W/m·K). Lo strumento ha il vantaggio di poter accogliere provini con spessore fino a 10 cm, avere un'elevata ripetibilità e accuratezza e restituire il risultato dell'analisi in un tempo medio di 15 min. Il range di temperatura impostato un ΔT di 10°C con temperatura media di 10°C.

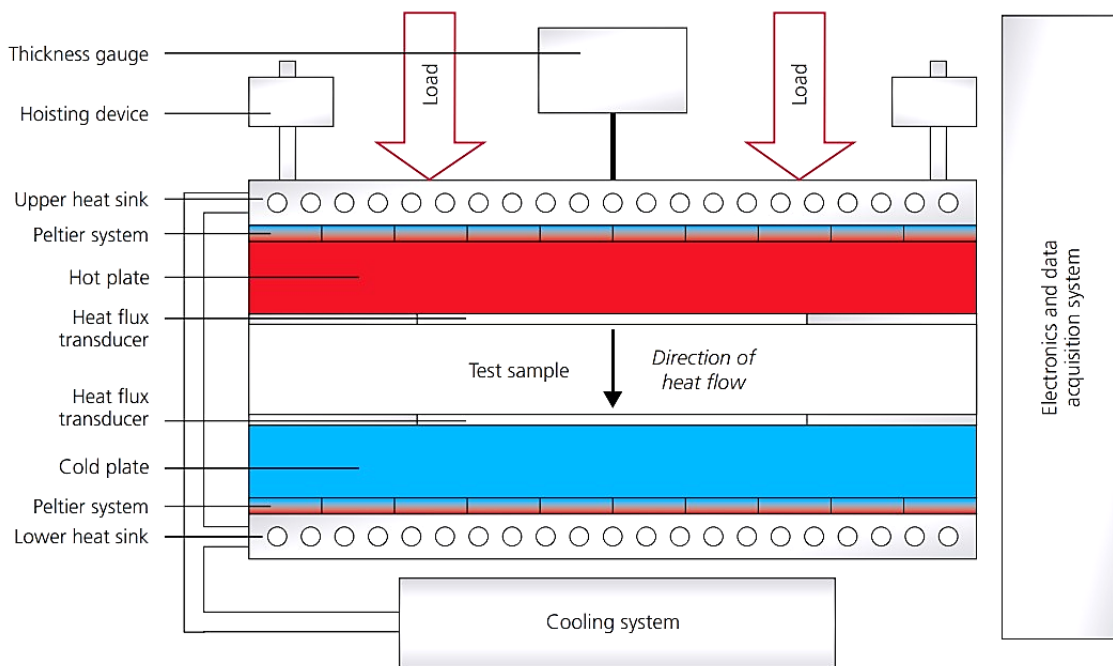


Figura 5-8: Schema delle componenti di un termoflussimetro.



Figura 5-9: NETZSCH Heat Flow Meter 436/3 Lambda™.

5.9 ESEM

I microscopi elettronici a scansione ambientale ESEM (*Environmental Scanning Electron Microscope*), come i microscopi elettronici a scansione tradizionali (SEM), utilizzano fasci di elettroni per investigare un campione su nanoscala. L'interazione tra elettrone e materia genera diversi tipi di segnali che portano informazioni diverse sul campione. Per esempio, gli elettroni retrodiffusi producono immagini con un contrasto che contiene informazioni sulle differenze nel numero atomico; gli elettroni secondari forniscono informazioni topografiche; la catodoluminescenza può dare informazioni sulla struttura dell'elettrone e la composizione chimica; gli elettroni trasmessi descrivono la struttura intrinseca del campione e la cristallografia; i raggi-X trasportano informazioni riguardanti gli elementi contenuti nel campione.

Il funzionamento del ESEM prevede la generazione di un fascio elettronico ad alta energia in un ambiente in cui è generata una condizione di vuoto più o meno spinto. Il fascio è focalizzato da un sistema di lenti elettromagnetiche e deflesso per scandire un'area del campione. I segnali emessi dal materiale analizzato vengono acquisiti da opportuni rilevatori ed elaborati in immagini a livelli di grigio. Una prima differenza con il SEM è la possibilità di generare condizioni di vuoto differenziali lungo il percorso ottico degli

elettroni mantenendo la risoluzione di 4 nm tipica del SEM. In concomitanza a ciò, sono stati sviluppati rilevatori che operano anche in presenza di gas all'interno della camera porta campioni (vapor d'acqua o altro gas) che aiuta a drenare le cariche in eccesso sulla sua superficie del campione che ne impedirebbero l'osservazione. In questo modo è possibile studiare anche campioni non conduttivi senza alcun trattamento preliminare. La presenza del gas ha anche il vantaggio di agevolare la produzione di un segnale "morfologico" proporzionale agli elettroni secondari rimossi dalla superficie del campione, dando la possibilità di un'osservazione superficiale di buona qualità.

Lo strumento ESEM permette di ottenere analisi sia morfologiche (elettroni secondari e retrodiffusi), che di composizione (raggi-X).

Nello sviluppare il presente lavoro sono stati rilevati e analizzati tre diversi segnali emessi dal campione:

- Elettroni retrodiffusi: sono gli elettroni primari (quelli prodotti dalla sorgente del fascio elettronico) che sono stati riflessi dal campione senza perdere energia. Questi sono rilevati dal detector BSD e portano informazioni sul numero atomico degli atomi con cui hanno interagito. Numeri atomici elevati producono segnali più intensi che vengono convertiti nelle immagini con una gradazione di grigio più scuro. Viceversa, numeri atomici bassi generano tonalità chiare. L'osservazione degli elettroni retrodiffusi permette di distinguere zone del campione di composizione diversa.
- Elettroni secondari: sono quelli generati dalla perdita di energia degli elettroni primari assorbiti dal campione. Questa energia permette ad alcuni elettroni del campione di diffondere verso la sua superficie e, in parte, di sfuggire all'esterno. Essi possono essere dunque rilevati da un detector LFD che permette un'osservazione del campione attraverso immagini ad elevata tridimensionalità ad alta risoluzione e con buona profondità di campo.
- Raggi-X: prodotti dalle transizioni energetiche (da uno stato eccitato a quello fondamentale) degli elettroni degli orbitali più interni degli atomi del campione. Queste a seguito della loro ionizzazione per collisione con gli elettroni primari ad elevata energia. L'effetto è detto di fluorescenza ed è analizzato dal sistema EDX e rilevato da detector SDD. L'energia delle radiazioni di tipo X rappresenta la differenza di energia tra il livello eccitato e quello fondamentale tra i quali è avvenuta la transizione elettronica. L'energia dipende dal numero atomico dell'atomo colpito dal fascio primario e rappresenta un "impronta digitale" di ogni elemento che potrà essere identificato se presente nel campione. I dati generati da una microanalisi EDX sono rappresentati da spettri con picchi corrispondenti agli elementi presenti nel campione. È possibile, inoltre, ottenere mappe della

composizione dell'area analizzata e quantificare la presenza percentuale di ciascun elemento. [71][72][73]

Per il presente lavoro è stato utilizzato un microscopio ESEM modello Philips XL30 TMP Microanalisi XRF-EDS.

Con l'ESEM sono state osservate alcune sezioni trasversali delle fibre. Per fare questo si è utilizzata una piccola piastra metallica forata. In ciascun foro sono state fatte passare alcune fibre tagliandole poi lungo la sezione con l'utilizzo di una lametta.



Figura 5-10: Microscopio ESEM modello Philips XL30 TMP Microanalisi XRF-EDS.

5.10 Impianto pilota: carda e faldatore

Per realizzare i provini di tessuto-non tessuto necessari alle analisi si è partiti da fibre in fiocco lavorandole con la tecnica *dry-laid*: cardatura e faldatura di tipo *cross-laid*. L'azienda O.R.V. Manufacturing dispone di un impianto di cardatura, faldatura ed agugliatura in scala ridotta, utile per piccole produzioni. La cardatrice è costituita da un tamburo principale, un cilindro convogliatore, due coppie di cilindri spogliatore-lavoratore e un solo cilindro scaricatore. Dal macchinario esce un unico velo di carda che alimenta un piccolo faldatore che crea il materassino di fibre muovendosi a zig-zag. La linea produttiva continua con una stazione di agugliatura che non verrà utilizzata per realizzare questo lavoro.



Figura 5-11: Impianto pilota utilizzato per cardare e faldare piccoli quantitativi di fibra.

5.11 Termostufa da laboratorio

I campioni di TNT che si sono realizzati sono stati interlacciati termicamente. Nella miscela delle fibre è presente una percentuale di fibra bicomponente che, se

opportunamente riscaldata, fonde creando punti di connessione tra le fibre. Per riscaldare i materassini di fibre è stata utilizzata una termostufa da laboratorio AST FAAR F110.



Figura 5-12: Termostufa da laboratorio AST FAAR F110.

Capitolo 6

Risultati sperimentali

Nel capitolo sesto è presentata l'elaborazione dei risultati sperimentali raccolti. Inizialmente sono definiti i parametri termoacustici che verranno analizzati. La trattazione è poi suddivisa in sei parti principali che riguardano:

- Analisi delle proprietà termoacustiche in funzione della densità, spessore e titolo medio tramite analisi *Design of Experiments*
- Analisi ANOVA ad una via delle proprietà termoacustiche in relazione alla porosità
- Studio dell'esistenza di una correlazione tra proprietà termoacustiche con grammatura e permeabilità
- Studio dell'esistenza di una correlazione tra assorbimento acustico e isolamento termico
- Studio sull'influenza della finitura superficiale sull'assorbimento acustico
- Analisi preliminare delle proprietà termoacustiche di tessuti-non tessuti realizzati con fibre con sezione di forma particolare

6.1 Definizione dei parametri termoacustici analizzati

Come è descritto nel secondo capitolo, l'assorbimento acustico è funzione della frequenza dell'onda sonora. Dalle analisi acustiche svolte con il tubo di impedenza, è emerso che l'andamento del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza è simile a quello nella curva in fig. 6-1. Si può osservare, come noto dalla teoria sui sistemi fonoassorbenti porosi, un assorbimento limitato alle basse frequenze che tende ad aumentare a quelle maggiori, spesso con andamento asintotico a valori prossimi all'unità. Per meglio rappresentare la variabilità del coefficiente α , si suddivide l'intervallo delle frequenze misurato dal tubo di impedenza in tre settori così definiti:

- Basse frequenze: $f \in [125 \text{ Hz}; 500 \text{ Hz}]$, rappresenta il range in cui l'assorbimento acustico è meno efficace per i materiali porosi
- Medie frequenze: $f \in [500 \text{ Hz}; 2500 \text{ Hz}]$, rappresenta il range di frequenze fondamentali per l'intelligibilità del parlato

- Alte frequenze: $f \in [2500 \text{ Hz}; 6250 \text{ Hz}]$, sono le frequenze in corrispondenza delle quali l'organo acustico umano ha la massima sensibilità. [23]

Si procede quindi, per quanto riguarda la caratterizzazione acustica dei materiali, considerando tre parametri risposta corrispondenti alle medie aritmetiche degli α appartenenti agli intervalli di frequenze definiti:

- $\bar{\alpha}_{basse}$: media aritmetica degli α nel range delle basse frequenze (adim.)
- $\bar{\alpha}_{medie}$: media aritmetica degli α nel range delle medie frequenze (adim.)
- $\bar{\alpha}_{alte}$: media aritmetica degli α nel range delle alte frequenze (adim.).

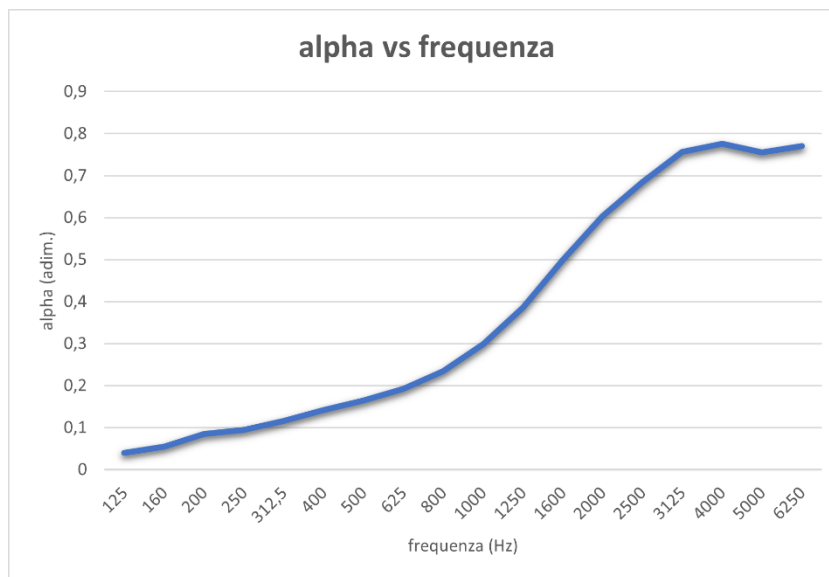


Figura 6-1: Andamento tipico dell'assorbimento acustico (α) in funzione della frequenza dei TNT presi in esame.

Per quanto riguarda le *performance* termiche dei TNT, le variabili risposta che vengono prese in considerazione sono la conducibilità termica k (W/m·K) e la resistenza termica R (m²K/W).

6.2 Analisi delle proprietà termoacustiche in funzione di densità, spessore e titolo medio tramite *Design of Experiments*

Il primo studio che si vuole intraprendere è volto a determinare come la densità (ρ) e lo spessore (l) di un TNT e il titolo medio (T) delle fibre di cui è costituito, influenzino l'assorbimento acustico, la conducibilità termica e la resistenza termica. A questo fine è stato utile procedere mediante un'adeguata progettazione degli esperimenti (*Design of Experiments*), selezionando come variabili risposta i parametri termoacustici presentati nel capitolo 6-1.

La densità e il titolo medio sono così definiti:

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} \quad (6.1)$$

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \cdot w_i \quad (6.2)$$

dove

$\bar{\rho}$ = densità del tessuto-non tessuto (kg/m³)

m = massa del provino (kg)

V = volume del provino (m³)

T = tiolo medio della miscela di fibre (dtex)

T_i = titolo della fibra i-esima (dtex)

w_i = frazione ponderale della fibra i-esima (adim.).

6.2.1 Progettazione dell'esperimento

Densità, spessore e titolo medio sono ampiamente descritti in letteratura come parametri determinanti per le *performance* termoacustiche di un TNT. A seguito di questa considerazione è stato utilizzato il software Minitab per creare una campagna di esperimenti secondo il modello *2-level full factorial*, che è parte della classe di *modeling* dei DOE. In questo modo si vuole evidenziare, con la risoluzione massima modellabile, il ruolo di ciascun fattore e dei fattori misti, rappresentativi dell'interazione tra i fattori. La scelta di utilizzare la tecnica DOE risponde alla necessità di analizzare un limitato numero di unità statistiche mantenendo una buona rappresentatività dell'intera popolazione non analizzata.

Questa progettazione degli esperimenti, visto che i fattori analizzati sono tre, può essere rappresentata da un cubo la cui regione spaziale è delimitata dai valori massimi e minimi che può assumere ciascun fattore. Questi limiti derivano dalla fattibilità nel realizzare i campioni e sono riportati in tabella 6-1, in cui è presente anche il loro valore medio. Quest'ultimo è stato aggiunto al modello statistico come "*center point*", necessario per verificare la presenza di curvatura nelle funzioni che descrivono i parametri di risposta.

Tabella 6-1: Livello massimo e minimo per ciascun fattore analizzato con la tecnica DOE.

<i>Fattore</i>	<i>Valore massimo</i>	<i>Valore medio</i>	<i>Valore minimo</i>
Densità	75 kg/m ³	48 kg/m ³	21 kg/m ³
Spessore	8.0 cm	4.5 cm	1.0 cm
Titolo medio	14.5 dtex	9.3 dtex	4.0 dtex

La rappresentazione della regione spaziale studiata è riportata in fig 6-2: il software, per realizzare il *2-level full factorial* con *center point* chiede di analizzare le performance termoacustiche di campioni con trattamenti dei fattori corrispondenti ai vertici del cubo e al suo centro.

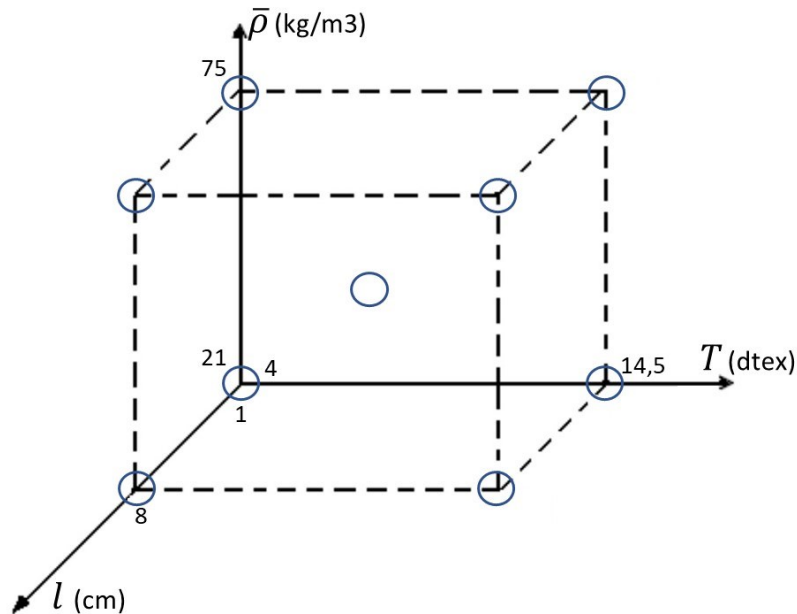


Figura 6-2: Rappresentazione geometrica della porzione analizzata dello spazio tridimensionale densità-spessore-titolo medio. I trattamenti dei fattori e il *center point* testati dal modello *2-level full factorial* sono evidenziati da cerchi.

Vengono aggiunte al modello tre repliche per ciascun trattamento dei fattori per aumentare la precisione del modello. Considerando i limiti operativi della strumentazione utilizzata, le prove verranno eseguite in quattro campagne (“*blocks*”) diverse e, per abbassare la componente di errore, l’ordine con cui devono essere svolti i test è reso aleatorio.

Con queste specifiche si è creato, utilizzando il software Minitab, il modello statistico. I trattamenti dei fattori, l’ordine dei test da effettuare (*Run Order*) e la campagna in cui ciascun test deve essere effettuato è riportato nella tabella 6-2.

Tabella 6-2: *Run Order*, numero del *Block* e trattamenti dei fattori in output del software Minitab per un’analisi DOE *2-level full factorial* con *center point* e quattro blocchi.

<i>Run Order</i>	<i>Block</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>
1	1	48,0	4,5	9,3
2	1	75,0	1,0	4,0
3	1	75,0	1,0	4,0

4	1	21,0	8,0	14,5
5	1	75,0	1,0	4,0
6	1	21,0	8,0	14,5
7	1	21,0	8,0	14,5
8	3	48,0	4,5	9,3
9	3	21,0	8,0	4,0
10	3	21,0	8,0	4,0
11	3	21,0	8,0	4,0
12	3	75,0	1,0	14,5
13	3	75,0	1,0	14,5
14	3	75,0	1,0	14,5
15	4	21,0	1,0	4,0
16	4	75,0	8,0	14,5
17	4	75,0	8,0	14,5
18	4	21,0	1,0	4,0
19	4	21,0	1,0	4,0
20	4	48,0	4,5	9,3
21	4	75,0	8,0	14,5
22	2	21,0	1,0	14,5
23	2	75,0	8,0	4,0
24	2	21,0	1,0	14,5
25	2	48,0	4,5	9,3
26	2	75,0	8,0	4,0
27	2	21,0	1,0	14,5
28	2	75,0	8,0	4,0

6.2.2 Preparazione dei campioni

Una volta acquisite le specifiche che devono avere i campioni (tabella 6-2), si sono reperite le fibre necessarie e si sono prodotti i provini. I TNT realizzati sono costituiti dal 70% da fibra in PET e 30% di fibra bicomponente *sheath-core* in PET-co-PES ($T_{m\ co-PES}=110^{\circ}C$), necessaria per consolidare il materiale una volta riscaldato. Le miscele fibra utilizzate sono riportate nella tabella 6-3.

Tabella 6-3: Frazioni ponderali delle fibre utilizzate per realizzare i campioni.

	Wellman 3.3	Comfort 9.9	Wellman 17	Huvis Bicomponente 4.4
Campioni con Titolo medio 4.0 dtex	0.7	0	0	0.3

<i>Campioni con Titolo medio 9.3 dtex</i>	0	0.7	0	0.3
<i>Campioni con Titolo medio 14.5 dtex</i>	0	0	0.7	0.3

Le fibre sono miscelate manualmente e lavorate con l'impianto pilota di cardatura e faldatura con un duplice passaggio nel macchinario per migliorare l'omogeneità del materiale. In uscita dell'impianto, il materassino di fibre è tagliato in parallelepipedi, le così dette "faldine". Sovrapponendo le faldine è possibile controllare il peso del provino. Lo spessore è invece controllato da uno strumento costituito da due piastre metalliche parallele la cui distanza è controllabile da un sistema viti-bulloni, fig. 6-3 b).



Figura 6-3: a) Miscela di fibre utilizzata prima della cardatura. b) Strumento per controllare lo spessore del provino.

Una volta preparate le faldine, queste sono interposte tra le piastre metalliche e poste in termostufa a 150°C per un tempo di 10 min. Durante il riscaldamento la guaina esterna della fibra bicomponente fonde e crea punti di reticolazione nella struttura del TNT consolidandolo. Una volta che il campione si è raffreddato, questo viene sagomato per essere esaminato al termoflussimetro. Al termine dell'analisi termica, dal materiale vengono ricavati i provini per la determinazione dell'assorbimento acustico grazie ad una fustellatrice idraulica.

6.2.3 Analisi preliminari

Prima di procedere con la preparazione dei campioni è necessario effettuare delle analisi preliminari sulle materie prime utilizzate.

La prima analisi è la spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR), per la caratterizzazione chimica delle materie prime. Si vuole infatti determinare se il materiale di cui sono costituite le fibre non è una variabile per questo studio, ma un parametro costante.

Dallo spettro di trasmittanza in funzione del numero d'onda, ottenuto in output dallo strumento di misura, si osserva che le quattro fibre in analisi presentano spettri sovrapponibili, indice della presenza degli stessi legami chimici nei polimeri costituenti. Da una prima analisi del posizionamento dei picchi si osservano i legami tipici del polietilene tereftalato, indicati in tabella 6-4 [74]. Questa ipotesi viene confermata anche da un successivo confronto dello spettro collezionato con gli spettri di polimeri noti presenti nelle librerie del software, che mostra un elevato match con lo spettro caratteristico del PET. (Fig. 6-4).

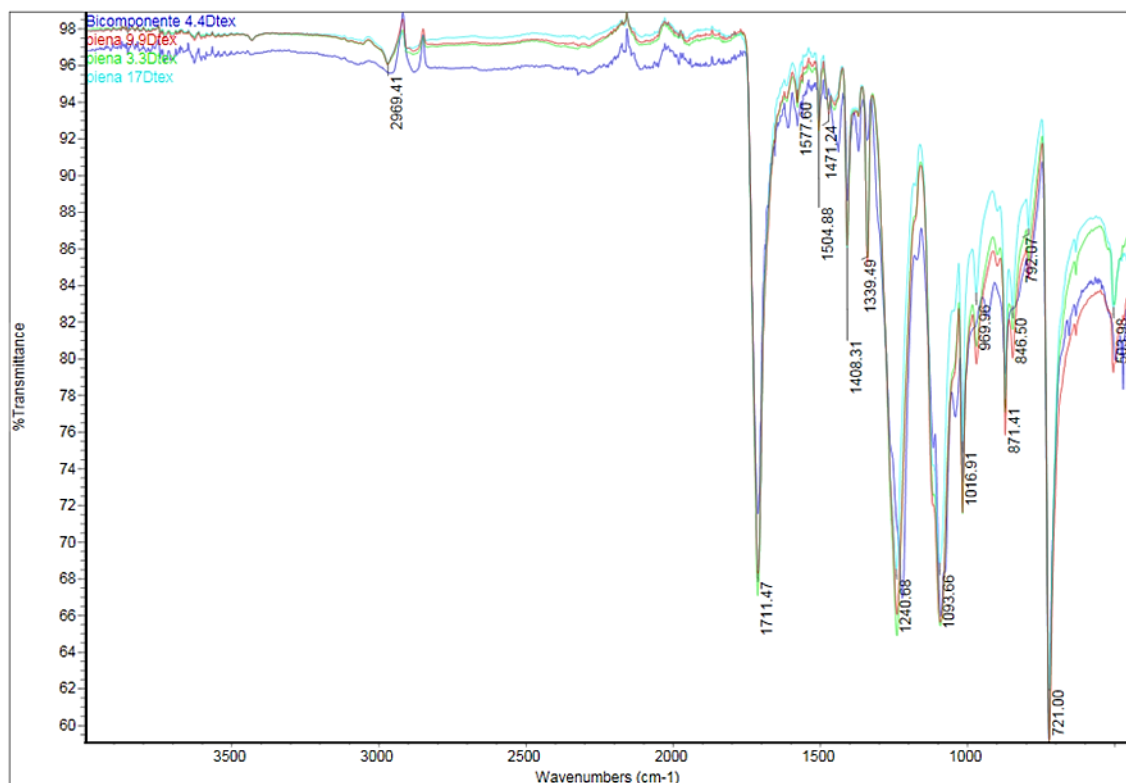


Figura 6-4: Spettri di trasmissione ottenuti con analisi FT-IR delle fibre utilizzate per la preparazione dei campioni. Lo strumento ha identificato che tutte le fibre sono costituite da PET.

Tabella 6-4: Bande con modalità vibrazionali assegnate dallo spettro FTIR del campione PET [74].

Absorption bands (cm^{-1})	Bands
3432	OH group (hydroxyl)
3054	Symmetrical stretch of CH
2969 and 2908	C-H, Symmetrical stretching
2350	Axial symmetrical deformation of CO_2
1730	Stretching of C=O of carboxylic acid group
1577 and 1504	Vibrations aromatic skeleton with stretching C=C
1453, 1410 and 1342	Stretching of the C-O group deformation of the O-H group and bending and wagging vibrational modes of the ethylene glycol segment
1240 and 1124	Terephthalate Group ($\text{OOC}_6\text{H}_4\text{-COO}$)
1096 and 1050	Methylene group and vibrations of the ester C-O bond
972, 872 and 848	Aromatic rings 1,2,4,5; Tetra replaced
1960 and 795	Vibrations of adjacent two aromatic H in p-substituted compounds and aromatic bands
712	Interaction of polar ester groups and benzene rings

Per determinare la composizione mista delle fibre bicomponenti, formate da una *shell* esterna e da un *core* interno, è stata condotta un'analisi termica mediante calorimetria a scansione differenziale. La fibra bicomponente, infatti, presenta da indicazioni del produttore una guaina in co-PES bassofondente ($T_m=110^\circ\text{C}$) e un *core* in PET ($T_m=245\text{-}265^\circ\text{C}$). Al fine di distinguere correttamente i fenomeni termici quali transizione vetrosa, fusione, eventuale ricristallizzazione (*cold crystallization*) dei polimeri, è stata scelta una MDSC, il cui output viene riportato in Fig 6-5.

Considerando il flusso di calore non reversibile, associato a transizioni non reversibili che hanno luogo nel campione durante la scansione, ovvero a fenomeni governati dalla cinetica (cristallizzazione a freddo sopra T_g , rilassamento entalpico, fusione e ricristallizzazione di cristalliti difettosi), si osservano tre picchi endotermici al riscaldamento, definiti a 65°C , a 157°C e a 253°C . La fusione del *core* in PET è riconducibile al picco a 253°C , mentre i picchi a 65°C e 157°C sono di difficile interpretazione; l'evento termico a 65°C può essere correlato al fenomeno del rilassamento entalpico tipico nel PET in corrispondenza della T_g , ma essendo l'area sottesa dal picco elevata, si può pensare anche ad una fusione. Il fenomeno termico a

157°C è invece univocamente una fusione. Si delineano due ipotesi: nel primo caso si potrebbe avere un componente in miscela bassofondente (65°C) e successivamente osservare, a partire dai 110°C, la fusione della *shell* in co-PES; alternativamente si può ipotizzare che il co-PES singolarmente fonda a 110°C mentre quando disperso nel PET realizza 2 forme polimorfe nella fase cristallina che fondono rispettivamente a 65°C e a 157°C.

Considerando poi il flusso di calore reversibile, necessario al riscaldamento/raffreddamento del campione e strettamente legato alla sua capacità termica (per esempio fusione cristallina e transizione vetrosa), si nota una temperatura di transizione vetrosa a 50-60°C, caratteristica del PET, nuovamente la fusione del co-PES dai 110°C e infine la fusione (fenomeno endotermico) preceduta da ricristallizzazione (esotermica) del PET.

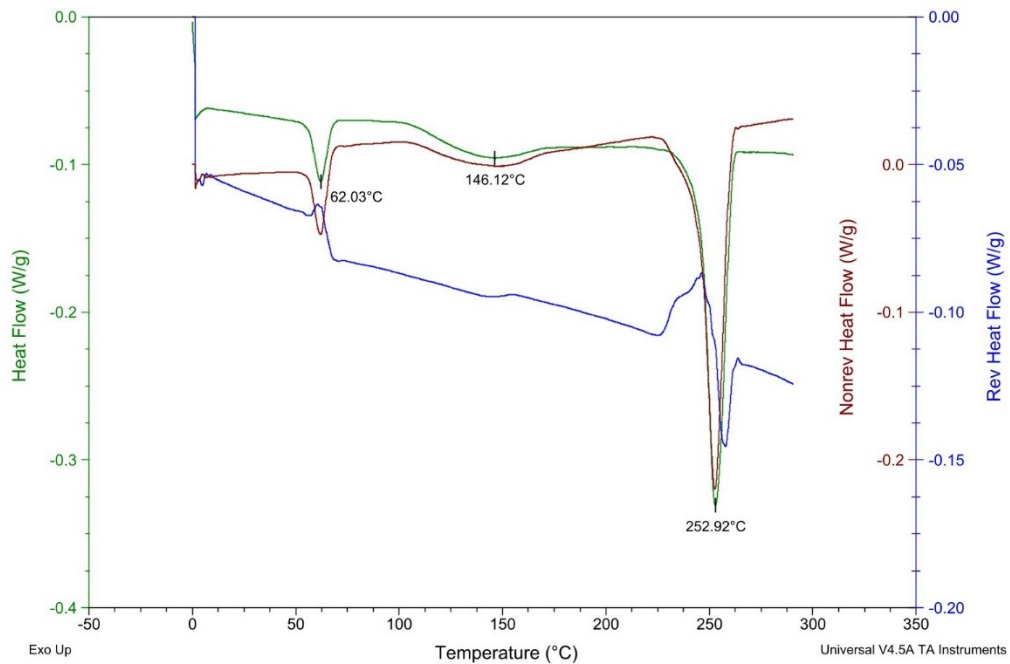


Figura 6-5: Output della MDSC: in verde il flusso di calore totale, in blu la sua componente reversibile e in marrone la componente reversibile.

Un altro test a cui sono sottoposte le fibre è la determinazione del titolo reale mediante vibroscopio. Sono state effettuate dieci misurazioni per ogni fibra, i risultati sono riportati nella tabella 6-5. Si conclude che tutte le fibre presentano un intervallo di confidenza al 95% (presente in tabella) per il titolo che include il valore puntuale oggetto del DOE.

Tabella 6-5: Risultati del test al vibroscopio per la determinazione del titolo delle fibre utilizzate.

	Wellman 3.3	Comfort 9.9	Wellman 17	Huvis Bicomponente 4.4
Titolo, media aritmetica (dtex)	3.58	10.81	18.69	5.25
Deviazione standard	0.23	0.95	1.94	0.46
Intervallo di confidenza al 95%	3.41-3.74	10.14-11.49	17.53-19.52	4.92-5.58

Una volta che i campioni sono stati prodotti sono caratterizzati in termini di spessore e densità. I risultati sono riportati nella tabella 6-6 e lo *scatterplot* 3D dei valori nella fig. 6-6.

Tabella 6-6: Caratterizzazione dei campioni: densità e spessore reale e titolo medio.

