POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Architettura
per il Progetto Sostenibile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

TECA panel

Textile Experimental Composite Acoustic

Analisi, progetto e sviluppo di pannelli fonoassorbenti
per l'ambiente interno a base di scarti tessili

RELATORE:
Arianna Astolfi

CORRELATORI:
Louena Shtrepi
Elena Piera Montacchini

CANDIDATO:
Giacomo Targa

A.A. 2018 - 2019

TOPIC

EXPERIENCE

INDICE 2

INTRODUZIONE 6

1. LO STATO ATTUALE DELL'INDUSTRIA TESSILE 9

1.1 Il settore tessile in Italia 11

1.2 L'economia circolare come prospettiva futura 13

1.3 Le tipologie di scarto tessile 19

1.4 L'industria tessile nel territorio biellese 23

2. L'ACUSTICA DELL'AMBIENTE INTERNO 27

2.1 Nozioni di acustica 29

2.2 Il fonoassorbimento 32

2.3 I materiali porosi e le loro caratteristiche 37

2.4 La lana e le sue proprietà acustiche 43

3. STATO DELL'ARTE: ESPERIENZE E SPERIMENTAZIONI PREGRESSE 47

3.1 Valutazione ed analisi di specifici casi studio 51

3.2 Considerazioni: punti critici e punti di forza dei casi studio esaminati 57

4. LA MATERIA PRIMA: ORIGINI, PRODUZIONE E FORNITURA DEGLI SCARTI INDUSTRIALI 59

4.1 Lanificio Successori Reda 1865 61

4.1.1 Il ciclo produttivo del Lanificio Reda 62

4.1.2 Gli scarti industriali del Lanificio Reda 66

4.2 Feltrificio Biellese 68

4.2.1 Il ciclo produttivo del Feltrificio Biellese 69

4.2.2 Gli scarti industriali del Feltrificio Biellese 72

4.3 Fibre corte e polveri di scarto: da problema a opportunità 73

5. I MATERIALI LEGANTI 75

5.1 La ricerca della matrice rigida 77

5.2 Verniciatura industriale Sassone 84

5.2.1 Il ciclo produttivo della Verniciatura Sassone 84

5.2.2 Lo scarto industriale della Verniciatura Sassone: le polveri polimeriche 87

6. SPERIMENTAZIONE A: PROGETTO E SVILUPPO DI PRODOTTI FONOASSORBENTI PER LA REALIZZAZIONE DI PANNELLI RIGIDI 89

6.1 Input e output progettuali: i principi guida e le aspettative della sperimentazione 91

6.2 Mix design: la composizione dei provini 93

6.2.1 Metodi meccanici per la formazione a secco dei campioni 95

6.2.1.1 Pressatura 95

6.2.1.2 Agugliatura 96

TECA PANEL

6.2.1.3 Feltratura 98
6.2.1.4 Lo scarto come imbottitura: realizzazione di cuscini 99
6.2.2 Campioni Serie A: fibre e polveri + polimeri 100
6.2.3 Campioni Serie B: fibre e polveri + colla di amido di mais 109
6.2.4 Campioni Serie C: fibre e polveri + colla di amido di riso 114
6.2.5 Campioni Serie D: fibre e polveri + fibre di poliestere 117
6.2.6 Campioni Serie E: fibre e polveri + PLA 118
6.2.7 Campioni Serie F: fibre e polveri + colla “Coccoina” 121
6.2.8 Campioni Serie G: fibre e polveri + colla di coniglio “Liberon” 122
6.2.9 Campioni Serie H: fibre e polveri + colla di pesce 125
6.2.10 Campioni Serie I: fibre e polveri + colla d’ossa “Zeus” 128
6.2.11 Campioni Serie L: fibre e polveri + colla idrorepellente 131
6.2.12 Campioni Serie M: fibre e polveri + colla naturale “Creartec” 133
6.2.13 Campioni Serie N: fibre e polveri + gesso scagliola 135
6.3 Risultati e conclusioni della sperimentazione A 136
7. VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE ACUSTICHE: LA RESISTIVITÀ AL FLUSSO 143
7.1 Calcolo della resistività al flusso 145
7.1.1 Caratteristiche dello strumento di misura della resistività al flusso (INRiM) 146
7.1.2 Misura della resistività al flusso sui campioni e acquisizione dei dati 148
7.1.3 Risultati della misura della resistività al flusso 153
7.2 Caratterizzazione acustica in funzione della resistività al flusso 162
7.2.1 Coefficienti di assorbimento acustico dei campioni analizzati 163
7.2.2 Coefficienti di assorbimento acustico in funzione dell’altezza dei campioni 169
7.2.3 Coefficienti di assorbimento acustico in funzione della densità del mix design 176
7.3 Dalla funzione alla ricetta: definizione del mix design in funzione della densità 186
7.4 Conclusioni e osservazioni sui risultati ottenuti 190
8. SPERIMENTAZIONE B: PROGETTO E SVILUPPO DI PANNELLI RIGIDI FONOASSORBENTI 195
8.1 L’evoluzione: scelta del mix design e introduzione delle nuove variabili di progetto 197
8.1.1 TECA panel Serie S: fibre e polveri + colla di amido 204
8.1.2 TECA panel Serie P: fibre e polveri + polimeri 210
8.2 Risultati e conclusioni della sperimentazione B 216
9. MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN CAMERA RIVERBERANTE IN SCALA 221
9.1 Introduzione sul calcolo del coefficiente di assorbimento 223
9.2 La camera riverberante in scala del Politecnico di Torino (DENERG) 225

TECA PANEL

9.3 La misura del coefficiente di assorbimento acustico 228
9.4 La misura del coefficiente di assorbimento acustico di TECA panel in camera riverberante 231
9.5 Risultati e comparazioni dei dati ottenuti dalla misura del coefficiente di assorbimento 237
9.6 Conclusioni e osservazioni dei risultati ottenuti dalla misura in camera riverberante 252
10. FILIERA DEL PRODOTTO: IPOTESI DI SVILUPPO 255
10.1 Premesse sullo sviluppo della filiera produttiva 257
10.2 Filiera produttiva Serie S: fibre e polveri + colla di amido 258
10.3 Filiera produttiva Serie P: fibre e polveri + polimeri 261
11. QUANTO COSTA TECA PANEL? 265
11.1 Premesse: analisi qualitativa sui possibili vantaggi economici di TECA panel 267
11.2 Comparazione fra categorie di mercato e tipologie di pannelli fonoassorbenti 268
11.3 Valutazione economica: costi relativi ad ipotetici scenari di mercato 273
12. ANALISI DELLE CARATTERISTICHE TECNICHE E VERIFICA DI POSA IN OPERA 287
12.1 Test di resistenza alla compressione di TECA panel 289
12.1.1 Misura e risultati dei test di resistenza a compressione 289
12.1.2 Conclusioni e comparazioni dei risultati ottenuti dal test di compressione 297
12.2 Verifica del fissaggio meccanico dei pannelli 298
12.3 Valutazione della reazione alla fiamma di TECA panel 302
12.3.1 Misura e risultati delle caratteristiche di resistenza al fuoco 302
12.3.2 Valutazioni e comparazioni finali dei risultati ottenuti dal test alla fiamma 310
13. POTENZIALITÀ FUTURE E MOLTEPLICITÀ DI SVILUPPO DEL PRODOTTO 313
13.1 Design di TECA panel: soluzioni, esempi e suggestioni 315
13.2 La flessibilità di sviluppo del materiale 322
13.3 Analisi e certificazioni di qualità del prodotto 324
14. CONCLUSIONI 327
ALLEGATI 335
BIBLIOGRAFIA 383

INTRODUZIONE

Questa ricerca nasce con l'intenzione di analizzare, progettare e sviluppare un prodotto fonoassorbente per l'ambiente interno attraverso l'utilizzo di scarti tessili.

La direttiva 2010/31/UE stabilisce i termini per i quali mantenere, entro il 2020, l'aumento della temperatura globale al di sotto dei 2° e ridurre le emissioni di gas a effetto serra fra il 20 e il 30%, rispetto ai livelli di riferimento del 1990. Inoltre definisce delle norme affinché entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici vengano progettati e costruiti come "edifici a energia quasi zero" per limitare l'impiego di risorse e il forte impatto che essi hanno sull'ambiente. Secondo i dati stimati dall' United Nations Environment Programme (UNEP), gli edifici consumano circa il 40% dell'energia mondiale, il 25% dell'acqua globale, il 40% del totale delle risorse e contribuiscono a circa un terzo delle emissioni dei gas responsabili dell'effetto serra.

E' evidente come la nascita di nuovi materiali abbia influito e portato a soluzioni sempre più innovative, che soprattutto negli ultimi tempi mirano ad integrare perfettamente il significato più profondo di sostenibilità e ad inserirsi nell'ottica della circular economy. In particolare se si osserva il settore del tessile, esso è caratterizzato a livello europeo da un'importante percentuale di scarti che vengono smaltiti in discarica. Secondo i dati forniti dal Ministero dell'ambiente, in Europa l'80% dei rifiuti tessili viene smaltito o incenerito, mentre il restante 20% viene riciclato e di questi ultimi solo l'8% riutilizzato.

L'attenzione sarà rivolta alle aziende del territorio biellese, e ai relativi scarti post-industriali; in particolare a una tipologia di rifiuto che attualmente viene smaltita in discarica poiché non esistono valide alternative di gestione e impiego, a differenza di altre tipologie di scarti per le quali il concetto di riciclo è ampiamente diffuso e applicato. Si fa riferimento agli scarti di polveri e fibre corte, che in questo progetto verranno fornite dal Lanificio Successori Reda 1865 e dal Feltrificio biellese, due realtà virtuose pronte ad appoggiare questa causa. Tali scarti sono composti da lana, materiale di originale animale, storicamente diffuso anche per le sue proprietà acustiche, dovute alla particolare conformazione delle fibre.

Negli ultimi anni, la richiesta di migliorare il comfort acustico dello spazio interno è un trend in forte crescita, sia nel campo pubblico che in quello privato, e può essere soddisfatta attraverso la manipolazione dell'ambiente, con lo scopo di migliorare il benessere abitativo o l'esperienza derivante in funzione della destinazione d'uso.

L'obiettivo del progetto è dunque concretizzare in TECA panel questi principi, al fine di progettare e sviluppare un prodotto fonoassorbente per l'ambiente indoor composto da scarti tessili, quindi riciclato, biodegradabile, sostenibile, di origine naturale e allo stesso tempo economicamente vantaggioso. E' possibile considerare questa sperimentazione, come la prima nel suo genere differenziandosi significativamente dalle esperienze simili e dai prodotti attualmente presenti sul mercato.

Sostanziale, in questo passaggio, è stato lo studio approfondito e la ricerca condotta su prodotti ed esperienze simili per assorbire un bagaglio di conoscenza che consentisse di delineare un percorso da cui prendesse il via la sperimentazione.

Si sottolineano le difficoltà riscontrate nell'individuazione di un legante e nella progettazione di un mix-design in grado di rispondere a determinati principi presi in considerazione (densità, omogeneità, rigidità ecc.), che consentisse di procedere successivamente con la composizione concreta dei provini e dei pannelli funzionali, generando processi definiti e "ricette" in grado di considerare tutte le variabili compositive emerse durante lo sviluppo sperimentale.

Fondamentali per questo progetto saranno le misure di resistività al flusso effettuate presso l'INRiM di Torino, con le successive elaborazioni, che hanno consentito una prima valutazione acustica dei prototipi in fase di proof of concept e hanno permesso così di individuare la tipologia di campione che meglio rispondesse alle caratteristiche richieste per poterla perfezionare e sviluppare. Non meno importanti saranno le misure acustiche effettuate in camera riverberante, presso il Politecnico di Torino (DENERG) per autenticare le performance acustiche di TECA panel secondo la norma vigente e valutare le relative combinazioni e configurazioni possibili.

Verranno infine analizzate e misurate le caratteristiche tecniche del prodotto, quali la resistenza a compressione, il fissaggio meccanico e la reazione al fuoco. Inoltre saranno valutate le potenzialità future e la fattibilità di TECA panel, attraverso la valutazione economica, lo studio della filiera produttiva e del design che il prodotto potrebbe assumere in un eventuale sviluppo futuro.

1

LO STATO ATTUALE DELL'INDUSTRIA TESSILE

- ASSOSISTEMA Servizi S.r.l, *Studio di settore sul fine vita dei prodotti tessili*, Ambienteitalia, 2015, pp. 1-48.
- Circular Economy Network, *Rapporto sull'economia circolare in Italia – 2019*, ENEA, 2019, pp. 77-118.
- Dansero E. , Caldera G. , *Green economy e tessile: chi passa per la cruna dell'ago*, Università degli studi di Torino, 2012, pp. 9-66.
- Fiorina S. , Tesi di laurea magistrale, *ReCashplaster Recycled Cashmere for plaster*, Politecnico di Torino, 2018, pp. 2-46.
- Maggiolini M. A., *Il distretto tessile biellese – L'eccellenza sfida la crisi*, Quaderni fondazione Milano, 2018-2019, pp 9-205.
- Ronchi E. , *Le sfide della circular economy, Fondazione per lo sviluppo sostenibile*, 2018, pp. 1-37.
- Tartaglione C. *et. al*, *Il "Fine Vita" dei prodotti nel sistema moda*, Fondoimpresa, 2013, pp. 6-53.

- https://www.prometeia.it/atlante/tessile-italiano-a-10-anni-crisi, consultato il 23/07/2019.
- https://www.icribis.com/it/osservatorio-imprese/tessile-Italia, consultato il 23/07/2019.
- http://dati.istat.it/Index.aspx, consultato il 23/07/2019.
- https://www.milomb.camcom.it/la-rivista-impresa-e-stato-indice-n.-72/2005-il-tessile-abbigliamento-moda-nel-mondo, consultato il 23/07/2019.
- http://www.ytongplanet.it/yblog/da-uneconomia-lineare-ad-uneconomia-circolare/, consultato il 23/07/2019.
- http://unicircular.org/index.php/unicircular/settori/conau, consultato il 23/07/2019.
- https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10205dl.htm, consultato il 26/07/2019.
- https://www.catasto-rifiuti.isprambiente.it/index.php?pg=rs, consultato il 26/07/2019.
- http://www.aerecologia.it/cer_rifiuti.htm#cer4, consultato il 30/07/2019.
- https://artsandculture.google.com/exhibit/il-tessile-biellese/gQHHvQ4V?hl=it, consultato il 30/07/2019.
- https://www.informazione-aziende.it/, consultato il 30/07/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

1.1 IL SETTORE TESSILE IN ITALIA

Il settore tessile in Italia occupa da sempre un ruolo fondamentale nella filiera dell'abbigliamento/moda e nel manifatturiero nazionale: infatti, per mezzo del suo marchio e della sua etichetta "made in italy", è divenuto sinonimo di alto standard qualitativo, design dei prodotti e di una specializzazione fortemente radicata nel territorio, e allo stesso tempo espressione di artigianalità, ingegno e manualità, elevandosi alla massima eccellenza europea e mondiale. Il ruolo del settore tessile risulta quindi strategico, con un peso del 7,9% delle industrie manufatturiere nel nostro Paese. A mantenere viva questa realtà risultano in attività circa 13.400 imprese, con un fatturato di poco superiore ai 20 miliardi di euro [1]. Numeri importanti ma sensibilmente inferiori rispetto a quelli del periodo precrisi, infatti si calcolavano 4.500 imprese e un fatturato di oltre 4 miliardi in più rispetto al 2007 [2]. Questo processo non è stato altro che l'evoluzione di problemi esistenti già a partire dalla fine degli anni 90', ove il baricentro industriale, non solo relativo al campo tessile, stava spostando il proprio interesse e la produzione verso paesi a basso costo. Tale migrazione ha penalizzato soprattutto le piccole/medie realtà, in particolare i contoterzisti, con pressioni competitive sempre maggiori. Dalla parte opposta troviamo invece le grandi realtà tessili, che hanno risposto alla crisi e al cambiamento variando la tipologia dell'offerta, puntando sulla qualità anziché la quantità, grazie a importanti investimenti sullo sviluppo e sull'innovazione dei processi e dei relativi prodotti. In questi ultimi anni si sta sviluppando un ulteriore evoluzione, quella dell'e-textile, per via dell'avvento delle tecnologie 4.0. Si tratta di tessuti intelligenti, in grado di integrare tecnologie innovative, di reagire agli stimoli, ai cambiamenti interni ed esterni, prodotti in stretta relazione con i nanomateriali che possono aprire nuove strade in diversi ambiti, anche non strettamente collegati alla moda.

Attualmente l'industria tessile italiana può "contare su una struttura produttiva più solida, fortemente internazionalizzata (46% la quota di export sul fatturato) e caratterizzata dalla presenza di un solido nucleo di imprese leader, in prima linea sul fronte dell'innovazione tecnologica" [3], con una distribuzione sul territorio spostata verso nord e centro Italia, come emerge dalla figura 1. In particolare la manifattura tessile può contare su 1548 filature e preparazione di fibre, 1847

1_Fonte ISTAT, dati 2016-2017: http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_ASIAUE1P#, consultato il 23/07/2019.

2_Fonte ISTAT, dati 2007: http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_ASIAUE1P#, consultato il 23/07/2019

3_https://www.prometeia.it/atlante/tessile-italiano-a-10-anni-crisi, consultato il 23/07/2019.

tessiture, 2063 finissaggi, 8350 di altre industrie ad esse collegate di cui: 751 fabbricazione di tessuti a maglia, 4482 confezionamento articoli tessili (no abbigliamento), 115 fabbricazione di tessuti e moquette, 149 fabbricazione di spago, corde, funi e reti, 224 fabbricazione di articoli tessili tecnici e industriali e 1197 fabbricazione di altri prodotti tessili [4] (figura 2).

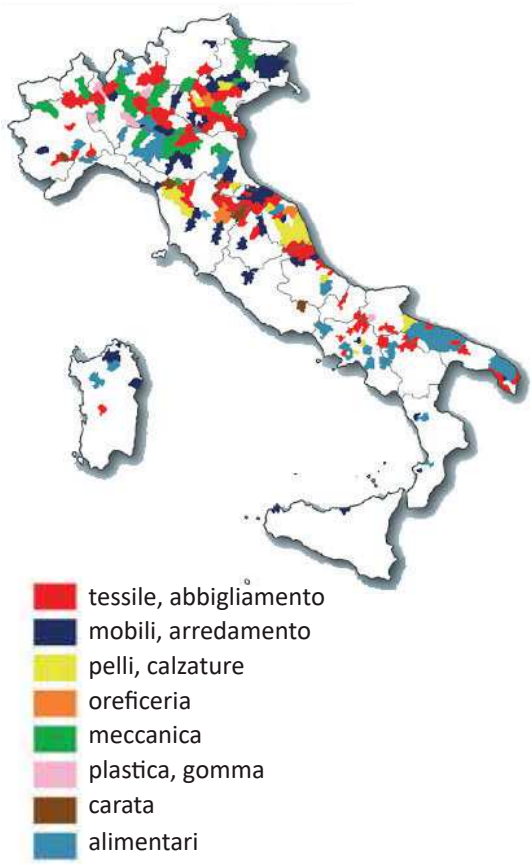
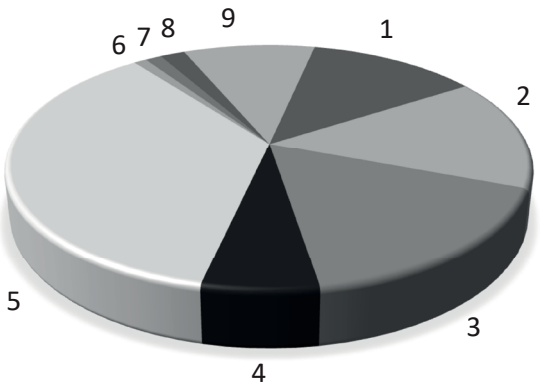


Figura 1: Distribuzione industrie manifatturiere, https://blog.makersvalley.net/produttori/litalia-dei-distretti-tessili.



1_filature e preparazione di fibre
2_tessiture
3_finissaggi
4_fabbricazione di tessuti a maglia
5_confezionamento articoli tessili (no abbigliamento)
6_fabbricazione di tessuti e moquette
7_fabbricazione di spago, corde, funi
8_fabbricazione di articoli tessili tecnici e industriali
9_fabbricazione di altri prodotti tessili

Figura 2 : Manifatturiera tessile in Italia, elaborazione dati ISTAT, 2016-2017.

4_ Fonte ISTAT, dati 2016-2017: http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DICA_ASIAUE1P#, consultato il 23/07/2019.

5_Distretti industriali: un'agglomerazione di imprese, in generale di piccola e media dimensione, ubicate in un ambito territoriale circoscritto e storicamente determinato (https://www.dadamoney.com/economia-distretti-industriali/).

Per via della particolare storia industriale del nostro paese, queste realtà sono organizzate sul territorio sotto forma di distretti industriali [5]. Como, nella produzione di filati di seta, Biella, Prato e Vicenza nei tessuti di lana, Pesaro per i jeans, Carpi e Treviso nella maglieria, Empoli nell'abbigliamento in pelle, Brenta per le calzature. Inoltre in diverse zone d'Italia sono presenti svariati centri di elaborazione creativa, fondamentali per l'innovazione, lo sviluppo e la sperimentazione. Questi conservano uno stretto rapporto con l'operato delle aziende, definendo la "rete creativa", che insieme alla capacità dei distretti di coordinare le piccole/medie realtà specializzate (non in grado di essere competitive in modo autonomo), porta alla nascita di una sinergia e una dimensione in grado di competere a livello mondiale, generando quel "bello e ben fatto" che rappresenta l'impronta distintiva del tessile, dell'abbigliamento e della moda "made in Italy".

1.2 L'ECONOMIA CIRCOLARE COME PROSPETTIVA FUTURA

La definizione di green economy a cui viene fatto riferimento, è quella fornita dall'UNEP[6]: "green Economy can be defined as one that results in improved human well-being and social equity, while significantly reducing environmental risks and ecological scarcities. A Green Economy is characterized by substantially increased investments in economic sectors that build on and enhance the earth's natural capital or reduce ecological scarcities and environmental risks. These sectors include renewable energy, low-carbon transport, energy-efficient buildings, clean technologies, improved waste management, improved freshwater provision, sustainable agriculture, forestry, and fisheries. These investments are driven by, or supported by, national policy reforms and the development of international policy and market infrastructure" [7].

Come tutti i comparti produttivi anche l'industria tessile, in tutte le sue diverse sfumature, è portata a confrontarsi sempre più con il concetto di green economy e di circular economy, superando così il modello di economia lineare. Quest'ultima è caratterizzata da un andamento, come suggerisce il termine stesso, lineare, dritto, definito da un inizio e una fine. Essa è basata sulle fasi di estra-

6_UNEP: United Nations Environment Programme
7_UNEP report, 2010, p. 5.

Figura 3: Economia lineare e circolare, Ronchi E., 2018, op. cit.

zione delle materie prime, progettazione, fabbricazione, distribuzione, consumo, uso, riutilizzo, riparazione, così che al termine del ciclo di vita il prodotto possa essere considerato un rifiuto e smaltito in discarica. Questo sistema inefficiente e costoso, diviene una tra le principali cause di inquinamento e di consumo delle materie prime del pianeta. L'evoluzione di questo principio, in grado di unire gli aspetti di sviluppo economico, di tutela ambientale e di sostenibilità, è definito nell'economia circolare. Questo modello prevede che alla fine della vita utile il prodotto possa essere recuperato e valorizzato, trasformandosi in materia prima seconda e potendo quindi essere riammesso nel ciclo economico, come illustrato nella figura 3.

Nell'ambito del tessile risulta fondamentale fare una distinzione, poiché non è sufficiente identificare il fine vita di un prodotto per considerarne il recupero e la valorizzazione. Infatti possiamo distinguere due macrocategorie: con il termine riuso si fa riferimento al riutilizzo del prodotto in altre realtà, con altre esigenze e in nuovi mercati; mentre con il termine riciclo si intende un processo in cui a seguito di trasformazioni, la materia prima secondaria viene reinserita in un nuovo ciclo produttivo. Inoltre risulta opportuno dividere quelli che sono i rifiuti post-industriali e i

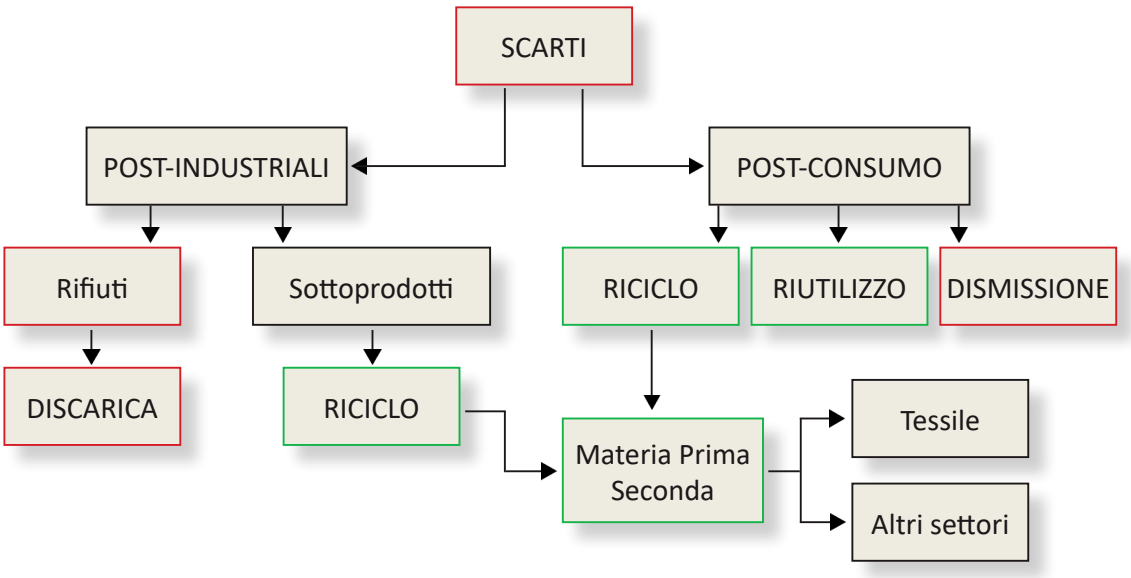


Figura 4: Tipologie di scarti tessili.

rifiuti post-consumo. I rifiuti post-industriali (categorizzati tramite il CER Catalogo Europeo del Rifiuto) derivano dai processi e dalle lavorazioni delle industrie tessili e possono essere riciclati, quindi venduti come sottoprodotti oppure smaltiti in discarica. I rifiuti post-consumo invece, fanno riferimento a prodotti come capi d'abbigliamento, tendaggi, lenzuola, che al termine della loro vita utile possono essere riutilizzati, generalmente in circuiti di beneficenza, oppure riciclati in nuovi processi di valorizzazione, come illustrato nella figura 4.

Il fulcro dell'economia circolare in questo campo consiste quindi nel riciclo e nel riuso (figura 5) di tutti gli scarti e dei prodotti tessili a fine vita, i quali verranno analizzati nel dettaglio nel paragrafo successivo. Ma quali sono i vantaggi derivanti da questo modello? Innanzitutto deve essere chiarito e sottolineato che riciclare non è sempre sinonimo di sostenibilità. Sebbene vi siano indubbiamente dei benefici, in alcuni processi di riciclo la sostenibilità economica, sociale e ambientale non viene rispettata nel suo profondo, a causa per esempio di schemi energivori o altamente inquinanti. Tuttavia, in particolare negli ultimi dieci anni, la sensibilità verso questo tema da parte della società, dei soggetti, dei consumatori e delle aziende è in forte crescita e sta conducendo verso importanti e vantaggiose conquiste:

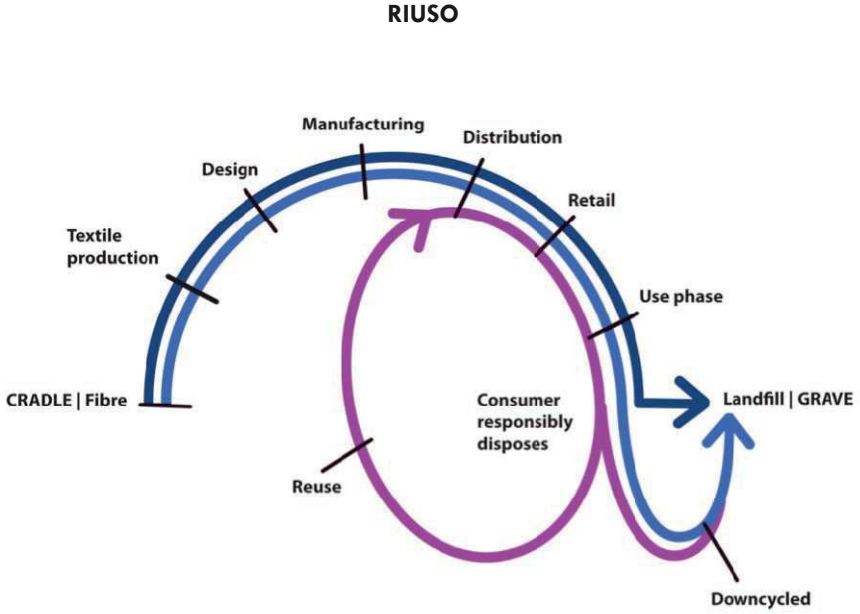


Figura 5: Riuso, Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit.

"- la riduzione del conferimento in discarica, che produce effetti benefici all'ambiente;
- il minore depauperamento delle risorse naturali vergini;
- la riduzione dell'inquinamento atmosferico e risparmio di energia dal momento in cui le fibre, a seguito di riciclo, risultano reperibili localmente, e quindi non devono essere trasportate da siti o Paesi esteri;
- il contenimento dello spreco di risorse idriche, che sarebbero necessarie, in grandi quantità, per lavare materie prime come, per esempio, la lana grezza;
- la riduzione dell'impiego di sostanze chimiche potenzialmente pericolose, come coloranti e agenti di fissaggio;
- il risparmio economico, dal momento in cui si acquistano meno prodotti e materiali per le proprie esigenze." [8]

Per valutare queste informazioni e in particolare per misurare l'impatto ambientale di un prodotto durante tutto il ciclo di vita, si fa riferimento a uno strumento fondamentale, l' LCA, ovvero Life Cycle Assessment. Per mezzo di questa analisi è possibile studiare ogni aspetto e ogni componente di un pro-

8_Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit.

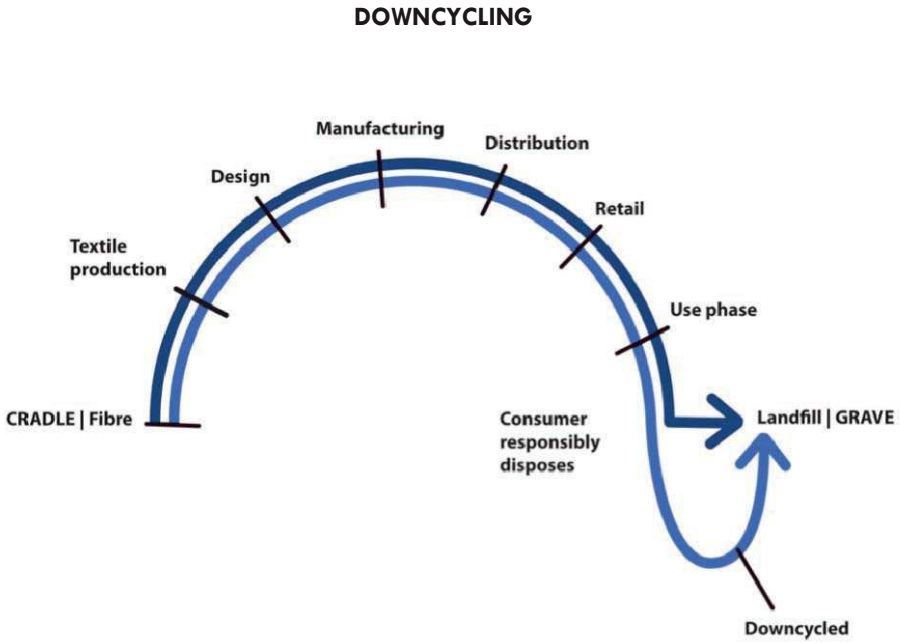


Figura 6: Downcycling, Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit.

dotto, raccogliendo dati relativi alle risorse utilizzate, input, valutare le immissioni, output, e di conseguenza valutare e calcolare l'impatto ambientale, al fine di risolvere le problematiche e ridefinire i processi più impattanti sotto un'ottica sostenibile, migliorando quindi e assistendo lo sviluppo di una nuova applicazione. Si basa su quattro fasi: definizione degli obiettivi e campo di applicazione, inventario, valutazione degli impatti, interpretazione dei risultati.

Si possono infine introdurre i concetti di downcycling, upcycling e Cradle-to-Cradle. Il nuovo prodotto, derivante dal riciclo, dalla lavorazione e dalla trasformazione di scarti o di sottoprodotti, può avere una qualità, un valore o caratteristiche fisico chimiche minori rispetto al prodotto di partenza, in questo caso si parla di downcycling (figura 6). Questo concetto è particolarmente significativo nel campo tessile, soprattutto se il nuovo prodotto, è della stessa tipologia rispetto a quella precedente; i successivi cicli porteranno ad abbassarne nuovamente la qualità, fino a quando esso non potrà essere più riciclato, conferendolo in discarica. Diversamente, con il termine upcycling (figura 7), si intende un processo di riciclo per il quale il prodotto

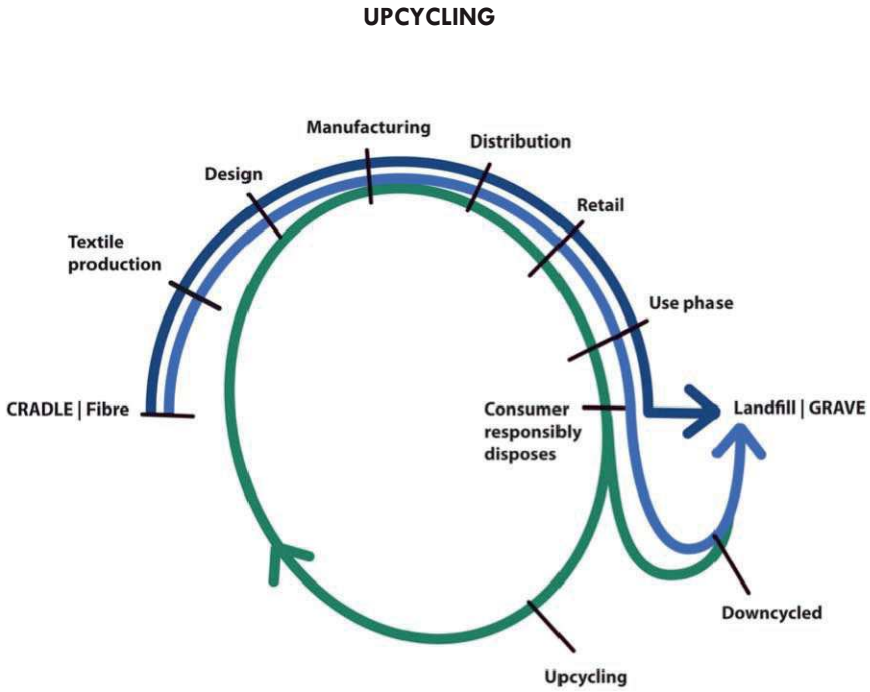


Figura 7: Upcycling, Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit.

avrà un valore uguale o maggiore rispetto a quello iniziale. Esso è rilevante ai fini di questa tesi, poiché il riciclo porta a coinvolgere altre realtà e altri processi diversi da quello iniziale, i cui prodotti appartengono ad altri settori, come quello dell'automotive, dell'arredamento, o delle pannellature isolanti e fonoassorbenti, generando indubbi vantaggi ambientali e considerevoli giri d'affari per le aziende coinvolte, con relative possibilità di riciclo quasi illimitate e attualmente non ancora sfruttate.

All'interno della circular economy, il modello Cradle-to-Cradle [9], dalla culla alla culla, suggerisce l'evolversi del riciclo, riportando alla natura ciò che è stato "prelevato" in termini di materie prime, superando dunque il concetto "dalla culla alla tomba". "Il principio è che l'industria deve preservare e valorizzare gli ecosistemi e i cicli biologici della natura, pur mantenendo i cicli produttivi, in una sor-

9_elaborata nel 2002 da William McDonough e Michael Braungart nella loro pubblicazione "Dalla culla alla culla: come conciliare tutela dell'ambiente, equità sociale e sviluppo".

ta di metabolismo tecnologico, secondo il quale tutti gli altri materiali post-utilizzo devono ritornare all'industria per essere reimpiegati nei processi produttivi" [10] generando quindi un processo ad anello chiuso, che nel caso specifico della moda nasce dalla fibra e torna alla fibra.

10_Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit..

1.3 LE TIPOLOGIE DI SCARTO TESSILE

Questo paragrafo risulta strettamente correlato a quello precedente, andando ad approfondire l'elemento chiave che sta alla base del riciclo: il rifiuto tessile. Sempre nel paragrafo precedente sono state presentate le macrocategorie di scarto e le diverse possibilità di riciclo o di riuso. Verrà posta l'attenzione sulla categoria di rifiuti post-industriali, elencati nella figura 8, i quali possono essere riciclati e valorizzati oppure devono essere smaltiti in discarica. Ma in cosa consistono questi rifiuti?

Per trovare risposta a tale domanda bisogna definire il termine rifiuto e il termine sottoprodotto secondo il nostro ordinamento.
Per rifiuto si intende "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi" [11]. La normativa prevede che ad ogni rifiuto debba corrispondere un codice europeo dei rifiuti, il CER. Il codice generico corrispondente ai rifiuti tessili è il numero 040000: rifiuti della lavorazione di pelli e pellicce e dell'industria tessile. In particolare il codice 040200 indica nel dettaglio i rifiuti dell'industria tessile, ma per scarti più specifici vengono utilizzati il codice CER 040221 per i rifiuti da fibre tessili grezze e il codice CER 040222 per rifiuti da

11_ Articolo 183 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152, https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10205dl.htm, consultato il 26/07/2019.

	Scarti Primari	Scarti secondari
Manifattura Tessile	Residui di produzione Scarti di cucitura Estremità laterali delle bobine Tessuti eliminati Panni e stoffe modello Fibre e filati Tessuti danneggiati Rifiuti chimici e da tintura	Rocche Coni Pallet Contenitori e bidoni di coloranti, tinte e sostanze chimiche Involucri di plastica Cartoni ondulati Rifiuti di carta Risorse energetiche (intangibile)
Manifattura Abbigliamento	Tessuti/Residui Filati per cucire (cucirini) Passamanerie Modelli Ritagli e frammenti	Rocche Coni Pallet Imballaggi per spedizione Rifiuti di carta Sacchi e borse Involucri di plastica

Figura 8: Rifiuti post-industriuali, Tartaglione C. *et. al, 2013, op. cit.*

fibre tessili grezze.

Il termine sottoprodotto viene invece definito come: " è sottoprodotto, e non un rifiuto ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;

b) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;

c) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;

d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana" [12].

12_https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10205dl.htm, consultato il 26/07/2019.

Blocchi produttivi	*Forme d'inquinamento*					
	Emissioni gassose	*Acque reflue*	*Rifiuti solidi*	*Rumore*	*Polveri e odore*	*Micro-clima*
Preparazione fibre:						
– cotone			x		x	
– lana, lino, seta		x	x			x
Preparazione nastro		x			x	
Preparazione filo	X			x	x	
Preparazione tessuto		x		x		x
Nobilitazione:						
– candeggio		x	x		x	x
– tintura		x	x			x
– stampa	X	x	x		x	x
– finitura	X		x		x	
Confezionamento			x		x	

Figura 9: Impatti ambientali della produzione tessile, Dansero E., 2012, op. cit.

La suddivisione dei significati dei due prodotti porta a comprendere il forte vantaggio che avrebbe un'azienda tessile nel vendere i propri scarti come sottoprodotti, in modo che possano essere riutilizzati in altre filiere di valorizzazione. Questo conduce, oltre a un vantaggio a livello di sostenibilità ed etico, a un'opportunità economica non indifferente. Questi scarti (sottoprodotti) derivano principalmente dalle operazioni di filatura, tessitura, tintoria e finissaggio, tra cui troviamo cascami, ritagli, cimosse e fibre lunghe, derivanti dalla lavorazione di materie prime naturali, sintetiche o artificiali. I sottoprodotti generalmente, vengono processati presso altri stabilimenti al fine di creare una materia prima seconda che possa essere reimmessa nell'economia tessile. Un'altra parte invece andrà a subire processi che porteranno alla creazione di prodotti appartenenti ad altre categorie.

Il percorso opposto sarebbe quello di smal-

Prodotto	Estrazione e produzione non inquinante	Fatto di risorse rinnovabili	Completamente biodegradabile	Riutilizzabile/Riciclabile
Cotone	No	Si	Si	Si
Lana	No	Si	Si	Si
Rayon	No	No	Si	Si
Lyocell	No	Si	Si	Si
Nylon	No	No	No	Si
Poliestere	No	No	No	Si

Figura 10: Analisi ambientale delle fibre tessili, Tartaglione C. et. al, 2013, op. cit.

tire questi prodotti come rifiuti in discarica, con costi per l'azienda, il non rispetto dell'economia circolare e conseguenti ripercussioni sull'ambiente, dirette e indirette. Tuttavia nonostante lo sviluppo tecnologico e l'obiettivo delle aziende nel riciclare interamente i propri scarti, una parte di essi, per loro natura, non può essere riciclata e deve essere smaltita in discarica: in particolare si fa riferimento a polveri, fibre corte e fibre lunghe, che attualmente, ad eccezione di alcuni primi studi e alcune sperimentazioni in ambito di ricerca, non possono essere riciclate né per essere rifilate, né in altri settori. Non si esclude che in un futuro quest'ultima tipologia di scarti possa essere considerata come un sottoprodotto, uno degli obiettivi, tra l'altro, di questo progetto.

Secondo i dati Ispra riferiti all'anno 2017, l'industria tessile a livello italiano produce quasi 350.000 tonnellate di rifiuti speciali all'anno[13] la cui filiera è basata ancora su un modello di tipo lineare, in cui gli scarti a fine vita vengono smaltiti in discarica.

Infine, sebbene l'industria tessile non presenti criticità ambientali, nella figura 9 e 10, viene proposta una analisi degli effetti ambientali derivanti dalla produzione tessile.

Da essa emerge un rilevante consumo nell'ambito idrico, riferito sia all'acqua utilizzata nei diversi processi di produzione, sia relativo alle acque reflue che a causa delle sostanze immesse e disciolte devono essere depurate.

Anche gli scarti tessili risultano avere una notevole incidenza, come evidenziato in questo stesso capitolo, ma tuttavia non vengono classificati pericolosi e in buona parte riciclati come sottoprodotti.

13_Dati ISPRA. https://www.catasto-rifiuti.isprambiente.it/index.php?pg=rs, consultato il 26/07/2019.

1.4 L'INDUSTRIA TESSILE NEL TERRITORIO BIELLESE

L'area del biellese è caratterizzata da una storica tradizione del tessile, il cui sviluppo fu favorito dalle particolari caratteristiche del territorio situato ai piedi delle Alpi, e ricco di innumerevoli corsi d'acqua e torrenti e dunque favorevole all'attività tessile e all'allevamento. Grazie a queste caratteristiche e all'intraprendenza degli abitanti si è sviluppata una realtà tessile basata su una qualità riconosciuta a livello mondiale.

Le prime tracce storiche riferite al tessile nel biellese si possono identificare nell'epoca preromana, proseguendo fino al 1300 ove si passa dalla sola conduzione familiare allo sviluppo di una rete con altre realtà locali. Nel cinquecento e nel seicento inizia a delinearsi una suddivisione del territorio, nota ancora oggi, in base alla produzione: nella Valle Elvo una produzione di panni fini, nella Valle dello Strona e del Sessera una produzione di panni grezzi. Nel 1800 compare la figura dell'imprenditore, ed è grazie a uno di essi, Pietro Sella, che furono importati i primi telai dall'Inghilterra e installati nella Valle di Mosso, dando il via a quella che sarà, negli anni successivi, l'industrializzazione del paese. Nel 1900 iniziano a comparire i primi brand, riconosciuti su scala nazionale. Quest'ultimo rimane oggi l'unico distretto in Europa a conservare l'intera filiera produttiva del tessile, dalle fibre sudice al tessuto finito, grazie alla rete e alla sinergia tra grandi aziende e realtà medio-piccole. Questa strategia, insieme agli ingenti investimenti, ha permesso di superare la forte competizione e la crisi degli ultimi dieci anni, puntando, come in nessun altro distretto, su prodotti di altissima qualità, e definendolo come il polo laniero più qualificato al mondo. I tessuti vengono realizzati grazie a processi e macchinari all'avanguardia, utilizzando le fibre più pregiate, importate e accuratamente selezionate da Paesi di tutto il mondo. Vengono così prodotti tessuti di lana, cashmere, alpaca, vigogna, lino, cotone e prodotti misti grazie alla combinazione di più filati. Negli ultimi tempi a questi prodotti si affiancano anche poliestere, acrilico e nylon, che consentono la produzione di tessuti di qualità, rispondenti alla forte domanda derivante da diversi settori, principalmente quello della moda.

Oggi la struttura produttiva si estende su un territorio di oltre 900 km^2 sul quale si possono contare 612 industrie tessili suddivise fra i vari comuni (tabella 1), le quali sono state distinte in base alla categoria merceologica ATECO come emerge dalla tabella 2, dando lavoro a circa 17.000 addetti [14]. Nonostante il minimo storico delle industrie presenti nel biellese nel 2016, è stata toccata la massima

14_Osservatorio nazionale distretti italiani, 2011.

COMUNE	n. aziende
Biella	100
Cossato	60
Trivero	50
Vigliano B.se	30
Sandigliano	26
Candelo	19
Valdengo	19
Valle mosso	17
Lessona	16
Masserano	16
Mongrando	16
Andorno Micca	15
Quaregna	15
Tollegno	15
Gaglianico	13
Cerrione	11
Crevacuore	11
Occhieppo superiore	11
Pray	11
Verrone	11
Benna	10
Occhieppo inferiore	10
Brusnengo	9
Cerreto Castello	8
Mottalciata	8
Ponderano	6
Sagliano micca	6
Salussola	6
Ronco biellese	5
Strona	5
Borriana	4

COMUNE	n. aziende
Camburzano	4
Pollone	4
Portula	4
Casapinta	3
Castelletto cervo	3
Cavaglià	3
Mosso	3
Pralungo	3
Soprana	3
Sostegno	3
Massazza	2
Miagliano	2
Mosso S. Maria	2
Ailoche	1
Coggiola	1
Crosa	1
Curino	1
Donato	1
Dorzano	1
Graglia	1
Mezzana Mortigliengo	1
Muzzano	1
Piatto	1
Sordevolo	1
Tavigliano	1
Valle san Nicolao	1
Veglio	1
Viverone	1
Zimone	1
Zubiena	1
TOTALE	612

Tabella 1: Industrie tessili nella provincia di BIella, https://www.informazione-aziende.it/13_INDUSTRIE-TESSILI/Provincia_BIELLA?qPgGeo=1#luogo, consultato il 30/07/2019.

produzione consistente in circa 1,3 miliardi di euro. Questo dato oggi non risulta più sufficiente, poiché all'interno di questo sistema intervengono altre variabili, decisive per lo sviluppo dei prossimi anni. Basti pensare che rispetto ad altri campi, come nella meccanica dove i tempi di produzione sono calati da 30 a 3 giorni, nel campo tessile si è passai da 90 a 60 giorni. Infatti sono ancora poche le aziende che si adoperano sui due fronti basilari: quello dell'innovazione e della sostenibilità. Essi sono due principi paralleli che presentano implicazioni comuni, e non possono più passare in secondo piano. Proprio

CATEGORIA MERCEOLOGICA ATECO	n. aziende
Preparazione e filature fibre	301
Tessitura	137
Finissaggio dei tessili, degli articoli di vestiario e attività similari	91
Confezionamento di articoli tessili (no abbigliamento)	26
Fabbricazione di tessuti a maglia	10
Fabbricazione di articoli tessili tecnici ed industriali	9
Fabbricazione di tappeti e moquette	8
Fabiricazione di altri tessuti tessili nca	8
Fabbricazione di tessuti non tessuti e di articoli in tali matrerie	3
Fabricazione di spago, corde, funi e reti	2
Altre industrie tessili	1

Tabella 2: Industrie tessili nella provincia di BIella, https://www.informazione-aziende.it/13_INDUSTRIE-TESSILI/Provincia_BIELLA?qPgGeo=1#luogo, consultato il 30/07/2019.

in virtù dell'economia circolare risulta fondamentale considerare queste opportunità. Da una valutazione territoriale è possibile affermare che le aziende che si muovono su questi fronti sono ancora in numero ridotto; solo le aziende più grandi hanno la possibilità di procedere secondo questa direzione, ossia verso la riduzione degli scarti, dell'utilizzo di risorse tramite il riciclo, limitando le risorse idriche ed energetiche e massimizzando la produzione pur mantenendo sempre quella qualità artigianale che contraddistingue questi prodotti. A favore di queste politiche è doveroso citare il Polo Innovazione Tessile con la volontà di promuovere, cooperare e rendere competitive le aziende aderenti, favorendo lo scambio costante tra la domanda e l'offerta d'innovazione.

Vengono ora riportati alcuni dati su quelli che sono gli scarti tessili biellesi, in seguito all'attenta analisi della tesi "ReCashplaster Recycled Cashmere for pla-ster" [15] di Simone Fiorina su un campione di tredici aziende del territorio.

Come emerge dalla ricerca la tipologia di scarto varia in base al processo e all'azienda considerata. In genere le cimosse, se derivate da fibre naturali, vengono vendute come sottoprodotti e riciclate, in altri casi vengono invece dismesse in discarica. Un altro scarto rilevante deriva dal processo di filatura, il sottocarda: esso può essere venduto come sottoprodotto o dismesso in discarica. Le polveri e le fibre più corte risultano essere un rifiuto che per via della loro dimensione non può essere riprocessato e quindi il suo

15_Fiorina S., 2018, op. cit.

ciclo di vita si chiude in discarica con un costo che può arrivare fino a 1,50 €/kg. Esse derivano principalmente dai reparti di filatura, tessitura e finissaggio che, grazie alla presenza di aspiratori presenti sui macchinari o in alternativa a terra, vengono condotti in apposite balle per essere smaltiti con il codice rifiuto 040222, rifiuti da fibre tessili lavorate. In modo indicativo nel reparto di filatura, vengono prodotte 2.500 Kg/anno di polveri su 650.000 kg/anno di filato.

Come emergerà nel capitolo 4, riferito alla materia prima, e nel paragrafo 6.1 riferito agli input progettuali in ambito sperimentale, le polveri avranno un ruolo principale in questo progetto, essendo dei rifiuti aziendali non riciclabili e di conseguenza un costo per l'azienda stessa, nonché un problema per l'ambiente. Solamente considerando le tredici aziende selezionate nella tesi presa in esame, si ha una produzione di polveri, di varia tipologia e diversa provenienza, di quasi 700.000 Kg/anno.

2

L’ACUSTICA DELL’AMBIENTE INTERNO

- Berardi Umberto, Iannace Gino, *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*, in *Building and Environment*, volume 94, Elsevier, 2015, pp. 840-850.
- Spagnolo R. , *Acustica*, fondamenti e applicazioni, Utet, 2015.
- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283.

- LFT, http://lft.unich.it/laboratorio-fisica-tecnica/images/pdf/lezioni/rumore.pdf, consultato il 30/07/2019.
- http://www.treccani.it/enciclopedia/lana/, consultato il 30/07/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

2.1 NOZIONI DI ACUSTICA

L'acustica è un campo di studio della fisica tecnica ambientale, in grado di comprendere diverse discipline come il suono, la comunicazione, la meccanica, la medicina, la psicologia, l'architettura, la musica.
L'acustica dell'ambiente, interno ed esterno, può essere suddivisa in tre parti: la sorgente, il percorso e il ricevitore. La sorgente è l'elemento che produce il suono, il percorso è il mezzo attraverso il quale il suono si propaga e il ricevitore colui che ascolta o percepisce il suono. Lo scopo della progettazione di un ambiente, in questo settore, è quello di garantire il comfort acustico in base alla tipologia di intervento. Se fosse presente una fonte sonora non desiderata, l'obiettivo sarebbe quello di impedire a quel suono di raggiungere il ricevitore, aumentando la distanza fra le parti attraverso una manipolazione dell'ambiente. Nel caso contrario, in cui fosse presente della musica, un concerto, o una comunicazione, l'obiettivo è quello di permettere al ricevitore di essere raggiunto dal suono senza degradarsi.

Il suono, in termini fisici, è un'onda meccanica che si propaga attraverso un mezzo elastico, solido, liquido o gassoso, mediante l'alternarsi di molecole compresse e rarefatte all'interno del mezzo stesso, generando cambiamenti di pressione locali, come illustrato nella figura 1. Il numero di oscillazioni

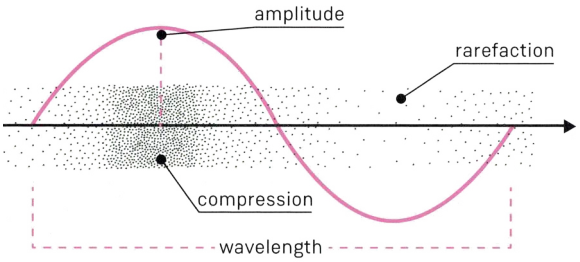


Figura 1: Il suono, Tyler Adams, 2018, op.cit.

complete nell'unità di tempo, un secondo, rappresenta la frequenza espressa in Hertz (Hz). La pressione sonora che costituisce la sua variazione in ampiezza, viene quantificata attraverso una scala logaritmica e misura-

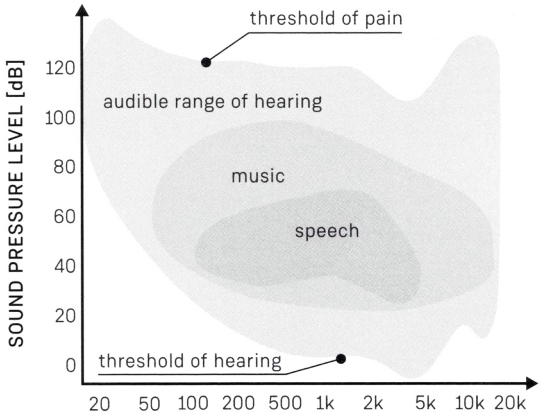


Figura 2: Range dell'udibilità, Tyler Adams, 2018, op.cit.

ta in decibel (dB).
Esiste una relazione fra la frequenza e la lunghezza d'onda di un suono. Prendendo come riferimento il mezzo elastico dell'aria,

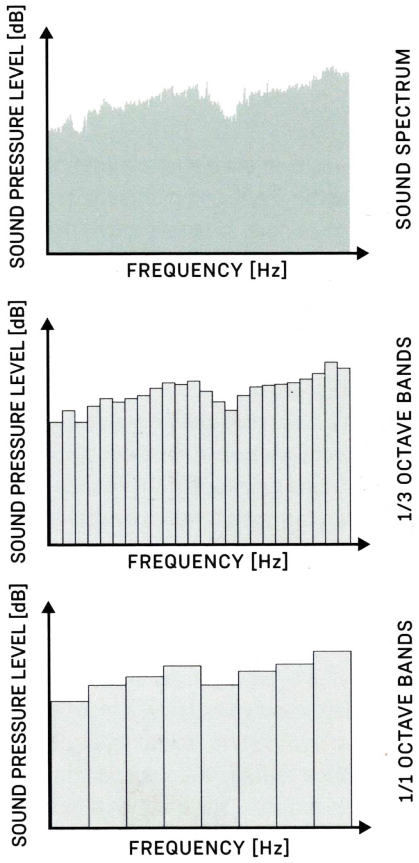


Figura 3: Spettro sonoro, Tyler Adams, 2018, op.cit.

con una velocità del suono di 343 m/s, la frequenza più bassa che l'orecchio umano può percepire ha una lunghezza d'onda di 17 m (20 Hz), mentre la più alta frequenza udibile ha una lunghezza d'onda di 0,02 m (20.000 Hz). Questo concetto risulta fondamentale poiché nei materiali porosi, tema che si approfondirà nel paragrafo successivo, le prestazioni di assorbimento acustico sono proporzionali allo spessore del materiale in funzione della lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda può essere calcolata attraverso una semplice equazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove λ corrisponde alla lunghezza d'onda [m], c alla velocità del suono [m/s] e f coincide con la frequenza [Hz].

L'analisi spettrale di un suono puro è unicamente costituita da sinusoidi, ma in natura esistono anche suoni complessi, i quali possono essere decomposti in sinusoidi elementari chiamate armoniche. Il rumore, per via della sua composizione spettrale continua, produce sensazioni sgradevoli e risulta difficilmente descrivibile. Viene quindi effettuata una discretizzazione del campo di variazione trasformando la curva spettrale continua con una a gradini per bande di frequenza per semplificare misurazioni e calcoli. È comune dividere lo spettro in bande di 1/3 di ottava o in bande di 1/1 di ottava (figura 3).

L'organo mediante il quale l'essere vivente è in grado di recepire le vibrazioni prodotte dalle onde sonore è costituito dall'apparato uditivo. Come accennato in precedenza, per via del sistema uditivo umano le onde sonore creano una sensazione sonora solo se caratterizzate da frequenze comprese fra i 20

e 20.000 Hz, come raffigurato nella figura 2. Il livello di sensazione sonora viene definito come "caratteristica comune di due suoni di diverso livello sonoro a diverse frequenze, ottenuto mediante il confronto con il livello di riferimento (tono puro) ad 1000 Hz" [1].
Essa può essere ottenuta attraverso le curve isofoniche: famiglia di curve di uguale livello di sensazione sonora. Secondo ISO 226 è stato adottato l'audiogramma normale medio di Robinson e Dadson (1956), illustrato nella figura 4, caratterizzato da una soglia minima di udibilità e un livello massimo a 120 phon, soglia del dolore. Attraverso i phon si misura la sensazione sonora che coincide con il livello di pressione a 100 Hz.
Per i suoni complessi il metodo più diffuso è basato sulle curve di ponderazione in frequenza, che riproducono in modo semplificato l'andamento delle curve isofoniche. Attraverso l'utilizzo del fonometro è possibile apportare una correzione al segnale acustico in modo da simulare il comportamento dell'orecchio umano; fra le tre modalità di pesatura generalmente si utilizza la scala di correzione A, rappresentata nella figura 5.

Infine, poiché i rumori non sono quasi mai stazionari, ma sono variabili nel tempo, bisogna riferirsi al livello equivalente ossia il livello sonoro che, nell'intervallo della misura T, corrisponde all'intensità acustica media del rumore.

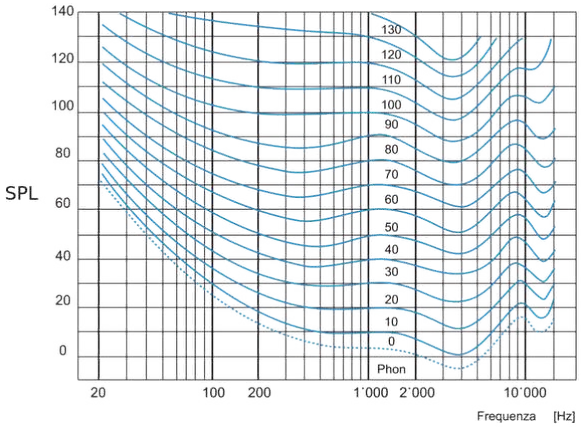


Figura 4: Audiogramma normale medio, https://davideruiba.com/tag/curve-isofoniche/.

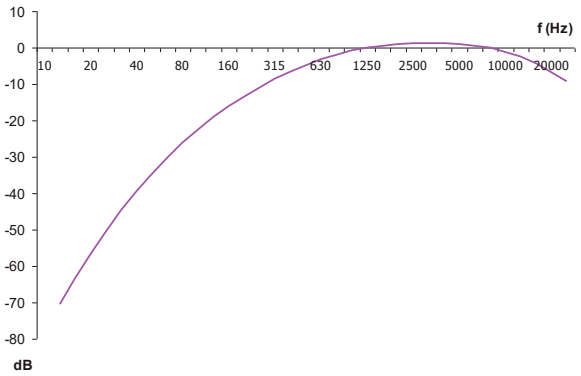


Figura 5: Curva di ponderazione A, http://lft.unich.it/laboratorio-fisica-tecnica/images/pdf/lezioni/rumore.pdf.

1_LFT, http://lft.unich.it/laboratorio-fisica-tecnica/images/pdf/lezioni/rumore.pdf, consultato il 29/07/2019.

2.2 IL FONOASSORBIMENTO

Considerando l'acustica degli edifici si parla di problemi di fonoassorbimento quando è necessario ottenere condizioni adeguate per l'ascolto della parola o della musica e occorre quindio effettuare una correzione acustica dell'ambiente. I problemi di fonoisolamento si riferiscono invece alla protezione dell'ambiente interno rispetto all'influenza negativa del rumore proveniente dall'esterno, da unita immobiliari adiacenti o dai sistemi impiantistici.

Quando un suono si scontra con un materiale, si verificano tre condizioni: una parte di energia viene riflessa, una parte viene assorbita e convertita in calore, e una parte può essere trasmessa attraverso il materiale, dalla parte opposta (vedi figura 6):

$$E_{incidente} = E_{riflessa} + E_{assorbita}$$

Ogni materiale reagisce al suono in base alle proprie caratteristiche in relazione a queste componenti. E' possibile quindi gestire, progettare e modificare l'acustica di un ambiente in base alle prestazioni che esso deve garantire per soddisfare le esigenze degli utenti. Oltre alla tipologia del materiale il suono è influenzato dalla forma, dalla superficie, dalla texture (figura 7) e dalla conformazione dello spazio. Per esempio una superficie piatta e monolitica tenderà a riflettere il suono specularmente o nell'architettura barocca, per esempio, per via delle sue innumerevoli finiture ornate e sculture determina ambienti diffusi. Per questo i materiali fonoassorbenti possono essere utiliz-

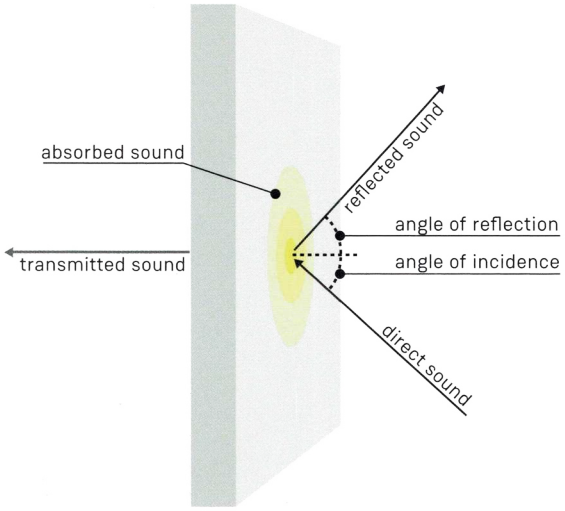


Figura 6: Azione del suono su un materiale, Tyler Adams, 2018, op.cit.

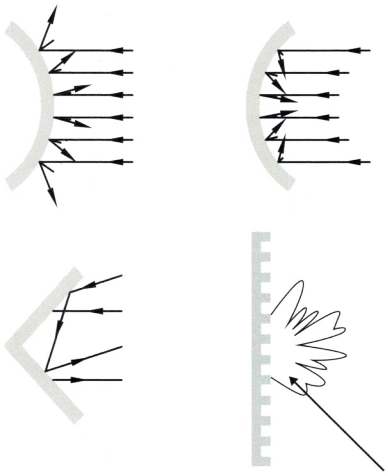


Figura 7: Tipologie di riflessione, Tyler Adams, 2018, op.cit.

zati per diversi scopi, per ridurre i livelli dei rumori, il riverbero, eliminare l'eco e migliorare l'acustica, modificando e influenzando la percezione di un ambiente.
La percezione di un suono varia in funzione dello spazio circostante: esso è influenzato dalle riflessioni degli oggetti e dalle superfici che ci circondano (motivo per il quale la nostra voce suona diversamente all'interno di una doccia rispetto all'aperto).
Difatti in un campo libero, dove non abbiamo riflessione del suono, l'unica percezione è quella che deriva dal suono diffuso sfericamente dalla sorgente. In questa condizione, il livello sonoro diminuisce di 6 dB a ogni raddoppio della distanza fra fonte e ricevitore.
In un ambiente riverberante, generalmente negli ambienti interni, la riflessione di oggetti e di superfici si somma al livello totale ricevuto. Tuttavia a un distanza ravvicinata il suono può comportarsi in condizioni di campo libero, ma appena la distanza dalla fonte sonora aumenta prevale il campo riverberato. L'introduzione di elementi acustici fonoassorbenti può in questo caso ridurre le riflessioni, permettendo di ricevere anche a una distanza maggiore il contributo diretto. In particolare per ogni raddoppio dell'importo totale di assorbimento in una stanza, il livello sonoro diminuisce di 3 dB.

Attraverso la seguente formula è possibile prevedere la riduzione del suono, confrontando l'assorbimento totale nella stanza prima e dopo il trattamento acustico:

$$\text{Riduzione del suono [dB]} = 10 \log \frac{\text{assorbimento totale dopo il trattamento nella stanza}}{\text{assorbimento totale prima del trattamento della stanza}}$$

Per la maggior parte delle situazioni, il limite di questa riduzione del rumore è 10 dB, che percettivamente è assimilabile a una riduzione del 50% del livello sonoro totale.

In ambienti rumorosi, quali un ristorante o bar, l'essere umano è portato ad aumentare involontariamente l'intensità della voce, nel tentativo di passare sopra al rumore di fondo. Per ridurre questo fenomeno è sufficiente intervenire sul rumore di fondo, limitando il riverbero attraverso un controllo del comfort acustico dell'ambiente. Inoltre ridurre le riflessioni comporta altri aspetti positivi: rendere il discorso comprensibile durante una conversazione, la musica più piacevole e consentire l'individuazione della provenienza dei suoni. Bisogna però evitare di raggiungere l'estremo opposto, creando un'atmosfera asettica e rendendo l'ambiente privo di riflessioni, quindi secco e silenzioso. Per una corretta progettazione è fondamentale raggiungere un equilibrio.
L'intelligibilità della parola dipende da una serie di fattori: la distanza tra la sorgente e

il ricevitore, il volume della sorgente rispetto al livello di rumore di fondo e la quantità di riverbero in ambiente. In particolare il riverbero influisce sia attraverso il rumore di fondo, sia attraverso i riflessi che vanno ad ostacolare la parole. I materiali fonoassorbenti sono particolarmente indicati in questi casi ove la parola è fondamentale: aule, tribunali, spazi di lettura, spazi pubblici, sistemi di emergenza.
Questi ultimi sono ampiamente utilizzati per eliminare l'eco, riflesso che si verifica in ritardo nel tempo, percepito come un suono separato dalla sua fonte iniziale. Questo fenomeno si può verificare nelle sale e negli auditori dove possono essere presenti superfici piane a distanza anche di 15 m rispetto alla sorgente: per evitare echi che rimbalzino è sufficiente ricoprire con materiale fonoassorbente la parete posteriore al pubblico. Il fenomeno si verifica anche quando vi sono due superfici parallele riflettenti, come in sale conferenze che possono presentare pareti di vetro.

Tutti i materiali assorbono il suono in una certa misura, esso può essere valutato attraverso il coefficiente di assorbimento acustico (alpha, α), cioè il rapporto fra energia sonora assorbita dalla superficie e l'energia incidente. Questo è un parametro adimensionale, e assume dei valori da 0 a 1: se l'assorbimento risulta 0 significa che le superfici non sono assorbenti, se 1 le superfici sono totalmente assorbenti.
Le prestazioni di assorbimento variano in modo significativo in base all'angolo di incidenza e alle frequenze; per questo generalmente l'assorbimento viene valutato alle 18 differenti bande di 1/3 di ottava, da 100 Hz a 5000 Hz.
L'assorbimento viene comunemente misurato in camera riverberante (capitolo 9) anche se a scopo di prototipazione i piccoli campioni possono essere testati attraverso il tubo di impedenza (tubo di Kundt) o tramite le resistività al flusso (capitolo 7). In alternativa possono essere utilizzate anche delle modellazioni empiriche basate sulle caratteristiche e sulle proprietà del materiale in questione. La camera riverberante costituisce in assoluto il metodo più completo per la misura dell'assorbimento poiché fornisce un campo sonoro diffuso con angoli casuali di incidenza. Le misurazioni su un piccolo campione non rappresentano sempre il comportamento a dimensioni maggiori.

Esistono inoltre delle metriche di progetto in grado di rappresentare in un unico numero le performance acustiche del materiale. Tuttavia questo può essere fuorviante, perché non rispecchia il reale andamento ma solo una media; risulta pertanto preferibile valu-

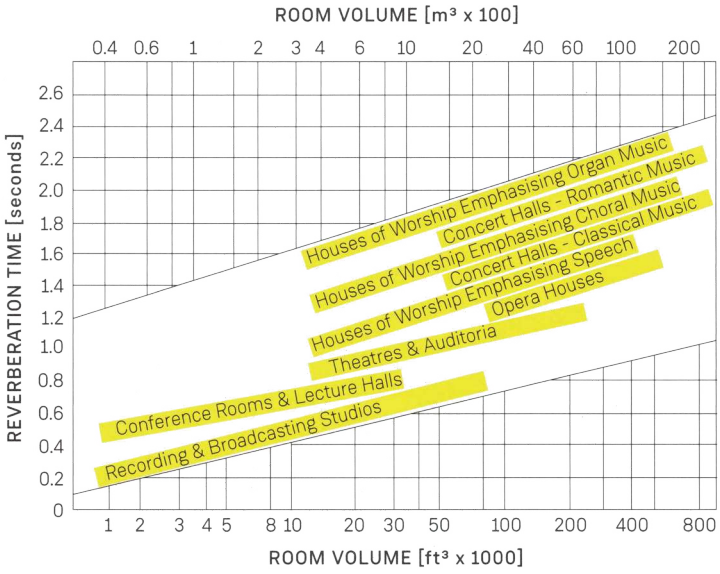


Figura 8: Tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume e della destinazione d'uso, alla frequenza di 500 Hz, Tyler Adams, 2018, op.cit.

tare i coefficienti di assorbimento acustico alle varie frequenze.

Come emerso nelle precedenti righe è fondamentale trovare il giusto equilibrio fra riverbero e campo diffuso, in base alla destinazione d'uso dell'ambiente e alle esigenze specifiche. Nella figura 8, viene mostrato il tempo di riverberazione ottimale in funzione del suo volume e della destinazione d'uso alla frequenza di 500 Hz. Spazi in cui l'uso della parola è fondamentale richiedono dei tempi di riverbero minori di 1 secondo, mentre per spazi con musica non amplificata tempistiche di riverbero maggiori. Ottenere tempi di riverbero lunghi a basse frequenze risulta complesso poiché i materiali da costruzione spesso fungono da assorbitori a tali frequenze. Allo stesso tempo mantenere tempi di riverbero a basse frequenze in spazi ampi risulta difficile perché sia la presenza dell'uomo sia l'aria assorbono le frequenze più alte.

Il tempo di riverberazione (T60), viene definito come il tempo necessario affinché il livello sonoro in un punto dell'ambiente decada di 60dB, dall'istante di spegnimento di una sorgente sonora che emette un segnale stazionario, figura 9. A causa delle difficoltà nell'ottenere un decadimento di 60dB la misurazione viene effettuata su una porzio-

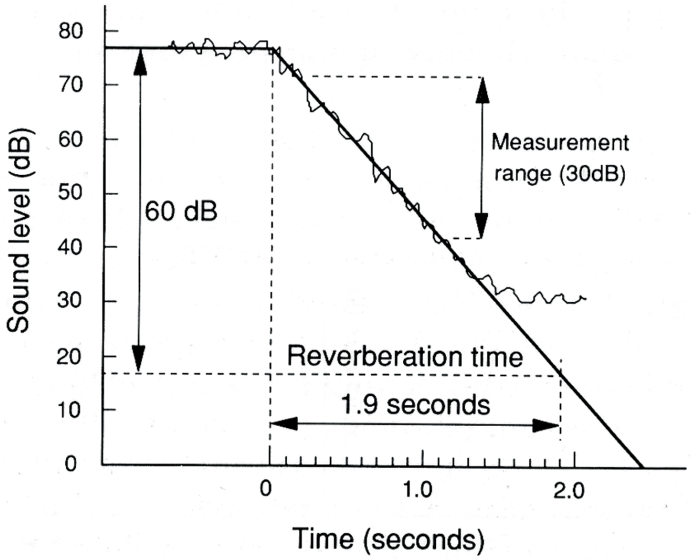


Figura 9: Decadimento della pressione sonora e tempo di riverberazione, T60.

ne più limitata della coda sonora, in genere 30dB per poi estrapolare il tempo a 60dB: si introducono gli equivalenti T30, T20 e T15.

L'equazione per calcolare il tempo di riverberazione è stata introdotta da Wallance Clement Sabine, che per primo stabilì in modo empirico la relazione fra tempo di riverberazione di un ambiente [s] alle sue dimensioni e al relativo assorbimento acustico:

$$\mathrm{T60} = 0{,}16\frac{V}{A}$$

dove *V* corrisponde al volume dell'ambiente [m^3], e *A* coefficiente di assorbimento medio di Sabine, il quale deve essere comprensivo di persone e arredo [m^2]. Quest'ultimo può essere valutato come:

$$\mathrm{A} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i$$

con α il coefficiente di assorbimento medio della i-esima superficie di materiale che delimita l'ambiente e S_i la superficie dell'ambiente [m^2]. Se si introduce l'attenuazione del suono in aria, per via dell'influenza delle dissipazioni, soprattutto in ambienti di notevoli dimensioni la formula diventa:

$$\mathrm{T60} = 0{,}16\frac{V}{(A + 4mV)} \quad [\mathrm{s}]$$

dove *A* coincide con l'assorbimento totale [m^2], *V* corrisponde al volume dell'ambiente [m^3] e *m* al coefficiente di attenuazione dell'aria [m^{-1}].

2.3 I MATERIALI POROSI E LE LORO CARATTERISTICHE

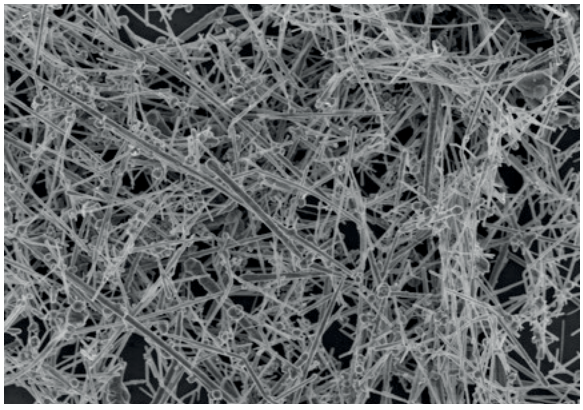


Figura 10: Esempio di materiale poroso fibroso, SEM, https://www.acsmaterial.com/copper-nanowire-in-ethanol-1g-1012.html.

I materiali porosi sono la tipologia più diffusa fra i materiali caratterizzati da assorbimento acustico. L'assorbimento avviene per mezzo dei pori interconnessi attraverso il materiale che, mediante effetti viscosi, sono in grado di dissipare l'energia acustica in calore. Caratteristica fondamentale è che i pori siano aperti ed esposti all'ambiente. La loro dimensione tipica è minore di 1 mm, inferiore a quella delle lunghezze d'onda d'interesse.
Quando un'onda acustica penetra un materiale, le molecole d'aria interne ai pori e alle interconnessioni sono costrette vibrare, perdendo energia a causa dell'attrito con le superfici interne dei pori all'interno del materiale. Nei materiali porosi fibrosi (figura 10) una parte dell'energia viene dissipata anche dalla vibrazione meccanica delle fibre stesse. In base alla microstruttura porosa questi materiali possono essere suddivisi in cellulari, ad esempio le schiume, fibrosi, caratterizzati da spazi d'aria fra i filamenti delle fibre, come la fibra di vetro, e i materiali granulari, ove vi sono sacche d'aria tra i granuli che compongono il materiale stesso, come nel caso del calcestruzzo poroso.

Caratteristiche fondamentali per questa tipologia di materiali, sono la porosità e la resistività al flusso.

La porosità indica la quantità frazionaria d'aria contenuta internamente dal materiale ed è definita come il rapporto fra volume dei pori e volume totale del materiale. In generale maggiore è la porosità, maggiori sono le capacità di assorbimento acustico. La lana di vetro può avere una porosità del 98%. Per il calcolo della porosità non vengono considerati i pori chiusi. Difatti alcuni materiali porosi sono formati da una struttura in cui i pori non sono interconnessi con conseguenti effetti su alcune proprietà del materiale; tuttavia riescono ad avere comunque assorbimenti acustici significativi. I pori devono essere aperti, permettendo una comunicazione fra la superficie esterna e quella interna; essi possono essere ciechi, cioè aperti a una sola estremità, o passanti, aperti a entrambe le estremità.

Un'altra importante distinzione è la differenza fra rugosità superficiale e porosità: superficie ruvida non è sinonimo di superficie porosa, ma una superficie può essere sia porosa sia ruvida.

La resistività al flusso (vedi capitolo 7) è una caratteristica per la quale viene misurato il passaggio d'aria attraverso l'elemento. Se la resistività al flusso è troppo alta comporta un impedimento da parte del materiale di essere attraversato dall'aria, e quindi una tendenza a riflettere piuttosto che assorbire. Il materiale deve quindi permettere all'onda sonora di entrare con facilità nella struttura, e dunque avere una bassa resistività e un'elevata porosità. Tuttavia deve anche generare attrito nella sua struttura per disperdere l'energia sonora, portando a un aumento della resistività al flusso.
Attraverso la resistività al flusso, tramite dei modelli, è possibile ricavare l'assorbimento acustico alle diverse frequenze per questa tipologia di materiali.

Altre caratteristiche importanti per i materiali porosi sono: la forma dei pori, con influenza sugli effetti termici e viscosi, la lunghezza e la tortuosità, maggiore e complessa è l'interconnessione dei pori maggiore sarà l'assorbimento. Quest'ultima è determinata da pori disposti in posizione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. La tortuosità è una caratteristica strettamente correlata alla resistività al flusso, poiché influisce su come il flusso d'aria sia in grado di attraversare il materiale.

Infine, ma non per ordine di importanza, un parametro fondamentale è il diametro della fibra. Le fibre sintetiche, grazie alla loro tipologia di produzione, possono essere realizzate con svariati diametri e gestite più facilmente nelle dimensioni. Al contrario le fibre naturali presentano un diametro più irregolare, meno gestibile e sono tendenzialmente più grandi rispetto alle fibre sintetiche comunemente prodotte.

SPESSORE e MONTAGGIO
L'effetto di assorbimento massimo si verifica nei punti in cui la velocità di particella è massima, cioè dove il materiale fonoassorbente sottrae maggiore energia all'onda incidente. In prossimità di una superficie rigida, questo

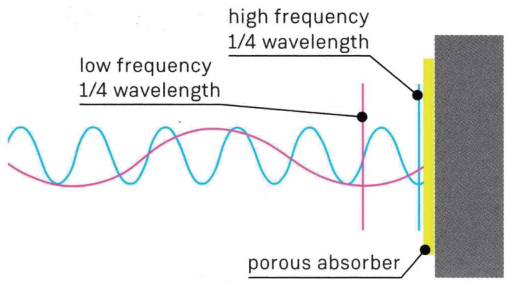


Figura 11: Fonoassorbimento, Tyler Adams, 2018, op.cit.

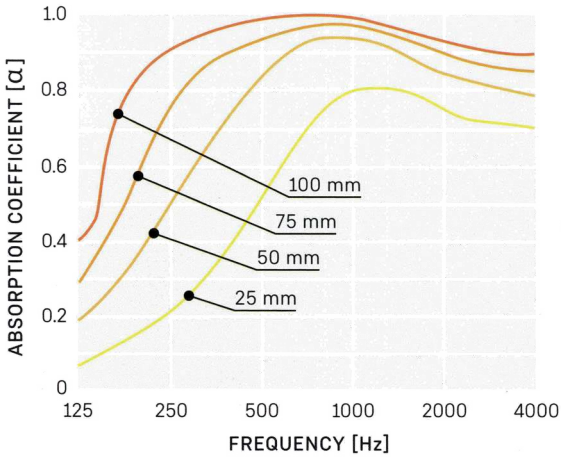


Figura 12: Variazione dell'assorbimento acustico a diversi spessori, Tyler Adams, 2018, op.cit.

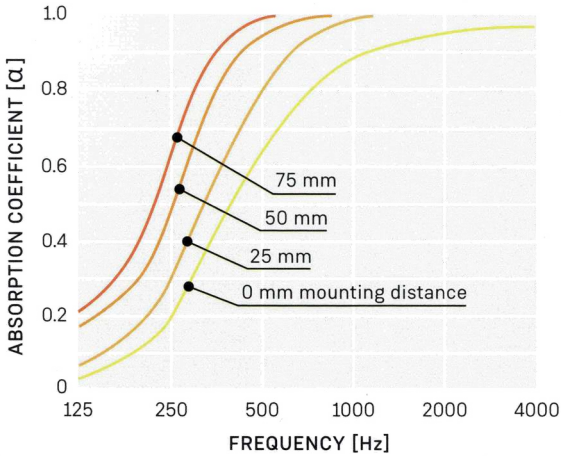


Figura 13 Variazione dell'assorbimento acustico a diversi air-gap, Tyler Adams, 2018, op.cit.

punto si trova ad una distanza [m]:

$$d = \lambda / 4$$

dove λ corrisponde alla lunghezza d'onda [m]. Quindi l'assorbimento si verifica quando il materiale poroso ha uno spessore di almeno ¼ della lunghezza d'onda (figura 11). Nei materiali porosi l'assorbimento alle basse frequenze aumenta con l'aumentare dello spessore del materiale fonoassorbente, come illustrato nella figura 12. Per questo motivo questa tipologia di materiali ha difficoltà nell'assorbire le basse frequenze con lunghezze d'onda di alcuni metri. In alternativa all'aumento dello spessore del materiale è possibile ottenere il medesimo risultato inserendo fra materiale e superficie di applicazione un air-gap (figura 13), in modo tale che lo spessore totale sia sempre di almeno ¼ della lunghezza d'onda. Fondamentale dunque è considerare i risultati dei test in funzione a come è stato posizionato e montato il pannello.

Nonostante questa possibilità di montaggio, in condizioni pratiche, risulta difficile avere lo spazio a disposizione per permettere al materiale poroso di assorbire le frequenze più basse. Basti pensare che a 90 Hz la lunghezza d'onda è di circa 4 metri, e per essere assorbita lo spessore del pacchetto dovrebbe essere di minimo un metro per raggiungere ¼ della lunghezza d'onda.

L'assorbimento per porosità è dato dalla velocità delle particelle: negli angoli la velocità di queste ultime non è elevata per questo non costituiscono delle trappole acustiche particolarmente efficaci.
Per coprire tutta la gamma di frequenze in particolare quelle più basse, il materiale poroso può essere associato a un pannello risonante; a volte risulta necessario unire più soluzioni per raggiungere risultati ottimali.