<i>Sample N°</i>	<i>Run Order</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>
25	1	50,2	4,5	8,4
4	2	73,3	1,2	3,6
5	3	72,2	1,2	3,6
12	4	20,6	7,95	13,2
6	5	72,6	1,2	3,6
13	6	19,8	8,0	13,2
14	7	21,1	7,9	13,2
26	8	48,3	4,5	8,4
8	9	21,7	7,8	3,6
7	10	22,1	7,7	3,6
9	11	23,1	7,6	3,6
15	12	74,1	1,2	13,2
16	13	73,2	1,2	13,2
17	14	73,0	1,2	13,2
3	15	20,4	1,0	3,6
18	16	75,1	8,0	13,2
19	17	76,4	8,0	13,2
2	18	21,3	1,0	3,6
1	19	20,6	1,0	3,6
27	20	50,5	4,5	8,4

20	21	75,6	8,0	13,2
21	22	21,3	1,0	13,2
11	23	76,4	8,0	3,6
22	24	18,7	1,0	13,2
28	25	48,7	4,5	8,4
10	26	80,6	8,5	3,6
23	27	20,3	1,0	13,2
24	28	78,1	8,0	3,6

Scatterplot of Densità vs Titolo medio vs Spessore

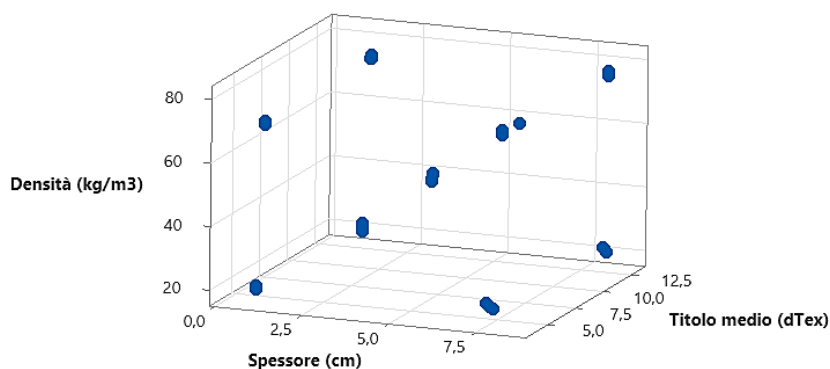


Figura 6-6: Scatterplot dei valori di densità, spessore e titolo medio ottenuti dalla caratterizzazione dei campioni di TNT.

6.2.4 Risultati delle analisi

Al termine delle campagne di test termoacustici si sono ottenuti i valori dei parametri risposta riportati nella tabella 6-7.

Tabella 6-7: Valori dei parametri risposta per ciascun campione che sono sottoposti all'analisi DOE: $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, k e R .

<i>Sample N°</i>	<i>Run Order</i>	$\bar{\alpha}$ basse (<i>adim.</i>)	$\bar{\alpha}$ medie (<i>adim.</i>)	$\bar{\alpha}$ alte (<i>adim.</i>)	k (W/m·K)	R (m ² ·K/W)
25	1	0,20	0,74	0,94	0,035	1,269
4	2	0,05	0,28	0,79	0,024	0,494
5	3	0,05	0,29	0,80	0,024	0,493
12	4	0,26	0,64	0,81	0,053	1,513
6	5	0,05	0,30	0,81	0,030	0,400
13	6	0,25	0,60	0,78	0,052	1,525
14	7	0,26	0,64	0,82	0,051	1,538
26	8	0,20	0,74	0,92	0,035	1,300
8	9	0,39	0,89	0,97	0,043	1,812
7	10	0,37	0,88	0,96	0,043	1,797

9	11	0,38	0,89	0,97	0,042	1,806
15	12	0,06	0,21	0,57	0,030	0,402
16	13	0,06	0,21	0,55	0,029	0,396
17	14	0,06	0,21	0,56	0,031	0,391
3	15	0,06	0,14	0,31	0,034	0,292
18	16	0,52	0,96	0,99	0,040	1,985
19	17	0,50	0,96	0,99	0,041	1,932
2	18	0,06	0,15	0,35	0,034	0,295
1	19	0,05	0,14	0,32	0,034	0,291
27	20	0,20	0,75	0,93	0,034	1,310
20	21	0,53	0,95	0,99	0,036	2,212
21	22	0,05	0,10	0,23	0,038	0,263
11	23	0,57	0,85	0,94	0,039	2,037
22	24	0,05	0,09	0,21	0,039	0,253
28	25	0,20	0,72	0,94	0,035	1,302
10	26	0,60	0,84	0,96	0,038	2,246
23	27	0,05	0,10	0,21	0,039	0,255
24	28	0,58	0,87	0,98	0,037	2,154

Si può notare che l'assorbimento acustico dei provini, nei diversi range di frequenze, conferma la teoria sulle proprietà acustiche dei materiali porosi. L'assorbimento è infatti limitato alle basse frequenze, con valore massimo registrato di 0,60, maggiore alle frequenze medie, dove il valore medio è di 0,54, e massimo alle frequenze alte, il valore minimo è stato di 0,21.

Per quanto riguarda le proprietà termiche, il minimo e massimo valore per la conducibilità sono rispettivamente di 0,024 e 0,053 W/m·K, mentre quello massimo per la resistenza è di 2,25 m²K/W. Nella norma UNI 10351, che elenca i valori di riferimento di conducibilità per i materiali tradizionali utilizzati in edilizia, con spessore maggiore di 10cm e testati alla temperatura media di 20°C, si leggono alcuni valori utili per il confronto con quelli osservati:

- Pannelli semirigidi in fibra di vetro: 0.040 W/m·K
- Pannelli semirigidi in fibre minerali: 0.042 W/m·K
- Polistirene espanso e sinterizzato in lastre: 0.042 W/m·K
- Polistirene estruso espanso con pelle nella forma di lastre: 0.035 W/m·K
- Poliuretano espanso in lastre: 0.032 W/m·K.

Si può concludere che, nelle condizioni di test effettuate, alcuni dei materiali che si sono realizzati presentano buone caratteristiche isolanti se confrontati con materiali tradizionali utilizzati in edilizia. Questo permette di affermare che i TNT possono essere utilizzati efficacemente per realizzare un sistema isolante termico.

6.2.5 Elaborazione dei dati raccolti

Una volta collezionati i risultati dei test termoacustici, vengono inseriti nel software Minitab per essere elaborati. Vengono analizzate separatamente le cinque variabili risposta: $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, k e R .

6.2.5.1 Assorbimento acustico alle basse frequenze

Il primo parametro acustico è l'assorbimento acustico alle basse frequenze. Prima di procedere alla presentazione dei risultati e alla loro elaborazione, vengono verificate le ipotesi alla base dell'analisi DOE. Viene quindi osservata la dispersione dei residui per verificarne la linearità, la distribuzione normale, l'omoschedasticità e l'indipendenza. Dalla figura 6-7, anche se qualche unità statistica presenta dei valori dei residui elevati, si può concludere che le ipotesi alla base del modello sono verificate. Infatti:

- Nel “*Normal Probability Plot*” i residui hanno una buona distribuzione lineare che conferma la loro distribuzione normale, lo stesso si nota anche nell'istogramma
- Nel “*Versus Fits*” non sono riconoscibili tendenze, per questo è accettata l'ipotesi di omoschedasticità
- Nel “*Versus Order*” i residui non sono dipendenti perché non esistono tendenze nei loro valori al variare del momento temporale in cui sono stati registrati.

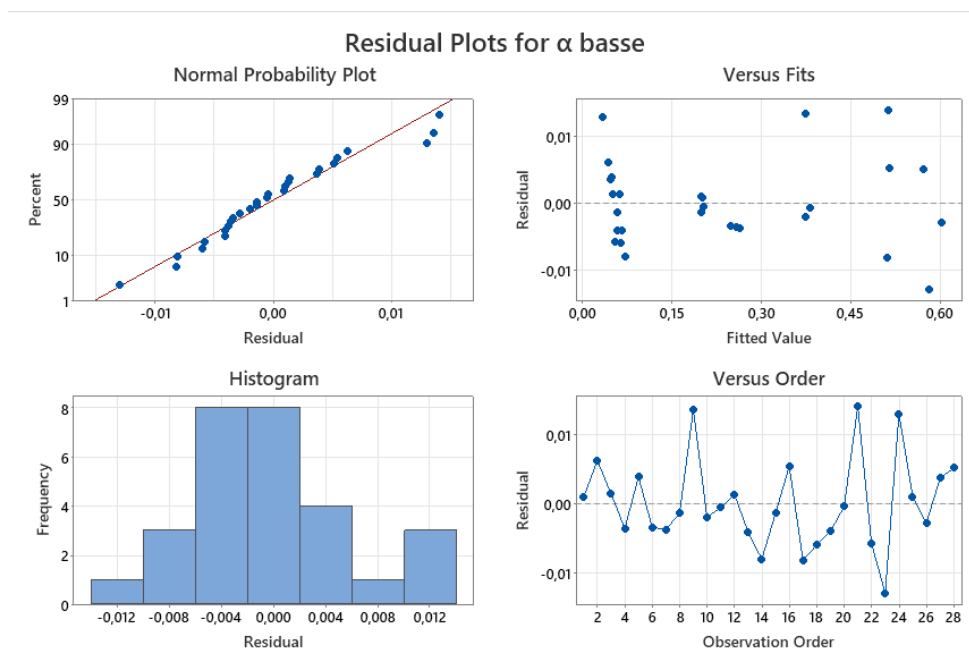


Figura 6-7: Analisi dei residui per le osservazioni sperimentali alle basse frequenze.

Si è ottenuto un valore del R-sq (adj) e del R-sq (pred) rispettivamente di 99.85% e 99.76%, il modello risulta quindi molto affidabile nel rappresentare la variabilità del

parametro risposta anche per la popolazione dei campioni non osservata. Il *p-value* del modello è nullo, dunque esiste almeno un fattore che ha coefficiente di correlazione con l'assorbimento acustico diverso da zero. Al termine della procedura *Stepwise backward elimination* tutti i fattori lineari e quadratici e le interazioni presentano un *p-value* nullo, quindi ciascun parametro influenza in qualche misura la proprietà acustica studiata. La forza della correlazione tra assorbimento acustico e i parametri rimasti in gioco dopo la procedura di eliminazione a step è mostrata dal grafico di Pareto, fig. 6-8.

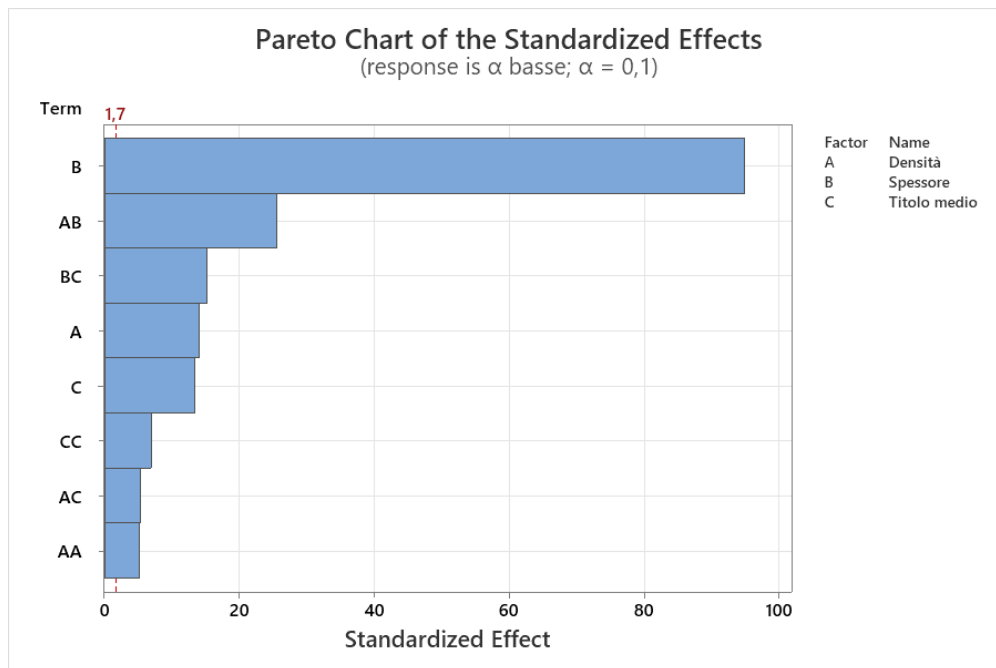


Figura 6-8: Grafico di Pareto per la variabile risposta $\bar{\alpha}$ basse (adim.), parametri analizzati: densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Emerge che, alle basse frequenze, il fattore che domina le *performance* acustiche è lo spessore del materiale, ciò conferma quanto affermato dagli studi di letteratura esaminati. Uno spessore maggiore del TNT aumenta la resistività al flusso d'aria del materiale e l'entità dei meccanismi che portano alla dissipazione dell'energia del suono. Secondi all'entità della relazione spessore- $\bar{\alpha}$ basse, si trovano due interazioni: quella densità-spessore e quella spessore-titolo medio. Da questo è possibile concludere che è più importante considerare il prodotto tra queste grandezze rispetto alla sola densità o il solo titolo medio, anche se entrambi compaiono come parametri statisticamente significativi. Si nota infine che i fattori quadratici del titolo medio e della densità hanno un *p-value* minore del livello di significatività. La relazione di questi parametri con $\bar{\alpha}$ basse è dunque non lineare come è possibile osservare nella fig. 6-9. La figura rappresenta l'effetto dei fattori singoli. Si notano le seguenti tendenze:

- Al crescere della densità del TNT si ottiene inizialmente un maggior assorbimento acustico. Esiste però un valore massimo oltre il quale la proprietà decade. Questo è in accordo con la letteratura esaminata. Quando si aumenta la densità del TNT si ha inizialmente un maggior assorbimento acustico perché sono presenti un maggior numero di fibre nell'unità di spazio che possono dunque interagire con l'onda acustica. Quando però la massa per unità di volume è troppo elevata, aumenta eccessivamente la resistenza al flusso d'aria offerta dal materiale con conseguente maggiore riflessione dell'onda acustica.
- All'aumentare dello spessore si ha sempre un aumento delle capacità acustiche, questo è in linea con le pubblicazioni scientifiche sull'argomento ed è dovuto principalmente all'aumento della resistività al flusso d'aria.
- Considerando il titolo medio, l'andamento dell'assorbimento acustico è parabolico, con concavità verso i valori di $\bar{\alpha}$ basse maggiori. Da questo si conclude che si ottengono *performance* acustiche migliori alle basse frequenze con TNT costituiti da fibre a titolo molto basso od elevato. Questo è in contrasto con la letteratura esaminata in cui viene affermato che i materiali migliori sono quelli costituiti dalle fibre di diametro più piccolo. La discrepanza trova spiegazione considerando che è risultata statisticamente rilevante l'interazione spessore-titolo medio, che dunque influenza la forma della funzione graficata. Una conferma a questo sono i risultati del confronto OFAT che verrà presentato nel capitolo 6.2.5.5.

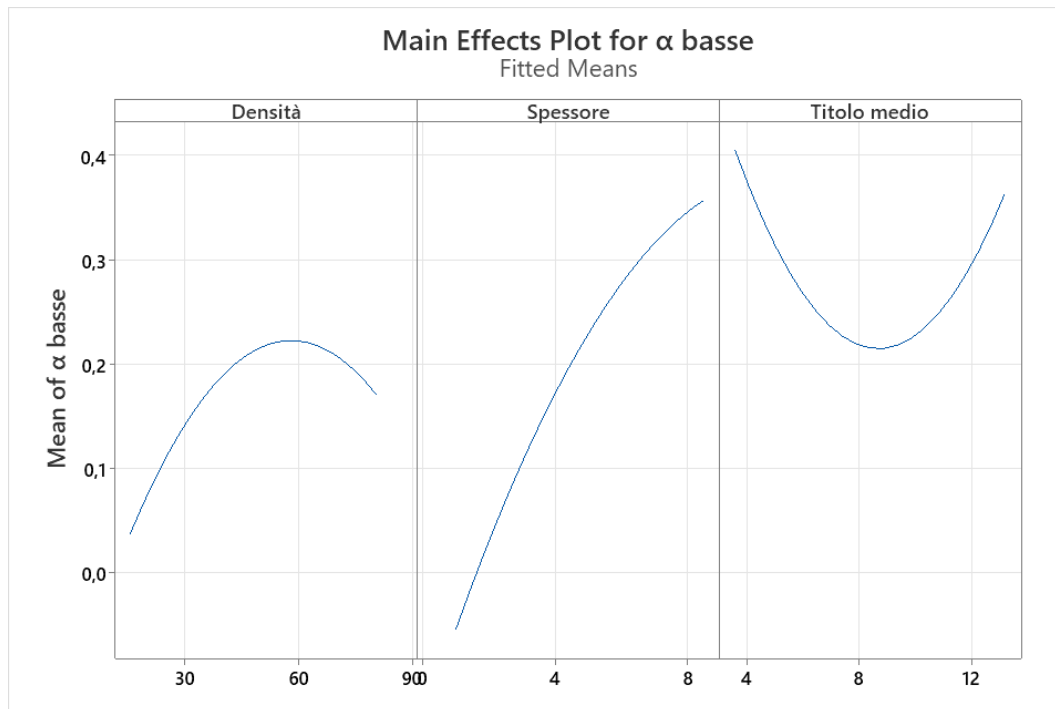


Figura 6-9: Effetto dei fattori singoli sulla variabile risposta $\bar{\alpha}$ basse (adim.). Densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Nella figura 6-10 è possibile apprezzare maggiormente la superficie che descrive il valore del coefficiente di assorbimento acustico medio in funzione della densità e spessore. Si nota che il miglior comportamento acustico si ottiene in corrispondenza degli estremi dell'intervallo dei valori del titolo medio e per valori di densità intermedi.

Surface Plot of α basse vs Titolo medio; Densità

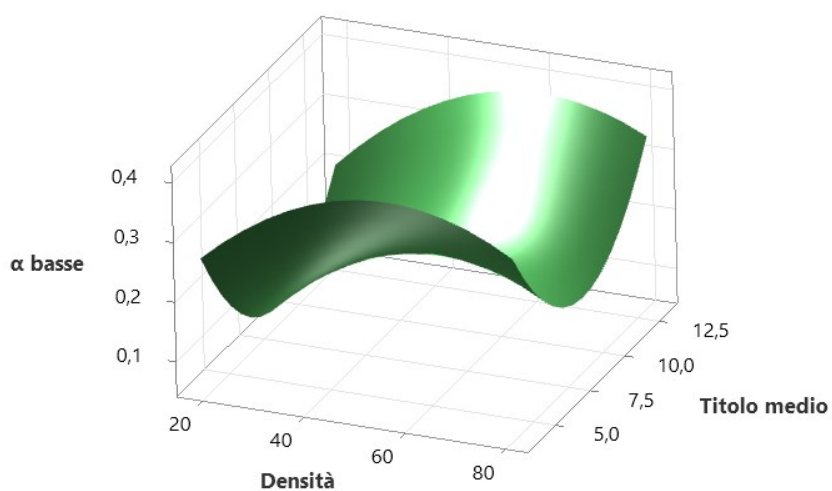


Figura 6-10: Superficie di risposta $\bar{\alpha}$ basse (adim.) in funzione di densità (kg/m^3) e titolo medio delle fibre (dtex). Il valore della variabile spessore è fissato a 4.75cm.

L'equazione del modello di regressione, che può essere utilizzata per stimare il valore di $\bar{\alpha}$ basse (adim.), è la seguente:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} \text{ basse} = & 0,1266 + 0,01266 \text{ Densità} + 0,03566 \text{ Spessore} - 0,1110 \text{ Titolo} \\ & \text{medio} - 0,000152 \text{ Densità} * \text{Densità} + 0,006547 \text{ Titolo medio} * \text{Titolo medio} + \\ & 0,000694 \text{ Densità} * \text{Spessore} + 0,000075 \text{ Densità} * \text{Titolo medio} - 0,001512 \\ & \text{Spessore} * \text{Titolo medio} \end{aligned} \quad (6.1)$$

dove la densità è espressa in kg/m^3 , lo spessore in cm e il titolo medio in dtex.

L'equazione è stata validata testando tre campioni, i risultati sono riportati nella tabella 6-8.

Tabella 6-8: Risultati delle tre prove di validazione dell'equazione 6.1.

<i>Prova di validazione</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% predetto</i>	<i>$\bar{\alpha}$ basse osservato</i>
1	40,6	5,0	10,3	0,20-0,23	0,21
2	62,8	3,0	10,5	0,10-0,14	0,11
3	81,9	8,5	3,6	0,57-0,62	0,58

Sono stati infine calcolati i valori che ottimizzano il parametro risposta, vengono riportati nella tabella 6-9.

Tabella 6-9: Valori ottimali di densità, spessore e titolo medio per massimizzare il coefficiente di assorbimento acustico medio alle basse frequenze.

	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>$\bar{\alpha}$ basse</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95%</i>
<i>Valore ottimale</i>	69,0	8,5	3,6	0,61	0,54-0,69

6.2.5.2 Assorbimento acustico alle medie frequenze

Il secondo parametro acustico analizzato è l'assorbimento acustico alle frequenze intermedie per le quali si segue una procedura di elaborazione dei dati analoga a quanto fatto per le basse frequenze.

La verifica delle ipotesi alla base dell'analisi DOE, tramite osservazione della dispersione dei residui, è verificata come si può osservare nella fig. 6-11. Anche in questo caso sono presenti alcune unità statistiche con residuo elevato. In aggiunta, si nota che la distribuzione dei residui nel "Normal Probability Plot" si discosta talvolta dalla linearità ma in modo tollerabile per accettare le ipotesi del modello.

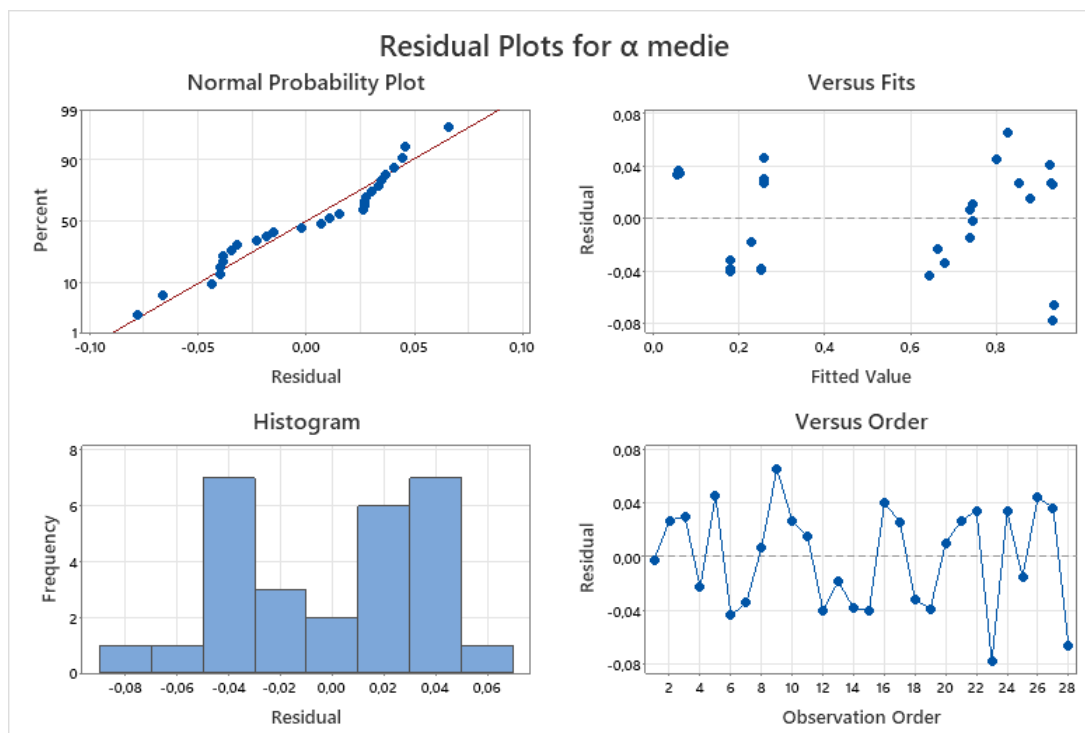


Figura 6-11: Analisi dei residui per le osservazioni sperimentali alle medie frequenze.

Si è ottenuto un valore del R-sq (adj) e del R-sq (pred) rispettivamente di 98.18% e 95.87%, il modello risulta quindi affidabile nel rappresentare la variabilità del parametro risposta anche per la popolazione dei campioni non osservata. Il p -value del modello è nullo, dunque esiste almeno un fattore che ha coefficiente di correlazione con l'assorbimento acustico diverso da zero. Al termine della procedura *Stepwise backward elimination* tutti i fattori lineari e quadratici e le interazioni presentano un p -value prossimo allo zero, quindi ciascun parametro influenza in qualche misura la proprietà acustica studiata. La forza della correlazione tra assorbimento acustico e i parametri rimasti in gioco dopo la procedura di eliminazione a step è mostrata dal grafico di Pareto, fig. 6-12.

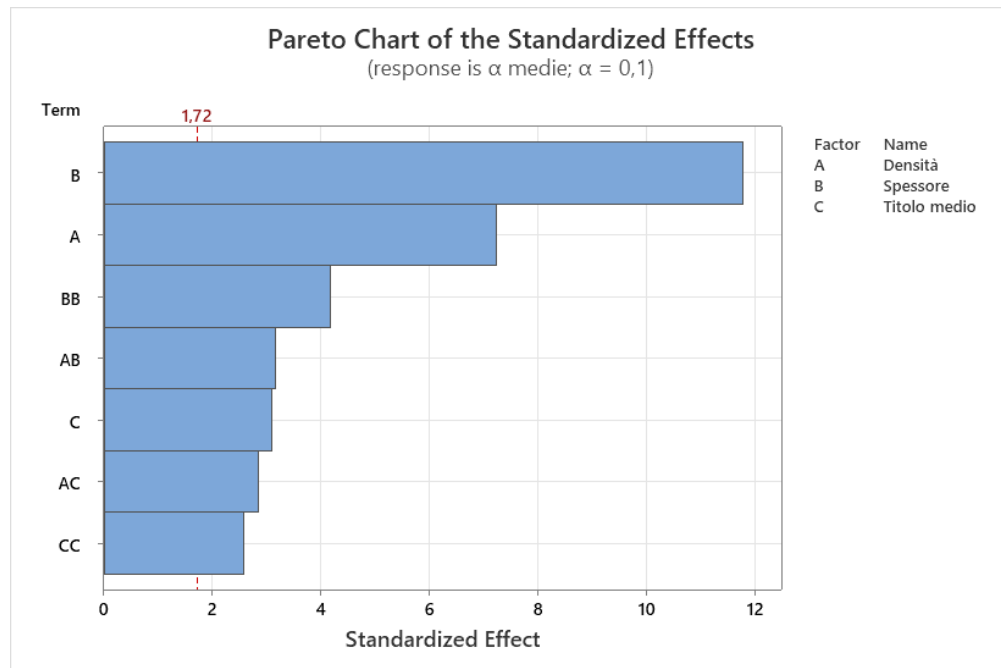


Figura 6-12: Grafico di Pareto per la variabile risposta $\bar{\alpha}$ medie (adim.), parametri analizzati: densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Dal grafico di Pareto si nota che, come per le basse frequenze, il fattore che domina le *performance* acustiche è lo spessore del materiale che conferma quanto affermato dagli studi di letteratura esaminati. A differenza delle basse frequenze, per le medie frequenze l'effetto dello spessore è meno preponderante su quello degli altri fattori. Tra questi, la densità è il secondo fattore per importanza per l'assorbimento acustico ed è seguita dal fattore quadratico dello spessore, ad indicare che la proprietà studiata non varia linearmente con questa caratteristica geometrica, bensì con un andamento a parabola. Questo è confermato dai grafici dell'effetto dei fattori singoli in fig. 6-13.

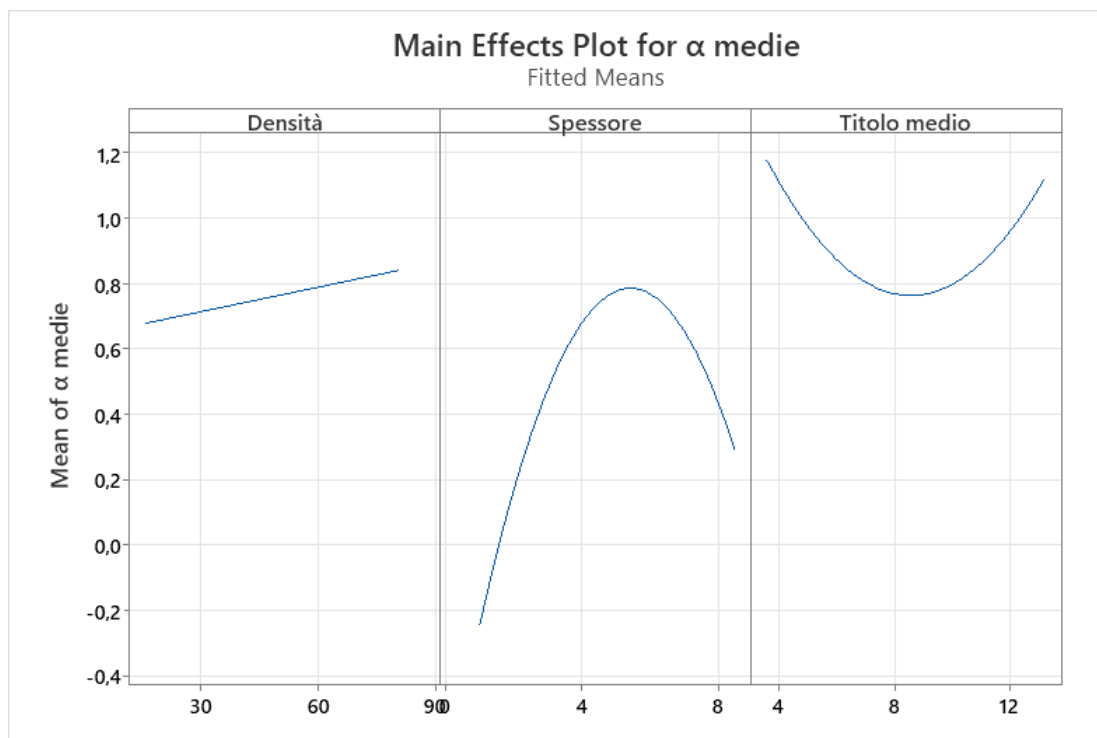


Figura 6-13: Effetto dei fattori singoli sulla variabile risposta $\bar{\alpha}$ medie (adim.). Densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Si notano le seguenti tendenze:

- A differenza di quanto notato alle basse frequenze, l’assorbimento acustico aumenta sempre con la densità; dunque, non si assiste alla riduzione del coefficiente di assorbimento alle densità maggiori prese in esame. Si ipotizza però che anche per le frequenze intermedie esista un massimo valore di questo fattore, al di sopra del quale la riflessione delle onde acustiche da parte del TNT risulta in *performance* inferiori.
- Lo spessore presenta un andamento parabolico con concavità verso i valori di $\bar{\alpha}$ medie maggiori. La forma parabolica ha un andamento piuttosto stretto e l’ottimo delle *performance* è centrale alla banda degli spessori analizzati. Questo è giustificato graficamente dalla fig. 6-14: la curva che rappresenta l’assorbimento acustico in funzione della frequenza, per i quattro provini appartenenti ai vertici del “cubo” caratterizzati dal massimo valore di spessore $\ell = 8,0 \text{ cm}$ (si veda la figura 6-2), presenta nel range delle medie frequenze una depressione. Quindi, un assorbimento minore. Diversamente, per i provini caratterizzati dallo spessore minimo analizzato ($\ell = 1,2 \text{ cm}$), questa forma delle curve non si osserva. Ciò giustificherebbe il calo del coefficiente $\bar{\alpha}$ medie.
- Considerando il titolo medio, in analogia con quanto osservato per le basse frequenze, si osserva un andamento parabolico con concavità verso l’alto della variabile di risposta. Questo è in contrasto con la letteratura esaminata in cui viene

affermato che i materiali migliori sono quelli costituiti dalle fibre di diametro più piccolo. Questa discrepanza trova spiegazione considerando che è risultata statisticamente rilevante l'interazione titolo medio-densità. Una conferma alla letteratura sono i risultati del confronto OFAT che verrà presentato nel paragrafo 6.2.5.5.