DENSITÀ

I materiali porosi possono essere realizzati a diverse densità, morbidi e flessibili oppure come tavole dense e rigide. La densità è direttamente correlata alla resistività al flusso. Infatti ad elevate densità diventa difficile per il suono attraversare il materiale, portando a una diminuzione dell'assorbimento acustico (figura 14). Allo stesso tempo densità troppo basse, e di conseguenza resistività al flusso basse, comportano assorbimenti minori, a determinati intervalli di frequenza.

VERNICE

La vernice può compromettere le caratteristiche di assorbimento acustico di un materiale poroso poiché può chiudere integralmente o parzialmente i pori in superficie, ostacolando la penetrazione del suono come emerge dalla figura 15. Alcuni produttori, tuttavia, offrono determinate vernici a base acquosa

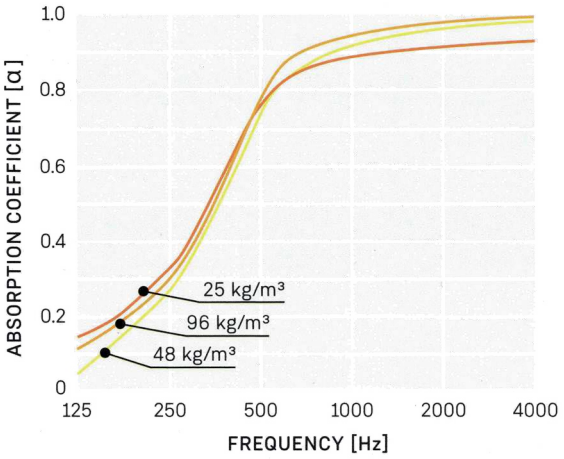


Figura 14: Variazione dell'assorbimento acustico a diverse densità, Tyler Adams, 2018, op.cit.

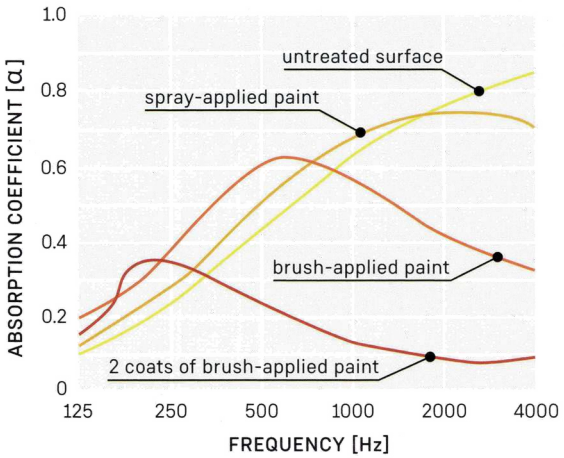


Figura 15: Influenza della vernice sull'assorbimento acustico, Tyler Adams, 2018, op.cit.

che non vanno a compromettere significativamente l'assorbimento.

ASSORBITORI VARIABILI

Questa particolare tipologia nasce dall'esigenza di realizzare ambienti dinamici in grado di adattarsi a diverse attività. Lo stesso ambiente può richiedere delle performance di assorbimento in caso di lezioni dirette oppure caratteristiche opposte nel caso di un evento musicale.

La tipologia di assorbitori variabili più diffusa e più economica sono i tendaggi, che consentono di coprire totalmente con le pieghe del tessuto la superficie riflettente retrostante oppure di lasciarla libera. Esistono invece alcuni assorbitori variabili di nuova generazione, in grado di modificare l'assorbimento dell'ambiente variando la quantità di superficie assorbente esposta alla stanza tramite dei sistemi rotanti o scorrevoli.

TAPPETI E TENDAGGI

Anche i tappeti possono essere considerati come materiali porosi. Essi sono efficienti nell'assorbire le alte frequenze e per via dello spessore limitato sono completamente inefficaci alle basse frequenze. Come per tutti i materiali porosi maggiore è la permeabilità del tappeto e del sottofondo, maggiore sarà l'assorbimento acustico. I tappeti formati da uno strato di peli in superficie hanno assorbimenti maggiori rispetto a quelli più compatti. Inoltre i tappeti possono risultare utili anche per ridurre il rumore creato dal calpestio, da carrelli, da sedie o cadute accidentali.

Anche le tende, come accennato, possono essere considerate come materiali porosi e come assorbitori variabili. Le loro performance acustiche variano in base a una serie di fattori: resistività al flusso che dipende dalla tipologia di materiale e dalla distanza di montaggio. Ovviamente maggiore sarà lo spessore del materiale maggiore sarà il suo assorbimento acustico. Un'altra caratteristica da considerare sono le pieghe del tessuto: infatti utilizzando una lunghezza orizzontale (o verticale) maggiore rispetto a quella della superficie di applicazione si otterrò un numero maggiore di pieghe e migliori performance acustiche, dovute all'incremento della superficie a disposizione.

RIVESTIMENTO

Per via della loro natura porosa e generalmente fibrosa questi materiali, se applicati in ambienti interni, spesso vengono rivestiti per essere protetti dall'umidità, da contaminazioni, per essere puliti e lavati, per evitare dispersioni di fibre, per mantenere la coesione o più semplicemente per rendere gradevole il loro aspetto. Se rivestiti da materiali rigidi, le capacità fonoassorbenti del materiale poroso diminuiscono come illustrato nella

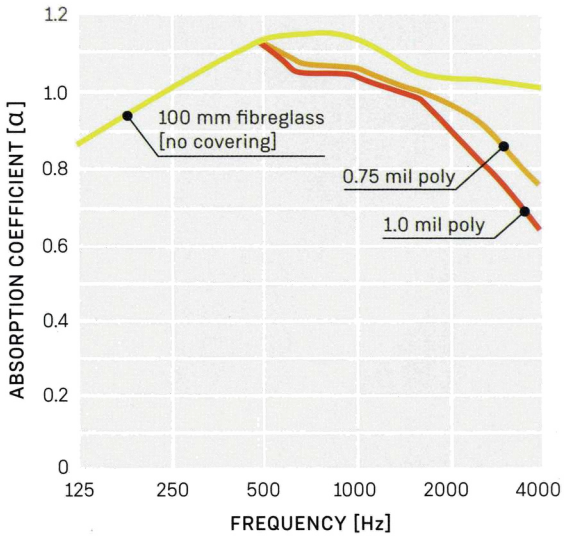


Figura 16: Influenza del rivestimento e del relativo spessore,Tyler Adams, 2018, op.cit.

figura 16; è necessario avere un'area aperta per permettere ai pori del materiale interno di essere a contatto con l'ambiente. Nel caso di una lamiera metallica l'area aperta deve essere almeno del 20%, ma se lo spessore del materiale aumentasse, come nel caso del legno la percentuale deve aumentare anche fino al 50%. Sia lo spessore sia la frazione di area aperta comportano comunque una diminuzione dell'assorbimento poroso, ma il rivestimento esterno può iniziare a funzionare come un assorbitore di Helmhotz.
In alternativa il rivestimento può essere realizzato con materiali flessibili, come tessuti o film. I tessuti possono variare l'assorbimento del materiale poroso in base alla loro resistività all'aria, la quale deve essere bassa per non compromettere le performance acustiche. I film sottili, di cuoio, vinile, prodotti polimerici, hanno il vantaggio di poter essere lavabili, impermeabili, e di avere superfici non porose e quindi in grado di non trattenere la polvere come richiesto in alcune circostanze. Tuttavia porteranno a una diminuzione dell'assorbimento acustico, in particolare alle alte frequenze: per ridurre questo inconveniente lo spessore deve essere minore ai 2 mm oppure, se possibile, avere una parte forata.

MATERIALI

Viene ora mostrata una rassegna dei materiali porosi suddivisi in base alla categoria di appartenenza, partendo da quelli tradizionalmente utilizzati a quelli più innovativi, seguita dalla tabella 1, dove viene presentato un confronto fra le performance acustiche dei materiali naturali maggiormente diffusi. Si sottolinea che sono state riportate sia le materie prime dalle quali si possono comporre svariate soluzioni , sia alcuni prodotti diffusi su larga scala; a causa della continua innovazione vengono elencati solamente i principali. Questi materiali possono essere combinati ed evolversi in molteplici forme, assemblaggi e, alcuni di questi, possono derivare totalmente o parzialmente dalla filiera del riciclo.

- **Origine minerale:** *fibra di roccia, fibra di vetro, vetro cellulare, vetroresina, perlite espansa, argilla espansa, schiuma di alluminio, schiuma ceramica, pietra, vetro, vermiculite, gesso, cemento acustico.*
- **Origine animale:** *lana.*
- **Origine vegetale:** *lino, canapa, canna, bamboo, cotone, iuta, cocco, legno, milkweed, kapok, cellulosa, cotone, denim, sughero, schiuma di legno.*
- **Origine sintetica:** *polietilene, poliestere, poliuretano, schiuma poliuretanica, schiuma di melammina, schiuma di poliammide, schiuma di polipropilene, schiuma di EPDM, gomma.*
- **Innovativi:** *muschio e muri verdi (vegetali), micelio (fungo), aerogel (sintetico).*

Materiale	Kg/m^3	Spessore cm	NRC
Kenaf	50	6	0,55
	100	4	0,55
		6	0,7
Legno	100	6	0,6
	260	3	0,2
Canapa	50	3	0,4
Cocco	60	5	0,5
		10	0,75
Sughero	100	3	0,3
Canna legno	470	4	0,25
		8	0,4
Canna corteccia	145	4	0,45
		8	0,6
Lana vergine	40	4	0,55
		6	0,7

Tabella 1: Confronto performance acustiche fra alcuni materiali di origine naturale. (NRC: media degli assorbimenti a 250, 500,1000 e 2000 Hz).

2.4 LA LANA E LE SUE PROPRIETÀ ACUSTICHE

Figura 17: Lana, http://mowedesign.dk/2016/08/inspiration-til-efteraaret-trends-2016/.

In questa sezione viene sviluppato un approfondimento su un materiale poroso specifico, la lana (figura 17). Come emerge dal paragrafo precedente risulta essere l'unico materiale poroso, quindi dotato di caratteristiche di assorbimento acustico, di origine animale. Inoltre come sottolineato nel paragrafo 1.4 e nel capitolo 4 la lana risulta essere il materiale d'eccellenza del territorio biellese: di conseguenza questo comporta la produzione di scarti che, come vedremo nel capitolo dedicato alla sperimentazione, risulteranno fondamentali in questo progetto.

La lana è una fibra proteica (cheratina) di ori-

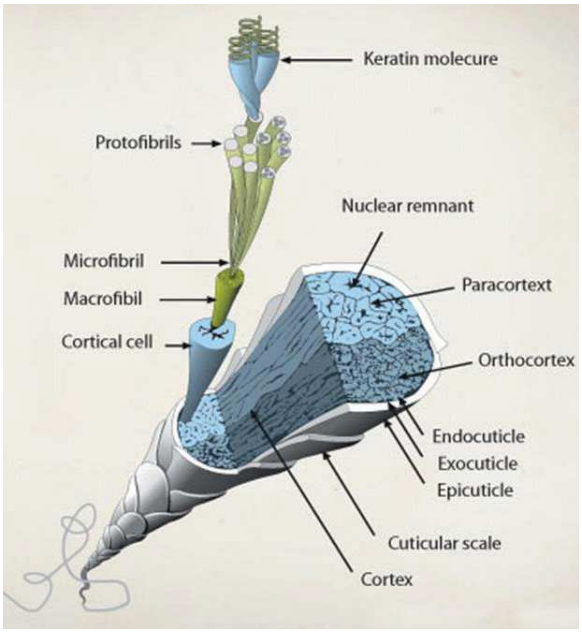


Figura 18: Sezione fibra di lana, http://www.medlaine.eu/index.php?id=103.

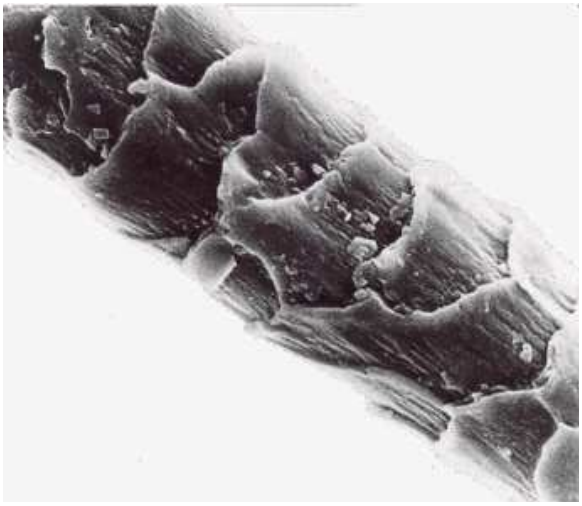


Figura 19: Fibra di lana, https://www.chimica-online.it/materiali/fibre-tessili/lana.htm.

gine naturale ed animale, ottenuta dal vello di alcune specie di pecora e di capra, alpaca, vigogna, cammello, coniglio e dromedario. La lana è da sempre stata utilizzata per l'abbigliamento grazie alle sue proprietà di isolamento, ma negli ultimi anni il suo uso è calato drasticamente a causa della concorrenza di prodotti sintetici a costi più bassi, portando spesso a bruciare quella in eccesso.

La fibra ha una lunghezza fra i 2 e i 90 mm con una sezione circolare e un diametro che varia dai 16 a 40 micron. Esternamente è rivestita da squame (figura 19) e per questo tende ad aggregarsi formando agglomerati con migliaia di fibre. Gli amminoacidi che compongono la lana formano lunghe catene a spirali che contribuiscono alla resilienza delle fibre e alle proprietà acustiche (figura 18). Queste caratteristiche conferiscono alla lana una buona elasticità, resistenza meccanica, resistenza all'usura, igroscopicità, morbidezza, termoplasticità, ma una scarsa resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

Un grande vantaggio della lana è la resistenza alla fiamma, difatti è autoestinguente e inoltre durante la combustione non emette sostanze tossiche. Nonostante la sua capacità di resistere a muffe e batteri può essere attaccata da falene e tarme: ha quindi bisogno di trattamenti prima di essere utilizzata.

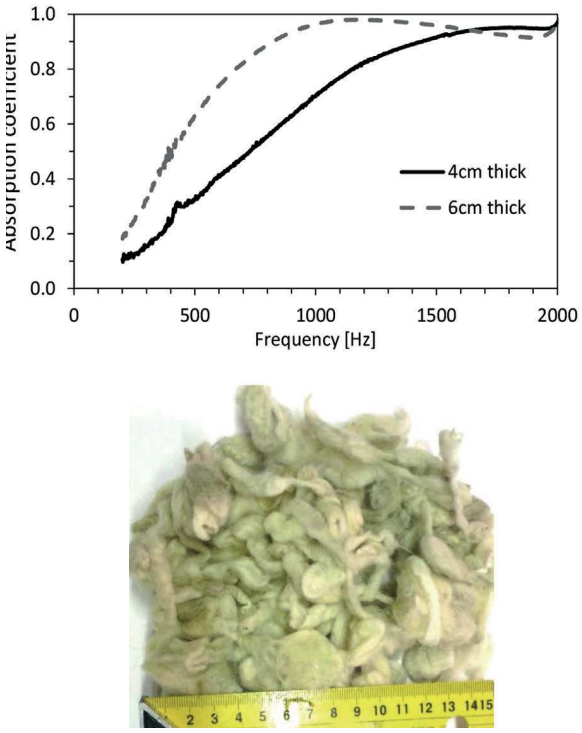


Figura 20: Coefficiente di assorbimento della lana a diversi spessori e relativo campione utilizzato per la misura, Berardi Umberto, 2015, op. cit.

Grazie alla sua composizione, in particolare per via delle microcavità all'interno della propria struttura, presenta ottime caratteristiche isolanti e fonoassorbenti.

Come mostrato nella figura 20, la lana di pecora mostra elevati assorbimenti alle medie e alle alte frequenze con un comportamento abbastanza omogeneo. Analogamente a tutti i materiali porosi un aumento dello spessore del materiale porta ad un aumento significativo dell'assorbimento, in questo caso soprattutto alle medie frequenze. Inoltre se paragonata ad altri materiali di origine naturale, come evidenziato nella tabella 1, la lana emerge per gli ottimi risultati, seconda solo alla fibra di cocco, quest'ultima è però caratterizzata da uno spessore maggiore.

Con la fibra di lana possono essere fabbricati svariati prodotti, ma in riferimento all'assorbimento acustico andremo ad elencare solo quelli coinvolti.
Tendaggi e tappeti, come discusso nel paragrafo precedente, sono considerati materiali porosi e possono avere buone qualità acustiche. Questi prodotti vengono generalmente realizzati in cotone ma soprattutto con fibre sintetiche; tuttavia, in particolare i tendaggi, possono essere realizzati con la lana.
Un altro impiego della lana è legato alla formazione di pannelli acustici o isolanti. Questa tipologia si presenta come pannelli flessibili, in cui la coesione è affidata a carta o reti metalliche.
Esistono anche dei pannelli fonoassorbenti realizzati con gli scarti di lavorazione della lana o utilizzando la lana sudicia. Questi ultimi possono essere integralmente o parzialmente di lana, poiché spesso, in fase di riciclo, vengono mescolati tessuti composti da altri materiali. Le fibre legate a queste soluzioni sono generalmente coese grazie all'u-

tilizzo di sostanze collanti di origine sintetica; esistono però ricerche e studi che mirano alla produzione di pannellature con un grado maggiore di sostenibilità attraverso l’utilizzo di collanti “bio”.

Infine viene ricordato uno dei primi materiali porosi impiegati nel campo acustico, il feltro. Esso può essere realizzato in svariate alternative, densità, colori, spessori e applicato in diversi campi: moda, acustica, architettura, arredamento e automotive. Oggi, a causa della forte competizione economica, viene realizzato generalmente utilizzando fibre sintetiche, anche se sono presenti sul suolo italiano alcune realtà (vedi paragrafo 4.2) in cui viene prodotto ancora partendo da fibre di lana. Questo permette di unire al feltro tutti i vantaggi della lana precedentemente discussi, generando un prodotto naturale, biodegradabile, ecologico e con buone performance acustiche.

3

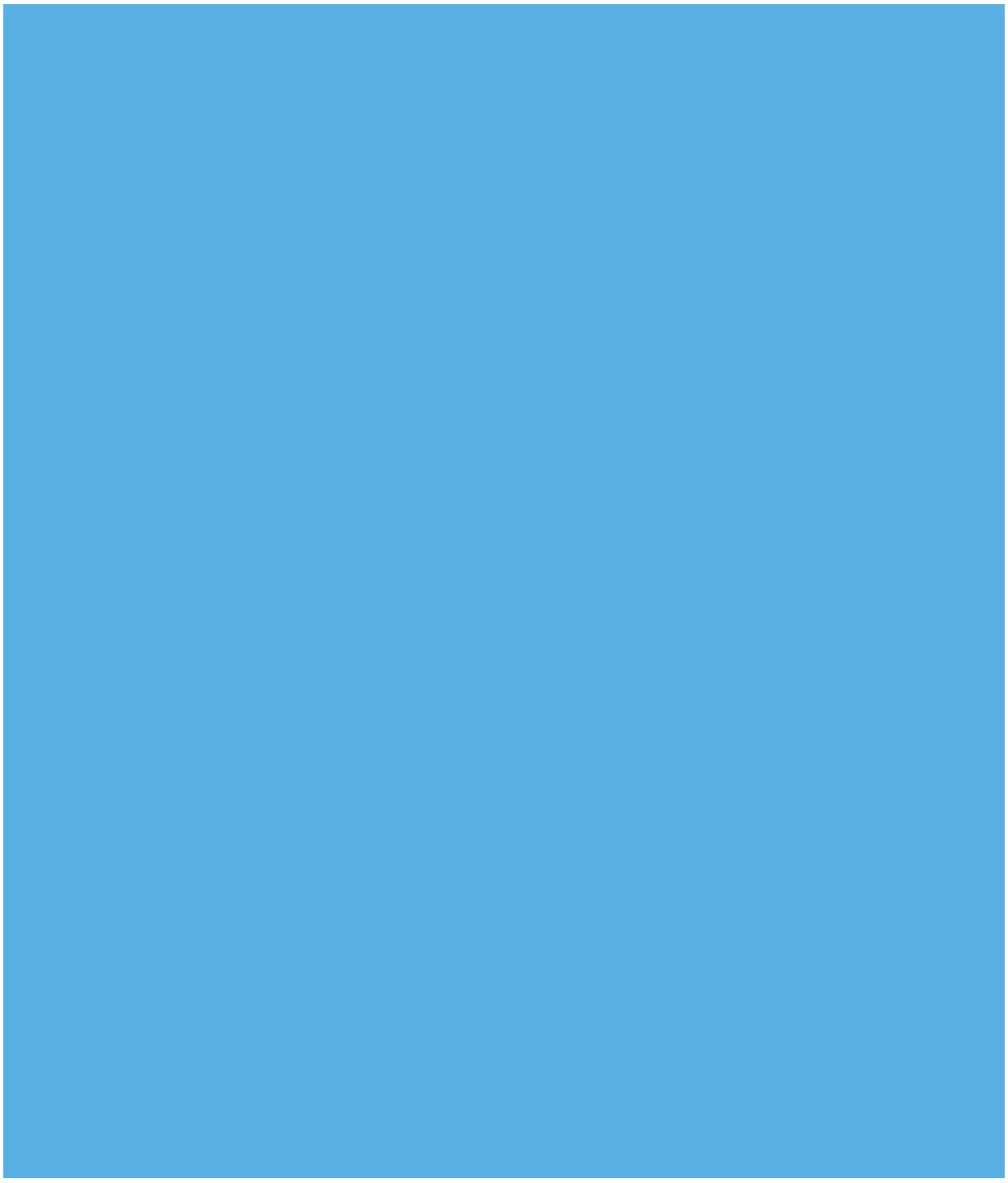
STATO DELL’ARTE: ESPERIENZE E SPERIMENTAZIONI PREGRESSE

- SCHEDA 1: Tiuca Ancuţa-Elena, *et. al, Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste*, in *Energy Procedia*, volume 85, Elsevier, 2015, pp. 559-565.
- SCHEDA 2: Drochytka Rostislav, *et. al, Performance Evaluation and Research of Alternative Thermal, Insulation Based on Waste Polyester Fibers*, in *Procedia Engineering*, volume 195, Elsevier, 2017, 236-243.
- SCHEDA 3: Buratti C., *et. al, Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization*, in *Energy Procedia*, volume 101, Elsevier, 2016, pp. 972-979.
- SCHEDA 4: Patnaik Asis, *et. al, Thermal and sound insulation materials from waste wool andrecycled polyester fibers and their biodegradation studies,* in *Energy and Buildings*,Elsevier, volume 92, Elsevier, 2015, pp. 161-169.
- SCHEDA 5: Islam S., *et. al, Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers*, in *International Journal of Clothing Science and Technology*, volume 30, Emerald, 2018, pp. 444-458.
- SCHEDA 6: Buratti C., *et. al, Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials*, in *Construction and Building Materials,* volume 171, Elsevier, 2018, pp. 338-349.
- SCHEDA 7: Tiuc Ancuta-Elena, et. al, *Sound Absorbing Insulating Composites Based onPolyurethane Foam and Waste Materials*, in *Materiale Plastice*, volume 55, Syscom 18, 2018, pp. 419-422.
- SCHEDA 8: Muthukumar N. , *et. al, Sound and thermal insulation properties of flax/low melt PET needle punched nonwovens*, in *Journal of Natural Fibers,* volume 16, Taylor & Francis, 2019, pp. 245-252.
- SCHEDA 9: Alcaraz Segura, *et. al, Sound absorption of textile material using a microfibres resistive layer*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 254, IOP, 2017.
- SCHEDA 10: Bessa J., *et. al, Multi-layer structures with thermal and acoustic properties for building rehabilitation*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* volume 254, IOP, 2017.
- SCHEDA 11: Trajković D., *et. al, Polyester apparel cutting waste as insulation material,* in *Journal of the Textile Institute,* volume 108, Taylor & Francis, 2017, pp. 1238-1245.
- SCHEDA 12: Zach J., *et. al, Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers,* in *Journal of Chemical Technology and Biotechnology,* volume 91, Wiley-Blackwell, 2016, pp. 2156-2161.
- SCHEDA 13: Lou C.-W., *et. al, Sound-absorbing and flame-retarding property of nonwoven compounded PU foam planks,* in *Journal of Engineered Fibers and Fabrics,* volume 10, Assoc Nonwo-

ven Fabrics Ind, 2015, pp. 29-38.
- SCHEDA 14: Iasnicu Iuliana, *et. al, The Analysis of sound Absorbing Performances for compisite Plates Containing Recycled Textile Wastes,* in *Sci. Bull.,* volume 78, U.P.B., 2016, pp. 213-218.
- SCHEDA 15: Ricciardi P., *et. al, Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment,* in *Applied Energy,* volume 134, Elsevier, 2014, pp. 150-162.
- SCHEDA 16: Bosia Daniela, *et. al, Sheep wool for sustainable architecture,* in *Energy Procedia,* volume 78, Elsevier, 2015, pp. 315 – 320.
- SCHEDA 17: Del Rey R., *et. al, Acoustic barriers made from textiles wastes and PET, in 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 [],* volume 5, 2013, pp. 4204-4208.
- SCHEDA 18: Pennacchio R., *et. al, Fitness: sheep-wool and hemp sustainable insulation panels,* in *Energy Procedia*, volume 111, Elsevier, 2017, pp. 287 – 297.
- SCHEDA 19: Echeverria Claudia A., *et. al, Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications,* in *Resources, Conservation & Recycling*, volume 143, Elsevier, 2019, pp. 1–14.
- SCHEDA 20: Jongkwan Ryu, *et. al, Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panel absorber on heavyweight floor impact sound in the building*, in *Building and Environment,* volume 139, Elsevier, 2018, pp. 1–7.
- SCHEDA 21: Desmond Daniel Vui Sheng Chin, *et. al, Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel(BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA),* in *Applied Acoustics,* volume 138, Elsevier, 2018, pp. 179–187.
- SCHEDA 22: Xiaoning Tang, et. al, *Facile dip-coating method to prepare micro-perforated fabric acoustic absorber,* in *Applied Acoustics,* volume 130, Elsevier, 2018, pp.133–139.

- https://www.scopus.com/home.uri, ultima consultazione il 20/01/19.
- https://www.researchgate.net/, ultima consultazione il 20/01/19.
- https://www.sciencedirect.com/, ultima consultazione il 20/01/19.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/



3.1 VALUTAZIONI ED ANALISI DI SPECIFICI CASI STUDIO

Lo scopo di questo capitolo deriva dalla volontà di comprendere e di realizzare una review sulla ricerca e sullo sviluppo di materiali fonoassorbenti porosi, con il fine di comprendere le problematiche, le tecniche, i processi e le potenzialità di questi prodotti. Come emerge dai paragrafi precedenti, ma non ancora esplicitato, la volontà di questo lavoro è la realizzazione di pannelli fonoassorbenti attraverso l'utilizzo di scarti tessili derivanti da industrie del territorio biellese. Risulta quindi comprensibile l'importanza di una valutazione di questo tipo in una fase di approccio alla questione.

L'analisi è stata condotta sui principali database inerenti al mondo della ricerca scientifica, quali Scopus[1], ResearchGate[2] e ScienceDirect[3] grazie ai quali sono state vagliate le pubblicazioni riferite a queste argomentazioni. Per via del continuo aggiornamento di queste realtà è doveroso premettere che l'analisi è stata condotta fra dicembre 2018 e gennaio 2019, quindi non si escludono eventuali recenti ricerche non catalogate.

In relazione al funzionamento di queste siti, sono state utilizzate delle keywords, fondamentali per individuare pubblicazioni congrue: recycled materials, waste, recycling, acoustic, sound absorption, refuse, panel, textile. La difficoltà in questa fase è consistita nel trovare ricerche in grado di tenere insieme i tre punti cardine del progetto, quello del riciclo, del tessile e del fonoassorbimento. Infatti, su migliaia di risultati ottenuti, solo un centinaio sono stati presi in considerazione e analizzati. In una seconda fase, tra i risultati ottenuti, ne sono stati selezionati 22, per ognuno dei quali è stata realizzata una schedatura, visionabile nella parte degli allegati (allegato A).

Viene mostrata, nella tabella 1, una schematizzazione delle 22 schedature elaborate, in cui vengono messe in evidenza le materie prime utilizzate ed eventualmente la matrice o la sostanza collante, la composizione e i principali risultati acustici.

Le singole pubblicazioni non verranno discusse e analizzate in questo percorso, poiché schedate, riassunte e raccolte nella sezione degli allegati A; inoltre non rappresenta l'obiettivo di tale capitolo. Seguirà invece una valutazione puntuale di tali schede, delle materie utilizzate e dei prodotti ottenuti, in modo da mettere in evidenza i relativi punti salienti.

Innanzitutto risulta difficile effettuare una valutazione acustica dei prodotti ottenuti, poiché le metriche riportate spesso non risultano confrontabili l'una con l'altra. Questo deriva dal fatto che ogni ricerca è stata

1_https://www.scopus.com/home.uri.
2_https://www.researchgate.net/.
3_https://www.sciencedirect.com/.

	MATERIE PRIME	COMPOSIZIONE di BASE	RISULTATI ACUSTICI
S. 1	Rifiuti tessili + schiuma poliuretanica rigida bicomponente	25% - 75%	α max: 0,86 [1000 Hz]
		40% - 60%	α max: 0,86 [800 Hz] - 0,6 NRC
S. 2	Scarti di produzione di polivinilcloruro plastificato con rinforzo maglia di poliestere	95 kg/m^3	α max: 0,99 [4000 Hz]
			α max: 0,95 [1000 Hz]
S. 3	carta straccia e tessuto fibre (18 mm)	-	α med: 0,39
	carta riciclata (10 mm)	-	α med: 0,32
	pannello in fibra di lana + strato di carta straccia (50 mm)	-	α max: 0,88 [4000 Hz] - α med: 0,59
S. 4	poliestere riciclato (RPET) + fibre di lana di scarto	DW 100%: fibre di lana	α max: 0,95 [2000-5700 Hz]
		RPET 100%: poliestere riciclato	α max: 0,81 [2000-5700 Hz]
		DWP 50%: fibre di lana DW + 50% RPET	α max: 0,95 [2000-5700 Hz]
S. 5	banbù - banana - canapa + PET + PP	11:35:30 (con agugliatura)	-
S. 6	Buccia di riso (35 mm) + poliuretano	poliuretano: 2,5%	α max:0,91 [5300 Hz]
S. 7	briciole di gomma riciclata + schiuma poliuretanica bicomponente	10% - 90%	α max: 0,99 [1000 Hz] - basse
	scarti di fibre di lino + schiuma poliuretanica bicomponente	10% - 90%	α max: 0,55 [1000 Hz] - medie
	fibre sintetiche riciclata + schiuma poliuretanica bicomponente	10% - 90%	α max: 0,69 [1200 Hz] - alte
S. 8	Fibre di lino + fibre di poliestere (PET)	80% - 20% (con agugliatura)	α max: 0,54 [6300 Hz]
S. 9	tessuto in microfibra (strato resistivo) + non tessuto in poliestere	strato tessuto + uno strato di 15 mm non tessuto	α max: 0,99 [1400 Hz]
		strato tessuto + uno strato di 15 mm non tessuto + strato tessuto	α max: 0,99 [900 Hz]
S. 10	A1: Non tessuto cotone + PES B1: sughero C1: Juta, C2: PET, C3: poliestere	A1 + B1 + C1	8,3 dB di riduzione a 500 hz
		A1 + B1 + C2	6,6 dB di riduzione a 500 hz
		A1 + B1 + C3	5,4 dB di riduzione a 500 hz
S. 11	rifiuti da taglio in poliestere (abbigliamento) + chiusura in tesssuti non tessuto in polipropilene	taglio 1	α max: 0,95 [2000 Hz] - 0,73 NRC
		taglio 2	α max: 0,90 [1000 Hz] - 0,70 NRC
		taglio 3	α max: 0,77 [1000 Hz] - 0,69 NRC
		taglio 4	α max: 0,88 [4000 Hz] - 0,54 NRC
S. 12	fibre di lino, cotone riciclato, poliestere riciclato, fibre bicomp. Poliestere	0 - 40 - 0 - 20	α max: 0,95 [1400 Hz] - α med: 0,60
		75 - 0 - 0 - 25	α med: 0,55
		0 - 0 - 80 - 20	α med: 0,55
S. 13	Fibra di Nylon (scarti cimossa) + fibre PET + schiuma poliuretanica bicomponente	60 - 20 - 20	α max: 0,83 [856 Hz]
S. 14	Scarti di fibbre tessili +	Placca in sughero 3 mm	α max: 0,54 [3200 Hz] - α med: 0,37
		Lastra di polistirolo 7 mm	α max: 0,51 [3200 Hz] - α med: 0,30
		Piastra di polietilene espanso 10 mm	α max: 0,63 [3200 Hz] - α med: 0,36
S. 15	Rifiuti di carta + scarti tessili polietilene	scarti tessili + carta 7 mm + scarti tessili	α max: 0,46 [2200 Hz] - α med: 0,30
		scarti tessili + carta 15 mm + scarti tessili	α max: 0,46 [1500 Hz] - α med: 0,38
S. 16	Lana di bassa qualità di scarto	-	α max: 0,85 [1600 Hz] - α med: 0,55
S. 17	Scarti tessili drivanti da cimossa (75% di fibre di cotone e 25% di puro poliestere) + PET	-	α max: > 0,9 [4000 Hz]
		+ pannello forato inox	α max: 0,89 [800 Hz]
S. 18	Lana di pecora di bassa qualità + Canapa	-	α max: 0,95 [800 Hz] - α med: 0,65
		+ rivestimento tessuto	α max: 1,00 [800 Hz] - α med: 0,75
S. 19	scarti di tessuto proveniente da abbigliamento	lana-acrilico	α max: 0,78 [6500 Hz]
		ana-poliestere	α max: 0,72 [6500 Hz]
S. 20	pannello forato in cartongesso + intercapedine 50 mm + lana di vetro 50 mm	foratura con diametro di 50 mm	α max: 0,6 [100 Hz]
		foratura con diametro di 25 mm	α max: 0,65 [140 Hz]
S. 21	fibra di kenaf + polimero biodegradabile (PLA)	30% - 70%	α max: 0,987 [1521 Hz]
		30% - 70% + air gap 30 mm	α max: 0,95 [800 Hz]
		30% - 70% + air gap 20 mm	α max: 0,91 [1000 Hz]
		30% - 70% + air gap 10 mm	α max: 0,98 [1500 Hz]
S. 22	Tessuto + Poliuretano a base acquosa	+ air gap 30 mm	α max: 0,95 [2200 Hz]
		+ air gap 20 mm	α max: 0,95 [1500 Hz]
		+ air gap 10 mm	α max: 0,95 [1000 Hz]

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle 22 schede elaborate, vedi allegato A.

condotta con analisi acustiche diverse, tubo di impedenza, modellazioni o test in camera, e con una valutazione dei risultati scelta in base agli scopi del progetto. Infatti emerge come in alcune schede vengano messi in evidenza i grafici di assorbimento acustico alle varie frequenze, in altri riportati solo i valori massimi, in altri casi ancora solo i valori medi, NRC oppure la riduzione in decibel a specifiche frequenze. Il confronto acustico può quindi essere effettuato solo su base interpretativa di questi dati.
Anche per quello che riguarda i processi, le tecniche, le operazioni e i passaggi per assemblare o generare i campioni non possono essere confrontati direttamente poiché ogni singolo studio parte da prodotti e possibilità diverse; inoltre queste fasi non vengono sempre esplicitate, a esclusione di alcuni casi isolati, e dunque diventa difficile capire e interpretare come sia avvenuto il passaggio dalla materia prima al provino.

Figura 1: Influenza delle fibre tessili sulle caratteristiche acustiche della schiuma poliuretanica, scheda 1, Tiuca Ancuţa-Elena, et. al, 2015, op. cit.

● Nella scheda 1 (figura 1) e nella 7 emerge come l'introduzione di fibre tessili in una determinata quantità, possa migliorare l'assorbimento acustico della schiuma poliuretanica[4]; tuttavia questo secondo composto oltre ad essere di origine petrolchimica, deve essere usato ex novo.

● Nella scheda numero 2 vengono utilizzati degli scarti di produzione, probabilmente dei sottoprodotti, con andamenti acustici tipici dei materiali porosi, i quali migliorano alle densità più alte.

● Emerge dalla scheda 3 come il provino composto con fibre di lana sia acusticamente superiore a quelli realizzati con altri tessuti ma nettamente inferiore alla fibra di vetro.

4_polimero, in cui la catena polimerica è costituita da legami uretanici, con aggiunta di componenti tensioattivi che permettono l'espansione di volume (http://www.treccani.it/vocabolario/poliuretano/).

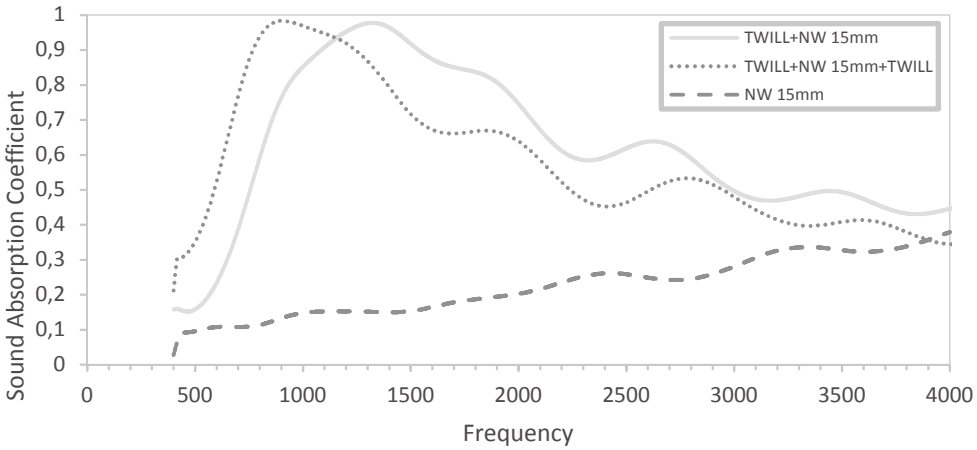


Figura 2: Esempio di variazione delle performance acustiche in funzione degli strati interni di un pannello multistrato, scheda 9, Alcaraz Segura, et. al, 2017, op. cit.

Anche nella scheda 19 i migliori risultati sono arrivati dai provini contenenti lana, in questo caso rispetto a materiali di scarto di altre tipologie come segatura, molluschi o lattice.

● Viene dimostrato nella scheda 4 come lane di diversa provenienza abbiano risultati acustici differenti, in particolare sono preferibili quelle con fibre più lunghe. Inoltre pannelli realizzati in RPET[5] risultano avere performance acustiche nettamente inferiori rispetto a quelli realizzati in lana.

● Nelle schede 5 e 8 viene suggerita una tecnica di produzione dei pannelli, l'agugliatura[6] con la quale si ottengono buoni assorbimenti

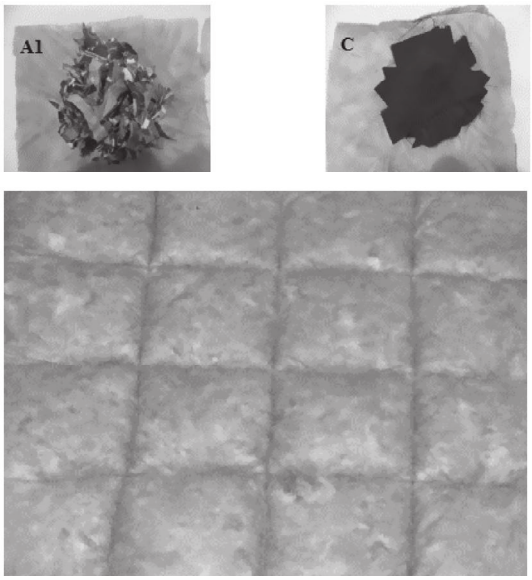


Figura 3: Scarti con tagli diversi all'interno di sacchi in PP, scheda 11, Trajković D., et. al, 2017, op. cit.

5_Polietilene tereftalato riciclato.

6_"Unione senza fili e cuciture: speciali aghi ad uncino si muovono verticalmente trasportando le fibre le une sulle altre, fissandole in una sintesi materica" (http://www.rica-mipuntoart.it/it/blog/2016/07/agugliatura-su-maglie-tessuti-e-non-tessuti).

solo alle alte frequenze, sopra ai 5000 Hz.

● Viene confermato nella scheda 6 come l'influenza della colla sia decisiva nel peggiorare le performance acustiche, rispetto al materiale sfuso, e come lo spessore aumenti l'assorbimento come da teoria.

● Il lino associato a schiume o a PET ha deboli proprietà fonoassorbenti, come mostrato nelle schede 7 e 8.

● Nelle schede 9 (figura 2), 10, 13 e 14 vengono elaborati dei pannelli multistrato: emerge come la combinazione di strati possa incrementare le proprietà acustiche rispetto all'utilizzo di un solo strato. Fondamentale è lo strato utilizzato sulla faccia esposta del pannello, anziché in quella posteriore, dove invece ha una influenza minima.

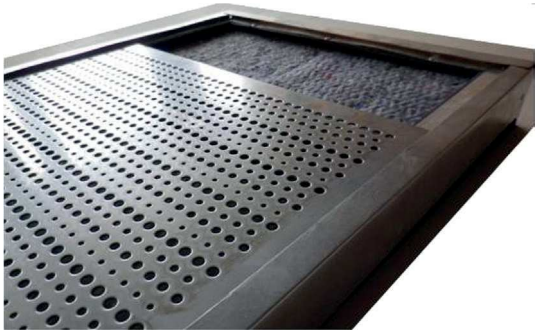


Figura 4: Applicazione di un materiale poroso e un assorbitore di Helmhotz , scheda 17, Del Rey R., et. al, 2013, op. cit.

● Particolare e soprattutto immediata è la soluzione applicata nella scheda 11 in cui scarti tessili in diverse percentuali vengono tagliati in forme diverse e inseriti all'interno di sacchetti in polipropilene (figura 3), con una notevole variazione dell'andamento acustico in funzione del taglio.

● A parità di materiali, fondamentale è la percentuale di combinazione di ognuno di

Figura 5: Lana di bassa qualità + canapa, aggregazione mediante il degrado della lana e il suo rilascio di creatina, scheda 18, Pennacchio R., et. al, 2017, op. cit.

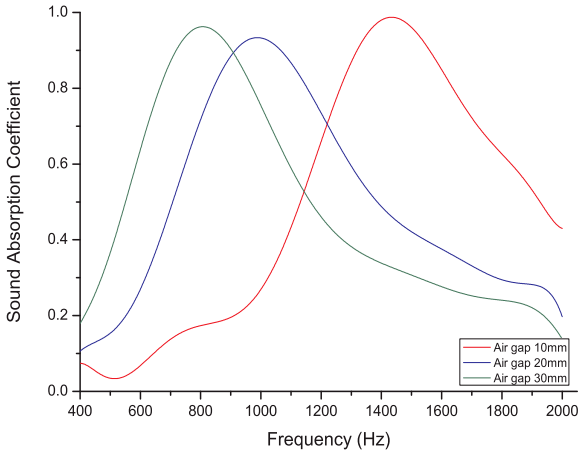


Figura 6: Variazione dell'assorbimento in funzione dell'air-gap, scheda 21, Desmond Daniel Vui Sheng Chin, et. al, 2018, op. cit.

essi poiché influisce sulla distribuzione in frequenza dell'assorbimento acustico, come emerge dalle schede 12 e 17.

● Interessante è il tentativo nella scheda 15 di avere un pannello completamente riciclato, ad esclusione della colla, a base di scarti tessili e carta, il quale però ha delle performance acustiche piuttosto basse.

● Nella scheda 16 viene utilizzata la lana sudicia esclusa dalle aziende per via della bassa qualità. Interessante è l'utilizzo di un collante ottenuto attraverso un degrado della lana stessa; il pannello rimane piuttosto flessibile. Nella scheda 18 vi è un perfezionamento della soluzione in questione, attraverso l'inserimento della canapa che conferisce maggiore rigidità al pannello come mostrato nella figura 5.

● A testimonianza di quanto scritto nel paragrafo 2.3, con riferimento al rivestimento dei materiali porosi, nelle schede 17 (figura 4) e 20 viene portato un esempio in cui vengono uniti i vantaggi dell'assorbimento dei materiali porosi a quelli dell'assorbitore di Helmhotz per un pannello ad uso esterno.

● In alternativa ai polimeri tradizionali viene suggerito nella scheda 21 il PLA[7] come polimero biodegradabile.

● Viene valutato nella scheda 21 (figura 6) e 22 come l'inserimento e la modifica dello spessore di un air-gap[8] fra pannello e superficie possa contribuire a migliorare le performance acustiche, come suggerito inoltre nel paragrafo 2.3.

Nonostante queste sperimentazioni avessero il fine di produrre e valutare i relativi risul-

7_"Acido polilattico, poliestere termoplastico ottenuto a partire dal mais" (https://www.tuttogreen.it/acido-polilattico-pla/).
8_ Letteralmente "vuoto d'aria", inserito fra pannello e superficie, in alternativa dell'aumento di spessore del pannello.
9_ Life-Cycle Assessment, analisi del ciclo di vita.

tati acustici, in molte di esse sono stati eseguiti altri test e misure, in particolare quelle per valutare le proprietà termiche (36%), la resistività all'aria e la permeabilità (20%), resistenza al fuoco (14%) e la biodegradabilità (14%). Inoltre su un numero ridotto è stata effettuata un'analisi LCA[9], misure sulla tossicità, sull'umidità e una valutazione delle proprietà meccaniche.

Le densità utilizzate per la produzione di questi materiali porosi in generale variano da 30 a 150 Kg/m^3, e all'interno di ogni sperimentazione, ove testato, la variazione della densità pregiudica le performance acustiche.

Si nota che i test acustici effettuati sono stati eseguiti solo per il 20% in camera riverberante e per il restante 80% nel tubo di impedenza. Inoltre tra i prodotti misurati in camera riverberante, il 40% è stato prima testato nel tubo di impedenza.

3.2 CONSIDERAZIONI: PUNTI CRITICI E PUNTI DI FORZA DEI CASI STUDIO ESAMINATI

In accordo con la volontà di questo capitolo, l'analisi presentata risulta fondamentale per capire soprattutto le problematiche, le lacune, i punti di forza e i punti critici dai quali partire per scegliere quale direzione intraprendere in merito alla realizzazione di pannelli fonoassorbenti.
Innanzitutto risulta evidente come gli scarti tessili siano oggetto di grande attenzione e di come essi siano largamente sfruttati in queste sperimentazioni con risultati positivi. Nello specifico la lana emerge per le sue ottime prestazioni acustiche, come evidenziato nel paragrafo 2.3, sia utilizzata in combinazione con altri materiali, in genere sintetici, sia utilizzata da sola. Affiorano però una serie di problemi non del tutto superflui. Come prima cosa la lana se utilizzata senza una matrice rigida, con l'utilizzo di sola colla, non è in grado di generare un pannello semirigido o rigido. Per conferire ad essa una rigidità maggiore deve essere assemblata insieme ad altri materiali, quali polimeri o schiume, o attraverso elementi come delle basi in sughero, in legno, in metallo o in cartone. Un altro problema rilevante è costituito dalle sostanze sintetiche impiegate nella realizzazione: esse vengono utilizzate ex novo, costituendo un controsenso in relazione al fine di riciclo e sostenibilità dichiarato da molte ricerche; in altri casi, benché si utilizzino sostanze di origine petrolchimica, queste deri-

vano da processi di riciclo, allungando la vita utile del prodotto.
Emerge quindi come sia complesso trovare una matrice con la quale assemblare la lana: essa infatti dovrebbe derivare da un prodotto riciclato, o eventualmente uno scarto aziendale, oppure se non riciclato dovrebbe, perlomeno in ambito di sperimentazione, come emerge in alcune ricerche, seguire la filosofia della sostenibilità e dell'economia circolare. Inoltre si conviene sul fatto che manchi un pannello rigido con queste caratteristiche, poiché con queste basi sono stati prodotti solo pannelli semirigidi. Non è da escludere anche la fornitura di lana riciclata, poiché la lana sudicia scartata dalle aziende risulta avere una lunga serie di problematiche, mentre gli scarti aziendali vengono attualmente venduti come sottoprodotti.

Si segnala la bassa percentuale di provini testati acusticamente in camera riverberante. Le complessità possono essere individuate nell'avere la disponibilità della camera stessa e nelle difficoltà produttive nel realizzare pannelli con dimensioni di gran lunga superiori. A tal proposito dovrebbe essere valutato il passaggio da provino cilindrico, di pochi centimetri di diametro, a un pannello di dimensioni maggiori, poiché potrebbero generarsi delle nuove variabili: la coesione a dimensioni maggiori potrebbe non essere la medesima.

Infine nella formazione di un pannello dovranno essere valutatati attentamente: la densità del prodotto e il suo controllo, poiché da essa le prestazioni acustiche possono subire importanti variazioni; inoltre la tipologia e la percentuale dei materiali utilizzati, nonché l'eventuale sequenza dei pannelli in un multistrato.

Non si esclude la possibilità di valutare altri aspetti del pannello come suggerito da questa ricerca. Alcuni riguardanti le caratteristiche proprie, poiché sebbene acusticamente siano performanti devono rispondere anche a ulteriori esigenze, quali la resistenza al fuoco, la biodegradabilità, resistenza meccanica, comportamento all'umidità e la misura di sostanze tossiche. O ancora aspetti e caratteristiche, come quelle termiche, importanti per garantire determinate prestazioni.

4

LA MATERIA PRIMA: ORIGINI, PRODUZIONE E FORNITURA DEGLI SCARTI INDUSTRIALI

- Dansero E., Caldera V, *Green economy e tessile: chi passa per la cruna dell'ago*, Università degli studi di Torino, 2012, pp. 9-66.
- Fiorina S., Tesi di laurea magistrale, *ReCashplaster Recycled Cashmere for plaster*, Politecnico di Torino, 2018, pp. 2-46.

- *https://www.reda1865.com/it/,consultato il 2/08/2019.*
- *https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/, consultato il 2/08/2019.*
- *https://www.informazione-aziende.it/13_INDUSTRIE-TESSILI/Provincia_BIELLA?qPgGeo=1#luogo, consultato il 2/08/2019.*

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

4.1 LANIFICIO SUCCESSORI REDA 1865

Figura 1: Logo, Reda 1865.

La storia di Reda inizia nel 1865 in una valle del biellese, Valle Mosso, oggi Valdilana, quando l'industriale Carlo Reda trasforma un vecchio mulino in un lanificio. Nel 1919 la famiglia Botto Poala acquisisce l'azienda, portandola a diventare un'eccellenza nella produzione di lana Merino di altissima qualità. Da sempre fortemente legata al territorio, per il quale nutre un profondo rispetto, e agli artigiani locali, formati da una storica cultura della lana, ha superato le avversità del tempo, e, attraverso le generazioni, alla passione e alla continua innovazione, senza mai dimenticare le proprie radici, è divenuta il punto di riferimento del Made in Italy, sia sul suolo italiano sia a livello internazionale.

Reda si è da sempre impegnata nel campo della sostenibilità, dimostrandosi una eccellenza unica, nutrendo un forte rispetto per l'ambiente e per l'uomo, rinnovando i processi e gli impianti, rispettando le risorse, abbattendo gli impatti e i consumi, attraverso il controllo di tutta la sua filiera, dal vello al prodotto finito.
Nel suo cammino verso la sostenibilità, grazie al suo impiego in questo campo, a innovazioni come l'istallazione di impianti foto-

Figura 2: Facciata del nuovo stabilimento Reda a Valdilana, aperto nel 2001, dichiarando espressamente la linea guida aziendale, https://www.reda1865.com/it/.

voltaici per abbattere le immissioni di $C0^2$, a sistemi di depurazione dell'acqua e migliori condizioni di lavoro, nel 2004, è il primo lanificio a ottenere la certificazione EMAS [1].

L'impiego in questo campo è continuato dedicandosi anche nel migliorare le condizioni delle fattorie e degli allevatori da cui viene acquistata la materia prima, salvaguardando l'ambiente e il benessere degli animali. Nel 2013 ottiene la Traceability and Fashion, che garantisce il controllo integrale su tutta la filiera produttiva. Nel 2018 viene effettuata l'analisi LCA, al fine di valutare e garantire il minor impatto ambientale della sua produzione. Un ulteriore passo in avanti avviene nel 2019, in cui viene prodotta la Dichiarazione Ambientale del Prodotto (EPD) divenendo un punto di riferimento per le aziende del settore.

1_"EMAS, Eco-Management and Audit Scheme, è un sistema a cui possono aderire volontariamente le imprese e le organizzazioni, sia pubbliche che private, aventi sede nel territorio della Comunità Europea o al di fuori di esso, che desiderano impegnarsi nel valutare e migliorare la propria efficienza ambientale" (http://www.isprambiente.gov.it/it/certificazioni/emas).

4.1.1 IL CICLO PRODUTTIVO DEL LANIFICIO REDA

Come anticipato, la qualità dei tessuti Reda è merito anche di un profondo controllo capillare dell'intera filiera produttiva, dal vello al tessuto finito, e di un processo produttivo che si svolge interamente in Italia. Il percorso inizia con una accurata selezione della materia prima, scegliendo la lana più pregiata, con un diametro medio della fibra di 17,5 micron (per le caratteristiche chimiche vedi allegato B). Nel 1975 per la prima volta viene acquistata lana australiana, garantendo all'azienda la produzione di tessuto di qualità, inoltre nel 1993 viene acquistata la prima fattoria in Nuova Zelanda, dove vengono allevate pecore per la produzione di lana Merino.

Il vello (figura 3) giunge quindi alla Pettinatura di Romagnano, in provincia di Vercelli, dove viene perlustrato e pettinato generando nastri chiamati tops (figura 4). Arrivati

Figura 3: Vello, lana di pecora, https://www.reda1865.com/it/.

Figura 4: Tops dopo la fase di pettinatura e tintoria, https://www.reda1865.com/it/.

nello stabilimento principale di Valdilana, i tops approdano nel reparto di tintoria dove incontrano il colore: il processo avviene in un bagno acquoso nel quale vengono disciolti i coloranti, gli ausiliari e i prodotti chimici fondamentali per una corretta fissazione del colorante sulla fibra. Il materiale tessile e il bagno, vengono mantenuti in costante movimento reciproco, seguono un adeguato ciclo termico formato da una fase di riscaldamento, da una fase di mantenimento ad alta temperatura (85-98° C) e da una fase di raffreddamento. La prima fase ha lo scopo di far migrare il colorante dal bagno acquoso alla fibra, la seconda di uniformare la distribuzione del colorante sulla medesima e l'ultima di rendere possibile lo scarico della merce. Le operazioni successive sono quelle di centrifugazione (solo per le rocche) necessarie per eliminare la maggior parte dell'acqua che impregna il materiale, e di asciugatura, effettuata in essiccatoio ad aria calda e con apparecchi a radiofrequenza. I tops colorati passano al reparto di filatura dove pettinatrici, melangiatrici e rings, riducono il nastro a un sottile filo. In base alle specifiche esigenze produttive i processi di tintoria e di filatura risultano trasversali.

Il filo viene in seguito accoppiato e intrecciato con altri fili nella fase di ritorcitura, per produrre il filato. Questo viene poi disposto in modo longitudinale nel reparto di orditura, per incontrare la trama nella fase di tessitura, dando vita al tessuto. Esso però non è ancora completo, risulta infatti ancora grezzo, e dopo un controllo e una correzione dei difetti nella fase di rammendo, passa in finissaggio, o nobilitazione, per subire una serie di trattamenti che ne determinano le carat-

teristiche finali del prodotto. In funzione del relativo utilizzo finale le operazioni possono essere le seguenti: tintoria, ripercorrendo alcune delle fasi già illustrate: bruciapelo, con lo scopo di eliminare la peluria superficiale attraverso una rapida combustione; lavaggio e follatura, con lo scopo di eliminare tutte le impurità presenti sul tessuto attraverso un macchinario a bagno acquoso con detergente e di ottenere la compattazione dell'intreccio del tessuto, cosa che viene effettuata con opportuna azione meccanica sul tessuto umido; con l'operazione di asciugatura il tessuto viene fatto essiccare, attraverso il mantenimento del medesimo ad una temperatura relativamente elevata per un tempo prefissato; con la cimatura viene rasato il pelo sulla superficie del tessuto a una altezza prestabilita, attraverso l'azione di tamburi e di coltelli rotanti; il decatissaggio, che può essere in autoclave o atmosferico, ha lo scopo di fissare la struttura del tessuto attraverso l'azione di vapore, a temperatura e tempo di trattamento adeguato; il vaporissaggio ha il fine di rilassare il tessuto e riprenderne la struttura attraverso l'azione di vapore.

A questo punto il tessuto (figura 5), con una quantità media di 1.882.000 Kg/anno, in seguito a un controllo finale, completato il suo ciclo produttivo, viene stoccato in magazzino per essere pronto a soddisfare il mercato internazionale dei tessuti di lusso Made in Italy.

Figura 5: Tessuto al termine del ciclo produttivo, https://www.reda1865.com/it/.

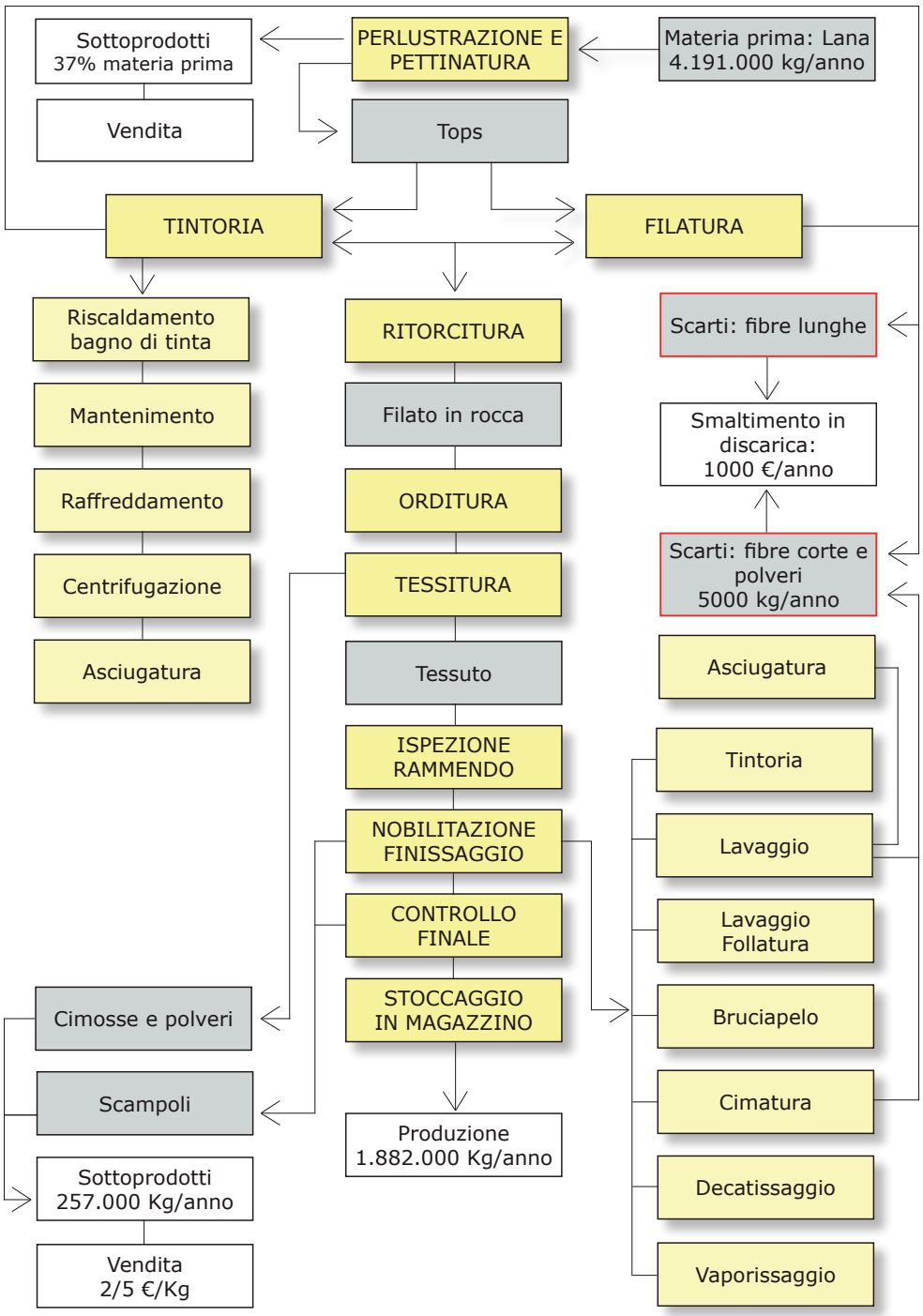


Figura 6: Flow chart, ciclo produttivo Lanificio Successori Reda 1865.

4.1.2 GLI SCARTI INDUSTRIALI DEL LANIFICIO REDA

Come illustrato nel primo capitolo, l'industria del tessile produce una vasta quantità di scarti aziendali, variabile a seconda dei processi, dei macchinari e dalla materia prima utilizzata. Anche il Lanificio Reda, produce quantità di scarti industriali non indifferenti, poiché risulta essere un'industria con l'intero ciclo produttivo e quindi necessita di numerose operazioni. Tuttavia l'azienda, come emerge nell'introduzione, si adopera da sempre nella sostenibilità e crede nei principi dell'economia circolare. A testimonianza di questo, negli ultimi anni, di tutti gli scarti prodotti, solo lo 0,5% viene smaltito come rifiuto, mentre la restante parte viene valorizzata e venduta come sottoprodotto.

Ripercorrendo il processo produttivo verranno ora considerati e analizzati gli scarti prodotti, come illustrato nella figura 6.
Dalla Pettinatura di Romagnano, dove giunge la lana grezza, si ha una prima importante fonte di scarto, infatti dei 4.191.000 Kg/anno circa il 37% viene scartato, dato che si traduce in circa 1.550.600 Kg/anno. Questo scarto viene venduto come sottoprodotto per produrre il "pudding", che attraverso una pressatura del materiale viene impiegato nei riempimenti di abbigliamento tecnico invernale. La parte restante viene poi processata nello stabilimento principale. Una seconda importante fonte di scarto, non per quantità ma per tipologia, deriva dalla tintoria dei tops e dalla filatura, dove vengono prodotti scarti di fibre lunghe, fibre corte e polveri. Questi scarti, uniti a quelli generati nei processi di tintura e di cimatura nel reparto di finissaggio, sono quantificabili in 5.000 Kg/anno; tali prodotti per via della loro tipologia e la loro composizione sono gli unici che non vengono venduti come sottoprodotti: risultano quindi rifiuti e vengono smaltiti in discarica con un costo per l'azienda di circa 1.000 €/anno (figure 8 e 9).

Altri scarti rilevanti si ottengono dalle varie fasi di produzione, in particolare in tessitura dove vengono prodotte cimosse, polveri e fibre corte e in finissaggio dove vengono prodotti scampoli. Questi vengono rivenduti completamente come sottoprodotti, a un prezzo variabile dai 2 ai 5 €/kg, i quali verranno sfilacciati e filati in altre filiere. La quantità di questi scarti è di circa 257.000 Kg/anno, identificabile come il 10% della materia prima che arriva nello stabilimento (figura7).

Il risultato di tale analisi, se confrontato con altre realtà tessili del territorio, è piuttosto anomalo, e dimostra come Reda costituisca una rarità per quanto riguarda il suo approccio sostenibile nella gestione degli scarti. Dall'analisi effettuata su 13 aziende tessili biellesi (paragrafo 1.4) si ricorda infatti come

esse producano rifiuti a base di polvere, di diversa tipologia e provenienza, per una quantità di circa 700.000 Kg/anno, numero estremamente elevato se confrontato con i rifiuti dell'azienda in questione. Tuttavia si sottolinea che nonostante l'adesione di Reda alla filosofia del riciclo legata alla volontà di vendere i propri sottoprodotti, ve ne sia ancora uno a base di polveri e fibre corte (sebbene in modeste quantità) la cui ricerca, da parte del responsabile della sostenibilità e delle materie prime, di una filiera presso cui destinarlo, non si è ancora conclusa.

Figura 8: Scarti, fibra corte e polveri, Lanificio Reda.

Figura 7: Sottoprodotti, Lanificio Reda.

Figura 9: Scarti, fibre lunghe, Lanificio Reda.

4.2 FELTRIFICIO BIELLESE

Figura 10: Logo, Feltrificio Biellese. https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/

Il Feltrificio Biellese viene fondato a fine degli anni 50, nello stabilimento di Quaregna, in provincia di Biella. Grazie alla tradizione, alla qualità dei prodotti e ai servizi offerti l'azienda è divenuta leader internazionale in questo settore.

Il feltro risulta "uno dei tessuti più antichi esistenti in commercio e le tecniche di lavorazione si sono tramandate nei secoli giungendo a noi pressoché invariate" [2] . Inoltre è il più naturale dei prodotti attualmente sul mercato, nasce da una pregiata materia prima come la lana, la cui fibre attraverso dei processi di calore, pressione e all'utilizzo dell'acqua, tendono a saldarsi l'una con l'altra, dando vita a questo prodotto.

La collocazione nel polo laniero italiano, Biella, ha permesso al Feltrificio di avere a disposizione le lane più pregiate al mondo, fondamentali per produrre manufatti di altissima

2_https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/, consultato il 2/08/2019.

Figura 11: Feltro, tipologie, https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/.

qualità. Proprio grazie a questa caratteristica fondamentale, l'azienda riesce a contrastare la crescente competizione economica del feltro sintetico, caratterizzato da una bassa qualità, un costo inferiore e produzioni intensive.

Per merito delle sue caratteristiche, nonché della possibilità di essere agevolmente accoppiato ad altri materiali e tagliato e modellato in qualsiasi forma, ha trovato impiego in diversi settori: "industria conciaria, arredamento, automotive, industria siderurgica, guarnizioni e articoli industriali, industria calzaturiera, dischi per pulitura e levigazione marmi e metalli, pirotecnici, sottoselle" [3].

La crescente domanda negli ultimi anni in settori come il design, l'architettura e l'arredamento, ha portato allo sviluppo, grazie alla continua innovazione tecnica e alla ricerca di materie prime, di feltri con diverse colorazioni, spessori e densità.

3_https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/, consultato il 2/08/2019.

4.2.1 IL CICLO PRODUTTIVO DEL FELTRIFICIO BIELLESE

La produzione dei manufatti del Feltrificio avviene completamente presso il proprio stabilimento. Per via di politiche aziendali, per motivi di privacy e spionaggio industriale, non è stato possibile entrare nel dettaglio del processo produttivo. I feltrifici che basano la produzione sulla lana, escludendo quindi quelli che lavorano materie prime sintetiche, sul nostro territorio e in ambito internazionale sono un numero molto limitato, ciò giustifica la volontà di proteggere il ciclo produttivo, i macchinari e i segreti dell'azienda.

Come illustrato dal flowchart nella figura 15, il primo passaggio consiste nella miscelazione della materia prima, la lana (figura 12). Essa deriva da un'accurata selezione di lane pregiate provenienti dalla Nuova Zelanda, dall'Australia e dall'Italia. Queste sono ca-

Figura 12: Miscelazione lana, https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/.

ratterizzate da un diametro della fibra da 20 a 28 micron, a differenza di quelle utilizzate da Reda, aventi un diametro medio di circa 17,3 micron. Seguono le fasi di cardatura e il successivo assemblaggio dei veli, in base alle caratteristiche richieste (figura 13). A questo punto il materiale può essere infeltrito per passare in seguito alla fase di follatura. Nel reparto di finissaggio il prodotto subisce una serie di lavorazioni in base alla tipologia del feltro richiesto, quali la tintura, il taglio ed altri trattamenti superficiali specifici. In seguito al controllo finale il feltro è pronto per essere stoccato in magazzino e appagare la richiesta dei clienti (figure 11 e 14).

Figura 13: particolare del ciclo produttivo, https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/.

Figura 14: Feltro, al termine del processo produttivo, https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/.

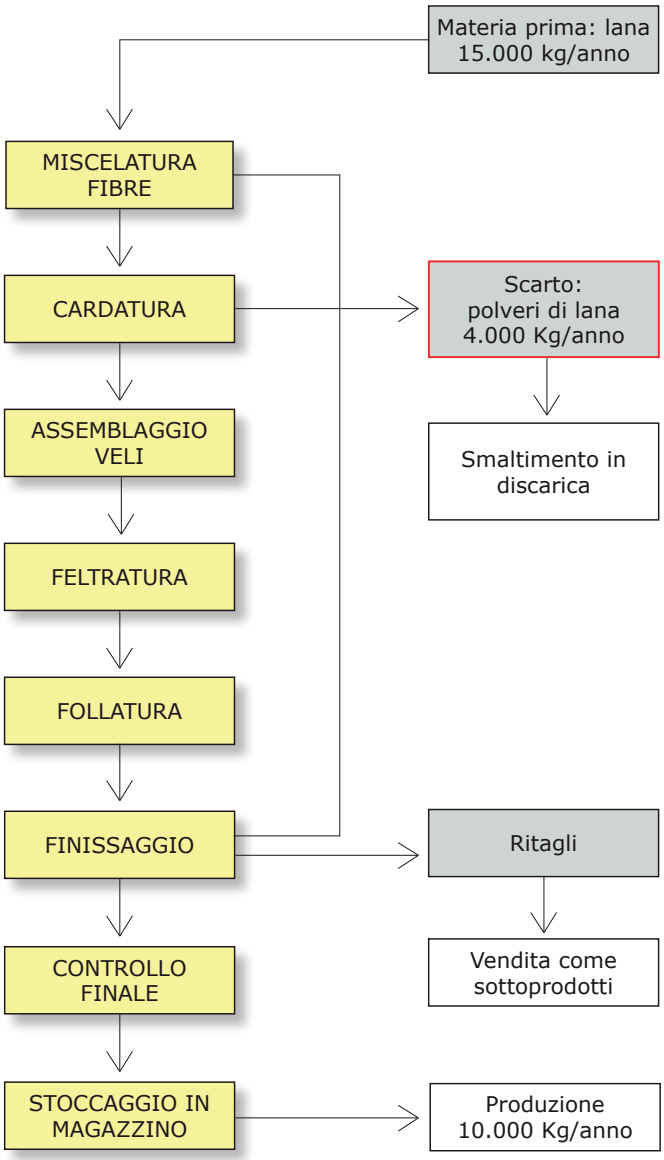


Figura 15: Flow chart, ciclo produttivo Feltrificio Biellese.

4.2.2 GLI SCARTI INDUSTRIALI DEL FELTRIFICIO BIELLESE

Il processo produttivo risulta diverso da quello dei lanifici e delle aziende tessili biellesi, che, come ripetuto, hanno un'ingente produzione di scarti. Tuttavia anche in questa realtà vengono restituiti una serie di scarti durante la produzione. Essi sono sostanzialmente di due tipologie: i ritagli derivati dalle operazioni di finissaggio, i quali vengono venduti come sottoprodotti per essere valorizzati in successivi processi, e le polveri (figura 16). In particolare le polveri derivano da diversi reparti e processi: miscelatura fibre, feltratura, finissaggio e soprattutto cardatura. Queste come quelle prodotte da Reda (anche se di diversa tipologia poiché non trattate a dall'aspetto più grezzo) e quelle trattate nel paragrafo 1.4, sono dei rifiuti che vengono smaltiti in discarica, con un costo per l'azienda. La loro quantità è stimata in circa 4.000 Kg/anno, e, considerato una produzione di 15.000 Kg/anno, il dato risulta piuttosto elevato.

Figura 16: Scarti, fibre corte e polveri Feltrificio Biellese.

4.3 FIBRE CORTE E POLVERI DI SCARTO: DA PROBLEMA A OPPORTUNITÀ

Come emerso in questi capitoli esiste uno scarto aziendale prodotto in elevate quantità, le fibre corte e le polveri, che non possono essere vendute come sottoprodotti, poiché, per via delle loro dimensioni non possono essere riprocessati. Diventano in questo modo un rifiuto per le aziende, le quali devono smaltirlo con codice 040222, rifiuti da fibre tessili lavorate, in apposite discariche, con relativi costi, i quali possono arrivare fino a 1,50 €/kg.

Neanche il Lanificio Reda, che da sempre si adopera nel riciclo (del totale degli scarti prodotti solo lo 0,5% è considerato rifiuto), riesce a smaltire 5.000 Kg/anno di questo prodotto. A questi si aggiungono i 4.000 kg/anno del Feltrificio Biellese e quelli delle tredici aziende analizzate nel lavoro di Simone Fiorina[4] (considerando il dato relativo alle sole fibre corte e polveri):

- Ripettinatura Porrino, Quaregna: 7.000 Kg/anno;
- Filatura Astro, Vigliano Biellese: 220.000 Kg/anno;
- Filatura di Pollone, Pollone: 20.000 Kg/anno;
- Filatura Bertoglio, Biella: 2.500 Kg/anno; Marchi & Fildi, Biella: 110.000 Kg/anno;
- Lanificio Fratelli Piacenza, Pollone: 14.370 Kg/anno;
- Maglificio Maggia, Occhieppo Superiore: 2.000 Kg/anno;
- Iniziative Industriali, Valdengo: 8.000 Kg/anno;
- Tintoria finissaggio 2000, Masserano: 40.480 Kg/anno;
- Finissaggio & Tintoria Ferraris, Biella: 2.000 Kg/anno;
- Sfilacciatura di Verrone, Verrone: 210.000 Kg/anno;
- De Martina Bayart & Textfibra, Verrone: 40.000 Kg/anno.

Il totale di questi rifiuti, polveri e fibre corte di diversa tipologia, e di diverso materiale, è di circa 700.000 Kg/anno: questo dato mette subito in risalto il volume di materiale portato in discarica e la rispettiva perdita economica da parte delle aziende coinvolte. Inoltre si basa su un campione limitato, il 2,5% delle 614 aziende oggi attive sul territorio biellese, il che porterebbe, estrapolando il dato con le dovute approssimazioni, tenendo quindi in considerazione solo lanifici, tessiture, finissaggi e maglifici [5], a oltre 15 milioni di rifiuti di questo tipo (figura 17).

4_Fiorina S, 2018, op. cit.

5_Escluse dal calcolo secondo dati ICRIBS, le aziende e le produzioni che non prevedono scarti, considerando un totale di 450 aziende (https://www.informazione-aziende.it/13_INDUSTRIE-TESSILI/Provincia_BIELLA?qPgGeo=1#luogo, consultato il 2/08/2019).

Attualmente, eccetto qualche studio di applicazione nel campo dell'architettura e del design e nel campo dell'automotive, non esistono possibilità concrete di riutilizzo.
Probabilmente la causa risiede nella difficoltà di creare e progettare processi che giustifichino il riciclo di un materiale di questo tipo o nel fatto che il mercato non abbia ancora intuito le possibilità di questa risorsa.
La colpa quindi non è tanto da attribuire alle aziende per l'inevitabile produzione di questo scarto, quanto nella difficoltà da parte di imprenditori, ricercatori, università e aziende stesse, nel riconoscere in questo elemento una risorsa da poter sfruttare e su cui poter investire.

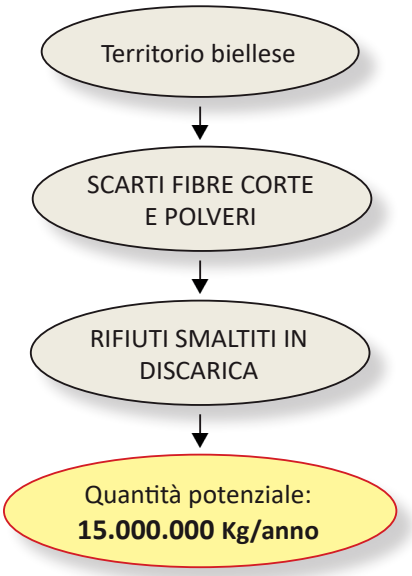


Figura 17: Quantità potenziali di rifiuti, a base di fibre corte e polveri, prodotti nel territorio biellese in un anno.

5

I MATERIALI LEGANTI

- *http://www.antichitabelsito.it/colle.htm, consultato il 20/04/2019.*
- *https://www.coccoina.it/, consultato il 25/04/2019.*
- *https://www.creartec.de/, consultato il 28/04/2019.*
- *https://www.ilcercartigianodiqualita.it/it/attivita/549-verniciatura-industriale-sassone-sas, consultato il 28/04/2019.*

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

5.1 LA RICERCA DELLA MATRICE RIGIDA

Emerge, dal capitolo 2, come il tessile, e in particolare la lana, dimostri ottime performance di assorbimento acustico, nelle sue diverse applicazioni, in particolare in ambito poroso, caratteristica ampiamente confermata da numerosi studi.

Inoltre nel capitolo 3 viene sottolineato, a fronte di un lavoro di ricerca, come in diverse sperimentazioni l'utilizzo dei tessuti, anche riciclati, vada a migliorare l'assorbimento acustico in varie applicazioni.

Con queste premesse, nel capitolo 4 è stata trovata e individuata la materia prima che sta alla base di questa sperimentazione, mirata allo studio e allo sviluppo di pannelli fonoassorbenti. La materia prima è polvere di lana scartata dalle aziende, considerata come un rifiuto di produzione e smaltita in discarica, con relativi costi e danni ambientali. Nello specifico essa viene fornita dal Lanificio Reda e dal Feltrificio Biellese, ma, come evidenziato, potenzialmente le quantità di scarti di polveri sul territorio biellese potrebbero essere davvero elevate.
Risulta intuitivo come sia fondamentale trovare a questo punto una matrice o una sostanza collante per generare i pannelli. Il punto di inizio per la ricerca, è costituito da alcuni tra i risultati emersi dallo studio di 22 sperimentazioni di questo tipo effettuate in ambito internazionale (paragrafo 3.2).
Prima di avviare un ragionamento sulle colle, si sottolinea la possibilità di realizzazioni di tipo meccanico, senza l'utilizzo di ulteriori materiali. Queste consistono nell'agugliatura, nella feltratura e nella produzione di sacchetti o cuscini. La prima soluzione è una tecnica mediante la quale si genera del tessuto non tessuto attraverso l'azione meccanica di un macchinario formato da una serie di aghi che si muovono intrecciando le fibre. I dubbi relativi a questa tecnica sono legati alla possibilità di utilizzare le fibre di lana prescelte e alla difficoltà nel produrre un elemento rigido. Anche nel secondo caso, la feltratura, il principale dubbio sorge in merito alla possibilità di utilizzo delle polveri per tale scopo. Con la terza soluzione si fa invece riferimento all'utilizzo delle polveri come riempimento all'interno di sacchetti o di cuscini. In questo caso deve essere attentamente valutata la copertura di tali prodotti, poiché potrebbe avere una forte incidenza sulla valutazione economica e variazioni delle capacità fonoassorbenti. Potrebbe per esempio essere utilizzato un sottoprodotto adatto a tale fine, e come tale venduto a un prezzo minimo da Reda.

Queste soluzioni, così come quelle che si andranno ad elencare in seguito, verranno applicate, e utilizzate, nei limiti delle possibilità

di questo progetto, nel capitolo dedicato alla sperimentazione.

Le sostanze collanti utilizzate per conferire coesione alle fibre tessili, tendenzialmente hanno originato pannelli flessibili, non del tutto adatti al nostro fine. Inoltre in queste sperimentazioni sono sempre state utilizzate fibre lunghe, caratterizzate da un grado di aggregazione maggiore rispetto alle polveri di lana con le quali andremo ad operare. Emerge come unica soluzione per generare un pannello rigido l'utilizzo di una struttura o una base rigida a supporto delle fibre o in alternativa l'utilizzo di una matrice in grado di conferire rigidità, come l'impiego di schiume o prodotti di origine polimerica.
In un ragionamento come quello affrontato fino ad ora, l'utilizzo di una sostanza di questo tipo, non risulterebbe una soluzione ottimale a causa della sua origine petrolchimica e del fatto che debba essere acquistata. Ciò nonostante, potrebbe essere utilizzata comunque una sostanza simile ma derivante da un processo di riciclo. La problematica consiste nel fatto che queste sostanze una volta applicate non possano essere riutilizzate poiché perdono il loro principio attivo e non funzionano più come agenti incollanti. A seguito di una attenta indagine sul territorio biellese è stato individuato un particolare scarto aziendale in grado di superare queste

Figura 1: Scarti di produzione: polimeri.

questioni; tale scarto, il quale verrà approfondito nel paragrafo successivo, è un rifiuto aziendale, ordinariamente smaltito in discarica che consiste in polimeri termoindurenti, del tipo poliestere (vedi figura 1 e scheda tecnica, allegato C).

Considerata in base alla possibilità di sfruttare la differenza di temperatura di fusione dei materiali, questa tipologia di scarto unita alla polveri di lana sembra dunque un ottimo punto di partenza per la successiva sperimentazione; sia per quello che riguarda la fornitura del materiale, essendo questo riciclato, sia, come emerge dalla schedatura, per le sue buone caratteristiche acustiche. L'unico punto critico può essere identificato nel fine vita di tale materiale: nonostante il suo riciclo, al termine della sua vita utile dovrà essere smaltito in discarica. Si può comunque pensare ad ulteriori possibilità di riciclo, come l'utilizzo di parte di esso nel-

Figura 2: PLA in polvere.

la fabbricazione di nuovi prodotti, oppure come riempimento o imbottiture. In alternativa, come emerge dalla ricerca, possono essere utilizzati dei polimeri biodegradabili. Il loro vantaggio risiede nell'avere un fine vita ecocompatibile, ma il fatto che non possano essere riciclati implica dei costi per l'acquisto; una valutazione economica dovrà eventualmente verificarne la loro convenienza. Nella fase sperimentale i polimeri biodegradabili verranno presi in considerazione, ma per via delle loro difficoltà di applicazione, potrebbero non essere analizzati.

In definitiva attraverso l'utilizzo dei polimeri congiuntamente alle fibre di lana, si potrebbe generare un pannello al 100% riciclato, con elementi di origine sintetica e un fine vita da valutare, ma con possibilità di sviluppo e perfezionamento, come la sostituzione dello scarto con polimeri biodegradabili, come il PLA (polimero dell'acido lattico, figura 2).
A questo punto è stata ritenuta conclusa, per quello che riguarda questo lavoro, la parte relativa alla ricerca di una matrice rigida di origine polimerica, lasciando comunque ampi spazi di miglioramento, in eventuali approfondimenti futuri, con altre tempistiche, collaborazioni e possibilità.
Per conferire rigidità alle polveri di lana, la riflessione è tornata sulle sostanze collanti, le quali però non avevano dato buoni risultati a livello di tenuta meccanica. In seguito a una serie di incontri con ricercatori, imprenditori ed esperti nel settore si è valutato come attraverso l'utilizzo di colle sarebbe stato possibile raggiungere una determinata rigidità strutturale.

L'analisi si è sviluppata a partire dall'esclusione di tutte le colle di origine sintetica, prendendo in considerazione solo quelle di origine naturale, vegetale o animale, in modo tale da poter eventualmente smaltire il pannello attraverso un processo sostenibile.