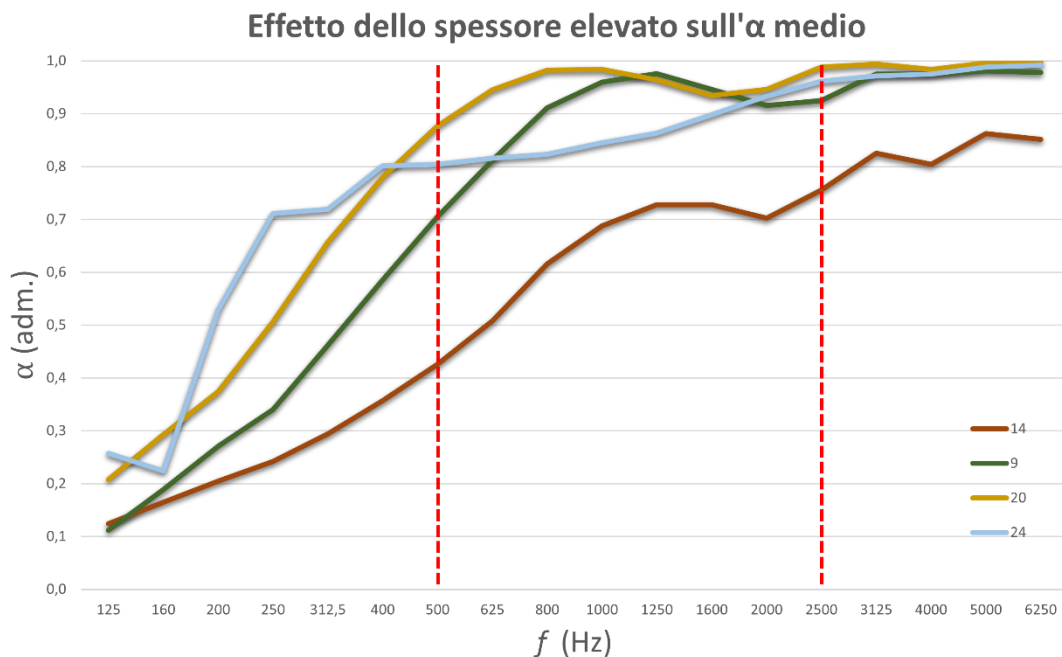


Figura 6-14: Curva di assorbimento acustico in funzione della frequenza, per quattro provini appartenenti ai quattro vertici del “cubo” in figura 6-2 caratterizzati dal massimo valore di spessore $\ell = 8,0 \text{ cm}$.

Considerando che le relazioni non lineari sono quelle dei fattori spessore e titolo medio, si riporta in fig. 6-15 la superficie che descrive il valore del coefficiente di assorbimento acustico in funzione di queste variabili. Anche in questa rappresentazione si nota che lo spessore è il fattore preponderante, il titolo medio delle fibre utilizzate ha invece un effetto più limitato sulla proprietà acustica.

Surface Plot of $\bar{\alpha}$ medie vs Titolo medio; Spessore

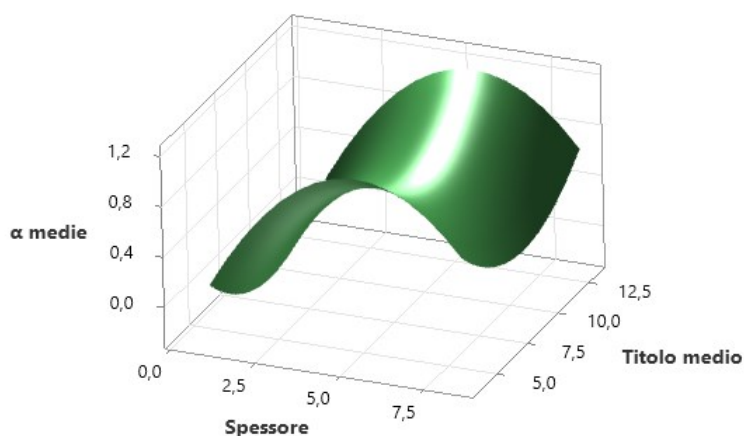


Figura 6-15: Superficie di risposta $\bar{\alpha}$ medie (adim.) in funzione di spessore (cm) e titolo medio delle fibre (dtex). Il valore della variabile densità è fissato a 49.6 kg/m³.

L'equazione del modello di regressione, che può essere utilizzata per stimare il valore di $\bar{\alpha}$ medie (adim.), è la seguente:

$$\bar{\alpha} \text{ medie} = 0,544 - 0,001539 \text{ Densità} + 0,547 \text{ Spessore} - 0,297 \text{ Titolo medio} - 0,0525 \text{ Spessore} * \text{Spessore} + 0,01669 \text{ Titolo medio} * \text{Titolo medio} + 0,000457 \text{ Densità} * \text{Spessore} + 0,000222 \text{ Densità} * \text{Titolo medio} \quad (6.2)$$

dove la densità è espressa in kg/m³, lo spessore in cm e il titolo medio in dtex.

L'equazione è stata validata testando tre campioni, i risultati sono riportati nella tabella 6-10.

Tabella 6-10: Risultati delle tre prove di validazione dell'equazione 6.2.

<i>Prova di validazione</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% predetto</i>	<i>$\bar{\alpha}$ medie osservato</i>
1	40,6	5,0	10,3	0,69-0,91	0,72
2	62,8	3,0	10,5	0,46-0,67	0,55
3	81,9	8,5	3,6	0,68-0,93	0,81

Sono stati infine calcolati i valori che ottimizzano il parametro risposta, vengono riportati nella tabella 6-11.

Tabella 6-11: Valori ottimali di densità, spessore e titolo medio per massimizzare il coefficiente di assorbimento acustico alle medie frequenze.

	<i>Densità</i> (kg/m ³)	<i>Spessore</i> (cm)	<i>Titolo</i> medio (dtex)	$\bar{\alpha}$ medie	<i>Intervallo di</i> <i>confidenza al 95%</i>
<i>Valore</i> <i>ottimale</i>	80,6	5,5	13,2	1,27	0,98-1,56

Si nota che, in output del modello previsionale, il valore del coefficiente di assorbimento acustico e il relativo intervallo di confidenza presentano valori superiori all'unità che non sono ammissibili ($\alpha \leq 1$). Si deve infatti considerare il valore di R-sq (adj), secondo il quale circa il 5% della variabilità dei dati non è spiegata dal modello.

6.2.5.3 Assorbimento acustico alle alte frequenze

Il terzo parametro acustico analizzato è l'assorbimento acustico alle frequenze maggiori. La verifica delle ipotesi alla base dell'analisi DOE, tramite osservazione della dispersione dei residui, è verificata come si può osservare nella fig. 6-16.

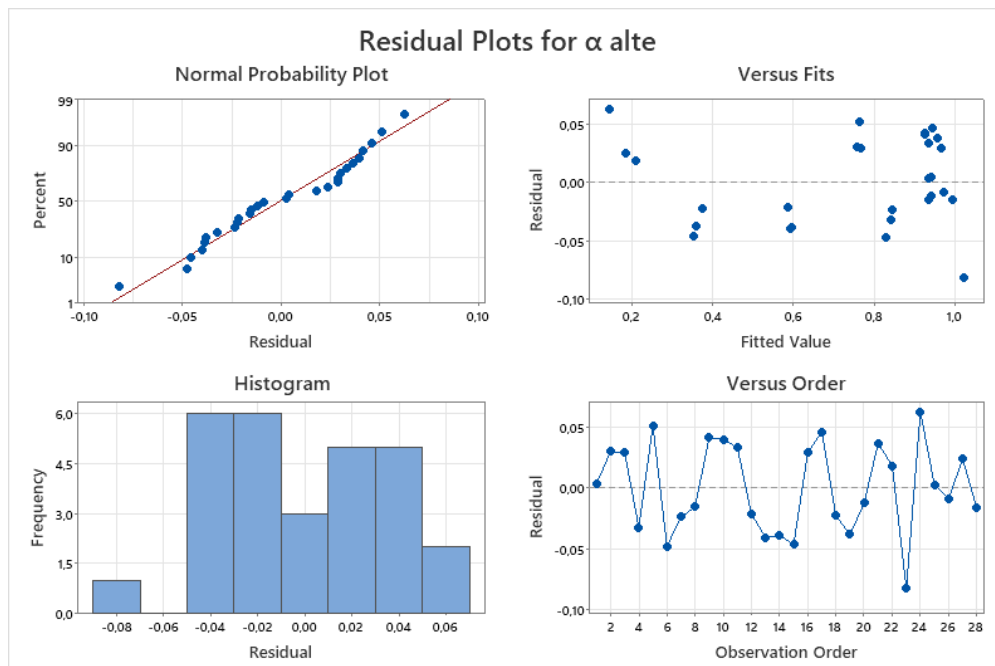


Figura 6-16: Analisi dei residui per le osservazioni sperimentali alle alte frequenze.

Si è ottenuto un valore del R-sq (adj) e del R-sq (pred) rispettivamente di 97.75% e 96.89%, il modello risulta quindi affidabile nel rappresentare la variabilità del parametro risposta anche per la popolazione dei campioni non osservata. Il *p-value* del modello è nullo, dunque esiste almeno un fattore che ha coefficiente di correlazione con l'assorbimento acustico diverso da zero. Al termine della procedura *Stepwise backward elimination* tutti i fattori lineari e quadratici e le interazioni presentano un *p-value* prossimo allo zero, quindi ciascun parametro influenza in qualche misura la proprietà acustica studiata. La forza della correlazione, tra assorbimento acustico e i parametri rimasti in gioco dopo la procedura di eliminazione a step, è mostrata dal grafico di Pareto in fig. 6-17.

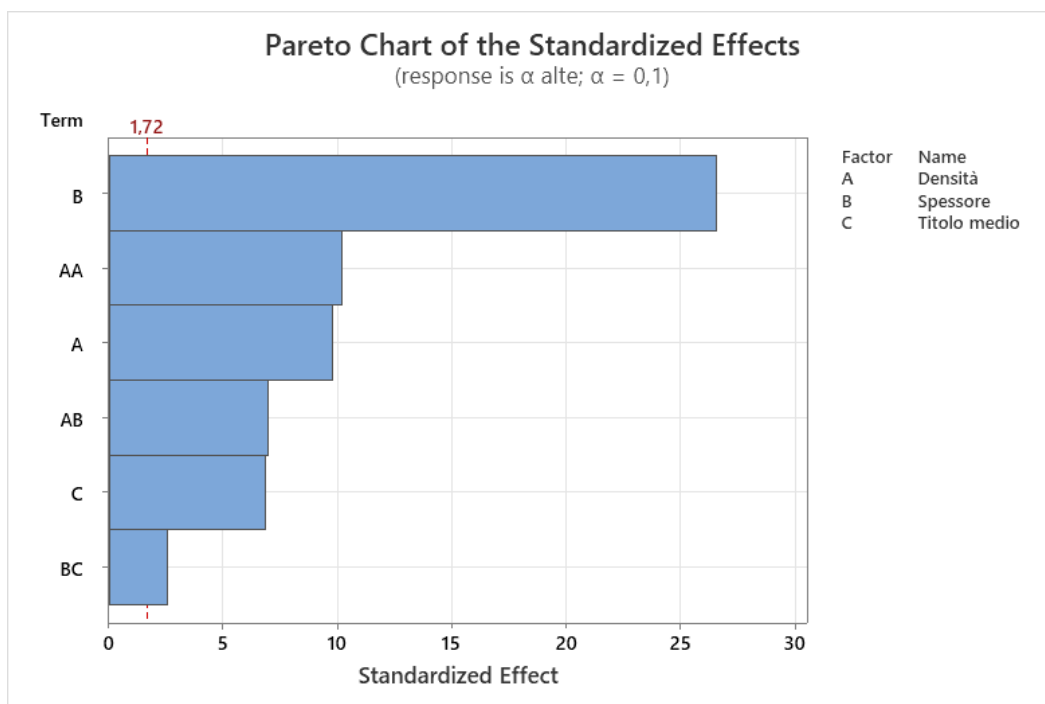


Figura 6-17: Grafico di Pareto per la variabile risposta $\bar{\alpha}_{alte}$ (adim.), parametri analizzati: densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Dal grafico di Pareto si nota che, come per le basse frequenze, il fattore che domina le *performance* acustiche è lo spessore del materiale che conferma quanto affermato dagli studi di letteratura esaminati. In analogia con le medie frequenze, per quelle alte, l'effetto dello spessore è meno preponderante su quello degli altri fattori. La densità è il secondo fattore per importanza, sia nella forma lineare che quadratica.

In fig. 6-18 sono presentati i grafici dell'effetto dei fattori singoli. Si notano le seguenti tendenze:

- In accordo con quanto determinato alle basse frequenze, l'assorbimento acustico in funzione della densità ha un andamento parabolico con concavità rivolta verso il basso. Si può dunque concludere che, anche per le alte frequenze, un eccessivo aumento di fibre per unità di volume riduce la capacità del TNT di assorbire le onde acustiche per l'effetto di riflessione da parte della superficie del materiale.
- Anche la relazione coefficiente di assorbimento acustico-spessore è in analogia con quanto trovato alle basse frequenze. Aumentare lo spessore ha sempre un effetto positivo sulla dissipazione delle onde sonore. Questo è in disaccordo con alcune ricerche scientifiche che affermano che non esiste una forte correlazione tra le due grandezze. Si ipotizza che questo sia legato alle numerose caratteristiche che concorrono a definire le proprietà di un TNT, che quindi non coinciderebbero completamente tra il presente studio e gli altri esaminati.
- Osservando la curva parametrica nel titolo medio si conclude che questa diverge da quanto affermato per le basse e medie frequenze. La relazione con l'assorbimento acustico non è infatti quadratica ma lineare con pendenza negativa. Questo è in accordo con la letteratura esaminata: fibre di diametro minore interagiscono maggiormente ed efficacemente con le onde di pressione sonora.

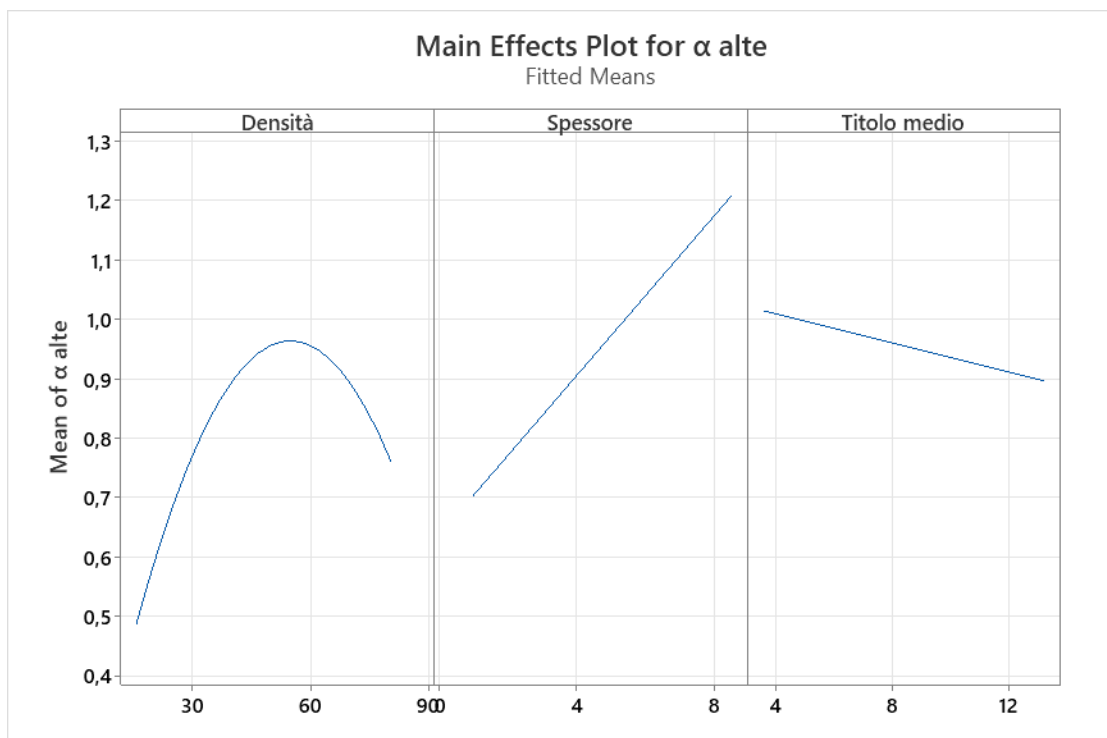


Figura 6-18: Effetto dei fattori singoli sulla variabile risposta $\bar{\alpha}$ alte (adim.). Densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtx).

L'equazione del modello di regressione, che può essere utilizzata per stimare il valore di $\bar{\alpha}$ alte (adim.), è la seguente:

$$\bar{\alpha}_{alte} = -0,2875 + 0,03707 \text{ Densità} + 0,08901 \text{ Spessore} - 0,01856 \text{ Titolo medio} - 0,000309 \text{ Densità} * \text{Densità} - 0,000662 \text{ Densità} * \text{Spessore} + 0,001327 \text{ Spessore} * \text{Titolo medio} \quad (6.3)$$

dove la densità è espressa in kg/m^3 , lo spessore in cm e il titolo medio in dtex.

L'equazione è stata validata testando tre campioni, i risultati sono riportati nella tabella 6-12.

Tabella 6-12: Risultati delle tre prove di validazione dell'equazione 6.3.

<i>Prova di validazione</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% predetto</i>	<i>$\bar{\alpha}_{alte}$ osservato</i>
1	40,6	5,0	10,3	0,80-0,99	0,89
2	62,8	3,0	10,5	0,72-0,90	0,89
3	81,9	8,5	3,6	0,84-1,05	0,94

Sono stati infine calcolati i valori che ottimizzano il parametro risposta, sono riportati nella tabella 6-13.

Tabella 6-13: Valori ottimali di densità, spessore e titolo medio per massimizzare il coefficiente di assorbimento acustico medio alle alte frequenze.

<i>Valore ottimale</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>$\bar{\alpha}_{alte}$</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95%</i>
	50,6	8,5	3,6	1,24	1,19-1,30

Si nota che, in output del modello previsionale, il valore del coefficiente di assorbimento acustico e il relativo intervallo di confidenza presentano valori superiori all'unità che non sono ammissibili ($\alpha \leq 1$). Si deve infatti considerare il valore di R-sq (adj), secondo il quale circa il 4% della variabilità dei dati non è spiegata dal modello.

6.2.5.4 Elaborazione dell'ottimo per l'assorbimento acustico

In questo sotto capitolo si presentano i valori ottimali di densità, spessore e titolo medio, ottenuti in output del DOE, che massimizzano le $\bar{\alpha}$ basse – medie – alte.

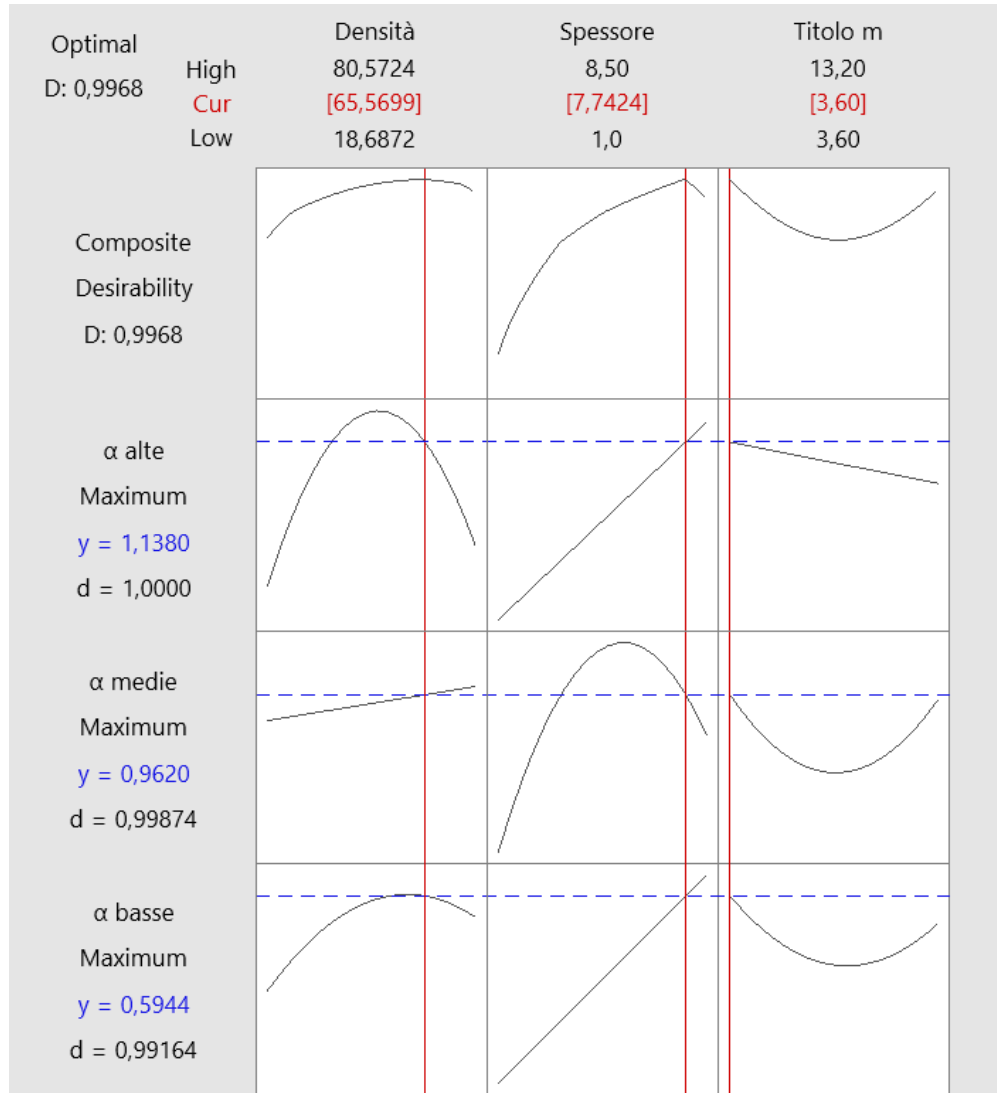


Figura 6-19: Valori di densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex), ottenuti con il modulo *Response Optimizer*, che ottimizzano l'assorbimento acustico nell'intero range di frequenze analizzato.

Osservando la fig. 6-19 si conclude che i valori di densità, spessore e titolo medio che ottimizzano tutti e tre i coefficienti di assorbimento acustico medio sono rispettivamente $65,6 \text{ kg/m}^3$, $7,74 \text{ cm}$ e $3,6 \text{ dtex}$. La desiderabilità media del modello è di $0,997$, dunque molto elevata. I valori dei coefficienti $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie e $\bar{\alpha}$ alte, il rispettivo intervallo di confidenza e la desiderabilità è riassunto nella tabella 6-14. In quest'ultima sono presenti valori di α al di fuori dei limiti di accettabilità. Questi vanno interpretati considerando che il valore massimo ammissibile è l'unità e che valori superiori sono

frutto di stime previsionali sulla base di un'osservazione solo parziale dell'intera popolazione di TNT. Dagli intervalli di confidenza per $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie e $\bar{\alpha}$ alte si comprende che la tipologia di TNT presi in esame può avere delle *performance* acustiche elevate alle medie e alte frequenze. Nel range delle basse frequenze i materiali porosi presentano un limitato assorbimento del suono che è possibile migliorare sensibilmente soprattutto utilizzando spessori elevati.

Nella fig. 6-19 si nota poi:

- Che l'assorbimento acustico ha andamento quasi parabolico al variare della densità. Questo è in accordo con la letteratura scientifica: densità troppo elevate riducono l'efficienza del materiale che ha una minore capacità di accogliere, e quindi dissipare, le onde di pressione sonora.
- Spessori elevati migliorano le *performance* di un TNT per una sua maggiore resistività al flusso d'aria.
- L'effetto del titolo medio delle fibre utilizzate sulle variabili risposta ha un andamento quasi parabolico con concavità verso l'alto. Questo è dovuto all'interazione, per le frequenze medio-basse, di questo fattore con densità o spessore.

Tabella 6-14: Valori ottimizzati dei parametri risposta $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, relativa desiderabilità e intervallo di confidenza.

<i>Risposta</i>	<i>Desiderabilità (adim.)</i>	<i>Valore (adim.)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95%</i>
$\bar{\alpha}$ basse	0,992	0,594	0,561-0,628
$\bar{\alpha}$ medie	0,999	0,962	0,897-1,028
$\bar{\alpha}$ alte	1,000	1,138	1,094-1,182

6.2.5.5 Confronto dell'assorbimento acustico con il metodo OFAT applicato ai fattori densità, spessore e titolo medio

Per valorizzare ulteriormente lo studio acustico dei TNT con una trattazione completa del ruolo che hanno densità, spessore e titolo medio nell'assorbimento acustico dei TNT stessi, si è deciso di analizzare l'assorbimento sonoro di altri campioni di materiale. I provini in questione fanno parte di quelli caratterizzati e sottoposti ad analisi nel successivo capitolo 6.3; questi campioni sono frutto del medesimo processo industriale dell'azienda O.R.V. ma presentano caratteristiche tra loro diverse: i materiali scelti per questa digressione possono essere raggruppati in tre quartetti: i quattro TNT che li costituiscono si differenziano per la sola densità (gruppo "D") o spessore (gruppo "S"), o titolo medio ("gruppo "T"), mentre gli altri parametri che li descrivono sono identici. Si

vuole in questo modo fare un confronto, con la tecnica OFAT (*One Factor At Time*), dell'assorbimento acustico in funzione della frequenza sonora incidente. Si riporta in tabella 6-15 la caratterizzazione dei materiali scelti in termini di densità, spessore e titolo medio.

Tabella 6-15: Caratterizzazione di densità, spessore e titolo medio dei campioni di TNT utilizzati per il confronto OFAT.

<i>Campione N°</i>	<i>Gruppo</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>
1A	D	57.8	4.0	11.8
2A	S e T	40.7	5.0	11.8
4A	D	20.5	4.0	11.8
5A	D	39.6	4.0	11.8
6A	S	41.8	1.5	11.8
7A	S	41.2	3.0	11.8
8A	T	41.2	5.0	5.4
9A	T	40.5	5.0	10.3
10A	T	40.0	5.0	10.8
11A	S	43.6	9.0	11.8
26A	D	49.1	4	11.8

Nella fig. 6-20 è possibile confrontare materiali che si differenziano per il solo valore di densità. All'aumentare della densità si osserva un maggior assorbimento acustico alle frequenze medio-alte e solo un aumento limitato a quelle basse; questo è in accordo con la letteratura scientifica secondo la quale alle frequenze più basse il parametro fondamentale è lo spessore, e non la densità. Questo è confermato dal confronto OFAT di materiali a differente spessore (fig. 6-21): si nota che all'aumentare dello spessore si assiste alla "traslazione" delle curve di assorbimento alle frequenze più basse, quindi al crescere dello spessore migliorano le *performance* acustiche a tutte le frequenze. Infine, prendendo in considerazione campioni che si differenziano per il solo titolo medio si osserva, nella fig. 6-22, che questo fattore ha un limitato effetto sulle proprietà acustiche: si apprezza solo un debole miglioramento del coefficiente di assorbimento alle frequenze alte al diminuire del titolo medio.

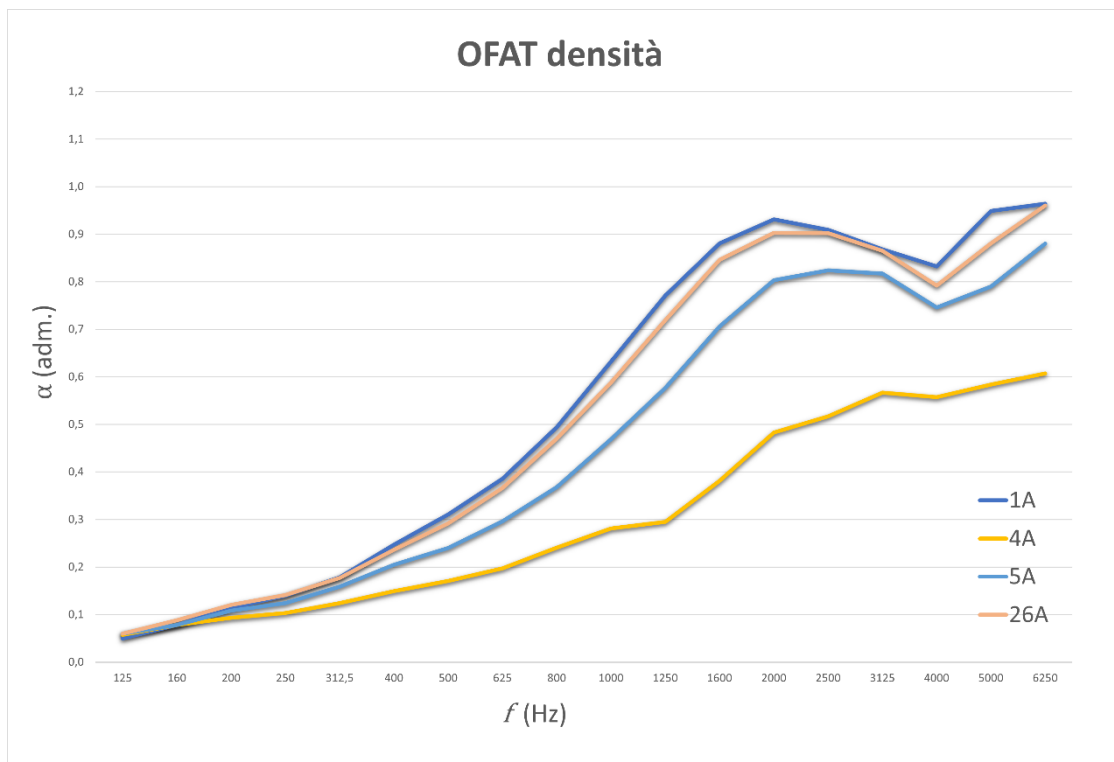


Figura 6-20: Curve di assorbimento acustico per il confronto OFAT della densità.

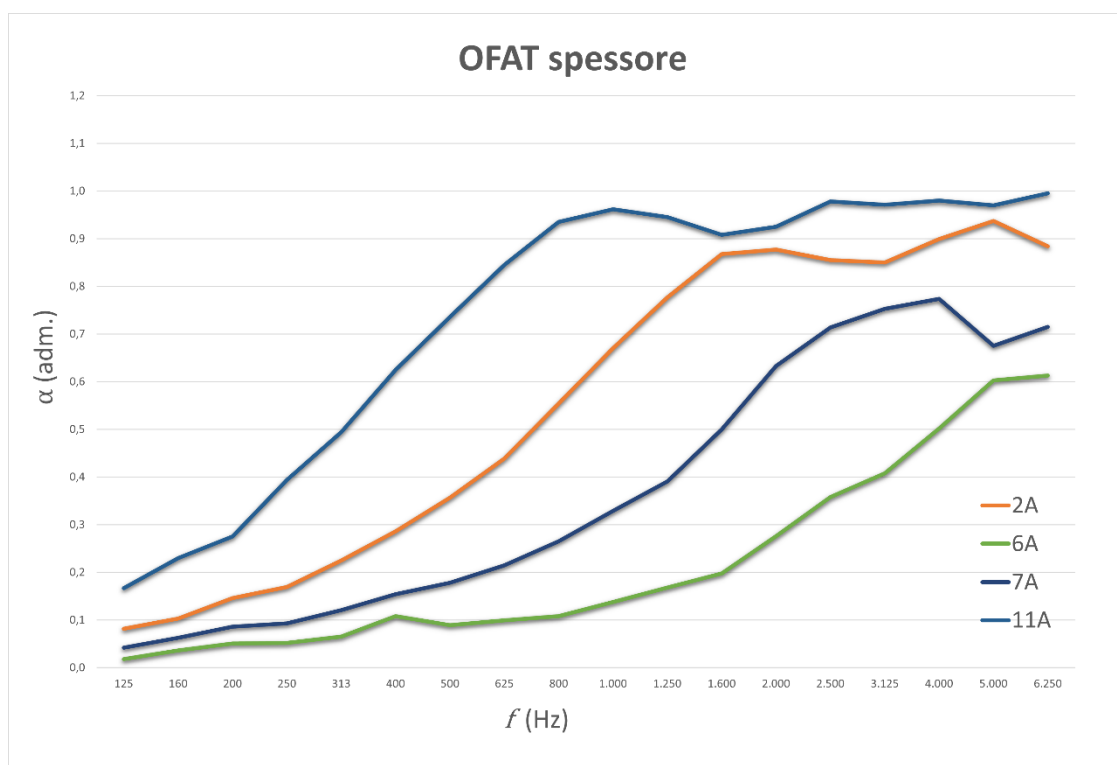


Figura 6-21: Curve di assorbimento acustico per il confronto OFAT dello spessore.