In primo luogo, è stato valutato l'utilizzo dell'amido, il quale, grazie alla sua composizione ricca di glucosio, è noto per avere buone qualità collanti. In particolare, come vedremo nel capitolo successivo, si è scelto

di sperimentare l'amido di mais, per via del costo commerciale relativamente basso (circa 3,50€/kg). Questa scelta porterebbe alla realizzazione di pannelli parzialmente riciclati e completamente biodegradabili, ma con un costo della materia prima, se pur basso, da sostenere in caso di produzione a livello industriale.

Con un profondo sforzo di ricerca, grazie anche al contributo della start-up RiceHouse, è stato riconosciuto un prodotto in grado di superare le incertezze relative all'amido di mais. Grazie alla loro profonda conoscenza del riso, della filiera produttiva e dei relativi scarti, è stato individuato nell'acqua di bollitura derivante dalla preparazione del riso precotto, un potenziale prodotto. Quest'ultima presente in abbondanti quantità, secondo recenti informazioni, viene parzialmente scartata dalle aziende. Diventa un elemento potenzialmente interessante per via delle sue proprietà collanti, essendo ricca di amido (in analogia al caso dell'amido di mais). Ne potrebbe derivare un pannello al 100% naturale, completamente riciclato e biodegradabile, risolvendo quindi tutte le problematiche riscontrate fin ora.

Potenzialmente l'ultima soluzione risulta fortemente interessante dovrà comunque essere analizzata e sperimentata per valutare la fattibilità e le relative performance acustiche.

Figura 3: Colla Oko Naturkleister, Creartec, https://www.creartec.de/.

Tuttavia questa soluzione, come quella basata sull'amido di mais, porterebbe a generare delle colle prodotte in ambito sperimentale, delle quali non si avrebbero conoscenze specifiche in ambito chimico. In campo spe-

Figura 4: Colla Coccoina, Balma, Capoduri & C. s.p.a, https://www.coccoina.it/.

rimentale abbiamo dunque vagliato altre possibilità, allargando la nostra ricerca verso colle commerciali, diffuse e ampiamente utilizzate, ma sempre di origine naturale. Questo ulteriore approfondimento, non viene svolto per migliorare le ottime potenzialità dell'amido di riso, comunque ancora da valutare, ma per effettuare un confronto acustico fra diversi collanti dei quali si ha la certezza del loro effettivo funzionamento come tali e delle rispettive proprietà.

Le colle commerciali di origine naturale presenti sul mercato, risultano in numero limitato, in ambito di ricerca oppure presentano costi elevati. Sono stati individuati due prodotti: con uno sguardo al passato la colla Coccoina prodotta da Balma, Capoduri & C. s.p.a (figura 4) con un costo commerciale di circa 40 €/Kg e una colla di origine tedesca, Oko Naturkleister, prodotta dall'azienda Creartec (figura 3), con un costo commerciale di 90 €/Kg. La prima è una "colla a base di destrina di fecola di patate in acqua senza l'utilizzo di solventi" [1] (vedi scheda tecnica, allegato D), la seconda viene prodotta con destrina, zucchero e glicerina, derivanti da amido di mais e fecola di patate (vedi scheda tecnica, allegato E).

1_https://www.coccoina.it/, consultato il 25/04/2019.

Verranno entrambe unite alle fibre di lana, valutando eventualmente le differenze con le colle generate in ambito sperimentale.

La ricerca è proseguita con un occhio al passato, attraverso un'analisi delle colle animali, le uniche utilizzate fino agli anni 30', quando furono affiancate e presto sostituite da quelle sintetiche e viniliche, che garantivano una maggiore facilità d'uso. Queste sono individuabili nella colla d'ossa o colla forte (figura 5), ricavata dai cascami di coniglio, nella colla di pesce, ottenuta dalla vescica natatoria di pesce, e nella colla di coniglio (figura 6), anch'essa derivata da cascami di coniglio, con un procedimento diverso. Nei secoli furono utilizzate nel campo artistico (in particolare la colla d'ossa,) come base per produrre vernici, leganti pittorici, stucchi e preparazioni di fondi e nel campo della falegnameria artigianale. Oggi, per via della loro preparazione lunga e difficoltosa, vengono quasi esclusivamente utilizzate nel restauro, al fine di rispettare la tradizione e il manufatto. Le capacità collanti derivano dal collagene contenuto in esse. Sono completamente naturali e biodegradabili e si possono trovare ancora in vendita tramite siti specializzati, inoltre hanno un prezzo vantaggioso rispetto alle colle commerciali precedentemente analizzate, con un costo che oscilla fra i 10 e i 20 €/kg. Anche con questi collanti, oppor-

Figura 5: Colla d'ossa.

Figura 6: Colla di coniglio.

tunamente uniti alle fibre di lana, verranno composti dei provini, al fine di completare l'analisi; gli eventuali pannelli saranno dunque parzialmente riciclati ma al 100% naturali, biodegradabili e, a differenza delle colle naturali commerciali, con un costo notevolmente minore.

Non si esclude che in fase di sperimentazione, o in futuro, vengano prodotti dei campioni testando altre colle o alte sostanze, in base all'evoluzione della stessa. Infatti al fine di valutare la fattibilità e di effettuare un confronto completo, verrà preso in considerazione un materiale sintetico, ampiamente diffuso nell'acustica e nel campo edile, il gesso, e una colla generata in ambito sperimentale a base di glicerina.
Tutti questi prodotti elencati, da quelli polimerici alle diverse tipologie di colle, risultano dei potenziali candidati: solamente quando verranno applicati nella fase di sperimentazione con le polveri di lana, verrà valutata la loro coesione, il loro funzionamento, le rispettive caratteristiche e proprietà acustiche, attraverso una serie di campioncini proposti a densità differenti. Nonostante l'evoluzione e il ragionamento su un così ampio numero di collanti, rimane valida l'idea iniziale, che individua l'amido di riso come migliore soluzione applicabile, perlomeno in teoria e secondo le informazioni attuali.

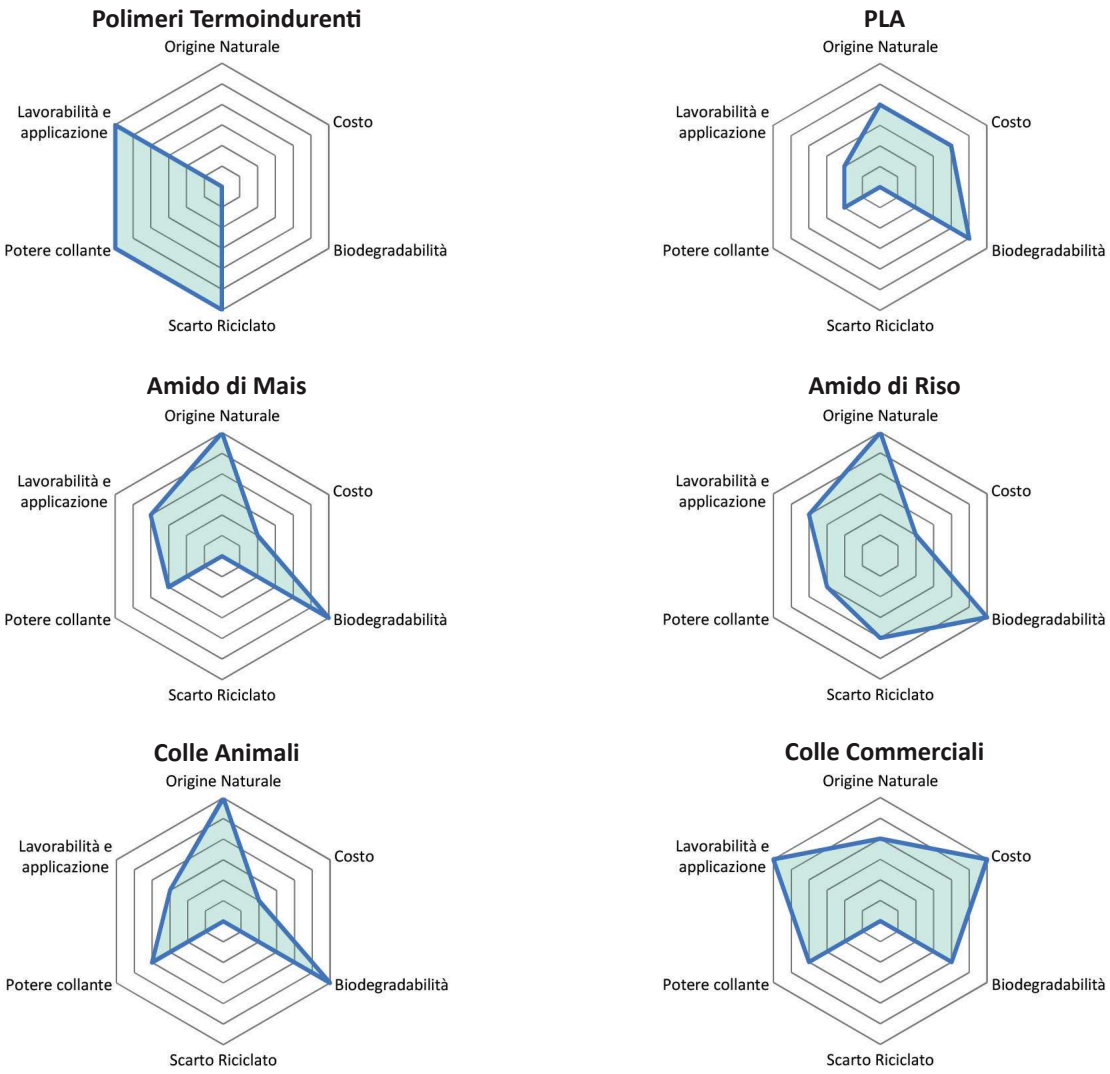


Figura 7: Diagrammi di Kiviat, confronto delle sostanze collanti amalizzate.

Attraverso l'utilizzo dei diagrammi di Kiviat (figura 7) è stato possibile eseguire le valutazioni esplicitate in questo paragrafo, per capire le potenzialità e le criticità dei prodotti collanti analizzati. In particolare sono state prese in considerazione le seguenti caratteristiche: l'origine naturale del collante, il relativo costo, la biodegradabilità a fine vita, l'eventuale provenienza da scarti di produzione, il potere collante, e la semplicità di lavorazione, preparazione ed applicazione.

5.2 VERNICIATURA INDUSTRIALE SASSONE

L'azienda viene fondata nel 1993 nel comune biellese di Cossato, specializzandosi fin da subito nella verniciatura a polveri. Grazie agli investimenti tecnologici, a un impianto moderno e all'esperienza maturata, la Verniciatura, oggi, è un punto di riferimento locale, che garantisce prodotti e trattamenti di alta qualità.
La Verniciatura Sassone, attraverso la verniciatura a polveri, è in grado di ricoprire qualsiasi superficie metallica e non solo, con un'ampia varietà di finiture e di trattamenti, in base alle richieste, alla tipologia di lavoro e allo scopo del trattamento.

La scelta di puntare su un trattamento a polveri, rispetto a una verniciatura a liquido più tradizionale, deriva dai numerosi vantaggi, e da una costante attenzione verso la salvaguardia dell'ambiente. Si tratta di un procedimento a secco che non richiede l'utilizzo di solventi altamente inquinanti e di ingenti quantità d'acqua; le polveri, grazie a sistemi di aspirazione, vengono completamente recuperate. A differenza dei solventi, dannosi e nocivi per l'uomo, le polveri utilizzate negli ultimi anni sono classificate non pericolose inoltre i tempi di lavorazione sono più veloci, richiedono un minore fabbisogno energetico e il trattamento risulta più duraturo con un film dalle qualità superiori.

5.2.1 IL CICLO PRODUTTIVO DELLA VERNICIATURA SASSONE

Il ciclo produttivo della verniciatura a polveri si discosta molto da quello più lungo e complesso di una verniciatura a liquido, ampiamente più diffusa. Esso è infatti basato su pochi passaggi, come emerge dal flowchart relativo all'azienda in questione (figura 9).

La Verniciatura Sassone si basa su un impianto di tipo statico, in cui i processi sono svolti in successione, a differenza di un impianto automatico in cui le lavorazioni si svolgono in modalità continuativa. Inoltre, per via delle dimensioni, e del contesto in cui lavora si parla di un processo a perdere, nel quale le polveri disperse e recuperate finiscono all'interno di appositi filtri e contenitori (figura 8), in modo indifferente in base al trattamento. Esistono realtà in cui lo scarto invece viene suddiviso in base al trattamento e alla colorazione, per essere successivamente riutilizzato all'interno del processo: sono aziende con un bacino di utenze differenti, con richieste di uno stesso servizio in relazione a tempistiche maggiori. Nell'azienda selezionata ogni singolo supporto, in base alla richiesta, subisce un trattamento diverso, e non risulta possibile svuotare l'impianto e i filtri a ogni singola applicazione.

Fondamentale in questo processo è la preparazione del supporto da trattare: esso deve essere ripulito da ogni impurità, da ossidi e

Figura 8: Particolare del sistema di aspirazione e di filtraggio delle polveri.

dalla presenza di sostanze oleose. Il supporto può quindi subire un processo di sabbiatura per asportare lo strato superficiale di materiale, o di fosfograssaggio. Dopo essere stato asciugato con aria calda è pronto per la verniciatura a polveri. Quest'ultima su un processo elettrostatico per il quale le polveri, a base di poliestere, vengono caricate negativamente e attratte sul supporto caricato positivamente. Si genera così un film omogeneo. Il supporto ricoperto di polveri viene trasportato per mezzo di appositi carrelli sospesi, nel forno di cottura. Questo forno grazie alle sue elevate dimensioni, 700x300x300 cm, può ospitare elementi di notevole grandezza. All'interno, attraverso un ciclo termico di riscaldamento, dai 30 ai 60 minuti a 180°C, le polveri si rammolliscono per poi polimerizzare generando una finitura organica sul supporto. Una volta raffreddato e visionato il prodotto può essere consegnato al cliente: in media vengono complessivamente trattati circa 36.000 m^2 di superficie all'anno.

Tuttavia in particolari applicazioni, ove è richiesto un trattamento per supporti soggetti ad ambienti aggressivi, la prima verniciatura e relativa cottura consistono nell'applicazione di un fondo zincante, per essere nuovamente verniciato e trattato termicamente nella seconda applicazione, dove viene finito con il trattamento richiesto.

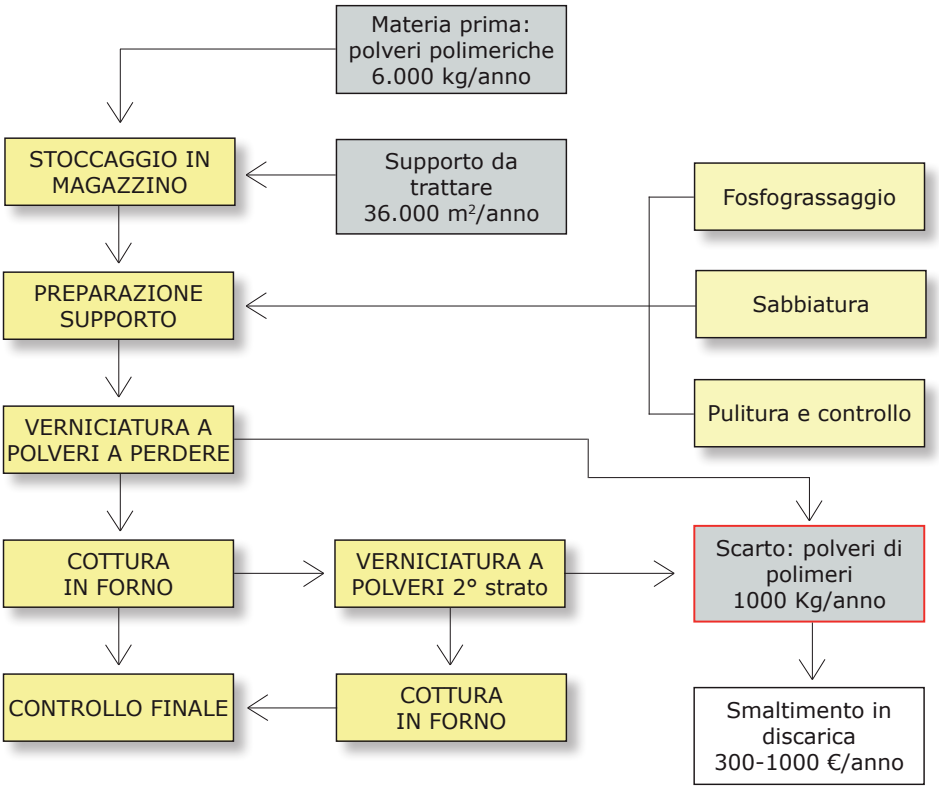


Figura 9: Flow chart, ciclo produttivo Verniciatura Industriale Sassone.

5.2.2 LO SCARTO INDUSTRIALE DELLA VERNICIATURA SASSONE: LE POLVERI POLIMERICHE

Lo scarto, prodotto dalla Verniciatura Sassone (figura 10), deriva completamente dalla fase di applicazione del prodotto tramite il processo elettrostatico: le polveri spruzzate attraverso apposite pistole, non finiscono totalmente sul supporto ma si disperdono all'interno della cabina di applicazione. Essa è dotata di appositi sistemi di aspirazione e filtrazione che permettono di recuperare tali polveri all'interno di appositi contenitori. Essendo questo un sistema a perdere, le polveri, di diverse tipologie e colorazioni, finiscono per miscelarsi all'interno dei contenitori, rendendone impossibile il loro riutilizzo.
Lo scarto è quantificabile in circa 1.000 Kg/anno, che rispetto ai 6.000 Kg/anno di polveri utilizzate come materia prima è del tutto significante. Per questo scarto attualmente non esistono soluzioni di riciclo: è una polvere polimerica difficile da trattare per altri scopi, viene quindi smaltita come rifiuto in discarica, con costi da parte dell'azienda.

Figura 10: Scarto derivante dal ciclo produttivo della Verniciatura Industriale Sassone.

Lo scarto prodotto, tuttavia non è ancora stato trattato termicamente, quindi la polvere che viene recuperata è ancora in possesso di tutte le caratteristiche proprie del materiale e quindi potenzialmente utilizzabile; l'unico inconveniente risulta la colorazione, che a causa della miscelazione assume una tonalità tendente al grigio.
Lo scarto, rifiuto per l'azienda, risulta del tutto assimilabile alla materia prima: polvere di poliestere, a livello chimico un polimero termoindurente. Nell'esempio della scheda in allegato, riferita a uno dei vari prodotti a base di polvere, la sua denominazione è la seguente: tetradecil-trimetil-ammonio-bromuro, e come evidenziato il preparato non è classificato pericoloso ai sensi delle direttive

di legge (vedi scheda tecnica, allegato C).

Come emerso nel paragrafo precedente, questo scarto potrebbe essere un punto di inizio e un riferimento per la sperimentazione di pannelli fonoassorbenti a base di lana in polvere riciclata. Sebbene sia un prodotto sintetico, risulta uno scarto aziendale classificato come rifiuto e smaltito in discarica, quindi il suo riutilizzo permetterebbe di realizzare dei pannelli riciclati al 100%, con tutti i vantaggi e le criticità evidenziate nel paragrafo 5.1.

6

SPERIMENTAZIONE A: PROGETTO E SVILUPPO DI PRODOTTI FONOASSORBENTI PER LA REALIZZAZIONE DI PANNELLI RIGIDI

- *http://www.antichitabelsito.it/colle.htm, consultato il 20/04/2019.*
- *https://stilenaturale.com/, consultato il 28/04/2019.*

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

6.1 INPUT E OUTPUT PROGETTUALI: I PRINCIPI GUIDA E LE ASPETTATIVE DELLA SPERIMENTAZIONE

Per poter valutare e analizzare la fattibilità del progetto, è doveroso esplicitare a monte della sperimentazione quelli che sono stati gli impulsi che hanno condotto e guidato attraverso determinate scelte. Essi, come emergerà nelle conclusioni a fine capitolo, costituiscono i principi su cui si compone TECA panel. Questi derivano dalla ricerca, dalle analisi, dalle valutazioni e collaborazioni largamente espresse nei capitoli precedenti.

Il primo elemento, fondamentale in questa analisi, fa riferimento all'industria tessile e al problema degli scarti post-industriali: nello specifico a quelli che attualmente non vengono valorizzati in altri processi, divenendo rifiuti per le aziende e di conseguenza un costo per le stesse. Per la società essi non presentano nessuna potenzialità, pongono anzi, il problema dello smaltimento in discarica: questo progetto sottolinea il contrario, dimostrando come invece rappresentino una risorsa sfruttabile. Le motivazioni che spingono ad identificare questi prodotti come risorse sono molteplici e riguardano aspetti di tipo ambientale, economico, e legati alla sostenibilità nelle sue diverse declinazioni. Il riciclo di tali scarti avverrebbe nel pieno rispetto della circolar economy, permettendo a questi ultimi di essere reimmessi nel ciclo produttivo con il fine di costituire un prodotto diverso rispetto a quello precedente, nell'ambito architettonico e del design. Assumerebbero quindi un valore maggiore, o uguale, realizzando un up-cycling del materiale stesso. All'interno dell'economia circolare, alla ricerca di un ciclo chiuso del processo, il modello cradle to cradle risulta di forte ispirazione: esso dipenderà dalla matrice utilizzata, e come si evince dai capitoli precedenti, porterà all'individuazione di soluzioni promettenti. Questi principi promuovono una corretta visione di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Tali propositi nascono dalla constatazione, della presenza di considerevoli quantità di scarti tessili, nel territorio biellese (polo lanifero riconosciuto a livello mondiale). Infatti è proprio in relazione alla lana che emerge un secondo elemento fondamentale, quello acustico. Negli ultimi anni, la richiesta di migliorare il comfort acustico è un trend in forte crescita, sia nel campo pubblico che in quello privato, e può essere soddisfatta attraverso la manipolazione dell'ambiente interno, con il fine di trovare un delicato equilibrio in relazione alla destinazione d'uso (un ristorante, una sala conferenze, un teatro o una scuola). Proprio la lana, materia prima impiegata in questo progetto, risulta avere buone proprietà ed elevati assorbimenti acustici. Quindi perché non comporre un pannello fonoas-

sorbente per risolvere questi problemi?

Si deduce che questi elementi trovino una certa armonia, l'uno con l'altro, l'acustica risponde a un'esigenza territoriale, nel rispetto della sostenibilità, attraverso l'impiego di un materiale dalle ottime performance acustiche.

Questi input (figura 1) possono trovare risposta in TECA panel, un pannello rigido fonoassorbente studiato per il controllo acustico degli ambienti interni, composto da materiali riciclati, con la possibilità di essere a sua volta riciclato e di avere proprietà biodegradabili. Inoltre la ricerca considera costantemente anche l'aspetto economico in quanto tale prodotto non mira solo ad essere competitivo sul mercato, ma anche ad essere estremamente vantaggioso. Molti pannelli riciclati, aventi caratteristiche simili, pur non raggiungendo tali livelli, presentano un

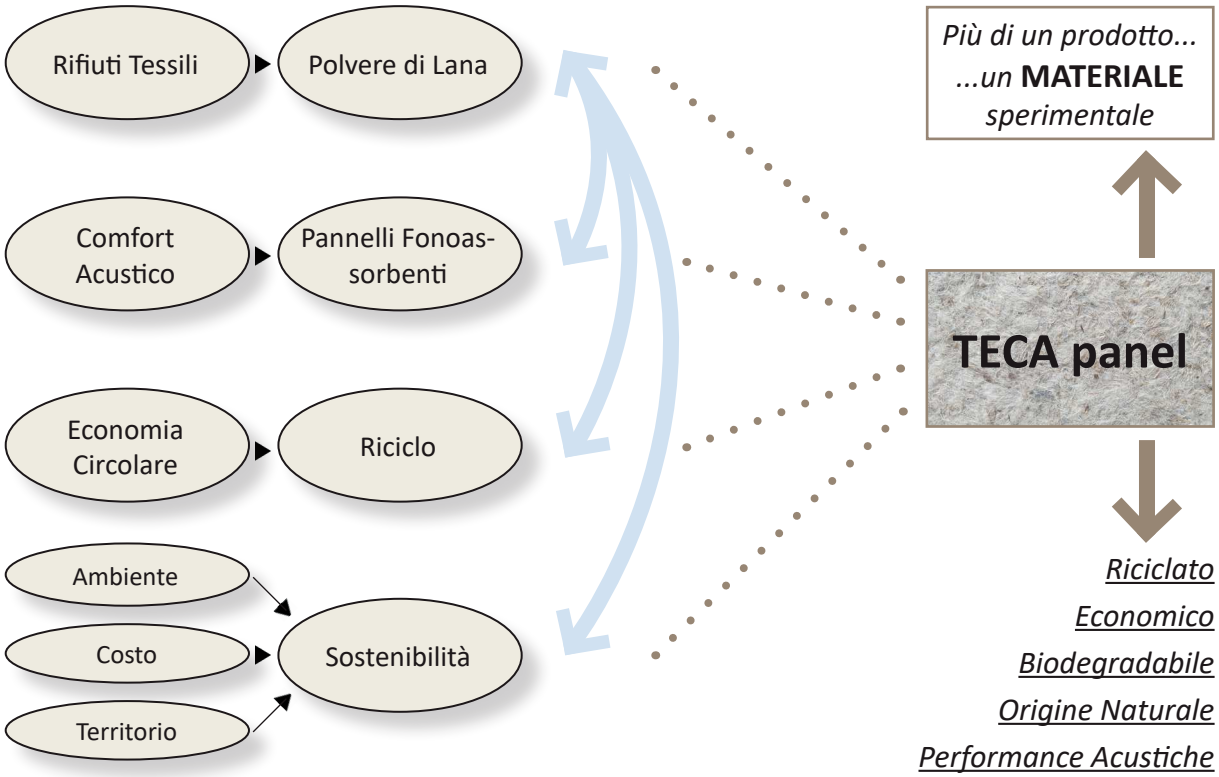


Figura 1: Input e output progettuali.

prezzo di mercato elevato, giustificato dall'etichetta "bio", che li connota come prodotti che "aiutano" l'ambiente. Questo va contro ogni logica, poiché grazie a queste caratteristiche i prezzi dovrebbero essere più contenuti e vantaggiosi, incentivando l'acquisto e l'utilizzo di siffatta tipologia di prodotti.

TECA Panel, acronimo di Textile Experimental Composite Acoustic, individua nel suo nome alcune caratteristiche e alcuni aspetti del progetto. Il pannello su cui verte la ricerca, sarà basato sul tessile, in particolare su scarti di polveri di lana, unite ad altre sostanze, e per questo sarà un prodotto composito. Il pannello sarà caratterizzato da un punto di vista acustico, che ne definirà la composizione, l'analisi e l'evoluzione nei paragrafi successivi. Con il termine experimental viene fatta una premessa: il progetto è una sperimentazione e in quanto tale porterà a dei risultati, ma non è scontato che questi siano esclusivamente positivi; in ogni caso da essi si potranno trarre delle conclusioni, utili per futuri sviluppi di questo prodotto o di prodotti simili. Inoltre non è stabilita l'unicità dello stesso, infatti non si esclude la possibilità di comporre diversi assemblaggi, con caratteristiche diverse e applicazioni che si potrebbero discostare parzialmente da quella individuata.

6.2 MIX DESIGN: LA COMPOSIZIONE DEI PROVINI

In questo capitolo verrà intrapresa la vera e propria sperimentazione, in cui, sulla base di quanto scritto fino ad ora, prenderanno concretamente forma i provini. Nello specifico essi saranno composti, come illustrato in seguito, da un mix di scarti selezionati del Lanificio Reda, (vedi paragrafo 4.1.2) e dalle matrici analizzate nel capitolo 5. Inoltre verranno sperimentate delle prove meccaniche in alternativa all'utilizzo delle colle. Tutti i test eseguiti verranno riportati nelle prossime pagine, in modo puntuale e dettagliato, per mostrare il lavoro effettuato in maniera trasparente e permettere una eventuale ripetibilità: verranno esplicitati i processi, le tecniche, le quantità e le "ricette" eseguite. Non si escludono tuttavia delle variabili che potrebbero influire sull'assemblaggio dei provini, derivanti dalle metodologie del processo. Scopo di questa sperimentazione è la ricerca del mix design ideale, in grado di assolvere a tutti gli input e output descritti nel paragrafo precedente. In particolare verrà valutata la fattibilità del processo, il dosaggio, il rapporto, il grado di aggregazione, la variazione di densità e delle caratteristiche fisiche, le tecniche di produzione, le differenze tra i vari composti e i risultati di ogni applicazione.

Si sottolinea inoltre che, nonostante le solide radici sulle quali si sviluppa il progetto,

non esistano sperimentazioni simili nel campo e in particolare nell'utilizzo degli scarti di polveri: pertanto non si ha a disposizione un background sul quale basare il mix design. Esso deriverà dalla sperimentazione, dalla composizione e dall'esperienza nata attraverso innumerevoli prove e processi.

I provini saranno caratterizzati da un nome, composto da una lettera iniziale e da un numero successivo. La lettera rappresenta la serie di appartenenza, in funzione della matrice o della colla utilizzata. Ad esclusione delle prove meccaniche, sono state prodotte un totale di 12 serie. Il numero indica, all'interno di ogni singola serie presa in considerazione, la variazione del mix design.

Viene di seguito riportato un elenco di tutte le serie composte con le relative materie prime utilizzate, in modo tale da fornire un riepilogo generale delle sperimentazioni descritte prossimi capitoli.

- ***Prove e applicazioni meccaniche:*** pressatura; agugliatura; feltratura; cuscini.
- ***Serie A:*** fibre Reda + scarti di polimeri termoindurenti.
- ***Serie B:*** fibre Reda + colla di amido di mais.
- ***Serie C:*** fibre Reda + colla di amido di riso.
- ***Serie D:*** fibre Reda + tessuto in poliestere.
- ***Serie E:*** fibre Reda + PLA.
- ***Serie F:*** fibre Reda + colla "Coccoina".
- ***Serie G:*** fibre Reda + colla di coniglio "Liberon".
- ***Serie H:*** fibre Reda + colla di pesce.
- ***Serie I:*** fibre Reda + colla d'ossa "Zeus".
- ***Serie L:*** fibre Reda + colla idrorepellente a base di glicerina.
- ***Serie M:*** fibre Reda + Colla naturale "Creartec eco-friendly".
- ***Serie N:*** fibre Reda + gesso scagliola.

6.2.1 METODI MECCANICI PER LA FORMAZIONE A SECCO DEI CAMPIONI

I metodi meccanici rappresentano il primo passo verso la realizzazione di TECA panel, ancor prima dell'utilizzo delle colle elencate. Essi fanno riferimento all'impiego di processi mediante i quali non è necessario un altro composto per conferire l'aggregazione fra le fibre di scarto derivanti dal Lanificio Reda, (come anticipato nel paragrafo 5.1). La scelta di tale processo produttivo comporterebbe diversi vantaggi quali il fatto di essere più semplice, rapido ed economico e consentirebbe un minor dispendio di materie prime, poiché si basa sull'utilizzo di una forza esterna o su una particolare applicazione a secco. La criticità invece deriva soprattutto dalla tipologia di scarto a disposizione: per l'agugliatura e il processo di feltratura sarebbero necessarie fibre lunghe e di buona qualità. Inoltre, in base all'esperienza maturata, la creazione di un pannello rigido potrebbe risultare difficoltosa con queste tecniche. La realizzazione di un cuscino potrebbe essere una soluzione, sebbene semplificata, più idonea per la produzione di un pannello, ma oltre a una serie di problematiche che verranno evidenziate, non rappresenta il vero fine di questo lavoro.

6.2.1.1 PRESSATURA

L'obiettivo dell'operazione di pressatura, che consiste semplicemente nell'esercitare una forza attraverso un pistone idraulico sulle fibre, è quello di attribuire a queste ultime rigidità e coesione.

La sperimentazione è stata realizzata presso "Crestani Officine Meccaniche s.r.l.". Un quantitativo di scarti di fibre corte e polveri del Lanificio Reda, è stato posizionato all'interno di un contenitore cilindrico in acciaio con un diametro interno di 5 cm. Su di esse

Figura 2: Pressa industriale idraulica, Crestani Officine Meccaniche s.r.l.

è stata esercitata una forza di 95.000N (pressione di lavoro del circuito 150 bar) attraverso una pressa industriale (figura 2) con una pressione sul provino di 50 MPa.

Il campione così formato assume una buona rigidità visiva e le fibre risultano sufficientemente coese fra di loro; tuttavia la mancanza di un legame chimico o fisico fra le fibre, ne comporta lo sfaldamento se soggette ad abrasione o anche semplicemente in fase di estrazione dal cilindro.

Il risultato ottenuto, porta ad escludere questa tecnica per la produzione di pannelli fonoassorbenti rigidi, poiché non presenta le caratteristiche minime ricercate e non permette alcuna possibilità di sviluppo successivo per il miglioramento del prodotto.

6.2.1.2 AGUGLIATURA

L'idea di sperimentare la tecnica dell'agugliatura deriva dall'analisi effettuata nel capitolo 3 e in particolare nelle schede 5 e 8 (vedi allegato A). Questa tecnica richiede l'utilizzo di fibre di almeno 3 cm di lunghezza, escludendo così l'utilizzo delle polveri (motivo per il quale si escluderà questa tecnica). Tuttavia, come emerso nel capitolo 4, il Lanificio Reda produce anche uno scarto di fibre definite lunghe; si è scelto quindi di eseguire la sperimentazione su questa tipologia di scarti.

Il processo è stato eseguito presso l' "Ovattificio Frigerio Angelo s.r.l.". Le fibre lunghe sono state innanzitutto tagliate attraverso una taglierina, nella dimensione di circa 3 cm, per adeguare la lunghezza alle successive fasi. In seguito è stato eseguito il processo di cardatura, al fine di omogeneizzare, districare e rendere parallele le fibre tessili. Questo è stato effettuato attraverso a una cardatrice manuale per via delle piccole quantità richieste per comporre il provino. Infine è stata eseguita l'agugliatura, dove attraverso il movimento verticale di appositi aghi ad uncino, le fibre sono state trasportate le une sulle altre, e legate in modo meccanico, andando a conferire così compattezza al prodotto.

Nonostante diverse prove, variando la densità o la sovrapposizione degli strati, come da

Figura 3: Campione realizzato attraverso il processo di agugliatura dall'Ovattificio Frigerio, utilizzando le fibre lunghe scartate dal Lanificio Reda.

aspettative, non è stato possibile generare un campione sufficientemente rigido.

Il campione (figura 3) risulta come uno strato di tessuto non tessuto piuttosto coeso, molto compatto ma altamente flessibile, non idoneo al fine ricercato. Sia perché le fibre lunghe costituiscono uno scarto minimo sul territorio biellese ed a esclusione di piccole quantità, vengono già vendute come sottoprodotti e valorizzate in successivi processi e sia per la mancanza della rigidità che si vuole ottenere.

Il campione realizzato grazie alla sua coesione, garantita dal processo in analisi, potrebbe tuttavia essere irrigidito attraverso le colle e le matrici elencate, superando agevolmente tutti i problemi caratteristici delle fibre corte e delle polveri, le quali presentano una coesione praticamente nulla. Questa soluzione risulterebbe poco vantaggiosa a causa dei numerosi processi che comporterebbe con conseguente aumento dei costi. Inoltre la ricerca e il progetto si focalizzano sui rifiuti di polveri e fibre corte, per le quali non è stato ancora trovato un campo di applicazione.

6.2.1.3 FELTRATURA

La scelta di sperimentare il processo di feltratura deriva dalla volontà di impiegare gli scarti forniti dal Lanificio Reda con l'obiettivo di realizzare un feltro riciclato. Questa è stata inoltre incoraggiata dalla semplicità di tale materiale, dal suo ampio impiego fin dal terzo millennio a.C. e dalle sue ottime proprietà anche nel settore acustico.

L'incontro è avvenuto presso il "Feltrificio Biellese s.r.l.". Come nel caso dell'agugliatura, fin da subito è risultato impossibile l'impiego delle fibre corte e polveri all'interno di questo processo. L'attenzione si è spostata nuovamente sulle fibre più lunghe scartate dal Lanificio Reda: nonostante le buone potenzialità, per la composizione del feltro, di queste specifiche fibre, non è stato possibile generare un provino, principalmente per due motivazioni. In primo luogo non è possibile per l'azienda realizzare dei provini di ridotte dimensioni senza avviare un piccolo processo produttivo, ma soprattutto l'eventuale utilizzo di questa tipologia di fibre, anche su scala industriale, non risulta economicamente vantaggioso per via della scarsa lavorabilità e di uno spreco eccessivo; è preferibile, per la composizione del feltro utilizzare una lana vergine che, nonostante il prezzo iniziale maggiore rispetto agli scarti, garantisce un processo produttivo più efficiente.

Dunque, per motivi legati all'azienda in questione, anche la strada del feltro riciclato è stata abbandonata, ma non si escludono successive possibilità di approfondimento in questo ambito con altre aziende. Inoltre, come emerso per l'agugliatura, il focus progettuale riguarda le fibre corte, poiché esse rappresentano l'interesse di questa ricerca, ma vista la possibilità, per una questione di completezza è stata ritenuta utile anche una sperimentazione di questo tipo.

Tuttavia l'incontro con il Feltrificio Biellese ha permesso di scoprire una realtà differente rispetto a quella tessile, tipica del territorio biellese, come emerso nel paragrafo 4.2., la quale porta comunque a una forte produzione di scarti di polvere di lana. Questi verranno presi in considerazione nelle successive evoluzioni della sperimentazione.

6.2.1.4 LO SCARTO COME IMBOTTITURA: REALIZZAZIONE DI CUSCINI

Quest'ultimo processo meccanico di produzione a secco, prevede la realizzazione di cuscini (come visto sia dai casi studio esaminati, sia dai prodotti attualmente in commercio). Risulta essere una soluzione ampiamente diffusa e di facile realizzazione: è sufficiente avere un materiale per l'imbottitura e un prodotto per la finitura superficiale e per il contenimento. Se il materiale utilizzato per l'imbottitura è poroso, quindi con buone qualità acustiche, è necessaria un'attenta analisi del rivestimento poiché potrebbe influire negativamente sulle performance. Si è deciso quindi di indagare anche questa via in relazione alle possibilità offerte dagli scarti presi in esame. Per l'imbottitura verranno utilizzate due diverse soluzioni, mentre per la finitura esterna si è scelto di utilizzare uno scarto venduto come sottoprodotto dal Lanificio Reda. Quest'ultimo deriva dal reparto di campioneria, ed è composto da lana: attualmente, come si verifica per prodotti simili, è già riutilizzato in altri processi, dove viene sfilacciato per poi andare a comporre un nuovo tessuto. Avendo come obiettivo della ricerca la composizione di un pannello rigido è stato fondamentale inserire una base in legno per conferire la resistenza desiderata e allo stes-

Figura 4: Campione serie Z01 in alto a destra, campione Z02 in basso a sinistra.

so tempo fissare il rivestimento esterno.

Campione Z01: Riempimento composto da scarti di fibre corte e polveri del Lanificio Reda, compattate a mano. Base realizzata in compensato 0,4mm di dimensioni 10cm x 17cm. Involucro realizzato con sottoprodotti di campionario del Lanificio Reda (figura 4).

Campione Z02: Riempimento composto come il provino A011 (paragrafo 6.2.2) con lati tagliati nelle dimensioni di 10 cm x 17cm. Base realizzata in compensato 0,4mm di dimensioni 10cm x 17cm. Involucro realizzato con sottoprodotti di campionario del Lanificio Reda (figura 4).

Anche la soluzione del cuscino, nonostante la semplicità di esecuzione e di possibile sviluppo viene scartata poiché comporterebbe l'utilizzo di un sottoprodotto, di una base in legno e di una tecnica di aggancio fra la copertura e la base stessa che implicherebbe dei costi, i quali sebbene contenuti, sarebbero da analizzare e considerare all'interno di una valutazione economica. Inoltre essendo una soluzione ampiamente diffusa non condurrebbe a nessuna sperimentazione innovativa, se non a un semplice utilizzo degli scarti come imbottitura. Infine si sottolinea il limite di applicazione a livello compositivo e di sviluppo per i fini acustici.

6.2.2 CAMPIONI SERIE A: FIBRE E POLVERI + POLIMERI

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (figura 5, vedi paragrafo 4.1.2).
- *Polimeri termoindurenti: polvere di poliestere scartata dalla Verniciatura Sassone* (figura 6, vedi paragrafo 5.2.2, 5.1 e scheda tecnica, allegato B).

PREPARAZIONE:

La composizione fra le materie sfrutta i diversi punti di fusione delle due componenti: a circa 180°C il polimero arriva al punto di polimerizzazione, mentre la lana non subisce alcun degrado. Il polimero fuso funge da collante fra le fibre e, una volta raffreddato, solidifica divenendo la matrice rigida del prodotto.

La preparazione è specifica per ogni singolo campione e subisce un graduale sviluppo all'avanzare della sperimentazione. La densità , a differenza delle serie successive, viene controllata attraverso l'applicazione di una forza (di una massa): grazie alla particolare composizione delle materie prime di riciclo, si verifica che le due polveri, durante la preparazione della miscela si omogeneizzano in modo perfetto. Questo permette alla polvere polimerica di aggregarsi nella giusta percentuale indifferentemente dalla quantità utilizzata. Il rapporto effettivo per tutte le

campionature è di 1:0,7 in favore delle fibre di lana. Il diametro del cassero in alluminio, salvo diversa indicazione, è di circa 6 cm.

Figura 5: Scarti di fibre corte e polveri forniti dal Lanificio Reda, prima dell'utilizzo.

Figura 6: Polimeri termoindurenti, poliestere, forniti dalla Verniciatura Sassone.

Figura 7: Fibre e polveri dopo la prima triturazione.

Figura 8: Aggiunta dei polimeri alle fibre prima di essere miscelati.

Figura 9: Mix pronto all'utilizzo.

Figura 10: Preparazione del mix all'interno del cassero, prima della cottura in forno elettrico.

CAMPIONI:

A000: fibre grezze + scarti polimerici, amalgamati a mano in cassero in alluminio. Cottura in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 25 minuti.

A001: fibre grezze disperse in acqua, successivamente mescolate con gli scarti polimerici all'interno di un cassero in alluminio. Lasciare asciugare per 24 ore il campione per poi effettuare la cottura in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 30 minuti.
N.B. Il campione risulta aver subito una cottura eccessiva.

Nei campioni successivi le fibre di lana prima di essere utilizzate, hanno subito una preparazione iniziale che consiste nel tritare le fibre stesse per 180 secondi, attraverso una doppia lama sfalsata azionata da un trapano elettrico, al fine di scomporre i grani e rendere la miscela più omogenea.

A002: fibre tritate + scarti polimerici. Tritare nuovamente il composto con la doppia lama per 90 secondi e formare il campione compattandolo a mano. Cottura senza cassero in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 25 minuti.

A003: come A002 ma cottura con cassero in alluminio.

A004: come A002 ma con cottura in cassero di alluminio, con una massa di 0,5 Kg sul campione (pressione di 175 Kg/m^2).

A005: fibre tritate + scarti polimerici. Tritare nuovamente il composto con la doppia lama per 90 secondi. Compattare, all'interno di un contenitore cilindrico con diametro di 5 cm, con pressa idraulica (50 MPa). Ma per problemi di applicazione il risultato e il processo non risulta ottimale. Cottura senza cassero in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 25 minuti.
N.B. Vedi aggiornamenti* a fine paragrafo.

A006: come A002 ma con cottura in cassero in alluminio, con una massa di 1 Kg sul campione (pressione di 350 Kg/m^2).

A007: fibre tritate disperse in acqua per poi essere mescolate con gli scarti polimerici all'interno di un cassero in alluminio. Lasciare asciugare per 72 ore il campione (fino a completa asciugatura) per poi effettuare cottura in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 10 minuti.
N.B. Il campione risulta aver subito una cottura eccessiva e mostra una scissione fra le due materie prime.

A008: fibre tritate + scarti polimerici. Tritare nuovamente il composto con la doppia lama per 90 secondi e formare il campione compattandolo all'interno di un cassero in alluminio di misure 18 cm x 11 cm. Cottura nel cassero in alluminio, con una massa omogenea di 3 Kg sul campione (pressione di 152 Kg/m^2). Cottura in forno elettrico, con cassero, 180°C per 20 minuti. Tagliare il provino per rettificare i lati.

A009: come A008 ma con maggior omogeneizzazione del composto grazie a un mix più raffinato e controllato, ottenuto attraverso la preparazione di un quantitativo minore di composto per volta.

A010: come A009 inserendo inoltre una piastra inferiore al cassero per distribuire e contenere la pressione.

A011: come A008 ma cottura in cassero in alluminio, con una massa di 0,5 Kg sul campione (pressione di 25 Kg/m^2). Applicazione di una piastra inferiore al cassero per distribuire e contenere la pressione. Taglio del provino per rettifica di un solo lato.

A012: come A004 ma con maggior omogeneizzazione del composto, grazie a un mix più raffinato e controllato, preparando un quantitativo minore dello stesso.

A013: come A012. Successivamente il provino è stato riprocessato e sottoposto a tritatura con Moulinex (tritatutto a 700W). Si è dato origine così a un nuovo composito, similare a quello iniziale ma meno compatto, spendibile per eventuali altri impieghi. In questo caso è stato ricomposto un ulteriore campione all'interno di un cassero in alluminio, cotto in forno elettrico, non preriscaldato, a 150°C per 20 minuti.

N.B. Essendo il campione costituito in parte da materiali termoindurenti non dovrebbe essere in grado di formare nuovamente una matrice rigida al suo interno: in questo particolare caso il provino ha assunto nuovamente rigidità. Questo porta a pensare che nella prima cottura non tutta la polvere sia arrivata a polimerizzazione.

Nei campioni successivi le fibre di lana, prima di essere utilizzate, sono soggette a una preparazione iniziale che consiste nel tritarle con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi (figura 7). Questi campioni, a differenza di quelli precedenti (in particolare fino al campione A006), destinati a valutare la fattibilità produttiva, subiranno un maggior controllo durante la produzione, poiché verranno creati con il fine di essere, in seguito, testati acusticamente.

A014: fibre tritate+ scarti polimerici con rapporto 1:1 (5g:5g). Nonostante il pari rapporto vi è un deposito rimanente, seppur minimo, di scarti polimerici, poiché come specificato nella preparazione i due materiali si aggregano nella giusta percentuale indifferentemente dalla quantità utilizzata comportando un rapporto effettivo di 1:0,7. Tritare quindi nuovamente il composto con Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi e formare il campione compattandolo all'interno di un cassero in alluminio con una massa di 0,7 Kg per un minuto. La cottura avviene nel cassero in alluminio, senza pressione, a 160°C per 25 minuti.

A015: come A014 ma in fase di preparazione la miscela è stata compattata, con la medesima massa, per un tempo maggiore, due minuti.

A016: come A014 ma in fase di preparazione la miscela è stata compattata per un tempo maggiore, 5 minuti, con un massa di 1 Kg.

Come illustrato, i campioni A014, A015 e A016, sono stati cotti in forno, senza l'ausilio di pressione. L'unica pressione esercitata è stata quella applicata durante la fase di formatura. Presentano comunque una determinata compattazione e aggregazione fra gli elementi, che ne evita lo sfaldamento, tuttavia il risultato su questo fronte non è ancora ottimale. Per questo motivo saranno soggetti a una pressione anche nella fase di cottura.

A017: fibre tritate + scarti polimerici con rapporto 1:1 (5g : 5g), effettivo 1:0,7. Tritare nuovamente il composto con Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi e formare il campione compattandolo all'interno di un cassero in alluminio con una massa di 200g per un minuto. Cottura nel cassero in alluminio a 160°C per 25 minuti, con una massa omogenea di 200 g sul campione, (pressione di 70 Kg/m^2).

A018: come A017 ma con una massa in fase di cottura di 400 g (pressione di 140 Kg/m^2).

A019: come A017 ma con una massa in fase di cottura di 700 g (pressione di 250 Kg/m^2).

A020: come A019, mantenendo sempre lo stesso rapporto, ma utilizzando un maggior quantitativo di materiali (7g : 7g).

A021: come A014, ma con rapporto effettivo di 1:0,5 (5g : 0,25g).

A022: come A019, ma con rapporto effettivo 1:0,5 (5g : 0,25g).

RISULTATI:
In seguito a un continuo perfezionamento, sia nella preparazione delle materie prime, sia nelle tecniche di formatura, sono stati generati una serie di provini rigidi grazie alla coesione termica derivante dai diversi punti di fusione delle due componenti. In particolare la prima fase di produzione dei provini, fino al campione A013, è stata effettuata per valutare la fattibilità del processo e le relative potenzialità. Nella seconda fase invece i campioni hanno subito un controllo maggiore durante la produzione con lo scopo di essere testati in seguito acusticamente. In relazione ai campioni A020 e A021 andando a diminuire il rapporto tra le componenti è stato possibile sperimentare la coesione. Ma questo ha condotto a scarsi risultati portando alla constatazione che, effettivamente le due materie si aggregano nella giusta percentuale indifferentemente dalla quantità utilizzata, senza però scendere sotto quella minima prevista (rapporto 1:0,7).

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Polimeri termoindurenti: -0,3/-1 €/Kg.

AGGIORNAMENTI*:
Il campione A005 è stato sottoposto a un getto di acqua per 30 secondi a 2 bar per verificarne la resistenza: non ha subito alcuna alterazione del suo stato fisico.

6.2.3 CAMPIONI SERIE B: FIBRE E POLVERI + COLLA DI AMIDO DI MAIS

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Colla di amido di mais: amido di mais in polvere* (figura 11, vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:

Unire l'amido di mais (30g) in 1/3 dell'acqua totale necessaria (100g), mescolare fino a sciogliere completamente l'amido ed ottenere un liquido omogeneo. Riscaldare in un pentolino a fuoco basso la parte restante di acqua (200g) fino alla temperatura di circa 60°C. Unire la miscela a filo, nel pentolino contenente l'acqua calda e continuare a mescolare, a fuoco basso, fino alla fase di ebollizione. Mescolare ancora per un minuto e poi togliere dal fuoco (figura 12). Lasciare raffreddare e unire la colla agli scarti di lana in base alla campionatura voluta. Il provino, una volta formato, verrà lasciato ad asciugare all'aria in modo naturale. A differenza dei campioni della serie A, la densità in questa sperimentazione verrà gestita attraverso la variazione del rapporto fra fibre e colla. Il rapporto minimo per avere aggregazione fra le fibre è di 1:0,5, tuttavia per ottenere una rigidità che sia coerente con l'obiettivo fissato dalla sperimentazione, il rapporto minimo considerato è di 1:1.

Dimensioni del cassero in alluminio di 6 cm.

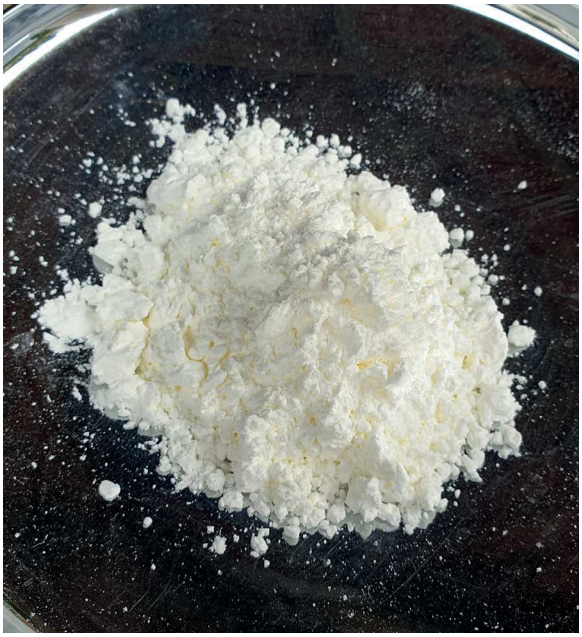


Figura 11: Amido di mais in polvere.

Figura 12: Fase di preparazione della colla a base di amido di mais.

CAMPIONI:

B000: prodotto agugliato da Ovattificio Frigerio (vedi paragrafo 6.2.1.2) + colla di amido di mais applicata tra le fibre del prodotto fino a completa saturazione.
N.B. Vedi aggiornamenti* a fine paragrafo.

A differenza di B000, i successivi campioni verranno prodotti attraverso una preparazione iniziale delle fibre di lana che consiste nel mixare le fibre stesse per 180 secondi, attraverso una doppia lama sfalsata azionata da un trapano elettrico.

B001: fibre tritate + colla di amido di mais fino a saturazione delle fibre. Mescolare, omogeneizzare a mano e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.
N.B. Campione realizzato per verificare la fattibilità del processo e del campione stesso. Vedi aggiornamenti* a fine paragrafo.

B002: come B001.

B003: fibre tritate + colla di amido di mais fino a saturazione delle fibre. Mescolare, omogeneizzare a mano e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio di misure 18 cm x 11 cm. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

Nei campioni successivi le fibre di lana prima di essere utilizzate subiranno una preparazione iniziale che consiste nel tritarle per 10 secondi, attraverso un Moulinex tritattutto 700W, consentendo una preparazione delle stesse più omogenea, soffice e rapida e permettendo allo stesso tempo un maggior controllo del risultato finale. Inoltre, una volta preparato il mix in base al rapporto desiderato, esso subirà un secondo passaggio nel tritattutto, al fine di conferire una maggiore coesione al composto.

B004: fibre tritate + colla di amido di mais con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

B005: come B004 ma con rapporto 1:1 (10g : 10g).

B006: come B004 ma con rapporto 1:1,25 (10g : 12,5g).

B007: come B004 ma con rapporto 1:1,5 (20g : 30g).

N.B. le dosi delle due materie prime sono

state raddoppiate per permettere la composizione di un provino con spessore adeguato e confrontabile con gli altri campioni.

B008: come B004 ma con rapporto 1:2 (20g : 40g).

B009: come B004 ma con rapporto 1:2,5 (20g : 50g). In questo caso è stata inoltre applicata sulla parte posteriore del prodotto, una colla di amido di mais per conferirne rigidità. Applicazione eventuale, nei campioni che presentano una aggregazione minore (B001).

B010: come B004 ma con aggiunta di 0,5g di glicerina per rendere il composto del campione più soffice. Inoltre la compattazione del prodotto, rispetto al campione B004 è stata applicata per un tempo maggiore.

B011: come B005 ma con aggiunta di 0,5g di glicerina per rendere il composto del campione più soffice. Inoltre, in questo caso il prodotto ha subito una fase di compattazione di durata maggiore rispetto al compione B004.

RISULTATI:
In seguito a un continuo miglioramento, sia nella preparazione delle materie prime, sia nelle tecniche di formatura, sono stati generati dei campioni con una adeguata rigidità: risultato ottenuto grazie all'utilizzo della colla derivata dall'amido di mais. Il rapporto sperimentato è di 1:0,5 minimo sufficiente per ottenne coesione, ma non in grado di conferire una adeguata rigidità.
E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto: dal campione B007 le dosi sono state raddoppiate per permettere la composizione di un provino con uno spessore adeguato e confrontabile con gli altri. Inoltre, aumentando la percentuale della colla, si è osservato come i provini diventino sempre più difficili da formare e le fibre tendano ad emergere nella loro struttura, a differenza di quelli con un quantitativo di colla minore dove le fibre risultano maggiormente aggregate fra di loro. La densità, come da aspettative, aumenta all'aumentare della quantità di colla utilizzata nel mix, generando campioni con un grado di durezza maggiore (saranno da valutare gli effetti di tale variazione sulle performance acustiche).
La glicerina non ha avuto effetti positivi sui campioni B010 e B011, poiché' anche con rapporti di colla elevati l'aggregazione risulta scarsa.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Amido di mais: +3,52 €/Kg.

AGGIORNAMENTI*:
Il campione B000 è stato sottoposto a un getto di acqua per 30 secondi a 2 bar, per verificarne la resistenza: la colla tende a essere dilavata ma grazie al processo di agugliatura il prodotto rimane compatto. Dopo l'asciugatura riprende rigidità. Il campione B001 è stato sottoposto a un getto di acqua per 30 secondi a 2 bar, per verificarne la resistenza: la colla tende a essere dilavata, il provino perde rigidità e compattezza. Dopo l'asciugatura riprende parzialmente rigidità.

6.2.4 CAMPIONI SERIE C: FIBRE E POLVERI + COLLA DI AMIDO DI RISO

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Colla di amido di riso*: derivante dallo scarto dell'acqua di bollitura del riso precotto (vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:

In questa serie di campionatura è doveroso fare una premessa per la preparazione della colla a base di amido di riso. L'idea consiste in una fornitura di questa tipologia di scarto da parte delle aziende connesse con la start-up Ricehouse, le quali però hanno richiesto tempistiche elevate e quindi non congrue con quelle del lavoro, sia per la fornitura di materiale, sia per un approfondimento su tale scarto.

Come emerso nel capitolo 5, questa soluzione rappresenta una delle potenziali candidate per futuri sviluppi in questo campo, si è quindi scelto, per via delle possibilità del progetto, di comporre una colla a base di amido di riso attraverso un processo alternativo ma in linea con il ciclo produttivo dell'azienda.

Per la preparazione della colla prelevare l'acqua di scolo, prodotta durante la bollitura del riso, e riscaldarla con un pentolino a fuoco basso. Mescolare e lasciare sul fuoco per un minuto dopo aver raggiunto la fase di ebollizione. In particolare, in questo caso, sono stati prelevati 500 g di acqua di bollitura del riso e ridotti per circa un'ora a fiamma bassa, mescolando il composto fino a bollitura. Dimensione del cassero in alluminio di circa 6 cm, salvo diversa indicazione.

CAMPIONI:

C000: Preparazione delle fibre di lana attraverso un processo iniziale che consiste nel mixare le fibre stesse per 180 secondi, attraverso una doppia lama sfalsata azionata da un trapano elettrico. Aggiunta della colla di amido di riso fino a saturazione del materiale. Mescolare e omogeneizzare a mano e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. In seguito estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.
N.B. Provino realizzato per verificare la fattibilità del processo e del campione stesso.

Nei campioni successivi le fibre di lana prima di essere utilizzate subiranno una preparazione iniziale che consiste nel tritarle per 10 secondi, attraverso un Moulinex tritattutto 700W, che ne consente una preparazione più omogenea, soffice permettendo allo stesso tempo un maggior controllo del risultato. Inoltre, una volta preparato il mix in base al rapporto desiderato, esso subirà un secondo passaggio nel tritattutto, al fine di conferire una maggiore coesione al composto.

C001: fibre tritate + colla di amido di mais con rapporto 1:0,3 (10g : 3g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.
N.B. il provino così composto non ha acquisito un grado di aggregazione sufficiente.

C002: come C001 ma con rapporto 1:0,5 (10g : 5g).

C003: come C001 ma con rapporto 1:0,7 (10g : 7g).

C004: come C001 ma con rapporto 1:1 (10g : 10g).

C005: come C001 ma con rapporto 1:1,5 (10g : 15g).

C006: come C001 ma con rapporto 1:2 (20g : 40g).

N.B. le dosi delle due materie prime sono state raddoppiate per permettere la composizione del pannello con uno spessore adeguato e confrontabile con gli altri campioni.

C007: come C001 ma con rapporto 1:3 (20g : 60g).

RISULTATI:

A causa della mancanza dello scarto aziendale che sta alla base del processo, la colla è stata prodotta in un modo alternativo.

In seguito a un continuo miglioramento delle tecniche di formatura, sono stati generati dei campioni aventi una determinata rigidità, grazie alla colla derivata dall'amido di riso.

Sperimentando un rapporto di 1:0,5, non è stata ottenuta la minima aggregazione richiesta: solo con un rapporto di 1:0,7 e successivi è stata raggiunta una rigidità ritenuta accettabile. Non si esclude l'utilizzo di rapporti minori attraverso l'applicazione di una pressione durante la fase di asciugatura.

E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto; dal campione C006 le dosi sono state raddoppiate per permettere la composizione del pannello con uno spessore adeguato e confron-

tabile con gli altri.
Confrontando la preparazione dei provini, la lavorabilità e i risultati di questa campionatura, con quella realizzata con colla derivante da amido di mais, si evince come essi siano del tutto similari su questi fronti; solo nelle fasi successive verrà effettuata una comparazione in merito alle le performance acustiche.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Amido di riso: + 0,00 €/Kg, da valutare.

6.2.5 CAMPIONI SERIE D: FIBRE E POLVERI + FIBRE DI POLIESTERE

INGREDIENTI:
- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- Scarti di tessuto in poliestere.

PREPARAZIONE:
La composizione è stata effettuata sfruttando la differenza di temperatura di fusione dei due materiali.

CAMPIONI:

D000: fibre di lana + fibre di poliestere con rapporto 70:30. Le fibre di poliestere, poiché derivanti da tessuto riciclato, sono state sfibrate e sfilacciate manualmente. Le due tipologie di fibre sono state mixate per 180 secondi, attraverso una doppia lama sfalsata azionata da un trapano elettrico. In seguito sono state compattate e formate all'interno di un cassero in alluminio. Cottura graduale, per la verifica di cambiamenti di stato del poliestere, fino a 250°C (temperatura massima ottenibile) per un tempo di 30 minuti, senza avere nessuna coesione apparente.

RISULTATI:
Il prodotto sembra aver acquisito una minima rigidità propria, ma al contrario delle aspettative, le fibre riciclate in poliestere, non hanno avuto la funzione di matrice; esse non hanno mostrato alcun cambiamento fisico in seguito alla cottura e non si è quindi verificata la coesione fra i due materiali. Non avendo informazioni con le quali approfondire tale strada, e visti i buoni risultati ottenuti fino a questo punto, si è deciso di non continuare a sviluppare questa possibilità. Non si esclude tuttavia, il corretto funzionamento di questo mix all'interno di un processo alternativo.

6.2.6 CAMPIONI SERIE E: FIBRE E POLVERI + PLA

INGREDIENTI:
- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *PLA,acido poliattico. Polimero dell'acido lattico* (figura 13, vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:
Il principio è il medesimo utilizzato nei campioni della serie A, che sfrutta la differenza di temperatura di fusione delle due materie prime. In questo caso però, come ricordato, si utilizza un polimero biodegradabile, caratterizzato da maggiori difficoltà di preparazione.
Il PLA sotto forma di filamenti, viene tritato attraverso l'utilizzo di un Moulinex tritatutto 700W, generando due prodotti differenti per dimensioni: le polveri di PLA e i granuli di PLA (diametro di circa 0,5 mm). Tritare le fibre di lana per 10 secondi, attraverso un Moulinex tritatutto 700W. Unire le parti e miscelarle con il tritatutto per 30 secondi. Formare il provino nel cassero in alluminio (6 cm) e cuocere in forno in base alla composizione del relativo campione.

Figura 13: Amido di mais in polvere.

CAMPIONI:

E000: fibre tritate + PLA in polvere con rapporto 1:0,5; tritare il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Cottura in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 30 minuti.

E001: Come E000 ma miscela composta da fibre grezze + PLA in polvere e granuli con rapporto 1:0,8.

E002: fibre tritate + PLA in polvere e granuli con rapporto 1:0,8; tritare il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Creare una base inferiore in PLA in polvere

e granuli. Cottura in forno elettrico, non preriscaldato, a 150°C per 90 minuti, con una massa di 0,7 Kg, al fine di conferire maggiore aggregazione fra i componenti.

E003: come E002 ma con rapporto di 1:1,5 tra le parti e cottura a 150°C per 120 minuti. N.B. per arrivare a tale rapporto è stato indispensabile mescolare successivamente i materiali in modo da ottenere le percentuali desiderate.

RISULTATI: composizione dei provini difficoltosa e con scarsi risultati. La preparazione del PLA per essere applicato risulta piuttosto lunga. Le fibre in lana e il PLA non presentano una buona coesione fra loro, tendono a non aggregarsi. Anche in seguito alla cottura il campione risulta non sufficientemente rigido poiché il PLA non mostra un grado di adesione consono a questo scopo. Applicando una pressione durante la fase di cottura il campione presenta modesti miglioramenti, ritenuti comunque non sufficienti. Attraverso la creazione di una base inferiore in PLA è possibile tuttavia conferire una modesta rigidità al provino. Inoltre il provino risulta, nella sua conformazione, eterogeneo e anisotropo.

Come da aspettative l'utilizzo di questa tipologia di materiali, comunemente chiamati"plastiche biodegradabili", per via della loro difficoltà di applicazione non ha avuto gli effetti sperati. Questi rimangono tuttavia una valida alternativa ai polimeri di origine sintetica, pur necessitando ancora di uno studio approfondito (purtroppo non affrontabile in questo percorso) sulle possibilità da loro offerte.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
PLA: > +20 €/Kg.

6.2.7 CAMPIONI SERIE F: FIBRE E POLVERI + COLLA "COCCOINA"

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Colla Coccoina in pasta bianca, Balma, Capoduri & C. s.p.a* (figura 14, vedi paragrafo 5.1, e scheda tecnica, allegato D)

PREPARAZIONE:

La colla Coccoina è una colla commerciale di origine naturale pronta all'uso, può quindi essere direttamente miscelata insieme alle fibre in base allo specifico provino. Le polveri di lana, prima di essere unite alla colla, devono essere tritate con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi.

Come nel caso delle altre colle sperimentate, la densità di ogni provino, (avente diametro di circa 6 cm) varierà in funzione della percentuale di colla utilizzata.

Figura 14: Colla Coccoina pronta all'uso.

CAMPIONI:

F000: fibre tritate + Coccoina con rapporto 1:0,7 (20g : 14g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

F001: come F000 ma con rapporto di 1:1 (20g : 20g).

F002: come F000 ma con rapporto di 1:1,5 (20g : 30g).

RISULTATI: grazie alla colla Coccoina pronta all'uso il processo risulta agevole e veloce. Questo tipo di colla consente un intervallo di tempo sufficiente per la formazione del provino, prima che si asciughi in pochi minuti, a differenza dei campioni B prodotti con amido di mais e dei campioni C, prodotti con amido di riso, dove i tempi di asciugatura sono elevati. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto. A differenza della campionatura B e C, l'aumento del quantitativo di colla non pregiudica la lavorabilità e la coesione. In tutti i provini realizzati è stata raggiunta una rigidità idonea e una buona coesione fra le fibre di lana.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
PLA: +40 €/Kg.

6.2.8 CAMPIONI SERIE G: FIBRE E POLVERI + COLLA DI CONIGLIO "LIBERON"

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Colla di coniglio, Liberon* (figura 15, vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:
Unire 100g di colla di coniglio con 1 litro di acqua in un pentolino e lasciare riposare per circa 24 ore, affinché la colla assorba l'acqua (figura 16). Per via dell'assorbimento, la colla aumenterà il suo volume, quindi versare la miscela colla-acqua in un recipiente di dimensioni maggiori. Riscaldare su un fornello il pentolino con il composto a bagnomaria. L'acqua deve essere ad una temperatura di circa 60°C. Mescolare e continuare la cottura per circa 20-30 minuti fino a quando la colla sarà sciolta completamente e avrà acquisito la giusta densità di applicazione.
Tritare le polveri di lana con Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi e unire la colla agli scarti di lana, in base alla campionatura voluta (diametro del cassero di 6 cm).
La densità verrà gestita attraverso la percentuale di colla miscelata con le fibre, come avvenuto per la sperimentazione con le altre tipologie di colla.

Figura 15: Colla di Coniglio, Liberon.

Figura 16: Preparazione della colla di coniglio.

CAMPIONI:

G000: fibre tritate + colla di coniglio con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Mixare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto applicando una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

G001: come G000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g).

G002: come G000 ma con rapporto di 1:1,5 (10g : 15g).

G003: come G000 ma con rapporto di 1:2 (10g : 20g).

G004: come G000 ma con rapporto di 1:3 (10g : 30g).

N.B. Vedi Aggiornamenti* a fine paragrafo.

G005: come G000 ma la colla di coniglio è stata aggiunta fino a saturazione delle fibre.

RISULTATI:
Grazie all'utilizzo della colla di coniglio è possibile generare una serie di provini con una buona rigidezza in base al rapporto scelto. Il tempo di asciugatura della colla consente un intervallo sufficiente per la formazione del provino. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto; nel campione G005 le dosi sono state triplicate per avere un provino di dimensioni confrontabili con gli altri. Inoltre, aumentando il peso della colla in percentuale, i provini diventano sempre più difficili da formare e le fibre tendono a emergere nella loro struttura, a differenza di quelli con un quantitativo di colla minore dove le fibre risultano maggiormente aggregate fra di loro. Anche

in questo caso, in linea con le altre colle, il rapporto minimo per avere una determinata rigidità e di 1:1, sotto al quale è possibile avere solo una debole aggregazione.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Colla di coniglio: + da 20 a 50 €/Kg.

AGGIORNAMENTI*:
Il campione G004 è stato sottoposto a un getto di acqua per 30 secondi a 2 bar per verificarne la resistenza: la colla non viene dilavata, tuttavia il provino tende progressivamente ad ammorbidirsi senza però perdere coesione. Non si esclude che per tempi superiori il provino possa perdere compattezza. Dopo l'asciugatura riacquista rigidità.

6.2.9 CAMPIONI SERIE H: FIBRE E POLVERI + COLLA DI PESCE

INGREDIENTI:
- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2)
- *Colla di pesce* (vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:
Unire 100g di colla di pesce con 1 litro di acqua in un pentolino e lasciare riposare per circa 24 ore, affinché la colla assorba l'acqua (figura 17). Riscaldare su un fornello il pentolino con il composto, a bagnomaria. L'acqua deve essere ad una temperatura di circa 60°C. Mescolare e continuare la cottura per circa 20-30 minuti fino a quando la colla si sarà sciolta completamente e avrà acquisito la giusta densità di applicazione.
Tritare le polveri di lana con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi. Unire la colla agli scarti di lana in base alla campionatura voluta.
La densità può essere gestita variando le percentuali di colla all'intento della miscela. Diametro del cassero di circa 6 cm, come le precedenti campionature.

Figura 17: Preparazione della colla di pesce.

CAMPIONI:

H000: fibre tritate + colla di pesce con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

H001: come H000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g).

H002: come H000 ma con rapporto di 1:1,5 (10g : 15g).

H003: come H000 ma con rapporto di 1:2 (10g : 20g).

H004: come H000 ma con rapporto di 1:3 (10g : 30g).

H005: come H000 ma colla di pesce aggiunta fino a saturazione delle fibre.

RISULTATI:
Grazie all'utilizzo della colla di pesce è possibile generare una serie di provini con una buona rigidità in base al rapporto scelto. Il tempo di asciugatura della colla consente un intervallo sufficiente per la formazione del provino. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia notevolmente ridotto. A differenza delle colle sperimentate fino ad ora, risulta possedere un potere adesivo notevolmente maggiore, questa caratteristica ha permesso di formare provini con percentuali di colla minori: anche con un rapporto di 1:0,5 il provino assume una buona coesione e rigidità.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Colla di pesce: + 15 €/Kg.

6.2.10 CAMPIONI SERIE I: FIBRE E POLVERI + COLLA D'OSSA "ZEUS"

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2)
- *Colla d'ossa o Colla Forte, Zeus* (figura 18, vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:

Unire in un pentolino la colla d'ossa in perle con una quantità d'acqua sufficiente a ricoprirla e lasciare riposare per circa 2 ore, affinché la colla assorba completamente l'acqua. Al termine le perle avranno aumentato di volume e appariranno rigonfie e ammorbidite, pertanto utilizzare un recipiente di notevoli dimensioni (figura 19). Riscaldare il pentolino con il composto, a bagnomaria, su un fornello. L'acqua deve essere ad una temperatura di circa 60°C. Mescolare e continuare la cottura per circa 20-30 minuti fino a quando la colla si sarà sciolta completamente e avrà acquisito la densità del miele.

Tritare la polvere di lana con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi. Unire la colla agli scarti di lana in base alla campionatura voluta (realizzazione con un cassero di alluminio di 6 cm di diametro).

La densità verrà controllata attraverso la variazione della percentuale di colla all'interno del campione.

Figura 18: Colla d'ossa, Zeus.

Figura 19: Preparazione della colla d'ossa.

CAMPIONI:

I000: fibre tritate + colla d'ossa con rapporto 1:<0,3 (10g : <3g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

I001: come I000 ma con rapporto di 1:0,3 (10g : 3g).

I002: come I000 ma con rapporto di 1:0,5 (10g : 5g).

I003: come I000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g).

I004: come I000 ma con rapporto di 1:1,5 (10g : 15g).

I005: come I000 ma con rapporto di 1:2 (20g : 30g).

RISULTATI:
Grazie all'utilizzo della colla d'ossa è possibile generare una serie di provini con una buona rigidezza in base al rapporto scelto. Il tempo di asciugatura della colla è molto rapido, questo comporta, una volta miscelati i componenti, l'avere poco tempo a disposizione per la formatura. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto; infatti nel provino I005 le dosi sono state raddoppiate per permettere la formazione dello stesso. Inoltre, aumentando il peso della colla in percentuale, i provini diventano sempre più difficili da formare e le fibre tendono a emergere nella loro struttura, tuttavia in modo inferiore ai campioni della serie H. Attraverso l'utilizzo di questa colla è stato possibile diminuire il rapporto fino a 1:0,3, garantendo una minima coesione ma non una rigidità sufficiente. A parità di rapporto con gli altri provini, questa colla permette di ottenere una rigidità notevolmente superiore. Questo ne giustifica il suo nome, "colla forte" e l'ampio utilizzo nel campo del restauro.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Colla d'ossa: + da 6 a 8 €/Kg

6.2.11 CAMPIONI SERIE L: FIBRE E POLVERI + COLLA IDROREPELLENTE

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2)
- *Colla idrorepellente a base di glicerina*.

PREPARAZIONE:
Aggiungere in un pentolino 30g di gelatina in polvere a 90ml di acqua e mescolare fino ad ottenere un prodotto omogeneo. Riscaldare il composto su un fornello a fiamma bassa fino a ebollizione, continuando a mescolare. Far bollire il composto ancora per un minuto e poi togliere dal fuoco. Aggiungere 30ml di glicerina e 30ml di aceto bianco e incorporare il tutto nel pentolino, avendo cura di amalgamare bene il composto. Tritare la fibre di lana con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi. Unire la colla agli scarti di lana in base alla campionatura voluta.

CAMPIONI:

L000: fibre tritate + colla idrorepellente con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

L001: come L000 ma con rapporto di 1:0,7 (10g : 7g).

L002: come L000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g).

L003: come L000 ma con rapporto di 1:1,5 (10g : 15g).

L004: come L000 ma con rapporto di 1:2 (10g : 20g).

L005: come L000 ma con rapporto di 1:3 (10g : 30g).

RISULTATI:
Con la colla idrorepellente a base di glicerina è possibile generare una serie di provini caratterizzati da una debole coesione (anche a dosaggi di colla elevati), notevolmente minore rispetto alle altre serie sperimentate. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto. Per via di questa formulazione i provini risultano avere una finitura superficiale particolarmente soffice. Tuttavia, sebbene la colla abbia caratteristiche idrorepellenti, i provini non risultano tali: sono invece quelli maggiormente sensibili alla presenza di acqua e di umidità, anche in condizioni ordinarie.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Glicerina: + da 10 a 40 €/Kg.
Aceto bianco: + 1 €/Kg.

AGGIORNAMENTI*:
Un campione extra è stato sottoposto a un getto di acqua per 30 secondi a 2 bar per verificarne la resistenza: il provino perde coesione e le fibre tendono a separarsi.

6.2.12 CAMPIONI SERIE M: FIBRE E POLVERI + COLLA NATURALE "CREARTEC"

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Colla naturale Oko Naturkleister, Creartec* (figura 20, vedi paragrafo 5.1, e scheda tecnica, allegato E)

PREPARAZIONE:

Questa tipologia di colla è un prodotto commerciale pronto all'uso, può quindi essere direttamente unito alle fibre, in base alla specifica composizione del provino (6 cm di diametro). Le polveri di lana sono state tritate con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi prima di essere unite alla colla.

Figura 20: Colla Oko Naturkleister, Creartec.

CAMPIONI:

M000: fibre tritate + colla Creartec con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

M001: come M000 ma con rapporto di 1:0,7 (10g : 7g).

M002: come M000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g).

M003: come M000 ma con rapporto di 1:1,5 (10g : 15g).

RISULTATI:
Grazie all'utilizzo di questa colla è possibile generare una serie di provini con una buona rigidità in base al rapporto scelto. Il tempo di asciugatura della colla consente un intervallo sufficiente per la formazione del provino. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore della colla in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto. Ma a differenza delle altre campionature l'aumento del quantitativo di colla non pregiudica la lavorabilità e la coesione. Come nel caso della campionatura della serie F, è stata utilizzata una colla commerciale pronta all'uso che consente tempi di produzione notevolmente minori. Inoltre è soggetta a un maggior controllo essendo prodotta su scala industriale.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Colla *Oko Naturkleister, Creartec:* +95 €/Kg.

6.2.13 CAMPIONI SERIE N: FIBRE E POLVERI + GESSO SCAGLIOLA

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Lanificio Reda, 100% lana* (vedi paragrafo 4.1.2).
- *Gesso scagliola "Duomo Idrostucchi"* (figura 21).

PREPARAZIONE:

Miscelare gesso e acqua in rapporto 7:5 (140g :100g) fino ad ottenere una miscela omogenea. Tritare le fibre con un Moulinex tritatutto 700W per 10 secondi e unire le parti in base allo specifico provino diametro di 6 cm.

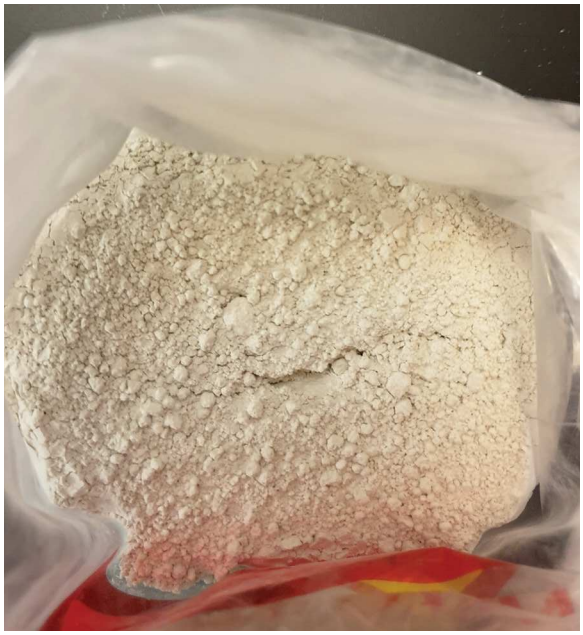


Figura 21: Gesso in polvere.

CAMPIONI:

N000: fibre tritate + miscela di gesso con rapporto 1:0,5 (10g : 5g). Tritare nuovamente il composto per 10 secondi con Moulinex e formare il campione all'interno di un cassero in alluminio. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

N001: come N000 ma con rapporto di 1:1 (10g : 10g). Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg fino a completa asciugatura.

N002: come N000 ma con rapporto di 1:2 (10g : 10g). Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg fino a completa asciugatura.

RISULTATI:
Con l'utilizzo del gesso è stato possibile formare dei campioni dotati di una buona coesione. Il problema principale è costituito dalle tempistiche di asciugatura, poiché in un intervallo di circa due minuti il gesso inizia a far presa, non consentendo più nessuna modifica successiva. E' possibile notare come aumentando il rapporto a favore del gesso in modo progressivo il volume dei campioni si sia ridotto. Oltre alle difficoltà di lavorazione, i provini prodotti presentano caratteristiche notevolmente differenti rispetto a quelli (precedentemente illustrati) che utilizzano le colle.

COSTI MATERIE PRIME:
Scarti Reda: -0,30 €/Kg.
Gesso: + da 2 a 10 €/Kg.

6.3 RISULTATI E CONCLUSIONI DELLA SPERIMENTAZIONE A

Prima di effettuare una valutazione acustica su parte dei campioni realizzati, verrà esposta una conclusione su questa prima sperimentazione. Essa si baserà sia sulle colle e i leganti utilizzati, sia sulla composizione dei provini e i relativi risultati, parzialmente esposti, ma non confrontati fra di essi.

Come emerso nel paragrafo 6.2.1, le prove meccaniche effettuate non hanno dato i risultati sperati, infatti nessuna di esse verrà sviluppata nei seguenti capitoli. Con la tecnica della pressatura il campione realizzato non raggiunge le caratteristiche minime richieste, non essendo in grado di avere coesione. Con l'agugliatura è stato possibile realizzare un tessuto non tessuto, ma estremamente flessibile, il quale potrebbe essere utilizzato al fine ricercato ma solo se unito a dei leganti: operazione che non comporterebbe nessun vantaggio produttivo o economico. Anche l'idea del feltro riciclato è stata esclusa per la mancanza di convenienza a livello aziendale rispetto a una lana vergine. Infine, con l'idea del cuscino, si potrebbe generare un prodotto idoneo, ma anche questa soluzione è stata esclusa per una mancanza di benefici in termini di risorse e di concorrenza. Inoltre non rappresenta la soluzione ricercata, come espresso nel paragrafo 6.1.

Escludendo questi prodotti, rimane come

unica soluzione quella riguardante l'utilizzo di colle o di matrici rigide per conferire aggregazione e rigidezza alle fibre di lana. In generale tutte le serie sperimentate, in seguito a una continua evoluzione del processo durante il work in progress del lavoro, hanno dato buoni risultati: attraverso differenti proporzioni fra le materie utilizzate, e con diverse tecniche, è stato possibile raggiungere un mixdesign in grado di soddisfare le esigenze ricercate nella maggior parte delle serie.

Tuttavia, questo processo porta ad escludere delle serie, ed aggregarne altre, nei prossimi sviluppi. Tra queste troviamo gli scarti di poliestere, che ha fornito in assoluto il peggiore risultato, non riuscendo a portare alla formazione di un provino. Non si esclude la possibilità di formare un pannello rigido con questo materiale, ma in questo progetto, e con le possibilità attuali, non è stato possibile.

La serie L, nella quale è stata sperimentata una colla idrorepellente a base di glicerina, non ha avuto buoni risultati. Nonostante siano stati composti diversi provini, con diverse percentuali di colla , essi risultano piuttosto fragili, e profondamente condizionati dall'umidità atmosferica. A tal proposito risulta normale il condizionamento della lana all'umidità, essendo un materiale animale e quindi igroscopico, ma in questo caso è la colla prodotta a subire un degrado in presenza di acqua: i provini infatti non risultano completamente asciutti, sia valutando la loro massa sia semplicemente al tatto.

Un'altra serie che non verrà presa in considerazione, nonostante le ottime aspettative, come emerso nei grafici di Kiviat (paragrafo 5.1), è la serie E, quella realizzata con il PLA. Esso risultava come un'alternativa sostenibile vincente, rispetto alla serie A, dove sono stati utilizzati dei polimeri termoindurenti di origine sintetica. Visti gli ottimi risultati emersi dalla serie A, l'obiettivo era quello di sostituire tali polimeri mantenendo invariato il processo, generando però provini biodegradabili e di origine naturale. I risultati purtroppo non sono stati all'altezza delle aspettative: i provini risultano con un grado di coesione minimo, non idoneo a divenire dei pannelli fonoassorbenti. Per ovviare a tale problema è stata cercata una soluzione nella realizzazione di un base rigida in PLA per conferire supporto al campione, ma anche in questo caso l'esito è stato il medesimo. L'utilizzo del PLA (o di altri polimeri biodegradabili di origine naturale) rimane comunque la più valida alternativa ai polimeri termoindurenti, questa però deve essere sviluppata attraverso altri processi e realtà, non riconducibili al presente progetto.

Una tra le sperimentazioni che ha determinato i migliori risultati è proprio la serie A, come suggerivano gli studi di ricerca effettuati nel capitolo 3. Attraverso l'utilizzo dei polimeri e del loro punto di fusione differente dalle fibre, è stato possibile realizzare molteplici campionature, variandone la densità. Quest'ultima è stata controllata, a differenza di tutte le altre campionature, attraverso l'utilizzo di una pressione sui campioni durante la fase di cottura, mantenendo costante il rapporto fra i due materiali, grazie a una aggregazione del tutto naturale fra polveri polimeriche e polveri di lana. Inoltre i provini realizzati in questo modo risultano completamente riciclati, con forti vantaggi a livello economico (valutando solo il costo delle materie prime e non del processo), resistenti all'acqua e all'umidità e con un processo di formazione piuttosto semplice. Tuttavia, come emerso nel paragrafo 5.1, i campioni non presentano caratteristiche di biodegradabilità, per via dell'origine sintetica dei polimeri, questo dovrebbe portare a un attento studio del ciclo di vita potenziale del prodotto. Questa tipologia verrà comunque esplorata nei successivi capitoli poiché, come accennato, con altre possibilità, tali polimeri potrebbero essere sostituiti da polimeri "bio", i quali avrebbero come unico difetto un costo maggiore.

I campioni realizzati con colle derivanti dall'amido di mais e di riso, rispettivamente serie B e serie C, sono del tutto comparabili, sia nella lavorazione sia nei risultati. Solamente i test acustici potranno mettere in evidenza le differenze fra i due leganti. Tuttavia esistono delle divergenze, soprattutto legate alla provenienza della materia. L'amido di mais, dal quale la colla viene generata, è un prodotto commerciale, e quindi caratterizzato da un costo, seppur basso, da prendere in considerazione. L'amido di riso rappresenta invece uno scarto nella filiera del riso, quindi porterebbe alla realizzazione un pannello totalmente riciclato, di origine naturale, biodegradabile e vantaggioso economicamente. Sebbene questo scarto non sia stato reso disponibile dalle aziende nelle tempistiche desiderate, rappresenta la soluzione ottimale, a conferma di quanto emerso nel paragrafo 5.1.

La serie G, H e I, nelle quali sono stati realizzati campioni con colle di origine animale, hanno dato risultati equivalenti e del tutto paragonabili. Tra di esse emerge come la colla d'ossa abbia un potere adesivo maggiore rispetto alle altre due, permettendo la realizzazione di campioni con densità e percentuali di colla più basse. Se confrontate con le altre colle, derivanti dall'amido e quelle commerciali, il potere collante risulta net-

tamente superiore. Anche in questo caso il prodotto derivante avrebbe caratteristiche di sostenibilità elevate, quali biodegradabilità e origine naturale. Presentano tuttavia alcune problematiche: una riferita al costo di acquisto, l'altra relativa ai lunghi tempi di preparazione della colla.

Al contrario, le colle commerciali utilizzate nelle serie F e M, sono direttamente applicabili, essendo vendute come colle pronte all'uso. Proprio per la loro tipologia, l'essere colle naturali vendute su larga scala, sono caratterizzate da prezzi nettamente elevati, con incidenze notevoli in una eventuale valutazione economica (in particolare la serie M).

La serie N, basata sul gesso, è stata una iniziativa non prevista, ma dato il suo largo impiego nell'edilizia e nell'acustica è stata sperimentata la sua fattibilità: il principale problema risulta il tempo di presa, che rende difficoltosa la realizzazione dei provini.

Comunemente a tutte le colle utilizzate il controllo della densità è avvenuto tramite l'aumento in percentuale della colla rispetto alle fibre di lana. Ad alte percentuali di colla, e quindi ad elevate densità, i campioni acquistano una maggiore rigidità, si ha inoltre una diminuzione del volume del provino e una maggiore difficoltà nella realizzazione. Elevate quantità di colla, potrebbero comportare la chiusura dei pori e delle interconnessioni fra di essi, portando a un drastico calo, o addirittura annullare, le performance acustiche tipiche dei materiali porosi. A basse percentuali di colla e di densità, la lana è in grado di far emergere le proprie caratteristiche acustiche, ma per preservarle non sempre è stato possibile realizzare un provino con un adeguata coesione. Infatti al di sotto di certe percentuali, in genere con un rapporto di 1:1 (in base alla colla utilizzata), la composizione del campione non è stata possibile, oppure è stata considerata non idonea. Non si esclude la possibilità di scendere a quantità di colla minori, introducendo la variabile della pressione.

Un problema comune a tutte le serie, ad esclusione della serie A, nella quale sono stati utilizzati dei polimeri, è la loro scarsa resistenza all'acqua e all'umidità, in riferimento alla colla. Infatti essendo tutte colle di origine naturale e di conseguenza biodegradabili, presentano questo tipo di problematica, che dovrebbe essere analizzata e approfondita per capire il loro effettivo comportamento in ambienti soggetti ad elevata umidità. In alternativa il legante potrebbe essere sviluppato chimicamente per poter migliorare questa caratteristica, per esempio attraverso

la reticolazione del pannello.

Si sottolinea come queste sperimentazioni siano valide per le dimensioni descritte, perciò per la realizzazione di un pannello, con formati maggiori potrebbero entrare in gioco nuove variabili e le "ricette" descritte non essere più valide o potrebbero necessitare di un successivo perfezionamento.

Infine si ricorda che lo sviluppo di tale sperimentazione, e in particolare la realizzazione degli 86 campioni, è nata con il fine di verificare la fattibilità, la coesione, le colle, le matrici, le differenze, i processi e le possibilità, per poi andare ad approfondire le proprietà acustiche in successione. Grazie al profondo controllo della fase realizzativa, ampiamente descritta e dettagliata, e grazie alla possibilità offerta dall'INRiM, una parte di questi campioni potrà essere testata alla resistività al flusso, e tramite modelli acustici sarà possibile ricavare l'assorbimento alle varie frequenze (vedi capitolo 7).

E' possibile concludere, sulla base di questa sperimentazione e delle precedenti ricerche, che i leganti potenzialmente più idonei al fine di produrre TECA panel, siano quelli a base polimerica (specialmente se i polimeri sintetici possono essere sostituiti con polimeri di origine naturale), e quelli derivanti dall'amido, in particolare quello di riso. Solamente con una valutazione acustica si potrà confermare o disdire questa conclusione, in cui i leganti citati verranno confrontati con una selezione delle altre serie.

Al fine di permettere un confronto diretto fra le serie realizzate, e non sulle colle (poiché per esse, al paragrafo 5.1, sono già stati realizzati dei confronti attraverso i diagrammi di Kiviat), dalle quali comunque dipendono, verranno riportate nella tabella riassuntiva 1, le rispettive caratteristiche e proprietà, nonché l'elenco delle serie utilizzate, al fine di rendere la lettura più semplice.

- **Serie A:** *fibre Reda + scarti di polimeri termoindurenti*
- **Serie B:** *fibre Reda + colla di amido di mais*
- **Serie C:** *fibre Reda + colla di amido di riso*
- **Serie D:** *fibre Reda + tessuto in poliestere*
- **Serie E:** *fibre Reda + PLA*
- **Serie F:** *fibre Reda + colla "Coccoina"*
- **Serie G:** *fibre Reda + colla di coniglio "Liberon"*
- **Serie H:** *fibre Reda + colla di pesce*
- **Serie I:** *fibre Reda + colla d'ossa "Zeus"*
- **Serie L:** *fibre Reda + colla idrorepellente a base di glicerina*
- **Serie M:** *fibre Reda + Colla naturale "Creartec eco-friendly"*
- **Serie N:** *fibre Reda + gesso scagliola*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N
100 % riciclato	X		X	X								
100 % naturale		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Biodegradabile		X	X		X	X	X	X	X	X	X	
Rigidità	X	X	X			X	X	X	X		X	X
Semplicità del processo	X					X					X	
Resistenza all'acqua	X				X							
Sostenze tossiche												
Vantaggio economico	X		X	X								
Costo elevato						X					X	

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle caratteristiche per ogni serie sperimentata.

7

VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE ACUSTICHE: LA RESISTIVITÀ AL FLUSSO

- Berardi Umberto, Iannace Gino, *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*, in *Building and Environment*, volume 94, Elsevier, 2015, pp. 840-850.
- Bonfiglio Paolo, Pompoli Francesco, *Inversion Problems for Determining Physical Parameters of Porous Materials: Overview and Comparison Between Different Methods,* in *Acta Acustica united with Acustica,* volume 99, S.Hirzel, 2013, pp.1-11.
- Castagnède Bernard, et. al, *Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials,* in *Applied Acoustics*, volume 61, Elsevier, 2000, pp. 173-182.
- Schiavi A., *et. al, Definizione di un modello geometrico per la determinazione della porosità effettiva e della tortuosità in mezzi fibrosi, Associazione Italiana di Acustica 41° Convegno Nazionale,* 2014, pp. 1-8.
- Schiavi Alessandro, *et. al, Effect and importance of static-load on airflow resistivity determination and its consequences on dynamic stiffness,* in *Applied Acoustics,* volume 72, Elsevier, 2011, pp. 705-710.
- Spagnolo R. , *Acustica*, fondamenti e applicazioni, Utet, 2015.
- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283.
- Voronina N., *Acoustic Properties of Fibrous Materials,* in *Applied Acoustics*, volume 42, Elsevier, 1994, pp. 165-174.
- Xiaoning Tang, Xiong Yan, Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review, in Composites: Part A, volume 101, Elsevier, 2017, pp. 360-380.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

7.1 CALCOLO DELLA RESISTIVITÀ AL FLUSSO

La resistenza al flusso di un materiale è definita come "la differenza di pressione che deve essere applicata alle due estremità del materiale per forzare attraverso di esso un flusso d'aria con velocità volumetrica. Nel caso di materiali omogenei la resistenza è proporzionale allo spessore del materiale e inversamente proporzionale all'area della sezione, in questo caso si utilizza il valore di resistività al flusso"[1]:

$$r = \frac{\Delta p}{q_v} \cdot \frac{A}{d} \quad [\text{Pa s/m}^2]$$

dove Δp [Pa] è la differenza di pressione da applicare alle due estremità, q_v la velocità volumetrica del flusso d'aria, A [m^2] coincide con l'area della sezione e d [m] lo spessore del materiale.

Tale proprietà è un parametro fisico che caratterizza i materiali fonoassorbenti porosi e fibrosi[2], che, a seguito di una caratterizzazione acustica, permette di valutare l'assorbimento di una vasta quantità di materiali in diversi campi di applicazione. La resistività al flusso valuta la capacità di un materiale di essere attraversato da un flusso d'aria e la resistenza incontrata da quest'ultimo all'interno della struttura (vedi paragrafo 2.3). Si deduce l'importanza delle caratteristiche del materiale, dalle quali essa dipende, come la porosità e la tortuosità. Infatti se la resistività al flusso è troppo alta, significa che il materiale ostacola il passaggio dell'aria al suo interno, con una tendenza a riflettere piuttosto che assorbire. Questo comporta una stretta relazione fra resistività al flusso e densità: all'aumentare della densità e quindi al diminuire della porosità, la resistività al flusso del campione è destinata a crescere, e di conseguenza la permeabilità a diminuire.

Una relazione empirica, per materiali porosi, fra resistività al flusso R, densità superficiale S [Kg/m^2], spessore T [m] e diametro delle fibre ρ [m], viene individuata nella seguente formulazione[3]:

$$R = \mathrm{K}\,\frac{S^{(1+x)}}{T^x} \cdot \frac{1}{\rho^2} \quad [\text{Pa*s/m}^3]$$

dove K è una costante del materiale, mentre x varia a seconda della disposizione delle fibre (0,3 per una disposizione parallela delle fibre alla faccia e 1 per una disposizione casuale).

Negli anni sono stati sviluppati ed evoluti ulteriori modelli, tra cui si ricorda quello di Castagnède[4]:

$$R_n = n^2 R_0 \quad [\text{Pa*s/m}^2]$$

dove n è il rapporto fra lo spessore prima e dopo la compressione del campione, R_0 è la resistività prima della compressione [Pas/

1_Spagnolo R., 2015, op. cit.
2_ Schiavi Alessandro, et. al, 2014, op.cit.
3_Voronina N., 1994, op. cit.
4_Castagneède Bernard, et. al, *2000,* op cit.

m^2], R_n la resistività in seguito alla compressione.

Risulta quindi evidente come la possibilità di effettuare questa misura sui campioni realizzati sia fondamentale. Infatti, attraverso questo test, potrebbe essere valutata la coerenza fra la parte sperimentale e le proprietà dei campioni, quali la densità, la porosità, la resistività al flusso e la permeabilità, confermando o meno, le intenzioni ricercate nella fase realizzativa. Inoltre, in seguito all'applicazione di modelli empirici, potrebbe essere ricavato l'assorbimento acustico dei campioni, permettendo così un confronto fra quelli delle stesse serie a densità diverse, e fra le numerose serie prodotte, al fine di valutare come le diverse tipologie di colle e legami utilizzati, influiscano sulle performance acustiche. Quest'ultime altrimenti non sarebbero valutabili utilizzando i campioni realizzati: dovrebbero essere composti campioni di notevoli dimensioni ed essere testati in camera riverberante. Attraverso l'analisi di resistività al flusso è invece possibile utilizzare direttamente i campioni realizzati, che risultano una valida alternativa in fase di prototipazione e di proof of concept.

7.1.1 CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ AL FLUSSO (INRIM)

L'analisi di resistività al flusso sui provini realizzati e selezionati, è stata eseguita presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica di Torino (INRiM) sulla base della norma ISO 9053 (Acoustics – materials for acoustical applications – determination ofairflow resistance). Lo strumento, mostrato in figura 1, è stato progettato e realizzato internamente all'Istituto; vengono ora riportate le principali caratteristiche di costruzione*:*

" • Una cella di misura, diametro 100 mm.
• Una piastra forata per il supporto del materiale, con un'area aperta di circa il 60%; i fori nella piastra di supporto hanno un diametro di 4 mm (figura 4).
• Un pistone in teflon, diametro 50 mm, guidato da un eccentrico con giunto a sfere collegato a un motore passo-passo, che produce un flusso d'aria volumetrico alternato ad una frequenza di 2 Hz; il tratto (spostamento da picco a picco) del pistone è di 1,706 ± 0,001 mm.
• Un microfono a condensatore per la misura dell'alternanza della componente di pressione, nel volume chiuso nella cellula di misurazione.
• Un amplificatore di misura del segnale del microfono.
•Un analizzatore di spettro in tempo reale." [5]

Oltre alle caratteristiche citate vengono ora riportati i dati relativi al flusso d'aria interno

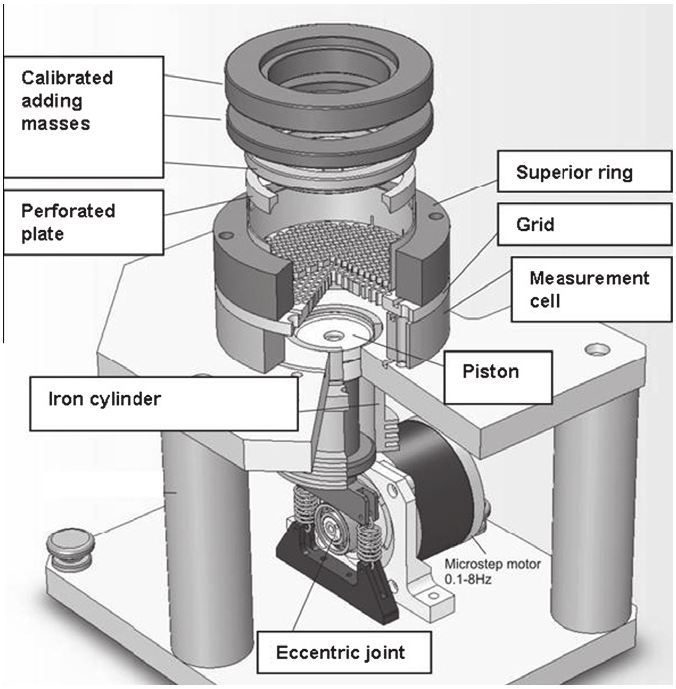


Figura 1: Strumento di misura della resistività al flusso, Alessandro Schiavi, et. al, 2014, op cit.

alla cella, alla sensibilità dello strumento, e ai carichi che possono essere utilizzati:

"Il risultante valore r.m.s. della velocità del flusso d'aria lineare corrisponde a $u_{r.m.s.}$ = $1.89x10^{-3}$ m/s, e il flusso volumetrico alternato risulta $q_{v,r.m.s.}$= $1.49x10^{-5}$ m^3/s. La sensibilità dell'apparato viene valutata sulla base del rapporto tra la tensione di uscita dal microfono calibrato nella cella di misura chiusa ermeticamente e la pressione effettiva calcolata all'interno della cella di prova. La sensibilità misurata, usando questo apparecchio, è di 19,20 Pa V^{-1} (p_0 = 984 kPa) con un intervallo di confidenza del 95% di 0,34 Pa V^{-1}. [...] L'apparato è dotato di una piastra di carico con un'area aperta del 60%, nella quale è possibile aggiungere masse note. In particolare, i carichi utilizzati per le valutazioni della resistenza del flusso d'aria sono gli stessi adottati nelle misurazioni utilizzate nell'acustica degli edifici. Riferendosi alle misure di compressione, in accordo con la norma EN 12431, i carichi utilizzati in questo lavoro sono 250 Pa e 2 kPa " [6].

5,6_Schiavi Alessandro, et. al, 2014, op.cit.

7.1.2 MISURA DELLA RESISTIVITÀ AL FLUSSO SUI CAMPIONI E ACQUISIZIONE DEI DATI

Mediante l'utilizzo dello strumento di misura della resistività al flusso, risulta possibile utilizzare i provini realizzati nel precedente capitolo tuttavia, a causa dei numerosi campioni realizzati, è stato necessario sceglierne un gruppo rappresentativo minore. In accordo con le conclusioni riguardanti la parte sperimentale (paragrafo 6.3) sono state escluse le serie non ritenute idonee, selezionando dunque quelle che hanno fornito i migliori risultati in termini di composizione e di controllo del processo. In particolare sono state scelte: la serie A (fibre + polimeri), la serie B (fibre + amido di mais), la serie C (fibre + amido di riso), serie F (fibre + colla Coccoina), serie I (fibre + colla d'ossa, in rappresentanza delle colle animali), serie M (fibre+ colla Creartec) e serie N (fibre + gesso). Come emerge dalla tabella 1, all'interno di ogni serie, sono stati selezionati i provini che visivamente mostrano una migliore coesione fra le fibre e una rigidità sufficiente per tale scopo: al fine di permettere un confronto diretto sono stati scelti i campioni con un rapporto fibra-colla corrispondente ad 1:1, 1:1,5 e infine quelli con il rapporto massimo per ogni serie analizzata (da 1:2 a 1:3). Per la serie A, ove il controllo della densità è avvenuto tramite l'applicazione di una determinata pressione, sono stati scelti quattro campioni con densità crescente. Tuttavia, sebbene si sia optato per campioni con rapporti similari, non sarà possibile una valutazione diretta fra le diverse serie, poiché le densità, a parità di rapporto, risultano diverse, a causa della differente natura e delle caratteristiche di ogni colla utilizzata.

Nonostante la possibilità di utilizzare tali campioni per l'esecuzione di questa misura, essi sono stati adattati, poiché il loro diametro non coincideva con quello dello strumento. Si ricorda che i provini in questione sono stati realizzati per verificarne la loro fattibili-

	Rapporto fibre-colla [g]	Pressione
A014	5:5	-
A017	5:5	70 Kg/m^2
A019	5:5	250 Kg/m^2
A020	7:7	250 Kg/m^2
	Rapporto fibre-colla	
B005	1:1	
B007	1:1,5	
B009	1:2,5	
C004	1:1	
C005	1:1,5	
C007	1:3	
F001	1:1	
F002	1:1,5	
I003	1:1	
I004	1:1,5	
I005	1:2	
M002	1:1	
M003	1:1,5	
N002	1:2	

Tabella 1: Campioni selezionati.

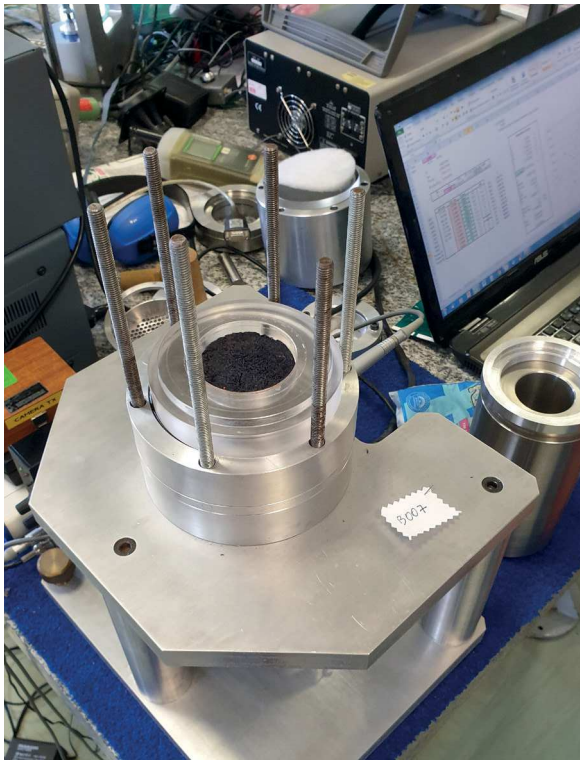


Figura 2: Campione inserito all'interno della flangia, per adattare il diametro allo strumento.

Figura 3: Campione in fase di misurazione.

tà e i rispettivi processi. Attraverso l'utilizzo di una flangia il diametro dello strumento è stato portato da 100 mm fino al diametro di 58,8 mm (figura 2). Inoltre per consentire l'esatto accoppiamento fra la flangia e i provini essi sono stati rifiniti e all'occorrenza sigillati sulla circonferenza.

La misura (figura 3) avviene tramite lo strumento di cui le caratteristiche sono descritte nel paragrafo precedente: il moto rettilineo alternato del pistone al suo interno, azionato da un sistema biella-manovella alimentato da un motore elettrico, genera una variazione di pressione all'interno della cella chiusa, misurata attraverso un microfono interno.

Lo strumento lavora solo alla frequenza di 2Hz (tabella 2) grazie a un filtro passabanda; in questo modo determinati rumori esterni non vanno a interferire con lo strumento in fase di misurazione.
Azionando lo strumento in assenza di un materiale poroso, viene raffigurata, sullo scher-

Strumento, parte interna		
Corsa	0,000853	m
Area	0,001924	m^2
dV	1,64153E-06	m^3
Volume	1,29E-03	m^3
diametro	0,099	m
h	0,16205	m
V1	0,00124741	m^3
V2	0,0010500	m^3
V3	0,0012566	m^3
V4	0,0012897	m^3

Microfono		
diam.microfono	0,0133	m
h microfono	0,007	mm
Volume microfono	9,72504E-07	m^3

Dati strumento		
P0	98220,0	Pa
P taratura	123,76	Pa
Vrms	5,290	V
sensibilità	42,74	mv/Pa
Area	0,002715467	m^3
f	2	Hz
V	5,29	V

Dati ambientali		
temperatura	23° ± 3°	C
pressione	982.2	hPa
viscosità aria	1,83E-05	Pa s
porosità	0,25	-
densità aria	1,15	Kg/m^3
Ergun Lin:	14,74	Pa/m
Ergun inerz:	0,46	Pa/m
%	3,149892665	-

Dimensioni provino		
r1	0,0294	m
r2	0,0294	m
S1	0,002715	m^2
S2	0,002715	m^2
h	0,02258	m
V	6,13152E-05	m^3
Sup.Media	0,002715467	m^2

Tabella 2: Input per lo svolgimento della misura di resistività al flusso, 16/05/2019. Tali dati sono esplicitati nel testo, con opportune speigazioni.

mo ad esso collegato, una sinusoide di 2Hz, che rappresenta la variazione di pressione interna allo strumento e una V_{rms} di 5,29 V. In questo caso la sensibilità dello strumento è risultata di 42,74 mv/Pa, dato prossimo a quello di taratura, 43,7 mv/Pa (tabella 2).
Procedendo con l'inserimento di un materiale poroso, risulta d'obbligo aumentare il volume della cella per evitare la saturazione di pressione dello strumento (figura 3), e in seguito avviare la misura. Conoscendo la sensibilità a volume chiuso dello strumento, non avendo più un tappo ermetico ma un tappo cedevole ossia il nostro materiale poroso, avremo una differenza fra le due variazioni di pressioni dalle quali deduciamo la resistività al flusso.

Vengono riportati nella tabella 2, i dati tecnici dello strumento, le condizioni ambientali specifiche e tutti i dati necessari per lo svolgimento della misura, effettuata in data 16/05/2019.
Tra i dati riferiti al volume interno dello strumento troviamo la corsa, la quale fa riferimento alla distanza fra punto morto superiore e punto morto inferiore del pistone, mentre l'area è riferita alla superficie interna dello strumento. Il termine "dV" coincide con il prodotto fra i due termini precedenti. Il volume, corrispondente a "V4", è calcolato considerando il volume interno senza griglia sommato a quello dei fori e quello del volumetto sopra il pistone, escludendo invece il volume del microfono. Vengono inoltre riportati i dati relativi al microfono: altezza, diametro e volume. Nei dati relativi allo strumento, il termine "V_{rms}" rappresenta il valore quadratico medio in assenza di un materiale poroso all'interno dello strumento stesso. La sensibilità risulta come prodotto fra P_0 (pressione ambientale) e V_{rms}, in questo caso in linea con quella di taratura dello strumento. Fondamentali le caratteristiche interne all'ambiente, tra cui la temperatura, 23 °C con un'oscillazione massima di 3°C, la pressione, 982.2 hPa, e l'umidità, come riferimento per il confronto. Attraverso questi parametri un software interno ricava la viscosità dinamica dell'aria.

Oltre alla misura effettuata tramite lo strumento, al fine di completare il modello, e dunque ricavare le proprietà desiderate, è indispensabile inserire per ogni provino analizzato il diametro, l'altezza e la massa (tabella 3). Il diametro, mediante la flangia utilizzata è stato portato per tutti i provini a 58,8 mm. Per calcolare l'altezza di ogni campione, per via delle superfici irregolari, sono state effettuate 4 misure da cui è stato ricavato un valore medio. La massa è stata ottenuta tramite la misura con una bilancia scientifica presso l'INRiM.

	massa [g]	altezza media [cm]
A014	4,88	23,9
A017	7,53	16,4
A019	7,24	15,1
A020	11,22	16,8
B005	7,89	16,5
B007	14	17,8
B009	14,92	17,6
C004	12,55	17,1
C005	12,54	13,3
C007	20,97	20
F001	15,38	20,1
F002	19,77	18,1
I003	12,91	16,4
I004	14,21	15,1
I005	26,59	19,5
M002	12,71	17
M003	12,74	12,2
N002	27,89	18,2

Tabella 3: Massa e altezza media campioni.

Grazie all'utilizzo di questi dati, processi e modelli sono state ricavate le seguenti caratteristiche specifiche per ogni campione,le quali verranno riportate in dettaglio nel paragrafo successivo:

• **Resistività al flusso, r [KPa*s/m²]:** viene ottenuta attraverso il dato direttamente fornito dallo strumento, la variazione di pressione (mV_{rms}). Da essa, attraverso dei modelli matematici basati sui dati riportati nella tabella 2, si ricava la resistività specifica. Il rapporto fra resistività specifica e altezza media del provino fornisce la resistività al flusso.

• **Permeabilità, K [md]:** è definita come il rapporto fra la viscosità dell'aria e la resistività al flusso di ogni provino.

• **Volume, V [m³]:** viene ottenuto dal prodotto fra superficie (costante in tutti i provini, grazie all'utilizzo della flangia) e altezza media.

• **Densità apparente, ρ [Kg/m³]:** è ricavata dal rapporto fra massa e volume di ogni singolo campione.

• **Porosità apparente [-]:** si ottiene dividendo la densità apparente e la densità effettiva (1.290 kg/m³).

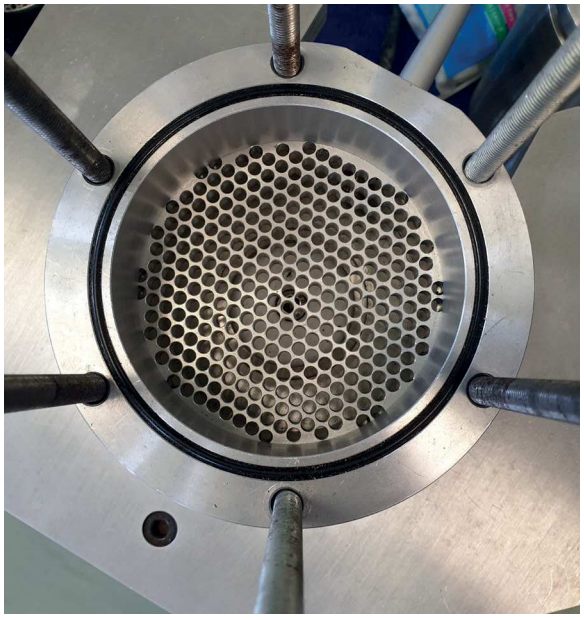


Figura 4: Strumento di misura, cella interna.

7.1.3 RISULTATI DELLA MISURA DELLA RESISTIVITÀ AL FLUSSO

Sulla base delle misurazioni effettuate presso l'INRiM di Torino, spiegate nel capitolo precedente, vengono ora esposti i dati elaborati e i rispettivi risultati. Essi sono stati distinti in base alle diverse serie analizzate, al fine di permettere una corretta analisi. Infatti, senza questa catalogazione, per via della diversa natura dei collanti utilizzati nelle serie scelte, non sarebbe stato possibile individuare delle tendenze e sviluppare delle conclusioni oggettive.

I dati ricavati dalle misurazioni sono stati catalogati all'interno delle tabelle, illustrate nelle pagine successive. All'interno di ogni tabella, per ogni singola serie, vengono riportati i seguenti dati:

- resistività al flusso, r [kPa/m^2]
- volume, V [m^3]
- densità apparente, ρ [kg/m^3]
- porosità apparente hp[-]
- permeabilità, k [md]

A conferma dell'intenzione, in fase sperimentale, di controllare la densità attraverso la variazione della quantità di colla, o della pressione nel caso della serie A, emerge dai risultati come all'aumentare di tale rapporto vi sia un incremento effettivo della densità.
All'aumentare della densità, all'interno di ogni serie di campioni, aumenta la resistività al flusso, e diminuiscono la porosità e la permeabilità, trovando conferma in quello che la letteratura afferma sull'argomento. Infatti a maggiori densità, dovute all'aumento del quantitativo di collante, i pori e le relative interconnessioni interne tendono a chiudersi, rendendo il provino non permeabile e con una resistività al flusso ovviamente maggiore. Unica eccezione emerge nella serie I, dove il provino I004 nonostante la sua elevata densità, maggiore del provino I003, presenta una resistività al flusso minore. Questa incongruenza probabilmente deriva da un errore in fase di misurazione della resistività al flusso del campione, il quale non è stato adeguatamente sigillato all'interno della flangia di contenimento, permettendo un passaggio del flusso superiore a quello che il provino avrebbe consentito in assenza di fessure.

Questi risultati sono stati esplicitati, per una lettura più chiara e diretta, attraverso l'utilizzo di grafici a dispersione, specifici per ogni serie di provini, dove tali attitudini sono state evidenziate da linee di tendenza lineari, comuni a tutte le serie (tabelle dalla 4 alla 10). Nel primo grafico di ogni serie vengono messe in relazione la resistività al flusso sull'asse delle ordinate, e la densità sull'asse delle ascisse, mentre nel secondo grafico di ogni serie si evidenzia la relazione fra la permeabilità sull'asse delle ordinate, e la poro-

sità apparente sull'asse delle ascisse (figure dalla 5 alla 16).

Grazie a queste linee di tendenza risulta quindi possibile, esplicitare la relativa funzione che ci permette di approssimare la resistività al flusso in base alla densità. Questo passaggio risulta fondamentale ed estremamente rilevante poiché per ogni serie è possibile ottenere la resistività al flusso a qualsiasi densità desiderata, senza realizzare ulteriori campioni ed eseguire nuove misurazioni.
Per verificare la validità di questa relazione viene presa in considerazione la funzione risultante dalla serie A:

$$y = 0{,}9158x - 71{,}846$$

dove x corrisponde alla densità richiesta, mentre y alla relativa resistività al flusso incognita.
Inserendo per esempio la densità del campione A019, 176,6 kg/m^3, ricaviamo una resistività di 89 kPa s/m^2, risultato approssimabile a quello valutato in linea pratica. Ovviamente l'utilizzo delle densità dei provini posizionati all'estremità del grafico, comporta una resistività al flusso teorica uguale a quella misurata, poiché la funzione passa esattamente da quel punto.
Questo processo risulta utile per il campione I004 (distinto da un errore), dove utilizzando la funzione inerente alla serie I:

$$y = 1{,}1781x - 325{,}08$$

ricavata però escludendo il campione in questione, e considerando la sua densità, è possibile ricavare la relativa resistività al flusso teorica corretta: 83,25 kPa s/m^2.

In seguito a una valutazione delle funzioni risultanti per ogni serie analizzata, emerge come esse siano in alcuni casi equiparabili: la motivazione secondo la quale queste non coincidono in tutte le serie dipende dalla colla utilizzata alle densità maggiori. Infatti per bassi rapporti i risultati tendono agli stessi valori, poiché è la fibra di lana a manifestare le proprie caratteristiche; a rapporti superiori subentra l'effetto della colla, ognuna delle quali è caratterizzata da proprietà diverse

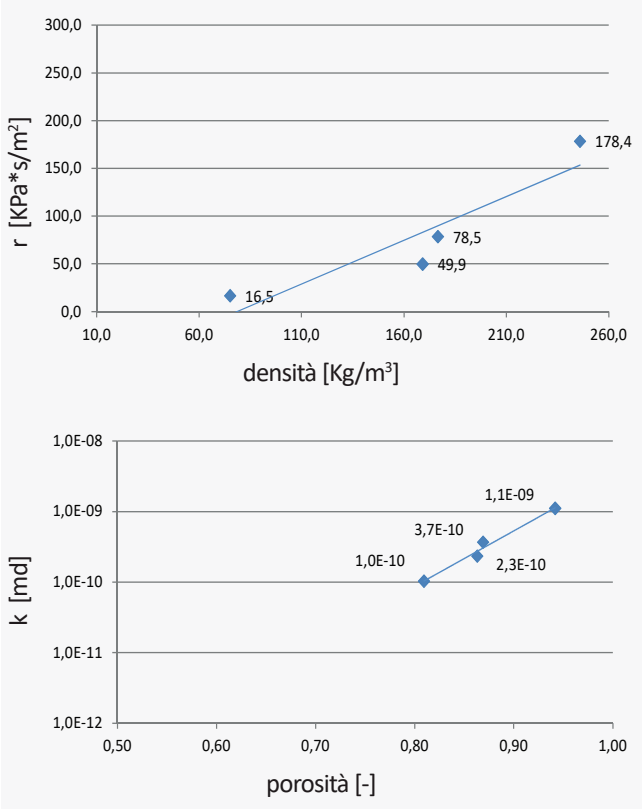
Anche nei grafici in cui si mette in relazione permeabilità (asse delle ordinate) e porosità (sull'asse delle ascisse) è possibile valutare una tendenza comune a tutte le serie considerate: secondo la quale all'aumentare della porosità aumenta la permeabilità del campione, confermando così le aspettative previste. Questo dato pur non essendo utile per le successive caratterizzazioni acustiche risulta importante per confermare l'esattezza del processo realizzato: infatti all'aumento della densità, in seguito all'incremento del collante nel campione, i pori tendono a chiudersi, portando a diminuire la porosità e di conseguenza anche la permeabilità.

SERIE A: Fibre + Polimeri

A014 *A017* *A019* *A020*

	r [KPa*s/m²]	V [m³]	ρ [Kg/m³]	hp [-]	K[md]
A014	16,5	6,49E-05	75,2	0,94	1,1E-09
A017	49,9	4,45E-05	169,1	0,87	3,7E-10
A019	78,5	4,10E-05	176,6	0,86	2,3E-10
A020	178,4	5,56E-05	245,9	0,81	1,0E-10

Tabella 4: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie A.



Funzione lineare SERIE A:
y = 0,9158x - 71,846

Emerge dai risultati delle analisi, come in questa serie siano state raggiunte densità più basse rispetto alle altre serie composte, comportando di conseguenza, resistività al flusso minori ed elevate porosità, tipiche dei materiali fonoassorbenti porosi fibrosi.
Si deduce come all'aumentare della densità aumenta la resistività al flusso e diminuisce la porosità e la permeabilità, confermando la letteratura specifica su tale argomento.

Figura 5 e 6: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie A.

SERIE B: Fibre + Colla Amido di Mais

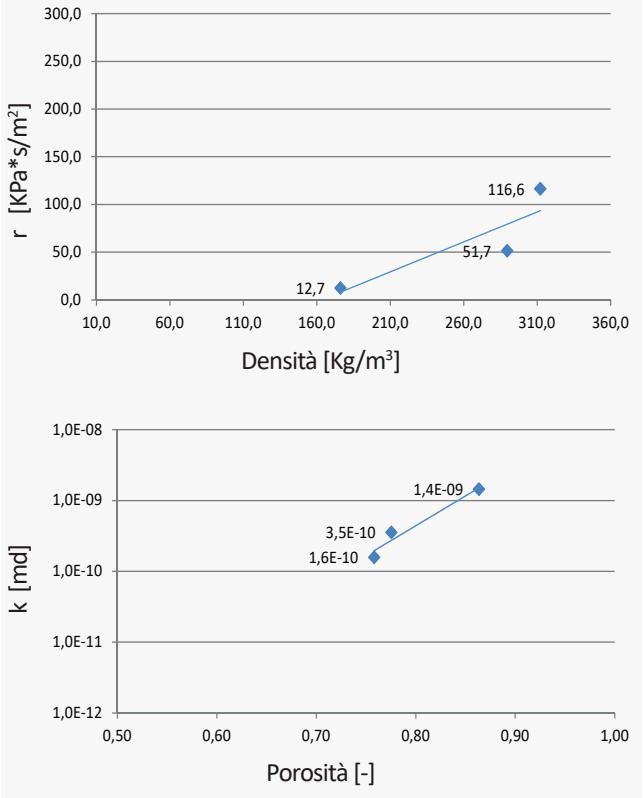
B005

B007

B009

	r [KPa*s/m²]	V [m³]	ρ [Kg/m³]	hp [-]	K[md]
B005	12,7	4,48E-05	176,1	0,86	1,4E-09
B007	51,7	4,83E-05	289,6	0,78	3,5E-10
B009	116,6	4,78E-05	312,2	0,76	1,6E-10

Tabella 5: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie B.



Funzione lineare SERIE B:
y = 0,6274x - 102,38

Si può dedurre dai risultati del campione B005, come esso sia caratterizzato da una bassa resistività al flusso nonostante una densità comunque elevata.
Anche in questa serie i risultati rispettano le aspettative: emerge un rapporto crescente fra resistività al flusso e densità e un rapporto direttamente proporzionale fra permeabilità e porosità dei campioni oggetto di analisi.

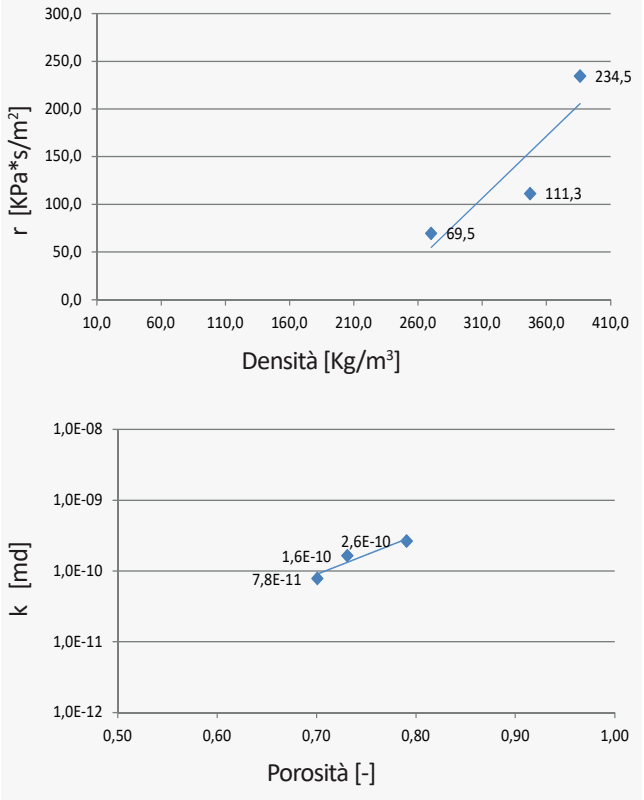
Figura 7 e 8: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie B.

SERIE C: Fibre + Colla Amido di Riso

C004 *C005* *C007*

	r [KPa*s/m²]	V [m³]	ρ [Kg/m³]	hp [-]	K[md]
C004	69,5	4,64E-05	270,3	0,79	2,6E-10
C005	111,3	3,61E-05	347,2	0,73	1,6E-10
C007	234,5	5,43E-05	386,1	0,70	7,8E-11

Tabella 6: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie C.



Funzione lineare SERIE C:
y =1,3006x - 296,65

In questa serie le densità ottenute risultano mediamente più elevate rispetto agli altri campioni, portando a valori di porosità apparente sotto la media per questa tipologia di materiali. Tuttavia i dati risultanti confermano l'andamento secondo il quale all'aumentare del rapporto di colla all'interno del mix design aumenta la densità, condizionando la funzione risultante. All'aumentare della densità aumenta la resistività al flusso, diminuiscono invece porosità e permeabilità.

Figura 9 e 10: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie C.

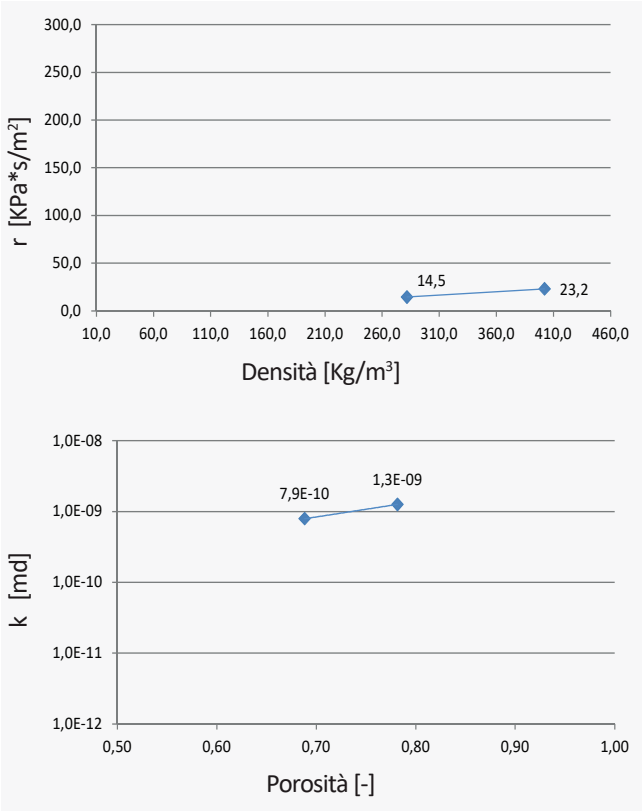
SERIE F: Fibre + Colla Coccoina

F001

F002

	r [KPa*s/m^2]	V [m^3]	ρ [Kg/m^3]	hp [-]	K[md]
F001	14,5	5,46E-05	281,8	0,78	1,3E-09
F002	23,2	4,91E-05	402,2	0,69	7,9E-10

Tabella 7: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie F.



Funzione lineare SERIE F:
y = 0,0719x - 5,7104

Questa serie è caratterizzata da solo due campioni analizzati: questo potrebbe portare a degli errori nel caso in cui la misura non fosse corretta, poiché non ci sarebbe un ulteriore valore per effettuare una valutazione. Inoltre è possibile notare come, a differenza delle altre serie, il coefficiente angolare della funzione risulti minore.
Tuttavia gli andamenti di resistività al flusso, densità, porosità e permeabilità appaiono corretti.

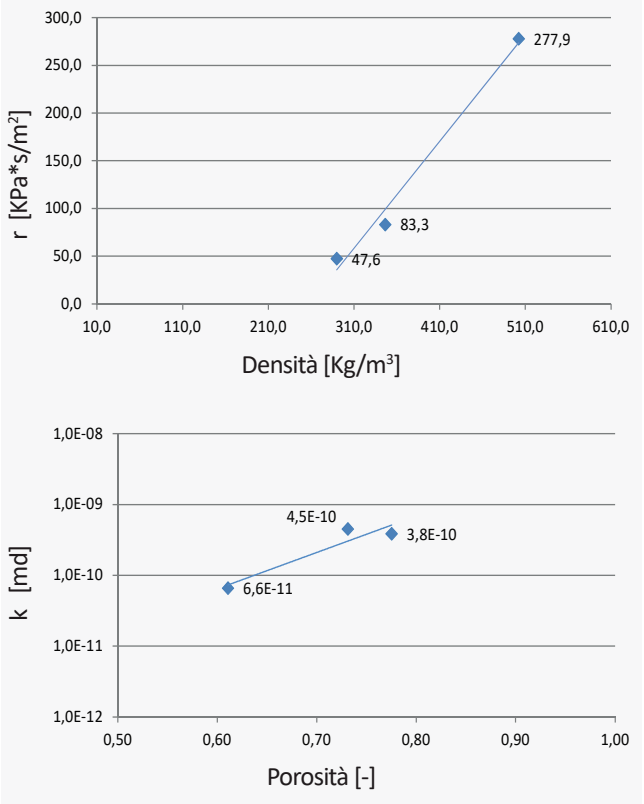
Figura 11 e 12: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie F.

SERIE I: Fibre + Colla d'Ossa

I003 *I004* *I005*

	r [KPa*s/m²]	V [m³]	ρ [Kg/m³]	hp [-]	K[md]
I003	47,6	4,45E-05	289,9	0,78	3,8E-10
I004	83,3	4,10E-05	346,5	0,73	4,5E-10
I005	277,9	5,30E-05	502,2	0,61	6,6E-11

Tabella 8: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie I.



Funzione lineare SERIE I:
y = 1,1781x - 325,08

Come esplicitato a inizio di questo paragrafo in questa serie è stato rivelato un errore: la resistività al flusso del campione I004, corrispondente a 40,8 KPa s/m², non risultava coerente con gli altri valori. Grazie alla funzione lineare ricavata dal grafico, nella quale è stato inserito il valore della densità misurata (X= 346,5 Kg/m³), è stata ottenuta la corretta resistività al flusso.

Figura 13 e 14: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie I.

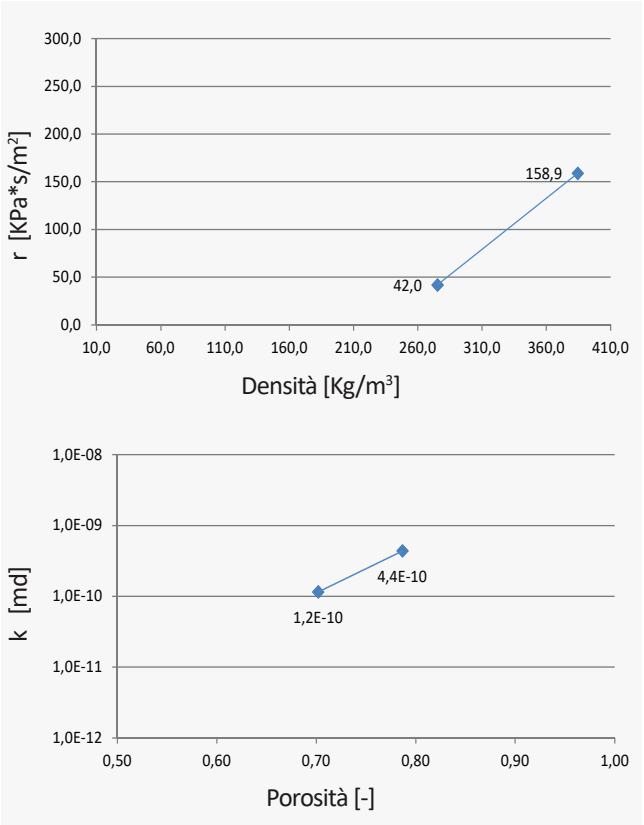
SERIE M: Fibre + Colla Creartec

M002

M003

	r [KPa*s/m^2]	V [m^3]	ρ [Kg/m^3]	hp [-]	K[md]
M002	42,0	4,62E-05	275,3	0,79	4,4E-10
M003	158,9	3,31E-05	384,6	0,70	1,1E-10

Tabella 9: Risultati della misura di resistività al flusso sui campioni serie M.



Funzione lineare SERIE M:
y = 1,0699x - 252,55

Nonostante siano stati valutati solo due campioni per questa serie, i risultati forniscono dei valori come da aspettative: all'aumentare della densità, determinata da un maggiore quantitativo di collante, la resistività al flusso aumenta, diminuiscono invece la porosità e la permeabilità.

Figura 15 e 16: Rispettivamente, relazione fra densità e resistività al flusso e relazione fra porosità e permeabilità, relativa ai campioni serie M.

SERIE N: Fibre + Gesso

N002

	r [KPa*s/m^2]	V [m^3]	ρ [Kg/m^3]	hp [-]	K[md]
N002	114,6	4,94E-05	563,9	0,56	1,6E-10

Tabella 10: Risultati della misura di resistività al flusso sul campione serie N.

Nell'ultima serie analizzata non risulta possibile elaborare dei grafici ed effettuare delle valutazioni poiché è stato analizzato un solo campione. Tuttavia verrà comunque calcolato il suo assorbimento acustico in frequenza, ma non sarà possibile, per mancanza di dati, sviluppare le caratterizzazioni acustiche nei paragrafi seguenti.

In conclusione, attraverso lo svolgimento di questa analisi, si trova conferma delle intenzioni espresse durante la fase sperimentale e dedotte dalla letteratura specifica, con particolare riferimento al controllo della densità e la rispettiva relazione con la resistività al flusso. Inoltre i provini sono stati definiti da specifiche proprietà e caratteristiche, tra le quali sono stati individuati degli andamenti comuni. Le funzioni inerenti a queste tendenze, nonché la resistività al flusso saranno i dati fondamentali per la caratterizzazione acustica del prossimo paragrafo. Questo risulterà fondamentale per valutare se le serie di campioni scelte nel paragrafo 6.3, serie A e serie C, come le potenziali scelte migliori, garantiscano buone performance acustiche, e, in ogni caso, per effettuare un confronto con gli altri collanti analizzati in questo paragrafo.

7.2 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA IN FUNZIONE DELLA RESISTIVITÀ AL FLUSSO

Lo sviluppo acustico che si dispiegherà di seguito, risulta strettamente collegato con l'analisi applicata ed elaborata nel paragrafo precedente. In particolare appare fondamentale il dato relativo alla resistività al flusso di ogni singolo provino e le funzioni ricavate dalle linee di tendenza nate dal rapporto fra la resistività e la densità. Un altro dato fondamentale concerne l'altezza dei provini, da essa, come evidenziato nel capitolo riguadante i materiali porosi, varia infatti la distribuzione dell'assorbimento in frequenza.

L'elaborazione acustica è basata su un modello matematico, fondato sul metodo empirico di Dalany e Bazley (1970): tale modellazione è valida per materiali porosi fibrosi, e consente di determinare l'impedenza caratteristica Z_0 del materiale poroso e quindi il calcolo del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale in funzione della frequenza[7]. Tale relazione coincide con:

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2$$

dove $Z=Z_0 \coth \gamma d$ e d coincide con lo spessore del materiale.

Nella tabella 11, vengono mostrati i dati di input con i quali si ha accesso al modello e che ne permettono il relativo funzionamento: in particolare si entra nel modello con la resistività al flusso e con lo spessore del relativo campione, mantenendo invece gli altri parametri costanti (densità, velocità del suono, prodotto $\rho_0 c_0$ e π). Il modello non verrà discusso in questo studio per la sua profonda complessità e poiché non rappresenta il fine di tale ricerca: verranno solo considerati i dati immessi e i risultati acustici sviluppati.

densità	1,15	Kg/m^3
velocità suono	360,9	m/s
resistività al flusso	.....	$KPa\ s/m^2$
$\rho_0 c_0$	416,64	rayl
π	3,14	
spessore campione	.....	m

Tabella 11: Dati di input per la modellazione acustica: inserire la resistività al flusso e lo spessore del campione considerato.

7__Spagnolo R., 2015, op. cit.

7.2.1 COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO ACUSTICO DEI CAMPIONI ANALIZZATI

In questa prima fase di caratterizzazione acustica, verranno inseriti all'interno del modello precedentemente descritto tutti i campioni analizzati (vedi paragrafo 7.1), singolarmente con la relativa resistività al flusso e altezza media (tabella 12).

Come emerge dalla tabella 13, è stato ricavato l'assorbimento acustico di ogni singolo campione di cui vengono messi in evidenza i migliori risultati in assoluto per ogni frequenza.

Per avere una valutazione di più facile lettura, sono stati elaborati i relativi grafici di assorbimento acustico in funzione della frequenza (figure dalla 17 alla 23), dove i campioni sono stati suddivisi per serie di appartenenza: un'elaborazione grafica fra tutti i campioni non sarebbe stata significativa, poiché caratterizzati da densità e altezze diverse. Effettivamente i confronti tra i risultati acustici, sono relativi al singolo provino realizzato, e come tali potrebbero essere effettuati, ma senza permettere delle valutazioni. Se confrontiamo per esempio l'assorbimento a 1000 Hz del provino I003 con quello del provino M002, risultano entrambi di 0,30, ciò significa che i provini si equivalgono a quella frequenza. Ma nonostante abbiano un rapporto fibra-colla identico essi sono caratterizzati da una densità e un'altezza diversa. Sarebbe quindi necessario livellare queste differenze permettendo così un rapporto diretto.

Lo stesso concetto è valido all'interno delle medesime serie, divisione sulla quale sono stati basati i grafici. Risulta possibile effettuare un confronto fra densità della stessa

	resistività al flusso [KPa s/m^2]	spessore medio [mm]
A014	16,5	23,9
A017	49,9	16,4
A019	78,5	15,1
A020	178,4	16,8
B005	12,7	16,5
B007	51,7	17,8
B009	116,6	17,6
C004	69,5	17,1
C005	111,3	13,3
C007	234,5	20
F001	14,5	20,1
F002	23,2	18,1
I003	47,6	16,4
I004	40,8	15,1
I005	277,9	19,5
M002	42,0	17
M003	158,9	12,2
N002	114,6	18,2

Tabella 12: Valori di resistività al flusso e spessore indispensabili per entrare nel modello acustico

tipologia di materiale, ma per via dell'altezza differente il confronto non è immediato poiché risulta influenzato da tale parametro.

In definitiva le comparazioni effettuate in questa valutazione sono legate allo specifico provino, con le proprie caratteristiche.

Tuttavia è possibile effettuare delle previsioni in riferimento a questa prima valutazione. Emerge una tendenza generale verso ottimi assorbimenti ad alte frequenze, per i provini aventi bassa densità, mentre a basse frequenze gli assorbimenti risultano scarsi e attribuibili solo ai campioni con una densità più alta. I provini a bassa densità hanno assorbimenti praticamente nulli alle basse frequenze e discreti alle medie, mentre i provini ad alta densità presentano valori massimi di assorbimento minori di quelli aventi maggiore porosità. Infatti alle basse frequenze i migliori risultati sono stati ottenuti dai provini C007 e I005 che risultano avere un'elevata densità e resistività al flusso, mentre alle alte frequenze i risultati migliori sono da attribuire ai campioni A014, B007, I003 e M002 caratterizzati da basse densità.

I grafici, realizzati per ogni serie, sono contraddistinti da una colorazione relativa all'aumento della densità; partendo da quella minore abbiamo in ordine crescente il rosso, il verde, il blu e il giallo, in funzione del numero di provini misurati all'interno della serie considerata. Ne consegue la tendenza nell'avere migliori assorbimenti alle medie e alle alte frequenze per i campioni a bassa densità, e migliori prestazioni a basse frequenze per quelli con una densità maggiore, a conferma dell'andamento generale riscontrato.
Tuttavia all'interno di alcune serie, in particolare la serie B, questo andamento non viene confermato e la variabile altezza potrebbe essere la causa di questo diverso sviluppo.

	SERIE A: polimeri termoindurenti				*Serie B: colla amido di mais*			*Serie C: colla amido di riso*		
f	**A014**	**A017**	**A019**	**A020**	**B005**	**B007**	**B009**	**C004**	**C005**	**C007**
100	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,01
125	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,03
160	0,00	-0,01	-0,01	0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,05
200	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,08
250	0,03	0,00	0,00	0,05	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,11
315	0,05	0,01	0,01	0,08	0,03	0,02	0,05	0,02	0,01	0,15
400	0,09	0,03	0,03	0,13	0,05	0,05	0,10	0,05	0,03	0,20
500	0,14	0,07	0,07	0,19	0,08	0,09	0,16	0,10	0,06	0,25
630	0,21	0,12	0,12	0,27	0,11	0,15	0,24	0,16	0,11	0,31
800	0,30	0,20	0,21	0,36	0,16	0,25	0,35	0,26	0,18	0,36
1000	0,41	0,30	0,31	0,44	0,21	0,36	0,46	0,38	0,28	0,41
1250	0,53	0,43	0,44	0,52	0,28	0,50	0,58	0,51	0,40	0,45
1600	0,67	0,58	0,59	0,59	0,37	0,66	0,68	0,67	0,54	0,50
2000	0,79	0,72	0,72	0,65	0,47	0,79	0,76	0,79	0,67	0,54
2500	0,89	0,85	0,83	0,69	0,57	0,89	0,81	0,88	0,78	0,59
3150	0,96	0,94	0,91	0,73	0,69	0,96	0,84	0,94	0,86	0,64
4000	0,98	0,98	0,95	0,76	0,79	0,99	0,86	0,96	0,91	0,70
5000	0,96	0,99	0,96	0,80	0,87	0,98	0,87	0,95	0,92	0,75

	Serie F: Coccoina		*Serie I: colla d'ossa*			*Serie M: Creartec*		*Serie N: gesso*
f	**F001**	**F002**	**I003**	**I004**	**I005**	**M002**	**M003**	**N002**
100	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	-0,01	-0,01	-0,01
125	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,03	-0,01	-0,01	0,00
160	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,06	-0,01	-0,01	0,00
200	0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,08	-0,01	0,00	0,01
250	0,02	0,01	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,03
315	0,04	0,02	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,06
400	0,07	0,05	0,03	0,04	0,20	0,04	0,03	0,11
500	0,10	0,08	0,07	0,07	0,24	0,07	0,07	0,17
630	0,15	0,13	0,12	0,13	0,28	0,12	0,11	0,26
800	0,22	0,20	0,20	0,21	0,32	0,20	0,19	0,37
1000	0,30	0,28	0,30	0,32	0,36	0,30	0,28	0,48
1250	0,39	0,39	0,42	0,45	0,40	0,43	0,38	0,59
1600	0,51	0,52	0,57	0,60	0,45	0,58	0,51	0,69
2000	0,63	0,65	0,72	0,73	0,50	0,72	0,63	0,76
2500	0,75	0,78	0,84	0,83	0,54	0,84	0,72	0,81
3150	0,85	0,89	0,93	0,91	0,60	0,94	0,79	0,84
4000	0,93	0,96	0,99	0,94	0,66	0,99	0,84	0,86
5000	0,95	0,99	1,00	0,95	0,71	1,00	0,86	0,87

Tabella 13: Coefficienti di assorbimento acustico dei campioni selezionati e misurati, in evidenza i migliori assorbimenti assoluti per ogni singola frequenza.

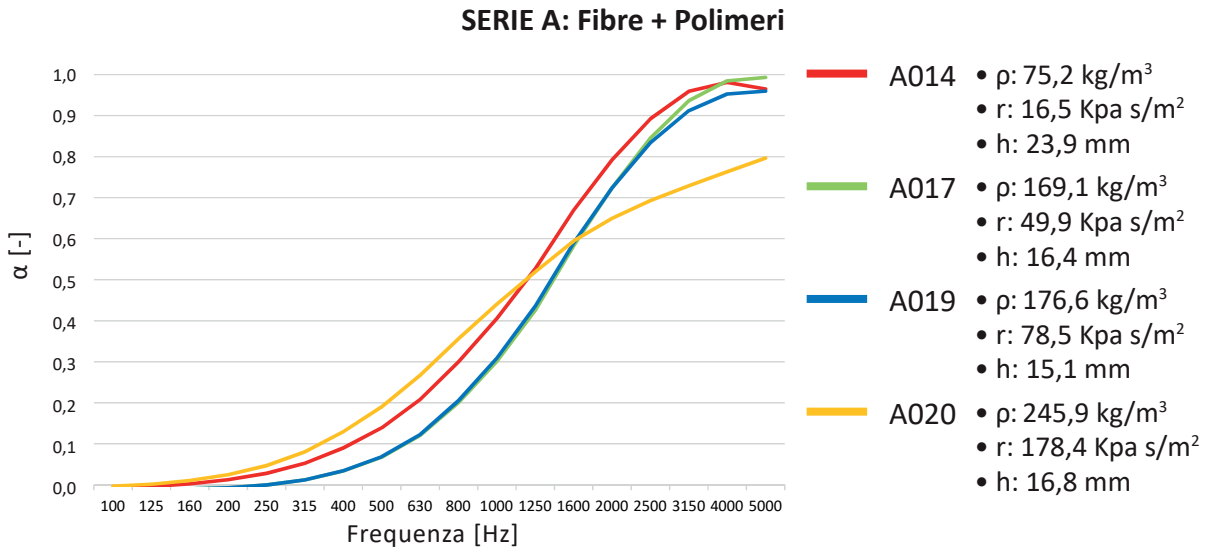


Figura 17: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie A (fibre + polimeri).

Dai risultati del grafico emerge come il campione A020 dotato di una densità maggiore abbia migliori assorbimenti a basse e medie frequenze; il campione A014, con densità minore, risulta avere l'andamento migliore. Le curve dei campioni con densità intermedie tendono a coincidere.

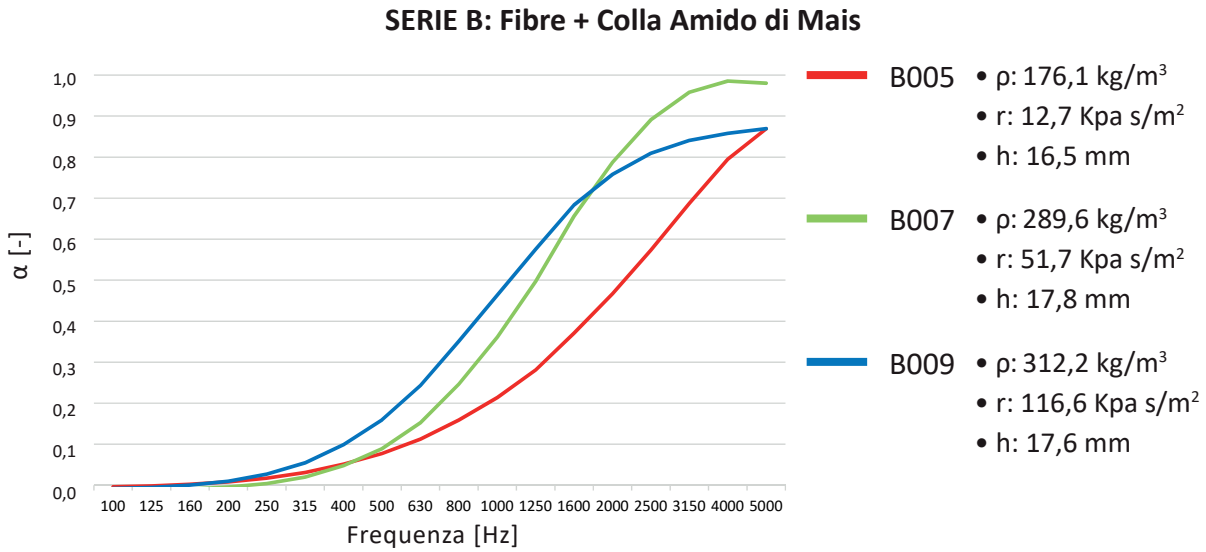


Figura 18: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie B (fibre + amido di mais).

Dal grafico risulta come il campione B007, con una densità maggiore abbia i migliori assorbimenti a basse e medie frequenze; Il campione B005 determina l'assorbimento più alto alle frequenze maggiori, mentre il campione B005 risulta avere l'andamento peggiore per via dell'altezza minore.

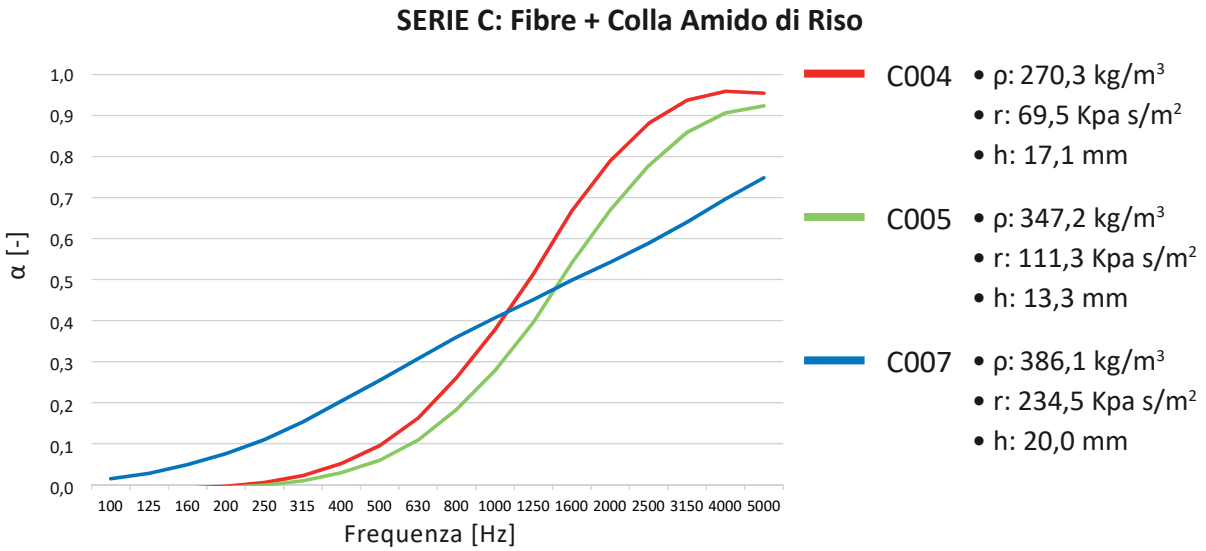


Figura 19: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie C (fibre + amido di riso).

Emerge come al diminuire della densità si abbiano assorbimenti maggiori alle alte frequenze, mentre alla densità più elevata risultano prestazioni migliori a basse frequenze. Si sottolinea che il campione C005 ha uno spessore minore, a giustificazione della propria performance.

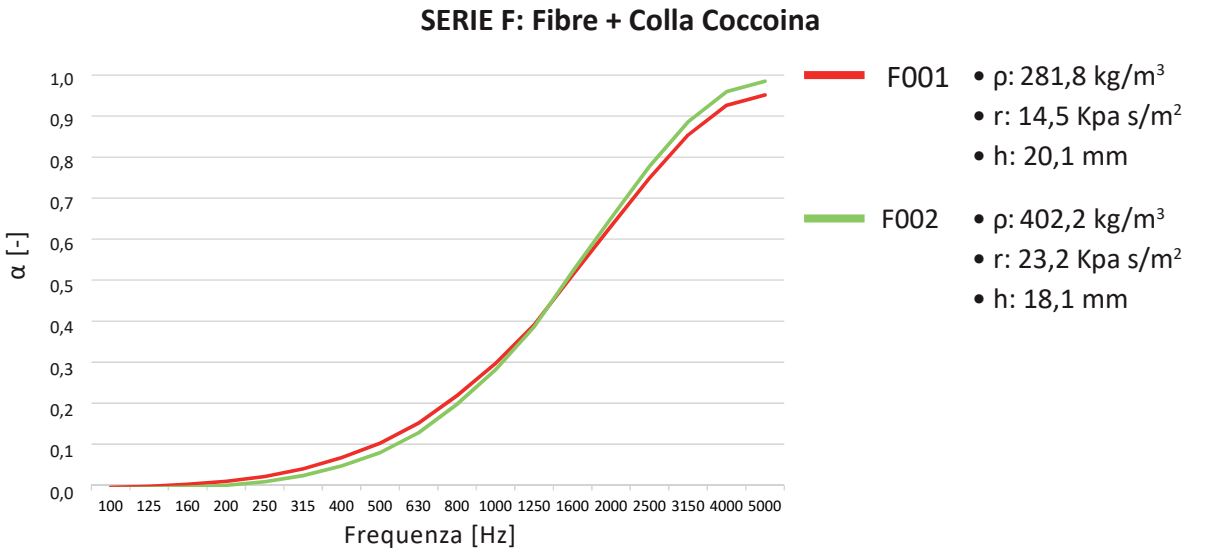


Figura 20: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie F (fibre + colla Coccoina).

Gli andamenti delle due curve sono praticamente comparabili; tuttavia il campione con densità minore, F001, presenta assorbimenti maggiori a basse frequenze in funzione dell'altezza maggiore, mentre il campione F002, con densità più alta, ha assorbimenti migliori alle frequenze più elevate.

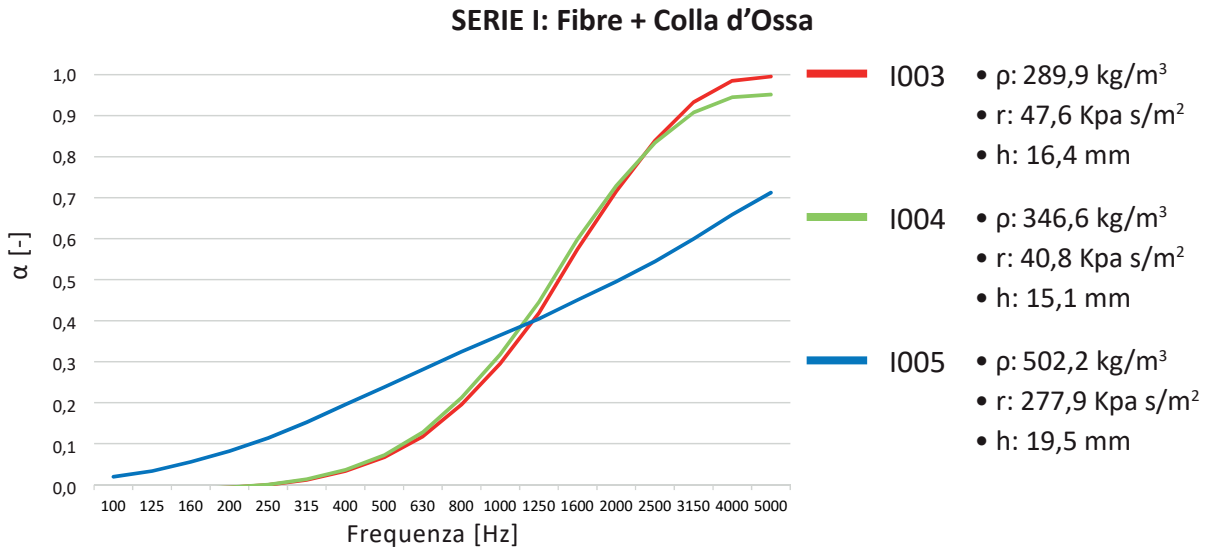


Figura 21: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie I (fibre + colla d'ossa).

Dal grafico risulta come all'aumentare della densità migliorano gli assorbimenti a medie e basse frequenze, come risulta dal campione I005 (caratterizzato però da uno spessore maggiore). Il campione con densità minore, I003, raggiunge l'assorbimento massimo alle frequenze più alte.

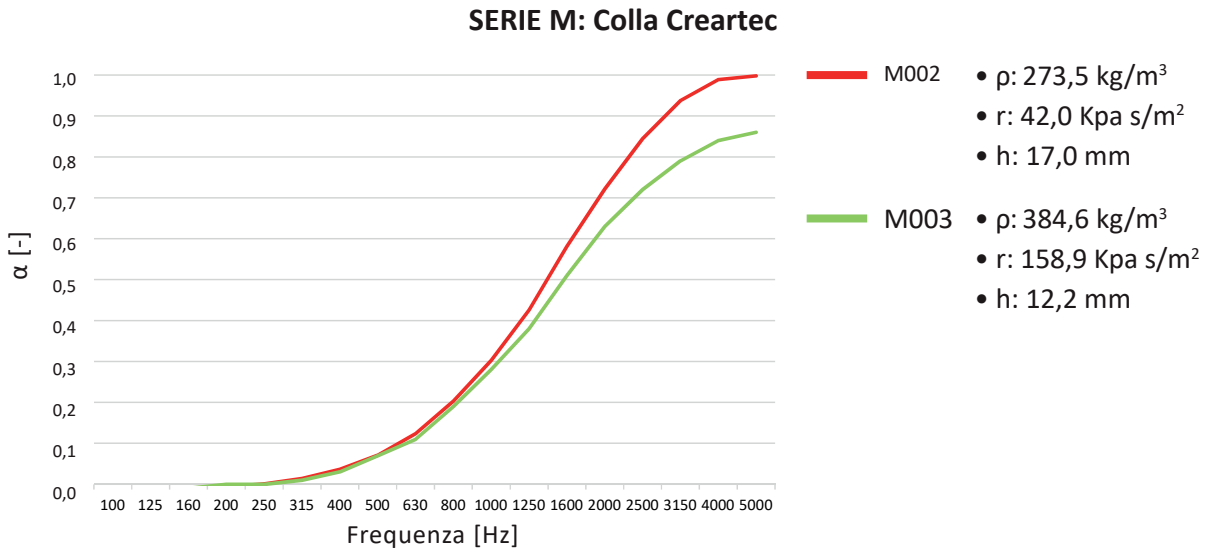


Figura 22: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie M (fibre + colla Creartec).

Risulta chiaro dalla comparazione come il campione M002 con densità minore abbia una performance migliore a tutte le frequenze, rispetto al provino M003, caratterizzato da una densità superiore e uno spessore minore.

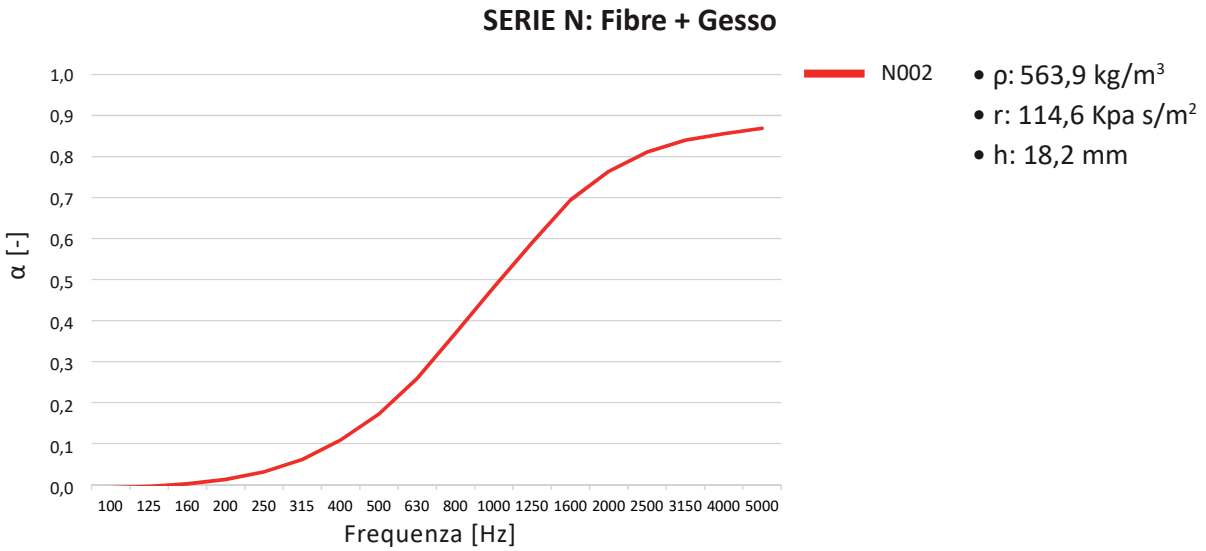


Figura 23: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza del campione serie N (fibre + gesso).

Emerge dai risultati come il campione N002 nonostante la sua elevate densità, abbia un andamento tipico dei materiali caratterizzati da densità più basse.

7.2.2 COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA DEI CAMPIONI

Nonostante questa prima analisi abbia portato a delle valutazioni, risulta difficile un confronto fra le diverse serie, poiché caratterizzate da densità e spessori diversi. A causa dello spessore risulta difficile anche un confronto all'interno della stessa serie, come emerso dal paragrafo precedente. Infatti questi risultati sono specifici dei singoli provini prodotti, i quali non hanno caratteristiche simili, per via dei diversi processi di produzione.

Per risolvere questo problema si è deciso di variare lo spessore dei provini. Prima di effettuare questo passaggio, viene mostrata nella figura 24 e nella tabella 14, la fattibilità di questo processo simulando l'aumento di spessore di alcuni campioni per verificare la variazione della distribuzione dell'assorbimento acustico. Sono stati presi in considerazione i provini A014 (bassa densità) e A020 (alta densità) rispettivamente di 1,39 cm e 1,68 cm. Attraverso il modello acustico, in entrambi i campioni, l'altezza è stata portata a 5 cm mantenendo inalterate le altre caratteristiche. A conferma della letteratura specifica, i risultati sono stati quelli previsti: l'aumento dello spessore porta a uno "spo-

	SERIE A			
f	A014	A014 5 cm	A020	A020 5 cm
100	-0,01	0,01	0,00	0,11
125	0,00	0,03	0,00	0,13
160	0,00	0,06	0,01	0,15
200	0,01	0,11	0,02	0,17
250	0,03	0,18	0,05	0,20
315	0,05	0,28	0,08	0,22
400	0,09	0,41	0,13	0,25
500	0,14	0,55	0,19	0,29
630	0,21	0,70	0,27	0,33
800	0,30	0,83	0,36	0,38
1000	0,41	0,93	0,44	0,43
1250	0,53	0,98	0,52	0,49
1600	0,67	0,99	0,59	0,55
2000	0,79	0,98	0,65	0,60
2500	0,89	0,96	0,69	0,65
3150	0,96	0,95	0,73	0,71
4000	0,98	0,98	0,76	0,76
5000	0,96	1,00	0,80	0,80

Tabella 14: Valutazione della variazione dei coefficienti di assorbimento acustico in funzione della modifica dell'altezza dei provini presi come esempio.

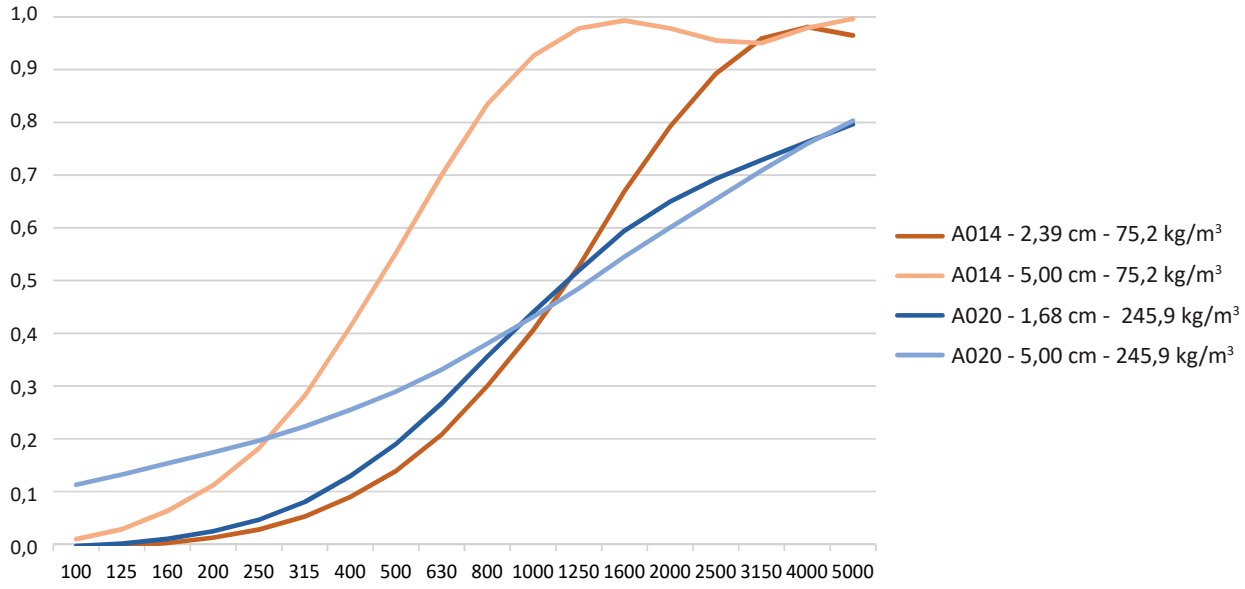


Figura 24: Grafico rappresentante una simulazione dell'aumento di spessore di due campioni al fine di verificare la variazione dell'andamento dell'assorbimento acustico alle diverse frequenze.

stamento" della curva verso sinistra, e quindi verso le basse frequenze. Questo fenomeno è particolarmente visibile per il campione A014, caratterizzato da una densità minore, dove la curva è traslata verso le medie e basse frequenze. Tuttavia anche per il campione A020, questo processo risulta evidente, seppur in maniera minore: le prestazioni si abbassano alle alte frequenze per migliorare nettamente a quelle più basse.

Il ragionamento è stato esteso a tutti i campioni per consentire una valutazione diretta fra quelli aventi la stessa altezza: all'interno del modello acustico lo spessore è stato uniformato a 3 cm per tutti i provini, mantenendo invece inalterato il relativo dato sulla resistività al flusso. Il passaggio è possibile poiché la resistività al flusso è indipendente dallo spessore. Infatti, quest'ultima, risulta come rapporto tra la resistività specifica e l'altezza media del campione misurato, quindi una volta ottenuta, costituisce una caratteristica del materiale e può essere utilizzata nel modello di calcolo in abbinamento a qualsiasi spessore.
Questo passaggio risulta fondamentale all'interno del ragionamento, poiché da questo momento non si valutano più i campioni realizzati, ma campioni ipotetici dello stesso materiale e con lo stesso mix design del provino dal quale derivano.

I risultati di questo sviluppo sono riportati nella tabella 15 e nei successivi grafici (figure dalla 25 alla 31). Ora il confronto fra i campioni all'interno della stessa serie risulta direttamente fattibile e attuabile. Si evidenzia come l'andamento sia quello previsto all'interno di tutte le serie: a basse frequenze sono i campioni a densità elevata ad avere i migliori assorbimenti, alle medie quelli con una densità intermedia, e alle frequenze maggiori sono invece i campioni con una densità più bassa e quindi una resistività al flusso minore, ad avere i migliori assorbimenti acustici. Questi risultati sono chiaramente visibili nelle figure dalla 25 alla 31, come evidenziato dalle rispettive colorazioni: in ordine crescente di densità troviamo il rosso, il verde il blu e il giallo, in funzione della serie analizzata. Unica eccezione riguarda la serie F dove le due curve non rispettano la tendenza generale: tuttavia si sottolinea che la discrepanza fra le due è comunque minima, di circa 0,05 punti di assorbimento.