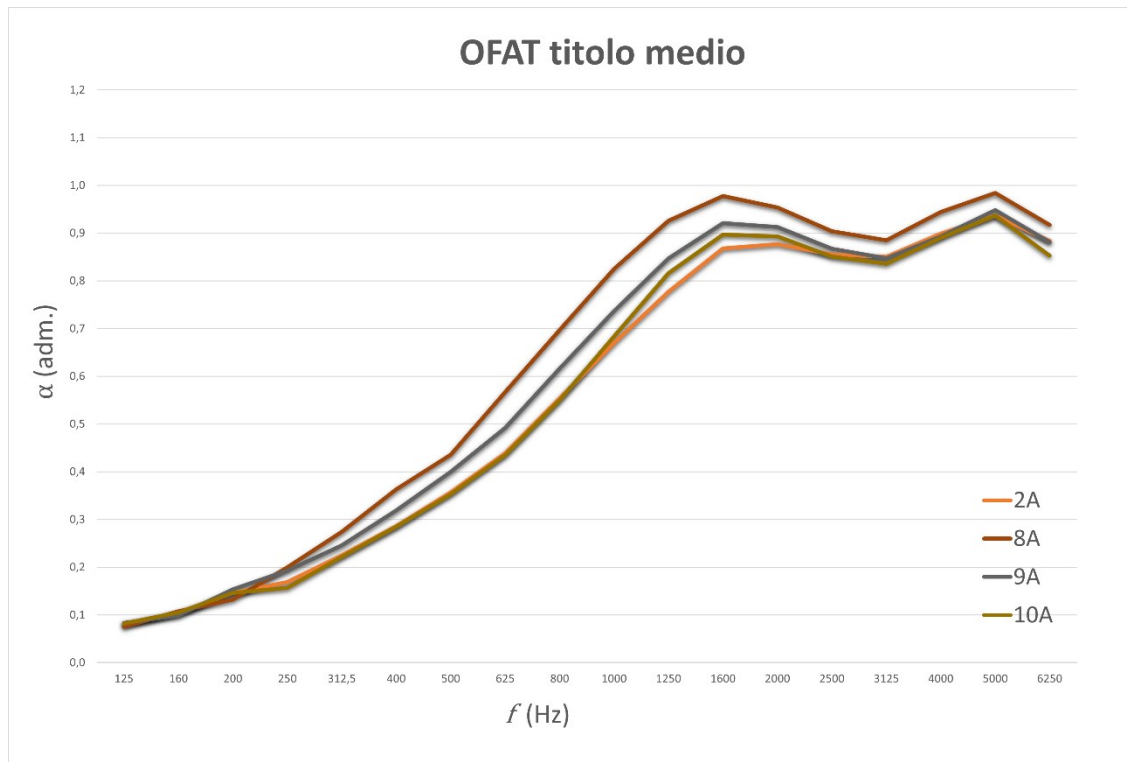


Figura 6-22: Curve di assorbimento acustico per il confronto OFAT del titolo medio.

6.2.5.6 Conducibilità termica

La conducibilità termica, intesa come combinazione dei diversi meccanismi di trasporto termico, è ora sottoposta ad analisi. Si segue una procedura di elaborazione dei dati analoga a quanto fatto per l'assorbimento acustico.

La verifica delle ipotesi alla base dell'analisi DOE, tramite osservazione della dispersione dei residui, è verificata come si può osservare nella fig. 6-23. Si osservano poche unità statistiche con residuo elevato.

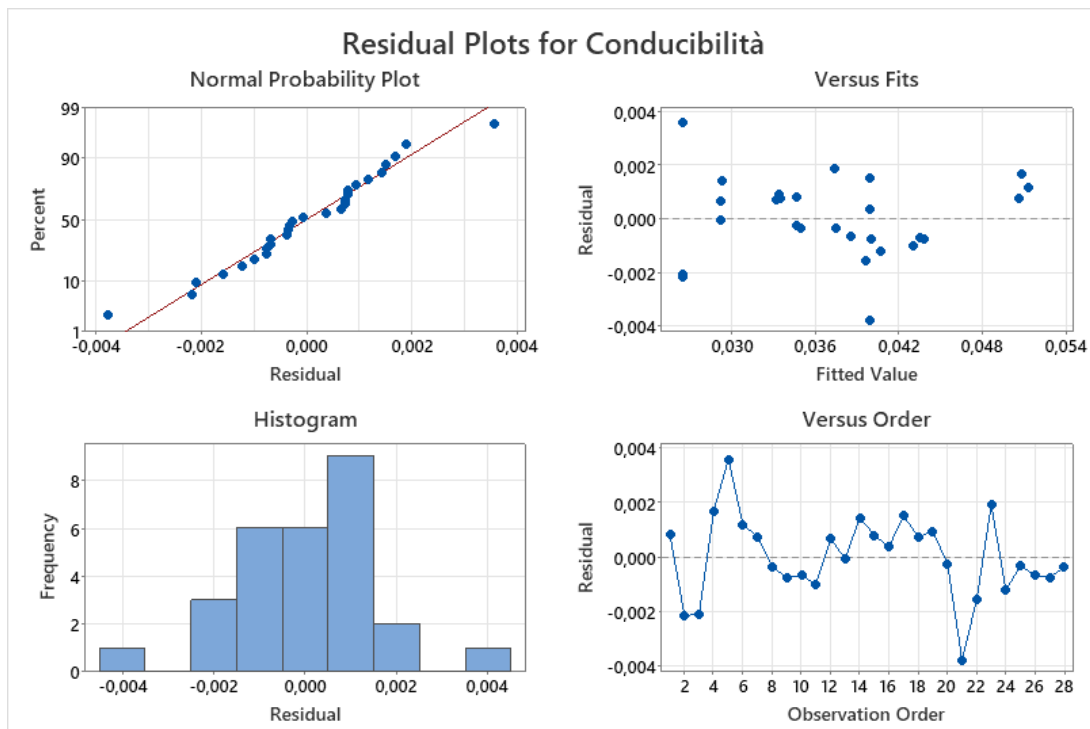


Figura 6-23: Analisi dei residui per le osservazioni sperimentali della conducibilità termica.

Si è ottenuto un valore del $R\text{-sq (adj)}$ e del $R\text{-sq (pred)}$ rispettivamente di 94.84% e 93.35%, leggermente inferiori di quelli ottenuti per i parametri acustici. Il modello risulta comunque affidabile nel rappresentare la variabilità del parametro risposta anche per la popolazione dei campioni non osservata. Il $p\text{-value}$ è nullo, dunque esiste almeno un fattore che ha coefficiente di correlazione con l'assorbimento acustico diverso da zero. Al termine della procedura *Stepwise backward elimination* tutti i fattori lineari e quadratici e le interazioni presentano un $p\text{-value}$ prossimo allo zero, quindi ciascun parametro influenza in qualche misura la proprietà acustica studiata. La forza della correlazione, tra conducibilità termica e i parametri rimasti in gioco dopo la procedura di eliminazione a step, è mostrata dal grafico di Pareto, fig. 6-24.

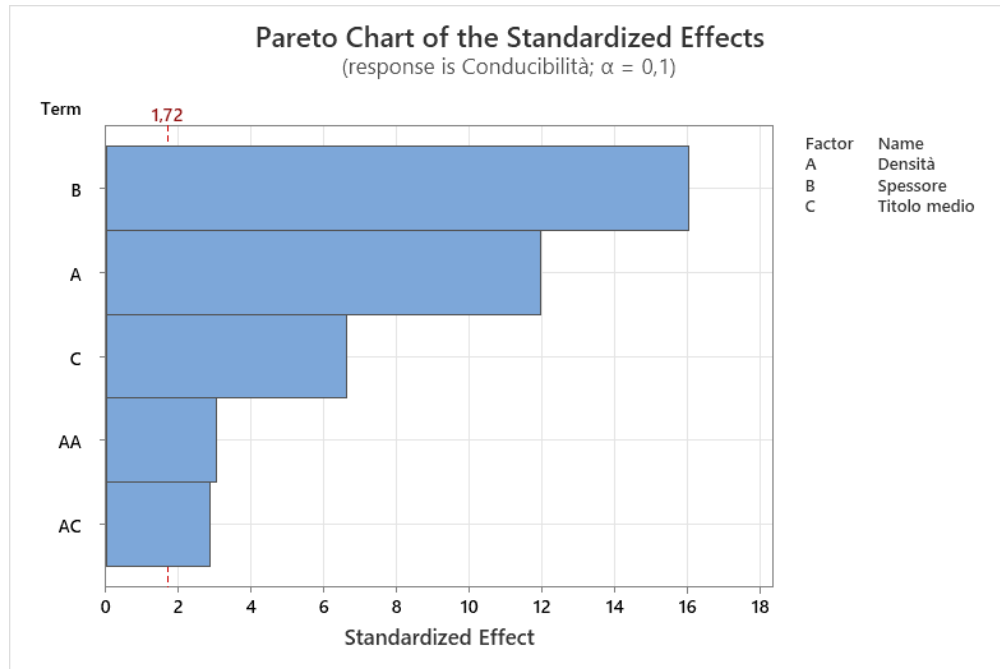


Figura 6-24: Grafico di Pareto per la variabile risposta conducibilità (W/mK), parametri analizzati: densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Dal grafico di Pareto si nota che i parametri che più influenzano la conducibilità termica sono i tre fattori lineari, primo tra questi lo spessore. Una possibile spiegazione della relazione con lo spessore, ricordando che la convezione non è considerata tra i meccanismi di trasporto termico per la corposa letteratura che sostiene quest'ipotesi, è una preponderanza dell'irraggiamento termico sulla conduzione. Dal processo di *Stepwise backward elimination*, è risultata statisticamente significativa solo l'interazione densità-titolo medio, anche se il suo effetto sulla risposta è il più limitato.

Si osservi come varia la conducibilità termica con il trattamento dei diversi fattori in fig. 6-25:

- Dal grafico della densità si nota un andamento a parabola con concavità verso i valori maggiori delle ordinate. I materiali che presentano il minor rapporto massa-volume sono quelli che presentano i valori di conducibilità maggiore. Considerando che la conducibilità dell'aria è minore di quella del materiale che costituisce le fibre, non è possibile spiegare questo andamento in termini di conduzione. L'andamento a parabola deve quindi trovare spiegazione considerando l'irraggiamento come fenomeno di trasporto preponderante nei TNT. Una densità elevata significa un maggior numero di fibre per unità di volume e dunque una maggiore tortuosità, il cammino libero medio delle radiazioni termiche è dunque inferiore con un conseguente maggior assorbimento delle stesse. Quando però la densità cresce e raggiunge un determinato valore, si

osserva un cambiamento di tendenza: la conducibilità diventa crescente. Questo è giustificato dai valori elevati di densità che diminuiscono drasticamente il calore irradiato. La conduzione diviene il principale fenomeno di trasporto termico con conseguente aumento della conducibilità al diminuire della frazione di gas contenuto nell'unità volumetrica del materiale.

- Il risultato meno previsto riguarda l'andamento della conducibilità in funzione dello spessore. Questo parametro geometrico influenza il solo trasporto per irraggiamento e l'esito atteso sarebbe quindi stato una diminuzione della conducibilità al suo aumentare, infatti tanto maggiore è la distanza che una radiazione termica deve percorrere per attraversare il materiale, tanto aumenta la possibilità che essa subisca *scattering* ed assorbimento. Si ipotizza di conseguenza che lo spessore non sia comunque sufficiente a schermare le radiazioni termiche. Inoltre, nella norma UNI 1035 si legge che sotto i 10cm la conducibilità dei materiali porosi aumenta con lo spessore per la presenza dell'irraggiamento. Solo per spessori maggiori questo meccanismo di trasporto è sensibilmente schermato. Una conferma all'andamento ottenuto della conducibilità in funzione dello spessore è data dalla fig. 6-26. Sono rappresentate, in un grafico conducibilità-spessore parametrico nella densità, le rette di regressione. Si osserva che anche in questa rappresentazione, indipendentemente dalla densità, al crescere dello spessore si registra un aumento di conducibilità.
- All'aumentare del titolo medio si osserva un discreto aumento della conducibilità. Questo è dovuto ad una minor superficie specifica della struttura fibrosa che risulta in un minor assorbimento e *scattering* delle radiazioni elettromagnetiche.

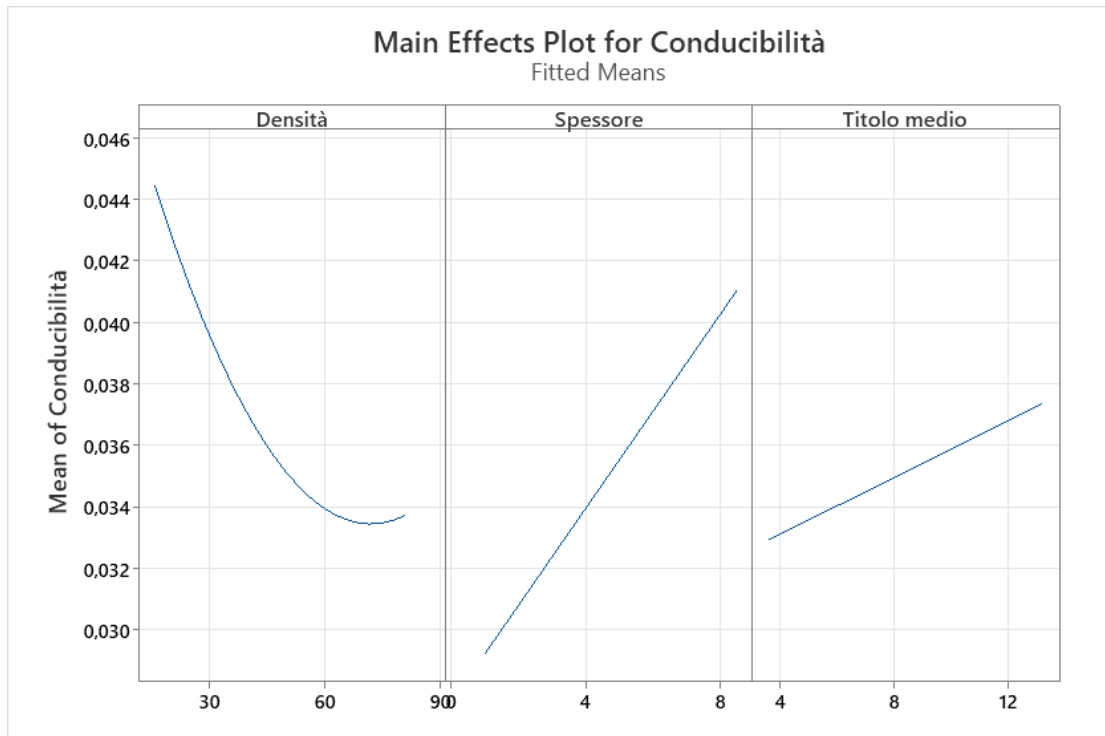


Figura 6-25: Effetto dei fattori singoli sulla variabile risposta conducibilità (W/m·K). Densità (kg/m³), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

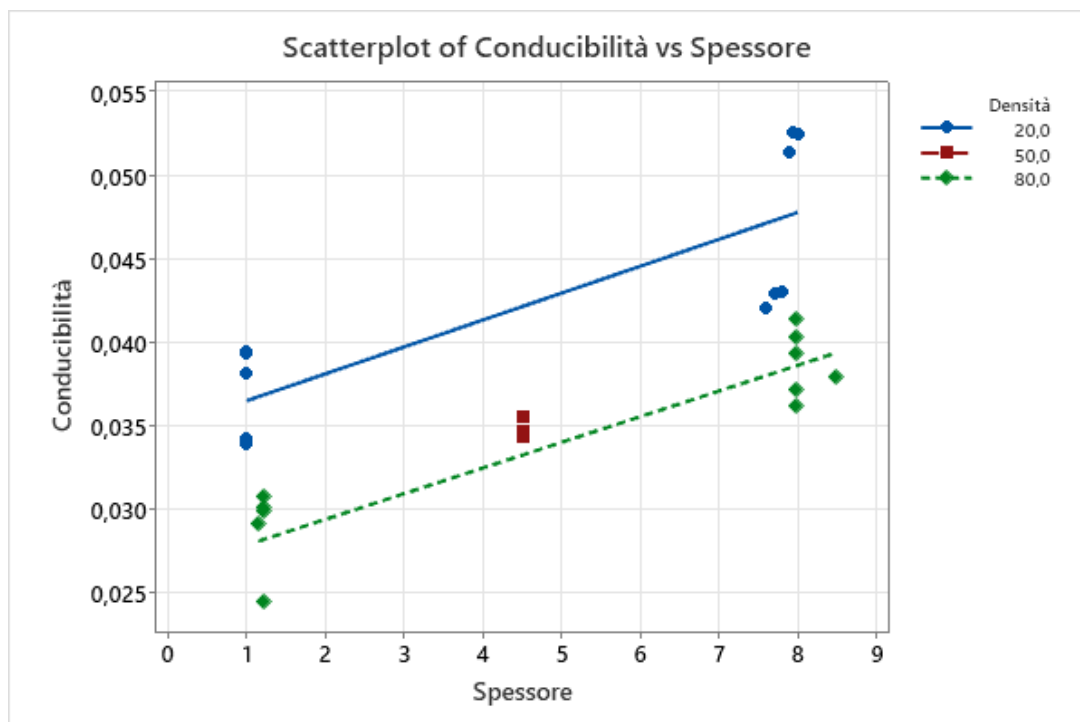


Figura 6-26: Scatterplot con rette di regressione della conducibilità (W/mK) vs spessore (cm) del TNT. Il grafico è parametrico nella densità (kg/m³).

L'equazione del modello di regressione, che può essere utilizzata per stimare il valore di conducibilità (W/mK), è la seguente:

$$\text{Conducibilità (W/mK)} = 0,03700 - 0,000440 \text{ Densità} + 0,001581 \text{ Spessore} + 0,000827 \text{ Titolo medio} + 0,000004 \text{ Densità} * \text{Densità} - 0,000007 \text{ Densità} * \text{Titolo medio} \quad (6.4)$$

dove la densità è espressa in kg/m^3 , lo spessore in cm e il titolo medio in dtex.

L'equazione è stata validata testando tre campioni, i risultati sono riportati nella tabella 6-16.

Tabella 6-16: Risultati delle tre prove di validazione dell'equazione 6.4.

<i>Prova di validazione</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% predetto</i>	<i>k osservato</i>
1	40,6	5,0	10,3	0,035-0,042	0,037
2	62,8	3,0	10,5	0,028-0,035	0,033
3	81,9	8,5	3,6	0,035-0,043	0,039

Sono stati infine calcolati i valori che ottimizzano (minimizzano) il parametro risposta, vengono riportati nella tabella 6-17.

Tabella 6-17: Valori ottimali di densità, spessore e titolo medio per minimizzare la conducibilità termica.

	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Conducibilità (W/mK)</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95%</i>
<i>Valore ottimale</i>	66,6	1,0	3,6	0,026	0,022-0,030

6.2.5.7 Resistenza termica

La resistenza termica, data dalla somma delle resistenze termiche dovute ai diversi meccanismi di trasporto termico, è ora presa in considerazione. Questo paragrafo, considerando che questa proprietà è inversamente proporzionale alla conducibilità con coefficiente pari allo spessore, ha il solo scopo di verificare questa affermazione a conferma della bontà dei risultati ottenuti.

La verifica delle ipotesi alla base dell'analisi DOE, tramite osservazione della dispersione dei residui, è verificata come si può osservare nella fig. 6-27. Si registrano poche unità statistiche con residuo elevato.

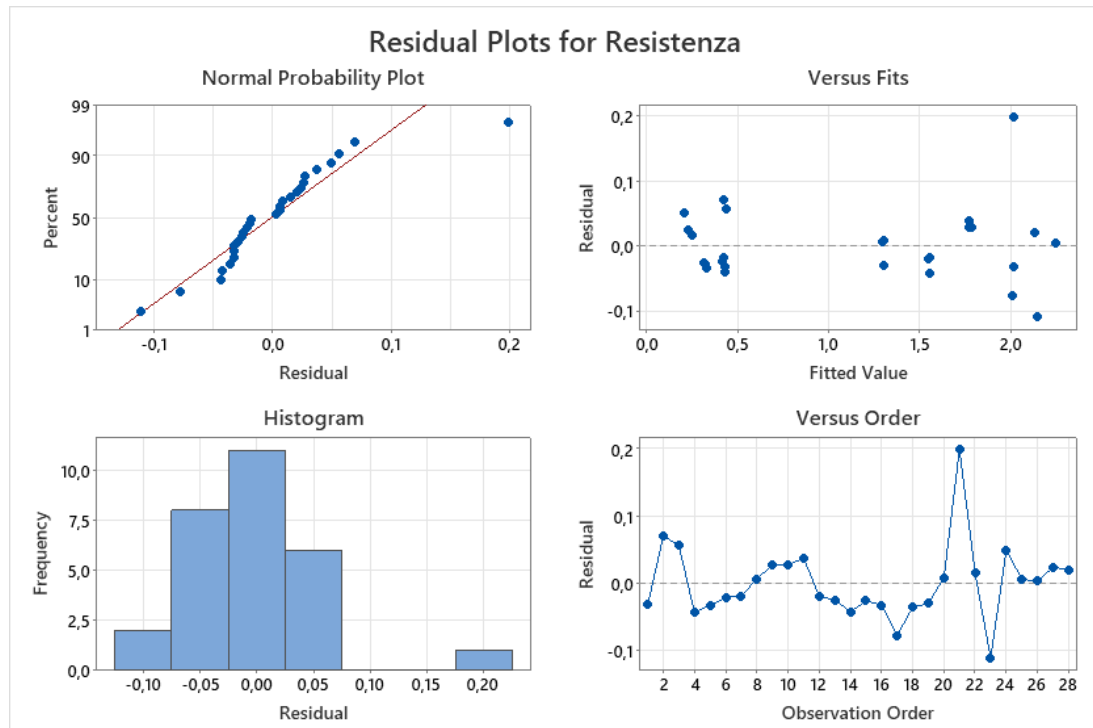


Figura 6-27: Analisi dei residui per le osservazioni sperimentali della resistenza termica.

Si è ottenuto un valore del R-sq (adj) e del R-sq (pred) rispettivamente di 99.25% e 98.90%, dunque il modello risulta molto affidabile nel rappresentare la variabilità del parametro risposta anche per la popolazione dei campioni non osservata. Il p -value del modello è nullo, dunque esiste almeno un fattore che ha coefficiente di correlazione con l'assorbimento acustico diverso da zero. Al termine della procedura *Stepwise backward elimination* la forza della correlazione, tra resistenza termica e i parametri rimasti in gioco, è mostrata dal grafico di Pareto in fig. 6-28. Il grafico a barre conferma la teoria sui fenomeni di trasporto termico: esiste una forte relazione tra resistenza termica e spessore, dovuta alla loro proporzionalità inversa. Un'ulteriore conferma è data dai grafici di tendenza della conducibilità al variare di densità, spessore e titolo medio in fig. 6-29. La debole correlazione con la densità e il titolo medio è dovuta alla loro relazione con la conducibilità.

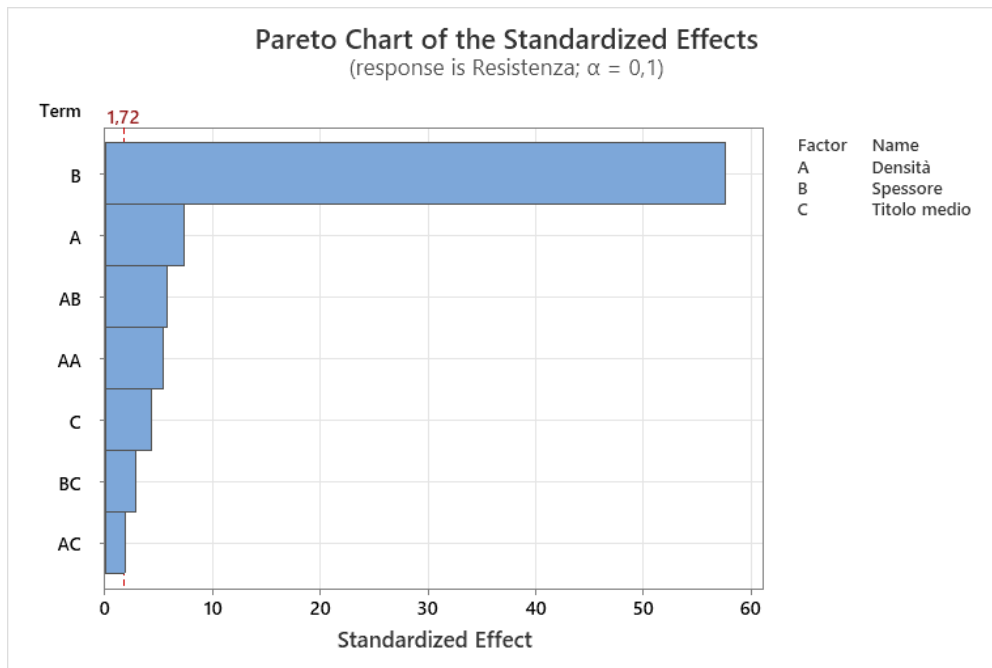


Figura 6-28: Grafico di Pareto per la variabile risposta resistenza termica (m^2K/W), parametri analizzati: densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).



Figura 6-29: Effetto dei fattori singoli sulla variabile risposta resistenza termica (m^2K/W). Densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex).

Infine, i valori di densità, spessore e titolo medio che ottimizzano la resistenza termica del TNT sono stati calcolati con il modulo *Response Optimizer*, essi sono rispettivamente

61,1 kg/m³, 8,50 cm e 3,6 dtex. Le migliori performance si ottengono infatti quando la conducibilità del materiale è minimizzata e lo spessore è massimizzato. Si può inoltre notare che il trattamento ottimale dei fattori è molto prossimo a quello ottenuto, con il medesimo metodo, per l'assorbimento acustico (densità = 65,6 kg/m³, spessore = 7,74 cm e titolo medio = 3,6 dtex). Si conclude quindi che le grandezze che descrivono l'acustica e la resistenza termica potrebbero essere correlate tra loro considerando che esse dipendono dai medesimi fattori. Il paragrafo 6-5 si occuperà di sviluppare questa ipotesi.

6.2.5.8 Elaborazione dell'ottimo delle proprietà termoacustiche

A conclusione dell'analisi DOE si vuole determinare la migliore combinazione tra i fattori per rispondere all'esigenza di un materiale con le migliori *performance* termoacustiche. Per questo si calcolano i livelli di densità, spessore e titolo medio che permettano di massimizzare la resistenza termica e l'assorbimento acustico alle alte, medie e basse frequenze. Si è dunque utilizzato il modulo *Response Optimizer*.

Osservando la fig. 6-29 si conclude che i valori di densità, spessore e titolo medio che ottimizzano tutti e tre i coefficienti di assorbimento acustico medio e la resistenza termica sono rispettivamente 66,7 kg/m³, 7,82 cm e 3,6 dtex. La desiderabilità media del modello è di 0,984, dunque molto elevata. I valori dei coefficienti $\bar{\alpha}_{basse}$, $\bar{\alpha}_{medie}$, $\bar{\alpha}_{alte}$ e resistenza termica con il rispettivo intervallo di confidenza e la desiderabilità è riassunto nella tabella 6-18. In quest'ultima sono presenti valori di α al di fuori dei limiti di accettabilità. Questi vanno interpretati considerando che il loro valore massimo ammissibile è l'unità e che valori superiori sono frutto di stime previsionali sulla base di un'osservazione solo parziale dell'intera popolazione di TNT.

I tre grafici nella parte alta della fig. 6-30, denominati "*composite*", rappresentano un andamento medio delle variabili risposta in funzione dei livelli assunti da ciascun fattore. È poi possibile notare che:

- Lo spessore è il fattore che più influenza le proprietà termoacustiche. Il relativo grafico, infatti, presenta una notevole pendenza che è rappresentativa della loro elevata variabilità in funzione dello spessore.
- La variazione di densità risulta in un andamento a parabola con concavità molto aperta e rivolta verso il basso. Le *performance* termoacustiche raggiungono quindi un valore massimale in corrispondenza di un certo valore di densità. Oltre questo massimo, si assiste ad un calo dell'efficienza del materiale legata alla riduzione della capacità fonoassorbente del TNT.
- La variazione del titolo medio delle fibre utilizzate risulta in una funzione media a parabola dei parametri risposta. Considerando che questo fattore si è dimostrato poco rilevante per la resistenza termica, si conclude che migliori proprietà del

materiale si ottengono con il titolo medio che ottimizza l'assorbimento acustico, ovvero titolo medio basso.

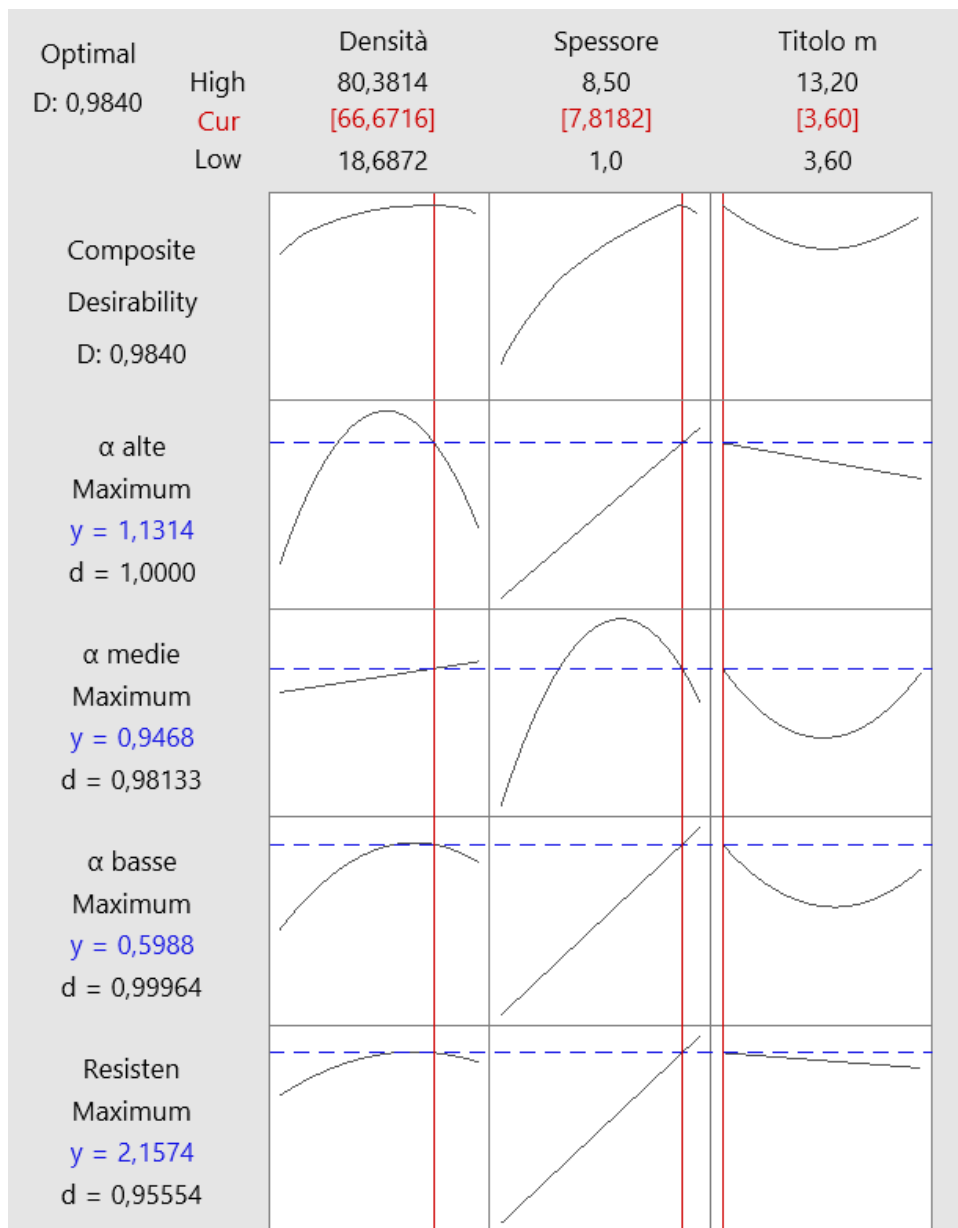


Figura 6-30: Valori di densità (kg/m^3), spessore (cm) e titolo medio (dtex), ottenuti con il modulo *Response Optimizer*, che ottimizzano l'assorbimento acustico e la resistenza termica.

Tabella 6-18: Valori ottimizzati dei parametri risposta $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte e resistenza termica, relativa desiderabilità e intervallo di confidenza.

<i>Risposta</i>	<i>Desiderabilità (adim.)</i>	<i>Valore</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95%</i>
$\bar{\alpha}$ basse (adim.)	1,000	0,599	0,563-0,635
$\bar{\alpha}$ medie (adim.)	0,981	0,947	0,838-1,056
$\bar{\alpha}$ alte (adim.)	1,000	1,131	1,034-1,229
<i>Resistenza termica (m²K/W)</i>	0,956	2,157	2,087-2,228

6.3 Analisi ANOVA ad una via delle proprietà termoacustiche in relazione alla porosità

Perché l'energia di un'onda acustica possa essere assorbita e dissipata è necessario che le onde di pressione penetrino nel tessuto-non tessuto. Questo avviene se il materiale presenta una porosità, soprattutto in superficie, sufficiente allo scopo. Inoltre, la porosità quantifica la frazione gassosa contenuta in un TNT che influisce direttamente sui meccanismi di trasporto termico. In questo capitolo si indaga, tramite l'analisi della varianza ad una via, se la porosità è un elemento determinante per le *performance* termoacustiche di un TNT. Si è deciso di utilizzare l'ANOVA perché permette di verificare se la media campionaria di due o più gruppi, caratterizzati sulla base di un parametro categoriale, è statisticamente differente.

6.3.1 Campioni analizzati e risultati delle analisi

Per il presente studio si confrontano le medie campionarie delle proprietà termoacustiche di due gruppi di provini. I campioni analizzati sono un sottogruppo di quelli presentati nel paragrafo 6-2, individuato dai TNT con porosità massima e minima. Sono così presi in considerazione dodici campioni con porosità pari al 94,57% e dodici al 98,48%. Le loro specifiche e i risultati della caratterizzazione termoacustica sono riportati nella tabella 6-19.

Tabella 6-19: Specifiche dei campioni analizzati con la tecnica statistica ANOVA. Risultati della caratterizzazione termoacustica.

<i>Sample N°</i>	<i>Porosità</i> (%)	$\bar{\alpha}$ <i>basse</i> (adim.)	$\bar{\alpha}$ <i>medie</i> (adim.)	$\bar{\alpha}$ <i>alte</i> (adim.)	<i>k</i> (W/m·K)	<i>R</i> (m ² ·K/W)
4	94,57	0,05	0,28	0,79	0,024	0,494
5	94,57	0,05	0,29	0,80	0,024	0,493
12	98,48	0,26	0,64	0,81	0,053	1,513
6	94,57	0,05	0,30	0,81	0,030	0,400
13	98,48	0,25	0,60	0,78	0,052	1,525
14	98,48	0,26	0,64	0,82	0,051	1,538
8	98,48	0,37	0,88	0,96	0,043	1,797
7	98,48	0,38	0,89	0,97	0,042	1,806
9	98,48	0,06	0,21	0,57	0,030	0,402
15	94,57	0,06	0,21	0,55	0,029	0,396
16	94,57	0,06	0,21	0,56	0,031	0,391
17	94,57	0,06	0,14	0,31	0,034	0,292
3	98,48	0,52	0,96	0,99	0,040	1,985
18	94,57	0,50	0,96	0,99	0,041	1,932
19	94,57	0,06	0,15	0,35	0,034	0,295
2	98,48	0,05	0,14	0,32	0,034	0,291
1	98,48	0,37	0,88	0,96	0,043	1,797
20	94,57	0,53	0,95	0,99	0,036	2,212
21	98,48	0,05	0,10	0,23	0,038	0,263
11	94,57	0,57	0,85	0,94	0,039	2,037
22	98,48	0,05	0,09	0,21	0,039	0,253
10	94,57	0,60	0,84	0,96	0,038	2,246
23	98,48	0,05	0,10	0,21	0,039	0,255
24	94,57	0,58	0,87	0,98	0,037	2,154

6.3.2 Elaborazione dei risultati dell'ANOVA ad una via

Prima di sottoporre ad analisi le medie campionarie dei parametri termoacustici, è stata verificata l'omoschedasticità dei dati raccolti tramite il test di Levene. I *p-value* ottenuti dal test sono riassunti nella tabella 6-20. Per i parametri termoacustici per i quali si è ottenuto un *p-value* minore del livello di significatività di 0.05 si utilizzerà un ANOVA ad una via non standard perché la differenza tra le varianze campionarie è significativa.

Tabella 6-20: risultati dei test di Levene su $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, conducibilità termica e resistenza termica di un TNT in relazione alla sua porosità.

	$\bar{\alpha}$ basse	$\bar{\alpha}$ medie	$\bar{\alpha}$ alte	Conducibilità	Resistenza termica
<i>p-value del test di Levene</i>	0.000	0.841	0.000	0.946	0.008

Nella tabella 6-21 sono riassunti i valori dei *p-value* ottenuti dall'analisi ANOVA ad una via standard e non standard. Si osserva che, assunto un livello di significatività di 0.05, esiste una differenza statisticamente significativa tra le medie campionarie di $\bar{\alpha}$ alte e conducibilità termica. Si conclude quindi che differenti livelli di porosità determinano una differenza rilevante nei valori di queste proprietà. In fig. 6-30 sono rappresentati, per $\bar{\alpha}$ alte e conducibilità termica, il grafico degli intervalli dei valori in relazione alla porosità e, rispettivamente, i confronti multipli in output dal metodo di Games-Howell e quello di Tukey.

Per le frequenze alte il coefficiente di assorbimento acustico è minore nei campioni a porosità maggiore. Una spiegazione a questo risultato è che per le onde sonore con elevata frequenza, una porosità troppo elevata risulta in una limitata interazione onda-struttura fibrosa e dunque un minor assorbimento acustico. Le frequenze medio-basse, avendo lunghezze d'onda maggiori, non risentono di questo effetto. Dai risultati dell'analisi ANOVA sulle frequenze maggiori è emerso che il modello statistico presenta un limitato valore di R-sq, la differenza tra i valori di assorbimento acustico è spiegata solo in piccola parte dal modello sviluppato con il parametro porosità. Questo porta alla conclusione che, seppur sia risultata significativa una differenza tra le *performance* acustiche di TNT con diversa porosità, esistono dei fattori che non sono stati inclusi nell'analisi statistica, che hanno un'influenza ben più rilevante del parametro analizzato.

Prendendo in considerazione la conducibilità termica per i due livelli di porosità studiati, si rileva che essa è maggiore nei campioni con maggiore frazione gassosa. Questo risultato va interpretato tenendo in considerazione che la conducibilità nei TNT è data dalla combinazione della conducibilità relativa alla conduzione e di quella relativa all'irraggiamento. All'aumentare della porosità del materiale, la conduzione risulta più limitata per una maggior frazione di gas che vi è contenuta. Questa osservazione permette di affermare che per porosità maggiori la conducibilità è maggiore perché il trasporto termico per irraggiamento è favorito. Una struttura con meno frazione solida interagisce meno con le radiazioni elettromagnetiche favorendone la trasmissione. La variabilità della proprietà termica risulta comunque poco spiegata dal modello statistico in quanto si

sono registrati dei valori di R-sq limitati. Questo porta alla conclusione che, seppur sia risultata significativa una differenza tra le *performance* termiche di TNT con diversa porosità, esistono dei fattori che non sono stati inclusi nell'analisi statistica, che hanno un'influenza ben più rilevante del parametro analizzato.

Tabella 6-21: risultati dei p-value dell'analisi ANOVA ad una via di $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, conducibilità termica e resistenza termica di TNT in relazione alla sua porosità.

<i>p-value</i>	$\bar{\alpha}$ basse	$\bar{\alpha}$ medie	$\bar{\alpha}$ alte	Conducibilità	Resistenza termica
ANOVA standard	/	0.331	/	0.004	/
ANOVA non standard	0.184	/	0.034	/	0.386

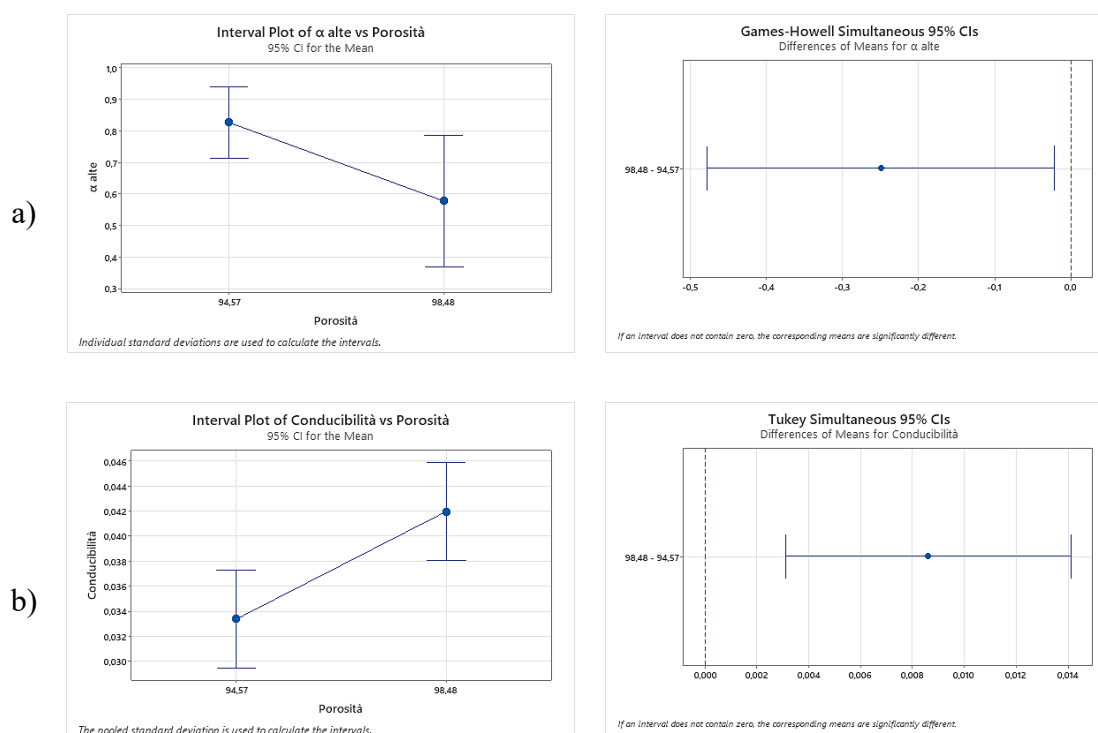


Figura 6-31: Intervalli dei valori in relazione alla porosità (%) e confronti multipli in output dall'analisi ANOVA per a) $\bar{\alpha}$ alte (*adim.*) e b) conducibilità termica (W/m·K).

L'elaborazione dei dati di porosità che è stata effettuata risultata comunque limitata. Nella letteratura scientifica sono presenti studi che confrontano le caratteristiche

termoacustiche di TNT caratterizzati da un maggior numero di livelli di porosità e appartenenti ad un range di valori più ampio di quello qui analizzato. Queste ragioni permettono di concludere che sarebbe necessario indagare materiali con porosità più limitata, range nel quale ci si aspetta un limitato assorbimento acustico per una maggiore riflessione delle onde sonore incidenti.

6.4 Studio dell'esistenza di una correlazione tra proprietà termoacustiche con grammatura e permeabilità

La grammatura (G) è la misura della densità superficiale del materiale, ovvero del quantitativo in grammi di fibre contenute in un metro quadrato di materiale. È dunque strettamente legata a densità e spessore del materiale da cui, come dimostrato nel paragrafo 6-2, dipendono le *performance* termoacustiche di un materiale poroso. In secondo luogo, dalla letteratura emerge che la resistività al flusso d'aria è uno dei parametri che più descrivono la capacità di un TNT di accogliere e dissipare le onde sonore. Non avendo a disposizione lo strumento per testare questa proprietà si vuole indagare se anche la permeabilità all'aria, che è anch'essa connessa alla resistenza offerta dal materiale ad un flusso gassoso, è un parametro determinante per le *performance* termoacustiche dei TNT.

Per analizzare grammatura e permeabilità all'aria è stato utilizzato il modulo *Correlation* del software Minitab: questo permette di misurare l'evidenza di una correlazione, lineare o polinomiale, tra due variabili.

6.4.1 Campioni analizzati

Per studiare gli effetti di grammatura e permeabilità all'aria non sono stati prodotti nuovi campioni. Sono stati selezionati alcuni tra quelli regolarmente prodotti nell'azienda O.R.V Manufacturing e conservati in una campioneria; in particolare, sono stati raccolti materiali prodotti dal medesimo impianto e con il medesimo processo. L'impianto in questione lavora fibra in poliestere con tecnica *dry-laid*: cardatura e faldatura *cross-laid*. La miscela fibre utilizzata presenta una certa percentuale di fibra bicomponente di tipo *sheath-core* che funge da agente legante nel materiale finito. Il materassino di fibre in uscita dal faldatore entra in un forno che riscalda il materiale ad una temperatura intermedia a quella di fusione delle fibre in PET e quella di fusione della guaina delle fibre bicomponenti; il TNT prodotto è quindi termolegato. Infine, il materiale attraversa un ultimo macchinario che, tramite l'utilizzo di tappeto caldo, liscia e calibra il materiale che viene dunque tagliato nelle dimensioni desiderate.

Tra tutti i materiali prodotti dall'impianto descritto sono stati selezionati casualmente ventisette campioni differenti per numerose proprietà, tra cui anche la grammatura e la permeabilità all'aria. Alcuni campioni, per i limiti imposti dallo strumento per determinare la permeabilità, non sono stati testati per questo parametro. La loro caratterizzazione è presentata in tabella 6-22.

Tabella 6-22: Caratterizzazione dei provini utilizzati per lo studio della grammatura e permeabilità.

<i>Sample</i> N°	<i>Densità</i> (kg/m ³)	<i>Grammatura</i> (g/m ²)	<i>Spessore</i> (cm)	<i>Titolo</i> <i>medio</i> (dtex)	<i>Porosità</i> (%)	<i>Permeabilità</i> (m/s)
1	57,83	2400	4,0	11,8	95,65	0,35
2	40,73	2000	5,0	11,8	97,10	0,38
3	50,48	2500	5,0	11,8	96,38	0,38
4	20,46	800	4,0	11,8	98,55	/
5	39,56	1600	4,0	11,8	97,10	0,42
6	41,81	600	1,5	11,8	97,10	/
7	41,22	1200	3,0	11,8	97,10	0,38
8	41,19	2000	5,0	5,4	97,10	0,36
9	40,45	2000	5,0	10,3	97,10	0,39
10	40,04	2000	5,0	10,8	97,10	0,38
11	43,56	4000	9,0	11,8	96,78	/
12	58,72	2000	3,5	5,4	95,86	0,31
13	21,04	400	2,0	3,7	98,55	0,53
14	24,31	1000	4,3	3,7	98,31	0,40
15	62,83	1800	3,0	10,5	95,65	0,29
16	44,02	2400	5,6	7,0	96,89	0,38
17	41,23	400	1,0	5,4	97,10	/
18	103,26	1500	1,5	10,5	92,75	0,25
19	29,62	300	1,0	10,8	97,83	/
20	50,61	500	1,0	11,8	96,38	0,63
21	100,22	1000	1,0	10,5	92,75	0,30
22	31,93	3000	9,5	5,4	97,71	/
23	55,00	1000	2,0	10,5	96,38	0,42
24	23,53	400	1,6	7,2	98,19	/
25	19,54	200	1,0	11,8	98,55	/
26	49,11	2000	4,0	11,8	96,38	0,42
27	81,88	7000	8,5	3,6	94,03	/

6.4.2 Risultati delle analisi

I risultati dei test termoacustici sono riassunti nella tabella 6-23.

Tabella 6-23. Risultati dei test termoacustici dei provini in tabella 6-18.

<i>Sample N°</i>	$\bar{\alpha}$ basse (adim.)	$\bar{\alpha}$ medie (adim.)	$\bar{\alpha}$ alte (adim.)	<i>k</i> (W/m·K)	<i>R</i> (m ² ·K/W)
1	0,16	0,66	0,90	0,035	1,143
2	0,20	0,67	0,89	0,042	1,200
3	0,22	0,75	0,91	0,040	1,246
4	0,11	0,32	0,57	0,046	0,868
5	0,14	0,54	0,81	0,039	1,038
6	0,06	0,18	0,50	0,035	0,423
7	0,11	0,40	0,73	0,037	0,816
8	0,23	0,79	0,93	0,037	1,359
9	0,21	0,72	0,89	0,037	1,345
10	0,19	0,68	0,87	0,037	1,359
11	0,42	0,90	0,98	0,041	2,219
12	0,15	0,67	0,95	0,031	1,127
13	0,07	0,23	0,57	0,035	0,575
14	0,17	0,65	0,90	0,037	1,168
15	0,11	0,55	0,89	0,033	0,915
16	0,25	0,77	0,92	0,036	1,560
17	0,04	0,14	0,38	0,033	0,299
18	0,05	0,32	0,87	0,029	0,513
19	0,05	0,10	0,25	0,035	0,288
20	0,05	0,13	0,38	0,029	0,345
21	0,04	0,18	0,59	0,025	0,398
22	0,49	0,94	0,98	0,039	2,450
23	0,07	0,31	0,74	0,031	0,651
24	0,07	0,20	0,48	0,035	0,453
25	0,04	0,08	0,20	0,038	0,267
26	0,16	0,64	0,88	0,035	1,131
27	0,58	0,81	0,94	0,039	2,176

6.4.3 Elaborazione dei dati relativi alla grammatura

L'effetto della grammatura sulle proprietà termoacustiche è analizzato graficamente visualizzando i grafici di dispersione. Si è così notata una tendenza nella distribuzione dei dati raccolti in termini di $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte e resistenza termica. Non sembra invece sussistere una relazione tra conducibilità e grammatura.

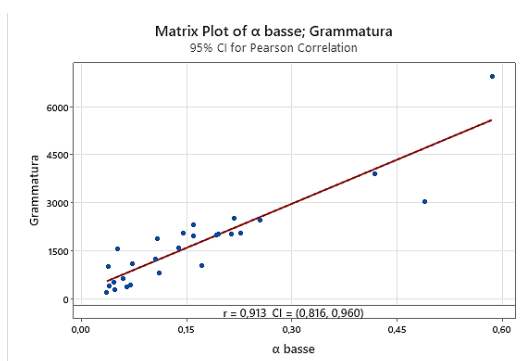
Si sono analizzate tutte le proprietà termoacustiche con il modulo *Correlation* del software Minitab. È stata applicata sia la statistica Pearson, per indagare la relazione lineare, che quella di Spearman, per analizzare quella monotona. In fig. 6-32 sono presentati i risultati dell'indagine: per ciascun fattore si è selezionato il metodo statistico

(Person o Spearman) che restituiva il miglior coefficiente di correlazione. Nella tabella 6-24 sono invece presentati i valori di r in output di entrambi i metodi. Tutti i fattori, ad eccezione della conducibilità, presentano coefficienti di correlazione lineare o monotona superiori a 0.9; al crescere della grammatura si nota un miglioramento delle *performance* acustiche e della resistenza termica. In particolare, la correlazione tra la grammatura e il coefficiente di assorbimento acustico alle basse frequenze è di tipo lineare mentre alle medie-alte frequenze e per la resistenza termica questa è monotona. Le migliori proprietà acustiche si spiegano considerando che la grammatura è pari al prodotto tra densità e spessore del materiale, il ruolo di queste due grandezze è dunque sovrapposto. Al crescere della grammatura aumenta la resistività al flusso d'aria perché cresce il numero maggiore di fibre si trovano nel cammino acustico dell'onda sonora, questa dunque è maggiormente assorbita dal materiale. Considerando la conducibilità termica, dal relativo grafico di dispersione e dai valori di r è evidente che non esiste una correlazione forte con la grammatura. Questo risultato va interpretato considerando che la conducibilità per la conduzione è indipendente dalla geometria del materiale. Questo meccanismo di trasporto è invece legato principalmente alla frazione di gas e solido del TNT. All'aumentare della densità la conducibilità dovuta alla conduzione aumenta in quanto la frazione di gas, per natura meno favorevole al trasporto per conduzione, è ridotta. Considerando invece l'irraggiamento, questo diminuisce sia all'aumentare della densità che dello spessore, la struttura fibrosa infatti favorisce un effetto di *scattering* della radiazione termica. La somma della conducibilità dovuta ai due fenomeni di trasporto ha quindi due tendenze opposte al variare della grammatura. Inoltre, è variabile con le condizioni di esercizio e le caratteristiche del TNT, quale, tra irraggiamento e conduzione, sia il meccanismo di trasporto preponderante. Queste considerazioni giustificano l'assenza di una correlazione evidente tra conducibilità termica e grammatura. Se si considera infine la resistenza termica, si osserva la sua tendenza ad aumentare con la grammatura; lo spessore è in questo caso il parametro da analizzare perché è quello che più controlla la difficoltà incontrata dal calore nell'attraversare il materiale, come dimostrato nel paragrafo 6.2. Fissata la densità, la grammatura aumenta con lo spessore, questo risulta in una maggiore resistenza termica del TNT.

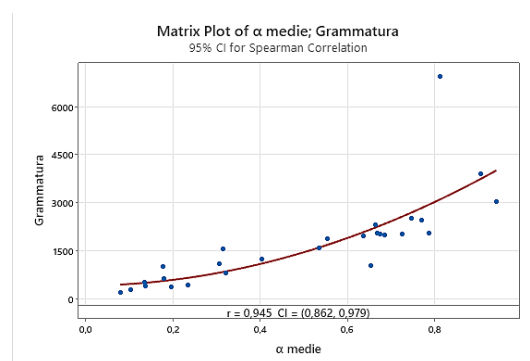
Si noti che le curve di tendenza di $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte e resistenza termica condividono lo stesso andamento monotono crescente. Si conclude che, tra l'acustica e la resistenza termica, potrebbe esserci una correlazione considerando anche che esse dipendono similmente dalla grammatura. Il paragrafo 6-5 si occuperà di sviluppare questa ipotesi.

Tabella 6-24: Coefficienti di correlazione (r) calcolati con il metodo Person e Spearman per $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, conducibilità termica e resistenza termica in funzione della grammatura del TNT.

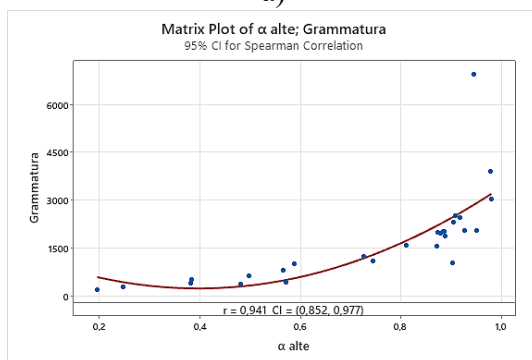
	$\bar{\alpha}$ basse	$\bar{\alpha}$ medie	$\bar{\alpha}$ alte	Conducibilità termica	Resistenza termica
Coefficiente r di Person	0.913	0.768	0.691	0.312	0.846
Coefficiente r di Spearman	0.900	0.945	0.941	0.426	0.915



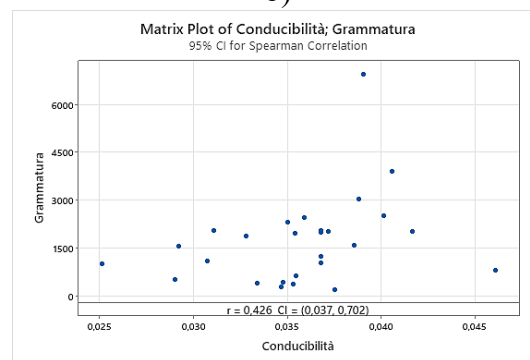
a)



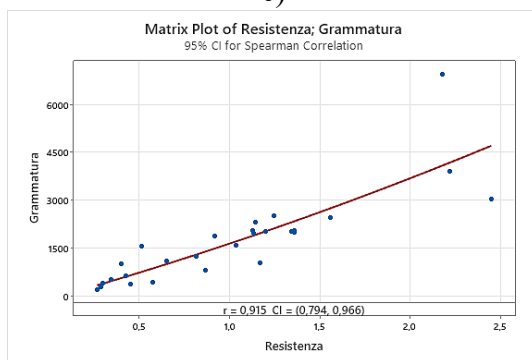
b)



c)



d)



e)

Figura 6-32: Grafici di dispersione di
 a) $\bar{\alpha}$ basse (adim.), b) $\bar{\alpha}$ medie (adim.), c) $\bar{\alpha}$ alte (adim.), d)
 conducibilità termica (W/m·K) e e) resistenza termica (m²K/W) in funzione
 della grammatura (g/m²) del TNT.

6.4.4 Elaborazione dei dati relativi alla permeabilità

Lo strumento di misura utilizzato per determinare la permeabilità dei TNT non permette di analizzare tutti i campioni elencati nella tabella 6-19. L'apparecchio è infatti limitato in termini di spessore massimo (8cm) del materiale analizzabile e velocità minima della pompa per l'aria che non consente di applicare la differenza di pressione voluta a tutti i campioni. L'indagine statistica è condotta sui campioni rimanenti, per i quali è riportato il valore di permeabilità nella tabella 6-22.

Si sono analizzate tutte le proprietà termoacustiche con il modulo *Correlation* del software Minitab. Si è applicata sia la statistica Pearson che quella di Spearman. Nella tabella 6-25 sono presentati i valori di r in output di entrambi i metodi.

Tabella 6-25: Coefficienti di correlazione (r) calcolati con il metodo Person e Spearman per $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, conducibilità termica e resistenza termica in funzione della porosità del TNT.

	$\bar{\alpha}$ basse	$\bar{\alpha}$ medie	$\bar{\alpha}$ alte	Conducibilità termica	Resistenza termica
Coefficiente r di Person	-0.158	-0.346	-0.675	0.085	-0.085
Coefficiente r di Spearman	-0.080	-0.271	-0.465	0.205	-0.115

I valori di correlazione che si sono ottenuti sono molto bassi, questo denota che la permeabilità del TNT non è strettamente connessa alle sue *performance* termoacustiche. Dalla letteratura esaminata è invece emerso che la resistività al flusso d'aria, e non la permeabilità, è il parametro che più quantifica la capacità di un materiale di accogliere le onde acustiche e di dissiparne l'energia. La resistività si ricava analiticamente a partire dalle medesime grandezze utilizzate per il calcolo della permeabilità (flusso del gas e differenza di pressione), ma queste devono essere determinate in condizioni di prova differenti. Per definire la resistività è necessario che il flusso d'aria generato dalla differenza di pressione sia sufficientemente lento per avere un regime di flusso laminare all'interno dei pori. Il suono infatti è generato dalla propagazione di una perturbazione nel mezzo, identificata da una differenza di pressione la quale, come enunciato nel

paragrafo 2.1, ha un ordine di grandezza che varia tra 1 e $10e^{-5}$ Pa. In queste condizioni, se il mezzo è l'aria, il moto delle molecole del gas è laminare all'interno di un TNT. Dunque, la resistività al flusso d'aria ben rappresenta la resistenza offerta dalla struttura fibrosa alla propagazione delle onde sonore. Diversamente, la permeabilità calcolata deriva da prove in cui la pressione dell'aria che attraversa il TNT è di 50 Pa. Queste condizioni non sono rappresentative dell'onda di pressione dei comuni suoni da attenuare. Si pensi che si verificano danni all'udito per esposizioni brevi a onde di soli 20 Pa [22]. Queste considerazioni concorrono quindi a giustificare l'assenza di una forte correlazione.

I risultati dell'indagine statistica sono comunque utili a fare alcune considerazioni qualitative:

- I coefficienti di correlazione tra indici di assorbimento acustico e permeabilità sono tutti negativi. Ovvero si osserva una tendenza ad avere migliori capacità acustiche nei TNT caratterizzati da una permeabilità minore. Questo è in linea con quanto riportato, sulla resistività al flusso d'aria, da numerosi articoli scientifici: una maggior resistenza al passaggio di gas attraverso un materiale denota una maggior capacità di dissipare energia sonora.
- I coefficienti di correlazione che riguardano conducibilità e resistenza termica sono prossimi allo zero, la conduzione e l'irraggiamento non sono infatti legati a moti macroscopici di materia all'interno della struttura fibrosa dei TNT.

6.5 Studio dell'esistenza di una correlazione tra assorbimento acustico e isolamento termico

Nel sotto paragrafo 6.2.5.8 si è sottolineato che il trattamento dei fattori densità, spessore e titolo medio, che realizzano l'ottimo per le proprietà acustiche e quello per la resistenza termica, sono tra loro molto simili. Inoltre, nel 6.4.3 si è notato che i grafici relativi ai parametri acustici e alla resistenza termica, in funzione della grammatura del TNT, sono tra loro paragonabili. È possibile poi notare che la maggior parte dei parametri geometrici e strutturali che caratterizzano un materiale poroso hanno un'influenza su entrambe le proprietà. Infine, nel sotto paragrafo 3.5, si sono presentati alcuni articoli scientifici che, trattando contemporaneamente l'assorbimento acustico e l'isolamento termico dei TNT, hanno ipotizzato l'esistenza di una correlazione tra queste due proprietà.

In questo capitolo sono stati selezionati alcuni campioni di TNT sui quali verificare l'ipotesi che esista una correlazione tra assorbimento acustico e isolamento termico. Se quest'ipotesi fosse verificata si otterrebbe una relazione tra queste proprietà che può

essere sfruttata, ad esempio, per effettuare un unico test, acustico o termico, sul materiale, ricavando poi facilmente l'altra proprietà.

6.5.1 Campioni analizzati

Per determinare l'esistenza di una correlazione tra i parametri acustici e termici sono stati utilizzati i medesimi campioni che sono presentati nel capitolo 6.4. In tale capitolo è possibile reperire, nelle tabelle 6-22 e 6-23, le caratteristiche dei campioni e le loro proprietà termoacustiche.

6.5.2 Elaborazione dei dati raccolti

Una prima analisi grafica dei dati raccolti è effettuata visualizzando i grafici di dispersione. Si è così notata una tendenza marcata in quelli relativi alla resistenza termica in funzione dei coefficienti di assorbimento acustico. Diversamente, la distribuzione dei valori di conducibilità termica sembra essere indipendente dal valore di $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie o $\bar{\alpha}$ alte. Si è comunque deciso di analizzare tutte le possibili correlazioni tra le proprietà acustiche e termiche tramite il modulo *Correlation* del software Minitab.

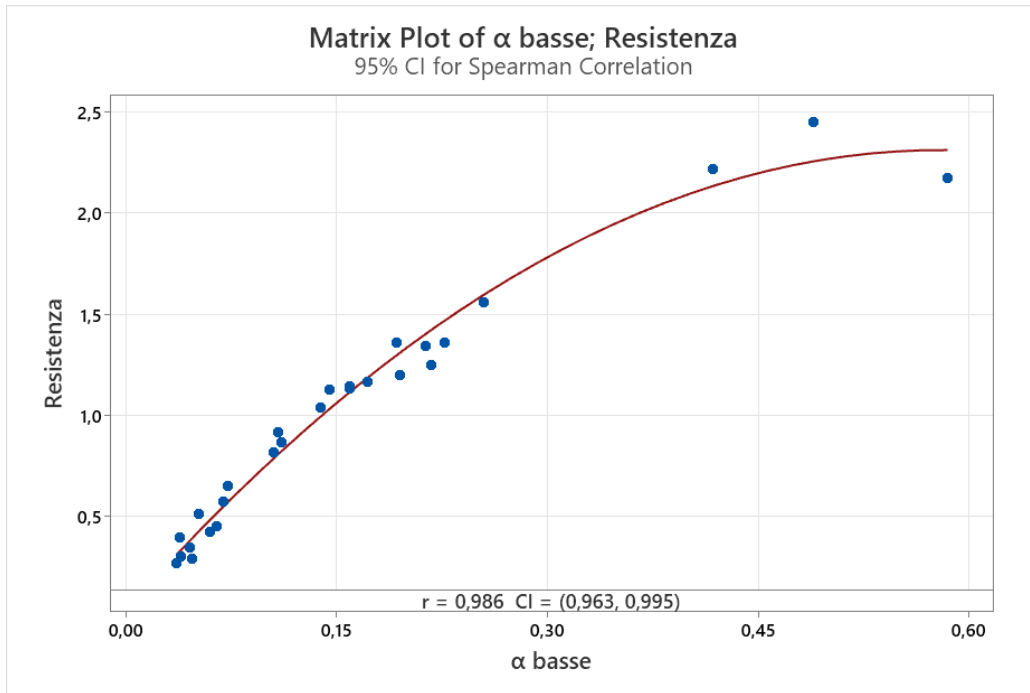
Si è applicata sia la statistica Pearson, per indagare le relazioni lineari, che quella di Spearman, per analizzare quelle monotone. In tabella 6-26 Sono riportati i coefficienti di correlazione ottenuti con le due statistiche. Si conclude che non sussiste una forte evidenza di una correlazione tra conducibilità termica e assorbimento acustico. Questo può essere spiegato, in accordo con alcuni studi scientifici, dal fatto che la conducibilità è meno dipendente dallo spessore di quanto non lo siano i coefficienti di acustica. Questo è confermato dalla forte correlazione, evidenziata dal test Spearman, che sussiste tra resistenza termica e assorbimento del suono.