Questo sviluppo presenta ancora un limite, quello di non permettere il confronto diretto fra provini di serie diversa nonostante l'altezza uniformata. Questo problema sarà analizzato ed elaborato nel paragrafo successivo.

3 cm	SERIE A: polimeri termoindurenti				Serie B: colla amido di mais			Serie C: colla amido di riso		
f	A014	A017	A019	A020	B005	B007	B009	C004	C005	C007
100	-0,01	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,07
125	0,00	0,00	0,02	0,08	0,00	0,00	0,04	0,01	0,04	0,09
160	0,01	0,02	0,05	0,11	0,01	0,02	0,08	0,04	0,07	0,12
200	0,02	0,04	0,08	0,15	0,03	0,05	0,12	0,07	0,12	0,14
250	0,05	0,08	0,13	0,19	0,05	0,09	0,17	0,12	0,17	0,17
315	0,09	0,14	0,20	0,23	0,09	0,15	0,24	0,19	0,24	0,20
400	0,14	0,23	0,29	0,28	0,14	0,24	0,32	0,28	0,32	0,23
500	0,22	0,34	0,39	0,32	0,21	0,35	0,39	0,38	0,39	0,26
630	0,32	0,47	0,50	0,36	0,29	0,48	0,46	0,50	0,47	0,30
800	0,44	0,61	0,60	0,41	0,40	0,61	0,53	0,61	0,54	0,33
1000	0,57	0,73	0,68	0,45	0,52	0,73	0,58	0,70	0,59	0,37
1250	0,71	0,82	0,74	0,49	0,65	0,82	0,62	0,77	0,64	0,42
1600	0,84	0,89	0,79	0,54	0,79	0,88	0,67	0,82	0,68	0,48
2000	0,93	0,92	0,81	0,60	0,89	0,91	0,71	0,84	0,72	0,53
2500	0,98	0,92	0,83	0,65	0,95	0,92	0,75	0,86	0,76	0,59
3150	0,99	0,92	0,85	0,71	0,98	0,91	0,79	0,87	0,80	0,65
4000	0,97	0,92	0,88	0,76	0,96	0,92	0,84	0,89	0,84	0,70
5000	0,94	0,94	0,92	0,80	0,93	0,94	0,87	0,92	0,88	0,75

3 cm	Serie F: Coccoina		Serie I: colla d'ossa			Serie M: Creartec		Serie N: gesso
f	F001	F002	I003	I004	I005	M002	M003	N002
100	0,00	-0,01	0,00	0,01	0,07	-0,01	0,04	0,02
125	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,00	0,07	0,04
160	0,01	0,01	0,02	0,05	0,11	0,01	0,10	0,08
200	0,03	0,02	0,04	0,09	0,13	0,04	0,14	0,12
250	0,05	0,05	0,08	0,14	0,16	0,07	0,19	0,17
315	0,09	0,09	0,14	0,21	0,18	0,13	0,24	0,24
400	0,14	0,16	0,23	0,30	0,20	0,21	0,29	0,32
500	0,21	0,24	0,33	0,40	0,23	0,31	0,34	0,39
630	0,30	0,36	0,47	0,50	0,26	0,45	0,39	0,46
800	0,42	0,50	0,61	0,60	0,30	0,59	0,44	0,53
1000	0,55	0,64	0,73	0,67	0,34	0,73	0,48	0,58
1250	0,68	0,77	0,83	0,73	0,38	0,83	0,52	0,63
1600	0,82	0,90	0,90	0,77	0,44	0,91	0,58	0,67
2000	0,91	0,97	0,93	0,80	0,49	0,94	0,63	0,71
2500	0,97	1,00	0,93	0,82	0,55	0,95	0,68	0,75
3150	0,99	0,99	0,93	0,84	0,60	0,94	0,73	0,79
4000	0,97	0,97	0,92	0,88	0,66	0,93	0,78	0,84
5000	0,94	0,95	0,94	0,91	0,71	0,94	0,82	0,87

Tabella 15: Coefficienti di assorbimento acustico dei campioni analizzati con un'altezza unificata a 3 cm; in evidenza i migliori assorbimenti all'interno di ogni singola serie alle diverse frequenze.

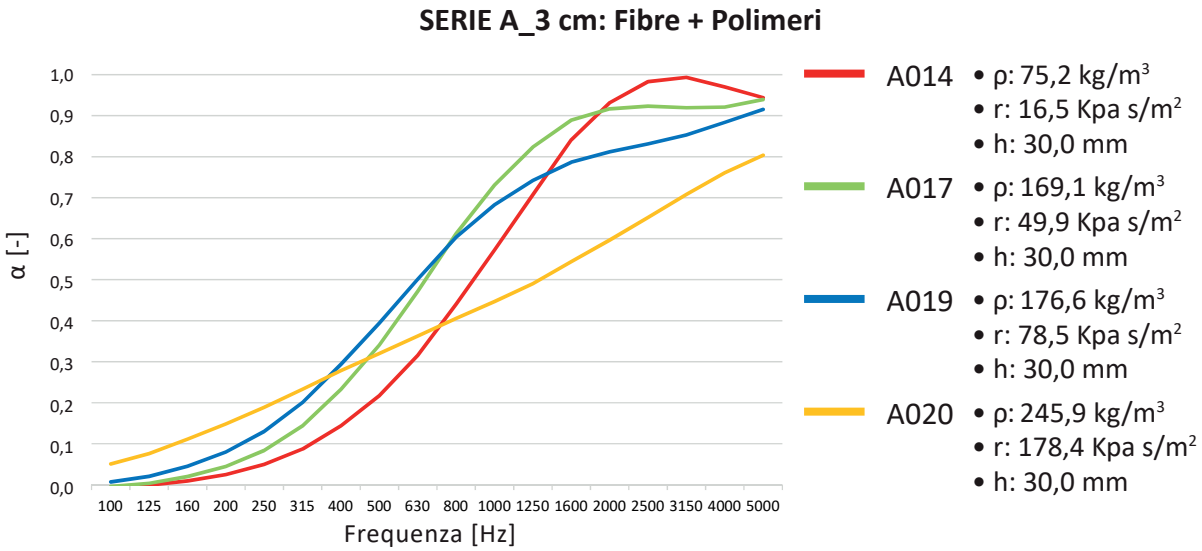


Figura 25: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie A, con altezza di 3 cm.

Dal grafico emerge come a parità di altezza il campione con densità maggiore abbia prestazioni migliori ad alte frequenze, mentre quello con densità più elevata ottiene prestazioni più alte a basse frequenze. I campioni con densità intermedie presentano assorbimenti migliori alle frequenze medie.

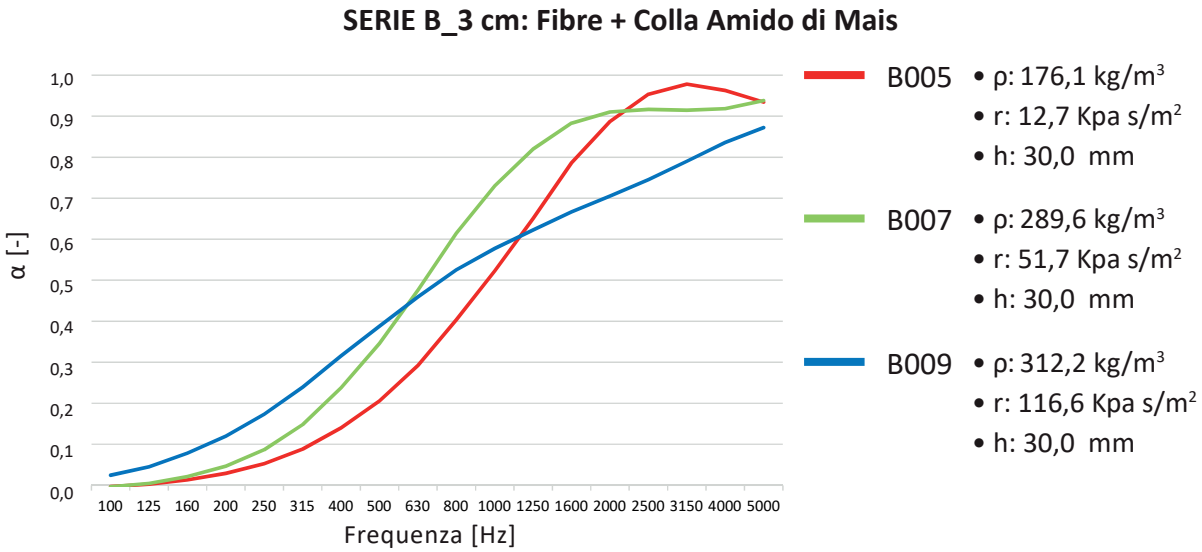


Figura 26: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie B, con altezza di 3 cm.

Anche in questa serie, a parità di altezza, si ottiene una performance migliore a basse frequenze per il campione con densità maggiore (B009), alle medie per quello con densità intermedia (B007) e alle alte frequenze per quello con una densità minore (B005).

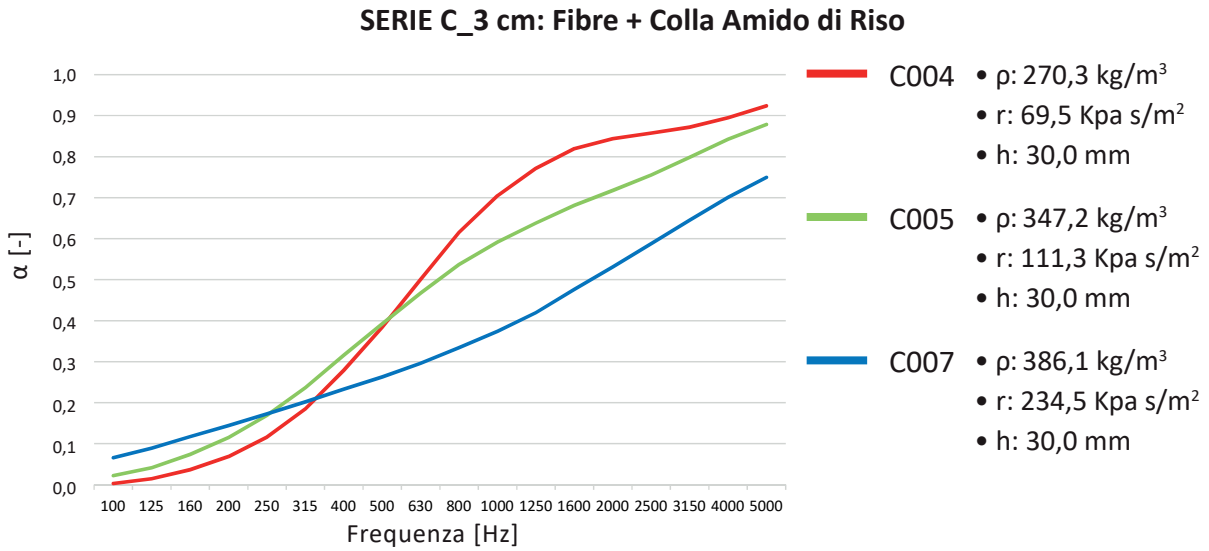


Figura 27: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie C, con altezza di 3 cm.

Dal grafico emerge come unificando le altezze, il campione con densità minore (C004) abbia i migliori assorbimenti alle alte e medie frequenze, insieme al provino C005; alle basse frequenze è il campione C007, caratterizzato da una densità più alta ad avere la prestazione più elevata.

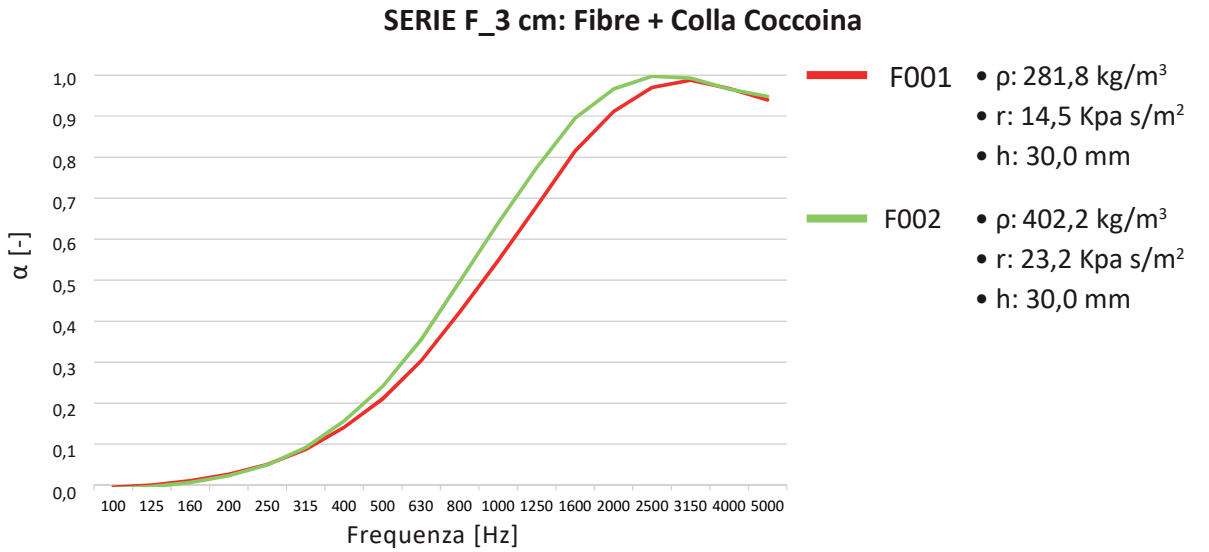


Figura 28: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie F, con altezza di 3 cm.

Al contrario delle altre serie risulta essere il campione con densità maggiore ad avere le performance migliori per tutto l'andamento del grafico anche a parità di altezza; tuttavia lo scostamento fra le curve risulta minimo, di circa 0,05 punti di assorbimento.

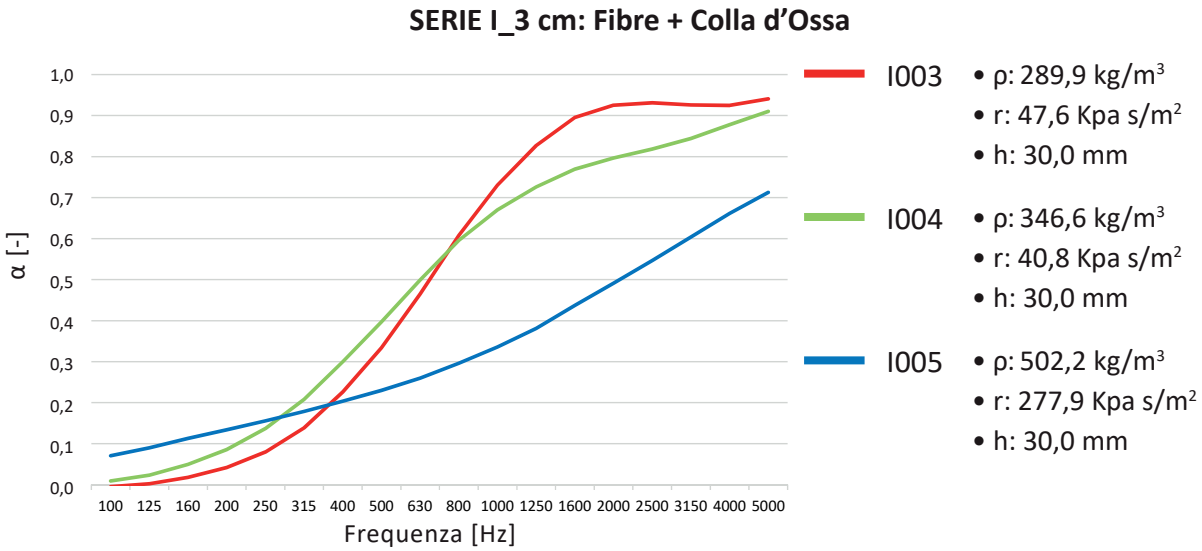


Figura 29: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie I, con altezza di 3 cm.

Analogamente rilevato nelle altre serie anche in questo grafico emerge come alle basse frequenze i migliori assorbimenti siano attribuibili al il provino con densità maggiore, alle frequenze intermedie al provino con densità media e alle alte frequenze al campione con densità minore.

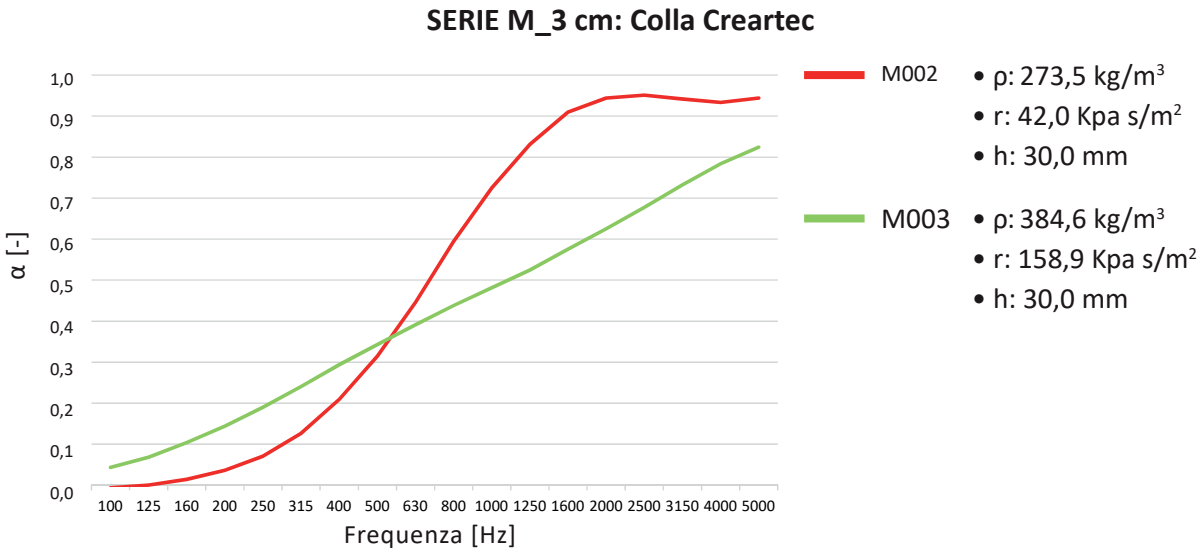


Figura 30: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei campioni serie M, con altezza di 3 cm..

Evidente come a parità di altezza il campione M002 con densità minore abbia assorbimenti maggiori ad alte frequenze, mentre il campione M003, con una densità maggiore, abbia prestazioni migliori a basse frequenze.

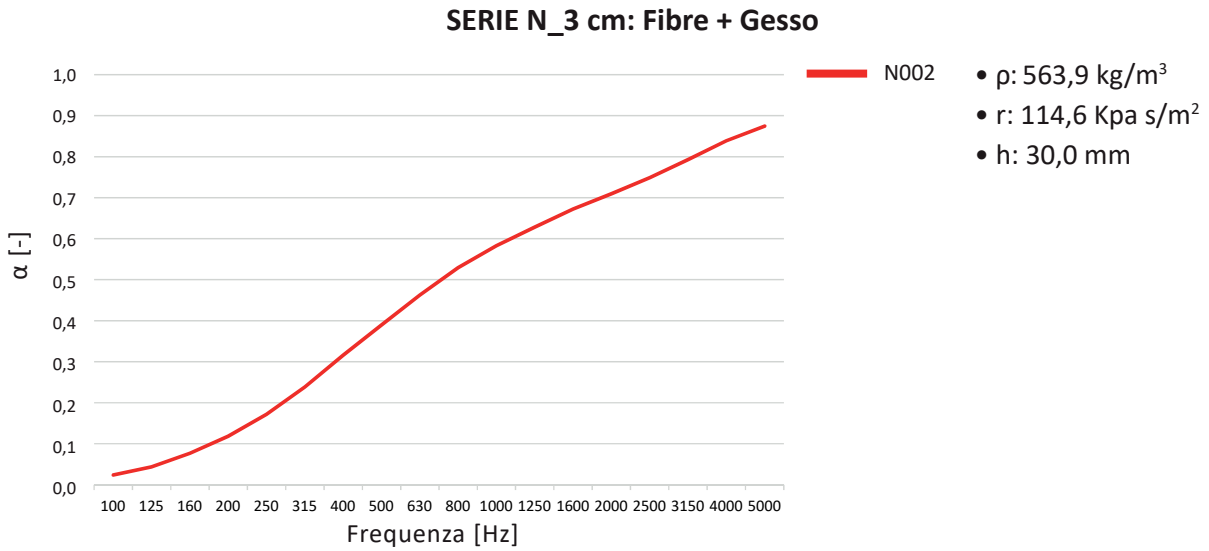


Figura 31: Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza del campione serie N, con altezza di 3 cm.

L'aumento dell'altezza per il campione N002, porta a un miglioramento delle prestazioni acustiche alle medie e alle basse frequenze.

7.2.3 COEFFICIENTI DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ DEL MIX DESIGN

Anche nella seconda valutazione, nonostante i risultati, non è possibile un confronto diretto fra le diverse serie poiché caratterizzate da densità diverse e non paragonabili fra loro. Sono state quindi definite quattro densità alle quali uniformare tutti i campioni: 100, 200, 300 e 400 Kg/m^3. Il problema ora consiste nel ricavare la resistività al flusso alle densità stabilite, in funzione del mix design di ogni singola serie, indispensabili per subentrare nel modello di sviluppo acustico.

Si è detto che per entrare nel calcolo del modello acustico (paragrafo 7.2) dobbiamo ricavare la resistività al flusso alle densità prescelte, e poiché abbiamo una relazione fra le due componenti è possibile portare avanti il ragionamento. Come indicato nel paragrafo 7.1.3, è stata ricavata una relazione fra la resistività al flusso e la densità, specifica di ogni serie: all'aumentare della densità apparente aumenta la resistività al flusso. Grazie alle linee di tendenza sviluppate nei grafici (paragrafo 7.1.3, figure 7, 9, 11, 13 e 15) è possibile ricavare la rispettiva funzione per la quale data una qualsiasi densità sia possibile ricavare la resistività, ovviamente tale funzione fa riferimento a ogni singola serie

considerata.
Tuttavia, al contrario dell'applicazione effettuata nella serie I, non può essere utilizzata solamente la funzione lineare, poiché non è possibile calcolare delle densità più basse rispetto a quelle dei campioni utilizzati con i dati a disposizione. È stato deciso di impiegare la funzione esponenziale, che oltre a fornire dei dati a densità più basse di quelle sperimentate è in grado di assecondare discretamente i punti nella tabella. Ciò nonostante, in seguito a un'attenta valutazione, le resistività risultanti mostrano valori anomali e non sempre in linea con i risultati attesi. Si è quindi deciso di integrare le due linee di tendenze in modo tale da permettere una elaborazione dei dati ottimale in base alla serie e al rispettivo grafico. In particolare, per la serie A è stata utilizzata la curva lineare per tutte le densità, per le altre serie è stata utilizzata la funzione esponenziale per le basse densità, mentre per le densità più alte è stata valutata caso per caso l'approssimazione migliore. Questo sviluppo non è stato applicato nella serie N, poiché avendo un solo dato non è stato possibile ricavare alcuna funzione in grado di permettere un'elaborazione. Anche la serie F è stata esclusa dai risultati che verranno illustrati, poiché si sono rivelati non congrui e piuttosto divergenti rispetto alle altre serie; è possibile trovare giustificazione di questo nella funzione relativa, poiché essa è stata costruita solo su due campioni analizzati, numero che risulta insufficiente nel caso in cui ci fosse un errore di misurazione, per uno dei due provini. In effetti tale serie forniva dei dati leggermente diversi, rispetto alle altre, anche nelle analisi precedenti.

Nella tabella 16 vengono mostrate le funzioni lineari (evidenziate anche nei grafici del paragrafo 7.1.3, figure 7, 9, 11, 13 e 15) e quelle esponenziali, dalle quali sono state ricavate le resistività al flusso nella tabella 17 per ogni serie di campioni, per le quattro densità calcolate, andando a suddividere i ri-

	Funzioni	
	Lineare	**Esponenziale**
Serie A	y = 0,9158x - 71,846	y = 5,6621e0,014x
Serie B	y = 0,6274x - 102,38	y = 0,862e0,015x
Serie C	y = 1,3006x - 296,65	y = 4,4756e0,0099x
Serie I	y = 1,1781x - 325,08	y = 4,2698e0,0083x
Serie M	y = 1,0699x - 252,55	y = 1,4703e0,0122x

Tabella 16: Funzioni lineari ed esponenziali delle tendenze fra resistività al flusso e densità (paragrafo 7.1.3).

	Resistività al flusso				
densità	**Serie A**	**Serie B**	**Serie C**	**Serie I**	**Serie M**
100 Kg/m³	19,73	3,86	12,05	9,79	4,98
200 Kg/m³	111,31	17,31	32,42	22,45	16,86
300 Kg/m³	202,89	85,84	87,24	51,49	57,12
400 Kg/m³	294,47	148,58	234,8	146,16	193,53

Tabella 17: Resistività al flusso ricavate dalle funzioni della figura 16, relative alle densità selezionate.

sultati ottenuti con la curva lineare e quelli ottenuti con la curva esponenziale.
Il passaggio consiste nel sostituire il termine *x* all'interno della funzione (specifica per ogni serie), con le densità stabilite (100, 200, 300 e 400 Kg/m^3), ricavando così il termine *y,* corrispondente alla resistività al flusso relativa al mix design e alla densità ricercata.

Sulla base di questi dati, è stato possibile subentrare nel modello di sviluppo acustico, mantenendo sempre uno spessore costante di 3 cm, ricavando così l'assorbimento acustico delle cinque serie rimanenti alle densità prescelte.

I dati acustici ricavati risultano immediatamente confrontabili anche fra serie diverse, poiché differiscono solo per la composizione e non più per densità e spessore. In pratica con quest'ultimo sviluppo stiamo ora confrontando le caratteristiche specifiche del materiale prodotto alle densità selezionate, e non più dei campioni realizzati fisicamente.

Nella tabella 18 e nei successivi grafici (figure dalla 32 alla 36), come nei casi precedenti, vengono confrontati gli assorbimenti acustici di ogni singola serie. In questo caso per ogni serie abbiamo quattro densità; rossa per 100 Kg/m^3, verde per 200 Kg/m^3, blu per 300 Kg/m^3 e gialla per 400 Kg/m^3.

Nel caso di tutte le serie in cui è stata utilizzata una sostanza collante per unire le fibre di lana (serie B, C, I, M), risulta evidente come il migliore assorbimento alle alte frequenze sia stato dato dalla densità di 200 Kg/m^3 e non dalla densità minore come da aspettative. Infatti con la densità di 100 Kg/m^3 si hanno generalmente adattamenti medio bassi, soprattutto alle basse frequenze. Appare chiaro come scendendo sotto una determinata soglia di densità, le caratteristiche peggiorino, mentre a densità medio alte il comportamento rispecchia quello visto nelle altre valutazioni: all'aumentare della densità si abbassano le prestazioni alle alte frequenze, migliora invece l'assorbimento alle frequenze medio basse.

Nel grafico inerente alla serie A troviamo invece un comportamento diverso rispetto alle altre serie: alla densità più bassa si ha il migliore assorbimento alle alte frequenze, alla densità di 200 Kg/m^3 alle medie frequenze e per la densità maggiore il migliore assorbimento risulta essere alle basse frequenze, penalizzando però le medie e le alte frequenze. Si può affermare che questo andamento sia dovuto al processo di produzione della matrice utilizzata: esso avviene attraverso l'utilizzo di polimeri, sfruttando il differente punto di fusione in fase di cottura per legare le fibre.

3 cm	Serie A: polimeri				Serie B: colla amido di mais				Serie C: colla amido di riso			
f	100	200	300	400	100	200	300	400	100	200	300	400
100	-0,01	0,02	0,06	0,07	0,02	-0,01	0,01	0,04	0,00	-0,01	0,01	0,07
125	0,00	0,04	0,08	0,09	0,03	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,03	0,09
160	0,01	0,07	0,12	0,11	0,04	0,01	0,05	0,10	0,01	0,01	0,05	0,12
200	0,02	0,12	0,15	0,13	0,06	0,02	0,09	0,14	0,03	0,03	0,09	0,14
250	0,05	0,17	0,18	0,15	0,08	0,05	0,14	0,19	0,05	0,06	0,14	0,17
315	0,09	0,24	0,22	0,17	0,10	0,09	0,21	0,24	0,09	0,11	0,21	0,20
400	0,15	0,32	0,26	0,19	0,14	0,15	0,30	0,30	0,14	0,18	0,30	0,23
500	0,23	0,39	0,29	0,22	0,17	0,22	0,40	0,36	0,20	0,28	0,40	0,26
630	0,33	0,47	0,33	0,25	0,22	0,32	0,50	0,41	0,29	0,40	0,50	0,30
800	0,47	0,54	0,37	0,28	0,28	0,45	0,59	0,46	0,40	0,56	0,59	0,33
1000	0,61	0,59	0,41	0,32	0,34	0,58	0,66	0,50	0,51	0,70	0,66	0,37
1250	0,74	0,64	0,46	0,37	0,42	0,72	0,72	0,55	0,64	0,82	0,71	0,42
1600	0,87	0,68	0,51	0,42	0,52	0,85	0,76	0,59	0,77	0,92	0,76	0,48
2000	0,95	0,72	0,57	0,48	0,61	0,94	0,79	0,64	0,88	0,97	0,78	0,53
2500	0,99	0,76	0,62	0,53	0,70	0,99	0,81	0,69	0,95	0,98	0,81	0,59
3150	1,00	0,80	0,68	0,59	0,77	0,99	0,84	0,75	0,97	0,97	0,84	0,64
4000	0,97	0,84	0,73	0,65	0,80	0,97	0,87	0,80	0,96	0,95	0,87	0,70
5000	0,95	0,88	0,78	0,70	0,80	0,94	0,91	0,84	0,93	0,95	0,91	0,75

3 cm	Serie I: colla d'ossa				Serie M: colla Creartec			
f	100	200	300	400	100	200	300	400
100	0,00	-0,01	0,00	0,04	0,01	-0,01	0,00	0,06
125	0,01	0,00	0,00	0,06	0,02	0,00	0,01	0,08
160	0,02	0,01	0,02	0,10	0,03	0,01	0,03	0,11
200	0,03	0,02	0,05	0,14	0,05	0,02	0,05	0,15
250	0,06	0,05	0,09	0,19	0,07	0,05	0,10	0,19
315	0,09	0,09	0,15	0,24	0,10	0,09	0,16	0,23
400	0,14	0,16	0,24	0,30	0,14	0,14	0,25	0,27
500	0,20	0,24	0,35	0,36	0,18	0,22	0,36	0,30
630	0,27	0,35	0,48	0,41	0,23	0,32	0,49	0,34
800	0,37	0,49	0,61	0,46	0,30	0,44	0,62	0,38
1000	0,48	0,63	0,73	0,51	0,38	0,58	0,73	0,42
1250	0,60	0,77	0,82	0,55	0,46	0,71	0,81	0,47
1600	0,73	0,89	0,88	0,60	0,57	0,85	0,86	0,52
2000	0,83	0,96	0,91	0,65	0,67	0,93	0,89	0,58
2500	0,91	1,00	0,92	0,70	0,76	0,98	0,90	0,63
3150	0,95	0,99	0,92	0,75	0,83	0,99	0,90	0,69
4000	0,94	0,97	0,92	0,80	0,85	0,97	0,91	0,74
5000	0,92	0,95	0,94	0,84	0,84	0,94	0,93	0,79

Tabella 18: Coefficienti di assorbimento acustico, elaborati mediante modellazione, alle densità prescelte, in funzione delle serie analizzate.

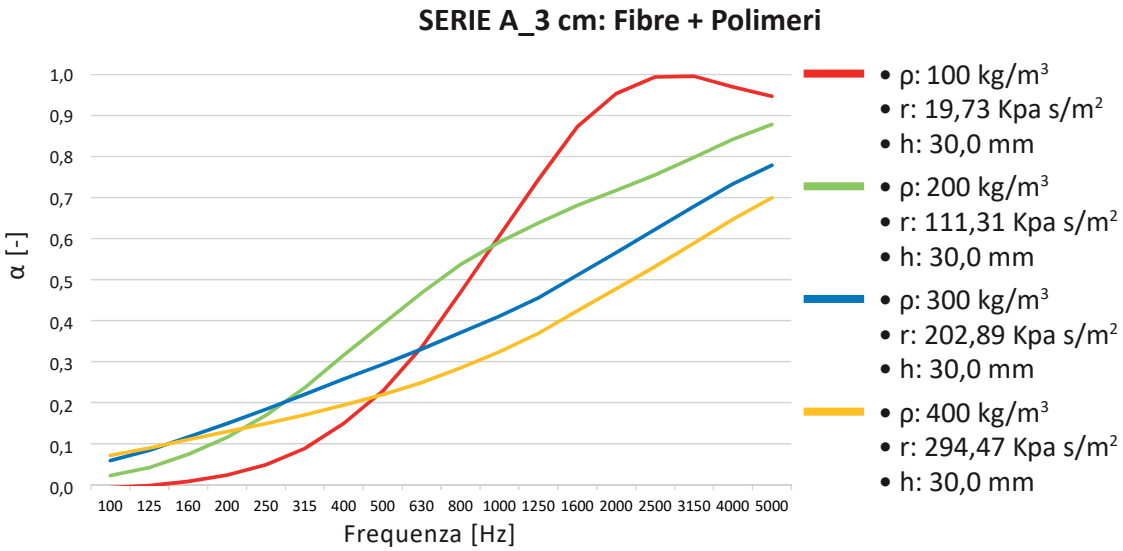


Figura 32: Coefficienti di assorbimento acustico della serie A, con altezza di 3 cm, in funzione della densità.

Dal grafico emerge come al diminuire della densità le performance acustiche si spostano gradualmente verso le frequenze più alte.

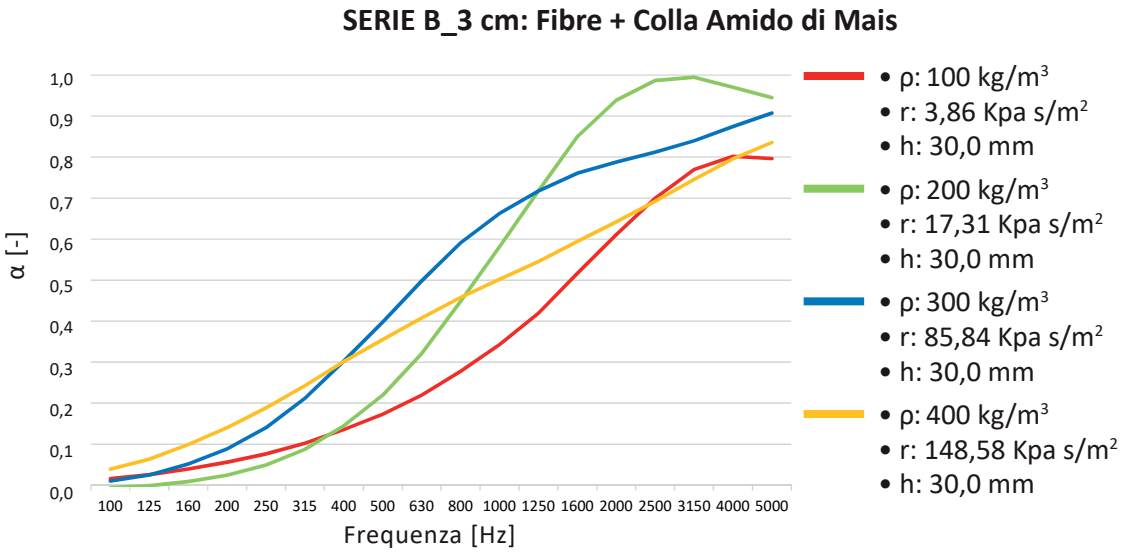


Figura 33: Coefficienti di assorbimento acustico della serie B, con altezza di 3 cm, in funzione della densità.

Risulta come alla densità di 200 Kg/m³ si abbiano gli assorbimenti maggiori alle elevate frequenze, alle medie per la densità di 300 Kg/m³ e alle basse per la densità di 400 Kg/m³. La densità minore tende ad avere caratteristiche mediamente inferiori a tutte le altre.

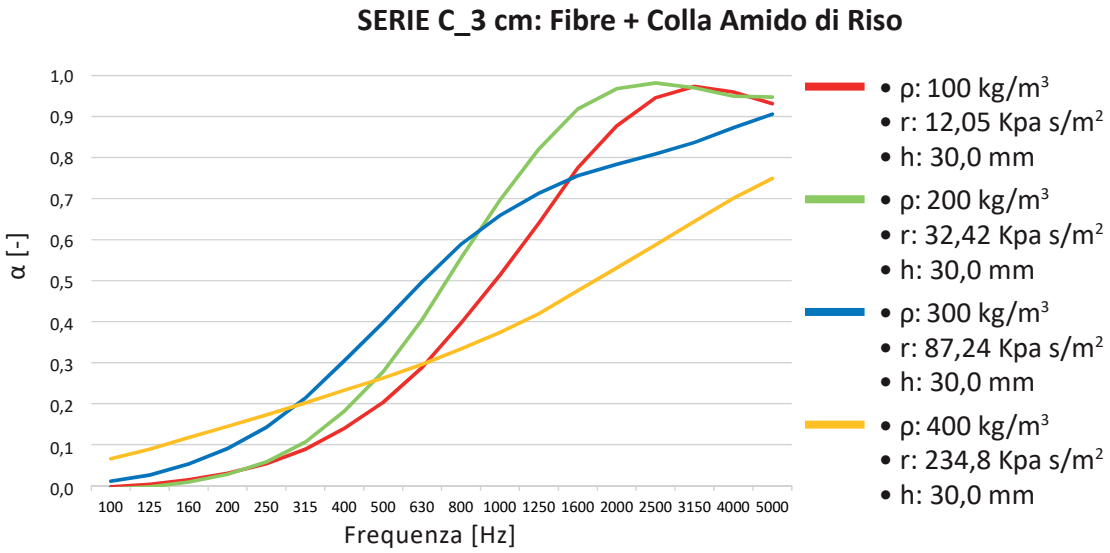


Figura 34: Coefficienti di assorbimento acustico della serie C, con altezza di 3 cm, in funzione della densità.

Si nota dal grafico come le curve corrispondenti alle densità minori abbiano assorbimenti maggiori alle alte frequenze, alle frequenze intermedie per le medie densità, e alle frequenze minori per le densità maggiori.

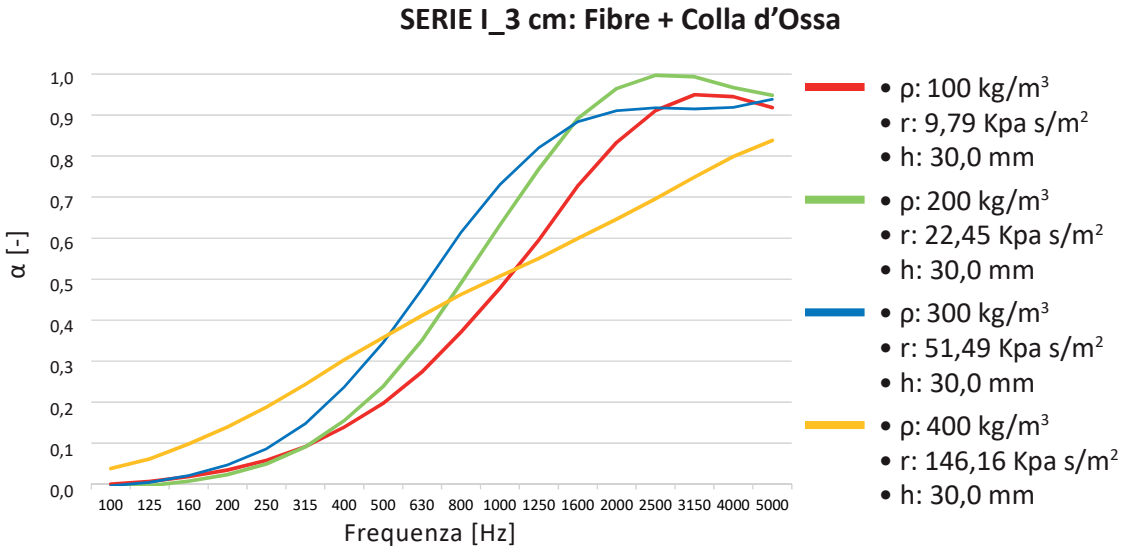


Figura 35: Coefficienti di assorbimento acustico della serie I, con altezza di 3 cm, in funzione della densità.

Come per le altre serie la densità di 200 Kg/m³ risulta avere gli assorbimenti migliori alle alte frequenze, seguita dalla curva con densità minore. Le prestazioni migliori alle medie frequenze sono attribuibili alla curva blu, e a quelle più basse alla curva con densità maggiore.

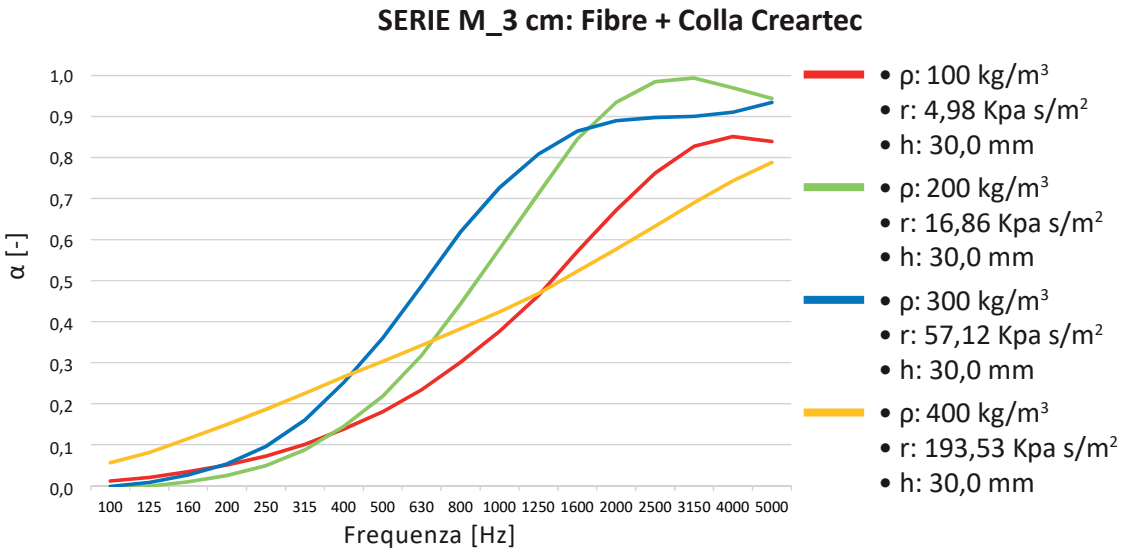


Figura 36: Coefficienti di assorbimento acustico della serie M, con altezza di 3 cm, in funzione della densità.

Anche in questa serie la curva verde determina gli assorbimenti maggiori alle alte frequenze, la curva a densità di 300 Kg/m^3 alle frequenze intermedie, mentre alle basse, la curva con densità più alta. La curva con densità minore mostra performance di rilievo solo alle elevate frequenze.

Si sottolinea come all'interno dei grafici appena illustrati sia possibile un confronto fra lo stesso colore per le diverse serie, poiché la densità, per il medesimo colore è equivalente in ogni grafico.

Grazie a questa tipologia di valutazione, risulta finalmente possibile andare a confrontare direttamente le varie serie sperimentate a parità di densità, cosa che non era possibile fare nelle precedenti valutazioni per via della diversa natura dei campioni.
Questo confronto è illustrato nei grafici relativi alle pagine seguenti (figure dalla 37 alla 40), dove i colori rispecchiano la serie presa in considerazione.

Dalla loro interpretazione, in maniera del tutto agevole è possibile affermare che alla densità di 100 Kg/m^3 la migliore prestazione è attribuibile alla serie A (fibre + polimeri) seguita dalla serie C (fibre + colla di amido di riso) e in sequenza tutte le altre serie, con valori del tutto confrontabili, e con andamenti delle curve analoghi.

Alla densità di 200 Kg/m^3 i risultati delle serie basate sulle colle tendono a coincidere su

tutte le frequenze, con valori massimi a quelle più alte. La serie A risulta avere un comportamento discordante: valori maggiori alle alte frequenze, ma più bassi delle altre serie, e valori migliori alle medio basse frequenze rispetto alle altre serie.

Alla densità di 300 Kg/m^3 gli andamenti e i ragionamenti sono analoghi a quelli della densità di 200 Kg/m^3, ma con un miglior risultato alle alte frequenze della serie I (fibre + colla d'ossa), seguita dalla serie M (fibre + colla Creartec). Alle basse frequenze emerge nuovamente la serie A.

Il discorso varia con la densità di 400 Kg/m^3, che, come alla densità più bassa, mostra valori di assorbimento e andamenti della curva del tutto confrontabili, su tutte le frequenze. I migliori assorbimenti alle frequenze medio alte sono attribuibili alla serie I e alla serie B (fibre + colla amido di mais).

In generale vale quanto detto in precedenza, i campioni basati su una colla hanno, a parità di densità e spessore, andamenti e assorbimenti del tutto confrontabili in cui emerge l'amido di riso per le densità di 100 e 200 Kg/m^3 e la colla d'ossa per le densità maggiori. La serie A, basata sui polimeri, per via del sua composizione, presenta un andamento ottimo a basse densità, ma già a 200 Kg/m^3 mostra un andamento tipico dei materiali a densità maggiore.

Tuttavia bisogna considerare che dall'esperienza maturata nella fase di composizione dei provini solo con la seria A è possibile scendere a densità minori di 100 Kg/m^3, mentre con tutte le altre serie si parte da densità di circa 250 Kg/m^3, poiché a densità minori non è stata raggiunta coesione fra le fibre o una rigidità ritenuta idonea. Questa problematica verrà analizzata e risolta nella successiva sperimentazione (capitolo 8).

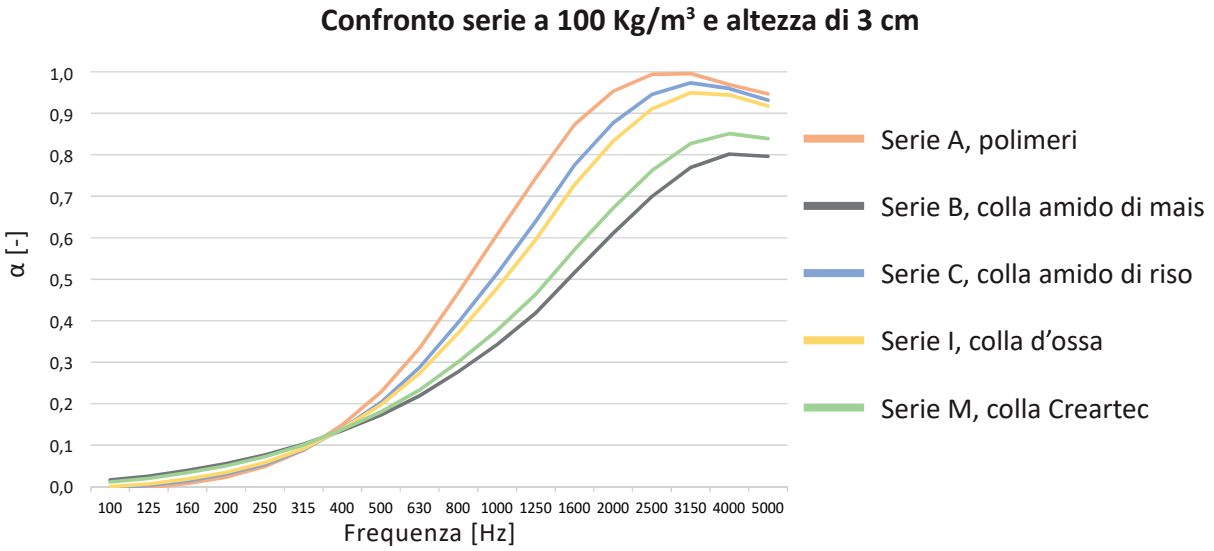


Figura 37: Coefficienti di assorbimento acustico tra le diverse serie, a parità di densità (100 Kg/m³) e altezza.

Dal confronto emerge come a questa densità sia la serie A ad avere la prestazione migliore, seguita dalla serie C e dalla serie I. L'andamento della curva è il medesimo fra tutte le serie considerate.

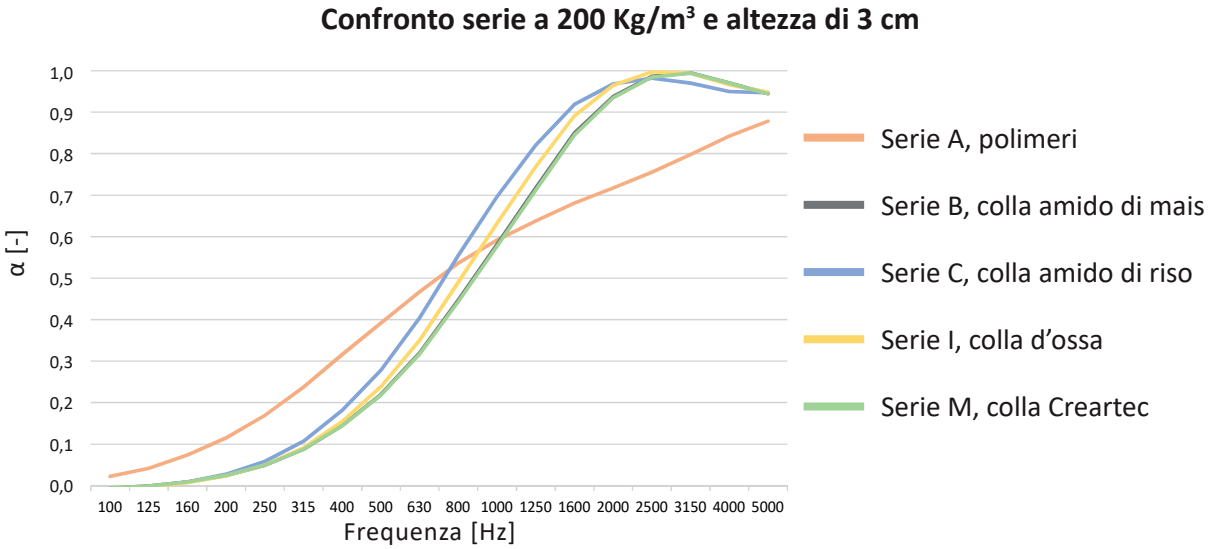


Figura 38: Coefficienti di assorbimento acustico tra le diverse serie, a parità di densità (200 Kg/m³) e altezza.

Tutte le serie tendono ad avere curve coincidenti a questa densità, con elevati assorbimenti alle alte frequenze; unica eccezione i risultati della serie A, la quale presenta un andamento peggiore alle alte frequenze e uno migliore alle frequenze più basse.

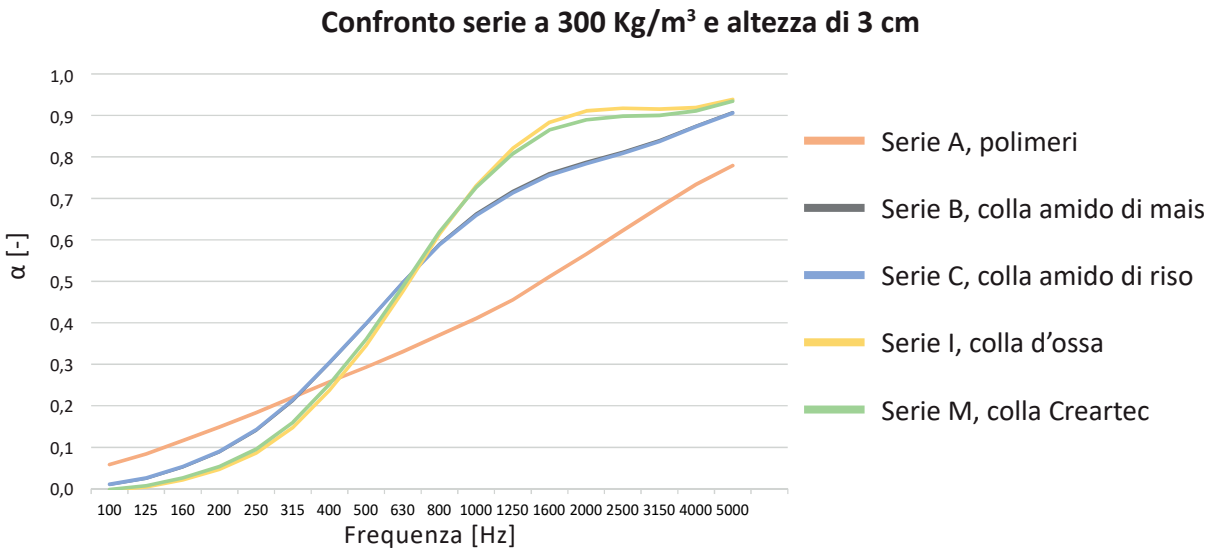


Figura 39: Coefficienti di assorbimento acustico tra le diverse serie, a parità di densità (300 Kg/m³) e altezza.

Gli andamenti sono analoghi a quelli della densità precedente, ma con un risultato migliore alle alte frequenze attribuibile alla serie I e alla serie M, mentre alle frequenze intermedie alla serie C. Alle frequenze basse emerge nuovamente la serie A.

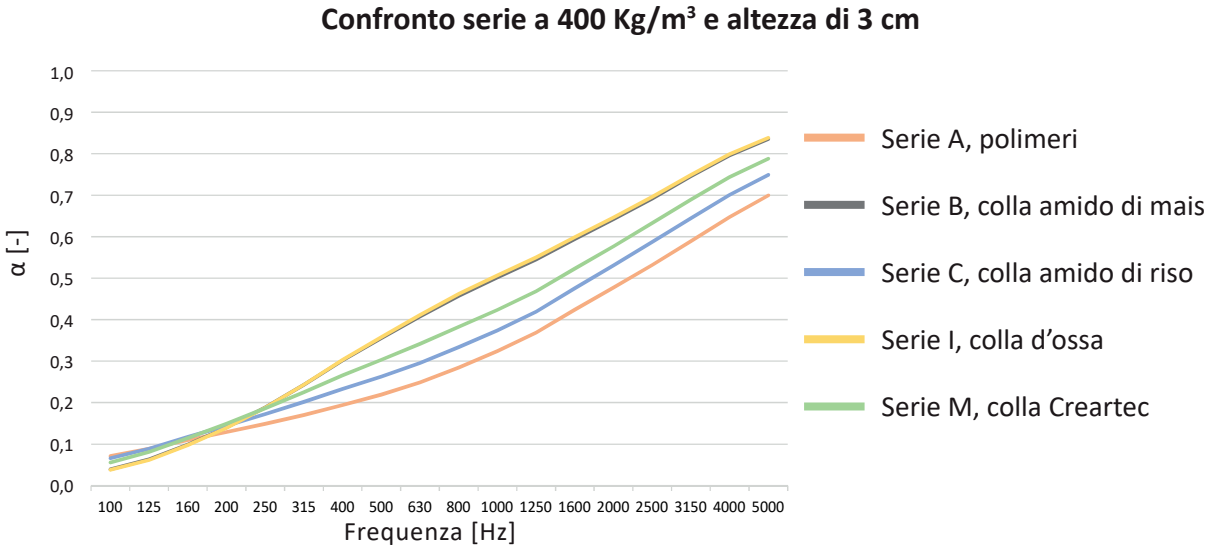


Figura 40: Coefficienti di assorbimento acustico tra le diverse serie, a parità di densità (400 Kg/m³) e altezza.

A questa densità le curve tendono a diventare più lineari e i valori tendono a coincidere; i migliori assorbimenti emergono dalla serie I e dalla serie B, soprattutto a frequenze medio alte.

7.3 DALLA FUNZIONE ALLA RICETTA: DEFINIZIONE DEL MIX DESIGN IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ

L'approccio utilizzato fino a questo punto consiste nel partire dal rapporto fra fibra e colla e la relativa "ricetta", da cui ricavare poi densità, impermeabilità, porosità, resistività al flusso e le performance acustiche appena elaborate. Ciò comporta che una qualsiasi variazione della ricetta iniziale porterebbe a una variazione dei rispettivi parametri. Come evidenziato, nell'ultima valutazione acustica, tramite un determinato processo, è stato possibile un confronto diretto tra le diverse serie uniformando l'altezza e la densità. Il confronto è stato quindi eseguito fra materiali a diverse densità prestabilite e non più fra i provini sperimentali realizzati fisicamente, i quali non potevano essere confrontati direttamente per via delle diverse caratteristiche.

Sorge però una domanda spontanea: questi nuovi prodotti, con densità prestabilite, a quale ricetta fanno riferimento? Per rispondere a tale domanda è stato sviluppato un ragionamento in grado di fornire la ricetta base, per ogni singola serie, tenendo constanti tutte le altre variabili.

Come sottolineato, per le serie B, C, F, I, M, N, la densità è stata controllata attraverso il rapporto fibra-collante: all'aumentare del collante aumenta la densità. Nel caso di questi provini non è stata esercitata alcuna pressione durante la loro realizzazione, se non quella minima per compattare il pannello. Dunque, tale variabile viene considerata una costante. La variabile pressione, per diminuire il rapporto, viene considerata come una potenzialità di sviluppo futuro per TECA panel.

Si è quindi deciso di sviluppare dei grafici per ogni serie, in grado di mettere in rapporto la densità dei provini analizzati sull'asse delle ascisse, e il rispettivo rapporto fibre-colla sull'asse delle ordinate (figure dalla 42 alla 45). Emerge una tendenza, diversa per ogni serie, della quale è stato possibile ottenere la rispettiva funzione. In particolare sono state usate le tendenze lineari ed esponenziali (specificate per ogni analisi): in base alla composizione del grafico è stata utilizzata la funzione che permettesse il risultato più congruo rispetto ai dati di base. Grazie a questa funzione è stato possibile ricavare, in base alle densità prestabilite di 100, 200, 300, 400 Kg/m^3, il rispettivo quantitativo di colla e di conseguenza il rapporto per ogni densità, per ogni serie.

Questo risultato è fondamentale, poiché, attraverso le diverse funzioni, è possibile ottenere il rapporto fibra-colla per produrre un campione con la densità richiesta. Inoltre, attraverso le funzioni citate nel precedente

paragrafo, è possibile ricavare anche le performance acustiche in base alla densità voluta, senza realizzare ulteriori campioni ed effettuare misure di resistività. Ovviamente questo è valido tenendo gli altri parametri costanti.

Si prenda per esempio la serie B (figura 42), dove è stata ricavata la seguente funzione lineare:

$$y = 0{,}0089x - 0{,}6359$$

sarà sufficiente sostituire al termine x i valori di densità ricercati per ottenere il rispettivo quantitativo di colla y, e quindi il rapporto fibra-collante da applicare nella ricetta per ottenere quella specifica densità.

Questo concetto è stato applicato anche per la serie A ove la densità è stata controllata grazie alla pressione esercitata sui provini. Dunque, in questo caso, il rapporto tra fibre e polimeri viene mantenuto costante e sarà da ricercare la ricetta che fornisca la pressione da applicare in base alla densità voluta, come emerge dalla figura 41.

Come emerso nel precedente paragrafo, in base all'esperienza maturata in fase di sperimentazione, sotto al rapporto fibra-colla di 1:1 il campione non presenta la rigidità minima prevista, e in alcuni casi nemmeno una adeguata coesione fra le fibre. Come risulta dall'elaborazione, i campioni con una densità minore di 200 Kg/m^3, richiedono un rapporto più basso, per il quale non risulta possibile la loro composizione. Uniche eccezioni sono la serie B, e la serie A: quest'ultima per via del differente processo ha le potenzialità per scendere a basse densità. Sarà compito della sperimentazione successiva analizzare queste problematiche.

Nelle pagine seguenti verranno mostrati i grafici formulati per ogni singola serie, mettendo in evidenza la funzione ricavata da essi. Inoltre verranno mostrate le relative tabelle elaborate, in cui è riportato il rapporto, o la pressione nella serie A, e quindi la nuova ricetta (figure dalla 40 alla 45), per ottenere le densità prescelte nel paragrafo 7.2.

SERIE A: Fibre + Polimeri

Campione	Kg/m^2	Densità
A014	0	75,2 Kg/m^3
A017	70	169,1 Kg/m^3
A019	250	176,6 Kg/m^3
A020	700	245,9 Kg/m^4

Densità	Kg/m^2	
100,0 Kg/m^3	45	*f esp.*
200,0 Kg/m^3	386	*f lineare*
300,0 Kg/m^3	770	*f lineare*
400,0 Kg/m^3	1.100	*f lineare*

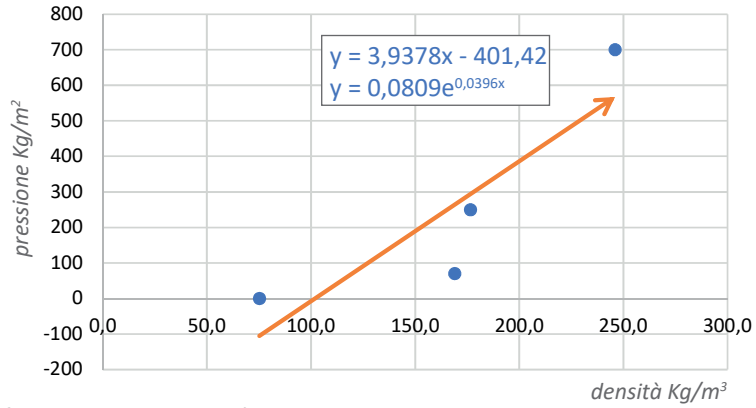


Figura 41: Elaborazione del mix design in funzione della densità selezionata, serie A.

SERIE B: Fibre + Colla Amido di Mais

Campione	Rapporto	Densità
B005	1 ÷ 1	176,1 Kg/m^3
B007	1 ÷ 1,5	289,6 Kg/m^3
B009	1 ÷ 2,5	312,2 Kg/m^3

Densità	Rapporto	
100,0 Kg/m^3	1 ÷ 0,3	*f lineare*
200,0 Kg/m^3	1 ÷ 1,1	*f lineare*
300,0 Kg/m^3	1 ÷ 2	*f lineare*
400,0 Kg/m^3	1 ÷ 3	*f lineare*

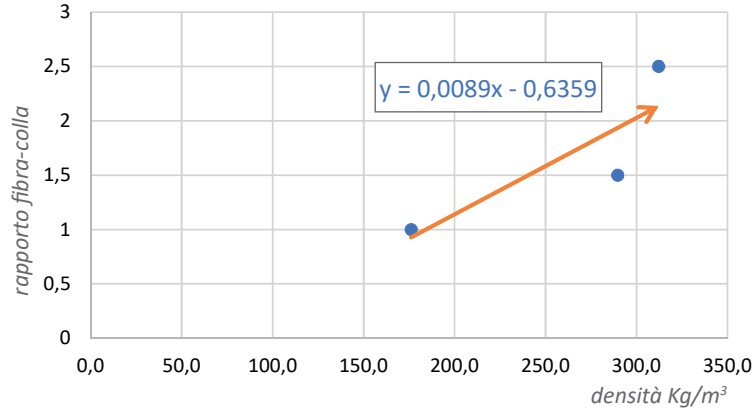


Figura 42: Elaborazione del mix design in funzione della densità selezionata, serie B.

SERIE C: Fibre + Colla Amido di Riso

Campione	Rapporto	Densità
C004	1 ÷ 1	270,3 Kg/m^3
C005	1 ÷ 1,5	347,2 Kg/m^3
C007	1 ÷ 3	386,1 Kg/m^3

Densità	Rapporto	
100,0 Kg/m^3	1 ÷ 0,4	*f esp.*
200,0 Kg/m^3	1 ÷ 0,7	*f esp.*
300,0 Kg/m^3	1 ÷ 1,3	*f lineare*
400,0 Kg/m^3	~ 1 ÷ 3	*f lineare*

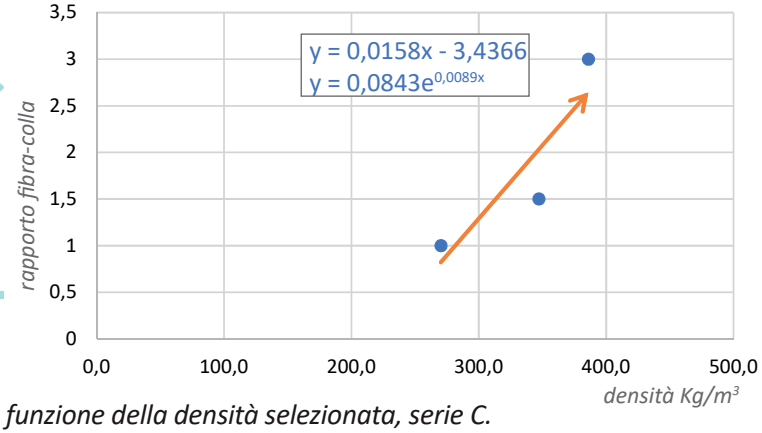
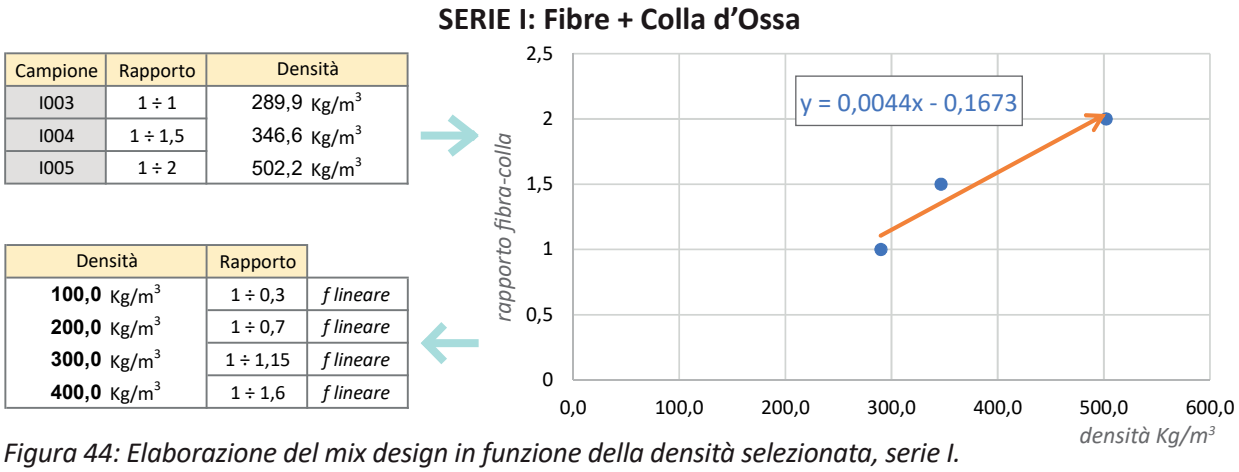


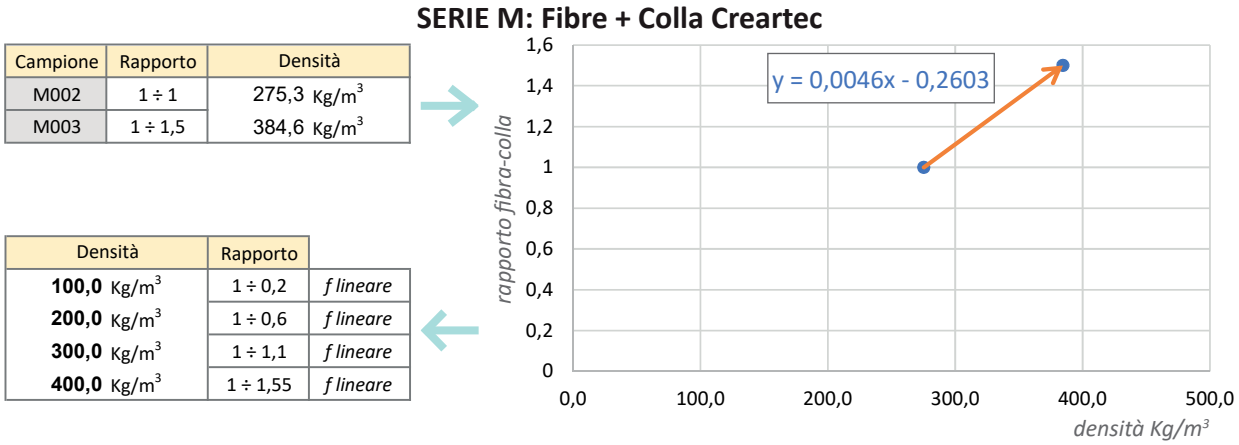
Figura 43: Elaborazione del mix design in funzione della densità selezionata, serie C.



Campione	Rapporto	Densità
I003	1 ÷ 1	289,9 Kg/m³
I004	1 ÷ 1,5	346,6 Kg/m³
I005	1 ÷ 2	502,2 Kg/m³

Densità	Rapporto	
100,0 Kg/m³	1 ÷ 0,3	*f lineare*
200,0 Kg/m³	1 ÷ 0,7	*f lineare*
300,0 Kg/m³	1 ÷ 1,15	*f lineare*
400,0 Kg/m³	1 ÷ 1,6	*f lineare*

Figura 44: Elaborazione del mix design in funzione della densità selezionata, serie I.



Campione	Rapporto	Densità
M002	1 ÷ 1	275,3 Kg/m³
M003	1 ÷ 1,5	384,6 Kg/m³

Densità	Rapporto	
100,0 Kg/m³	1 ÷ 0,2	*f lineare*
200,0 Kg/m³	1 ÷ 0,6	*f lineare*
300,0 Kg/m³	1 ÷ 1,1	*f lineare*
400,0 Kg/m³	1 ÷ 1,55	*f lineare*

Figura 45: Elaborazione del mix design in funzione della densità selezionata, serie M.

7.4 CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

In questa fase terminale dello sviluppo acustico e della relativa sperimentazione, non verranno riportati i singoli risultati, poiché essi sono stati esposti in modo approfondito all'interno di questo capitolo in relazione a delle considerazioni, variabili, ipotesi e successive elaborazioni da comprendere integralmente, per la lettura di tali esiti.

Viene rappresentato nella figura 46 il flow chart riassuntivo delle principali fasi, elaborazioni e risultati emersi in questo capitolo, al fine di rendere più agevole la comprensione del percorso e dei processi affrontati per determinare una caratterizzazione acustica dei campioni composti.

Un'importante conferma qui raggiunta, riguarda le proprietà dei provini realizzati, infatti, i risultati, asseriscono la letteratura in questo ambito. Si fa riferimento all'aumento della resistività al flusso al crescere della densità, e a una diminuzione della porosità e della permeabilità. Questa dimostrazione ha portato a un altro risultato di rilievo: in seguito a delle modellazioni matematiche, basate su delle funzioni e delle modellazioni acustiche, è possibile ricavare la resistività al flusso e di conseguenza le performance acustiche, per ogni specifica serie (e quindi per ogni singolo mix design) a qualsiasi densità desiderata, escludendo la produzione di ulteriori campioni e analisi attraverso lo strumento. Inoltre, attraverso un'ulteriore modellazione matematica, è possibile ricavare la "ricetta" per queste nuove densità ottenute, per le quali, altrimenti, non si conoscerebbe il rapporto fibra colla corretto, o la pressione nel caso della serie A.
Le performance acustiche sviluppate, sulla base dei campioni realizzati e analizzati, risultano confermare le aspettative. Gli andamenti acustici rispecchiano generalmente per tutte le serie quelli tipici della lana: bassi coefficienti di assorbimento alle basse frequenze per poi crescere in modo graduale e costante alle alte frequenze dove, in base alle diverse densità, si arriva a coefficienti di assorbimento pari a 1. Questo significa che la lana contenuta nei provini, nonostante la presenza di sostanze collanti, esprime il suo massimo potenziale acustico.

Questo risultato permette di confermare che a parità di densità i risultati tendono ad avere andamenti paragonabili e dunque potenziali funzioni coincidenti. La motivazione per la quale le funzioni utilizzate in questo capitolo risultano diverse per ogni serie (varia il coefficiente angolare), deriva dall'elevata quantità di collante utilizzato nei campioni con densità maggiori; si ricorda come la densità venisse controllata per mezzo del rapporto fibra-colla. Si ipotizza che nel caso

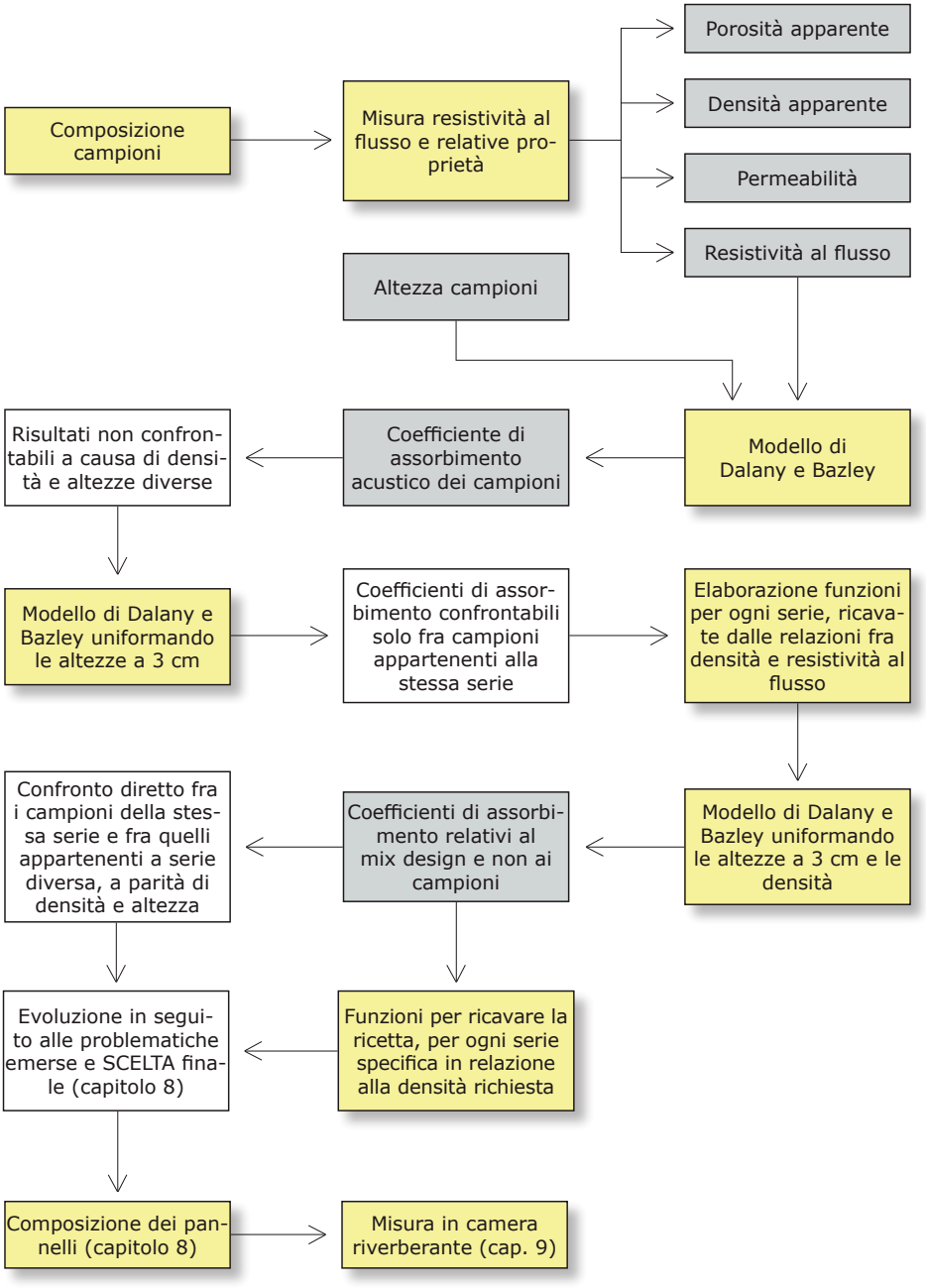


Figura 46: Flow chart del percorso effettuato per la valutazione delle caratteristiche acustiche e delle proprietà ad esse collegate. In colore giallo vengono evidenziate le elaborazioni, in grigio i risultati ottenuti e in bianco i relativi commenti.

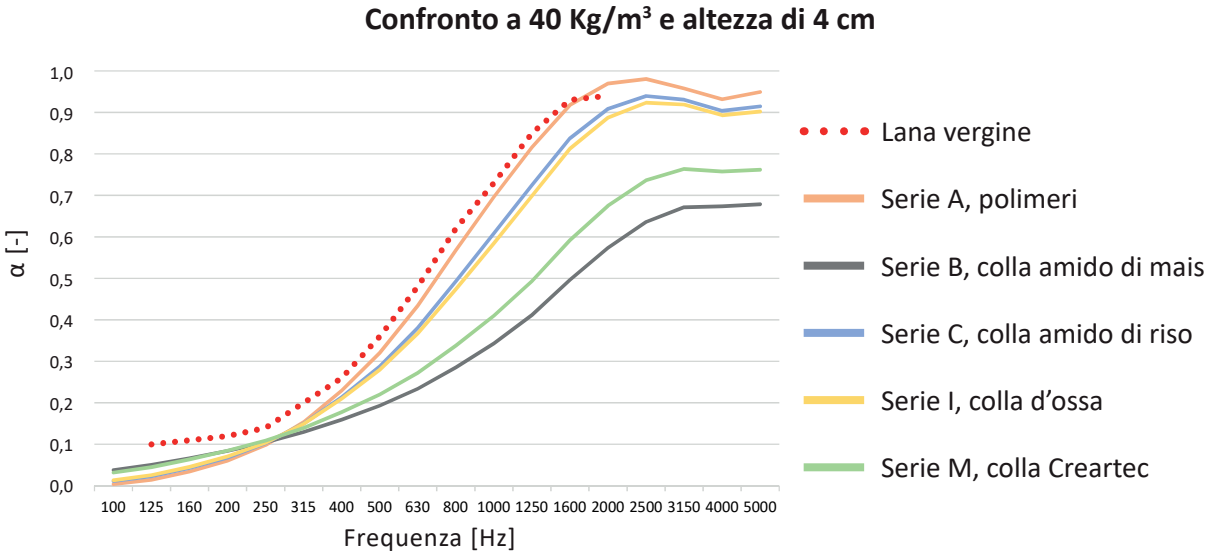


Figura 47: Confronto assorbimento acustico della lana vergine con quello delle serie realizzate e analizzate, spessore 4 cm e densità 40Kg/m³.

fosse mantenuto costante il rapporto fra le materie prime, utilizzando la pressione per il controllo della densità, le funzioni sarebbero potute coincidere (vedi capitolo 9).

A conferma di ciò, nella figura 47, è stato effettuato un confronto acustico fra le serie analizzate in questo capitolo, e quelle relative alla lana vergine. Le performance acustiche di quest'ultima sono state elaborate attraverso l'utilizzo del tubo di Kunt [8]. Poiché la lana vergine è stata valutata con uno spessore di 4 cm e una densità di 40 Kg/m³ è stato necessario applicare le funzioni elaborate in questo capitolo per sviluppare le stesse caratteristiche per le serie considerate. Dalla comparazione emerge come l'andamento delle curve sia del tutto assimilabile; anche le performance acustiche risultano in linea con quelle della lana vergine; in particolare quelle della serie A (polimeri) e quelle della serie C (amido di riso). Tuttavia, i dati relativamente minori, trovano giustificazione nei leganti utilizzati, a differenza della lana vergine per la quale non è stata utilizzata nessuna colla. Non si esclude che, a causa delle differenti metodologie impiegate, i risultati, possano essere stati influenzati dalla tipologia del processo stesso.

8_Berardi Umberto, 2015, op. cit.

Questa elaborazione conclusiva può quindi essere individuata come conferma di tale sviluppo.

Con questo capitolo potrebbe ritenersi conclusa una prima parte di sperimentazione, nella quale sono stati centrati gli obiettivi ricercati, al fine di un completo sviluppo tecnico e acustico di TECA panel. Come anticipato TECA panel non vuole costituire un prodotto unico e con un unico fine, ma anche offrire la possibilità di variare in modo controllato il proprio mix design in base alla sua realtà di applicazione e alle performance acustiche richieste. Infatti in funzione della matrice utilizzata, esso può avere diverse finalità. Allo stesso tempo in relazione alla densità scelta potrebbero derivare prodotti per diverse tipologie d'impiego: a basse densità, TECA panel, potrebbe essere utilizzato all'interno di intercapedini, a densità intermedie come pannellature sospese o appese a una superficie, mentre ad elevate densità potrebbero essere generati dei prodotti autoportanti. TECA panel deve essere in grado di assolvere a queste diverse soluzioni, nonché considerare nuovi scenari non ancora esplorati.

Per questi motivi l'evoluzione di TECA panel porterà a una seconda sperimentazione (capitolo 8), al fine di considerare queste possibilità e alcune problematiche emerse nel capitolo 6 e 7. Tra le più rilevanti si ricorda come non sia possibile, con riferimento alle serie basate sulle colle e con le considerazioni effettuate, arrivare a realizzazioni con bassa densità; dovrebbe infatti essere inserita la variabile della pressione per provare a risolvere tale questione. Inoltre deve essere attentamente valutato il passaggio da campioni circolari di 6 cm a pannelli, con dimensioni notevolmente maggiori: questo salto potrebbe comportare la nascita di nuove variabili, fin'ora non emerse, che implicherebbero la modifica delle ricette elaborate, ma allo stesso tempo consentirebbero una evoluzione fondamentale per il continuo miglioramento di tale prodotto.

8

SPERIMENTAZIONE B: PROGETTO E SVILUPPO DI PANNELLI RIGIDI FONOASSORBENTI

- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

8.1 L'EVOLUZIONE: SCELTA DEL MIX DESIGN E INTRODUZIONE DELLE NUOVE VARIABILI DI PROGETTO

All'interno di questo capitolo, in particolare di questo primo paragrafo, verrà illustrata e descritta l'evoluzione di quella che è stata la prima sperimentazione. Essa infatti è stata concepita con fini esplorativi, per verificare la fattibilità dei processi, la coesione fra le fibre, le matrici e le colle, le densità e tutte le variabili ampiamente descritte. Su quelle basi è stato poi effettuato un approfondito lavoro di analisi e sviluppo acustico, che ha condotto a una serie di conclusioni positive e all'individuazione di alcune problematiche che verranno prese in considerazione in questa seconda sperimentazione.

Il capitolo nasce con un duplice significato: da una parte proseguire lo sviluppo di TECA panel, superando le difficoltà e i dubbi emersi fono ad ora, dall'altra consentire il successivo sviluppo in camera riverberante (capitolo 9). Per effettuare tale misura, attraverso la quale si andrebbero ad ottenere le performance acustiche senza l'ausilio di modelli, risulta necessaria la realizzazione di pannelli di dimensioni notevolmente maggiori rispetto ai provini realizzati finora. In particolare verrà utilizzata una camera riverberante in scala, questo ci permette di ridurre la dimensione dei pannelli che sarebbe necessaria per un test in una camera con dimensioni standard. Tuttavia la dimensione richiesta è quella di un pannello 60x80 cm per ogni matrice e densità con la quale si intende svolgere tale misura.

Prima di continuare su questo discorso sorge spontanea una domanda, quale serie utilizzare per questa evoluzione? Sarebbe significativo proseguire lo sviluppo con le serie e con le densità portate avanti fino allo scorso capitolo, ma per via delle dimensioni e del numero di pannelli da realizzare, del quantitativo di risorse e di forza lavoro, nonché della strumentazione necessaria, risulta essenziale individuare una strategia. Incrociando i risultati del capitolo 5, in cui si analizzavano i leganti, la sperimentazione del capitolo 6, lo sviluppo acustico del capitolo 7 e la valutazione economica del capitolo 11 è possibile confermare l'interesse, come previsto, sulle serie A e C.
La serie A si costituisce su una matrice rigida a base di polimeri termoindurenti (poliestere), in grado di sfruttare la differenza di temperatura di fusione fra i materiali, portando ad aggregare le fibre di lana. Questa soluzione permette un agevole processo di produzione ed è l'unica serie con la quale è stato possibile scendere a basse densità senza perdere coesione garantendo allo stesso tempo un'adeguata rigidità. Inoltre le performance acustiche, soprattutto a basse densità, sono state le migliori rispetto a tutte le altre serie, mentre a densità maggiori gli assorbimenti

massimi sono diminuiti, innalzando discretamente quelli a basse frequenze. Entrambe le materie utilizzate in questa serie, come ampiamente descritto nei capitoli 4 e 5, derivano da processi di riciclo: sono scarti aziendali considerati rifiuti e come tali portati in discarica. Tuttavia in questo caso si parla di un polimero di origine sintetica pertanto non biodegradabile, ma non si esclude la possibilità di sostituzione con un polimero di origine naturale in un futuro processo di sviluppo. Ovviamente la scelta deve essere attentamente pesata e valutata ai fini industriali: da una parte uno scarto aziendale vantaggioso economicamente, dall'altra un'evoluzione sostenibile caratterizzata però da costi più elevati. Per queste ragioni la serie in questione sarà oggetto di studio ed evoluzione, e verrà denominata Serie P.
La serie C è basata invece sulla colla realizzata partendo dall'amido di riso, contenuto nell'acqua di bollitura del riso precotto. Anche in questo caso la sostanza è parzialmente scartata a livello industriale, permettendo un notevole vantaggio a livello economico. Quindi il pannello così realizzato, sarebbe completamente riciclato e inoltre totalmente di derivazione naturale, biodegradabile e riciclabile. Anche lo sviluppo acustico ha confermato tale soluzione per via delle buone performance, soprattutto alle densità minori di 200 Kg/m^3, alle frequenze medio alte. Tuttavia, come ribadito nei capitoli 5 e 6, tale scarto aziendale non è stato fornito ed è stato necessario sviluppare un prodotto paragonabile in fase di sperimentazione. Il prodotto generato risulta però di difficile gestione per via delle elevate quantità necessarie per produrre i futuri pannelli; a scopo esemplificativo si è deciso di utilizzare l'amido derivante dal mais, mantenendo però valido il discorso appena descritto per l'amido di riso. L'amido di mais ha infatti dimostrato le stesse caratteristiche in fase sperimentale e andamenti acustici congruenti, soprattutto a determinate densità intermedie. Su queste basi anche l'utilizzo dell'amido verrà preso in considerazione in questa parte di lavoro, e tale serie verrà chiamata serie S.

Effettuate queste scelte l'obiettivo principale risulta quello di andare a realizzare il pannello da testare in camera riverberante. Questo passaggio fa emergere nuove variabili e mette in luce tutte le problematiche delle quali si è scritto nei capitoli precedenti.

A causa delle notevoli dimensioni si è deciso di scomporre il pannello 60x80 cm in 4 pannelli più piccoli, di dimensioni 30x40 cm. Per questo motivo è stata necessaria la produzione di una dima in ferro di tali dimensioni, per permettere la formazione del pannello. Essa è stata realizzata da Crestani Officine

Meccaniche.

Il campione su cui basare la realizzazione del pannello di 3 cm è il numero C004, caratterizzato da un rapporto fibra-colla di 1:1, una altezza di 1,71 cm e una massa di 12,55 g. Sono quindi stati ricavati da tale sperimentazione gli ingredienti per realizzare il pannello: 580 g di fibre di lana Reda e 580g di colla di amido per un totale di 1,16 Kg da bagnato. La realizzazione è stata eseguita seguendo lo schema utilizzato per il campione C004:

Figura 1: Pannello 40x30 realizzato su base del campione C004.

le fibre sono state tritate prima dell'utilizzo attraverso un Moulinex tritattutto 700W, poi sono state unite alla colla, per essere mescolate nuovamente attraverso una doppia lama rotante azionata da un trapano elettrico. Il composto è stato adagiato all'interno del cassero (figura 1), compattato, per essere poi lasciato ad asciugare naturalmente all'aria.

Questa sperimentazione non ha però condotto ai risultati previsti. Come prima cosa si è presa consapevolezza dell'enorme quantità di materiale e di risorse necessarie per la produzione di un solo pannello 30x40. Inoltre, completata l'asciugatura, quest'ultimo non ha acquisito rigidità: le fibre sono risultate coese ma non a sufficienza per evitare la sua rottura con una minima azione esterna.

La realizzazione di tale pannello ha inoltre evidenziato due problematiche, di cui è stato già accennato. La prima fa riferimento al passaggio da un piccolo campione a pannello: l'aggregazione tra le fibre in piccole quantità coesiste, mentre a dimensioni maggiori, mantenendo il processo produttivo e il rapporto invariati, queste non sono in grado di sorreggere l'aumento della massa propria. La seconda è legata alla pressione: nei capitoli precedenti quest'ultima è stata chiamata in causa nei casi in cui si è presentata l'esigenza di diminuire il rapporto fibre-colla, al di sotto di quello minimo, per ridurre la densità. Tut-

tavia emerge come mantenendo un rapporto di 1:1, risultato largamente accettabile per il campione C004, nel caso del pannello non sia stato sufficiente; è fondamentale inserire la variabile della pressione per evitare di arrivare a percentuali di colla troppo elevate. In merito a questo e in seguito a diversi confronti, tra cui RiceHouse, si è deciso di fissare il massimo rapporto per i successivi sviluppi a 1:1, sia per una questione di processo produttivo, sia per permettere alle fibre di lana di esprimere al meglio le loro caratteristiche acustiche.

Il passaggio successivo consiste nell'andare a sviluppare queste problematiche al fine di generare il corretto mixdesign e realizzare i pannelli da analizzare in camera riverberante. Per avviare la ricerca occorre partire da quanto emerso in questa realizzazione ossia la grande quantità di scarti necessari sia per comporre i pannelli sia per il loro sviluppo. Questo ha comportato un ulteriore complicazione derivante dal fatto che il Lanificio Reda deposita in un unico contenitore le proprie polveri scartate, con l'altro scarto aziendale, le fibre lunghe. Ciò implica l'impossibilità da parte di Reda di dividere i due prodotti: per piccole quantità, sufficienti per produrre i campioni della prima sperimentazione, tale fornitura è stata sufficiente mentre per quantità largamente maggiori non risulta possibile, poiché dovrebbe essere modificato il processo di scarto o comunque comporterebbe tempi lunghi per scindere i due materiali. Si sottolinea comunque l'interesse del Lanificio Reda verso questa possibilità, e verso un' eventuale evoluzione futura del progetto, che porterebbe all'eventualità di poter dividere gli unici scarti che attualmente l'azienda produce (figura2).
La decisione è stata quella di procedere con una fornitura da parte di un'altra azienda, tra le tante che producono scarti (rifiuti) di polvere di lana nel territorio biellese: il Feltrificio Biellese, analizzato in dettaglio nel paragrafo 4.2. Esso ha fornito una elevata quantità di scarti, permettendo l'avanzare del progetto (figura 4).
Nonostante lo scarto sia composto da fibre corte miste a polveri, totalmente in lana, risulta avere caratteristiche parzialmente diverse da quello precedente. Esso risulta innanzitutto di una colorazione differente, più naturale, poiché non soggetto a processi di tintura a differenza di quello fornito da Reda in cui la fibra viene precedentemente colorata e trattata. In questo caso le fibre appaiono più grezze ma comunque di ottima qualità, con un diametro superiore, e inoltre risultano mescolate con piccole quantità di paglia. Ma questa tipologia di scarto è soprattutto già pronta per essere utilizzata: è fornito come polvere e non deve essere tritato

Figura 2,3,4: Confronto fra gli scarti forniti dal Lanificio Reda (1), gli scarti Reda dopo essere tritati in modo tale da essere impiegati (2) e gli scarti forniti dal Feltrificio Biellese direttamente pronti all'uso (3).

prima di effettuare il mix. Lo scarto di Reda invece, prima dell'utilizzo, doveva essere accuratamente tritato e omogenizzato (figura 3). La possibilità di evitare questo processo è del tutto rilevante, poiché comporterebbe notevoli vantaggi sia in termini di tempo e impiego di risorse, sia, a livello industriale, per quanto riguarda l'aspetto economico.

Oltre ad avere risolto il problema relativo alla fornitura della materia prima, aver deciso di mantenere un rapporto massimo di 1:1 e quindi di introdurre la pressione all'interno della sperimentazione, per questioni di fattibilità legata alla gestione del processo e dell'attrezzatura disponibile è stato deciso di ridurre la dimensione dei pannelli a 20x30 cm. Ne risulta che dovranno essere realizzati 8 pannelli per comporre un pannello di 60x80 cm per le valutazioni in camera riverberante.

Prima di realizzare la serie di 8 pannelli per effettuare i test di cui si parlerà nel capitolo successivo, viste le profonde innovazioni introdotte in questa sperimentazione, nei prossimi paragrafi verranno nuovamente composti dei campioni di piccole dimensioni e in seguito una serie di pannelli, serie S e serie P, per verificare e sviluppare i nuovi processi, e definire gli spessori e le densità per la valutazione acustica.

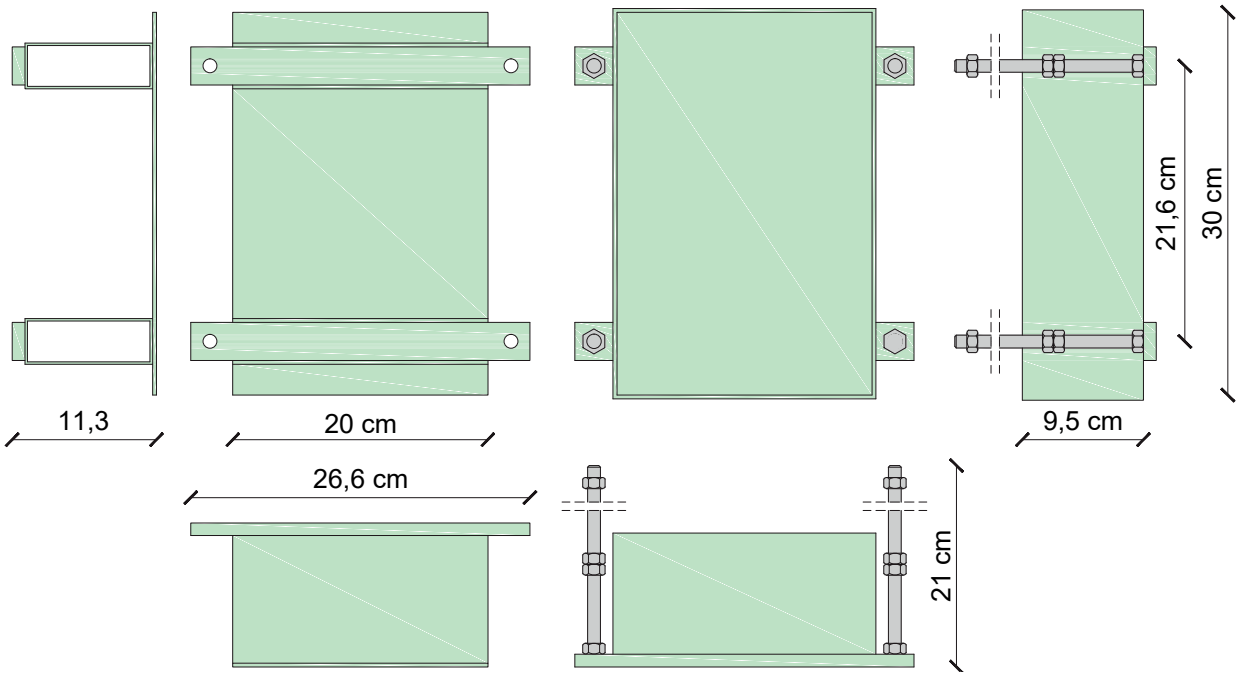


Figura 5: Progetto della pressa trasportabile, fondamentale per la composizione dei pannelli 20x30 cm.

Viene ora spiegato come sarà gestita e controllata la parte relativa alla pressione durante la produzione dei pannelli di dimensione 20x30 cm. E' stato necessario progettare una pressa trasportabile (figura 5), poiché i pannelli della serie P devono essere mantenuti in pressione durante la fase di cottura. Inoltre gli sviluppi hanno portato a introdurre la fase di cottura anche per i pannelli sviluppati con l'amido, serie S: per permettere la loro formatura essi devono essere cotti in forno mantenendo la pressione prestabilita, a differenza della prima sperimentazione dove venivano lasciati asciugare all'aria in modo naturale. La progettazione della pressa diventa quindi, del tutto fondamentale poiché per entrambe le serie è indispensabile il mantenimento della pressione durante la cottura.

La pressa progettata e successivamente costruita da Crestani Officine Meccaniche (figure 6 e 7), è costituita da una base in ferro 3mm, con misure interne di 20x30, la quale costituisce il cassero dentro cui si formerà il pannello. Saldate alla base, sul lato lungo, emergono quattro staffe alle quali sono ancorati quattro prigionieri M10. La parte di chiusura superiore è in grado di scorrere all'interno del cassero e dei rispettivi prigionieri. Attraverso la chiusura dei dadi

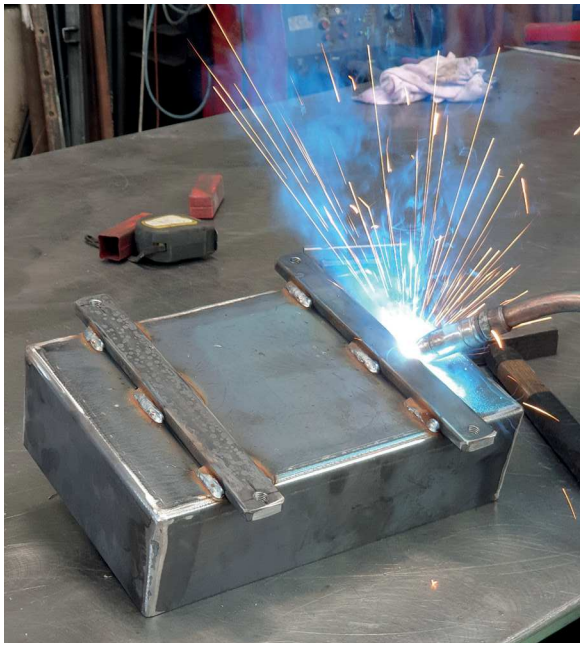


Figura 6: Particolare durante la fase di produzione della pressa, Crestani Officine Meccaniche.

Figura 7: Pressa trasportabile fabbricata da Crestani Officine Meccaniche.

sui rispettivi prigionieri, è possibile avvicinare la chiusura superiore a quella inferiore, esercitando una determinata pressione. Tale pressione viene calibrata in una pressa pneumatica industriale messa nuovamente a disposizione da Crestani Officine Meccaniche. Inoltre sono presenti sulla lunghezza dei prigionieri 8 dadi che fungono da fine corsa per il controllo della pressione e dell'altezza del pannello. Il funzionamento è piuttosto semplice: una volta inserito il materiale, opportunamente preparato, e aver calibrato correttamente i fine corsa in base all'altezza prestabilita, è possibile posizionare la chiusura superiore e azionare la pressa industriale, esercitando una pressione controllata. A questo punto i dadi superiori possono essere agevolmente chiusi fino a battuta e di seguito è possibile liberare la pressa trasportabile dalla pressione di quella industriale, poiché dopo la chiusura dei dadi, tale pressione è mantenuta costante all'interno del cassero. Infine, in base alla ricetta del prodotto da realizzare subirà un processo termico.

Il processo di gestione della densità avviene attraverso il volume noto della parte interna della pressa (con la relativa altezza impostata), e della massa utilizzata nel del mix-design. Questo determina una determinata pressione di applicazione per permettere al coperchio di raggiungere i fine corsa impostati e di conseguenza la pressione desiderata.

8.1.1 TECA PANEL SERIE S: FIBRE E POLVERI + COLLA DI AMIDO

Prima dello sviluppo e realizzazione dei pannelli, verranno composti una serie di campioni, al fine di verificare la coesione delle fibre, la rigidità del provino e il comportamento delle nuove fibre di lana utilizzate. La preparazione, in questa prima fase, si baserà sulla stessa ricetta utilizzata per i campioni serie B, paragrafo 6.2.3, senza introdurre quindi la nuova variabile della pressione.

INGREDIENTI

- *Fibre corte e polveri scartate dal Feltrifio Biellese, 100% lana* (vedi paragrafo 4.2.2).
- *Colla di amido di mais: amido di mais in polvere* (vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE

Unire l'amido di mais (30g) in 1/3 dell'acqua totale (100g dei 300g complessivi), mescolare fino a sciogliere completamente l'amido ed avere un liquido omogeneo. Riscaldare in un pentolino a fuoco basso la parte restante di acqua (200g) fino alla temperatura di circa 60°C. Unire la miscela a filo nel pentolino contenente l'acqua calda e continuare a mescolare fino a bollitura, a fuoco basso. Mescolare ancora per un minuto e poi togliere dal fuoco. Lasciare raffreddare e unire la colla agli scarti di lana in base alla campionatura voluta. Il campione, una volta formato, verrà lasciato ad asciugare all'aria in modo naturale. La formazione del provino avverrà all'interno di un cassero in alluminio, e la densità verrà controllata attraverso la percentuale di colla utilizzata nel composto. Le fibre verranno utilizzate direttamente come fornite dal Feltrificio Biellese, senza quindi essere tritate, comportando un vantaggio significativo nel processo produttivo.

CAMPIONI

S001: fibre + colla di amido di mais con rapporto 1:1 (10g : 10g). Tritare il composto per 10 secondi con Moulinex tritattutto 700W e formare il campione all'interno del cassero. Compattare il prodotto con una massa di 0,7 Kg. Dopo la formatura estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

S002: come S001 ma con rapporto 1:1,5 (10g : 15g).

S003: come S001 ma con rapporto 1:1,2 (10g : 20g).

S004: come S001 ma con rapporto 1:3 (10g : 30g).

RISULTATI

La composizione dei campioni, sulla base delle ricette precedenti, ha portato a dei risultati ottimali, del tutto confrontabili con quelli realizzati con gli scarti forniti da Reda. Sulla base dell'esperienza maturata, è stato scelto un rapporto minimo di fibra-colla di 1:1, riscontrando una buona rigidità del campione. Nuovamente, all'aumentare del quantitativo di colla, il volume del campione diminuisce, la coesione e la rigidità aumentano, ma si riduce la lavorabilità durante la preparazione del composto. E' possibile sottolineare alcune differenze riscontrate in questa prima sperimentazione, derivanti dall'utilizzo delle nuove fibre. Innanzitutto le fibre fornite dal lanificio Reda devono subire un processo di triturazione iniziale, comportando un elevato utilizzo di risorse, mentre quelle utilizzate in questa sperimentazione, a seguito di una perlustrazione iniziale, risultano direttamente utilizzabili nel mix. La lavorabilità di queste fibre, e il risultato che ne deriva, sono qualitativamente di un livello superiore rispetto alla precedente sperimentazione. Per esempio in fase di produzione, e dopo avere composto il campione non avviene dispersione di fibre e di polvere, inoltre l'aggregazione risulta più efficace. Ciò è dovuto all'utilizzo di una fibra più grezza e con meno lavorazioni, rispetto a quella di Reda che risultava evidentemente più stressata. Inoltre il diametro

maggiore della fibra e la presenza di alcuni filamenti di paglia all'interno del composto, hanno favorito maggiormente l'aggregazione e la resistenza meccanica.

PANNELLI

Sulla base di questi promettenti risultati è stato dunque possibile portare avanti la sperimentazione, utilizzando questa tipologia di scarto, per andare a formare dei pannelli più grandi. La loro dimensione è di 20x30 cm, poiché è stata suddivisa in otto parti la misura del pannello ideale per i test in camera riverberante. Inoltre, come ampiamente introdotto nel paragrafo precedente, in questa sperimentazione è stato fissato un rapporto tra fibra e colla di 1:1 e verrà applicata sul pannello una specifica pressione per gestirne la densità.

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Feltrifio Biellese, 100% lana* (figura 8, vedi paragrafo 4.2.2).
- *Colla di amido di mais: amido di mais in polvere* (vedi paragrafo 5.1).

PREPARAZIONE:

La preparazione risulta la medesima di quella dei campioni della serie S, utilizzando dosi e tempistiche differenti, per via delle maggiori quantità di composto richieste.

Unire l'amido di mais (50g) in 1/3 dell'acqua totale (160g dei 500 g complessivi), mescolare fino a sciogliere completamente l'amido ed avere un liquido omogeneo. Riscaldare in un pentolino a fuoco basso la parte restante di acqua (340g) fino alla temperatura di circa 60°C. Unire la miscela a filo nel pentolino contenente l'acqua calda e continuare a mescolare fino a bollitura (8 minuti), a fuoco basso. Mescolare ancora per 3 minuti e poi togliere dal fuoco. Lasciare raffreddare e unire la colla agli scarti con un rapporto di 1:1 (figura 9) e mescolare il composto attraverso una quadrupla lama sfalsata azionata da un trapano elettrico (a causa dell'elevata quantità di materiale quest'ultima fase è stata svolta dividendo il composto in parti di dimensioni minori, vedi figura 10). Inserire il composto all'interno della base della pressa trasportabile e applicare la pressione, in relazione alla densità desiderata (figura 11). Serrare i dadi fino a raggiungere l'altezza prestabilita e posizionare la pressa in un forno ventilato per un'ora a 100°C per il trattamento termico. Estrarre la pressa, lasciare raffreddare, estrarre il campione delicatamente e lasciarlo asciugare in maniera naturale all'aria.

La densità di applicazione della colla, prima dell'unione con le fibre è di 290 Kg/m^3 ed è mantenuta costante per tutti i pannelli composti.

Figura 8: Fibra di Lana Fornita dal Feltrificio Biellese pronta all'uso.

Figura 9: Colla di amido aggiunta alle fibre, prima di essere mescolata.

Figura 10: Composto fibre + colla pronto per essere inserito all'interno della pressa.

Figura 11: Particolare durante la pressione esercitata dalla pressa industriale.

S010: fibre + colla di amido di mais con rapporto 1:1 (300g : 300g). Tritare il composto in parti da 100g attraverso una quadrupla lama sfalsata azionata da un trapano elettrico per un minuto. Unire le parti e riporle all'interno del cassero. Posizionando i fine corsa a 7 cm, la pressione esercitata è praticamente nulla (quella del solo coperchio). Cottura in forno per 3 ore a 75°C. Estrarre il campione e lasciare asciugare naturalmente all'aria.

S011: fibre + colla di amido di mais con rapporto 1:1,1 (300g : 330g). Tritare il composto per un minuto in parti da 100g attraverso una quadrupla lama sfalsata azionata da un trapano elettrico. Unire le parti e riporle all'interno del cassero. Posizionare i fine corsa a 1,3 cm, e sistemare la chiusura superiore della pressa trasportabile. Mediante pressa industriale esercitare una forza di 6.400N per una pressione sul provino di 10.833 Kg/m^2. Chiudere i dadi della pressa trasportabile e cuocere in forno per un'ora a 100°C. Lasciare raffreddare la pressa, estrarre il pannello e lasciarlo asciugare naturalmente all'aria fino a completa essiccazione.

S012: come pannello S011 ma con fine corsa posizionati a 3,1 cm, forza esercitata di 735N per una pressione di 1.250 Kg/m^2.

S013: come pannello S011 ma con fine corsa posizionati a 4,7 cm, forza esercitata di 147N per una pressione di 250 Kg/m^2.

RISULTATI

Si premette che prima della composizione dei quattro campioni realizzati, sono stati sperimentati e prodotti ulteriori pannelli, al fine di valutare le variabili riguardanti la pressa, i fine corsa e la cottura. Il pannello S010 è stato prodotto con la volontà di mostrare la differenza che comporta l'applicazione della pressione, per il controllo della densità, a parità di rapporto nella miscela, come illustrato nella tabella 1. Infatti questo pannello è stato generato senza l'applicazione di pressione: è dotato di coesione fra le fibre ma non è in grado di sorreggere la massa propria per via della rigidità troppo bassa. All'estremo opposto si colloca invece il pannello S011, prodotto con una pressione decisamente elevata, che ha dato origine a un vero e proprio pannello rigido con una densità di 372 Kg/m^3. Tra i due pannelli estremi sono stati composti altri due pannelli con densità e pressioni intermedie, i quali presentano ottime caratteristiche di coesione e rigidità: risultano ottimali per essere utilizzati come pannelli fonoassorbenti in ambienti interni. Tuttavia solo i test acustici successivi potranno confermare o smentire quanto affermato. Emerge come nei pannelli successivi all' S010, il quantitativo di colla utilizzato sia aumentato di una quantità minima poiché, all'interno del processo produttivo impiegato, è stata individuata una dispersione

fra le varie fasi.
A conclusione di questo capitolo verranno scelti i due campioni, di questa serie, per essere sviluppati in camera riverberante. Ne consegue che per ogni pannello scelto ne dovranno essere realizzati otto.
Si sottolinea che i quattro pannelli sperimentati sono stati realizzati ai fini di questo progetto, non si esclude la possibilità di generare ulteriori pannelli con densità minori, intermedie o anche superiori rispetto a quanto fatto in questa sperimentazione, semplicemente variando la pressione esercitata e l'altezza dei fine corsa della pressa trasportabile realizzata. Oppure diminuendo la percentuale di colla utilizzata, aumentando però il rapporto di compressione, al fine di ridurre le quantità di materia prima utilizzata, con possibili vantaggi in una ipotetica produzione a livello industriale.

	S010	S011	S012	S013
Fibra [g]	300	300	300	300
Colla [g]	300	330	330	330
Pressione [Kg/m^2]	-	10833	1250	250
Altezza [cm]	7,3	1,3	3,1	4,7
Peso medio [g]	319	290	296	330
Densità [Kg/m^3]	73	372	160	117

Tabella 1: Caratteristiche pannelli serie S, fibre di lana + colla di amido.

8.1.2 TECA PANEL SERIE P: FIBRE E POLVERI + POLIMERI

Come nella serie S, anche in questa, prima della realizzazione dei pannelli, sono stati effettuati dei campioni per verificare il comportamento delle nuove fibre utilizzate. La preparazione di tali campioni è basata sulla ricetta utilizzata per la serie A, paragrafo 6.2.2.

INGREDIENTI

- *Fibre corte e polveri scartate dal Feltrifio Biellese, 100% lana* (vedi paragrafo 4.2.2).
- *Polimeri termoindurenti: polvere di poliestere scartata dalla Verniciatura Sassone* (vedi paragrafo 5.2.2, 5.1 e scheda tecnica, allegato B).

PREPARAZIONE

La composizione fra le due materie sfrutta il diverso punto di fusione fra i due componenti: a circa 180°C il polimero arriva al punto di polimerizzazione, mentre la lana non subisce alcun degrado. Il polimero fuso funge da collante fra le fibre, e, una volta raffreddato solidifica, divenendo la matrice rigida del prodotto.
Mescolare le due materie prime attraverso un Moulinex tritatutto per 10 secondi, comporre il campione all'interno del cassero in alluminio e cuocere il composto, in base allo specifico provino. Lasciare raffreddare ed estrarlo dal cassero.

P001: fibre + scarti polimerici con rapporto 1:0,5 (10g:5g). Tritare il composto per 10 secondi con Moulinex tritatutto 700W e formare il campione all'interno del cassero compattandolo a mano. Cottura nel cassero, senza pressione, in forno elettrico, non preriscaldato, a 180°C per 25 minuti.

P002: come P001 ma con rapporto 1:0,7 (10g:7g) e compattato con una massa di 0,7Kg all'interno del cassero.

P003: come P001 ma cottura con una pressione di 220 Kg/m^2.

RISULTATI

Anche in questa seconda serie i provini prodotti, risultano direttamente confrontabili con quelli realizzati con scarti Reda, a conferma sia dell'ottimizzazione del processo, sia del fatto che tali fibre possano funzionare e ambire ad ottimi risultati. Anche in questo caso possiamo tuttavia, trovare delle differenze rispetto alle fibre Reda. Come nella serie S queste fibre possono essere utilizzate senza processi iniziali, comportando un notevole vantaggio. Unite ai polimeri, sembrano avere una coesione minore, ma dai risultati emersi dai primi campioni sembra non comportare nessun problema. Infatti è stato possibile abbassare il rapporto reale fino a 1:0,5. Il rapporto effettivo rimane per questi motivi minore, 1:0,4 per il primo campione e circa 1:0,5 per i campioni successivi. Si confermano invece tutte le caratteristiche emerse nella fase di sperimentazione dei campioni

della serie S: l'ottima lavorabilità e coesione, superiore alle fibre scartate da Reda, si può ricondurre a una fibra più grezza, meno lavorata, con un diametro maggiore, mentre l'aumento della resistenza meccanica e della rigidità alla presenza di filamenti di paglia.

PANNELLI

Anche per questa serie, dopo aver verificato la fattibilità del processo utilizzando questa nuova tipologia di scarto, il passo successivo è la composizione di pannelli 20x30 per i successivi test acustici. In questo caso il rapporto fibra-polimero è stato fissato a 1:0,5 lasciando il controllo della densità alla pressione e all'altezza del prodotto. Tuttavia a causa della dispersione durante il processo, il rapporto effettivo risulterà minore, 1:0,4 circa.

INGREDIENTI:

- *Fibre corte e polveri scartate dal Feltrifio Biellese, 100% lana* (vedi paragrafo 4.2.2).
- *Polimeri termoindurenti: polvere di poliestere scartata dalla Verniciatura Sassone* (vedi paragrafo 5.2.2, 5.1 e scheda tecnica, allegato B).

PREPARAZIONE:

Il processo di preparazione è il medesimo utilizzato per la serie A e per i campioni della serie P, ma adattato alle nuove quantità. Le due materie prime vengono unite secondo il rapporto stabilito (figura 12) e tritate con una lama quadrupla azionata da un trapano elettrico (figura 13), suddividendole in parti più piccole per agevolare il processo. Inserire il composto all'interno della base della pressa trasportabile (figura 14), regolare i fine corsa e chiudere con il coperchio. Applicare la forza necessaria (figura 16) e chiudere i dadi fino a battuta. Mettere la pressa trasportabile nel forno e cuocere il composto a 180°C per 30 minuti (figura 15). Lasciare raffreddare la pressa per circa 15 minuti ed estrarre delicatamente il pannello finito.

Figura 12: Unione del polimero alle fibre di lana prima di essere mescolate.

Figura 13: Composto fibre + polimeri pronto per essere inserito all'interno della pressa.

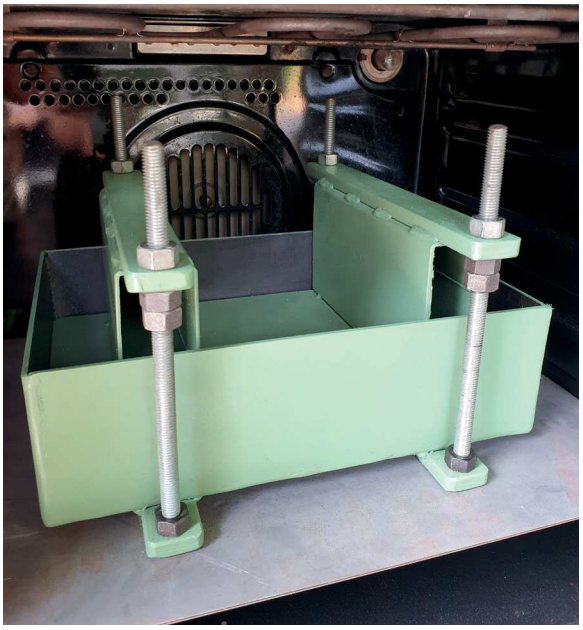


Figura 15: Trattamento termico del composto, all'interno della pressa, con adeguata pressione.

Figura 14: Composto adagiato all'interno della pressa trasportabile.

Figura 16: Particolare, manometro pressione del circuito dell'olio, pressa industriale. Per mezzo di questo dato, insieme all'alesaggio del cilindro (98 mm) e al diametro dello stelo (60 mm), è possibile calcolare la forza in spinta (N), durante l'applicazione sulla pressa trasportabile.

P011: fibre + scarti polimerici con rapporto 1:0,5 (120g:60g). Tritare il composto in parti più piccole per un minuto, attraverso l'utilizzo di una quadrupla lama sfalsata azionata da un trapano elettrico. Unire le parti e posizionarle all'interno del cassero, quindi chiudere la parte superiore con il coperchio della pressa trasportabile e regolare i fine corsa a 3 cm. Mediante la pressa esercitare una forza di 196N per una pressione sul provino di 333 Kg/m^2. Chiudere i dadi della pressa trasportabile e cuocere in forno per 30 minuti a 180°C. Lasciare raffreddare la pressa ed estrarre il pannello così terminato.

P012: come pannello P011 ma con fine corsa posizionati a 1,2 cm, forza esercitata di 735N per una pressione di 1.250 Kg/m^2.

P013: come pannello P011 ma con fine corsa posizionati a 4,5 cm, forza esercitata di 50N per una pressione di 83 Kg/m^2.

P014: come pannello P011 ma con fine corsa posizionati a 2,1 cm, forza esercitata di 392N per una pressione di 666 Kg/m^2.

P015: questo pannello, come esplicitato nelle successive conclusioni, nasce con la volontà di generare un prodotto con la stessa densità e la stessa altezza del pannello S012, al fine di permettere un confronto diretto nei test acustici in camera riverberante. I fine corsa sono quindi stati calibrati ad un'altezza di 3,1 cm. Siccome la densità e il volume sono noti l'unica variabile da ricavare è la quantità di materiale: 0,00186 m^3 x 160 Kg/m^3 = 0,297 Kg. Tuttavia, in base all'esperienza, in seguito alla cottura si ha una perdita di massa del 10%, che comporta quindi un aumento della quantità del materiale: 222g di fibre + 111g di polimeri (rapporto 1: 0,5). La pressione in questo caso non è più un dato fondamentale, poiché tutto è già predisposto per arrivare a comporre il pannello secondo le caratteristiche ricercate. Tuttavia la pressione utilizzata è di 833 Kg/m^2 corrispondente a una forza esercitata di 490N.

RISULTATI

Per la composizione di questa serie di pannelli, sono state effettuate svariate prove non menzionate, con il fine di migliorare il processo e la gestione di tutte le variabili annesse. Grazie all'impiego di queste fibre e all'utilizzo della pressione il rapporto reale fibra-polimeri è sceso fino a 1:0,5 avendone uno effettivo minore. Questo dato è di assoluta rilevanza poiché nel caso in cui questa tipologia di polimero fosse sostituita da un polimero biodegradabile, e dunque con un costo indubbiamente incisivo, una percen-

tuale minore costituirebbe anche un vantaggio economico. Non si esclude la possibilità di diminuire la quantità del polimero, aumentando tuttavia la pressione esercitata sul pannello. In questa serie sono stati composti dei pannelli con un ampio range di densità, ognuno dei quali ha caratteristiche di coesione e rigidità, anche alle densità più basse (tabella 2). Anche in questo caso, come nella serie precedente, non si esclude la formazione di pannelli di densità minori, intermedie o anche maggiori rispetto a quelli realizzati.
Si sottolinea infine come la produzione di pannelli serie P, rispetto a quelli della serie S, sia notevolmente più gestibile, sia a livello di processo, per via delle minori variabili, sia a livello di mixdesign grazie all'utilizzo dei polimeri.

	P011	P012	P013	P014	P015
Fibra [g]	120	120	120	120	222
Polimero [g]	60	60	60	60	111
Pressione [Kg/m^2]	333	1250	83	666	833
Altezza [cm]	3	1,2	4,5	2,1	3,1
Peso medio [g]	169	147	156	164	310
Densità [Kg/m^3]	94	204	58	130	166

Tabella 2: Caratteristiche pannelli serie P, fibre di lana + polimeri termoindurenti (poliestere).

8.2 RISULTATI E CONCLUSIONI DELLA SPERIMENTAZIONE B

In questa fase non verranno elencati quelli che sono i risultati ottenuti dalla serie S e dalla serie P, poiché essi sono già stati esplicitati alla fine di ogni serie composta. Verranno invece effettuate delle valutazioni e definita la scelta dei pannelli da realizzare per i test in camera riverberante del capitolo successivo.

La scelta delle polveri scartate dal Feltrificio Biellese si è rivelata una scelta vincente: grazie a questo particolare scarto è stato possibile effettuare una serie di pannelli rigidi a diverse densità con diverse matrici. Non si esclude la possibilità di generare pannelli comparabili anche con gli scarti forniti dal Lanificio Reda, ma all'interno di questa sperimentazione non è stato possibile, come emerge nell'evoluzione a inizio capitolo. Interessante sarebbe un confronto tra queste due fibre, o ancor di più realizzare dei pannelli creando un mixdesign composto dalle diverse polveri, prodotte in quantità elevatissime, derivanti da tutto il territorio biellese. Infatti con le sole prodotte dal Feltrificio Biellese e dal Lanificio Reda non sarebbe possibile una reale produzione di tali pannelli, poiché (come emerge nella valutazione economica, capitolo 11) sarebbero necessarie quantità superiori, estendendo quindi la fornitura sull'intera area, la quale produce circa 15.000.000 Kg/anno.

Si sottolinea che i pannelli prodotti in dimensioni 20x30 cm non rappresentano la forma definitiva di TECA panel, ma solo il formato per comporre un pannello di dimensioni maggiori per le misure acustiche. La forma, la dimensione e il design, verranno discusse, in breve, nel paragrafo 13.1: TECA panel non rappresenta un unico prodotto, ma un materiale in grado di adattarsi alle diverse esigenze, con diverse densità, in base alla tipologia e al campo di applicazione.

Mettendo a confronto le serie appena discusse emergono delle differenze sostanziali nel processo produttivo. I pannelli prodotti nella serie P, in seguito al trattamento termico e al conseguente raffreddamento, possono essere estratti senza particolari problematiche; essi hanno raggiunto stabilità e possono essere direttamente utilizzabili. I pannelli appartenenti alla serie S invece, una volta estratti dal forno, risultano ancora non coesi ed estremamente fragili: devono essere estratti e maneggiati con cautela. Successivamente devono ancora subire una fase di asciugatura, naturale o nel forno (o essiccatoio), la quale richiede un processo aggiuntivo e tempistiche dilatate. Non sarebbe possibile, lasciarli essiccare all'interno della pressa, poiché quest'ultima non permetterebbe all'acqua contenuta di evaporare.
I pannelli generati con i polimeri, una volta terminato il ciclo di produzione, risultano rispettare con esattezza le caratteristiche richieste per questa tipologia, dimensioni, altezza, massa e densità. I pannelli formati con l'utilizzo della colla di amido invece, finita la produzione non risultano stabili dimensionalmente, portando a non poche difficoltà nella fase di progettazione e in quelle di esecuzione.

Un altro elemento emerso durante la produzione è la forte influenza sui pannelli dell'umidità esterna: questa particolare sensibilità è una proprietà tipica della lana. Essa infatti è una fibra igroscopica è quindi soggetta all'assorbimento delle molecole d'acqua presenti nell'ambiente. Tuttavia tale proprietà potrebbe eventualmente essere sfruttata a proprio vantaggio, al fine di permettere un controllo igrometrico dell'ambiente di applicazione.
Questo è rilevabile soprattutto nella serie S, dove è possibile evidenziare una variazione dell'umidità di circa il 7 % sulla massa complessiva di ogni pannello, equivalente a circa 20g. Apparentemente nella serie P il prodotto sembra essere meno soggetto a questa variabile, ma ciò dipende solo dal minor quantitativo di lana utilizzato. Infatti anche i pannelli di questa serie, sono soggetti a una variazione di circa il 7% sul totale. Questo conferma la tesi, secondo la quale è la lana

a determinare la variazione della massa del pannello, per via della sua sensibilità all'acqua. Infatti nelle figure 1 e 2 la massa, e di conseguenza la densità, sono espresse come valori medi, calcolati nell'arco della giornata, per una sequenza di 10 giorni.

Con entrambe le matrici utilizzate, è possibile realizzare dei pannelli dotati di rigidità e coesione. Risulta nuovamente il polimero quello che potrebbe permettere una variazione di densità maggiore, senza variare il rapporto fibra-polimero, ma semplicemente agendo sulla pressione. Grazie a quest'ultimo è possibile scendere a basse densità, mantenendo comunque un'ottima struttura, a differenza dei pannelli realizzati con la colla, dove al di sotto di determinate densità il pannello perde di rigidità, mantenendo solo un minimo di coesione. Si ricorda che in questa sperimentazione l'aggregazione è un fattore fondamentale, poiché, a differenza dei pannelli anche riciclati reperibili in commercio, prodotti con fibre di lunghezza adeguata, vengono utilizzati dei rifiuti a base di polvere e di lana, la cui coesione risulta complessa, soprattutto utilizzando basse densità e basse percentuali di collante.

Figura 17: Otto pannelli, tipologia S011.

Figura 18: Otto pannelli, tipologia S012.

Figura 19: Otto pannelli, tipologia P012.

Figura 20: Otto pannelli, tipologia S015.

A questo punto diventa fondamentale compiere una scelta sui pannelli da produrre per effettuare le misure acustiche in camera riverberante.
A seguito di un confronto con i relatori di questo progetto, sono stati definiti due pannelli appartenenti alla serie S e due pannelli per la serie P. In particolare sono stati scelti quelli con la dimensione minima ottenuta S011 e P012, i quali verranno testati sia come pannelli sia come baffles[1], con un'idea di proof of concept. E' stato inoltre selezionato, per via delle caratteristiche ottenute, il pannello S012. Al fine di effettuare un confronto diretto fra le due serie, a parità di altezza e di densità è stato realizzato il pannello P015.

Per ognuna delle quattro scelte effettuate, sono stati composti otto pannelli di dimensioni 20x30 cm (per un totale di 32 pannelli), per creare, in fase di misurazione acustica, un pannello unico 60x80cm (figure 17, 18, 19, 20). La produzione di otto pannelli per ogni serie, risulta interessante per verificare la riproducibilità della ricetta su cui si basano e le eventuali variazioni riscontrate.

1_Particolare tipologia di disposizione per i pannelli fonoassorbenti: posati a soffitto con posizionamento verticale. Questa tipologia di design permette di raddoppiare l'assorbimento, poiché consente l'esposizione di entrambe le facce del pannello.

Al fine di evitare gli effetti dovuti all'ultima variabile riscontrata, quella relativa all'umidità della lana, è stato deciso di mettere la lana in forno per 45 minuti a 50°C prima di ogni utilizzo. Infatti la variazione di massa non è stata riscontrata solo nel pannello finito ma anche nella lana prima dell'utilizzo, dopo un controllo continuo per un giorno.

In seguito all'intenso processo produttivo degli otto pannelli concordati, è possibile stabilire alcuni effetti derivanti dalla produzione di più pannelli della stessa tipologia. In entrambe le quattro soluzioni si è verificata una variazione di massa, fra pannelli della stessa tipologia, di circa il 5%. Questa variazione, per via dei processi e delle possibilità concesse da questo progetto, si ritiene accettabile; essa può trovare giustificazione nelle instabilità atmosferiche, nonché nelle diverse fasi di produzione, poiché nonostante la gestione ottimale, alcune variabili, come piccole quantità di dispersione del materiale nelle attrezzature, non possono essere controllate. Anche la gestione dell'altezza, nella serie S, come anticipato, è soggetta ad alcune differenze, tuttavia ritenute tollerabili, mentre per i pannelli della serie P, l'altezza risulta esattamente quella stabilita. Nella tabella 3 vengono riportati i dati ricavati sulla media degli otto pannelli realizzati per ciascuna tipologia. Si può notare come i pannelli S012 e P015 abbiano le medesime caratteristiche come preventivato, discostandosi tuttavia dal campione di origine, in funzione di una massa media leggermente superiore. Anche i pannelli S011 risultano con una massa media superiore al pannello dal quale derivano, mentre nei pannelli P012 è stata aumentata l'altezza per allinearsi con quelli dei campioni S011.

	Fibra [g]	Collante [g]	Pressione [Kg/m^2]	Altezza media [cm]	Peso medio [g]	Densità media [Kg/m^3]
8 pannelli x S011	300	330	10833	1,3	320	410
8 pannelli x S012	300	330	1250	3,1	315	169
8 pannelli x P012	120	60	1250	1,3	155	200
8 pannelli x P015	222	111	833	3,1	315	169

Tabella 3: Caratteristiche ricavate sulla base della media degli 8 pannelli per ogni singola tipologia scelta per le misure in camera riverberante.

9

MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN CAMERA RIVERBERANTE IN SCALA

- Duval A. , *et. al, Diffuse field absoption coefficient simulation of porous materials in small reverberant rooms: finite size and diffusivity issues,* Hal, 2010, pp. 12–16.
- Latorella F. , *Validazione delle misure dell'assorbimento acustico in base alla ISO-354 in una camera riverberante in scala*, Politecnico di Torino, 2018, pp.10-115.
- Spagnolo R. , *Acustica*, fondamenti e applicazioni, Utet, 2015.

- http://www.fonoisolamento.it/, consultato il 30/08/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

9.1 INTRODUZIONE SUL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

Sulla base dei risultati ottenuti durante la sperimentazione B (capitolo 8) sono stati sviluppati, selezionati e composti dei pannelli con il fine di poterne verificare le rispettive performance acustiche in camera riverberante.

Come introdotto nel paragrafo 2.2, il coefficiente di assorbimento può essere ottenuto mediante due metodi: la misura nel tubo di impedenza (tubo di Kundt) e la misura in camera riverberante. Nel primo caso le onde arrivano perpendicolari alla superficie esposta (figura 1), questo metodo risulta quindi utile nelle fasi di prototipazione, poiché può essere applicato su piccoli campioni in fase di proof of concept; nel secondo caso invece gli angoli di incidenza sono casuali ed equamente distribuiti sulla superficie (figura 1). Per questo motivo, considerando il fatto che le misure su un piccolo campione possono non rispecchiare il comportamento a dimensioni più grandi, a seconda del metodo utilizzato, si possono ottenere risultati che differiscono anche in modo significativo. Tuttavia i dati più affidabili sono quelli forniti dalla camera riverberante poiché risultano più vicini ai campi sonori incontrati nelle applicazioni reali [1].

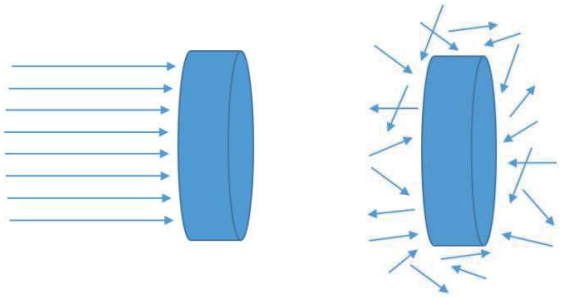


Figura 1: Incidenza normale a sinistra, incidenza casuale a destra, Latorella F., 2018 op. cit.

"Una camera riverberante è definita come una stanza in cui si ricrea un campo sonoro diffuso ed uniforme. Questo significa che le onde sonore si propagano in qualsiasi direzione ed in qualsiasi momento con uguale probabilità, quindi il campo sonoro è lo stesso ovunque" [2].

L'energia sonora all'interno di un ambiente può creare dei modi acustici, ossia onde stazionarie con lunghezza d'onda confrontabili a quelle delle dimensioni della camera. Essi sono di tre tipi: modi assiali, in cui le onde colpiscono due superfici opposte, modi tangenziali, nel caso colpiscano quattro superfici e modi obliqui, su sei superfici. La frequenza di risonanza, in una situazione di camera rettangolare può essere ottenuta come [3]:

$$f_{(x,y,z)} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{W}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2}$$

1,2_Spagnolo R., 2015, op. cit.
3_Latorella F., 2018, op. cit.

dove *c* coincide con la velocità del suono [m/s]; $f_{(x,y,z)}$ è la frequenza di risonanza naturale [Hz] dei modi n_x, n_y, n_z; *L, W, H* corrispondono rispettivamente alla lunghezza, alla larghezza e all'altezza [m] della stanza.

Risulta fondamentale una distribuzione omogenea delle frequenze modali per ottenere un campo sonoro diffuso, in particolare per camere riverberanti in scala dove la condizione si può amplificare. E' sufficiente rispettare alcuni requisiti geometrici fondamentali: evitare pareti parallele, e progettare la camera in modo tale da non avere un numero intero ottenuto tra il rapporto delle dimensioni interne.

Una camera riverberante è dotata di alcuni parametri caratteristici, il primo è la frequenza di taglio [Hz], che "identifica la frequenza oltre la quale la camera, in base al suo volume, ha il potenziale per essere diffusa" [4] :

$$f_{min} = \frac{c}{\left(\frac{V}{4}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

in cui *c* è la velocità del suono [m/s] e *V* il volume della stanza [m^3].

Il secondo parametro è la frequenza di Schroeder, frequenza sopra la quale i modi iniziano a raggrupparsi e non sono più rappresentati come picchi risonanti, quindi oltre tale frequenza il campo sonoro è considerato diffuso[5]:

$$f_s = \frac{4c}{(\pi A)^{0.5}} - \frac{S_r}{16V}$$

dove *A* è l'assorbimento della stanza, *Sr* è la superficie totale della stanza [m^2], *c* è la velocità del suono [m/s] e *V* il volume della stanza [m^3].
Si nota come f_s sia superiore a f_{min}, è dunque possibile scrivere l'equazione equivalente[6]:

$$f_s \geq 2000 \left(\frac{T}{V}\right)^{0.5}$$

dove *T* è il tempo di riverberazione [s] e *V* il volume della stanza [m^3].
Come emergerà in seguito, l'assorbimento acustico alle diverse frequenze, prevede la misura dei tempi di riverberazione prima e dopo il posizionamento del pannello all'interno della camera; il campione aggiunge un assorbimento interno alla camera e quindi riduce il tempo di riverberazione[7].

4,5,6,7_Latorella F., 2018, op. cit.

9.2 LA CAMERA RIVERBERANTE IN SCALA DEL POLITECNICO DI TORINO (DENERG)

L'utilizzo e il diffondersi negli ultimi anni di camere riverberanti in scala, deriva dal principale vantaggio di poter analizzare campioni di dimensioni minori rispetto ai 10/12 m^2 richiesti dalla ISO 354, senza perdere tuttavia l'incidenza diffusa del metodo. Presentano però alcuni limiti: la mancanza di diffusività del campo acustico (soprattutto alle frequenze medio-basse) e la diffrazione dovuta alla dimensione finita del materiale analizzato[8].

Per le misure dell'assorbimento acustico relativo ai pannelli realizzati è stata utilizzata la camera riverberante in scala del DENERG (Dipartimento di Energia) del Politecnico di Torino, figure 2,3,4.
Si tratta di una riproduzione in scala 1:5 della camera riverberante dell'INRiM di Torino, è composta da pannelli di MDF (Medium density fibreboard) di 3,8 cm di spessore, con dimensioni medie di 1,53 x 1,56 x 1,20 m e un volume medio di 2,85 m^3. Le pareti non sono parallele, ma risultano leggermente inclinate al fine di ricreare un campo diffuso (vedi figura 2).

La base è rialzata rispetto al pavimento attraverso una struttura in legno, che consente il

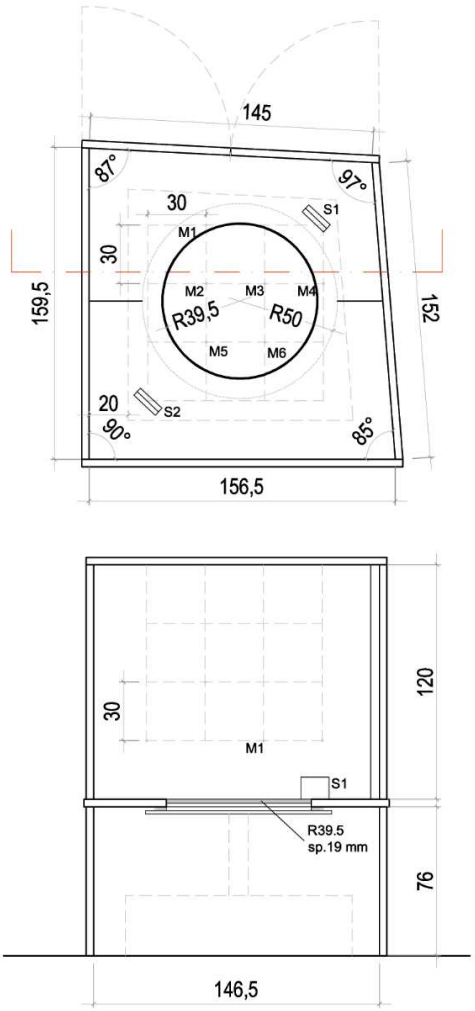


Figura 2: Pianta e prospetto camera riverberante, quote in cm. DENERG, Latorella F., 2018 op. cit.

posizionamento di una piattaforma rotante (e del relativo motore), per effettuare le misure di scattering.

Al soffitto sono stati applicati dei ganci per appendere i diffusori ed effettuati dei fori

8_Duval A., 2010, op. cit.

Figura 3: Vista esterna camera riverberante DENERG.

Figura 5: Sorgente dodecaedrica omnidirezionale ITA.

Figura 4: Vista interna camera riverberante DENERG.

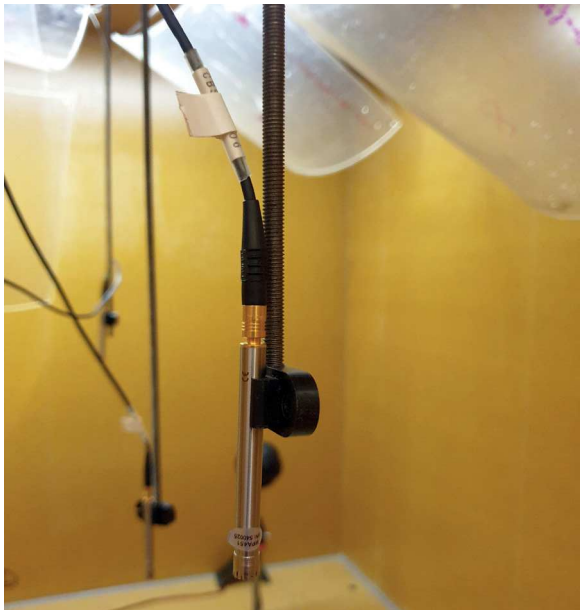


Figura 6: Microfono a condensatore omnidirezionale da 1/4 di pollice.

filettati disposti a maglia quadrata 4x4, in modo da poter posizionare i microfoni, mediante l'utilizzo di una barra filettata in ferro avente una lunghezza di 30 o 60 cm.

Gli studi sulla camera hanno rivelato come l'assorbimento sia dipendente dalle condizioni ambientali: in particolare come l'area equivalente di assorbimento (A_1), dipenda dal materiale della camera stessa e quindi dalla relativa umidità, che a sua volta varia in funzione delle condizioni ambientali esterne (umidità relativa e temperatura).

Il software utilizzato per le misurazioni è Matlab, unito all'ITA-Toolbox, un toolbox open source specifico per l'acustica, sviluppato dall'Istituto di acustica tecnica della Aachen University.
Il segnale digitale, costituito da uno sweep esponenziale da 100 Hz a 25.000 Hz , viene inviato ad un convertitore analogico-digitale e quindi amplificato ed emesso attraverso la sorgente sonora. I sei microfoni registrano l'audio e il segnale registrato viene inviato al computer. Come richiesto dalla norma (ISO 354) la registrazione del segnale avviene per due posizioni della sorgente (figura 5) e sei posizioni dei microfoni (figura 6), per un totale di dodici misure. Il segnale di uscita viene filtrato a bande di un terzo di ottava per riuscire ad ottenere le curve di decadimento energetico.

Le misure vengono eseguite valutando i parametri ambientali all'interno della camera poiché essi influiscono sul coefficiente di attenuazione della potenza. La temperatura e l'umidità vengono valutate attraverso un dispositivo installato all'interno della camera e collegato direttamente al computer, mentre la pressione atmosferica è ricavata in tempo reale in funzione dei dati forniti dall'INRiM" [9].

9_Latorella F., 2018, op. cit.

9.3 LA MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO

La misura del coefficiente di assorbimento acustico in camera riverberante è normata dalla UNI EN ISO 354:2003 e dalla ASTM C243-17. Entrambe richiedono un volume interno della camera di almeno 200 m^3, una dimensione del campione di 10/12 m^2 per la ISO 354 e di 5,5/6,7 m^2 per la ASTM C243.

In questo progetto verrà seguita la UNI EN ISO 354:2003, attraverso l'utilizzo della camera riverberante in scala, presentata nel paragrafo precedente.

Come precisato viene emesso uno sweep esponenziale da 100 Hz a 25.000 Hz e, come richiesto dalla norma, la registrazione del segnale avviene per due posizioni della sorgente e sei posizioni dei microfoni, per un totale di dodici misure.
Il segnale di uscita viene filtrato a bande di un terzo di ottava per riuscire ad ottenere le curve di decadimento energetico.

Il legame tra la risposta all'impulso e il tempo di riverberazione è stato studiato da Schroeder, fornendo attraverso un integrale la curva di decadimento del tempo di riverberazione.
Poiché nelle bande ad alta frequenza le riflessioni si estinguono in minor tempo, non è possibile utilizzare un decadimento di 60 dB, per questo si considera un tempo di riverberazione di 15dB, in particolare da -5 dB a -20 dB.

E' possibile quindi calcolare il tempo di riverberazione medio a stanza vuota, T_1, e quello relativo alla stanza con al suo interno il campione oggetto di misura, T_2.

Utilizzando i tempi di riverberazione è possibile calcolare attraverso la formula di Sabine (capitolo 2), l'area equivalente di assorbimento acustico [m^2], della stanza vuota, come da normativa:

$$A_1 = \frac{55.3\,V}{cT_1} - 4Vm_1$$

dove:
V: volume della stanza riverberante [m^3];
c: velocità di propagazione del suono nell'aria [m/s];
T_1: tempo di riverberazione della stanza vuota [s];
m_1: coefficiente di attenuazione della potenza, calcolato secondo ISO 9613-1 utilizzando le condizioni climatiche interne alla stanza durante la misurazione:

$$m = \frac{\alpha_A}{10\log(e)}$$

L'area equivalente di assorbimento acustico contenente il campione [m^2] viene valutata come:

$$A_2 = \frac{55.3\,V}{cT_2} - 4Vm_2$$

dove:
V: volume della stanza riverberante [m^3];
c: velocità di propagazione del suono nell'aria [m/s];
T_2: tempo di riverberazione della stanza con il campione [s];
m_2: coefficiente di attenuazione della potenza.

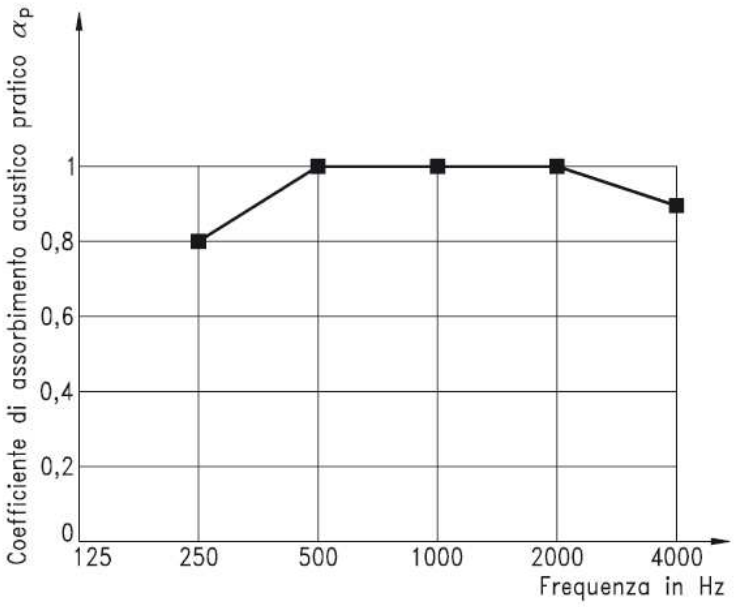
L'area equivalente di assorbimento sonoro del campione [m^2], viene ottenuta come differenza di A_1 e A_2:

$$A_T = 55.3V\left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1}\right) - 4V(m_2 - m_1)$$

Da questo valore è possibile ricavare il coefficiente di assorbimento del campione, dividendolo per la sua superficie [m^2], come esplicitato nella ISO 354:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

Secondo questa metodologia, attraverso gli strumenti descritti nel paragrafo precedente



Frequenza	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Valore	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90

Figura 7: Curva di riferimento per il calcolo del coefficiente di assorbimento α_w.

è possibile ottenere il coefficiente di assorbimento acustico, i valori per bande di terzo di ottava dei diversi campioni ed effettuare quindi le relative valutazioni.

A questo punto si introduce la normativa UNI EN ISO 11654:1998 che consente di convertire i valori di assorbimento acustico in un unico valore (α_w) al fine di rendere possibile un confronto diretto delle proprietà fonoassorbenti, secondo una normativa internazionale.

Il primo passo consiste nel calcolare il coefficiente di assorbimento acustico pratico (α_{pi}), per ciascuna banda di ottava, come media aritmetica dei tre coefficienti di assorbimento acustico per bande di terzo di ottava:

$$\alpha_{pi} = \frac{(\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3})}{3}$$

E' quindi possibile calcolare α_w, partendo dalla figura 7 di riferimento: "essa deve essere traslata per passi di 0,05 verso il valore misurato, fino a quando la somma degli scostamenti sfavorevoli sia minore o uguale di 0,10. A una determinata frequenza, uno scostamento è sfavorevole quando il valore misurato è minore del valore della curva di riferimento. Devono essere considerati nel conteggio solo gli scostamenti nella direzione sfavorevole. Il coefficiente di assorbimento acustico ponderato α_w viene definito come il valore della curva di riferimento traslata a 500 Hz" [10].

10_Latorella F., 2018, op. cit.

9.4 LA MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO DI TECA PANEL IN CAMERA RIVERBERANTE

Secondo la metodologia per la misura e il calcolo del coefficiente di assorbimento esposta nel paragrafo precedente, e grazie alla strumentazione presentata nel paragrafo 9.2 vengono ora valutate le performance acustiche dei pannelli di progetto realizzati e illustrati nel capitolo 8.

La camera riverberante in scala del Politecnico di Torino, richiede, per avere dei risultati attendibili, che ciascun pannello presenti delle dimensioni di circa 60x80 cm. A tale fine, a scopo esemplificativo, sono stati composti 8 pannelli di dimensioni 20x30 cm, per ogni serie considerata, che sono stati poi uniti per formare il pannello delle dimensioni richieste.

Si riportano di seguito i dettagli dei pannelli oggetto di misura, composti e realizzati come descritto nel capitolo 8, all'interno della Sperimentazione B.

Pannello: S011

Composizione: polveri e fibre corte di lana + colla d'amido (rapporto 1:1)

Densità media: 410 Kg/m^3

Massa media: 320 g

Altezza media: 1,3 cm

Pannello: S012

Composizione: polveri e fibre corte di lana + colla d'amido (rapporto 1:1)

Densità media: 169 Kg/m^3

Massa media: 315 g

Altezza media: 3,1 cm

Pannello: P012

Composizione: polveri e fibre corte di lana + polimeri (rapporto 1:0,5)

Densità media: 200 Kg/m^3

Massa media: 155 g

Altezza media: 1,3 cm

Pannello: P015

Composizione: polveri e fibre corte di lana + polimeri (rapporto 1:0,5)

Densità media: 169 Kg/m^3

Massa media: 315 g

Altezza media: 3,1 cm

Pannello: Z000

Composizione: scarti tessili vari + resina sintetica

Densità media: 35 Kg/m^3

Altezza media: 3 cm

Al fine di permettere un confronto tra i risultati ottenuti dai pannelli realizzati, è stato riportato con la sigla Z000, un pannello fonoassorbente commerciale. Questo pannello è stato fornito dalla Sfilacciatura Negro s.r.l. (Verrone, Biella): viene realizzato utilizzando scarti tessili di varia tipologia, derivanti da aziende internazionali, in cui le fibre lunghe vengono coese grazie a una minima quantità di resina sintetica e da una pellicola applicata alla base. Esso è caratterizzato da una bassa densità è una buona coesione fra le fibre, viene venduto in rotoli, in particolare per l'utilizzo all'interno di intercapedini e viene impiegato soprattutto, nel settore dell'automotive.

I pannelli sono dunque stati posizionati all'interno della camera secondo le figure riportate in seguito (figure dalla 8 alla 19). Inoltre nella tabella 1 vengono mostrati i dati relativi alla temperatura, umidità relativa e area effettiva del pannello per ogni misura eseguita.
Come emerge dalle foto e dalla tabella sono state effettuate diverse configurazioni:

- misure A,B,C,D,E,N analisi dei pannelli, adagiati nella camera (rispettivamente figure 9,10,11,12,19), avendo cura di calcolare l'area anche dei bordi di ciascun pannello realizzato;

- misure G, H analisi dei pannelli con un airgap di 5 cm, attraverso l'utilizzo di un telaio posizionato tra camera e pannelli (figure 13,14,15);

- misure I,L,M analisi dei pannelli con una configurazione a baffles, (figure 16,17,18), in cui l'area è quella riferita al telaio in legno posizionato alla base.

In merito alle ultime misure, per via delle dimensioni della camera non idonee a tale configurazione, i risultati e le valutazioni sono state fatte sotto un'ottica di proof of concept. La base in legno realizzata permette un interasse dei pannelli di 24 cm e dunque minore dell'altezza degli stessi (20 cm) consentendo il funzionamento del sistema.

La misura A, con camera vuota è indispensabile per il calcolo di A_1 (ISO 354) al fine di valutare l'assorbimento effettivo dei pannelli. Il medesimo ragionamento vale anche per le misure F e I, nelle quali anziché effettuare la misura con camera vuota, sono stati inseriti (per il calcolo di A_1) rispettivamente la cornice e il telaio in legno, sui quali verranno in seguito montati i pannelli per il calcolo di A_2.

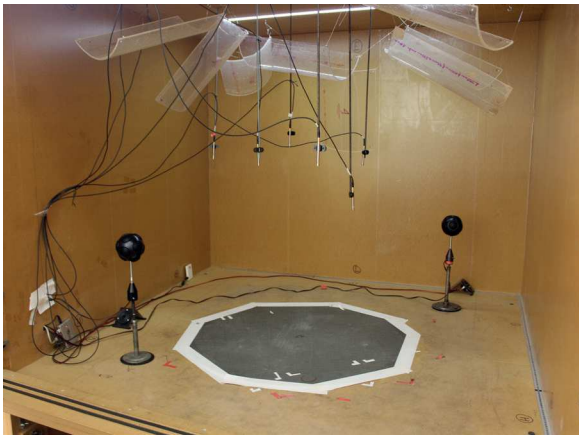


Figura 8: Misura A: camera vuota.

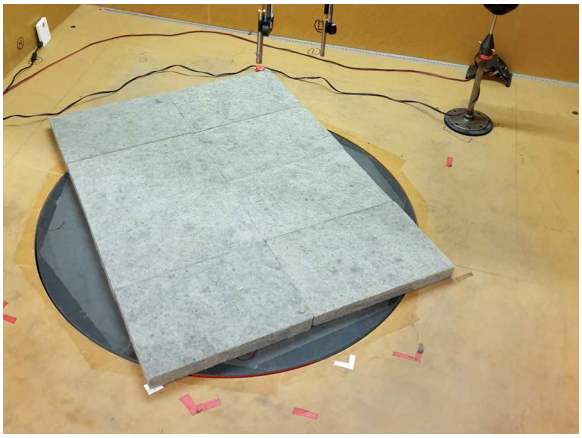


Figura 9: Misura B: P015.

Figura 10: Misura C: P012.

Figura 11: Misura D: S012.

Figura 12: Misura E: S011.

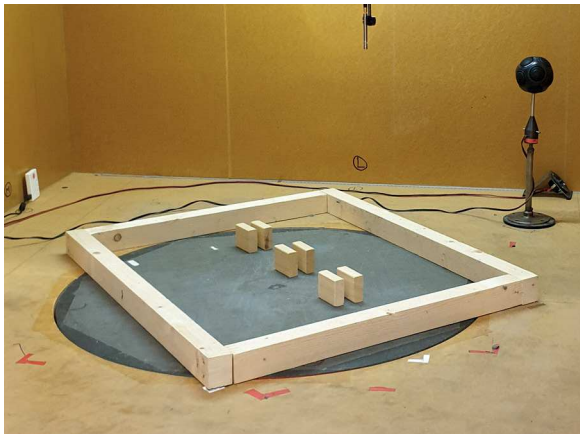


Figura 13: Misura F: cornice in legno.

Figura 14: Misura F: P012 air-gap 5 cm.

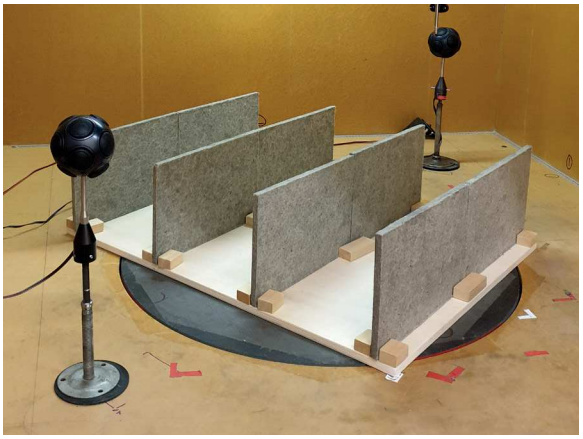


Figura 17: Misura L : P012 baffles.

Figura 15: Misura H: S011 air-gap 5 cm.

Figura 18: Misura M: S011 baffles.

Figura 16: Misura I: telaio baffles in legno.

Figura 19: Misura N: Z000.

		Temp. [C]	U.R.	Area
Misura A:	Camera vuota	29,3 °C	56 %	
Misura B:	P015	29,4 °C	57 %	0,57 m^2
Misura C:	P012	29,7 °C	58 %	0,52 m^2
Misura D:	S012	29,6 °C	57 %	0,57 m^2
Misura E:	S011	29,9 °C	58 %	0,52 m^2
Misura F:	Cornice in legno 5 cm	29,9 °C	55 %	
Misura G:	P012 air-gap 5 cm	29,8 °C	59 %	0,52 m^2
Misura H:	S011 air-gap 5 cm	29,9 °C	58 %	0,52 m^2
Misura I:	Telaio baffles in legno	30,0 °C	56 %	0,48 m^2
Misura L:	P012 baffles	29,9 °C	55 %	0,48 m^2
Misura M:	S011 baffles	29,9 °C	55 %	0,48 m^2
Misura N:	Z000	25,5 °C	48 %	0,53m^2

Tabella 1: Misure effettuate e relative caratteristiche: temperatura e umidità relativa all'interno della camera e area effettiva del pannello.

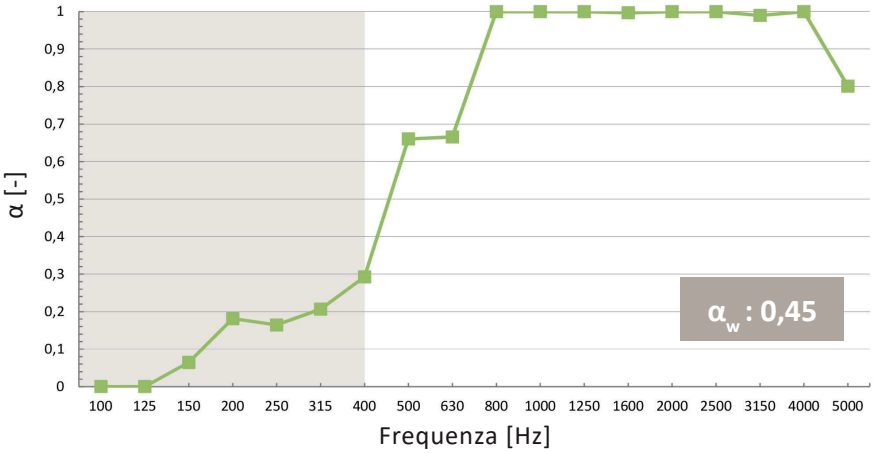
9.5 RISULTATI E COMPARAZIONI DEI DATI OTTENUTI DALLA MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

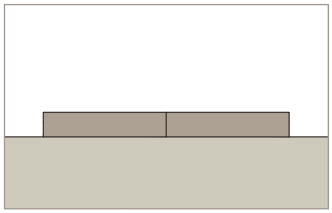
Nei grafici successivi sono riportati (dalla figura 20 alla 28) i valori di assorbimento acustico (α) alle diverse frequenze, da 100 a 5.000 Hz, ottenuti grazie alle misure eseguite in camera riverberante (ISO 354), per le diverse tipologie e configurazioni analizzate. I valori di assorbimento al di sotto dei 400 Hz sono considerati poco accurati, a causa dell'utilizzo di una camera in scala.

Ogni dato è ottenuto dalla media di tre misure separate, al fine di avere risultati più accurati, nonché per verificarne la ripetibilità.

Tutti gli assorbimenti superiori a 1 sono stati ricondotti a quest'ultimo valore, che costituisce il massimo previsto. Il risultato di α_w valutato secondo ISO 11654, è stato calcolato prima di effettuare tale variazione. Tuttavia anche in seguito alla correzione dei coefficienti, α_w non subisce variazioni, poiché lo scarto non è sufficiente per effettuare il salto al valore successivo tenendo conto che la traslazione deve essere effettuata a passi di 0,05, fino ad ottenere una somma degli scostamenti sfavorevoli minore o uguale di 0,10, come esplicitato nel paragrafo 9.3.

Misura B: P015



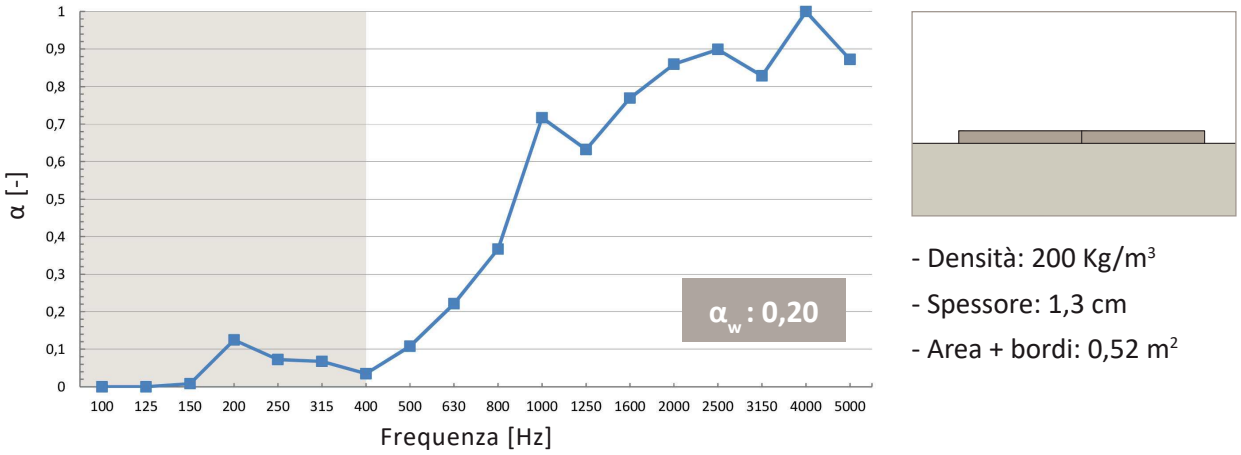


- Densità: 315 Kg/m^3
- Spessore: 3,1 cm
- Area + bordi: 0,57 m^2

Figura 20: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello P015 (fibre + polimeri).

Il pannello P015, come da aspettative, dimostra un andamento tipico dei materiali porosi fonoassorbenti a base di lana. Il grafico riporta elevati valori di assorbimento acustico, in particolare a partire da 500 Hz. Alla frequenza di 800 Hz raggiunge l'assorbimento massimo, (α = 1), praticamente costante fino a 4.000 Hz.

Misura C: P012

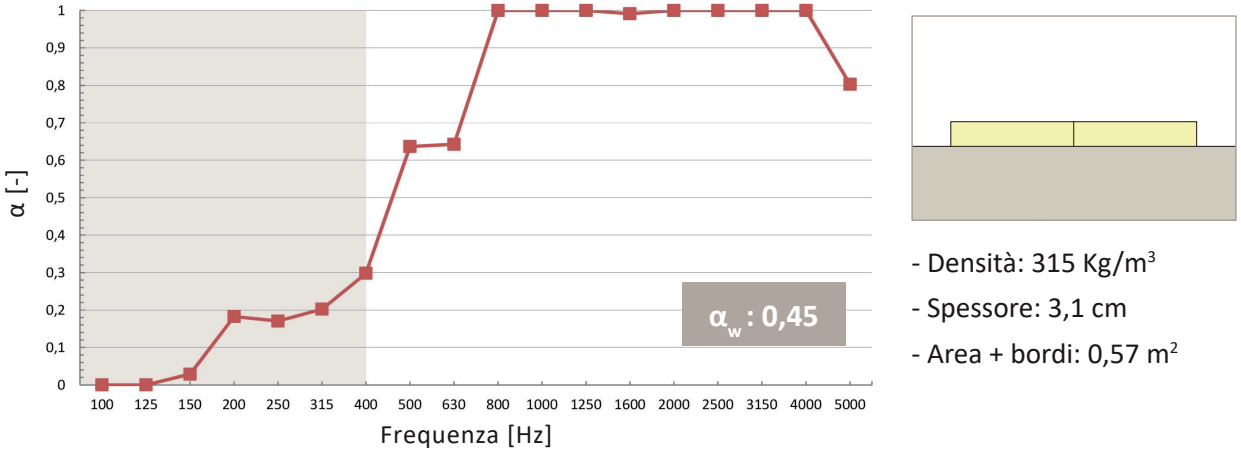


- Densità: 200 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area + bordi: 0,52 m^2

Figura 21: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello P012 (fibre + polimeri).

Il pannello P012, dimostra un graduale aumento dell'assorbimento acustico, a partire da 500 Hz. Alla frequenza di 4.000 Hz raggiunge l'assorbimento massimo, (α = 1).

Misura D: S012

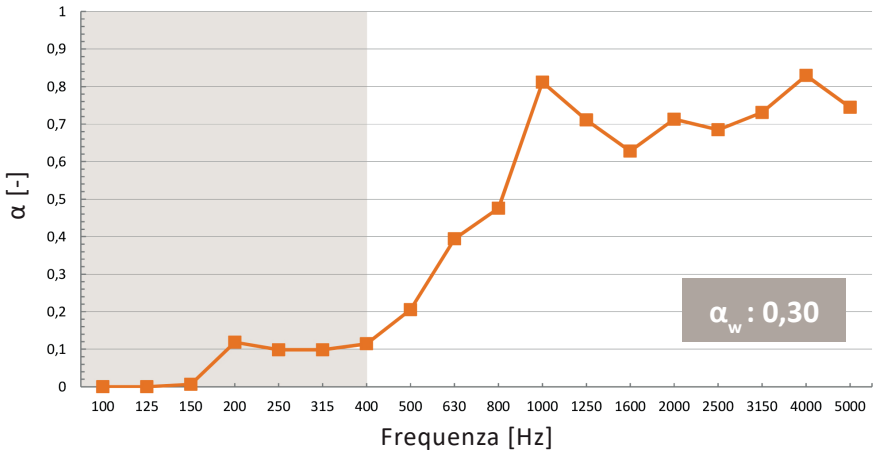


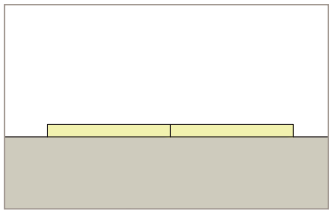
- Densità: 315 Kg/m^3
- Spessore: 3,1 cm
- Area + bordi: 0,57 m^2

Figura 22: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello S012 (fibre + colla d'amido).

Il pannello S012 mostra un comportamento tipico dei materiali fonoassorbenti a base di lana. Il grafico riporta elevati valori di assorbimento acustico, come da aspettative, in particolare a partire da 500 Hz. Alla frequenza di 800 Hz raggiunge l'assorbimento massimo, (α = 1), praticamente costante fino a 4.000 Hz.

Misura E: S011



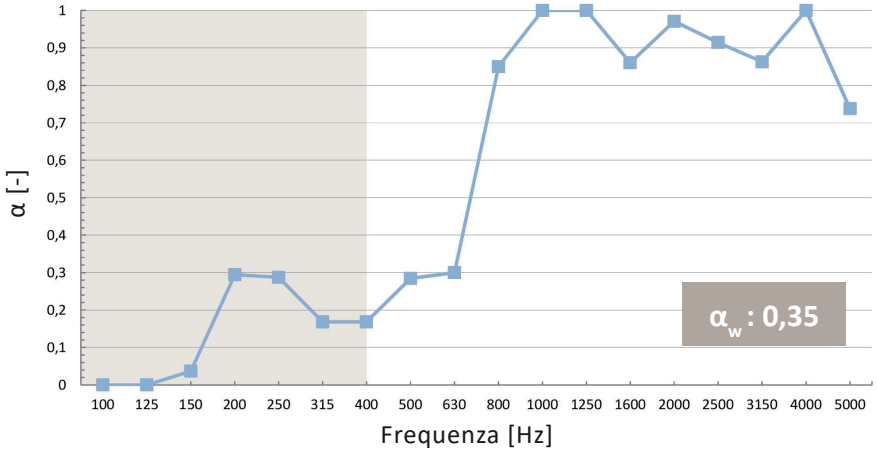


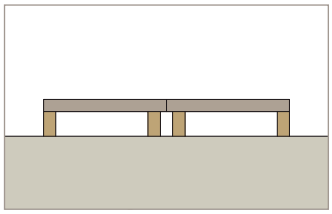
- Densità: 410 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area + bordi: 0,52 m^2

Figura 23: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello S011 (fibre + colla d'amido).

Il pannello S011, dimostra un graduale aumento dell'assorbimento acustico, a partire da 500 Hz. Alle frequenze di 1.000 Hz e 4.000 Hz raggiunge l'assorbimento massimo, (α = 0,8).