Tabella 6-26: Coefficienti di correlazione (r) tra parametri acustici e termici ottenuti con le statistiche di Pearson e Spearman con il modulo *correlation* di Minitab.

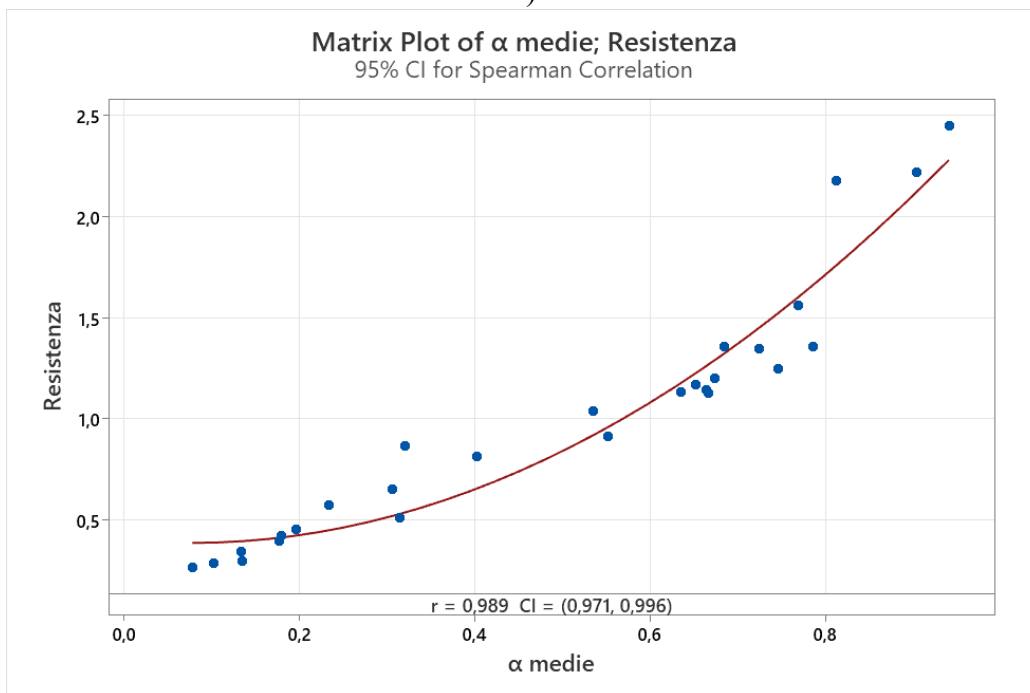
		$\bar{\alpha}$ basse	$\bar{\alpha}$ medie	$\bar{\alpha}$ alte
Conducibilità termica	Coefficiente r di Pearson	0.477	0.438	0.208
	Coefficiente r di Spearman	0.642	0.564	0.347

Resistenza termica	Coefficiente r di Person	0.954	0.935	0.790
	Coefficiente r di Spearman	0.986	0.989	0.906

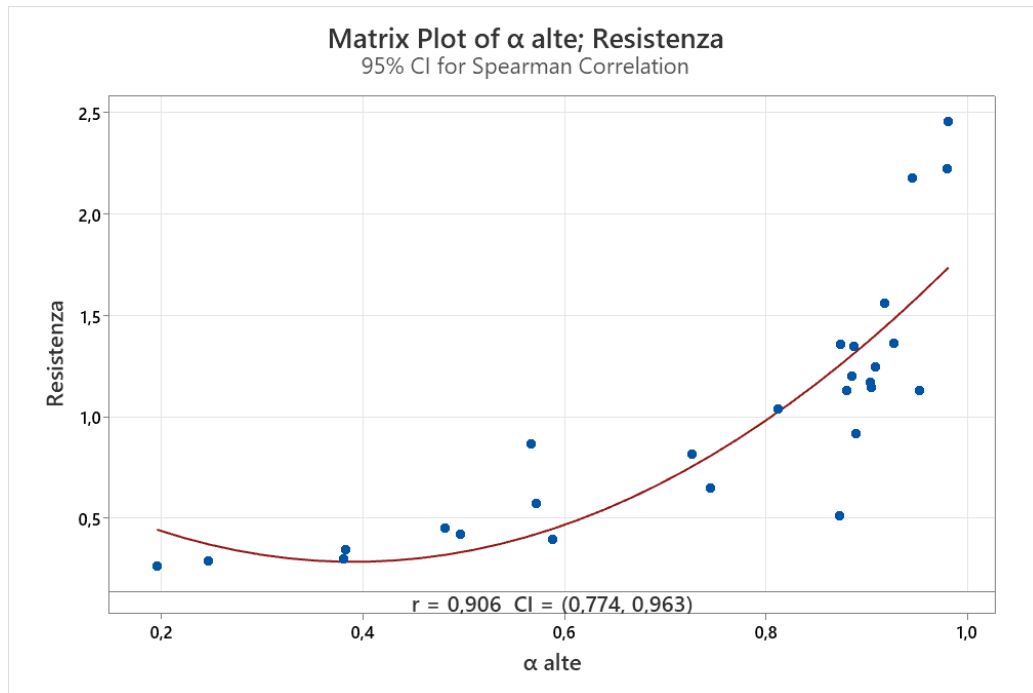
In fig. 6-33 sono rappresentati i risultati dell'indagine della correlazione monotona (test Spearman) tra $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte e la resistenza termica. Le linee di tendenza dimostrano che maggiore è l'energia acustica assorbita, minore è il calore condotto dal TNT e viceversa. Le *performance* acustiche e la resistenza termica sono proprietà del materiale che dipendono dai medesimi fattori. In particolare, la forte correlazione è principalmente dovuta al medesimo andamento di resistenza termica e coefficienti di assorbimento acustico in funzione dello spessore che è stata evidenziata nel capitolo 6.2. All'aumentare di questo parametro geometrico le onde acustiche e le radiazioni termiche interagiscono maggiormente con il materiale, aumentando la frazione di quelle che vengono assorbite. Dai grafici in figura 6-33 si notano diverse concavità nelle curve di tendenza. Considerando il grafico relativo alle frequenze più basse, l'aumento della resistenza termica si riduce con i valori maggiori registrati di $\bar{\alpha}$ basse. Questo andamento trova spiegazione considerando che, per spessori molto elevati, il trasporto termico per irraggiamento è estremamente limitato. La conduzione diviene quindi il meccanismo di trasporto termico preponderante e la conducibilità termica, che quindi non varia più all'aumentare dello spessore, rimane costante. Il valore di resistenza continua quindi ad aumentare solo debolmente all'aumentare dello spessore. I grafici che evidenziano la correlazione degli assorbimenti alle medio-alte frequenze presentano una linea di tendenza caratterizzata da una concavità contraria a quella delle basse frequenze. In questo caso, considerando che i materiali porosi sono buoni assorbitori acustici alle alte frequenze, il valore di $\bar{\alpha}$ si avvicina al valore massimo. Di conseguenza, si evidenzia un aumento della resistenza termica contemporaneamente ad una stabilizzazione del coefficiente di assorbimento medio.



a)



b)



c)

Figura 6-33: Grafici di dispersione di a) $\bar{\alpha}$ basse (adim.), b) $\bar{\alpha}$ medie (adim.), c) $\bar{\alpha}$ alte (adim.), in funzione della resistenza termica ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) del TNT.

6.5.2.1 Equazione di correlazione tra assorbimento acustico e resistenza termica

Nello svolgere i test di laboratorio per la caratterizzazione termoacustica si è appurato che le analisi al termoflussimetro, per il tempo che richiedono, risultano un fattore limitante se si vuole esaminare un numero consistente di provini. Si vuole dunque determinare, con il modulo *Fit Regression Model*, la funzione che permetta di determinare la resistenza termica di un TNT sulla base dei valori dei coefficienti di assorbimento alle diverse frequenze. In questo modo, attraverso un'analisi con il tubo di Kundt che non richiede più di cinque minuti, è possibile evitare di avviare un'analisi di diverse ore al termoflussimetro.

La verifica delle ipotesi alla base del modello di regressione, tramite osservazione della dispersione dei residui, è verificata come si può osservare nella fig. 6-34 anche se sono presenti alcune unità statistiche con residuo elevato.

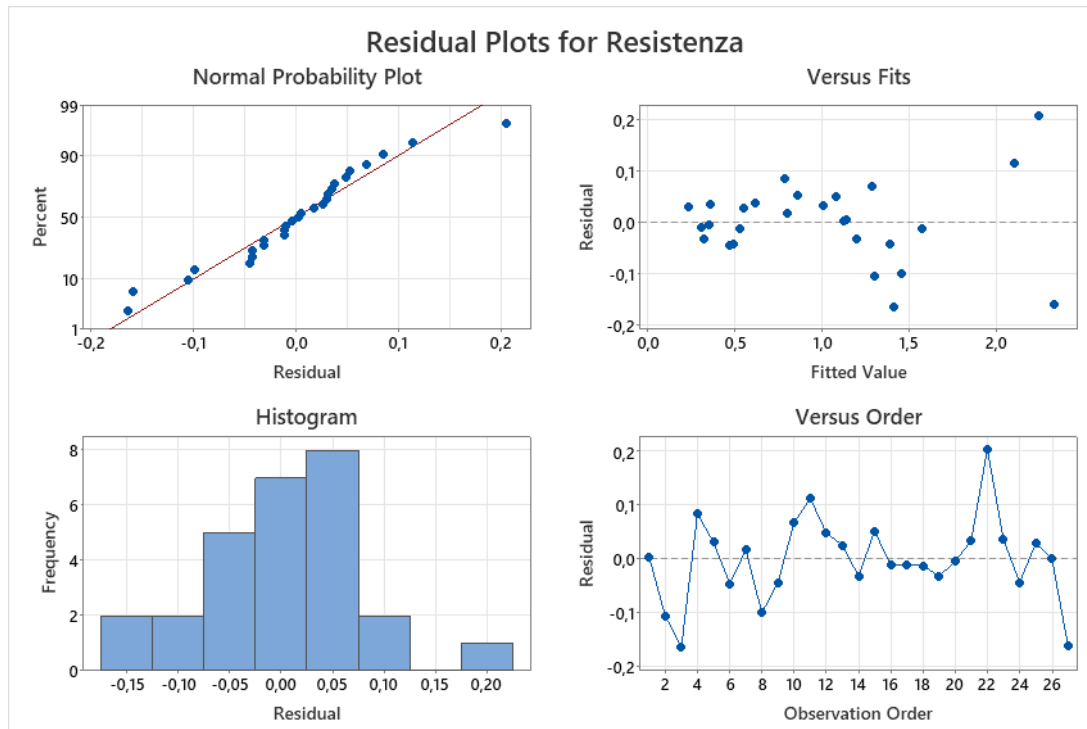


Figura 6-34: Analisi dei residui per il modello di regressione.

Considerando che dalle analisi con il modulo *Correlation* è emerso che la relazione tra acustica e resistenza termica è monotona, si vuole determinare la funzione di regressione che contiene $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte al primo e secondo ordine. Al termine della procedura di *backward elimination* si è determinata la seguente relazione:

$$R = -0,0556 + 6,712 (\bar{\alpha} \text{ basse}) + 0,283 (\bar{\alpha} \text{ alte}) - 5,266 (\bar{\alpha} \text{ basse})^2 \quad (6.5)$$

dove:

R = resistenza termica ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$).

Il modello di regressione sviluppato presenta un R-sq (adj) e R-sq (pred) rispettivamente di 98.08% e 94.88%. Dunque, la variabilità spiegata dal modello è elevata e la regressione risulta molto affidabile nel calcolo della resistenza termica anche per TNT che non fanno parte della popolazione dei campioni osservata.

L'equazione è stata validata testando tre campioni, i risultati sono riportati nella tabella 6-27.

Tabella 6-27: Risultati delle tre prove di validazione dell'equazione 6.5.

<i>Prova di validazione</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>$\bar{\alpha}$ basse</i>	<i>$\bar{\alpha}$ alte</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% predetto</i>	<i>R osservato</i>
1	39,76	6,0	11,8	0,24	0,88	1,318-1,684	1,532
2	24,87	2,5	3,7	0,10	0,69	0,582-0,934	0,729
3	65,58	5,0	10,8	0,24	0,92	1,330-1,694	1,423

6.6 Ruolo della finitura superficiale sull'assorbimento acustico

I tessuti-non tessuti possono essere prodotti con differenti finiture superficiali. Ad esempio, prima di uscire dalla linea produttiva, possono subire un processo di lisciatura superficiale attraverso un tappeto caldo. Questo processo ne riduce la porosità superficiale e quindi potrebbe influire a svantaggio della percentuale di potenza sonora che penetra nel materiale. Diversamente, un TNT che non ha subito lisciatura è detto calibrato e si presenta con una superficie con pori più aperti.

In letteratura, un confronto tra l'assorbimento acustico di TNT con finitura calibrata e lisciata non è stato trovato. Dalla teoria è però emerso quanto sia rilevante la porosità superficiale del materiale, e di conseguenza la sua finitura, per le *performance* acustiche. Si vuole studiare se questo è confermato da un'analisi statistica. Considerando che le unità statistiche analizzate presentano differenti finiture superficiali, lisciata o calibrata, che si suppone possano influenzare l'assorbimento acustico, si utilizza la tecnica statistica *paired-t*. I campioni si considerano dunque appaiati.

Non verrà condotta l'analisi termica perché si ipotizza che i fenomeni di trasporto del calore non siano influenzati da questo parametro.

6.6.1 Campioni analizzati

Le caratteristiche dei campioni sui quali si effettua lo studio sono riassunte in tabella 6-28. La disponibilità di materiali ha limitato lo studio a sei coppie di campioni. Si nota che, per ciascuna coppia di TNT, quello con finitura lisciata presenta una minor permeabilità all'aria. Questo conferma che la porosità superficiale del materiale è inferiore che in quelli calibrati.

Tabella 6-28: Caratterizzazione dei provini utilizzati per lo studio della finitura superficiale.

<i>Sample N°</i>	<i>Finitura</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Grammatu ra (g/m²)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>	<i>Permeabilità (m/s)</i>
1L	Lisciato	25,00	1000	4,5	3,7	0,38
1C	Calibrato	25,00	1000	4,5	3,7	0,40
2L	Lisciato	33,00	1500	4,6	10,8	0,42
2C	Calibrato	33,00	1500	4,6	10,8	0,88
3C	Calibrato	38,00	800	2,0	5,4	0,41
3L	Lisciato	38,00	800	2,0	5,4	0,39
4L	Lisciato	38,00	800	2,0	10,3	0,52
4C	Calibrato	38,00	800	2,0	10,3	0,67
5C	Calibrato	38,00	1200	3,0	11,8	0,67
5L	Lisciato	38,00	1200	3,0	11,8	0,52
6L	Lisciato	52,00	1000	2,0	10,5	0,40
6C	Calibrato	52,00	1000	2,0	10,5	0,46

6.6.1 Risultati delle analisi

I risultati dei test acustici sono riassunti nella tabella 6-29.

Tabella 6-29. Risultati dei test termoacustici dei provini in tabella 6-17.

<i>Sample N°</i>	<i>$\bar{\alpha}$ basse (adim.)</i>	<i>$\bar{\alpha}$ medie (adim.)</i>	<i>$\bar{\alpha}$ alte (adim.)</i>
1L	0,25	0,73	0,91
1C	0,25	0,79	0,92
2L	0,19	0,60	0,78
2C	0,17	0,53	0,73
3C	0,09	0,35	0,73
3L	0,09	0,37	0,76
4L	0,08	0,27	0,61
4C	0,08	0,27	0,59
5C	0,12	0,41	0,68
5L	0,12	0,46	0,76

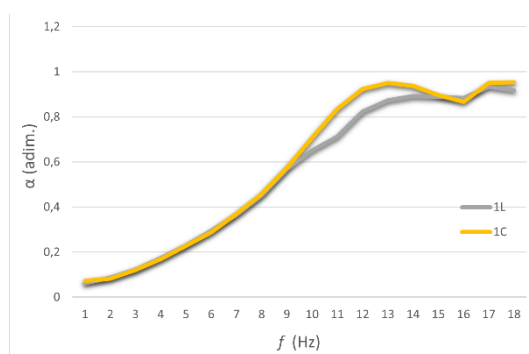
6L	0,09	0,35	0,76
6C	0,09	0,39	0,78

6.6.2 Elaborazione dei dati raccolti

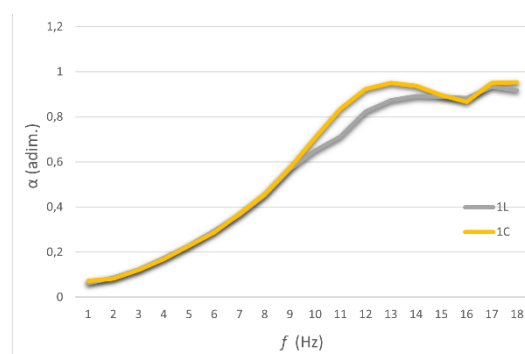
I *p-value*, ottenuti nei test *paired-t* sull'assorbimento acustico alle basse, medie e alte frequenze, sono riportati nella tabella 6-30. Nella stessa è riportato anche l'intervallo di confidenza per la differenza tra le medie del gruppo dei provini lisciati e quello di quelli calibrati. Si osserva che l'assorbimento acustico non è statisticamente influenzato dalla tipologia di finitura superficiale. Questo risultato non era atteso in quanto si prevedeva una differenza significativa legata alla diversa porosità superficiale tra i provini lisciati e quelli calibrati. Probabilmente, la differenza non è così rilevante nei campioni analizzati. Il *p-value* relativo alle alte frequenze si avvicina al valore del livello di significatività del test, si può quindi concludere che probabilmente la finitura superficiale di un TNT è maggiormente importante alle alte frequenze. Questo trova conferma nei grafici, in fig. 6-35, relativi all'assorbimento acustico delle coppie di provini.

Tabella 6-30: *p-value* ottenuti nei test *paired-t* sull'assorbimento acustico alle basse, medie e alte frequenze e intervallo di confidenza della differenza tra le medie del gruppo dei provini lisciati e calibrati.

	<i>p-value</i>	<i>Intervallo di confidenza al 95% per la differenza tra e medie</i>
$\bar{\alpha}$ basse	0,363	-0,01-0,01
$\bar{\alpha}$ medie	0,593	-0,06-0,04
$\bar{\alpha}$ alte	0,240	-0,07-0,02



a)



b)

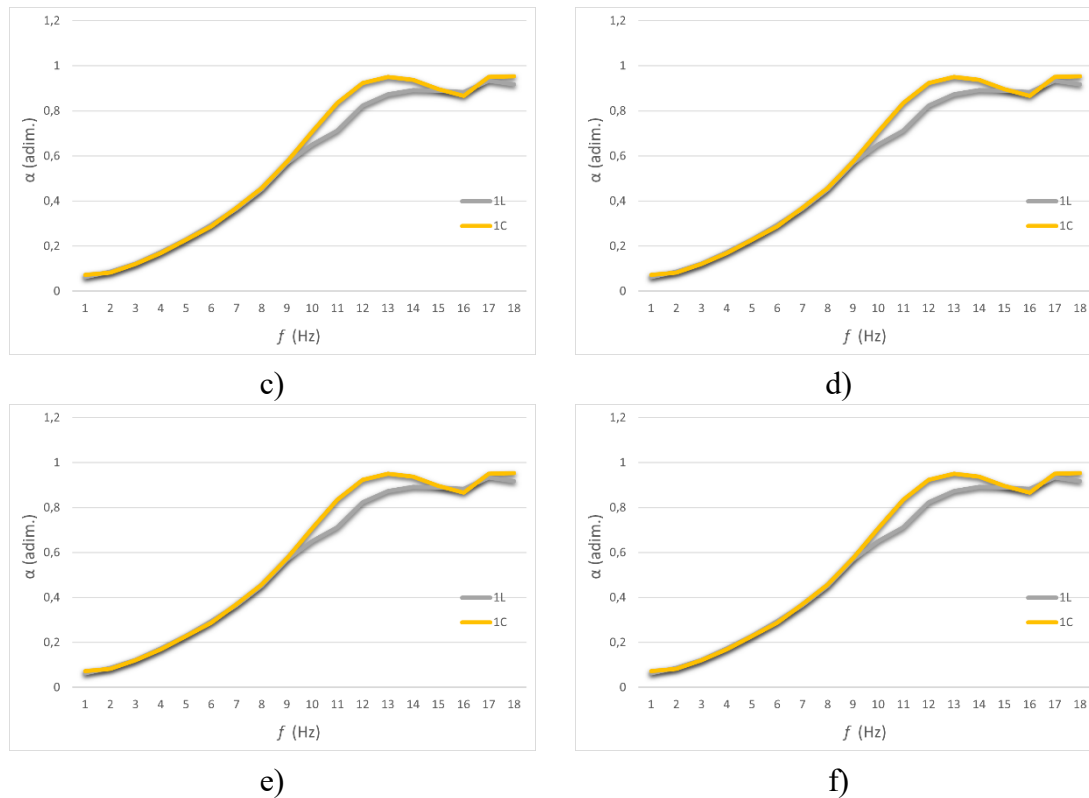


Figura 6-35: Curve di assorbimento acustico relative alle sei coppie di provini analizzati per lo studio sulla finitura superficiale dei TNT. Le specifiche di ciascun materiale in legenda si trovano in tabella 6-27.

6.7 Analisi preliminare delle proprietà termoacustiche di tessuti-non tessuti realizzati con fibre con sezione di forma particolare

Dalla letteratura scientifica analizzata è emerso che la forma della sezione delle fibre che costituiscono un TNT ne influenza le caratteristiche acustiche e termiche. La geometria della sezione delle fibre ne definisce la morfologia della superficie laterale. Forme più complesse e meno serrate risultano in un'elevata superficie specifica della fibra. Questa interagisce maggiormente con l'onda acustica incidente aumentando generalmente l' α del materiale. Inoltre, si ipotizza che questo possa accadere anche per le onde termiche: si prevede un loro maggior *scattering* e assorbimento.

In generale, le fibre con forma di sezione irregolare sono maggiormente abili nel variare la direzione delle onde che vi incidono. Se si considerano onde acustiche, questo fenomeno aumenta la probabilità che un'onda deviata interferisca in modo distruttivo con un'altra.

Infine, la presenza di fibre a sezione cava nella miscela di un TNT, per il maggior contenuto di aria che intrappolano nella struttura fibrosa, riduce la conducibilità termica.

In questo capitolo si vuole condurre un'analisi preliminare delle proprietà termoacustiche di tessuti-non tessuti realizzati con fibre con sezione di forma particolare. Per fare questo si sono confrontati, con la strategia OFAT, i campioni realizzati con fibre a sezione circolare piena, normalmente utilizzata nelle industrie di TNT, con altri costituiti da fibre a sezione circolare cava, trilobata o esagonale cava.

6.7.1 Preparazione dei campioni

Si è deciso di realizzare gruppi di tre campioni, ciascuno costituito principalmente da fibre in PET con le seguenti forme di sezione:

- Circolare piena
- Circolare cava
- Particolare

con forma “particolare” si intende una tra forma trilobata ed esagonale cava.

Si denomina gruppo A quello costituito da fibre in PET con titolo medio di 4.8 dtex e con gruppo B quello con titolo medio 7.9 dtex.

I TNT realizzati sono costituiti dal 70% da fibra in PET e 30% di fibra bicomponente *sheath-core* in poliestere ($T_{m\ co-PES}=110^{\circ}C$), necessaria per consolidare il materiale una volta riscaldato. Le miscele fibra utilizzate sono riportate nella tabella 6-31.

Per realizzare un confronto OFAT specifico per studiare l'effetto della forma della sezione, i provini appartenenti al medesimo gruppo condividono tutte le caratteristiche ad eccezione della geometria di sezione.

Tabella 6-31: Frazioni ponderali delle componenti delle miscele fibra utilizzate.

Gruppo	Sample N°	Frana	Unisky	Haxaflo	Wellma	Texino	Trilobat	Huvis
		3.3	3.3	wer 4.9	n 7.0	7.8	a 7.9	Bicomponente
								4.4
A	1F	0.7	0	0				0.3
	2F	0	0.7	0		/		0.3
	3F	0	0	0.7				0.3
	4F				0.7	0	0	0.3
B	5F		/		0	0.7	0	0.3
	6F				0	0	0.7	0.3

La lavorazione delle fibre per ottenere il TNT è analoga a quanto descritto nel paragrafo 6.2.2.

6.7.2 *Analisi preliminari*

Prima di procedere con la preparazione dei campioni è necessario effettuare delle analisi preliminari sulle materie prime utilizzate.

La prima analisi è la spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR). Si vuole infatti determinare se il materiale di cui sono costituite le fibre non sia una variabile di questo studio, ma un parametro costante. Lo spettro di trasmittanza in funzione del numero d'onda ottenuto in output dallo strumento di misura, in figura 6-36, conferma che tutte le fibre utilizzate sono costituite in PET.

La caratterizzazione delle temperature di fusione delle fibre bicomponenti *sheath-core* mediante MDSC è stata presentata nel paragrafo 6.2.3.

Un altro test a cui sono sottoposte le fibre è la determinazione del titolo reale mediante vibroscopio. Sono state effettuate dieci misurazioni per ogni fibra, i risultati sono riportati nella tabella 6-32. Si conclude che tutte le fibre presentano un intervallo di confidenza al 95% (presente in tabella) per il valore di titolo medio puntuale assunto come caratteristico del gruppo di appartenenza.

Sono poi state osservate le sezioni delle fibre con il microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM). Le scansioni relative agli elettroni retrodiffusi sono riportate nella figura 6-37. Si presenta anche l'analisi della fibra Coolmax (sezione a lobi) che non fa parte di quelle utilizzate, ma che potrebbe essere studiata in futuri sviluppi sull'argomento.

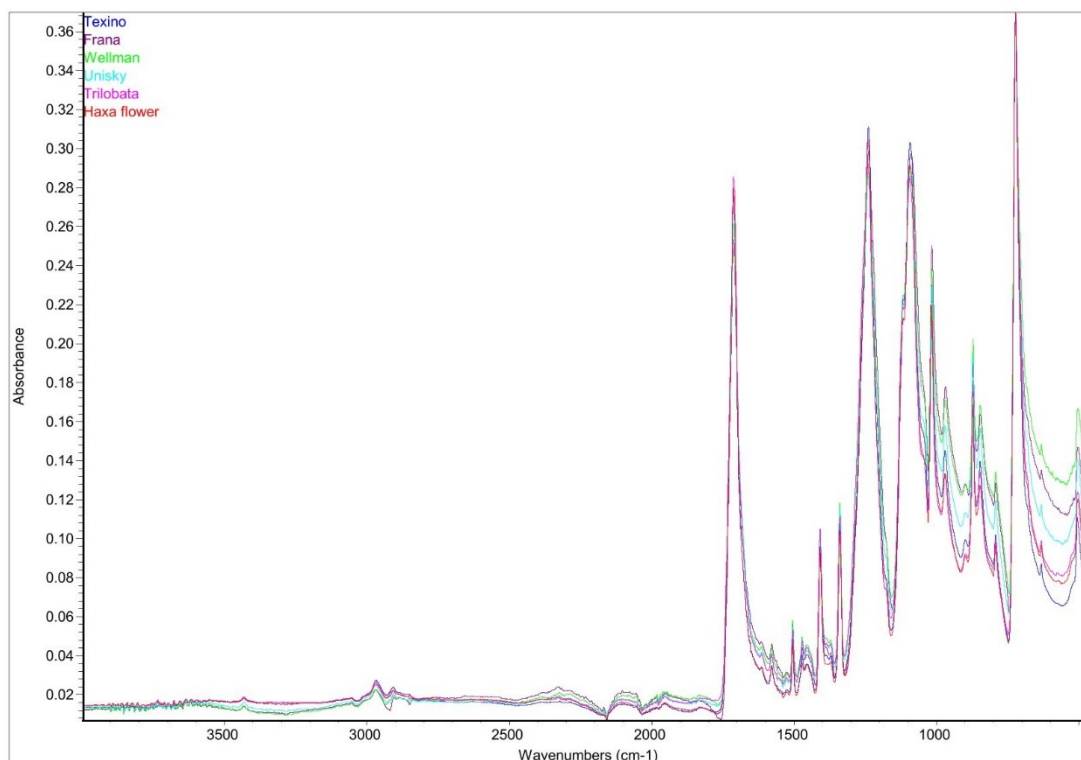
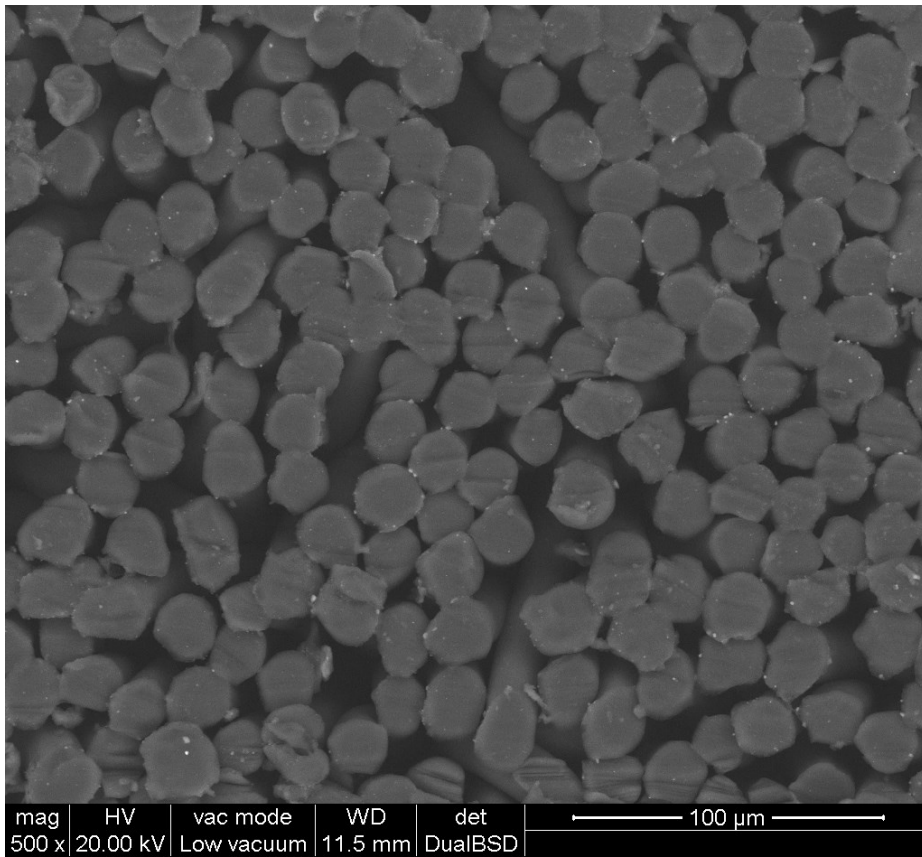


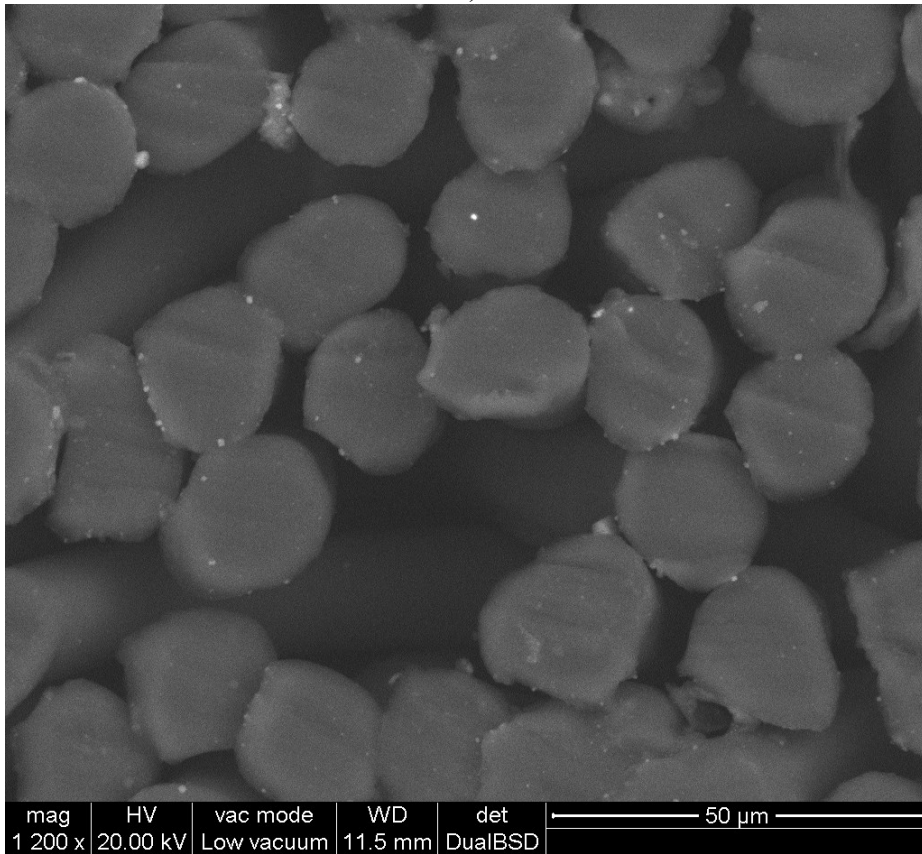
Figura 6-36: Spettri di trasmissione ottenuti con analisi FT-IR delle fibre utilizzate per la preparazione dei campioni. Lo strumento ha identificato che tutte le fibre sono costituite da PET.