Misura G: P012 air-gap 5 cm



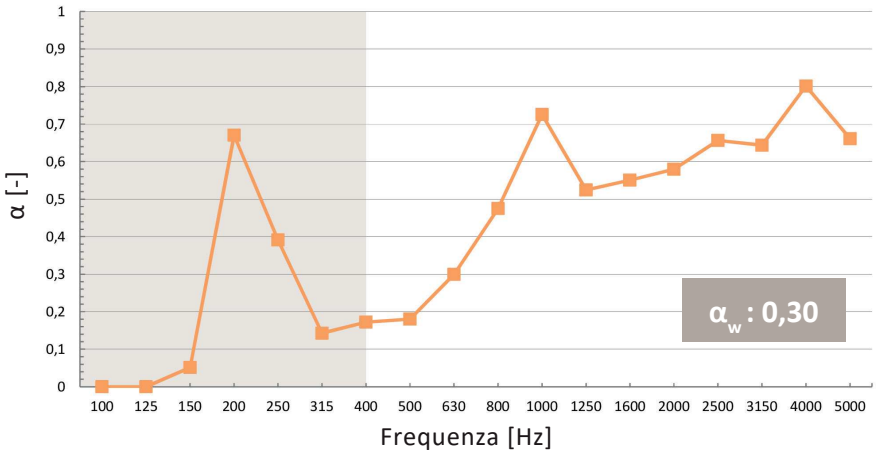


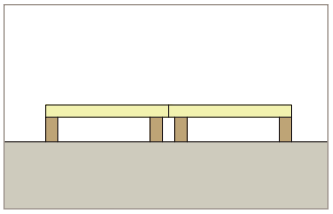
- Densità: 200 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area + bordi: 0,52 m^2

Figura 24: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello P012 con un air-gap di 5 cm.

In questa configurazione risulta evidente un incremento dell'assorbimento del pannello a partire da circa 800 Hz, e un andamento non costante che mantiene comunque valori elevati fino a 400 Hz. Il picco con α = 1, viene raggiunto alle frequenze di 1000, 1250 e 4000 Hz.

Misura H: S011 air-gap 5 cm



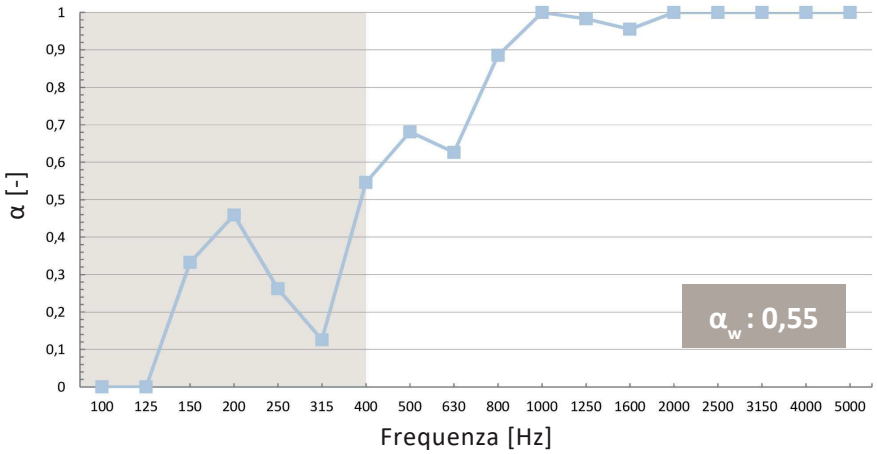


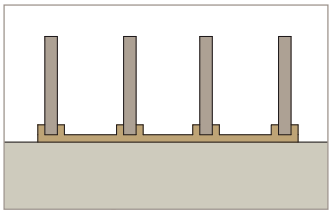
- Densità: 410 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area + bordi: 0,52 m^2

Figura 25: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello S011 con un air-gap di 5 cm.

Questa configurazione genera un picco anomalo alle basse frequenze, con un assorbimento di circa 0,7 a 200 Hz. L'assorbimento massimo coincide con 0,8 a 4.000 Hz.

Misura E: P012 baffles



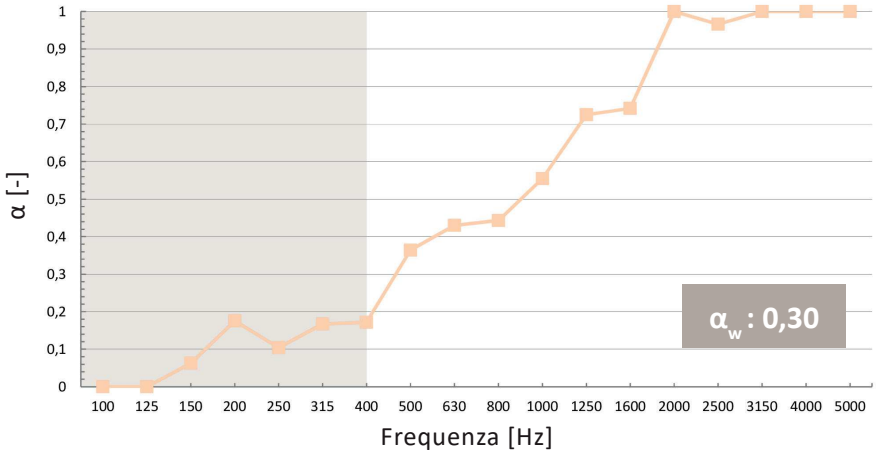


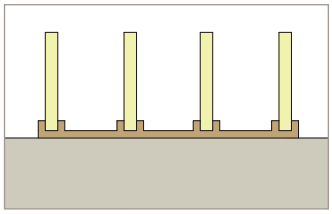
- Densità: 200 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area base: 0,48 m^2

Figura 26: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello P012 in configurazione baffles.

Questa configurazione è proposta come proof of concept per via delle dimensioni della camera. L'assorbimento mostra valori elevati già alle basse e medie frequenze, crescendo fino a raggiungere il picco massimo alla frequenza di 1.000 Hz e rimanendo praticamente costante fino a 5.000 Hz.

Misura M: S011 baffles



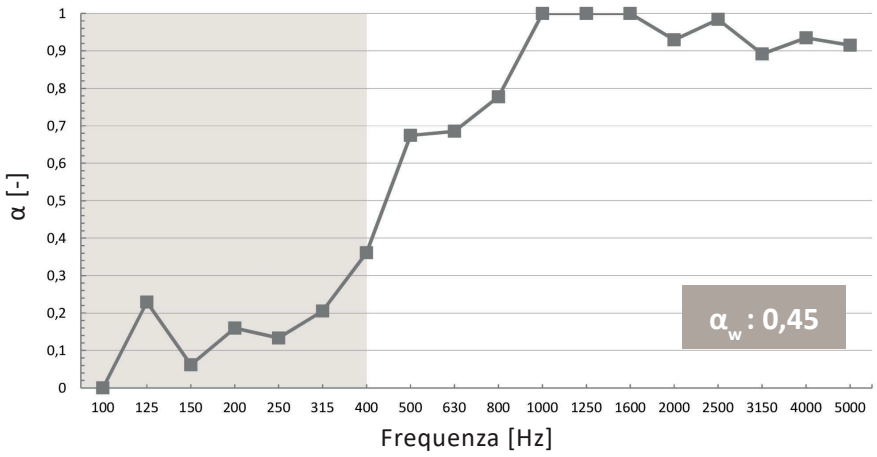


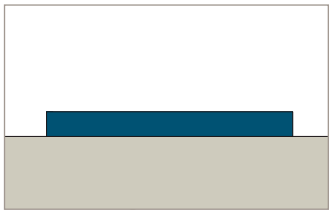
- Densità: 410 Kg/m^3
- Spessore: 1,3 cm
- Area base: 0,48 m^2

Figura 27: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello S011 in configurazione baffles.

Questa configurazione è proposta come proof of concept per via delle dimensioni della camera. L'assorbimento mostra valori crescenti fino a raggiungere il massimo (α = 1), alla frequenza di 2.000 Hz, rimanendo praticamente costante fino a 5.000 Hz.

Misura N: Z000





- Densità: 35 Kg/m^3
- Spessore: 3 cm
- Area + bordi: 0,53 m^2

Figura 28: Grafico ottenuto dalle misure in camera riverberante del pannello P012 in configurazione baffles.

Il pannello Z000, indispensabile come riferimento, mostra elevati valori di assorbimento acustico, crescenti fino al raggiungimento del picco alle frequenze di 1.000, 1.250 e 1.600 Hz.

COMPARAZIONI

Dopo aver valutato le prestazioni acustiche di ogni pannello, in questa sezione, viene riportato il confronto tra i quattro pannelli realizzati e tra le diverse soluzioni e configurazioni composte, al fine di valutarne il comportamento acustico ed impostare un ragionamento conclusivo nell'ambito di questa sperimentazione.

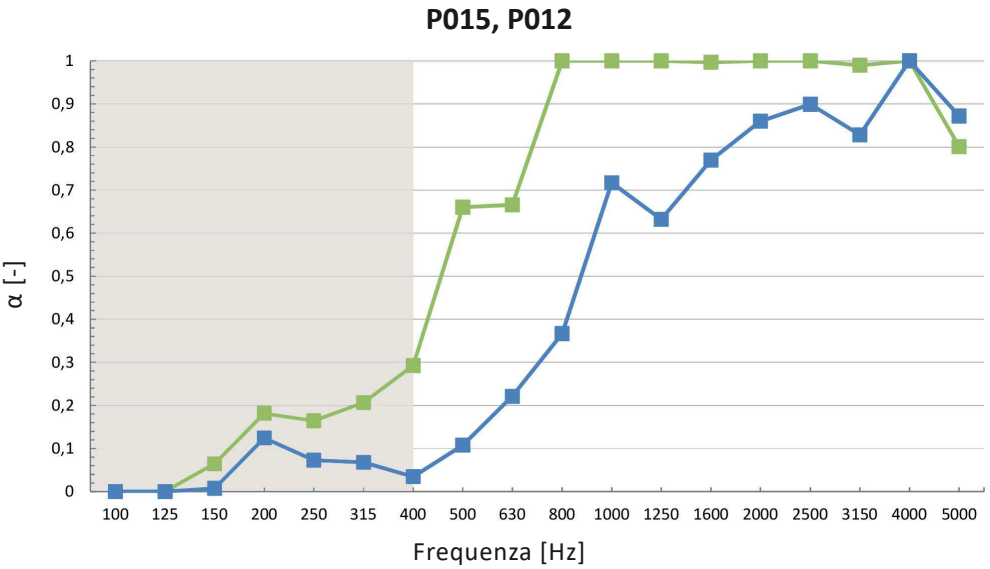
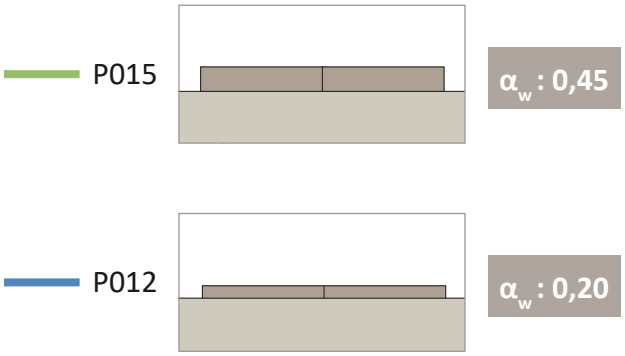


Figura 29: Confronto fra i pannelli composti da fibre +polimeri: P015 e P012.



La comparazione riportata nella figura 29 viene effettuata fra i due pannelli realizzati a base polimerica. Dal grafico risulta come il pannello P015, dotato di una densità minore e un'altezza maggiore, presenti un assorbimento superiore a tutte le frequenze. Il pannello P015 raggiunge il massimo assorbimento a 800 Hz, mentre il pannello P012 raggiunge un unico picco di $\alpha = 1$ alla frequenza di 4.000 Hz. Le prestazioni notevolmente maggiori sono confermate dall'ampio divario fra α_w.

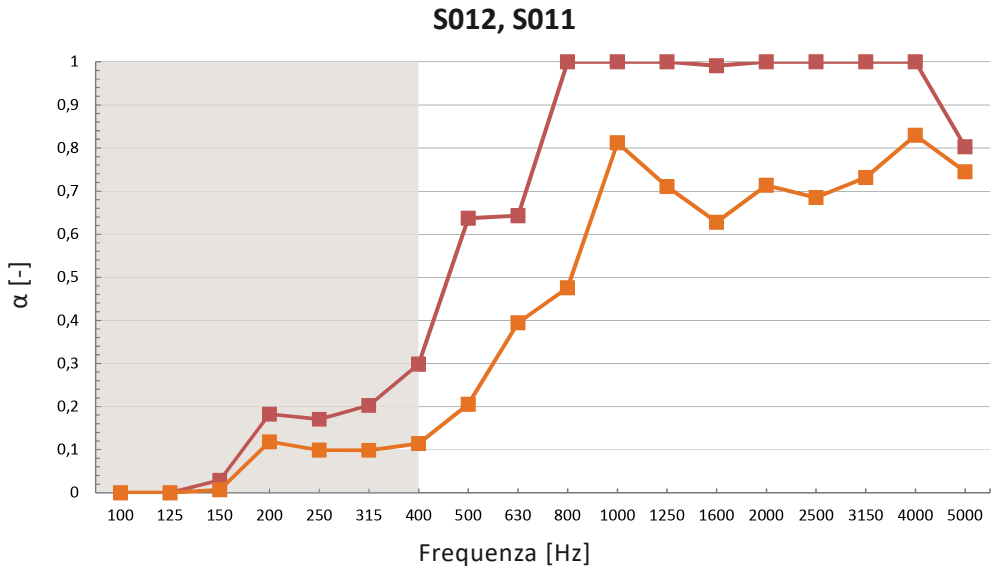
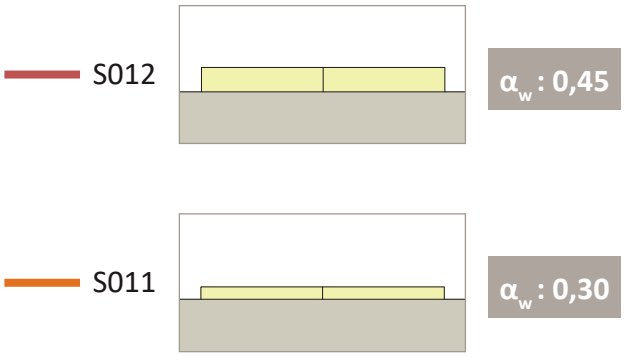


Figura 30: Confronto fra i pannelli composti da fibre + colla di amido di mais: S012 e S011.



In modo analogo al precedente vengono comparati i due pannelli a base di colla di amido (figura 30). Dai risultati riportati sul grafico emerge come il pannello S012, caratterizzato da uno spessore maggiore e una densità minore, abbia un assorbimento superiore per tutte le frequenze. Il pannello S012 a 500 Hz inizia ad avere buoni assorbimenti, mentre a 800 Hz raggiunge il suo massimo. Il pannello S011 alla frequenza di circa 1.000 Hz presenta assorbimenti accettabili, senza però raggiungere mai il coefficiente massimo. Il risultato conferma le aspettative, secondo le quali a densità minori corrispondono assorbimenti maggiori.

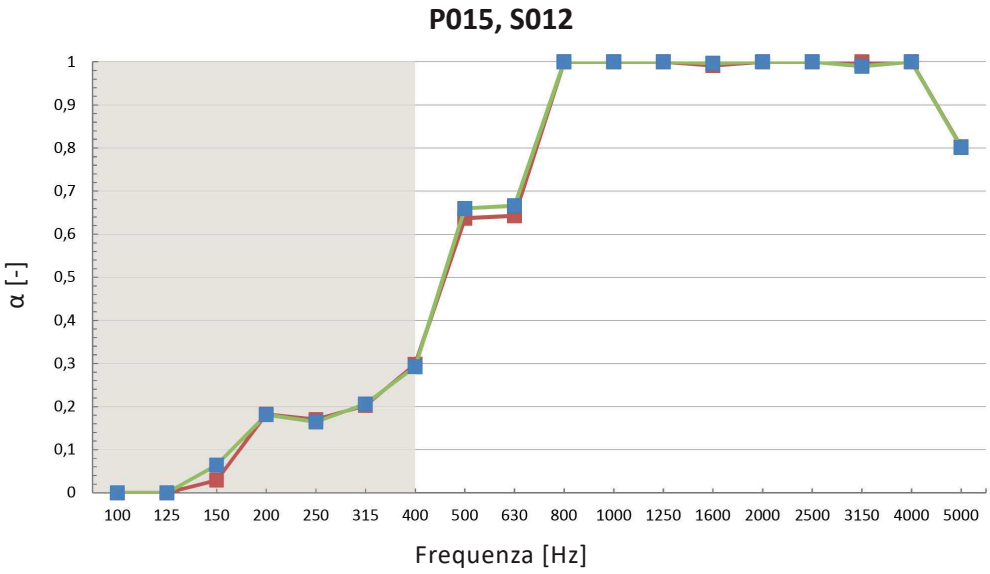
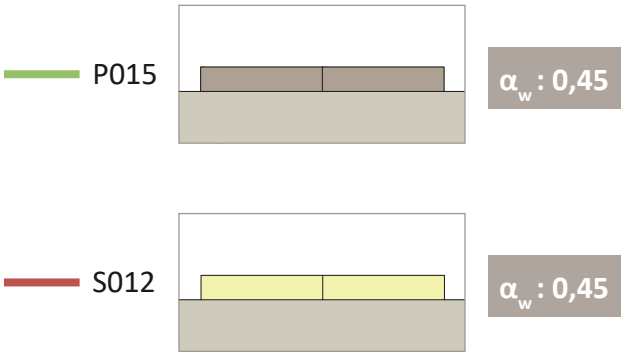


Figura 31: Confronto fra pannelli di spessore 3,1 cm, uguale densità e differente mix design: P015 e S012.



In questo caso il confronto viene effettuato fra due pannelli composti con soluzioni diverse ma caratteristiche uguali (figura 31). Entrambi i pannelli presentano stesso spessore, densità e massa. Dal grafico emerge chiaramente come i due pannelli abbiano un andamento pressoché congruente e non mostrino sostanziali differenze. A partire da circa 500 Hz risultano elevati valori di assorbimento, questi raggiungono il picco a 800 Hz, rimanendo costanti fino alla frequenza di 4.000 Hz. Il risultato di questo confronto è del tutto significativo, poiché dimostra come l'assorbimento acustico, nei materiali porosi, dipenda esclusivamente dalla densità. Anche utilizzando matrici e sostanze collanti diverse (perlomeno in questi rapporti) non si ha una influenza sulle relative performance acustiche. Questo è fondamentale per un eventuale sviluppo successivo, nel quale la sostanza legante potrebbe essere evoluta o variata. Inoltre il grafico conferma la corretta realizzazione dei pannelli poiché in caso contrario i risultati non sarebbero stati praticamente coincidenti.

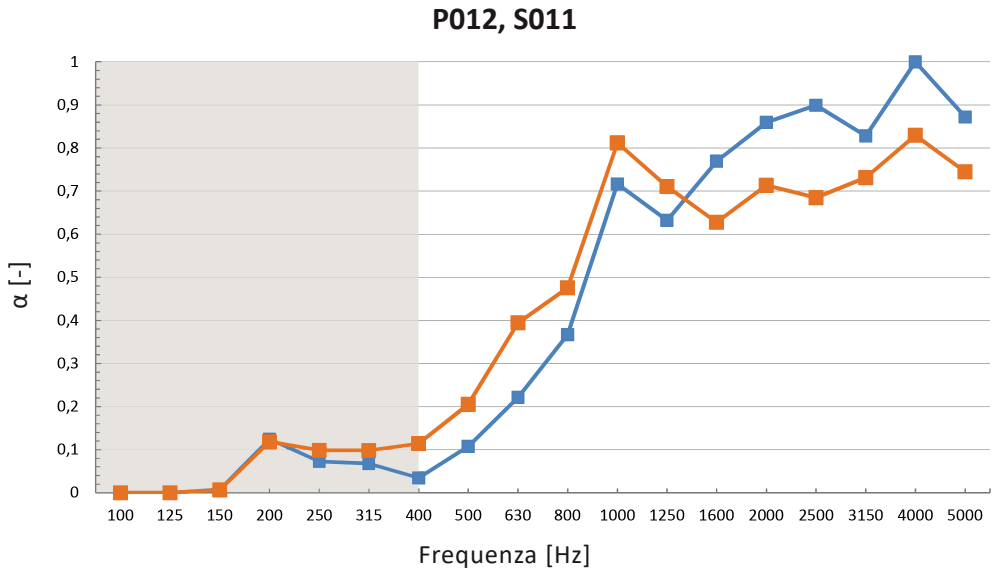
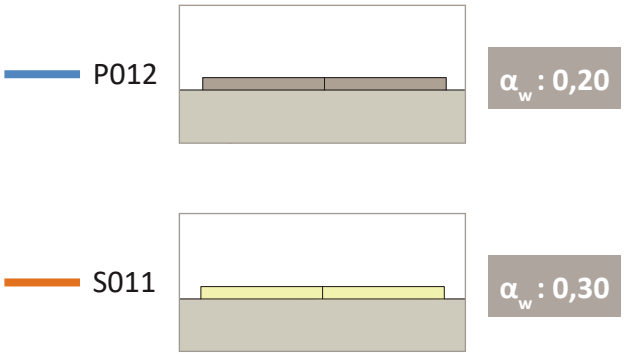


Figura 32: Confronto fra pannelli di spessore 1,3 cm e differente mix design: P012 e S011.



La comparazione nella figura 32 viene effettuata fra i due pannelli da 1,3 cm di spessore, realizzati però con metodologie differenti e caratterizzati da densità diverse. Entrambi dimostrano buoni assorbimenti solamente sopra i 1.000 Hz. Alle medie frequenze risultano valori maggiori per il pannello S011, mentre alle alte frequenze il pannello P012 dimostra un assorbimento maggiore, con un picco massimo a 4.000 Hz. Emerge quindi come densità minori portino ad assorbimenti maggiori ad alte frequenze e come pannelli con densità più elevate abbiano performance acustiche migliori a frequenze intermedie. Nonostante le performance siano paragonabili, il valore di α_w per il pannello S011 risulta nettamente maggiore.

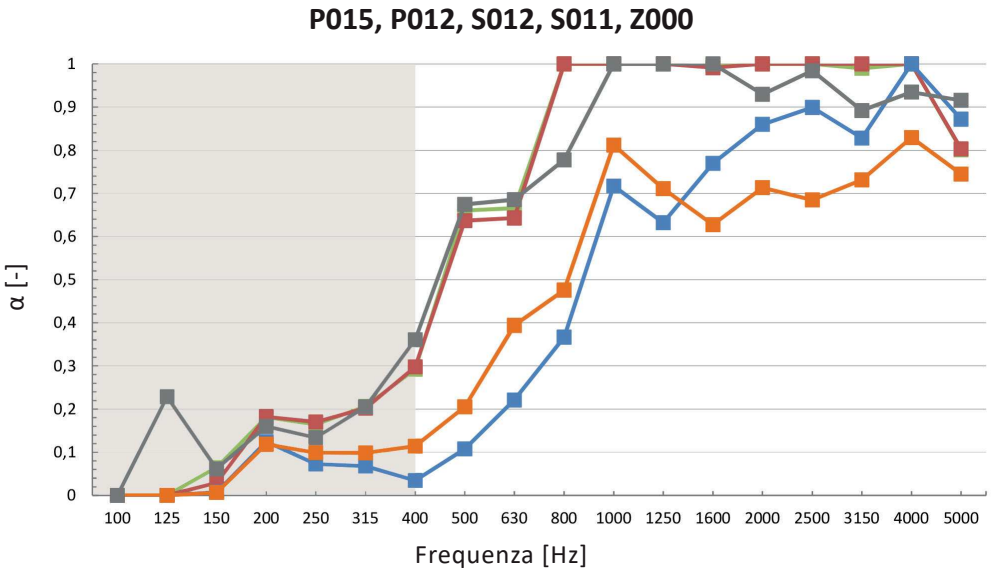
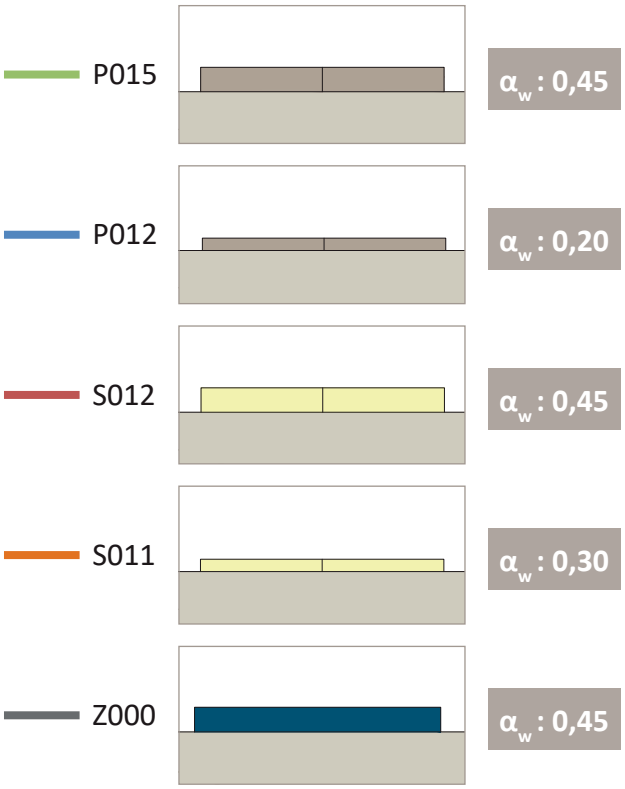


Figura 33: Confronto fra tutti i pannelli realizzati: P015, P012, S012, S011, Z000.



Il confronto viene ora effettuato fra tutti i pannelli realizzati (figura 33). Il grafico evidenzia come i pannelli P012 ed S012, caratterizzati da densità maggiori e uno spessore di 1,3 cm abbiano performance acustiche minori a tutte le frequenze. I pannelli P015 e S012 dimostrano assorbimenti elevati alle medie e soprattutto alle alte frequenze. Questi vengono infine confrontati con il pannello commerciale Z000: alle medie frequenze i risultati sono comparabili, mentre alle alte frequenze i pannelli P015 e S012 presentano assorbimenti migliori. Questo dato è di assoluta importanza poiché conferma le ottime performance di TECA panel (rispetto a un pannello simile in commercio), caratterizzato però da una densità più elevata e dotato di ottima rigidità strutturale.

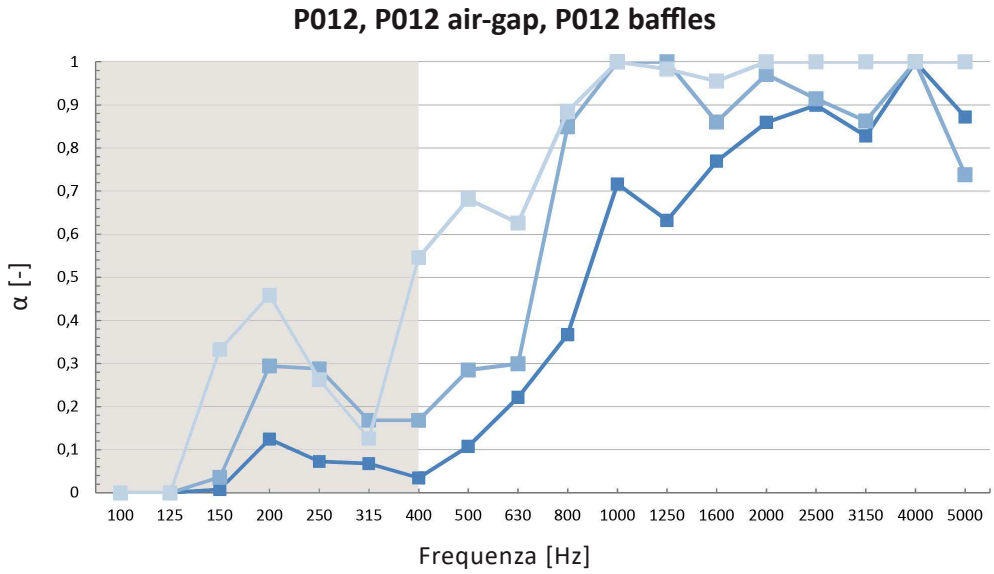
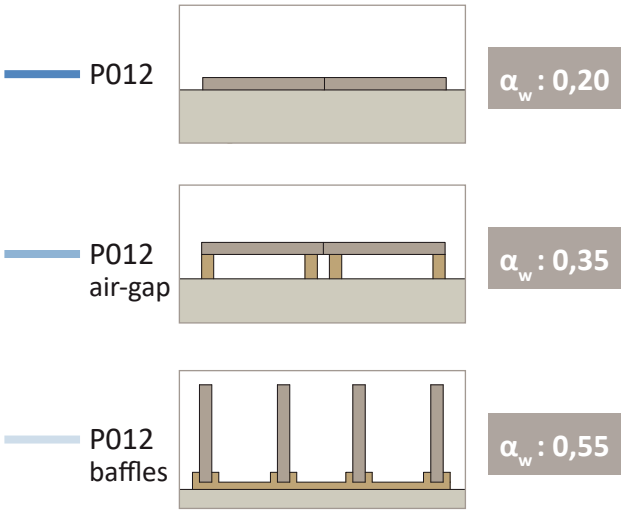


Figura 34: Confronto fra il pannello P012 in differenti tipologie di configurazione.



La comparazione nella figura 34 viene effettuata utilizzando il pannello P012 in tre configurazioni differenti: pannello appoggiato, inserendo un air-gap di 5 cm e nella modalità baffles. Nella prima modalità si hanno gli assorbimenti minori in relazione a tutte le frequenze. Inserendo un air-gap, come previsto (capitoli 2 e 3), le performance acustiche crescono su tutto il range analizzato. Nella configurazione a baffles si hanno i risultati migliori, come evidenziato da α_w, con un buon assorbimento già alle basse frequenze. Il risultato conferma le aspettative, poiché la soluzione baffles permette di esporre entrambe le facce, garantendo così prestazioni nettamente maggiori, anche con un pannello con bassi assorbimenti come il P012. Solamente cambiando la configurazione è possibile quindi variare in modo significativo le performance acustiche di un pannello, migliorandole, come in questo caso specifico, fino al 275%.

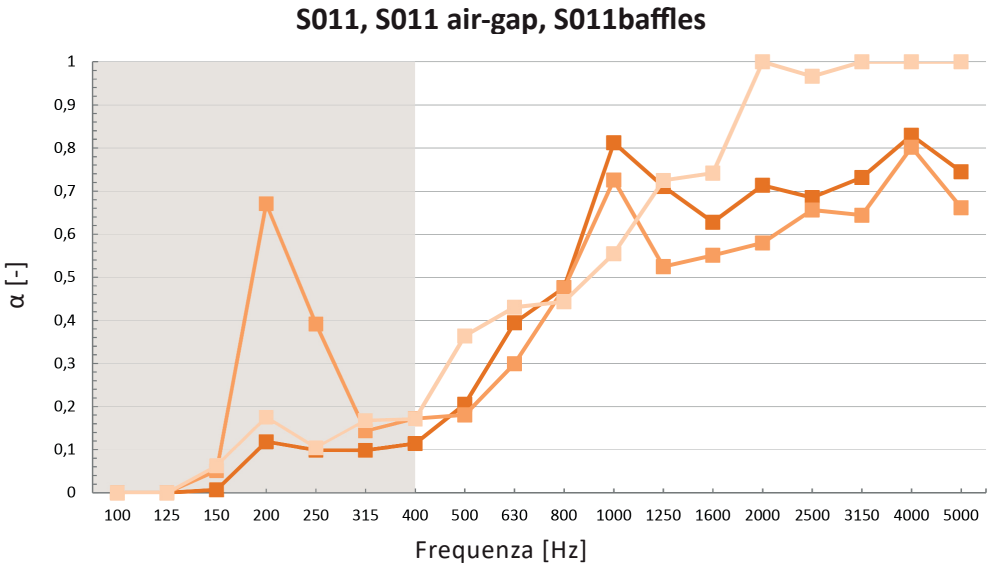
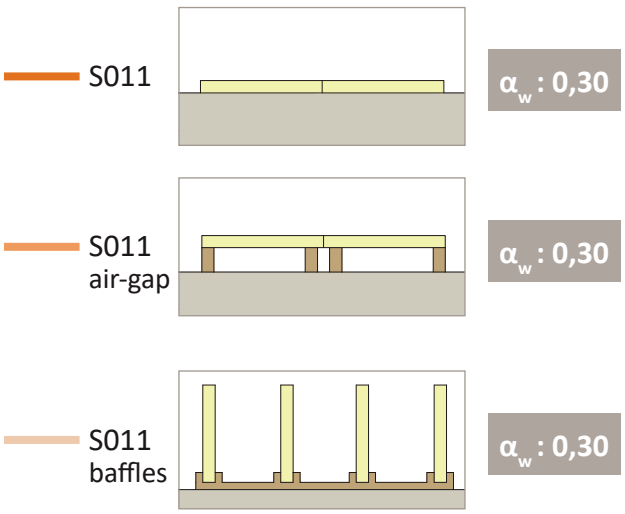


Figura 35: Confronto fra il pannello S011 in differenti tipologie di configurazione.



In modo analogo alla precedente comparazione, nella figura 35, viene ora preso in considerazione il pannello S011 in relazione a diverse configurazioni: pannello appoggiato, pannello con un air-gap di 5 cm e nella modalità baffles. I risultati del grafico non risultano congruenti alle aspettative, infatti inserendo un air-gap di 5 cm le prestazioni non migliorano, ad esclusione di un anomalo picco a 200 Hz. Neppure con la soluzione dei baffles le performance subiscono una variazione significativa; solo alle alte frequenze è visibile un aumento dell'assorbimento acustico, che raggiunge il valore massimo a 2.000 Hz, rimanendo praticamente costante fino a 5.000 Hz. Nonostante le tre diverse configurazioni il valore di α_w rimane invariato. Questo risultato è imputabile all'elevata densità del pannello, 410 Kg/m^3 (nettamente maggiore rispetto a qualsiasi pannello realizzato). A causa dell'elevata pressione probabilmente la permeabilità risulta minima, e ciò non consente l'innescarsi del meccanismo di assorbimento tipico dei materiali porosi.

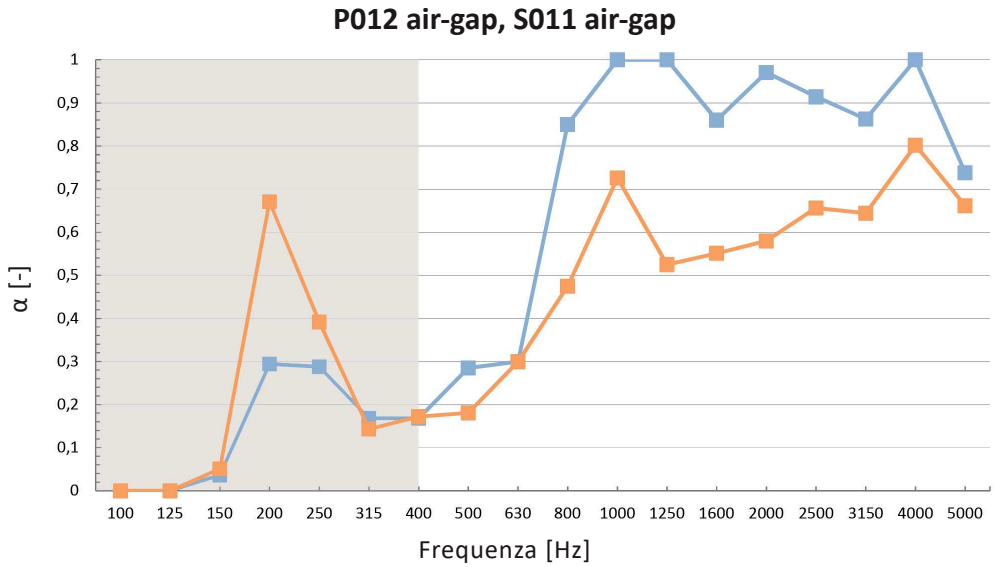
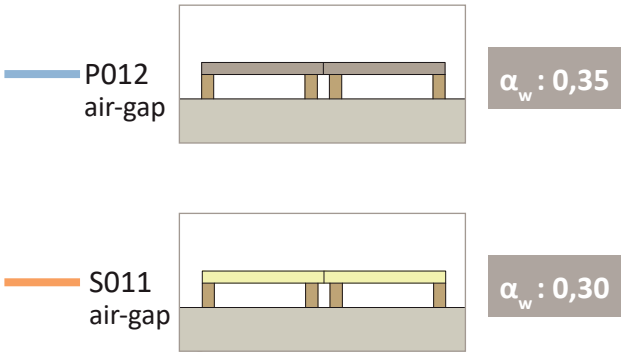


Figura 36: Confronto fra i due pannelli con spessore di 1,3 cm in configurazione air-gap 5 cm.



Il confronto (figura 36) viene effettuato fra i due pannelli di spessore 1,3 cm aventi la stessa configurazione: pannello con un air-gap di 5 cm. Dal grafico emerge come entrambi presentino un incremento dell'assorbimento a 250 Hz, ma al crescere della frequenza le prestazioni del pannello P012 risultano nettamente maggiori, raggiungendo il massimo assorbimento alle frequenze di 1.000, 1.250 e 4.000 Hz. Anche in questo caso le basse prestazioni del pannello P012 sono attribuibili alla sua elevata densità.

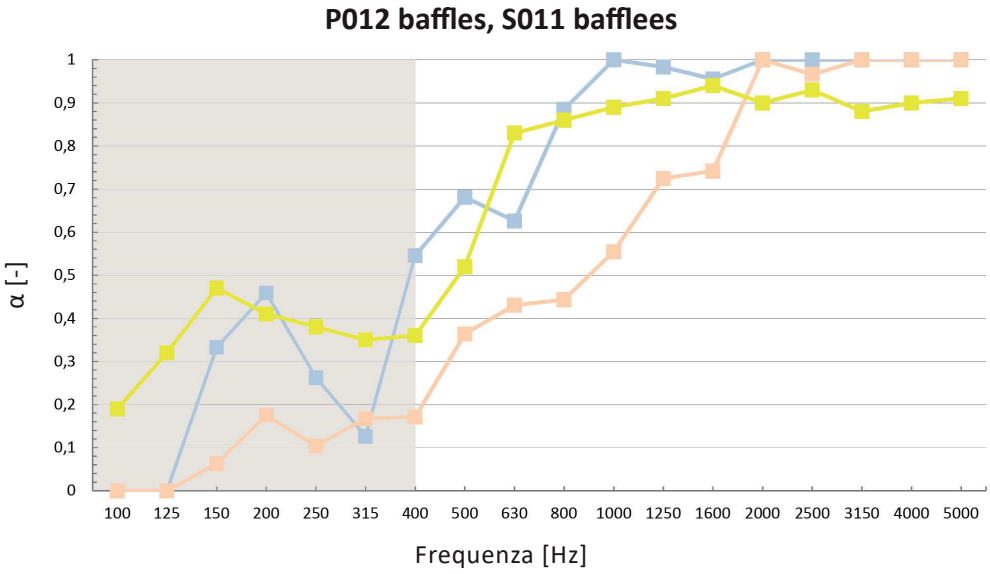
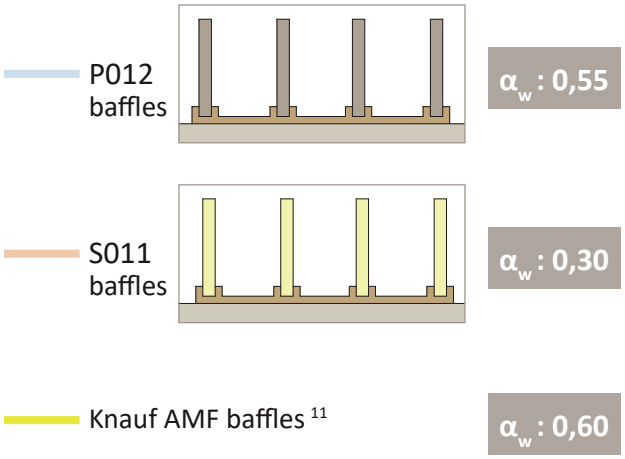


Figura 37: Confronto fra i pannelli con spessore di 1,3 cm in configurazione baffles.



La comparazione viene effettuata nella figura 37 mantenendo la stessa configurazione, variando i pannelli utilizzati. Dai risultati del grafico emerge come alle alte frequenze abbiano entrambi raggiunto il valore massimo, mentre alle basse e medie frequenze il pannello P012 mostri delle performance nettamente superiori. I limiti del pannello S011 sono legati alla sua densità elevata, che non consente un significativo aumento del proprio assorbimento acustico neanche in relazione a questa soluzione apparsa come la più vantaggiosa; il suo comportamento tende a quello di un pannello vibrante. Confrontando invece la soluzione P012 baffles con una soluzione commerciale, in particolare quella offerta da Knauf AMF, risulta come quest'ultima abbia prestazioni migliori a basse frequenze, equiparabili alle medie, e inferiori a frequenze più alte. Tuttavia il rispettivo valore di α_w risulta leggermente superiore .

11_Certificazione acustica di prodotto allegato F.

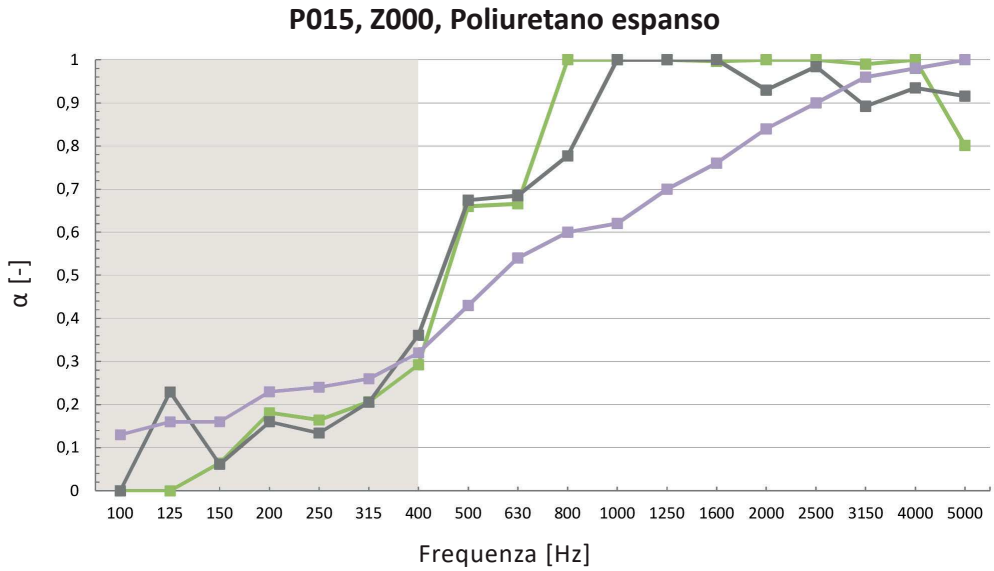
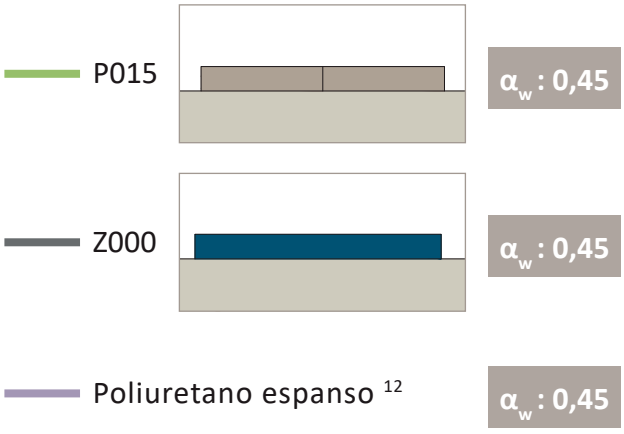


Figura 38: Confronto fra i pannelli P015, Z000 e il poliuretano espanso.



La comparazione viene effettuata fra il pannello P015 che presenta gli stessi risultati del pannello S012, il pannello commerciale analizzato Z000 (figura 38), e le prestazioni acustiche di uno dei prodotti fonoassorbenti più diffusi, il poliuretano espanso, considerato con uno spessore di 3 cm e una densità di 30 Kg/m^3. Alle frequenze più basse il pannello P015 manifesta prestazioni minori, mentre alle medie frequenze il poliuretano è il prodotto con gli assorbimenti più bassi. Alle frequenze intermedie i risultati migliori sono quelli ottenuti dei pannelli P015 e Z000, i quali sono del tutto comparabili. Alle alte frequenze è il pannello P015 ad avere le prestazioni migliori, ad esclusione della frequenza di 5.000 Hz dove si può leggere un calo. Questo confronto permette di confermare nuovamente le potenzialità acustiche di TECA panel, che presenta un valore di α_w pari a quello di pannelli fonoassorbenti commerciali.

12_http://www.fonoisolamento.it/, consultato il 5/09/2019.

9.6 CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA MISURA IN CAMERA RIVERBERANTE

In conclusione, in seguito ai risultati emersi in questo capitolo, è possibile affermare che TECA panel è a tutti gli effetti un pannello fonoassorbente che garantisce ottimi assorbimenti acustici. Si ricorda che, in questo caso, sono state provate solo quattro tipologie di pannelli ma, come mostrato nel capitolo 6 è possibile realizzare numerosi prodotti in funzione della densità richiesta. Si può quindi affermare che diminuendo la densità rispetto ai pannelli realizzati sia possibile aumentare ulteriormente le performance acustiche del prodotto.

In relazione ai pannelli misurati in camera riverberante è emerso che a parità di densità e di spessore, pannelli di diversa tipologia, presentano i medesimi risultati. Questa affermazione è valida se si considerano i rapporti utilizzati nel mixdesign di tali pannelli. Infatti per rapporti superiori, a favore del collante o della matrice utilizzata, l'effetto di questa sostanza potrebbe emergere, portando a risultati diversi. Anche la diversificazione della tipologia di fibra utilizzata, a parità di densità porterebbe a una variazione delle performance. Inoltre questo risultato conferma come il processo di realizzazione sia corretto, sebbene eseguito in maniera prototipale.
Questo fenomeno non è emerso nella prima valutazione acustica (capitolo 6); le motivazioni si possono riscontrare nel fatto che gli assorbimenti siano stati valutati in seguito a delle modellazioni e a delle funzioni ricavate da tendenze comuni. Inoltre i campioni erano, in alcuni casi, caratterizzati da rapporti elevati a favore del collante, influendo quindi sulle proprietà delle fibre e di conseguenza sui passaggi successivi di calcolo.

Un altro risultato emerso, è legato all'importanza dello sviluppo del design del prodotto. Infatti a seguito di diverse configurazioni è possibile migliorare drasticamente le performance acustiche del pannello, semplicemente variando la modalità di applicazione. La progettazione di un prodotto che permetta la possibilità di esporre entrambe le facce del pannello genera un forte aumento dell'assorbimento acustico, a tutte le frequenze. I pannelli considerati, nella configurazione baffles risultano direttamente confrontabili con pannelli commerciali, come emerso dalle comparazioni effettuate.

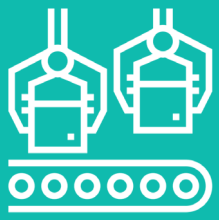
Pannelli realizzati con densità elevate generano assorbimenti acustici modesti e influenzati in modo limitato dalla configurazione scelta; il loro comportamento è assimilabile a un pannello vibrante. Tuttavia tali elementi potrebbero essere assemblati insieme a prodotti caratterizzati da una densità minore, o potrebbero fornire loro un valido supporto,

in alternativa all'utilizzo di ulteriori materiali. Si sottolinea infine la competitività acustica di TECA panel. Esso è stato confrontato con un pannello commerciale prodotto da scarti tessili misti, fornito dalla Sfilacciatura Negro, e con un pannello in poliuretano espanso di 3 cm. TECA panel si è dimostrato direttamente confrontabile, raggiungendo gli stessi valori di α_w, con performance acustiche migliori a medie e, soprattutto, elevate frequenze. Si sottolinea che tali valori sono stati ottenuti con una densità nettamente maggiore rispetto agli altri due prodotti commerciali (P015 169 Kg/m^3, Z00 e poliuretano 30 Kg/m^3). Questo consentirebbe a TECA panel di raggiungere addirittura prestazioni migliori se venisse utilizzato un pannello con densità minori, come quelli realizzati e descritti nel capitolo 6. Inoltre grazie a questa caratteristica e al mixdesign sviluppato, tali pannelli, a differenza per esempio di quelli prodotti dalla Sfilacciatura Negro, sono caratterizzati da una buona rigidità e coesione delle fibre, nonostante l'utilizzo di un rifiuto aziendale come le polveri di lana.

Con questo paragrafo la parte sperimentale, di sviluppo e di analisi acustica del prodotto viene considerata conclusa. Seguirà un'analisi di fattibilità e delle potenzialità e possibilità future che potrebbero coinvolgere ed essere intraprese da TECA panel.

10

FILIERA DEL PRODOTTO: IPOTESI DI SVILUPPO



Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

10.1 PREMESSE SULLO SVILUPPO DELLA FILIERA PRODUTTIVA

Prima di introdurre questo capitolo è fondamentale fare una premessa che condurrà al discorso di seguito argomentato e illustrato.
Le filiere produttive che verranno presentate, in relazione alla serie S (fibre + colla di amido) e alla serie P (fibre + polimeri), fanno riferimento ad un ipotetico sviluppo e a supposizioni fondate sull'esperienza acquisita durante le fasi sperimentali e sulle informazioni ricavate a seguito di numerosi confronti con imprenditori impiegati in settori simili. Il ciclo produttivo che verrà proposto, dovrà quindi essere considerato con le dovute cautele, non esiste infatti alcuna realtà conosciuta che impieghi delle polveri di lana, unite a una matrice o ad una sostanza collante, al fine di generare pannelli acustici di questa tipologia.
Le filiere produttive ipotetiche che verranno esposte, rappresentano una visione delle fasi prototipali effettuate concretamente durante le sperimentazioni, in una realtà industriale o a livello artigianale. Infatti il ciclo produttivo in questione può essere esteso a una produzione autonoma o semiautonoma, basata sul largo impiego di sistemi automatici a ciclo continuo, o a una produzione più artigianale, in cui la mano d'opera ne costituisce la risorsa fondamentale. Anche in quest'ultimo caso l'artigiano deve essere affiancato da macchinari predisposti per tale lavoro. A tal proposito, anche i macchinari necessari per il ciclo di produzione verranno solo suggeriti e non esplicitati, poiché dovrebbero essere attentamente progettati e messi a punto per il fine desiderato.
Non si esclude neppure che tale processo, in una sua eventuale concretizzazione, possa essere variato nelle diverse fasi, in funzione delle possibilità offerte e della tipologia di prodotto selezionato.
Un punto in comune, per entrambe le filiere analizzate, è costituito dalla materia prima: gli scarti di polveri e di fibre corte provenienti dalle aziende. Gli scarti selezionati risultano essere rifiuti industriali, e come tali vengono smaltiti in discarica. In particolare si fa riferimento agli scarti di lana illustrati nel capitolo 4, prodotti dal Lanificio Reda (circa 5.000 Kg/anno) e dal Feltrificio Biellese (circa 6.500 Kg/anno). Nell'ottica di una produzione a livello industriale, queste quantità potrebbero non essere sufficienti per garantire una produzione continua annuale (vedi valutazione economica, capitolo 11), la fornitura di scarti simili si estenderebbe quindi a tutto il territorio biellese, raggiungendo una quantità potenziale di 15.000.000 Kg/anno come analizzato nel paragrafo 4.3. Vista l'ingente quantità, potrebbero essere selezionati all'interno di questi scarti, solo quelli le cui fibre presentino caratteristiche simili a quelle utilizzate in questa ricerca, per ridurre così al minimo le variabili del prodotto.

10.2 FILIERA PRODUTTIVA SERIE S: FIBRE E POLVERI + COLLA DI AMIDO

Prima di avviare un'analisi sulla filiera, è indispensabile garantire la fornitura delle materie prime necessarie per realizzare il pannello: fibre corte miste a polveri di lana (vedi paragrafo 10.1) e amido di riso. Quest'ultimo come evidenziato nei precedenti capitoli, deriva da uno scarto della filiera del riso, in particolare dall'acqua di bollitura utilizzata per la produzione del riso precotto. All'interno della ricerca, oltre a non aver avuto la fornitura di tale materiale, non sono neppure stati forniti dati significativi riguardanti le quantità.

Come emerge dalla figura 1, tali materiali, in attesa di essere utilizzati all'interno del ciclo vengono stoccati in magazzino. Si procede con la miscelazione delle fibre di diversa tipologia al fine di avere una mista omogenea. In parallelo, per alcune tipologie di fibre, come quelle fornite dal Lanificio Reda, è stato previsto un processo di triturazione, per via del composto formato da aggregati rigidi di polvere, a seguito del quale possono essere miscelate insieme alle altre. Tali processi potrebbero, tuttavia, essere ipotizzati in sequenza anziché in parallelo, prevedendo una triturazione preventiva di tutte le fibre prima della miscelazione. Per tali passaggi si ipotizza l'utilizzo di una sfilacciatrice, o di una sua eventuale evoluzione, che attraverso l'azione di cilindri rotanti dotati di lame, genererebbe delle polveri e delle fibre aperte e soffici. Queste fasi produrrebbero, inevitabilmente, ulteriori scarti, individuabili sotto forma di polvere, che, se opportunamente recuperata, potrebbe essere direttamente reinserita in questa filiera produttiva.

Prima di tali passaggi, non si esclude la possibilità di un controllo ottico per rilevare eventuali corpi estranei, e di una fase di lavaggio e asciugatura. L'introduzione di questi passaggi deriva dalla possibilità che alcuni scarti non siano direttamente utilizzabili, al contrario, per esempio, di quelli forniti dal Feltrificio Biellese. Potrebbero essere lavati e asciugati mediante le normali attrezzature utilizzate per tale scopo all'interno dell'industria tessile.

Parallelamente a questa filiera, dovrebbe essere prodotta la colla: ipotizzando di utilizzare lo scarto dell'acqua di bollitura, essa deve essere ridotta, attraverso l'evaporazione dell'acqua contenuta, fino al raggiungimento delle proprietà di utilizzo, che dovrebbero essere attentamente studiate. Non si escludono ulteriori analisi e trattamenti chimici, per valutare e migliorare alcune caratteristiche della colla, come la relativa resistenza all'umidità.

Prodotta la colla, internamente o tramite terzi, essa può essere aggiunta alle fibre nel corretto dosaggio, in funzione della densità e della ricetta. Le materie possono essere miscelate tramite apposito impianto, dotato di

pale rotanti o di coclea a spirale. Il composto, così preparato, può essere inserito, in modo automatico o manuale, all'interno di una dima, in base al design prescelto. Lo stampo, contenente il materiale, tramite l'applicazione di una forza esterna, deve essere pressato, secondo la densità voluta, e trasportato in un forno continuo, di dimensioni opportune. In alternativa è possibile ipotizzare una formatura, attraverso la quale il prodotto viene inserito all'interno di uno stampo a piastre calde, in grado di fornire un'adeguata pressione e allo stesso tempo permettere il trattamento termico.

In entrambi i casi, tale trattamento, non ha il fine di asciugare o cuocere il prodotto, ma solo di conferire alla miscela la forma desiderata: la sperimentazione effettuata, ha portato a stabilire un tempo ottimale di circa un'ora alla temperatura di 100°C.

Segue la fase di essiccazione: il prodotto può essere estratto dallo stampo e inserito in un forno di essiccazione in cui perderà l'acqua in eccesso, grazie al calore secco controllato dal macchinario stesso. Al termine di tale fase il pannello, per mezzo della colla, acquisirà la coesione e la rigidità richiesta.

Si suggerisce, a partire dalle fasi di miscelazione delle materie prime, di mantenere sotto stretto controllo la massa delle fibre utilizzate, poiché come emerso dall'ultima sperimentazione, esse sono fortemente influenzate dall'umidità dell'ambiente, e ciò potrebbe comportare un'eventuale variabilità nelle caratteristiche dei pannelli.

In base alla tipologia del prodotto realizzato, può seguire una fase di controllo e di rifinitura, per eliminare difetti o eccessi di produzione. In questa fase i pannelli verranno corredati di eventuali accessori, in relazione al loro impiego. Non analizzando la parte di design del prodotto in questo progetto, tutto ciò che riguarda gli accessori non potrà essere approfondito, ma al fine di conservare la filosofia di sostenibilità del pannello, essi potrebbero essere pensati, come una composizione in PLA, mediante l'utilizzo di macchine di prototipazione rapida. Questi sarebbero caratterizzati da un materiale di derivazione naturale quindi biodegradabili, inoltre grazie a questo processo verrebbero creati incastri, distanziali, cornici e supporti senza l'ausilio di ulteriori colle. Il prodotto può infine essere confezionato e stoccato in magazzino, nell'attesa di essere venduto e finalmente utilizzato come pannello, arredo o partizione, per migliorare il comfort acustico di un ambiente.

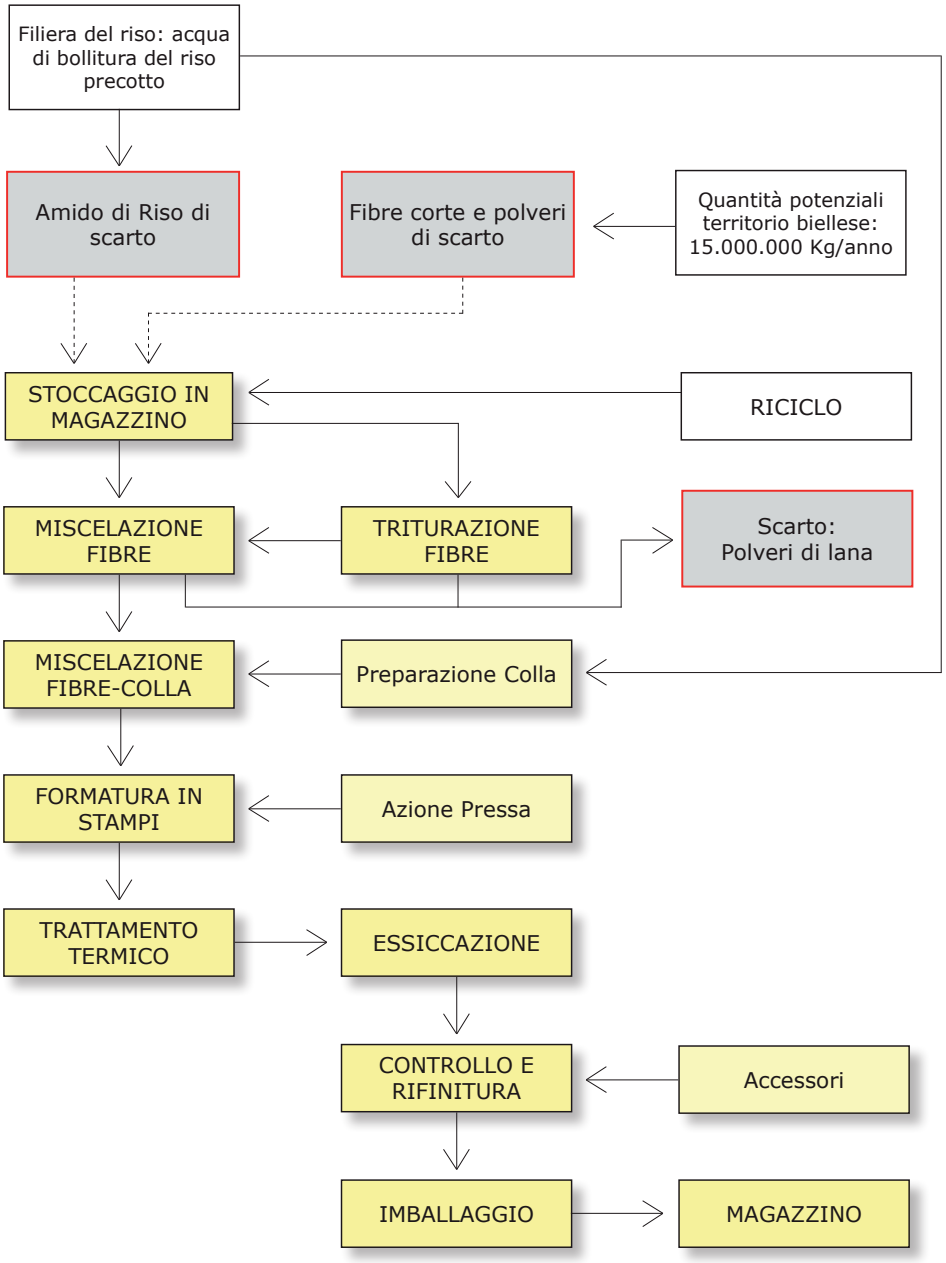


Figura 1: Flow Chart, ciclo produttivo ipotetico per TECA panel serie S, fibre di lana + colla di amido di riso.

10.3 FILIERA PRODUTTIVA SERIE P: FIBRE E POLVERI + POLIMERI

In questa seconda ipotesi di filiera di produzione, molte fasi risultano sovrapponibili a quelle descritte per la serie precedente: al fine di evitare inutili ripetizioni, esse verranno solo elencate, e vale quanto detto nel paragrafo precedente.

Le materie prime, necessarie per la produzione di TECA panel serie P, sono le medesime fibre corte miste a polveri di lana e, come matrice per attribuire rigidità al pannello, sono costituite da polimeri sintetici (vedi capitolo 5). Come emerso nei precedenti capitoli, questi polimeri derivano da scarti di produzione e, in questo caso particolare, dalla Verniciatura Industriale Sassone: essi sono dei polimeri termoindurenti, sotto forma di polvere di poliestere (vedi paragrafo 5.2.2, 5.1 e scheda tecnica,allegato B), considerati come rifiuti e smaltiti in discarica. E' già stato segnalato che questi polimeri sintetici, all'interno di altre realtà, possano essere sostituiti con polimeri di origine naturale e biodegradabili. Tuttavia il processo potrebbe essere similare, ad accezione della fornitura e dell'applicazione degli stessi nella miscela, non consentendo quindi una valutazione specifica.

Come nella serie precedente, le fibre prima di iniziare il processo, in funzione della loro provenienza, potrebbero subire delle fasi di controllo, lavaggio e asciugatura. Anche la preparazione di queste ultime risulta essere la medesima: verrebbero tritate e poi miscelate, per creare un composto omogeneo (figura 2). Successivamente il polimero può essere aggiunto e miscelato alla fibre di lana, in base alle percentuali definite nella ricetta, con gli stessi strumenti elencati nel paragrafo precedente. A differenza della serie S, dove è stato individuato uno scarto nelle sole fasi di miscelatura e triturazione delle fibre, in questo caso, anche nella fase di miscelazione fra le due materie si potrebbe generare ulteriore polvere di scarto, che tuttavia, può essere reimmessa direttamente in questo ciclo. La nascita di questo ulteriore scarto deriva da un processo di tipo a secco, a differenza di quello a umido della serie S, nel quale viene aggiunta della colla sotto forma di liquido.

Il prodotto ottenuto può essere quindi posizionato all'interno del cassero, in funzione della tipologia e della forma richiesta. Si consiglia un processo automatizzato, anziché manuale, in cui il materiale viene inserito per insufflaggio, nell'esatta quantità. La motivazione la troviamo nuovamente nel processo a secco, che determina una miscela volatile, non coesa e di difficile gestione. Il cassero può essere sottoposto all'azione di una forza esterna mediante una pressa, in base alla densità ricercata. Il prodotto mantenuto in pressione, all'interno del cassero, può quindi subire il trattamento termico all'interno di un forno continuo. In alternativa, può essere

composto secondo due metodi differenti. Il primo consiste nell'inserire la miscela all'interno dello stampo tramite l'insuflaggio a pressione, in questo modo il composto risulta già pressato, e non è necessaria nessun altra azione: lo stampo può quindi essere trattato termicamente. Il secondo, in modo analogo alla serie S, consiste nell'inserire il composto all'interno di uno stampo a piastre calde, in grado di fornire simultaneamente pressione e calore. In entrambe le possibilità, la cottura deve permettere la polimerizzazione del polimero utilizzato, e nello specifico, per quello scartato dalla Verniciatura Sassone, questo avviene alla temperatura di 180°C per un tempo di circa 30 minuti in base alle dimensioni del prodotto da realizzare.

Come sottolineato per la precedente filiera, si consiglia un attento controllo dell'umidità dell'ambiente di lavoro, per via dell'igroscopicità della fibra di lana, che potrebbe comportare una variazione delle sue caratteristiche e di conseguenza di quelle del pannello finito.

Terminata la cottura, lo stampo con all'interno il composto, soggetto a pressione costante, deve essere lasciato raffreddare: in questa fase il polimero fuso si solidifica, generando la matrice rigida fra le fibre di lana.

Il pannello può quindi essere estratto dallo stampo, e risulta direttamente pronto all'uso. Non si esclude tuttavia un controllo e un'eventuale rifinitura del prodotto, oramai ultimato. Come nella serie precedente, TECA panel può essere corredato di accessori per il montaggio, ipotizzati in PLA, tramite l'utilizzo di macchine di prototipazione rapida.

Il prodotto può quindi essere imballato e stoccato in magazzino, pronto per essere impiegato.

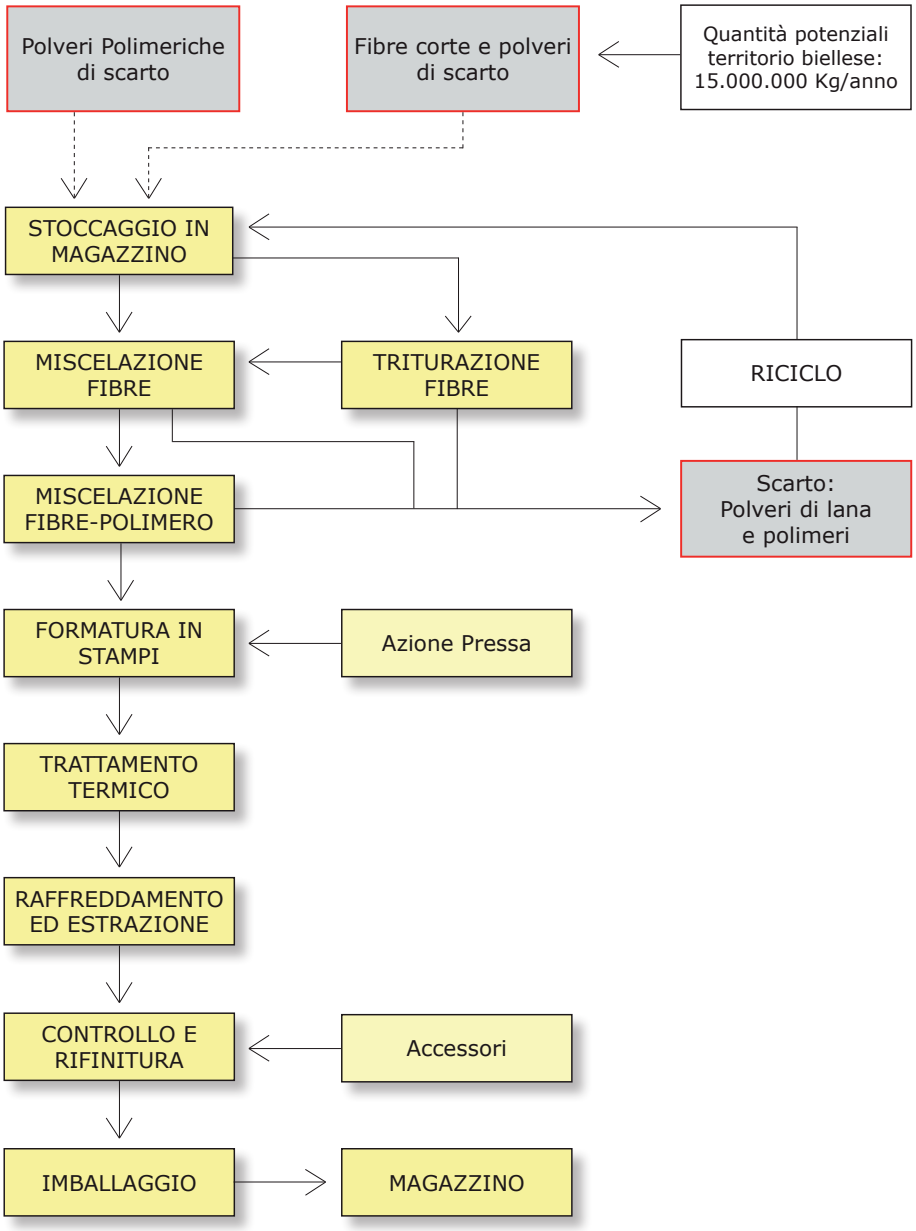


Figura 2: Flow Chart, ciclo produttivo ipotetico per TECA panel serie P, fibre di lana + polimero.

11

QUANTO COSTA TECA PANEL ?

- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283.

- http://www.internationalacoustic.com/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.dellachiara.it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.acustica-eternoivica.com/it/prodotti, consultato il 19/08/2019.
- https://www.masacoustics.it/, consultato il 19/08/2019.
- http://www.isolmant.com/it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.baux.se/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.keyhelmshop.it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.aleksandragaca.eu/, consultato il 19/08/2019.
- https://kvadrat.dk/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.theitaliantimes.it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.archiproducts.com/it, consultato il 19/08/2019.
- http://www.annekyyroquinn.com/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.acustico.com/index.html, consultato il 19/08/2019.
- http://www.fonoisolamento.it/, consultato il 19/08/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

11.1 PREMESSE: ANALISI QUALITATIVA SUI POSSIBILI VANTAGGI ECONOMICI DI TECA PANEL

A seguito dei risultati emersi durante la ricerca, come è possibile intuire già dal paragrafo 6.1, TECA panel si caratterizza anche per il suo valore economico, poichè si pone come obiettivo non solo l' essere vantaggioso e interessante all'interno del mercato dei pannelli fonoassorbenti, ma anche l' essere estremamente competitivo rispetto a prodotti simili.
Risulterebbe difficile per una comune persona valutare la reale sostenibilità e le relative caratteristiche di un pannello di questa tipologia, poiché si baserebbe esclusivamente, almeno per una scrematura iniziale, solo sul prezzo di vendita. Si sottolinea come pannelli con caratteristiche simili ed eventualmente riciclati, secondo altri schemi, abbiano un prezzo di mercato elevato, giustificato dal fatto che essi siano attenti e rispettosi della natura, cosa che si verifica in generale per tutti i prodotti legati a questa filosofia. Tale ragionamento, ampiamente diffuso, è frutto solo di strategie di marketing e non contempla alcuna reale giustificazione: queste caratteristiche dovrebbero essere garantite ad un prezzo commercialmente vantaggioso, perlomeno in relazione a prodotti simili, in modo da incoraggiare la società verso l'utilizzo di tale tipologia di prodotti (che risultano attualmente ancora poco accessibili).

L'analisi effettuata in relazione a TECA panel, espressa nei paragrafi successivi, non può essere considerata una vera e propria valutazione economica, poiché sarebbero indispensabili dati che in questa fase della sperimentazione non possono essere ancora dedotti. Quanto segue, così come si è verificato anche in merito al discorso sulle filiere produttive (capitolo 10), risulta essere solo una serie di ipotesi su possibili scenari economici futuri, che potrebbero fortemente variare in relazione ad un eventuale risvolto concreto. L'obiettivo pertanto è quello di cercare di attribuire un prezzo corretto, attraverso delle semplificazioni e delle licenze, ritenute accettabili in questo progetto. L'unico dato concreto, preso in considerazione, è quello relativo al prezzo di mercato delle materie prime, esposto nel paragrafi 5.1 e 6.2, che è stato fondamentale per la scelta delle serie di campioni da sviluppare, per via della sua profonda incidenza in una realistica fase di produzione.

Non approfondendo la parte relativa al design del prodotto, non è possibile conoscere le sue diverse composizioni finali. Ma, come sottolineato, l'idea di TECA panel è quella di fornire un materiale, anziché un unico prodotto, in grado di adattarsi alle diverse esigenze attraverso differenti forme e densità.

11.2 COMPARAZIONE FRA CATEGORIE DI MERCATO E TIPOLOGIE DI PANNELLI FONOASSORBENTI

Non disponendo ancora di un effettivo design per TECA panel, grazie alla possibilità e all'intenzione di generare un materiale in grado di offrire diverse soluzioni in relazione al suo utilizzo, è fondamentale, come primo passo, l'identificazione di un prezzo. Questo può essere individuato attraverso la suddivisione in categorie dei prodotti presenti in commercio, in relazione alle rispettive fasce di prezzo, in modo da poter effettuare una chiara comparazione.
Sono state quindi indicate quattro macro-categorie, venduti come pannelli fonoassorbenti (escludendo i pannelli termici ai quali vengono attribuite anche proprietà acustiche), all'interno delle quali sono state considerate tutte le tipologie esistenti, (sintetici, naturali o riciclati), generando un intervallo di prezzo rappresentativo.

Figura 1: Categoria 1, Isolmat, pannello in fibra riciclata di poliestere, http://www.isolmant.com/it/prodotti/isolmant-perfetto-tr/.

Figura 2: Categoria 1, Masacoustics, pannello in fibra riciclata di poliestere, https://www.masacoustics.it/categoria-prodotto/pannelli-fonoassorbenti/.

1.Pannelli per intercapedini: *da 4 a 35 €/m².*
In questa categoria vengono considerati i pannelli più comunemente diffusi, quelli impiegati nelle intercapedini, caratterizzati generalmente da basse densità. Essi possono avere le seguenti composizioni: base minerale, come la lana di roccia e la lana di vetro; origine vegetale come le fibre di legno e i pannelli in sughero con un prezzo medio che varia a partire da 10 €/m² in base allo spessore; i tessuti naturali come la lana, la canapa, la juta e la fibra di cocco; pannelli sintetici derivanti dall'industria petrolchimica, tra cui il polistirene, da 6 €/m² in base allo spessore, il poliuretano espanso, da 7 €/m² in base allo spessore, la gomma eventualmente anche riciclata e i pannelli a base

polimerica, con un prezzo medio di 9 €/m^2 in base allo spessore prescelto.
Questa tipologia di prodotti, in particolare quelli di origine minerale, vegetale e naturale, si presenta come pannelli, o rotoli, con bassa coesione e assenza di rigidità; dunque devono essere maneggiati e applicati con alcune accortezze e, in ogni caso, prevedendo una struttura rigida alla quale agganciarsi di origine metallica oppure in legno.
Alcuni di questi, soprattutto quelli nella fascia di prezzo più alta, sono formati da pannelli di tipo sandwich, associati in alcuni casi a lastre di cartongesso. All'interno di questa tipologia si considerano anche i pannelli fonoassorbenti costituiti da fibre tessili sintetiche (figure 1 e 2), generalmente poliestere, eventualmente anche totalmente o parzialmente riciclati, con un prezzo di mercato che varia a partire da 16 €/m^2, in base allo spessore.

2.Pannelli sfusi per l'ambiente interno - no di "design": *da 10 a 35 €/m^2.*
A questa categoria appartengono i pannelli utilizzati negli ambienti interni nei casi in cui non sono richieste particolari esigenze estetiche o architettoniche, come ad esempio negli studi di registrazione. Si fa riferimento generalmente ai pannelli in poliuretano espanso (figura 3) e melammina, nella tipica conformazione piramidale o a bugnato.

Figura 3: Categoria 2, Keyhelm, pannello poliuretano espanso, bugnato, https://www.keyhelm-shop.it/correzione-acustica/pannello-bugnato/.

Tuttavia, alcuni pannelli citati nella categoria precedentemente possono essere inseriti anche in questa, tra cui il cartongesso e i pannelli in sughero. Fondamentale è quindi conoscere la destinazione d'uso e le esigenze dell'ambiente in cui installare questa tipologia. Generalmente questi sono parzialmente rigidi, idonei per essere fissati sulle superfici senza l'ausilio di ulteriori strutture.

3.Pannelli per l'ambiente interno, di "design" (a muro o sospesi): *da 25 a oltre 200 €/m^2, oppure prezzo riferito al singolo pannello, in base alla tipologia.*
In questa categoria sono contenute tutte le pannellature vendute per l'applicazione in ambiente interno: esse sono in grado di garantire un corretto fonoassorbimento e allo stesso tempo qualità estetiche in grado, in

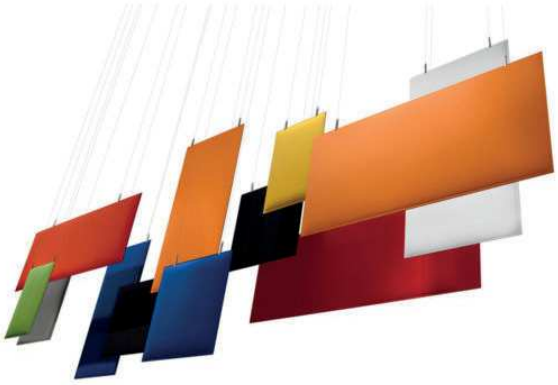


Figura 4: Categoria 3, dellachiara, pannelli sospesi in poliestere, https://www.dellachiara.it/categoria/comfort-acustico/pannelli-fonoassorbenti/.

alcuni casi, di caratterizzare l'ambiente nella sua composizione. Questi vengono generalmente applicati su una superficie verticale (figure 5 e 6) o in alternativa appesi al solaio come nuvole o isole (se appesi in orizzontale) o come baffles (se posizionati in verticale, figura 4). Questa fascia di prodotti parte dal semplice pannello in tessuto, eventualmente anche stampato, generalmente riempito di lana minerale, fino a vere e proprie composizioni caratterizzate da una profonda ricercatezza nel design e nella loro architettura, eventualmente firmate da celebrità del campo dell'arredamento, divenendo così vere e proprie opere d'arte. In quest'ultimo caso il prezzo può notevolmente superare quel-

Figura 5: Categoria 3, Baux, modelli in lana di legno, https://www.baux.se/patterns/.

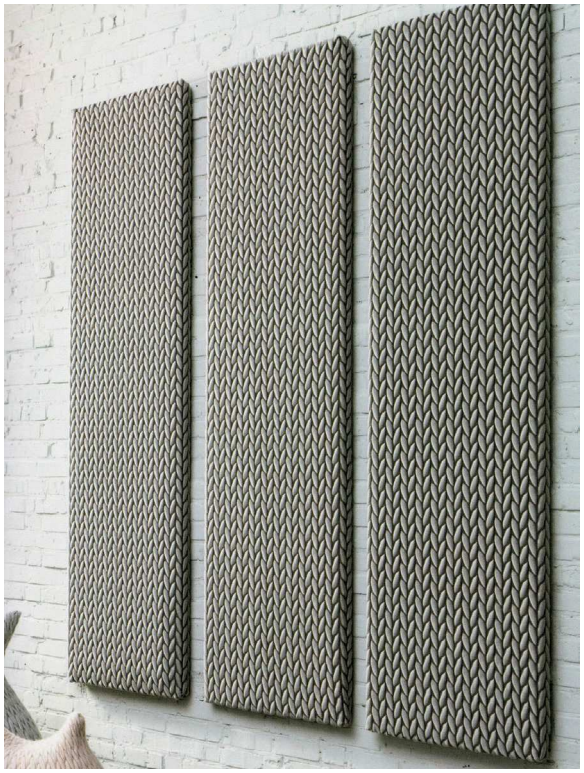


Figura 6: Categoria 3, Aleksandra Gaca, pannello tridimensionale in lana e fili metallici, Tyler Adams, Sound Materials, op cit.

lo massimo previsto per tale categoria. Tra i materiali e le soluzioni utilizzate ricordiamo: tessuto (poliestere), feltro, bamboo, legno, muschio, pareti verdi, funghi (mycelium), PET, polistirene, schiume di poliuretano, polipropilene, schiuma di alluminio, schiuma di legno, aerogel, alluminio, vermiculite, cellulosa, intonaci specifici, efte. Come accennato questi materiali spesso vengono composti, assemblati e studiati per comporre un design unico, ricercato e raffinato, che giustifica il prezzo elevato di alcuni prodotti.

4.Pannelli divisori, pannelli autoportanti, pannelli singoli, pannelli da scrivania, arredamento: *da 200 a oltre 5.000 € al pezzo o a composizione, in base alla tipologia.*

A quest'ultima categoria appartengono una vasta serie di tipologie. Tra di esse troviamo: i pannelli divisori, utilizzati generalmente per dividere ambienti di lavoro o per modulare la composizione di un locale in base alle esigenze (figura 8); i pannelli singoli, posizionati una tantum all'interno dei locali in modo da controllare il fonoassorbimento (figura 7). Questi sono di tipo autoportante, generalmente supportati da una struttura metal-

Figura 7: Categoria 4, divisore di ambienti regolabile, tessuto e alluminio, http://www.internationalacoustic.com/categoria-prodotto/soluzioni-acustiche/.

Figura 8: Categoria 4, dellachiara, soluzione modulabile in tessuto e acciaio, https://www.dellachiara.it/shop/comfort-acustico/kivo-pannello-acustico/.

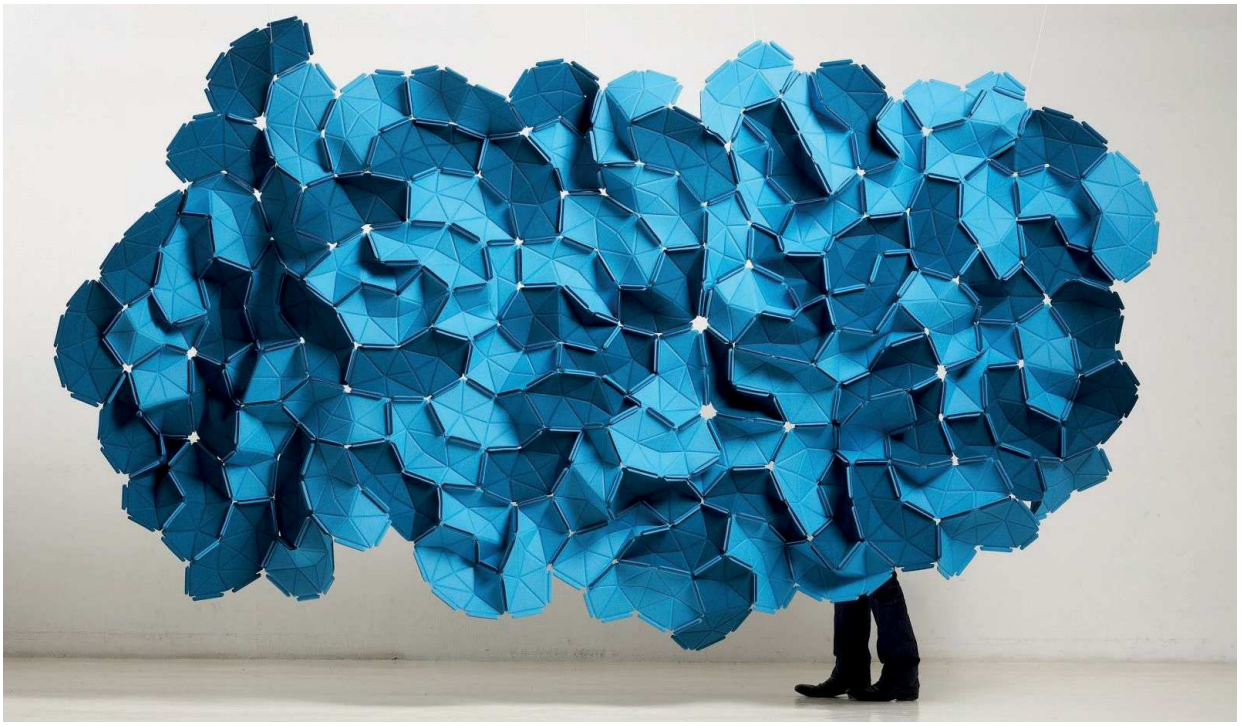


Figura 9: Categoria 3 e 4, Kvdrat Cloud, assemblaggio componibile in schiuma termocompressa e tessuto, https://kvadrat.dk/.

lica, sia per attribuire loro rigidità sia per il corretto posizionamento, comportandone un aumento del prezzo. Inoltre, ricordiamo i pannelli da scrivania, posizionati al fine di delimitare lo spazio di lavoro in uffici open space. Anche all'interno di questa categoria, come per i pannelli di design per ambienti interni, le soluzioni sono profondamente incisive per la composizione e il linguaggio formale che caratterizza lo spazio interno in cui si collocano (figura 9). Questi pannelli infatti, per via della loro ricercatezza e del loro design, possono essere definiti come oggetti d'arredo. A tal proposito esistono alcune tipologie di arredamenti come lampadari, strutture e scrivanie composte da materiale fonoassorbente, create spesso come esercizio di stile, e in ogni caso vendute a prezzi molto elevati.