Tabella 6-32: Risultati del test al vibroscopio per la determinazione del titolo delle fibre utilizzate.

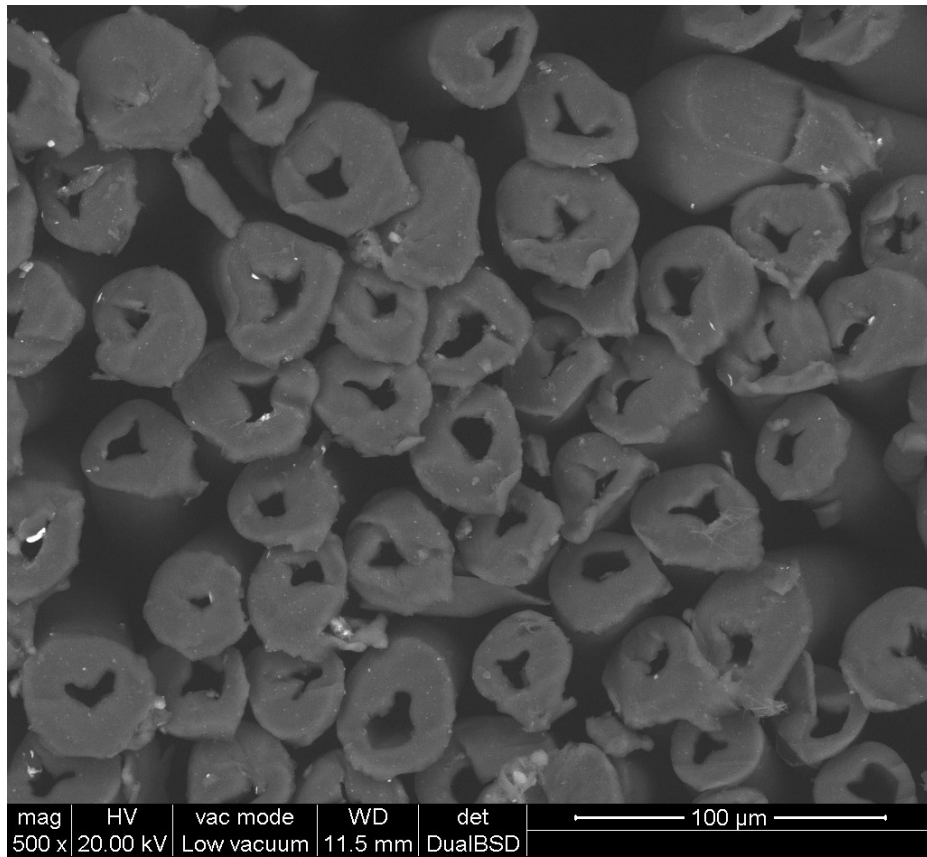
	<i>Frana</i>	<i>Unisky</i>	<i>Haxaflo</i>	<i>Wellma</i>	<i>Texino</i>	<i>Trilobat</i>	<i>Huvis</i>
	<i>3.3</i>	<i>3.3</i>	<i>wer 4.9</i>	<i>n 7.0</i>	<i>7.8</i>	<i>a 7.9</i>	<i>bicomponente 4.4</i>
Titolo, media							
<i>aritmetica</i>	4.71	5.16	4.93	8.06	7.60	7.98	5.25
<i>(dtex)</i>							
Deviazione							
<i>standard</i>	0.31	0.94	0.53	0.50	0.86	0.88	0.46
Intervallo di							
<i>confidenza al</i>	4.49-	4.49-	4.55-	7.71-	6.99-	7.35-	4.92-
<i>95%</i>	4.93	5.84	5.31	8.42	8.22	8.61	5.58



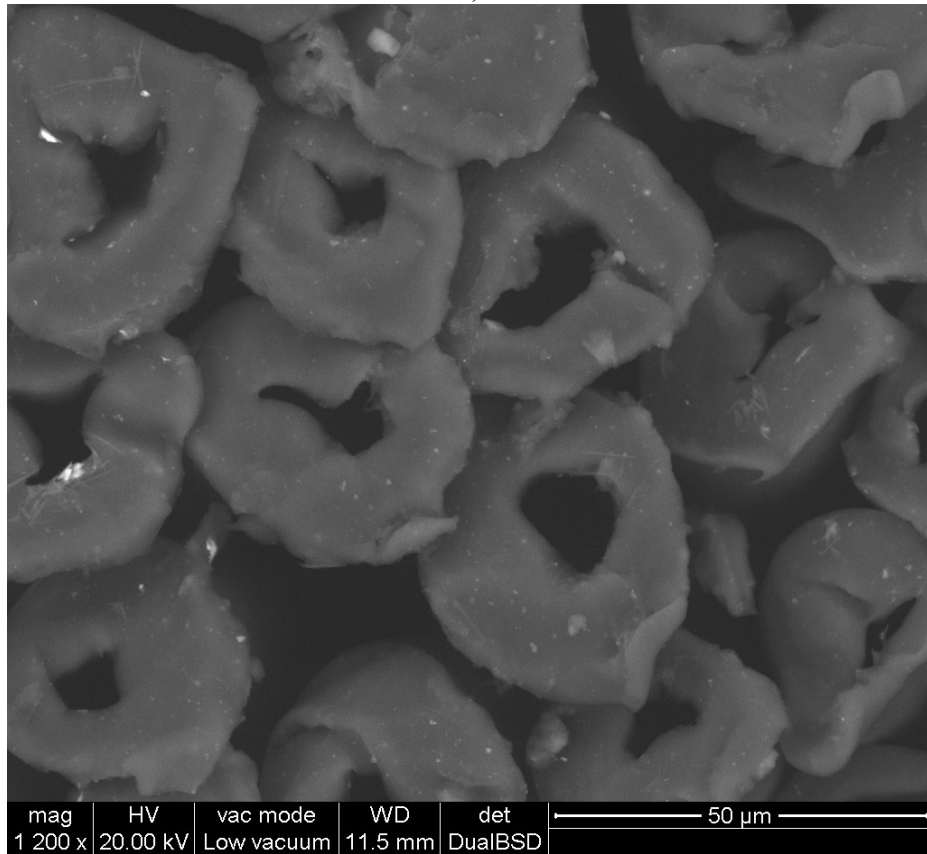
a)



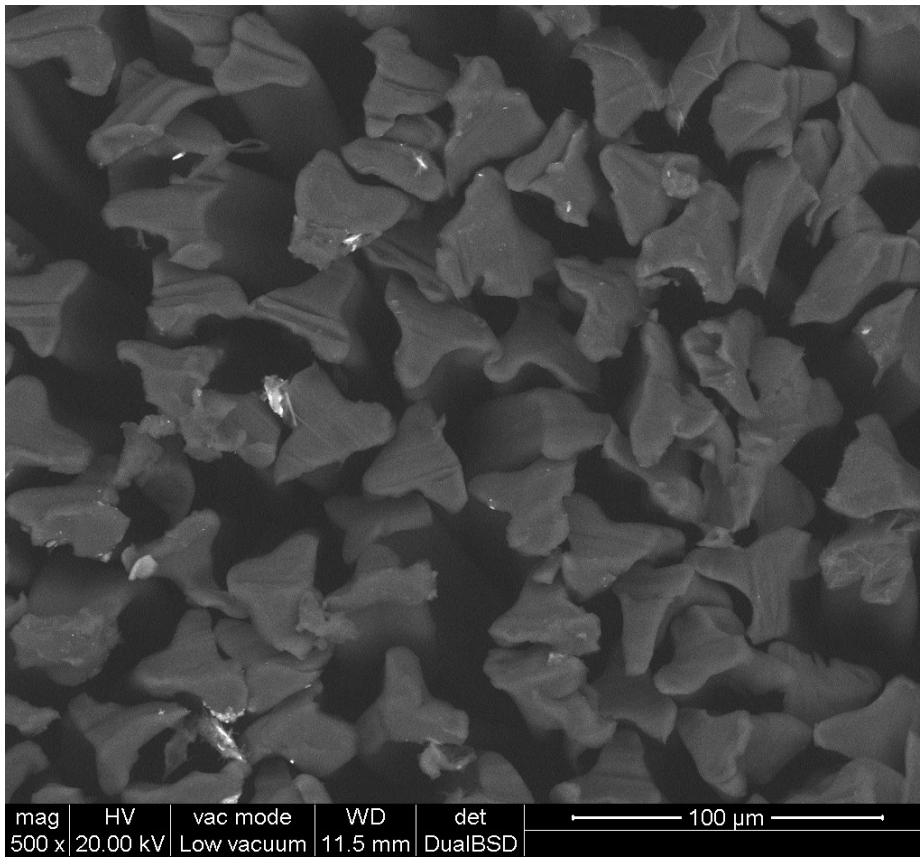
b)



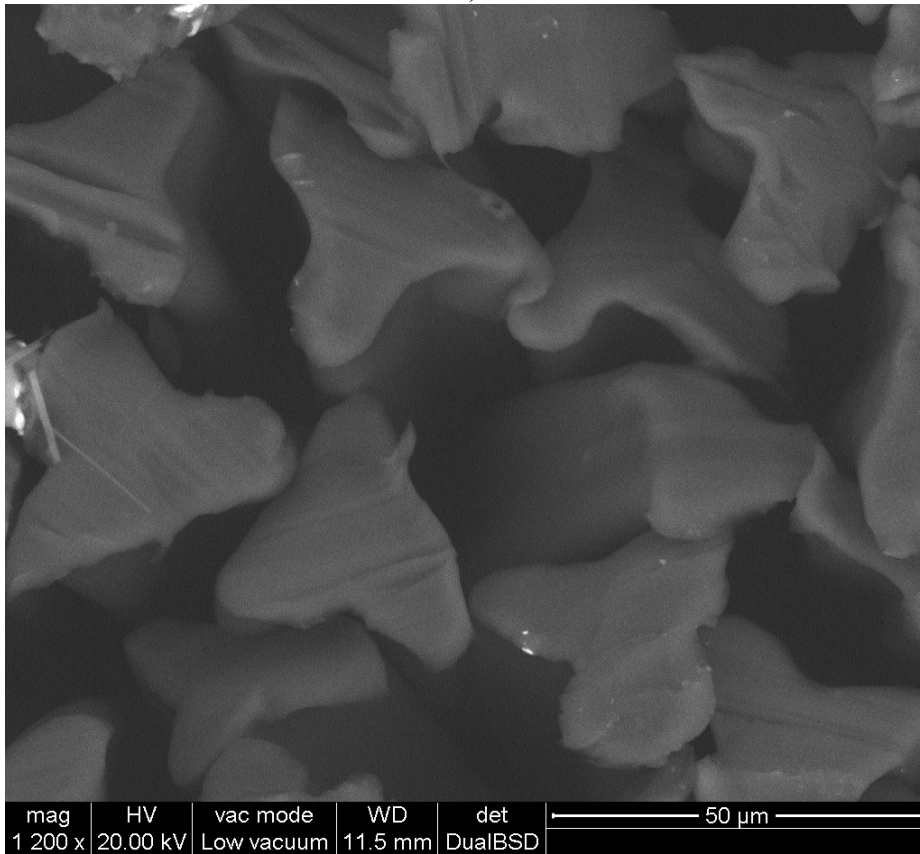
c)



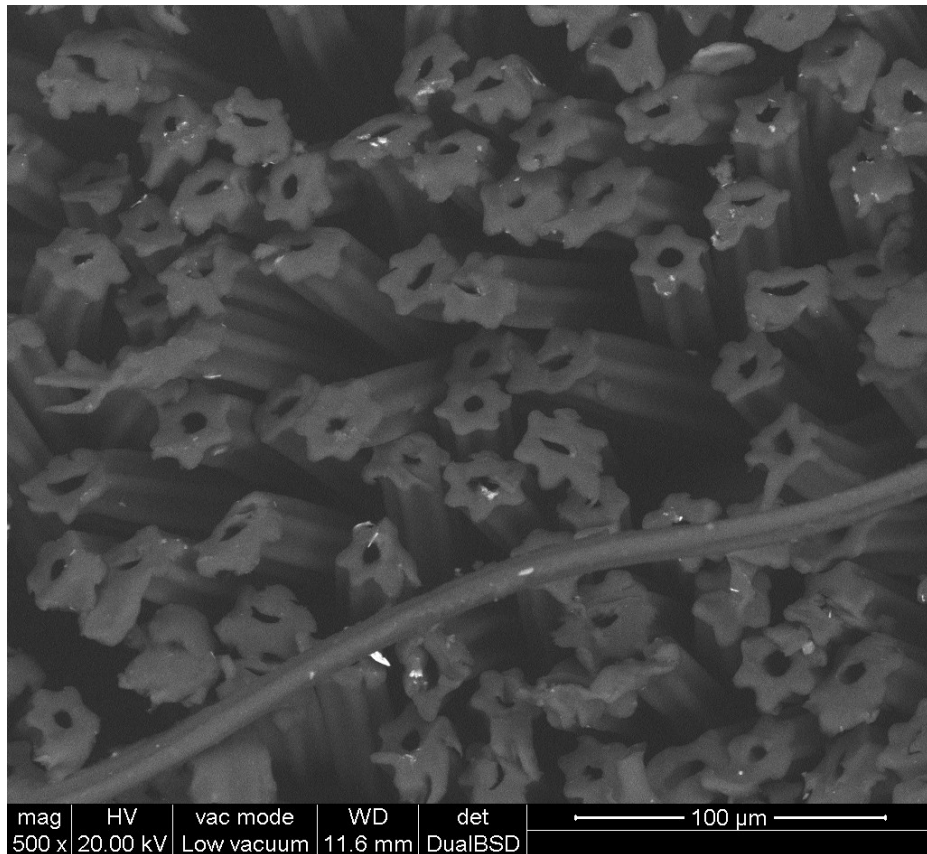
d)



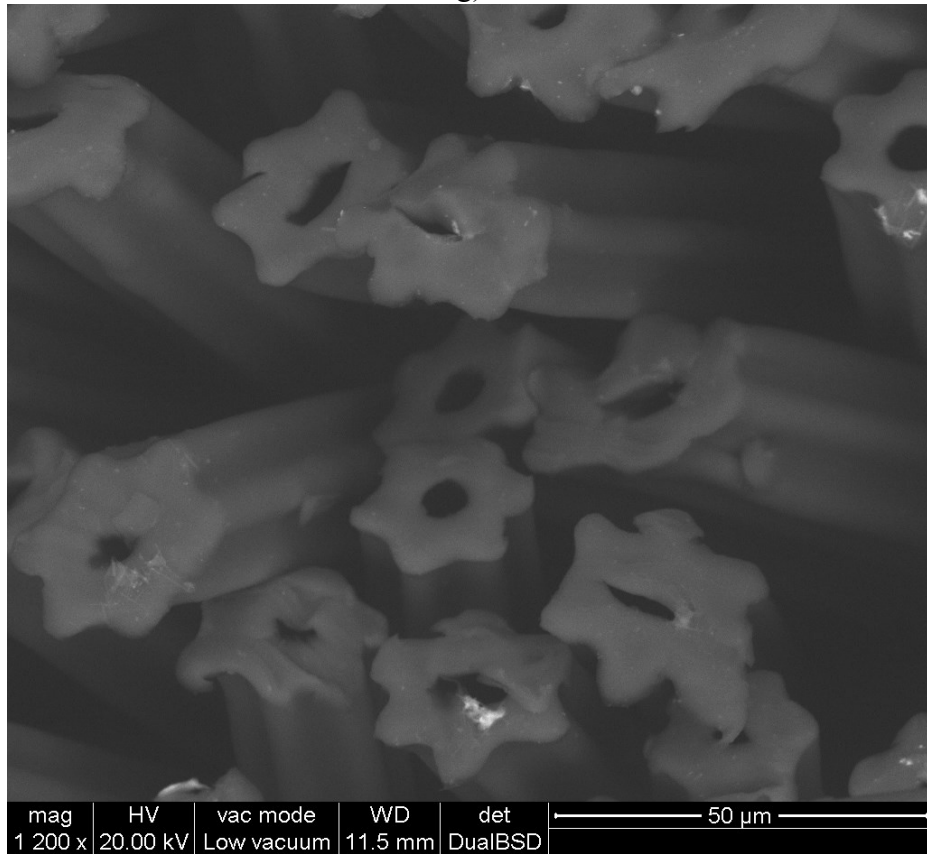
e)



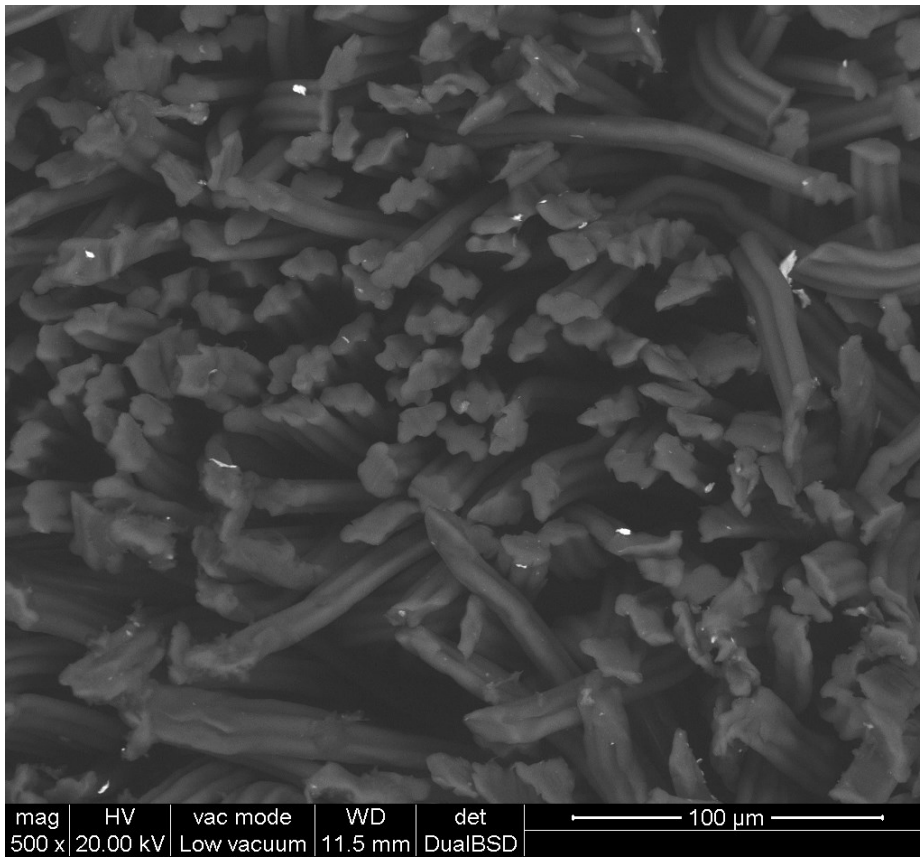
f)



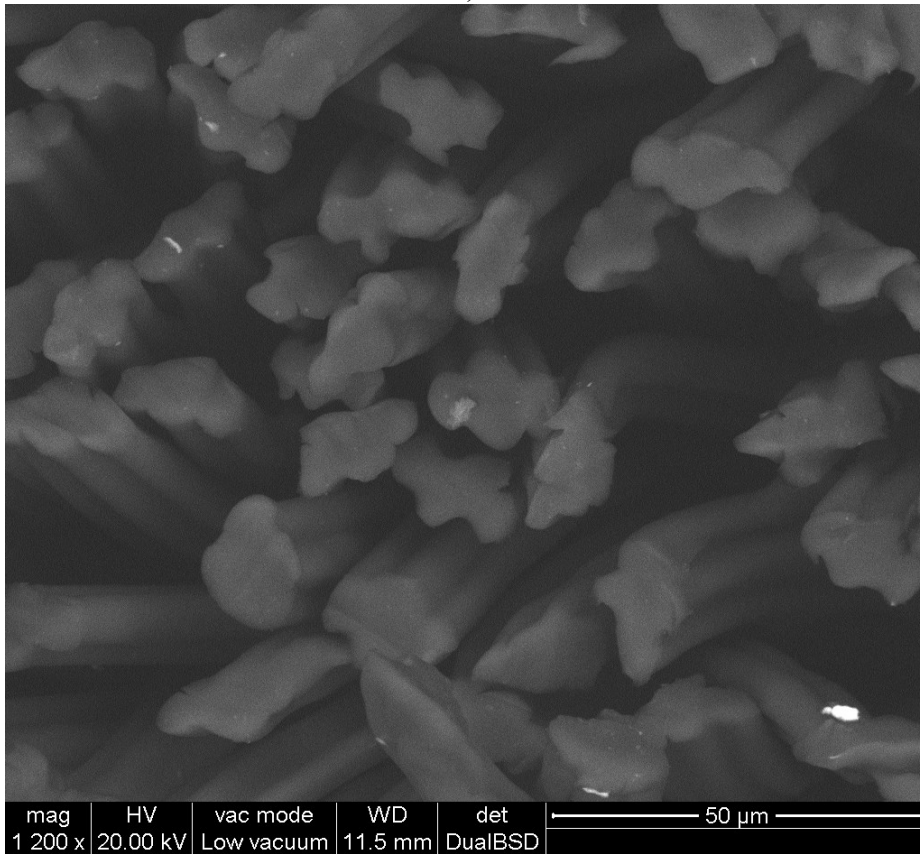
g)



h)



i)



j)

Figura 6-37: Immagini ottenute con un ESEM. Analisi degli elettroni retrodiffusi con ingrandimenti 500x e 1200x di fibre con sezione: a,b) circolare piena, c,d) circolare cava, e,f) trilobata, g,h) esagonale cava e i,j) a lobi (fibra Coolmax).

Una volta che i campioni sono stati prodotti sono caratterizzati in termini di spessore e densità. I risultati sono riportati nella tabella 6-33.

Tabella 6-33: Caratterizzazione dei campioni: densità e spessore reale e titolo medio.

<i>Sample N°</i>	<i>Densità (kg/m³)</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Titolo medio (dtex)</i>
1F	62,4	5,3	4,8
2F	61,9	5,3	4,8
3F	61,6	5,3	4,8
4F	60,0	5,3	7,9
5F	56,9	5,3	7,9
6F	59,5	5,3	7,9

6.7.3 Risultati delle analisi

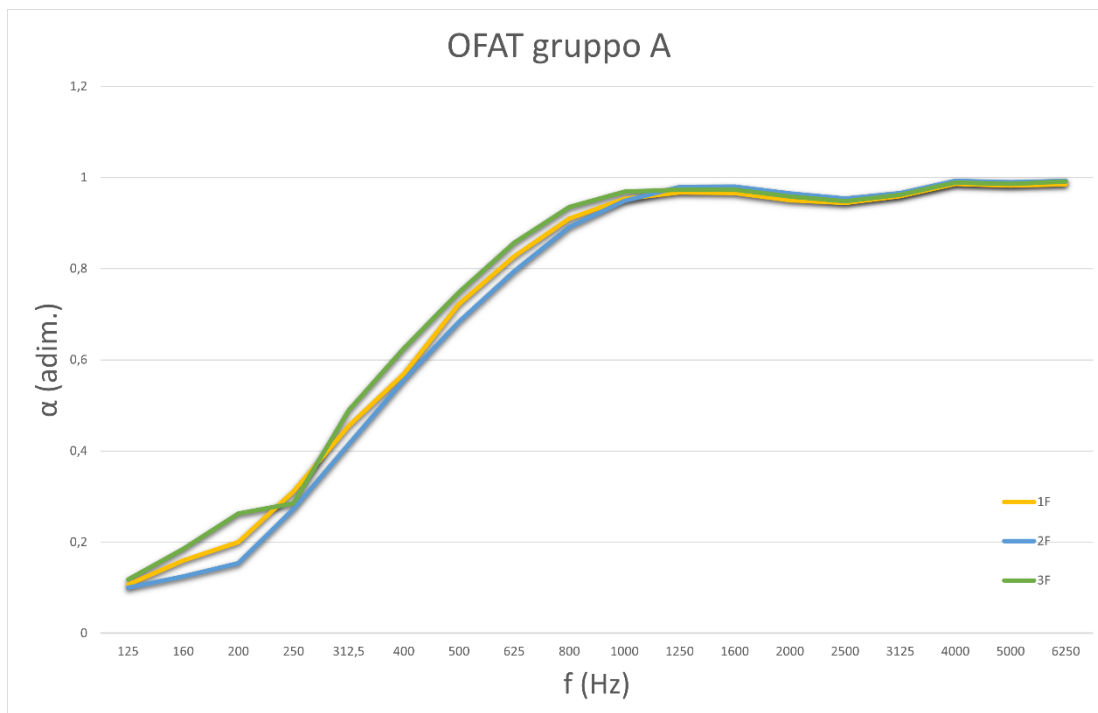
Al termine delle campagne di test termoacustici si sono ottenuti i valori dei parametri risposta riportati nella tabella 6-6. In figura 6-38 è invece presentato il confronto OFAT delle curve di assorbimento acustico dei provini appartenenti al gruppo A e B.

Per l'acustica non si è osservato un effetto rilevante della sezione delle fibre sull'assorbimento sonoro a tutte le frequenze. Nonostante questo risultato nell'analisi preliminare, si ipotizza che, in accordo con la letteratura scientifica, la forma della sezione delle fibre possa avere un ruolo nelle *performance* acustiche perché modifica il rapporto superficie/titolo e la geometria del fenomeno di riflessione dell'onda sonora sulle singole fibre.

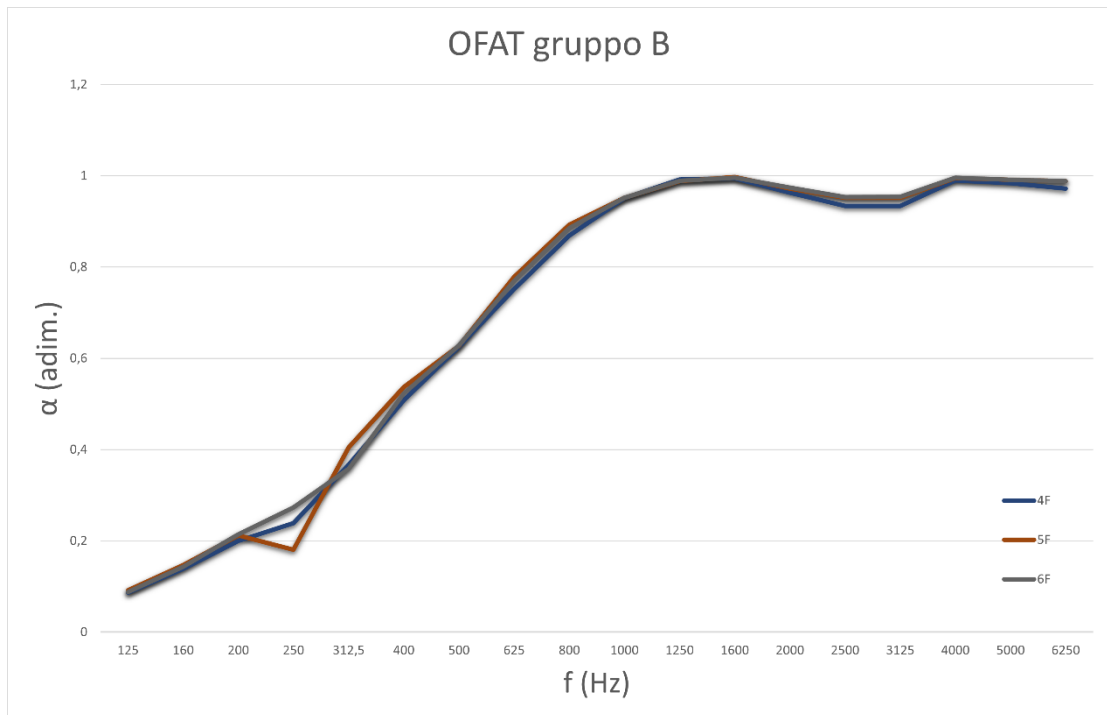
Considerando la conducibilità termica, dai risultati delle analisi graficati nella figura 6-39 è emerso che, per entrambi i gruppi di campioni, il trasporto del calore è maggiormente impedito nei materiali costituiti da fibre a sezione cava. Questo potrebbe essere dovuto al maggior contenuto di aria intrappolato dalla struttura fibrosa, come ipotizzato da alcuni articoli in letteratura che si sono consultati.

Tabella 6-34: Valori dei parametri risposta per ciascun campione che si è realizzato: $\bar{\alpha}$ basse, $\bar{\alpha}$ medie, $\bar{\alpha}$ alte, k e R .

Gruppo	Sample N°	$\bar{\alpha}$ basse (adim.)	$\bar{\alpha}$ medie (adim.)	$\bar{\alpha}$ alte (adim.)	k (W/m·K)	R (m²·K/W)
A	1F	0,36	0,90	0,97	0,035	1,500
	2F	0,33	0,90	0,98	0,031	1,735
	3F	0,39	0,92	0,98	0,034	1,537
B	4F	0,31	0,89	0,96	0,036	1,488
	5F	0,31	0,90	0,98	0,035	1,503
	6F	0,32	0,89	0,98	0,036	1,455

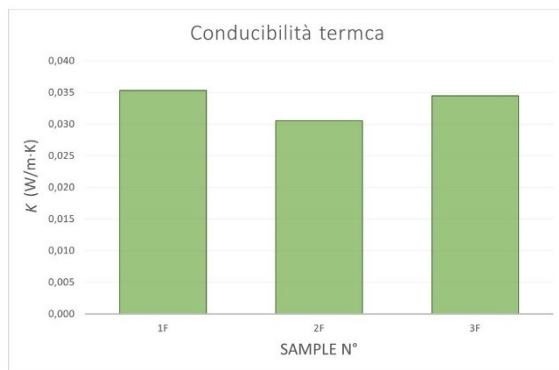


a)

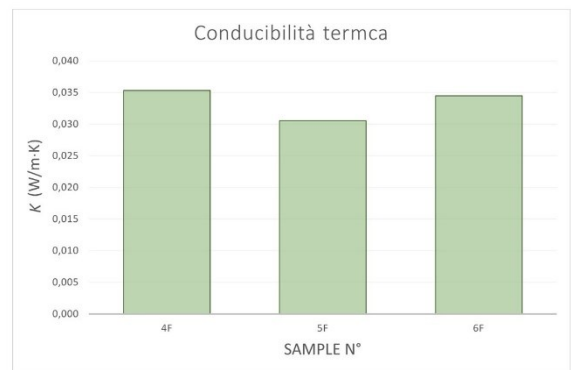


b)

Figura 6-38: Assorbimento acustico in funzione della frequenza sonora incidente per il confronto OFAT tra i provini del gruppo a) A e b) B.



a)



b)

Figura 6-39: Istogrammi relativi alla conducibilità termica dei provini del gruppo a) A e b) B.

Conclusioni

Nel presente lavoro si sono analizzati i tessuti-non tessuti, materiali ad elevata porosità costituiti da fibre, legate con tecniche chimiche, termiche o meccaniche, che hanno la capacità di ostacolare i fenomeni di trasporto del calore e di assorbire l'energia sonora trasformandola in calore. Lo studio ha l'obiettivo di mettere in luce i principali fattori che influenzano le capacità di pannelli in tessuto-non tessuto di assorbire le onde acustiche e di isolare termicamente.

I TNT sono materiali fonoassorbenti porosi per la presenza di cavità interconnesse. La dissipazione dell'energia acustica avviene principalmente per frizione, perdita di momento e per fluttuazioni di temperatura che si generano quando l'onda di pressione sonora riesce a penetrare tra la struttura fibrosa. È dunque fondamentale che la superficie del materiale abbia una porosità sufficientemente elevata per avere un regime di flusso viscoso nelle cavità.

Le proprietà isolanti dei materiali fibrosi, intesi come solidi costituiti da fibre e aria ad elevata porosità, sono correlate principalmente alla loro abilità nel ridurre la trasmissione del calore per irraggiamento e conduzione, la convezione infatti non avviene nei materiali studiati per la dimensione limitata dei pori. La conduzione è soprattutto correlata al gas intrappolato nel materiale, mentre l'irraggiamento è controllato da fenomeni di assorbimento, riflessione, *scattering* e rifrazione da parte delle singole fibre.

I materiali studiati sono realizzati in fibre in PET legate a caldo da fibre bicomponenti in PET-co-PES di tipo *sheath-core*. I campioni sono realizzati con tecnica *dry-laid* e faldatura *cross-laid*. La caratterizzazione delle fibre è stata condotta mediante analisi FT-IR, MDSC, ESEM e vibroscopio per la determinazione del titolo.

Si sono indagati gli assorbimenti acustici medi con un tubo ad impedenza acustica (tubo di Kundt) in tre intervalli di frequenze: basse frequenze se $f \in [125 \text{ Hz}; 500 \text{ Hz}]$, medie frequenze se $f \in [500 \text{ Hz}; 2500 \text{ Hz}]$ e alte frequenze se $f \in [2500 \text{ Hz}; 6250 \text{ Hz}]$. Le proprietà termiche prese in considerazione sono invece la conducibilità e la resistenza, determinate con un termoflussimetro. Questi parametri termoacustici costituiscono le variabili risposta dell'elaborazione dei dati che è svolta con diversi metodi statistici grazie al software Minitab.

L'analisi delle proprietà termoacustiche in funzione della densità, spessore e titolo medio è stata condotta tramite analisi *Design of Experiments*. Si è osservato che l'assorbimento acustico è controllato principalmente dallo spessore del materiale, al crescere del quale si osserva una maggiore dissipazione di energia sonora. Questo accade anche per la densità,

ma esiste un valore massimo al di sopra del quale l'assorbimento diminuisce per una maggiore riflessione delle onde incidenti. Il titolo medio è il fattore meno influente e generalmente porta a dei benefici se mantenuto basso. L'analisi termica, avente come oggetto la conducibilità, ha evidenziato lo spessore come parametro più rilevante. Questo ha permesso di concludere che l'irraggiamento è importante nei TNT soprattutto a basse densità; quando questa diviene troppo elevata il trasporto termico dominante è la conduzione del gas all'interno della porosità. Il parametro titolo medio è poco rilevante anche per il comportamento termico. L'ottimo delle *performance* termoacustiche è stato calcolato e si verifica per densità di $66,7 \text{ kg/m}^3$, spessore di $7,82 \text{ cm}$ e titolo medio pari a $3,6 \text{ dtex}$.

Per determinare invece la relazione tra le variabili risposta e la porosità è stata condotta un ANOVA. È emerso che la connessione è limitata e statisticamente rilevante solo per l'assorbimento alle alte frequenze e per la conducibilità. L'analisi risulta comunque limitata dall'intervallo ristretto di valori di porosità che si è potuto studiare.

Successivamente, si è verificata la correlazione tra grammatura e permeabilità all'aria con le performance termoacustiche. Al crescere della grammatura aumenta la resistività al flusso d'aria perché cresce il numero maggiore di fibre si trovano nel cammino acustico dell'onda sonora, questa dunque è maggiormente assorbita dal materiale. La densità superficiale non è invece determinante per la conducibilità per un effetto simultaneo e opposto dei valori di conduzione ed irraggiamento. La permeabilità all'aria non è invece statisticamente correlata alle variabili risposta; questo si verifica perché è una grandezza determinata sottoponendo il TNT ad un flusso d'aria molto più elevato di quanto avviene quando un'onda di pressione sonora si muove all'interno del materiale. È possibile ottenere un risultato apprezzabile analizzando la resistività al flusso d'aria anziché la permeabilità.

Al fine di studiare l'esistenza di una correlazione tra assorbimento acustico e isolamento termico si è utilizzato il metodo *correlation*. È emerso che questa correlazione sussiste considerando la resistenza termica, non la conducibilità. Si è così determinata e verificata una legge sperimentale che permette di calcolare la resistenza termica a partire dal coefficiente di assorbimento acustico alle basse e alte frequenze. La relazione ha presentato un elevato livello di affidabilità.

Lo studio seguente è stato rivolto alla verifica dell'ipotesi che la finitura superficiale del materiale, lisciata o irregolare, influenzi l'assorbimento acustico. L'esito di una statistica *paired-t* ha riportato l'assenza di peso di questo parametro sulla risposta analizzata.

Infine, si è condotta un'analisi preliminare con la tecnica OFAT sull'effetto della geometria delle fibre sulle caratteristiche termoacustiche dei TNT. I risultati hanno permesso di notare solamente una riduzione della conducibilità del calore nei materiali

realizzati con fibre a sezione cava. Non è evidente una differenza nel comportamento acustico dei provini realizzati con fibre a sezione cava, trilobata o esagonale cava.

Nomenclatura

T_m	=	Temperatura di fusione ($^{\circ}\text{C}$)
p	=	Pressione sonora (N/m^2)
p_o	=	Massima ampiezza dell'onda di pressione (N/m^2)
f	=	Frequenza (Hz)
T	=	Periodo (s)
λ	=	Lunghezza d'onda (m)
c	=	Velocità del suono nell'aria (m/s)
W	=	Potenza sonora, detta anche indice di emissione di energia acustica (W)
I	=	Intensità del suono (W/m^2)
L	=	Livello sonoro (dB)
p_{ref}	=	Pressione sonora di riferimento (N/m^2)
α	=	Coefficiente di assorbimento (adim.)
τ	=	Coefficiente di trasmissione (adim.)
ρ	=	Coefficiente di riflessione (adim.)
W_i	=	Potenza sonora incidente (W)
W_a	=	Potenza sonora assorbita (W)
W_t	=	Potenza sonora trasmessa (W)
W_r	=	Potenza sonora riflessa (W)
k_o	=	Numero d'onda (m^{-1})
$\bar{\rho}$	=	Densità del mezzo (kg/m^3)
\hat{r}	=	Resistenza acustica specifica (rayls)
Z	=	Impedenza acustica (rayls)
u	=	Velocità della particella (m/s)
x	=	Reattanza acustica specifica (rayls)
r	=	Fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)
r_r	=	Parte reale del fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)
r_i	=	Parte immaginaria del fattore di riflessione ad incidenza normale (adim.)
Φ_r	=	Angolo di fase del fattore di riflessione ad incidenza normale (rad)
H_{12}	=	Funzione di trasferimento (adim.)
H_r	=	Parte reale della funzione di trasferimento (adim.)
H_i	=	Parte immaginaria della funzione di trasferimento (adim.)
Φ	=	Angolo di fase (rad)
H_I	=	Funzione di trasferimento per la sola onda incidente (adim.)

H_R	=	Funzione di trasferimento per la sola onda riflessa (adim.)
x_1 e x_2	=	Distanze del campione dai microfoni 1 e 2 di un tubo di impedenza (m)
f_r	=	Frequenza di risonanza (Hz)
F	=	Frazione della superficie del risuonatore forata (adim.)
d	=	Spessore dell'intercapedine o del materiale poroso (m)
s	=	Lunghezza del collo dei risonatori (m)
m	=	Massa per unità di area del pannello (kg/m^2)
k_n	=	Numero di Knudsen (adim.)
l_{fluid}	=	Cammino libero medio (m)
l_{char}	=	Lunghezza caratteristica (m)
ϕ	=	Porosità (adim.)
V_{pori}	=	Volume dei pori (m^3)
V_{tot}	=	Volume totale del materiale poroso (m^3)
$\bar{\rho}_{tot}$	=	Densità del materiale poroso (kg/m^3)
$\bar{\rho}_m$	=	Densità della parte solida del materiale poroso (kg/m^3)
G	=	Grammatura (g/m^2)
q_{eN}	=	Flusso di calore emesso da un corpo nero (W/m^2)
σ	=	Costante di Stefan-Boltzmann $5.670374\text{e-}8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$
T	=	Temperatura (K o $^{\circ}\text{C}$ a seconda della relazione in cui compare)
ε	=	Emissività (adim.)
q_a	=	Flusso di calore assorbito (W/m^2)
ζ	=	Assorbanza (adim.)
\mathcal{G}	=	Irradiazione, energia che giunge al corpo (W/m^2)
q_e	=	Flusso di calore emesso da un corpo (W/m^2)
q_{irr}	=	Flusso di calore totale per irradiazione (W/m^2)
T_E	=	Temperatura del sistema emettitore (K)
k_l	=	Conducibilità termica per l'irraggiamento ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)
R_l	=	Resistenza termica per l'irraggiamento ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
q	=	Flusso termico (W/m^2)
k	=	Conducibilità termica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
$\frac{dT}{dx}$	=	Gradiente di temperatura nella direzione del flusso termico (K)
T_1	=	Temperatura della superficie calda (K)
T_2	=	Temperatura della superficie fredda (K)
l	=	Spessore del materiale che conduce (m)
R	=	Resistenza termica ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)
U	=	Conduttanza termica ($\text{W/ m}^2\cdot\text{K}$).
h	=	Coefficiente di scambio termico per convezione ($\text{W/ m}^2\cdot\text{K}$)

T_s	=	Temperatura del solido lambito (K)
T_∞	=	Temperatura indisturbata al limite dello strato termico (K)
k_{CV}	=	Conducibilità termica per convezione (W/m ² ·K)
R_{CV}	=	Resistenza termica per convezione (m ² ·K/W)
Υ	=	Spessore ottico (adim.)
\mathcal{W}_i	=	Potenza della radiazione incidente (W)
\mathcal{W}_t	=	Potenza della radiazione trasmessa (W)
\hbar	=	Costante di Planck (J·s)
q_{irr}	=	Flusso termico per l'irraggiamento (W/m ²)
k_r	=	Conducibilità termica per l'irraggiamento (W/m·K)
$\frac{dT}{dy}$	=	Gradiente di temperatura nella direzione del flusso termico (K)
ζ_λ	=	Coefficiente di assorbimento alla λ (m ⁻¹)
$I_{b\lambda}(T)$	=	Legge di Planck (W/m ²)
$I_b(T)$	=	Massima potenza emessa alla temperatura T (W/m ²)
Γ_λ	=	Coefficiente di assorbimento modificato (m ⁻¹)
K_λ	=	Coefficiente di estinzione nella direzione del flusso di calore (m ⁻¹)
G_λ	=	Fattore di asimmetria dello scattering (adim.)
$k_f(T)$	=	Conducibilità termica dello scheletro di fibre (W/m·K)
F_s	=	Fattore geometrico (m ³ /kg)
$\bar{\rho}_s$	=	Densità del materiale delle fibre (kg/m ³)
$k_s(T)$	=	Conducibilità termica del materiale delle fibre (W/m·K)
$k_{g0}(T)$	=	Conducibilità termica del gas indipendente dalla pressione (W/m·K)
ℓ_m	=	Cammino libero medio del gas alla temperatura T
P	=	Diametro medio dei pori (m)
β	=	Definito nella (3.19) (adim.)
γ	=	Coefficiente di dilatazione adiabatico (adim.)
α_m	=	Definito nella (3.20) (adim.)
m_g	=	Massa molecolare del gas (u)
m_s	=	Massa molecolare del materiale delle fibre (u)
Λ	=	Area della sezione delle molecole del gas (m)
p	=	Pressione del gas nei pori (Pa)
$\bar{\rho}$	=	Densità lineare (dtex)
F	=	Forza di pretensionamento (N)
f_r	=	Frequenza di risonanza (Hz)
l	=	Lunghezza testata (m)
E	=	Energia della radiazione elettromagnetica (J)
m	=	Massa del provino (kg)

V	=	Volume del provino (m^3)
T	=	Tiolo medio della miscela di fibre (dtex)
T_i	=	Titolo della fibra i -esima (dtex)
w_i	=	Frazione ponderale della fibra i -esima (adim.)
P	=	Permeabilità (m/s)
\bar{q}_v	=	Media aritmetica dei flussi d'aria (l/min)
A	=	Superficie del tessuto che è analizzata (m^2)
Q	=	Potenza termica scambiata (W)
ΔT	=	Differenza di temperatura impostata tra le due piastre (K)
Δx	=	Spessore del provino analizzato (m)
N	=	Fattore di calibrazione dello strumento (W/Volt)
ΔV	=	Differenza di potenziale misurata (Volt)

Acronimi

TNT	=	Tessuti-non tessuti
PES	=	Poliestere
PP	=	Polipropilene
PA	=	Poliammide
EDANA	=	<i>European Disposables and Nonwovens Association</i>
INDA	=	<i>North America's Association of the Nonwoven Fabrics Industry</i>
CoPES	=	Co-poliestere
NRC	=	<i>Noise Reduction Coefficient</i>
PET	=	Polietilene tereftalato
PE	=	Polietilene
PU	=	Poliuretano
PLA	=	Acido polilattico
TA	=	Acido tereftalico
EG	=	Glicole etilenico
DOE	=	Design of Experiments
α		livello di significatività
R-sq (adj)		R^2 aggiustato
R-sq (pred)		R^2 predetto
ANOVA		<i>Analysis of variance</i>
FT-IR		Spettrometria ad infrarossi a trasformata di Fourier
DSC		Calorimetria a scansione differenziale
MDSC		Calorimetria differenziale a scansione modulata

Riferimenti bibliografici

- [1] F. Karimi, P. Soltani, M. Zarrebini, and A. Hassanpour, “Acoustic and thermal performance of polypropylene nonwoven fabrics for insulation in buildings,” *J. Build. Eng.*, vol. 50, no. December 2021, p. 104125, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104125.
- [2] S. M. Nazire Deniz Yilmaz, Pamela Banks-Lee, Nancy B. Powell, “Effects of Porosity, Fiber Size, and Layering Sequence on Sound Absorption Performance of Needle-Punched Nonwovens,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, 2010, doi: 10.1002/app.
- [3] “EDANA.” <https://www.edana.org/>.
- [4] N. A. Kalabek and O. Babaarslan, “Fiber Selection for the Production of Nonwovens,” *Non-woven Fabr.*, Mar. 2016, doi: 10.5772/61977.
- [5] S. S. Woo, I. Shalev, and R. L. Barker, “Heat and Moisture Transfer Through Nonwoven Fabrics: Part I: Heat Transfer,” *Text. Res. J.*, vol. 64, no. 3, pp. 149–162, 1994, doi: 10.1177/004051759406400305.
- [6] S. K. A. Y. Obendorf and J. P. Smith, “Heat Transfer Characteristics of Nonwoven Insulating Materials,” *New York State Coll. Hum. Ecol. Cornell Univ. Ithaca, New York 14853, U.S.A.*, no. C, pp. 691–696, 1986.
- [7] C. M. Pelanne, “Heat Flow Principles in Thermal Insulations:,” <http://dx.doi.org/10.1177/109719637700100104>, vol. 1, no. 1, pp. 48–80, Sep. 2016, doi: 10.1177/109719637700100104.
- [8] “INDA.” inda.org.
- [9] S. J. Russell, *Handbook of nonwovens*, vol. 7, no. 1. 2015.
- [10] J. S. Dugan, “CRITICAL FACTORS IN ENGINEERING SEGMENTED BICOMPONENT FIBERS FOR SPECIFIC END USES.”
- [11] “NONWOVEN TECHNOLOGY. For Unconventional fabrics. By Milin Patel & Dhruvkumar Bhrambhatt DTT, BE In Textile Technology M.S. - PDF Free Download.” <https://docplayer.net/20892391-Nonwoven-technology-for-unconventional-fabrics-by-milin-patel-dhruvkumar-bhrambhatt-dtt-be-in-textile->

- technology-m-s.html (accessed Aug. 24, 2022).
- [12] “Producer of PU foam and fibre - What is the difference between solid, hollow and hollow conjugated fibres?” <https://www.eurospuma.com/en/news-/learning-zone/what-is-the-difference-between-solid-hollow-and-hollow-conjugated-fibres-/> (accessed Aug. 24, 2022).
- [13] Tiia Plamus, “Modern Textile Materials Textile Fibres,” Tallinn, 2020.
- [14] B. S. Gupta, “Textile fiber morphology, structure and properties in relation to friction,” *Frict. Text. Mater.*, pp. 3–36, Jan. 2008, doi: 10.1533/9781845694722.1.3.
- [15] K. W. Albrecht Wilhelm, Fuchs Hilmar, *Nonwoven fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing processes*. 2003.
- [16] “Nonwovens,” in *Advanced Textile Testing Techniques*, no. July, CRC Press, 2017, p. 340.
- [17] L. H. Bell and D. H. Bell, *Industrial Noise Control Fundamentals and Applications*, 2nd ed., vol. 1999, no. December. Marcel Dekker Inc., 2006.
- [18] I. . K. A. Jayaraman (Fiber Innovation Technology, “Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens,” North Carolina State University, 2005.
- [19] V. Mohan, “Acoustical Properties of Winged Fibers,” North Carolina State University, 2011.
- [20] V. V Nesaragi, C. B. T, and D. Kumar, “Design and noise, vibration, harshness analysis of engine bonnet of the car,” *J. Eng. Res. Appl. www.ijera.com*, vol. 4, no. 7, pp. 5–11, 2014, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: www.ijera.com.
- [21] M. J. Crocker, *Noise and Vibration Control Engineering*. 1971.
- [22] “Dipartimento di Fisica dell’Università di Modena e Reggio Emilia.” http://fisicaondemusica.unimore.it/Livelli_di_pressione_sonora.html.
- [23] M. A. Kuczmarski and J. C. Johnston, “Acoustic Absorption in Porous Materials,” *Nasa/Tm—2011-216995*, no. March, pp. 1–20, 2011, [Online]. Available: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110011143.pdf>.
- [24] M. Vigolo, “Basi di acustica applicata, dispense.” p. 45, 2011.
- [25] C. Zhang *et al.*, “The review of fiber-based sound-absorbing structures,” *Text. Res. J.*, no. 399, p. 004051752210847, 2022, doi: 10.1177/00405175221084736.
- [26] P. Sun and Z. Guo, “Preparation of steel slag porous sound-absorbing material using coal powder as pore former,” *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 36, pp. 67–75,

2015, doi: 10.1016/j.jes.2015.04.010.

- [27] L. Mattevi, “Assorbimento acustico: Metodi di miglioramento delle prestazioni acustiche degli edifici.” [Online]. Available: www.inquinamentoacustico.it.
- [28] “UNI EN ISO 10534-2:2001 Acustica Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell’impedenza acustica in tubi di impedenza Metodo della funzione di trasferimento.” UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, pp. 9–25, 2001.
- [29] J. António, *Acoustic behaviour of fibrous materials*. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [30] P. R. Puranik, R. R. Parmar, and P. P. Rana, “Nonwoven Acoustic Textiles – a Review,” *Int. J. Adv. Res. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 976–6480, 2014.
- [31] IUAV, “Fonoassorbimento : Materiali e sistemi assorbenti, dispense.” .
- [32] L. Cao, Q. Fu, Y. Si, B. Ding, and J. Yu, “Porous materials for sound absorption,” *Compos. Commun.*, vol. 10, no. May, pp. 25–35, 2018, doi: 10.1016/j.coco.2018.05.001.
- [33] T. Yang *et al.*, “Study on the sound absorption behavior of multi-component polyester nonwovens: experimental and numerical methods,” *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 16, pp. 3342–3361, 2019, doi: 10.1177/0040517518811940.
- [34] I. Prasetyo, Gunawan, and D. R. Adhika, “Sound absorption performance of nonwoven fabrics,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1896, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1896/1/012008.
- [35] N. D. Yilmaz, N. B. Powell, P. Banks-Lee, and S. Michielsen, “Multi-fiber needle-punched nonwoven composites: Effects of heat treatment on sound absorption performance,” *J. Ind. Text.*, vol. 43, no. 2, pp. 231–246, 2013, doi: 10.1177/1528083712452899.
- [36] Hoda S. Seddeq, “Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials,” *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 4610–4617, 2009.
- [37] T. Saravana Kumar and M. Ramesh Kumar, “Development of needle punched non-woven fabrics for acoustic application,” *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 8, no. 7, pp. 21–26, 2015.
- [38] Y. Lee and C. Joo, “Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers,” *Autex Res. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 78–84, 2003.
- [39] S. Sengupta, “Sound reduction by needle-punched nonwoven fabrics,” *Indian J.*

- Fibre Text. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 237–242, 2010.
- [40] J. Manning and R. Panneton, “Acoustical model for Shoddy-based fiber sound absorbers,” *Text. Res. J.*, vol. 83, no. 13, pp. 1356–1370, 2013, doi: 10.1177/0040517512470196.
- [41] R. G. Yaghin and K. Khalajmehri, “Effective Parameters, Modeling, and Materials in Sound Absorption: A Review,” *Itast.Ir*, vol. 10, no. 1, pp. 3–21, 2022, [Online]. Available: http://www.itast.ir/article_126734_aff7de42b10343886b0781e31a41cdec.pdf.
- [42] F. Shahani, P. Soltani, and M. Zarrebini, “The analysis of acoustic characteristics and sound absorption coefficient of needle punched nonwoven fabrics,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 9, no. 2, pp. 84–92, 2014, doi: 10.1177/155892501400900210.
- [43] M. Tascan, E. A. Vaughn, K. A. Stevens, and P. J. Brown, “Effects of total surface area and fabric density on the acoustical behavior of traditional,” *J. Text. Inst.*, vol. 102, no. 9, pp. 746–751, 2011, doi: 10.1080/00405000.2010.515731.
- [44] K. O. Ballagh, “Acoustical properties of wool,” *Appl. Acoust.*, vol. 48, no. 2, pp. 101–120, 1996, doi: 10.1016/0003-682X(95)00042-8.
- [45] E. T. DÖNMEZ and E. TURKER, “Thermal and Sound Insulation Performances of Building Panels Produced By Recycling Waste Fibres of Yarn Factories,” *TEKSTİL VeKonfeksiyon*, vol. 32, no. 1, pp. 9–23, 2021, doi: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.941068.
- [46] J. H. L. V IV, *A Heat Transfer Textbook*. Phlogiston Press Cambridge, Massachusetts, USA.
- [47] A. D. K. Adrian Bejan, *Heat Trnsfer Handbook*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
- [48] E. Zandegiacomo, “Appunti di trasmissione del calore,” 2009.
- [49] R. B. B.-W. E. Stewart, *Transport Phenomena*, 2nd ed. .
- [50] F. F. Ling, *Mechanical Engineering Series*. 2006.
- [51] C. M. Pelanne, “HEAT FLOW PRINCIPLES IN THERMAL INSULATIONS,” vol. 1, pp. 48–80, 1977.
- [52] S. C. Lee and G. R. Cunnington, “Conduction and radiation heat transfer in high-porosity fiber thermal insulation,” *J. Thermophys. heat Transf.*, vol. 14, no. 2, pp. 121–136, 2000, doi: 10.2514/2.6508.
- [53] T. Yang *et al.*, “Theoretical and experimental studies on thermal properties of

- polyester nonwoven fibrous material,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 12, 2020, doi: 10.3390/ma13122882.
- [54] A. Berge and P. Å. R. Johansson, “Literature Review of High Performance Thermal Insulation,” 2012.
- [55] A. M. Papadopoulos, “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments,” *Energy Build.*, vol. 37, no. 1, pp. 77–86, 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
- [56] M. S. Al-Homoud, “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
- [57] R. Petkova-Slipets, P. Zlateva, and D. Staneva, “Influence of the polyester non-wovens production type on their thermal and flammability properties,” *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 69, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1186/s44147-022-00107-2.
- [58] P. Kaleeswaran and V. K. Kothari, “Thermal resistance of nonwoven waddings,” *J. Text. Inst.*, vol. 108, no. 10, pp. 1657–1661, 2017, doi: 10.1080/00405000.2016.1275445.
- [59] S. Dr.S.Sundaresan, A.Arunraj, Hemharish K., Nivetha A., “Study of Polyester High Loft Textiles for the Acoustic and Thermal Insulation Applications,” vol. 7, no. 3, 2021.
- [60] R. Arambakam, H. V. Tafreshi, and B. Pourdeyhimi, “Modeling performance of multi-component fibrous insulations against conductive and radiative heat transfer,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 71, pp. 341–348, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.031.
- [61] T. Yang, X. Xiong, R. Mishra, J. Novák, and J. Militký, “Acoustic evaluation of Struto nonwovens and their relationship with thermal properties,” *Text. Res. J.*, vol. 88, no. 4, pp. 426–437, 2018, doi: 10.1177/0040517516681958.
- [62] Thirumurugan V, Sowmia. K, Maheshwaran, K. B, and Tharani T L, “A Study on the Effect of Non Woven Fabric Properties on Thermal Applications ,” *IMPACT Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 29–38, 2020.
- [63] M. Kucukali Ozturk, M. Venkataraman, and R. Mishra, “Influence of structural parameters on thermal performance of polypropylene nonwovens,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 3027–3034, 2018, doi: 10.1002/pat.4423.
- [64] G. J. Morris, “Thermal properties of textile materials,” *J. Text. Inst. Trans.*, vol.

- 44, no. 10, pp. T449–T476, 1953, doi: 10.1080/19447025308662608.
- [65] W. K. Horst Kopnick, Manfred Schmidt, Wilhelm Brugging, Jorn Ruter, “Polyestres,” in *Ullmann’s Encyclopedia of industrial chemistry*, 2000, pp. 618–622.
- [66] S. Contents and P. Class, “Polymer Data Handbook, 2nd ed.,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 44, pp. 16330–16330, 2009, doi: 10.1021/ja907879q.
- [67] H. Sattler and M. Schweizer, “Fibers, 5. Polyester Fibers,” *Ullmann’s Encycl. Ind. Chem.*, 2011, doi: 10.1002/14356007.o10_o01.
- [68] R. Çelen and Y. Ulcay, “Bicomponent Fibers,” *Tekstil ve Muhendis*, vol. 26, no. 114, pp. 177–187, 2019, doi: 10.7216/1300759920192611407.
- [69] Luigi Salmaso (Università degli studi di Padova), “Appunti del corso di Analisi dei Dati e Applicazione ai Processi Industriali.” .
- [70] “ISO 9237:1995 Determination of the permeability of fabrics to air.” .
- [71] Irene Calliari (Università degli studi di Padova), “Appunti del corso di Caratterizzazione dei Materiali.” .
- [72] “Come funziona l’analisi EDX nel microscopio elettronico a scansione(SEM) | Microscopia Elettronica da banco.”
<https://www.microscopiaelettronicaadabanco.it/analisi-edx-nel-microscopio-sem>
(accessed Oct. 12, 2022).
- [73] Università degli studi di Padova, “L’ESEM e le sue applicazioni.”
<https://www.unipd.it/cugas/esem.htm>.
- [74] A. P. Dos Santos Pereira, M. H. P. Da Silva, É. P. Lima, A. Dos Santos Paula, and F. J. Tommasini, “Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste,” *Mater. Res.*, vol. 20, pp. 411–420, 2017, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2017-0734.

Ringraziamenti

Cari lettori, siamo giunti finalmente all'unico capitolo che, è risaputo, probabilmente leggerete. È il traguardo di un mio lungo percorso; come al rientro da un cammino di molti giorni, quando si guardano le fotografie e si ripercorre ogni singola impronta calpestata, non posso che ripensare a tutti gli istanti che hanno caratterizzato la mia formazione.

Ringrazio il professor Modesti e Silvia per avermi preparato alla prova finale. Ringrazio tutta la squadra di O.R.V. e in particolar modo Francesca e l'ufficio di R&D, per la collaborazione nello sviluppare questo lavoro, che è stato per me molto stimolante, e per avermi accolto con fiducia e disponibilità.

Ringrazio i compagni di corso di questi cinque ultimi anni, in particolare Carlotta, assieme abbiamo buttato in spassose chiacchierate i più pesanti primi anni universitari, e Alessandra, Alex, Chiara e Giulio: ci siamo fatti forza a vicenda con l'obbiettivo di goderci del meritato relax in qualche centro termale, mi chiedo se sia giunto il momento.

Ringrazio gli amici di famiglia, dai quali ho imparato l'ironia e la convivialità, e quelli storici dell'AESSE, tra cui Altea, Andrea, e Mattia, con voi ho sviluppato il senso di squadra. Ringrazio Irene e Cecilia, siete per me famiglia, da voi ho ricevuto sempre una spinta valida e un appoggio sicuro. Ringrazio Claudia, soprattutto per esserci stata, subito e senza battere ciglio, in uno dei momenti più difficili per i miei studi. È stato un passaggio importante che mi ha fatto capire quanto siano preziose le vere amicizie. Ringrazio Filippo, per essere diventato un fratello, per affiancarmi nella crescita personale e per la condivisione di indimenticabili esperienze. Ringrazio Aurora, Alessio, Alejandro, Daniele, Emma, Filippo R. e chi altro sia stato parte di una mia Compagnia.

Vorrei poi ringraziare tutti gli altri amici, uno per uno, perché non importa quanto abbiamo condiviso, ciascuno di voi mi ha donato qualcosa. È successo anche senza conoscermi bene, e per questo vi sono più che grato.

I would thank also who was part of my exchange semester in Tallinn. Especially Elijah, Ostap, Michael, Matteo and the TalTech volleyball team (only for 8 a.m. volleyball sessions). I had spent unforgettable moments with you.

A cugini, zii, Luisa e affini, ci siete sempre e vorrei ringraziarvi di cuore per questo, non è per me condizione scontata.

Ai miei cari nonni, che insegnano sempre tanto, anche attraverso i ricordi.

Un ringraziamento doveroso ai miei fratelli per i quali c'è poco da dire, non sarei ciò che sono se non fossi cresciuto con voi.

Il ringraziamento più grande e sentito va però ai miei genitori, a voi dedico la conclusione di questo mio lungo percorso. Sempre presenti, mi avete sostenuto e incoraggiato, non solo nello studio ma in quanto potesse essere per me fonte di vita.

Vorrei terminare con un racconto che è parte della mia memoria, un ricordo a me caro che mi si ripresenta spesso, come durante la stesura di questa conclusione.

È una giornata di sole, nonno Alfredo mi controlla mentre poto l'Alberello, è così che chiamiamo affettuosamente il Bosso che cresce dove abitava.

Sforbiciata dopo sforbiciata la forma della sua piccola chioma si definisce, la mano si fa affaticata ma il lavoro è quasi ultimato. Ultimi tagli, mi volto verso il mio supervisore in cerca di assenso. Lui guarda la pianta con aria attenta, poi mi chiede di seguirlo. Così mi insegna ad indietreggiare di qualche passo e ad osservare quanto ho creato con le mie fatiche e a identificare i punti della chioma che non sono adeguati alla sua consueta forma sferica.

Una posizione ravvicinata non consentirebbe tutto questo.

Torno dal Bosso per darci qualche altra sforbiciata.

Ritorno da mio nonno rimasto in attesa.

Entrambi fissiamo l'Alberello, sempre alla giusta distanza.

“Ora è perfetto”, lui esclama.

Si, aveva proprio ragione, e io ne ero pienamente soddisfatto.