Si sottolinea che in queste ultime due categorie, i prodotti sono generati da materie non riciclate, tuttavia alcuni risultano riciclabili o biodegradabili. Esistono alcuni prodotti, pannelli, composizioni e oggetti d'arredo, di alta fascia, fabbricati partendo da scarti o sottoprodotti di altre filiere ma spesso elo-

giati e pubblicizzati per adesione alla causa da parte del progettista, non per generare una vera filiera sostenibile.
Infine, valido per tutte le categorie, spesso le misure delle performance acustiche non vengono effettuate, ma semplicemente dedotte dalla tipologia del prodotto, che viene comunque venduto come pannello fonoassorbente.
Da questa analisi, nata con lo scopo di capire le fasce di mercato delle diverse categorie selezionate, è tuttavia emerso come TECA panel sia estremamente innovativo. Esso, sulla base delle sperimentazioni effettuate, può generare prodotti per tutte le categorie analizzate, da quelle di prezzo minore, semplici pannelli, fino alla realizzazione di esercizi di stile, generando composizioni e architetture dal design profondamente ricercato. Tutte le realizzazioni deriverebbero comunque da un processo similare, poiché varierebbe solo la formatura del prodotto e i relativi accessori. In merito a quest'ultimo punto si sottolinea come l'influenza degli accessori, spesso metallici (come evidenziato nell'ultima categoria), determini un incremento del prezzo. Scelto il mixdesign, fra quelli esposti in questo progetto, esso può essere inserito all'interno di una dima di qualsiasi forma, generando una vastissima possibilità di prodotti, caratterizzati dal medesimo prezzo (portando a una potenziale soluzione vincente).

11.3 VALUTAZIONE ECONOMICA: COSTI RELATIVI AD IPOTETICI SCENARI DI MERCATO

Dopo la catalogazione per tipologia di prodotti attualmente in commercio, e relative fasce di prezzo, può essere ora sviluppato un ragionamento per determinare un costo per TECA panel. Si premette che questa analisi non si vuole sostituire ad una valutazione economica, ma risulta essere semplicemente l'unica possibilità per analizzare il valore di questo prodotto.

Non essendo stato definito un design, risulta indispensabile scegliere una composizione per avviare il procedimento. Al fine esemplificativo, verranno considerati dei pannelli rettangolari di dimensioni analoghe a quelli realizzati nella sperimentazione del capitolo 8: in particolare si considerano i pannelli S012 e P015, entrambi composti nelle misure di 20x30x3,1 cm, con una massa di 315 g e una densità media di 169 Kg/m^3. Differiscono invece per la sostanza collante utilizzata e il conseguente processo produttivo.

Per avviare il ragionamento su questo fronte, sono state effettuate delle ipotesi personali e stabilite delle condizioni, che, se modificate, potrebbero avere una forte incidenza sul costo finale indicato. Innanzitutto, viene contemplata un'attività produttiva avviata, non vengono quindi prese in considerazione quelle che sono le spese d'investimento e le relative spese di ammortamento per

l'acquisto, la fornitura e la posa dei macchinari, delle attrezzature, dell'impiantistica e del salone in cui si svolgerà la produzione. Non viene inoltre tenuto conto delle spese di progettazione, di gestione e dei costi per i permessi e per le certificazioni per il ritiro e l'utilizzo di scarti industriali. Oltre a queste ipotesi viene presa in considerazione l'idea di installare sulla copertura un impianto di pannelli fotovoltaici ed eventualmente anche di un sistema di accumulatori, in grado di garantire autosufficienza energetica per tutta la produzione e sopperire ad eventuali altri consumi di energia elettrica.

Risalutano quindi significative le voci di costo riguardanti il trasporto, la materia prima, lo scarto o il sottoprodotto e quelle della manodopera.

Il costo della materia prima è l'unico dato certo all'interno di questa analisi: esso corrisponde al prezzo di mercato dei prodotti utilizzati ed esposti durante la fase di sperimentazione. Emerge tuttavia un problema relativo alla fornitura degli scarti. Infatti come tali, dovrebbero essere forniti gratuitamente dalle aziende, poiché verrebbero alleggerite del relativo costo di smaltimento. Si aprirebbero quindi due scenari alternativi. Il primo andrebbe a considerare l'eventualità che l'azienda, decida di attribuire un prezzo a questa tipologia di scarto, una volta recepito il valore di tale risorsa. La seconda invece, riguarda la possibilità di guadagno dal ritiro degli stessi, con il medesimo prezzo che si pagherebbe per la dismissione in discarica. Quest'ultima alternativa è stata suggerita da un imprenditore nel settore, che commercia prodotti simili con questa filosofia, sostenendo inoltre che in determinati Paesi, al di fuori del territorio italiano, le aziende sono disposte a pagare anche un prezzo maggiore, rispetto a quello di smaltimento, proprio al fine di valorizzare e sostenere tali processi. Tali variabili, che verranno analizzate in questo paragrafo, hanno quindi importanti ripercussioni sul prezzo finale del prodotto.
La voce di costo relativa alla manodopera risulterà quella con un'influenza maggiore. In base allo scenario designato verranno presi in considerazione due artigiani operanti nel processo produttivo. A tal riferimento, gli scenari dipenderanno anche dalla filiera produttiva e, nonostante venga seguita quella esposta nel capitolo 10, si sottolinea come essa possa variare da una realtà fortemente artigianale, a una realtà industriale, dotata di sistemi di automazione, che, a fronte di un investimento maggiore, porterebbero ad abbattere il costo della manodopera e ad un sensibile aumento della produzione. Come valore medio, a scopo esemplificativo, viene contemplato un costo aziendale complessi-

vo per ogni artigiano considerato, nell'anno 2019, con un tempo a contratto indeterminato, di circa 34.000 €/anno[1].

Con il termine trasporto, si fa riferimento al prezzo che l'azienda di pannelli dovrebbe sostenere per la fornitura delle materie prime. Anche in questo caso risulta basilare effettuare una serie di ipotesi. Come primo punto è indispensabile fissare una sede dove si ipotizza la produzione di TECA panel, fondamentale per verificare le distanze. Essa viene ipotizzata nel comune di Valdilana, in provincia di Biella, come buon compromesso territoriale per le aziende biellesi. Inoltre rappresenta una località ricca di imprese, di locali e di saloni industriali in disuso, a testimonianza di un passato storico, caratterizzato da un forte sviluppo nel settore tessile e nello specifico nell'impiego della lana. Questa iniziativa può essere considerata come un'idea per avviare un processo di innovazione e di recupero di queste zone che negli ultimi vent'anni, soprattutto per via della chiusura delle fabbriche, ha generato un ciclo di spopolamento che non promette nulla di positivo per il prossimo futuro. La sede individuata risulterebbe a una distanza di circa 8 Km, nel caso venga considerata una fornitura dei soli scarti provenienti dal Lanificio Reda e dal Feltrificio Biellese, come nello scenario A, e a una distanza massima di circa 25 Km considerando una fornitura anche da altre aziende sul territorio biellese (paragrafo 4.3), per consentire una produzione annuale continua (come emergerà dalle successive valutazioni). Definita la distanza, è necessario attribuire un prezzo indicativo per il trasporto di tale materiale. La ricerca risulta piuttosto complessa, poiché sono implicate numerose variabili in relazione alla ditta di autotrasporti, ai contratti, alle dimensioni dell'automezzo a disposizione e all'organizzazione dell'attività giornaliera. In modo indicativo, è stato riferito da un impiegato in questo settore, che nel caso considerato sarebbe richiesta una cifra di circa 100 € a trasporto, per coprire le distanze indicate. Si considera l'utilizzo di un autocarro di medie dimensioni (carico < 3,5 t), con il quale, secondo calcoli indicativi, potrebbero essere trasportati , per via dell'elevato volume di questa tipologia di scarti, circa 500 Kg di polvere e fibre corte di lana.

Tale costo di trasporto verrà esteso anche alla fornitura dei polimeri e della sostanza collante. I polimeri in questione sono forniti dalla Verniciatura Industriale Sassone, collocata nel del raggio di 20 Km rispetto alla sede di produzione individuata. Nel caso della sostanza collante, non avendo dati sufficienti

1_https://www.theitaliantimes.it/economia/contratto-tempo-indeterminato-costo-azienda_050719/, consultato il 19/08/2019.

per delineare un prezzo congruo, verrà confermato lo stesso valore.

Non si esclude la possibilità, non esplorata, per la quale sia direttamente un'azienda tessile a produrre TECA panel attraverso il recupero dei propri scarti, abbattendo così i costi di trasporto.

A fronte delle ipotesi effettuate e delle innumerevoli variabili riportate, verranno esposti alcuni scenari teorici per individuare un costo ipotetico per i pannelli considerati.

SCENARIO A_Serie P

In questa prima ipotesi si consideri la sola fornitura di scarti di polveri e fibre corte di lana, dal Lanifio Reda e dal Feltrificio Biellese, con una quantità totale di circa 11.500 Kg/anno.

Si consideri il pannello P015, composto da fibre di lana e polimeri, con un rapporto di 1:0,5 fra le due componenti. Per la sua composizione la ricetta prevede l'utilizzo di 222 g di lana e 111 g di polimero.

Vengono quantificati 220 giorni lavorativi all'anno, con un impiego di 8 ore al giorno, quindi 160 ore mensili e 1.760 ore annuali [2].

Supponendo di utilizzare tali quantità di scarti, avremo: 11.500 Kg / 0,222 Kg = 51.800 pannelli all'anno, approssimabili a 50.000 pannelli, per via degli scarti e di tutte le possibili variabili. Questo comporterebbe una produzione di circa 28 pannelli all'ora, e indicativamente 4.500 pannelli al mese, per una massa di 1.000 Kg di fibre e 500 Kg di polimeri.

Considerando l'ipotesi peggiore, per la quale gli scarti di lana vengano venduti e non ceduti a titolo gratuito, in base al costo di vendita dei sottoprodotti essi potrebbero avere un prezzo di circa 1 €/kg. Ciò comporterebbe una prima voce di costo pari a 1000 €/mese.

I polimeri, invece, nella condizione peggiore, verrebbero forniti gratuitamente.

I trasporti possono essere quantificati, considerando due forniture al mese, con un costo di circa 200 €/mese. All'interno di tale prezzo è considerato anche il trasporto di 500 Kg di polimeri al mese, poiché, per via della loro densità, comporterebbero comunque un volume minimo e quindi un costo di trasporto, compreso in quella cifra.

Per queste quantità, si immagina una produzione artigianale, composta da due artigiani, con un relativo costo di 68.000 €/anno e quindi 5.666 €/mese.

Il totale delle voci di costo, per tali condizioni coincide con 6.866 €/mese; è possibile dunque ricavare il costo di un singolo pannello,

2_Equivalente a tempo pieno o FTE (full-time equivalent).

corrispondente a circa 1,5 €/pannello e dunque 25 €/m^2.
All'interno dello stesso scenario, si considera l'eventualità secondo la quale gli scarti del Lanificio Reda e dal Feltrificio Biellese, possano essere forniti gratuitamente, con evidenti vantaggi per entrambe le parti. Mantenendo costanti tutte le altre variabili, il costo totale per la produzione di 4.500 pannelli/mese sarebbe di 5.866 €/mese, e di conseguenza si avrebbe un costo di 1,3 €/pannello. Estendendo il costo a un metro quadro, risulterebbe 21,7 €/m^2, con un risparmio di 3,3 €/m^2, rispetto alla soluzione precedente.
Infine si considera l'ipotesi ottimale, secondo la quale ci possa essere un guadagno per il ritiro degli scarti. Esso può essere individuato in circa 0,20 €/Kg per gli scarti forniti da Reda, mentre per gli scarti forniti dal Feltrificio, in assenza di dati certi, si ipotizza un guadagno di circa 1 €/Kg, come dichiarato nel paragrafo 4.3. I polimeri invece permetterebbero un guadagno medio di circa 0,65 €/kg. Questo porterebbe a una spesa totale di 4.941 €/mese, con un conseguente costo di 1,1 €/pannello, corrispondente a 18,3 €/m^2.

Da questa prima valutazione emerge, come la fornitura di materie prime sia del tutto rilevante, poiché il relativo prezzo, negativo o positivo, può generare una forbice fra i due casi estremi significativa, con una differenza di ben 6,7 €/m^2.

N. pannelli/mese		4.500		
Scarti €/mese	Fibra	1.000	0	- 600
	Polimeri	0	0	- 325
Trasporto: €/mese		200		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		25	21,7	18,3

Tabella 1: Scenario A_Serie P, riepilogo voci di costo.

SCENARIO A_Serie S

In questa ipotesi, viene mantenuto lo stesso scenario del caso precedente, considerando però il pannello S012, contraddistinto dalle medesime caratteristiche, ma composto da fibre di lana e colla di amido di mais, con rapporto 1:1 fra i due componenti. La ricetta di questo pannello prevede 300 g di lana e 300 g di colla, che in relazione ai dati del primo scenario, comporta: 11.500 kg / 0,3 Kg = 38.3333 pannelli all'anno, approssimati a 37.000 pannelli/anno. Questo dato si traduce in 21 pannelli all'ora, in 3.360 pannelli mensili con una massa di circa 1.000 Kg di fibre e 1.000 Kg di colla, alla densità di utilizzo. Anche in questo caso si considera un prospetto per il quale le fibre scartate vengano

vendute a un prezzo di 1 €/kg, le spese di trasporto identificate in 200 €/mese e la manodopera quantificabile in 5.666 €/mese in una realtà artigianale.
Non avendo dati esatti riferiti alla fornitura dell'amido di riso e alla produzione di colla, che comunque potrebbe essere pensata all'interno della filiera stessa, con un costo già considerato nella manodopera indicata, si quantifica un prezzo di trasporto di 200 €/mese.
Questo scenario condurrebbe a una voce totale di costo, di 7.066 €/mese; il costo di un singolo pannello corrisponderebbe a 2 €, e si avrebbe un costo di 34 €/m^2.
Considerando una fornitura gratuita degli scarti, mantenendo inalterate le precedenti variabili, il costo scenderebbe a 1,8 €/pannello, dunque a 30 €/m^2.
Se, come nello scenario precedente, venisse considerato un guadagno nel ritiro delle fibre di lana presso il Feltrificio Biellese e il Lanificio Reda, mantenendo comunque nullo il dato riferito all'amido di riso, si avrebbe una spesa mensile di 5.466 €, per un costo nell'ipotesi più vantaggiosa di 1,6 €/pannello, corrispondente a 27 €/m^2.

Come nello scenario precedente emerge come sia del tutto fondamentale il valore attribuito allo scarto aziendale, il quale genera anche in questo caso una forbice di 7 € fra le ipotesi opposte.
Risulta piuttosto rilevante una seconda conclusione: come i pannelli della serie S, a parità di variabili e di processo, siano caratterizzati da un costo superiore rispetto a quelli della serie P, nonostante non si sia presa in considerazione la colla, che avrebbe determinato, inoltre, un ulteriore aumento del costo finale. La causa della differenza, circa il 38%, può essere riconosciuta sia nel maggior quantitativo di fibre di lana necessario per generare un pannello con le stesse caratteristiche, sia nel processo, mediamente più lungo è complesso, rispetto a quello ipotizzato per la formazione di polimeri.

N. pannelli/mese		3.360		
Scarti €/mese	Fibra	1.000	0	- 600
	Collante	0	0	0
Trasporto: €/mese		400		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		34	30	27

Tabella 2: Scenario A_Serie S, riepilogo voci di costo.

Vengono ora presentati due scenari, in cui si presuppone il passaggio da una realtà artigianale, a una realtà industriale, contraddistinta da una maggiore automazione e un livello tecnologico di gestione del processo

più avanzato. La produzione , rispetto allo scenario A, verrà infatti raddoppiata mantenendo costante la manodopera. Infatti, se anch'essa fosse raddoppiata, il risultato sarebbe il medesimo, generando solo un processo artigianale a scala maggiore.
Si potrebbe in questa condizione, portare allo stesso quantitativo la produzione relativa alle serie S e P; tuttavia viene mantenuto il divario, a causa di una filiera caratterizzata da tempistiche più lunghe. Questo passaggio genererebbe una maggiore richiesta di scarti di polveri di lana, problema di facile risoluzione, per via delle enormi quantità presenti sul territorio di questa tipologia di scarto come emerso nel paragrafo 4.3.

SCENARIO B_Serie P

Il ragionamento in questo scenario prevede un punto di partenza opposto rispetto al precedente: si parte dalla produzione mensile per arrivare a definire tutte le variabili annesse. Viene considerata una produzione mensile di 9.000 pannelli, corrispondente a 56 pannelli/ora, con una richiesta di 2.000 Kg/mese di scarti, per un totale di 23.000 Kg/anno di fibre di lana, quantità minore rispetto a quella prodotta sul territorio.
In modo analogo al precedente scenario, in questa prima ipotesi, si considera un costo della fibra di 1 €/kg, un costo mensile di due artigiani di 5.666 €, una spesa di trasporto di 400 €/mese per le fibre e una spesa aggiuntiva di 100 €/mese, per la fornitura dei polimeri, equivalente a un trasporto, a causa delle quantità non più trascurabili.
La voce di costo mensile corrisponde a 8.166 €/mese, con un costo del pannello di 0,9 €, e un costo di 15 €/m^2.
Prendendo in considerazione la fornitura gratuita degli scarti, confermando le altre variabili, il costo mensile da sostenere da parte dell'azienda risulta di 6.166 €, comportando un costo di 0,7 €/pannello e 11,5 €/m^2.
Nell'ipotesi secondo cui ci fosse un guadagno nel recupero degli scarti, equivalente a una media di 0,6 €/Kg per gli scarti tessili e 0,65 €/Kg per gli scarti polimerici, il costo da sostenere per l'azienda sarebbe di 4.316 €/mese, questo comporterebbe il costo vantaggioso di 0,50 €/pannello e quindi di 8 €/m^2.

N. pannelli/mese		9.000		
Scarti €/mese	Fibra	2.000	0	-1.200
	Polimeri	0	0	- 650
Trasporto: €/mese		500		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		15	11,5	8

Tabella 3: Scenario B_Serie P, riepilogo voci di costo.

SCENARIO B_Serie S

Viene riproposto il medesimo scenario B, ma basando il ragionamento sul pannello S012.

Le variabili rimangono quelle esposte per tale scenario, ma si adattano a questa tipologia di pannelli. La produzione mensile viene portata a 6.720 pannelli, per una produzione oraria di 42 pannelli, con un consumo di 2.000 Kg/mese di scarti di fibre e polveri di lana.

Il costo relativo alle fibre, alla manodopera e al trasporto rimangono costanti, con una spesa aggiuntiva per il trasporto della colla, 400 €/mese.

Questi dati portano a una voce di costo complessiva di 8.466 €/mese, e al relativo costo del pannello di 1,25 €, e quindi 21 €/m^2.

Ipotizzando nuovamente una fornitura gratuita degli scarti, si scenderebbe a 6.466 €/mese. Ne deriva un costo del pannello pari a 1 €, e conseguentemente un costo al metro quadro corrispondete a 16 €.

Infine, nell'ipotesi migliore in cui ci fosse un guadagno derivante dal riutilizzo degli scarti, il pannello avrebbe un costo di 0,8 € con un relativo costo di 13 €/m^2.

Dallo scenario B emerge come un aumento dell'automazione all'interno della filiera, in congruenza con le aspettative, porti a un drastico abbattimento dei costi, a discapito però, di un investimento maggiore nella fase iniziale, e un conseguente ammortamento; queste opzioni non vengono considerate in questo progetto, poiché si basa su un'ipotetica attività avviata.

N. pannelli/mese		6.720		
Scarti €/mese	Fibra	2.000	0	-1.200
	Collante	0	0	0
Trasporto: €/mese		800		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		21	16	13

Tabella 4: Scenario B_Serie S, riepilogo voci di costo.

SCENARIO C_Serie P

In questo scenario, al fine di un ulteriore abbattimento dei costi, si incrementa nuovamente la produzione, triplicandola rispetto a quella iniziale, portando dunque la filiera a produrre pannelli in modo praticamente autonomo.

Per non ripetere i dati, verranno esplicitati solo i risultati di tale analisi.

La produzione mensile porterebbe alla fabbricazione di 13.500 pannelli con una massa di circa 3000 Kg/mese di fibre e 1.500 Kg/mese di polimeri.

Nella prima ipotesi si consideri la manodopera di due persone, una spesa complessiva

di trasporto di circa 800 €/mese, tenendo conto sia dei polimeri sia delle fibre di lana, e di un costo dello scarto di 1 €/kg.
Costo relativo a un pannello: 0,7 €, corrispondente a 11,7 €/m^2.
Ipotesi di fornitura gratuita dello scarto: costo del pannello di 0,5 €, corrispondete a 8 €/m^2.
Guadagno in fase di ritiro dello scarto: costo del pannello di 0,3 €, corrispondete a 4,6 €/m^2.

N. pannelli/mese		13.500		
Scarti €/mese	Fibra	3.000	0	-1.800
	Polimeri	0	0	- 975
Trasporto: €/mese		800		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		11,7	8	4,6

Tabella 5: Scenario C_Serie P, riepilogo voci di costo.

SCENARIO C_Serie S

Viene riproposto lo scenario C serie P, utilizzando però la colla di amido di riso come collante.
La produzione mensile consisterebbe in 10.080 pannelli con una massa di circa 3.000 Kg/mese di fibre e 3.000 Kg/mese di colla.
La manodopera è la medesima, mentre i costi di trasporto per le fibre e l'amido sono identificabili in 1.200 €/mese. Considerando il costo dello scarto, il pannello avrebbe un ipotetico costo di 1 €, corrispondente a 16 €/m^2.
Per mezzo di una fornitura gratuita dello scarto: costo del pannello di 0,7 €, corrispondete a 11,5 €/m^2.
Ipotizzando un guadagno in fase di ritiro dello scarto: costo del pannello di 0,5 €, corrispondete a 8 €/m^2.

N. pannelli/mese		10.800		
Scarti €/mese	Fibra	3.000	0	-1.800
	Collante	0	0	0
Trasporto: €/mese		1200		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		16	11,5	8

Tabella 6: Scenario C_Serie S, riepilogo voci di costo.

SCENARIO D

Questo scenario nasce con lo scopo di evidenziare i vantaggi dell'utilizzo di una matrice riciclata o eventualmente caratterizzata da un costo minimo rispetto all'acquisto di una sostanza collante commerciale. Il confronto avverrà rispetto allo scenario A, e quindi una produzione di tipo artigianale, ma potrebbe

essere estesa anche agli altri scenari.
Considerando la serie P, la voce di costo consiste nel prezzo di acquisto del polimero. Viene considerato l'acquisto del PLA, che, come emerso nei vari capitoli del progetto, ha indubbiamente notevoli vantaggi rispetto al polimero sintetico utilizzato, fatta eccezione per il prezzo: il costo del PLA può essere stimato in circa 20 €/kg.
Contemplando l'ipotesi secondo la quale gli scarti vengano pagati, si ha una spesa totale di 6.866 €/mese alla quale deve essere aggiunto il costo della nuova matrice. Considerando la produzione di 4.500 pannelli/mese, questi necessitano, secondo la ricetta considerata, di circa 500 Kg/mese di PLA con un costo di 10.000 €/mese. Tenendo conto di queste condizioni il pannello avrebbe un costo di 3,7 € e un rispettivo costo al metro quadro di 62,5 €/m^2, risultato notevolmente maggiore rispetto ai 25 €/m^2 ottenuti nella prima valutazione.
Considerando una fornitura gratuita delle fibre di lana il prezzo del singolo pannello risulta di 3,5 €, e quindi 58,8 €/m^2.
Se invece la fornitura di fibre consistesse in un guadagno, il pannello avrebbe un costo di 3,4 €, quindi 56,5 € al metro quadro.

N. pannelli/mese		4.500		
Scarti €/mese	Fibra	1.000	0	- 600
	PLA	10.000	10.000	10.000
Trasporto: €/mese		200		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		62,5	58,8	56,5

Tabella 7: Scenario D_Serie P, riepilogo voci di costo.

Si osservi ora il medesimo scenario, ma in relazione alla produzione del pannello con una sostanza collante commerciale di origine naturale. Come illustrato nel paragrafo 5.1 la forbice di prezzo per queste sostanze è piuttosto elevata: si è scelto di considerare l'acquisto di una colla con un prezzo intermedio: la colla naturale Coccoina, avente un costo di 40 €/kg.
In relazione allo scenario A, e alla produzione di 3.360 pannelli al mese, sarebbero necessari 1.000 kg di colla mensili, con un prezzo di 40.000 €. Il prezzo del pannello, nell'ipotesi di un costo iniziale delle fibre, sarebbe di 14 €, per 233 € al metro quadro. Nell'ipotesi di una fornitura gratuita dello scarto di fibre, il costo sarebbe di 13,7 €/pannello (228 €/m^2), e in quella di un eventuale guadagno dal loro ritiro, consisterebbe in 13,5 €/pannello (225 €/m^2).

N. pannelli/mese		4.500		
Scarti €/mese	Fibra	1.000	0	- 600
	Colla Coccoina	40.000	40.000	40.000
Trasporto: €/mese		400		
Mano d'opera: €/mese		5.666		
Pannello: €/m^2		233	228	225

Tabella 8: Scenario D_Serie S, riepilogo voci di costo.

CONCLUSIONI

Dallo schema riassuntivo (tabella 9), è possibile confrontare direttamente i costi ipotizzati all'interno di questa valutazione. Come emerso dall'analisi effettuata in questo capitolo, risulta evidente un notevole vantaggio in termini economici per quanto concerne i pannelli realizzati con scarti di polimeri, indipendentemente dallo scenario considerato. Questo vantaggio risulta costante in relazione a tutte le ipotesi di produzione e a tutti gli scenari creati, con un risparmio medio del circa 35% rispetto alla serie S, basata su colla di amido. Inoltre è possibile notare come, per entrambe le serie, ci sia un notevole vantaggio nell'avere una fonte di guadagno nel riutilizzo degli scarti, come già si verifica all'interno di determinate filiere nel campo dei rifiuti tessili. Come da aspettative, il passaggio da una produzione artigianale a una produzione automatizzata, comporta un forte risparmio sul costo del pannello, con un salto da 21,7 €/m^2 fino ad arrivare al prezzo competitivo di 4,6 €/m^2. Tuttavia non è possibile indicare se tali costi possano subire un ulteriore ribasso, a seguito di una industrializzazione ancora maggiore, o se in una realtà artigianale, i costi possano essere più elevati. Come premesso tali risultati sono da considerarsi ipotetici e validi solo in queste condizioni: non si esclude che in una concreta realtà tali cifre possano subire importanti variazioni, in funzione di costi aggiuntivi, ulteriori variabili, deducibili solo da una effettiva valutazione economica.

Si sottolinea che tutti quelli indicati sono prezzi riferiti al costo del pannello, e non a quello relativo alla vendita. Esso dovrebbe, inoltre, tenere conto del guadagno aziendale, di ulteriori spese di gestione, spese di innovazione, spese di sostituzione dei macchinari, della manutenzione degli stessi e di ulteriori variabili non preventivate. Per definire il prezzo di vendita, in linea di massima, è plausibile triplicare il costo del pannello considerato. Esso, in ogni caso, porterebbe a un forte vantaggio rispetto alle categorie elencate nel precedente paragrafo e riassunte nella tabella 10; con tale prezzo di mercato, TECA panel, grazie alla sua modularità, potrebbe essere di forte concorrenza sia nel-

la categoria di pannelli utilizzati per intercapedini, ma soprattutto in accordo con gli intenti del progetto, nella categoria di pannelli per ambienti interni. Grazie alla sua praticità e alla possibilità di assumere la forma in base allo stampo utilizzato, esso potrebbe divenire un elemento in grado di caratterizzare la composizione di un ambiente interno, in seguito ad un eventuale studio di design del prodotto. In quest'ultimo caso il prezzo non dovrebbe subire forti variazioni, divenendo quindi, grazie anche alle sue caratteristiche, un prodotto di forte interesse per il mercato attuale.

Lo sviluppo degli accessori, non viene considerato all'interno di questo studio, ma nel caso di un valutazione economica essi dovrebbero essere analizzati con profonda attenzione, poiché potrebbero in alcuni casi superare il prezzo del pannello stesso. Si pensi per esempio all'eventualità che ogni pannello venga fornito di alcuni elementi di aggancio realizzati in PLA, il relativo costo sarebbe di 0,2 €/10 g, e in base alla loro massa potrebbe raggiungere il costo del pannello stesso, che nell'ipotesi più vantaggio-

	artigianato					*industriale*				*colle commerciali*		
	Scenario A [€/m^2]			**Scenario B** [€/m^2]			**Scenario C** [€/m^2]			**Scenario D** [€/m^2]		
	☹	😐	☺	☹	😐	☺	☹	😐	☺	☹	😐	☺
Serie P ***fibre + polimeri***	25	21,7	18,3	15	11,5	8	11,7	8	4,6	62,5	58,8	56,5
Serie S ***fibre + amido riso***	34	30	27	21	16	13	16	11,5	8	233	228	225

Tabella 9: Tabella riassuntiva dei costi analizzati, per i due pannelli selezionati, in funzione dello scenario prescelto: scenario A considera una realtà artigianale, scenario C una realtà industriale e scenario B una situazione intermedia. Nello scenario D si riprende lo scenario A, ma sostituendo le colle riciclate con l'acquisto di colle commerciali. Le emoticons fanno riferimento all'acquisto degli scarti (vedi legenda): dalla situazione più negativa, all'essere ceduti gratuitamente in quella centrale, fino all'essere pagati per il loro ritiro nella probabilità migliore.

Legenda: ☹ *acquisto degli scarti;* 😐 *cessione gratuita degli scarti;* ☺ *pagamento degli scarti.*

sa avrebbe un prezzo di 0,5 €. Ovviamente questo è valido per i pannelli considerati e quindi di piccole dimensioni; a dimensioni maggiori tale influenza sarebbe minore, e comunque, anche nella categoria 4, il peso degli accessori e delle strutture sul prezzo risulta elevato.

Anche se i costi di questa valutazione non fossero del tutto attendibili, emerge dallo scenario D, come a condizioni costanti rispetto allo scenario A, l'acquisto di una sostanza collante commerciale, rispetto all'utilizzo di scarti aziendali, porti ad un aumento esponenziale del prezzo. Nella serie P, la sostituzione dello scarto polimerico sintetico con un polimero di origine naturale, come il PLA, comporta un incremento del 271%, raggiungendo il 760% nel caso di utilizzo di una colla naturale commerciale, la Coccoina, rispetto a una derivante dall'amido di riso, prodotto di scarto della filiera.

Nel caso della serie P, tale variazione, sarebbe tuttavia giustificata dall'utilizzo di un prodotto biodegradabile e di origine naturale, rispetto a uno scarto di origine sintetica; solo una valutazione approfondita, in relazione alle ideologie imprenditoriali di un'azienda, porterebbe a una scelta obiettiva su quale sia la strada più conveniente. All'interno di questo percorso la risposta può essere trovata nella volontà di utilizzare un polimero naturale, purtroppo a causa delle possibilità di questo lavoro non è stato possibile sperimentare tale applicazione.

	Prezzo Pannello: €/m²
Serie P, scenario A Condizione migliore (costo analizzato x 3)	54,90
Serie P, scenario B Condizione migliore (costo analizzato x 3)	24,00
Serie P, scenario C Condizione migliore (costo analizzato x 3)	13,80
Pannelli per intercapedini	da 10 a 35
Pannelli sfusi per l'ambiente interno (no design)	da 10 a 35
Pannelli sfusi per l'ambiente interno di design, a muro o sospesi	da 25 a >200
Pannelli divisori, autoportanti, singoli, da scrivania, arredamento	da 200 a >5.000
Celenit, texture 2mm, spessore 35 mm, non colorato, forma rettangolare, senza accessori	25,98

Tabella 10: Confronto fra i prezzi di TECA panel studiati in questo paragrafo (moltiplicati per 3, al fine di avere un valore significativo), con i prezzi per macro categorie analizzate al paragrafo 11.2. Inoltre in ultima posizione è riportato il prezzo di un pannello di Celenit (Listino Isoldesign 2019).

12

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE TECNICHE E VERIFICA DI POSA IN OPERA

- https://www.acustico.com/index.html, consultato il 3/09/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

12.1 TEST DI RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE DI TECA PANEL

Conclusasi la parte relativa allo sviluppo del pannello, alla sperimentazione, alla determinazione delle performance acustiche, all'ipotesi di una filiera produttiva e alla valutazione acustica, verranno ora analizzate le principali caratteristiche meccaniche.

A differenza degli isolanti termici, per i quali le caratteristiche meccaniche diventano parte delle peculiarità del prodotto, dalla lettura di schede tecniche relative a pannelli simili presenti sul mercato, si nota come questa tipologia di dati e risultati non venga presa in considerazione.

E' stato quindi deciso, in accordo con i relatori, di effettuare una valutazione a compressione, sulla base della UNI EN 13162:2013 (Isolanti termici per edilizia - Prodotti di lana minerale ottenuti in fabbrica - Specificazione) e la UNI EN 826:1998 (Isolanti termici per edilizia - Determinazione del comportamento a compressione). Queste rappresentano unicamente un riferimento rispetto alla misura effettuata in questo specifico caso.

In particolare viene misurata la resistenza a compressione al 10% e al 50 % di schiacciamento, al fine di verificare le prestazioni del pannello quando viene sottoposto all'azione istantanea di un carico. Questa valutazione risulta utile ai fini pratici, per comprendere come il pannello possa assorbire un urto, se possa essere maneggiato agevolmente in fase di applicazione e se sia in grado di resistere all'azione di un carico per verificarne l'eventuale deformazione.

12.1.1 MISURA E RISULTATI DEI TEST DI RESISTENZA A COMPRESSIONE

Per effettuare la misura sono stati realizzati 3 campioni di dimensioni 3 x 15 cm in relazione ad ogni tipologia precedentemente analizzata. I pannelli testati sono i medesimi utilizzati per le analisi in camera riverberante, capitolo 9, e sono stati ricavati attraverso il taglio meccanico dei prototipi composti nel capitolo 8, all'interno della Sperimentazione B. Questa operazione ha permesso inoltre di valutare la loro lavorabilità: il taglio è risultato netto, consentendo di generare superfici uniformi. Tuttavia i campioni a base polimerica permettono una lavorabilità maggiore e un risultato più definito da un punto di vista visivo.

Il comportamento dei campioni in risposta a tali test verrà valutato e confrontato con quello di pannelli in fibra di legno e con un pannello commerciale in sughero.
Vengono illustrate di seguito le principali caratteristiche dei campioni oggetto di misura.

Campione: S012

Composizione: polveri e fibre corte di lana + colla d'amido (rapporto 1:1)

Densità media: 169 Kg/m^3

Dimensioni: 3 x 15 cm

Altezza: 3,1 cm

Campione: S011

Composizione: polveri e fibre corte di lana + colla d'amido (rapporto 1:1)

Densità media: 410 Kg/m^3

Dimensioni: 3 x 15 cm

Altezza: 1,3 cm

Campione: P015

Composizione: polveri e fibre corte di lana +polimeri (rapporto 1:0,5)

Densità media: 169 Kg/m^3

Dimensioni: 3 x 15 cm

Altezza: 3,1 cm

Campione: P012

Composizione: polveri e fibre corte di lana +polimeri (rapporto 1:0,5)

Densità media: 200 Kg/m^3

Dimensioni: 3 x 15 cm

Altezza: 1,3cm

La misura è stata effettuata presso il Laboratorio Lastin al Politecnico di Torino, dipartimento DAD (Dipartimento di Architettura e Design). Il modello dello strumento di misura utilizzato (figura 1), è il "Point load tester D550, Controls", con una scala del primo manometro di 0-55 kN x 1KN, e quella del secondo corrisponde a 0-5,5 kN x 0,1 kN, al fine di avere una scala di misura ridotta e quindi un dettaglio maggiore.

Il primo passaggio consiste nella calibrazione della pressa: azionare la pompa a mano, in modo tale da permettere il movimento del martinetto idraulico, fino a completa chiusura delle piastre, e verificare che la scala graduata montata sul telaio riporti il valore zero. Se questo non si dovesse verificare risulterebbe necessario regolare l'altezza del-

le piastre della pressa, fino a far coincidere i due valori.

In seguito è possibile quindi inserire il campione sulla piastra mobile inferiore e azionare la pompa per portare il provino a raggiungere la piastra superiore: leggere sulla scala graduata l'altezza del provino. Azionare la pressa fino al raggiungimento del 10% dell'altezza del provino attraverso la lettura sulla scala graduata (figura 2): per mezzo i manometri è possibile visualizzare la forza [kN] applicata. Azionare nuovamente la pressa mediante la pompa a mano fino a raggiungere il 50% dell'altezza del provino ed effettuare la rispettiva lettura sui manometri. Quest'ultima (figura 3) deve essere effettuata attraverso la lancetta rossa, che indica il picco massimo raggiunto; inoltre deve essere considerato il manometro di sinistra al di sotto dei 5,5 kN (limite superiore), e quello di destra se la forza applicata è maggiore (forza massima applicabile 55 kN).

Infine è possibile estrarre il provino, aprendo il circuito idraulico della pressa tramite ap-

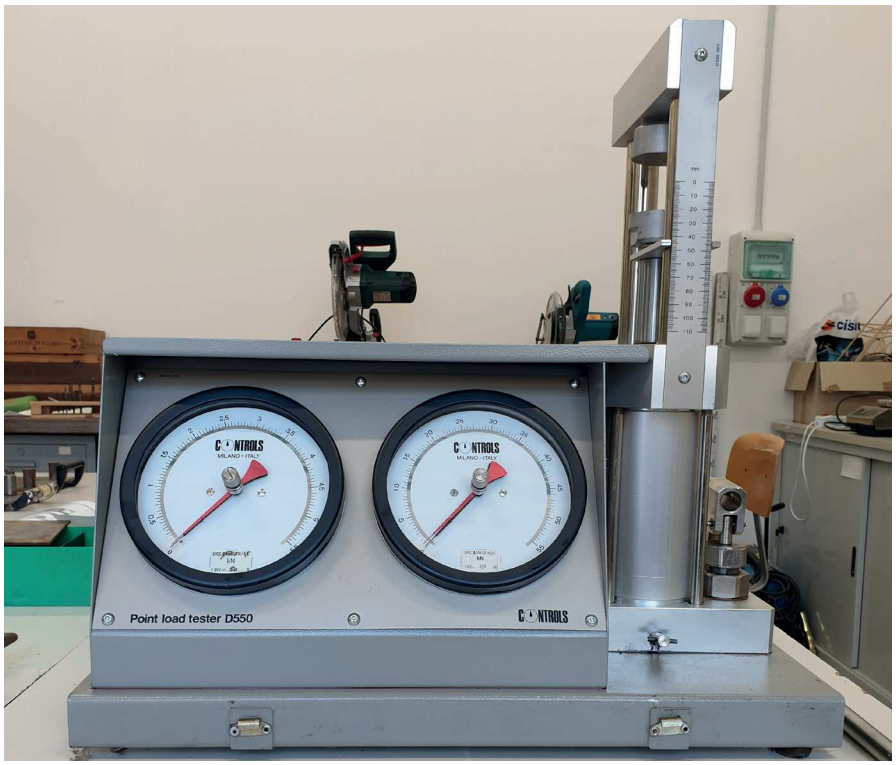


Figura 1: Strumento di misura resistenza a compressione, Point load tester D550, Controls, DAD.

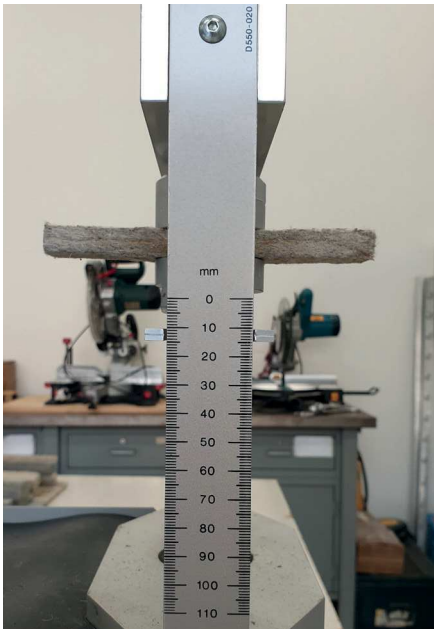


Figura 2: Scala graduata montata sul telaio per effettuare la lettura dell'altezza.

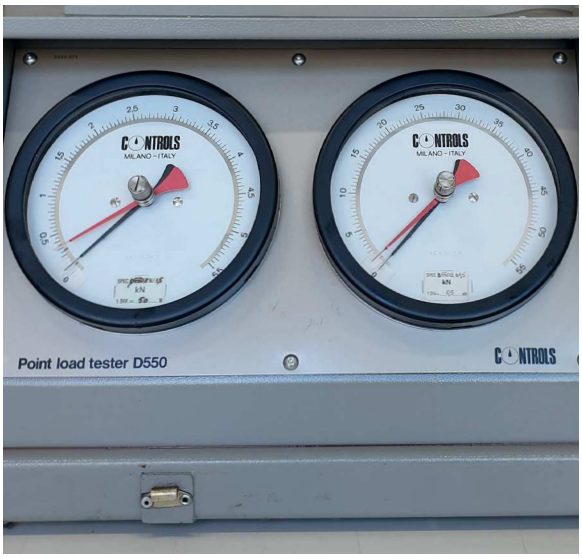


Figura 3: Dettaglio, manometri dello strumento per la lettura della forza applicata [kN].

posita vite.

Il valore della forza applicata può quindi essere suddiviso per l'area di competenza con le dovute trasformazioni, in modo tale da ricavare la pressione effettiva esercitata [MPa] come richiesto dalla normativa:

$$\text{Forza [Kn]} \longrightarrow \text{[N]} \longrightarrow \frac{\text{Forza [N]}}{\text{Area [mm}^2\text{]}} = \text{Pressione [MPa]}$$

L'area è un dato noto, mantenuto costante per tutti i provini: essa coincide con il valore della superficie di contatto fra il campione e la piastra di appoggio della pressa. Corrisponde in questo caso a 1.468 mm^2.

Vengono riportati nelle tabelle di seguito (tabelle 1,2,3,4) i risultati per ogni tipologia di campione, e le rispettive foto (figure dalla 4 alla 11) corrispondenti al 10 % e al 50 % di schiacciamento rispetto all'altezza iniziale del provino.

Campione: S012_altezza iniziale 3,1 cm

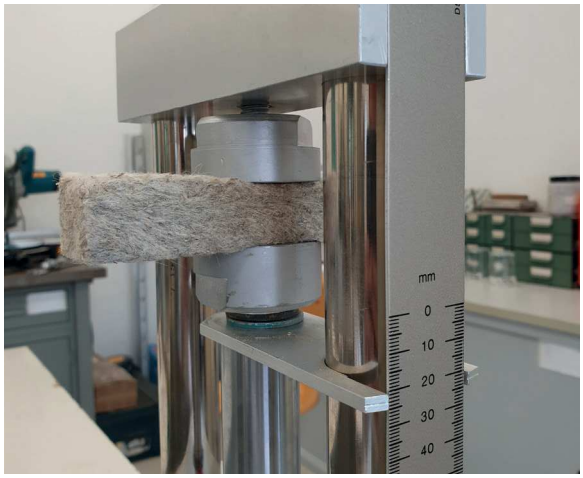


Figura 4: Schiacciamento del 10%.

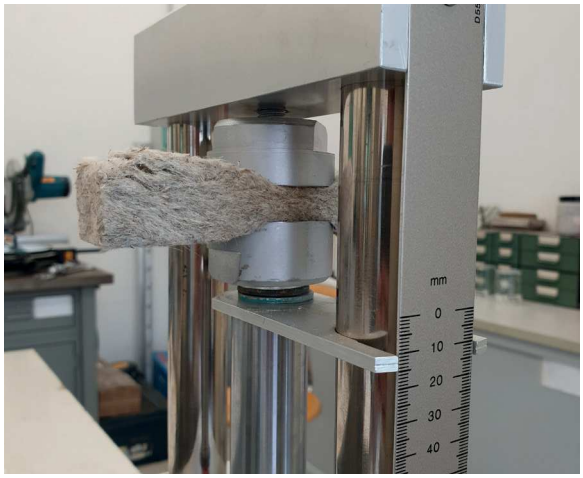


Figura 5: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	2,79	0,10	0,07
50 %	1,55	0,40	0,27

Tabella 1: Risultati misura campione S012.

Campione: S011_altezza iniziale 1,3 cm

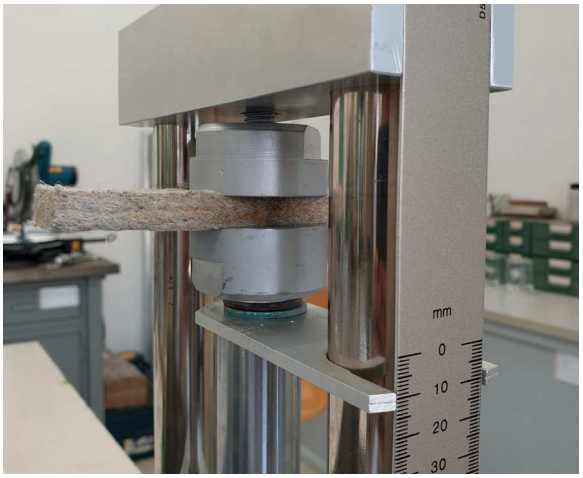


Figura 6: Schiacciamento del 10%.

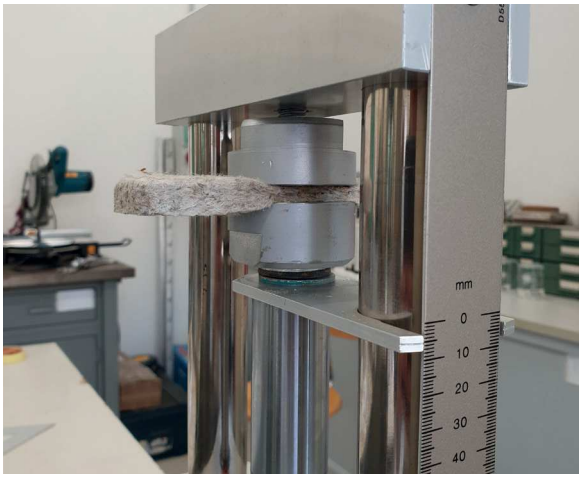


Figura 7: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	1,17	1,00	0,68
50 %	0,65	10,0	6,81

Tabella 2: Risultati misura campione S011.

Campione: P015_altezza iniziale 3,1 cm

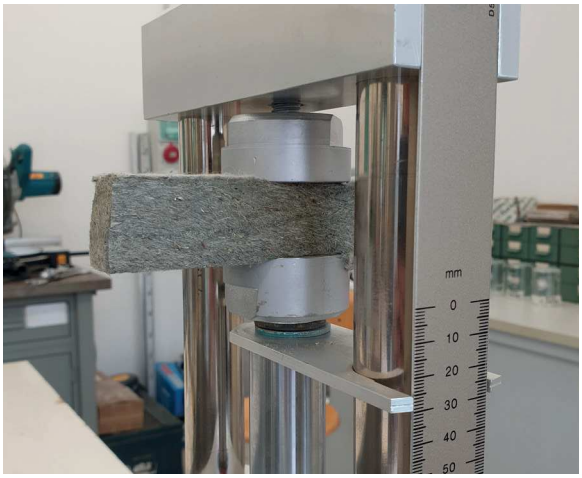


Figura 8: Schiacciamento del 10%.

Figura 9: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	2,79	0,15	0,10
50 %	1,55	0,50	0,34

Tabella 3: Risultati misura campione P015.

Campione: P012_altezza iniziale 1,3 cm

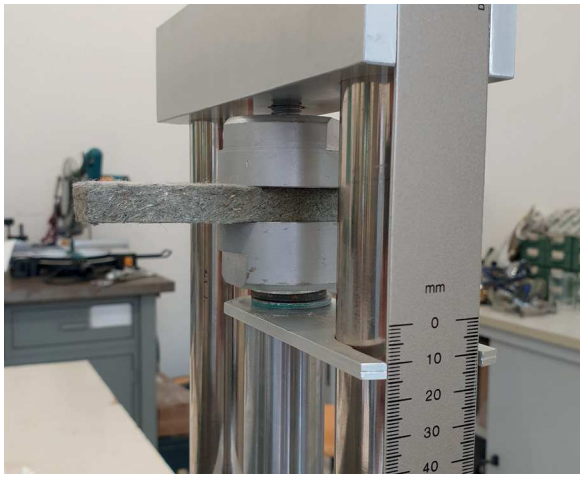


Figura 10: Schiacciamento del 10%.

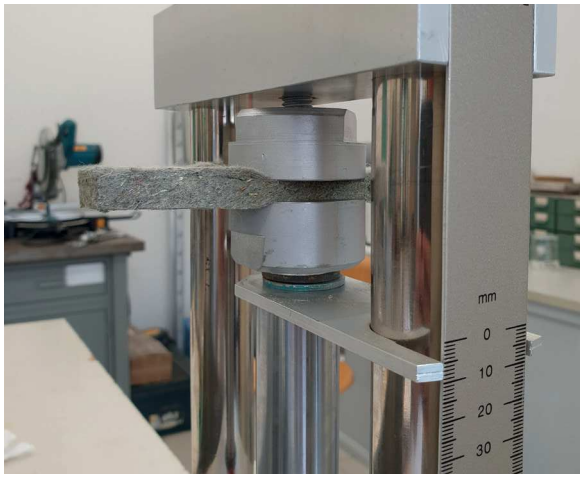


Figura 11: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	1,17	0,20	0,14
50 %	0,65	1,5	1,02

Tabella 4: Risultati misura campione P012.

Oltre a un confronto fra i diversi campioni misurati, al fine di effettuare una comparazione completa, è stato attuato il medesimo procedimento su dei campioni di fibra di legno.

In seguito verranno riportati nelle tabelle 5,6,7 i risultati delle relative misure, le foto (figure dalla 12 alla 17) corrispondenti al 10% e al 50% di schiacciamento rispetto all'altezza iniziale, e i principali dati del campione considerato.

Si specifica che, a causa della diversa dimensione dei provini, per avere un risultato confrontabile con quelli ottenuti in precedenza, l'area considerata corrisponde a 2.123mm^2.

Campione: Fibra di legno A
Densità: 175 Kg/m^3
Dimensioni: 10 x 15 cm
Altezza: 2,2 cm

Campione: Fibra di legno B
Densità: 115 Kg/m^3
Dimensioni: 13 x 9,5 cm
Altezza: 4,0 cm

Campione: Fibra di legno C
Densità: 70 Kg/m^3
Dimensioni: 13 x 9,5 cm
Altezza: 3,5 cm

Campione: Fibra di legno A_ altezza: 2,2 cm

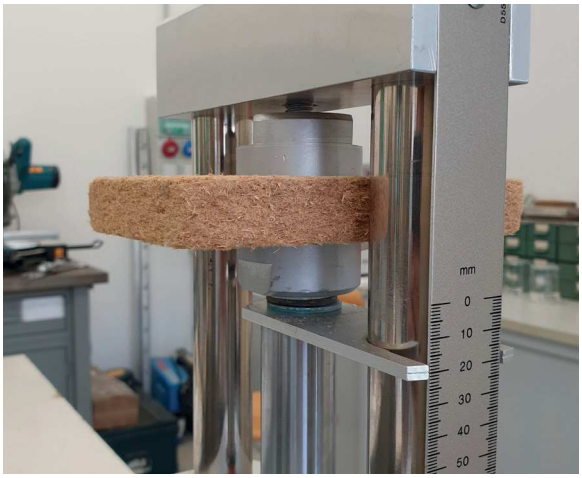


Figura 12: Schiacciamento del 10%.

Figura 13: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	1,98	0,2	0,09
50 %	1,10	1,9	0,89

Tabella 5: Risultati campione fibra di legno A.

Campione: Fibra di legno B_ altezza: 4,0 cm

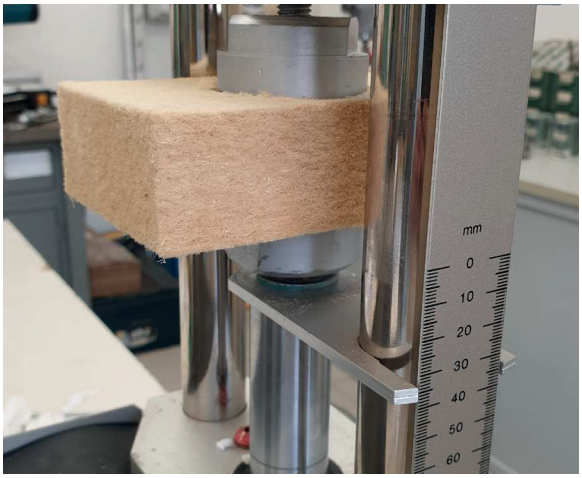


Figura 14: Schiacciamento del 10%.

Figura 15: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	3,6	0,15	0,07
50 %	2,00	1,2	0,57

Tabella 6: Risultati campione fibra di legno B.

Campione: Fibra di legno C_ altezza: 3,5 cm

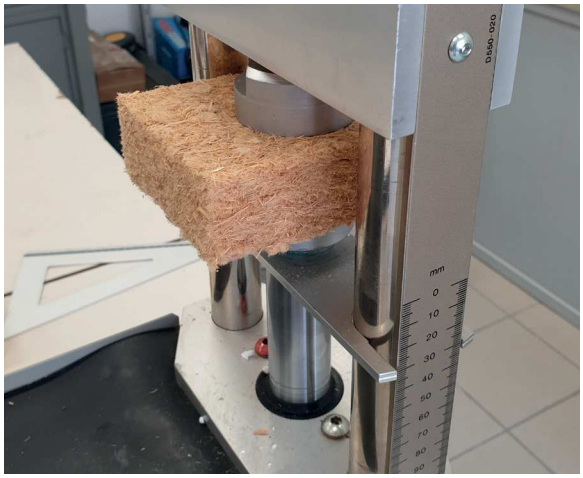


Figura 16: Schiacciamento del 10%.

Figura 17: Schiacciamento del 50%.

Schiacciamento [%]	h [cm]	Forza [kN]	Pressione [MPa]
10 %	3,15	0,05	0,02
50 %	1,75	0,10	0,05

Tabella 7: Risultati campione fibra di legno C.

12.1.2 CONCLUSIONI E COMPARAZIONI DEI RISULTATI OTTENUTI DAL TEST DI COMPRESSIONE

Attraverso il confronto dei risultai riportati nella tabella 8, emerge come la pressione al 10% e al 50% della deformazione sia correlata alla densità. I campioni caratterizzati da basse densità, presentano bassi valori di pressione, ciò significa che con una minima forza applicata essi subiscono una determinata deformazione. Nel caso contrario, per deformare un campione ad alta densità (per esempio il campione S011) è richiesta una pressione maggiore. Tuttavia analizzando le misure effettuate, la resistenza a compressione del campione dipende anche dalla matrice e dall'origine della materia utilizzata. Questo comportamento risulta evidente confrontando i campioni S012 e P015, caratterizzati dalla medesima densità: i risultati sono paragonabili, ma il campione realizzato con i polimeri risulta essere dotato di una resistenza maggiore poiché la matrice polimerica presenta caratteristiche superiori rispetto all'amido utilizzato nel caso dell'altro campione. Spostando il confronto sui risultati della fibra di legno, per i quali è stata effettuata la medesima misura, è possibile nuovamente affermare che a parità di mix-design la resistenza a compressione del campione dipende dalla densità. Ma se questi ultimi vengono paragonati ai campioni TECA panel dimostrano valori minori per deformazioni del 10% e valori di resistenza maggiori per deformazioni del 50% dell'altezza. Questo andamento può dipendere dalle materie prime utilizzate, le quali, anche a densità simili, sono caratterizzate da proprietà meccaniche differenti, come la lana e il legno: per questa ragione emerge uno scostamento dei risultati, che rientrano comunque nello stesso ordine di grandezza.

Estendendo la valutazione al confronto tra il pannello P012 e un prodotto commerciale,

Campioni	Densità [kg/m^3]	Pressione al 10% di deformazione [Mpa]	Pressione al 50% di deformazione [Mpa]
S012	169	0,07	0,27
S011	410	0,68	6,81
P015	169	0,10	0,34
P012	200	0,14	1,02
Fibra di legno A	175	0,09	0,89
Fibra di legno B	115	0,07	0,57
Fibra di legno C	70	0,02	0,05
Suberwall [1]	185	-	0,98

Tabella 8: Confronto fra i risultati misurati, in funzione della relativa densità.

1_Pannello fonoassorbente in sughero, (https://www.acustico.com/index.html).

il Suberwall, un pannello fonoassorbente in sughero, è possibile affermare che i risultati siano comparabili; questo dimostra come il mix design di TECA panel, in funzione della densità composta, abbia anche caratteristiche meccaniche in grado di concorrere con quelle dei prodotti diffusi attualmente sul mercato di questa tipologia di pannelli.

Infine si sottolinea come, in seguito all'applicazione della forza, i campioni di TECA panel, una volta estratti dalla pressa, siano stati in grado di riacquistare la forma e l'altezza iniziale, a differenza di quelli in fibra di legno, che hanno conservato i segni della deformazione nel punto di applicazione della forza. In particolare i campioni S012 e P015 recuperano il 95% dell'altezza iniziale, mentre i campioni S011 e P012 circa il 93%. Questa leggera differenza è dovuta alla pressione maggiore subita dai campioni ad elevata densità, i quali per via della propria conformazione risultano avere un "effetto memoria" minore rispetto a quelli formati da densità inferiori.

12.2 VERIFICA DEL FISSAGGIO MECCANICO DEI PANNELLI

Questo paragrafo nasce dall'idea di valutare il comportamento dei pannelli in relazione a un fissaggio di tipo meccanico. Si premette, che tale tipologia di fissaggio, non corrisponde a quella ottimale che potrebbe essere eventualmente prevista e pensata ad hoc per il prodotto in uno sviluppo successivo del suo design. In seguito a uno studio di questo tipo si potrà capire come poter fissare il pannello attraverso soluzioni alternative che possono prevedere elementi ad incastro sulla superficie posteriore del pannello, realizzati in PLA o eventualmente incollati al supporto.

La verifica effettuata in questo paragrafo vuole testare la reazione del pannello in seguito alla perforazione di una vite o di un tassello. Questo risulta del tutto significativo nel caso in cui in determinati ambienti il pannello venga applicato a un supporto realizzato con listelli di legno o profilati metallici. Infatti se tale prova non andasse a buon fine sarebbe da escludere la sua perforazione: si dovrebbe quindi pensare a una metodologia di fissaggio alternativa, come la composizione di un perimetro rigido o l'utilizzo di una sostanza collante, tecniche che porterebbero a influenzare fortemente le scelte di design del prodotto.

I pannelli utilizzati per tale valutazione sono

quelli riportati nella tabella 9, realizzati per la Sperimentazione B, capitolo 8. Questi vengono fissati tramite l'utilizzo di viti dotate di rondella, a due listelli in legno di dimensioni 4x2 cm, per mezzo di un avvitatore elettrico (figure dalla 18 alla 21).

Campioni	Densità [kg/m^3]	Altezza [cm]
S012	169	2,7
S011	410	1,3
P015	169	3,1
P012	200	1,3

Tabella 9: Campioni utilizzati per la verifica.

Figura 19: Verifica fissaggio pannello S011.

Figura 18: Verifica fissaggio pannello S012.

Figura 20: Verifica fissaggio pannello P015.

Figura 21: Verifica fissaggio pannello P012.

Da una valutazione effettuata durante la fase concreta di fissaggio meccanico del pannello al supporto in legno, mediante l'utilizzo di viti con rondella, è possibile affermare che il processo sia stato svolto senza nessuna problematica rilevante. I pannelli si lasciano penetrare dalla vite senza danneggiarsi e non ostacolano la rotazione della stessa. Anche a seguito di un esame visivo il risultato viene confermato, il pannello rimane rigidamente unito ai listelli in legno, senza creare movimenti interni o fenomeni di rifollamento, i quali potrebbero comportarne un danneggiamento o far emergere problematiche nella fase di messa in opera. E' possibile notare una sottile differenza in funzione della densità dei pannelli. Quelli costituiti da una densità minore permettono una penetrazione agevolata, ma non si verifica un'unione meccanica fra pannello e vite; il fissaggio è dato dalla pressione della vite sul listello in legno. I campioni con densità maggiori, in particolare il campione S011, ostacolano l'avanzare della vite, ma ciò determina un'ottima aderenza tra la vite stessa e il pannello, e di conseguenza un solido ancoraggio al supporto in legno.

I pannelli, una volta fissati sui listelli in legno, sono stati applicati su una superficie verticale, per verificare la resistenza al peso proprio (figure dalla 22 alla 25). Come da aspettative, grazie all'elevata rigidità ottenuta con TECA panel, i pannelli non dimostrano nessuna problematica se posizionati secondo questa configurazione; essi potrebbero inoltre essere in grado di sopportare dei carichi applicati, reagire in caso di urti di lieve entità e di resistere ad elevate pressioni, come evidenziato nel paragrafo precedente.

Figura 22: Applicazione su superficie verticale, S011.

Figura 23: Applicazione su superficie verticale, S012.

Figura 24: Applicazione su superficie verticale, P015.

Figura 25: Applicazione su superficie verticale, P012.

12.3 VALUTAZIONE DELLA REAZIONE ALLA FIAMMA DI TECA PANEL

L'ultima caratteristica meccanica valutata in questo progetto è la reazione alla fiamma di TECA panel, ma non si esclude la possibilità di ulteriori analisi future sulle caratteristiche di questo prodotto, come evidenziato nel capitolo 13.
L'analisi trattata risulta fondamentale per valutare l'installazione di materiali fonoassorbenti in relazione a determinate destinazioni d'uso in particolare per applicazioni in cui è richiesto l'utilizzo di un materiale autoestinguente e una certificazione che ne attesti il comportamento e la reazione al fuoco. Con il termine "autoestinguente" si fa riferimento a un materiale che, sottratto dalla fiamma, non consente il propagarsi della combustione, impedendo così il diffondersi del fuoco.

Per l'attuazione dei test di reazione alla fiamma, viene seguita (nei limiti delle possibilità) la normativa UL 94:2004: test di infiammabilità di materie plastiche per parti in dispositivi ed elettrodomestici. Tale norma si costituisce solo come un riferimento all'interno della sperimentazione, ma consente di effettuare una valutazione del comportamento al fuoco dei mix-design realizzati. In particolare di attuare un confronto fra la serie S, costituita da amido di mais, per la quale le aspettative sono piuttosto positive, e la serie P, nella quale la matrice viene creata da polimeri, in particolare poliestere, noto per essere un materiale infiammabile. La lana invece, materia prima utilizzata per la composizione dei pannelli è ampiamente diffusa e impiegata in diversi settori proprio per le sue capacità autoestinguenti.
Prima di avviare la misura, si ricorda che la serie P è costituita da un rapporto fra fibre di lana e polimeri di 1:0,4, mentre nella serie S il rapporto fra fibre e colla sale a 1:1. Tuttavia quest'ultimo, rappresenta il rapporto umido, considerato in fase di realizzazione, mentre una volta completata l'evaporazione dell'acqua il rapporto fra fibre e amido può essere considerato di 1:0,1.

12.3.1 MISURA E RISULTATI DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA AL FUOCO

La normativa, per effettuare tale test, richiede dei campioni di misura 5x15 cm con uno spessore massimo di 1,3 cm. Ciò comporta l'esclusione di quelli aventi uno spessore maggiore. Sono stati quindi realizzati dei provini con queste caratteristiche, attraverso il taglio meccanico dei pannelli di tipologia S011 e P012, realizzati per la Sperimentazione B (capitolo 8). Inoltre, al fine di effettuare una comparazione con un prodotto commerciale, tale misura, è stata effettuata su un pannello fonoassorbente fornito dalla Sfilacciatura Negro (presentato nel paragrafo 9.4). Quest'ultimo è costituito da scarti tessili a fibra lunga, di varia origine e tipologia, legati da un prodotto di origine sintetica.

Campioni: P012

Composizione: polveri e fibre corte di lana + polimero, poliestere
Densità media: 200 Kg/m^3
Dimensioni: 5 x 15 cm
Altezza: 1,3 cm
Area media: 75 cm^2

Campioni: S011

Composizione: polveri e fibre corte di lana + colla d'amido
Densità media: 410 Kg/m^3
Dimensioni: 5 x 15 cm
Altezza: 1,3 cm
Area media: 75 cm^2

Campioni: Z000_riferimento

Composizione: scarti tessili vari + resina sintetica
Densità media: 35 Kg/m^3
Dimensioni: 5 x 15 cm
Altezza: 1,3 cm
Area media: 75 cm^2

La misura è stata effettuata presso il laboratorio di ricerca di Alessandria, Politecnico di Torino, dipartimento di scienza applicata e tecnologia (DISTAT).

Prima di avviare il test è necessario un pre-condizionamento dei provini in ambiente controllato per 48h: i campioni sono stati collocati all'interno di una camera climatica con temperatura di 23°C e umidità relativa del 50%.

Il test è stato effettuato all'interno dell'ambiente controllato raffigurato nelle figure 26 e 27. La strumentazione e gli accessori sono stati allestiti come richiesto dalla normativa UL 94 (figura 28). In particolare l'altezza della griglia, sulla quale il campione oggetto di mi-

sura verrà disposto, deve avere una altezza di circa 17,5 mm. La fiamma deve avere una temperatura di 800 /900 °C (di colore blu intenso) ed essere applicata all'estremo della griglia, su cui viene posizionato il campione, per un tempo di 60 secondi, terminati i quali si può determinare il tempo di estinzione della combustione e valutare i danni prodotti sul campione residuo.
Per rispondere ai requisiti richiesti dalla certificazione HF-1 (UL 94), il tempo di "afterflame" deve essere minore a 2 secondi, durante la combustione non devono essere rilasciate gocce di materiale sul cotone posizionato sotto al provino, e la parte danneggiata nel residuo deve essere minore di 60 mm.

Di seguito (figure dalla 29 alla 42) verrà mostrato il comportamento del campione prima e durante il test, gli effetti della combustione sui provini analizzati, e nelle tabelle successive (tabelle 10, 11 e 12) i rispettivi risultati: tempo di afterflame, la profondità della combustione, la massa iniziale, quella successiva al test e la relativa differenza in percentuale, per verificare la massa effetti-

Figura 26: Esterno ambiente di misura.

Figura 27: Interno ambiente di misura.

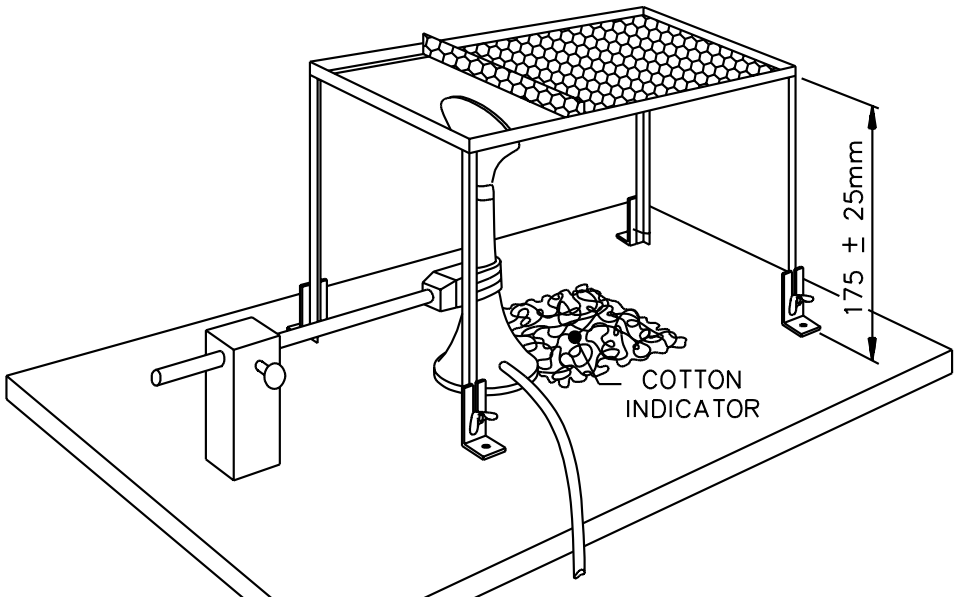


Figura 28: Disposizione della strumentazione e degli accessori richiesti dalla normativa UL 94.

vamente combusta.

Il tempo di afterflame è stato valutato per mezzo dei video realizzati durante il test: grazie ad essi è stato possibile conteggiare il tempo esatto dal momento di cessazione del fuoco applicato, fino al punto di estinzione dell'ultima fiamma sul provino. Per tale dato non viene fatta una media tra i risultati, poiché poco indicativo: la norma prevede, ai fini della certificazione, un tempo di spegnimento minore rispetto a quello previsto per 4 provini su 5, e di 1 provino su 5 con un tempo minore a 10 secondi.
La profondità di combustione, riportata nelle tabelle, fa rifermento al punto massimo al quale la combustione è arrivata, misurata per la lunghezza del provino, rispetto a quella iniziale, coincidente a 15 cm.

Si ricorda che l'analisi effettuata risulta parziale, e con il solo fine di una valutazione qualitativa in un ottica di completezza del progetto. Inoltre i risultati potrebbero non dimostrare l'effettivo comportamento alla fiamma per via dei bordi e per la non completa omogeneità del pannello. Infatti alcuni bordi risultano tagliati e non derivanti dalla forma dello stampo: questo potrebbe creare delle vie preferenziali per il diffondersi della fiamma.

Campioni: P012

Figura 29: Preparazione del test, campione P012.

Figura 30: Applicazione della fiamma sul campione.

Figura 31: Effetto della combustione, lato inferiore.

Figura 32: Effetto della combustione, lato superiore.

	P012_A	P012_B	P012_C	MEDIA
Afterflame [s]	33	42	35	-
Profondità combustione [cm]	3,5	4,2	4	3,9
Massa iniziale [g]	17,43	20,85	18,02	18,76
Massa residuo [g]	16,66	19,63	16,91	17,73
Percentuale massa combusta	4,4 %	5,9 %	6,2 %	5,5%

Tabella 10: Risultati reazione alla fiamma sui 3 campioni P012.

Campioni: S011

Figura 33: Preparazione del test, campione S011.

Figura 34: Applicazione della fiamma sul campione.

Figura 35: Effetto della combustione, lato inferiore.

Figura 36: Effetto della combustione, lato superiore.

	S011_A	S011_B	S011_C	S011_D	S011_E	MEDIA
Afterflame [s]	12	0	0	10	1	-
Profondità combustione [cm]	4,2	3,5	3,5	3,7	4	3,7
Massa iniziale [g]	41,15	41,34	38,27	38,10	37,56	39,28
Massa residuo [g]	40,26	40,52	37,67	37,33	36,86	38,52
Percentuale massa combusta	2,1 %	1,9 %	1,6%	2,0 %	1,8 %	1,8%

Tabella 11: Risultati reazione alla fiamma sui 5 campioni S011.

Campioni: Z000_riferimento

Figura 37: Preparazione del test, campione Z00.

Figura 38: Applicazione della fiamma sul campione.

Figura 39: Effetto della combustione, lato inferiore.

Figura 40: Effetto della combustione, lato superiore.

	Z000_A	Z000_B	Z000_C	MEDIA
Afterflame [s]	30	35	35	-
Profondità combustione [cm]	7	6,5	10	7,8
Massa iniziale [g]	4,68	4,52	4,30	4,5
Massa residuo [g]	3,85	3,70	3,28	3,6
Percentuale massa combusta	17,7 %	18,1 %	23,7 %	19,8%

Tabella 12: Risultati reazione alla fiamma sui 3 campioni di riferimento Z000.

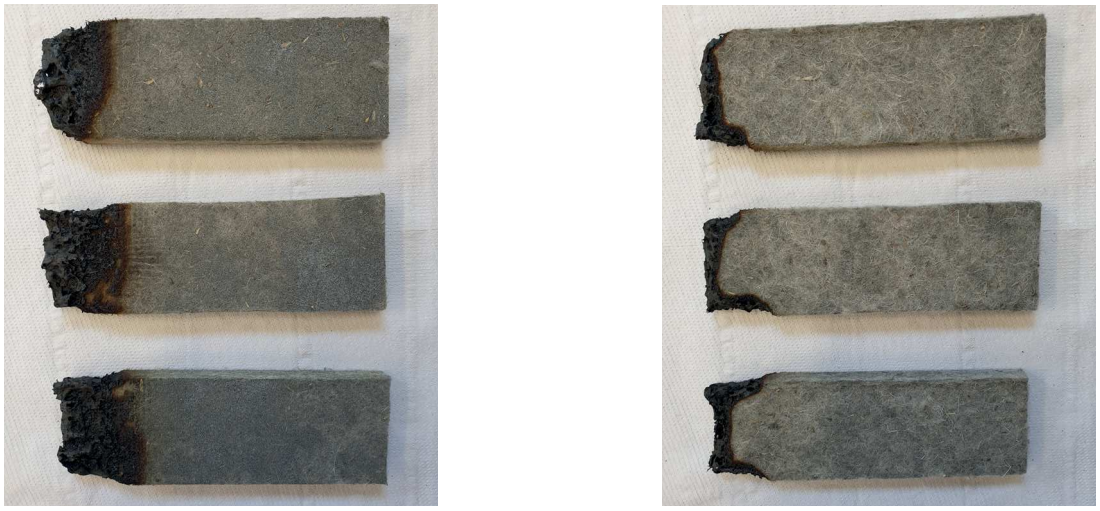


Figura 41: Confronto dei campioni dopo il test a combustione, serie P, a sinistra lato inferiore, a destra lato superiore

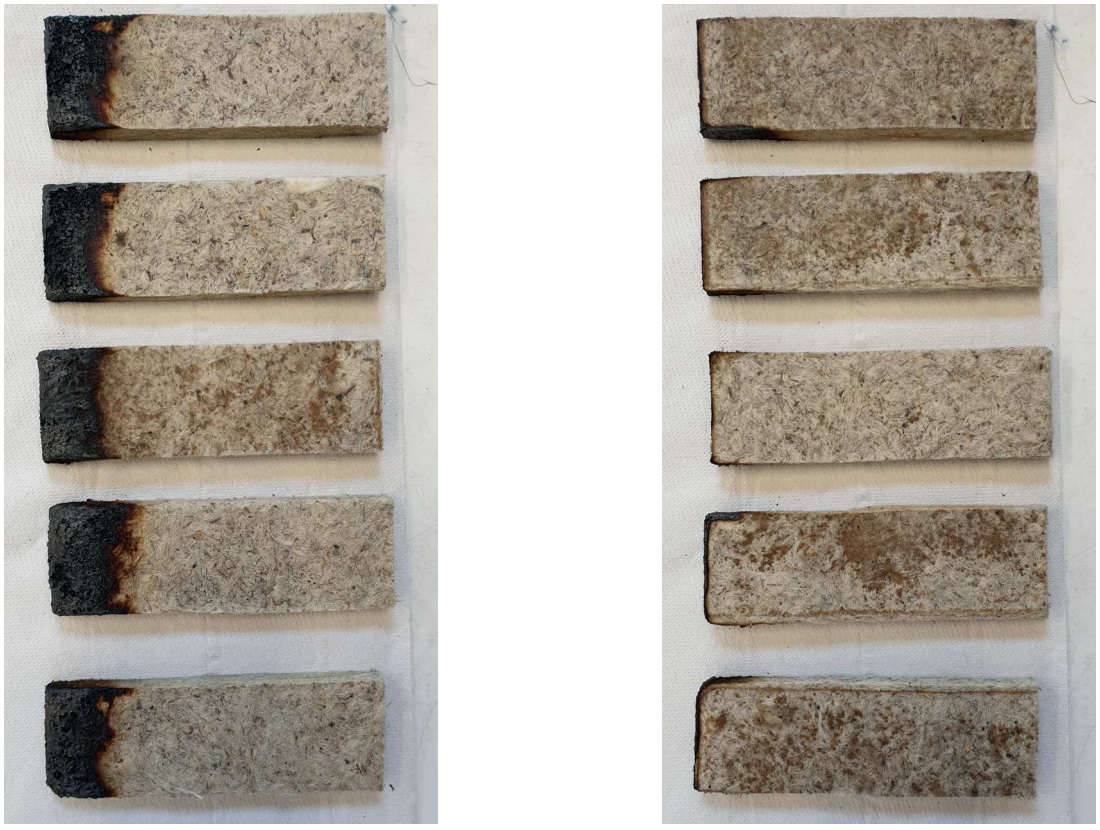


Figura 42: Confronto dei campioni dopo il test a combustione, serie S, a sinistra lato inferiore, a destra lato superiore

12.3.2 VALUTAZIONI E COMPARAZIONI FINALI DEI RISULTATI OTTENUTI DAL TEST ALLA FIAMMA

Come precedentemente anticipato, lo scopo di questa verifica non è determinare il rispetto dei termini previsti dalla certificazione, ma valutare se vi siano possibilità rispetto a tali requisiti nonché effettuare un confronto e soprattutto una valutazione sul comportamento di TECA panel in presenza di una fiamma.

Dai risultati emersi dai test effettuati sui campioni della serie P, composta da fibre di lana e polimeri (poliestere), il tempo di afterflame risulta maggiore rispetto alle altre serie analizzate. Sebbene rispettino la profondità di combustione richiesta, il tempo impiegato per estinguere la fiamma è notevolmente superiore a quello richiesto per la certificazione. La causa di questi risultati è imputabile al polimero utilizzato, il quale in un primo momento scioglie, senza creare gocce, per poi iniziare a bruciare, o meglio "friggere", generando un residuo tipico di tale materiale (figura 43). Questo fenomeno viene contrastato dall'effetto della lana, che influisce sull'estinzione della combustione del poliestere. Tuttavia il campione può essere definito come un prodotto autoestinguente, poiché non permette la propagazione della fiamma. Nel caso si vogliano rispettare i requisiti richiesti dalla certificazione HF-1, dovrebbe essere incluso nel mix-design un ritardante di fiamma, che creerebbe però

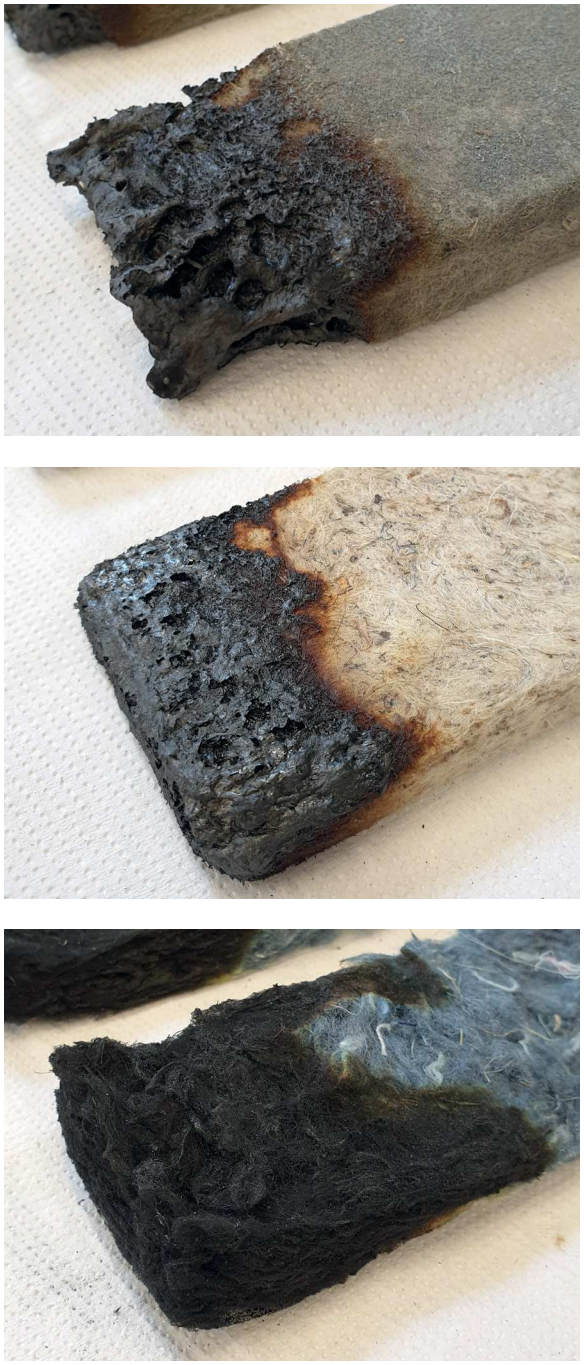


Figura 43: Confronto tra le diverse tipologie di combustione. Dall'alto: P012, S011 e Z000

nuove problematiche. In alternativa, come suggerito diverse volte nell'ambito di questo progetto, il polimero di origine sintetica potrebbe essere sostituito con uno di origine naturale, e quindi biodegradabile, in grado di garantire un migliore comportamento alla fiamma, ma costituendo un problema da un punto di vista economico (vedi valutazione economica, capitolo 11).
Si ricorda che tali risultati sono determinati anche dalla maggiore presenza di sostanze polimeriche all'interno del mix-design rispetto all'amido (una volta raggiunta la completa essiccazione del pannello).

I campioni realizzati con amido, serie S, risultano aver ottenuto i risultati migliori. Essi denotano una minima propagazione della fiamma all'interno del campione testato, presentando la faccia superiore praticamente inalterata. Ma soprattutto mostrano dei tempi di afterflame molto bassi, infatti quelli di 3 campioni su 5 analizzati possono essere considerati praticamente nulli: una volta sottratta la fiamma dal campione, questo non continua la combustione. I tre elementi citati potrebbero potenzialmente rispettare la normativa HF-1. Gli altri due campioni sono caratterizzati da tempi di spegnimento maggiori, ma questo probabilmente è dovuto al taglio dei bordi che consente alla fiamma di diffondersi con maggiore facilità. Per valutare il rispetto della normativa sarebbe opportuno comporre i campioni attraverso uno stampo delle dimensioni richieste e non come in questo caso produrli effettuando il taglio meccanico di un pannello di dimensioni più grandi. L'effetto dei bordi è riscontrabile anche nei campioni a base polimerica, nei quali è evidente la propagazione della fiamma verso i lati del provino (figura 43). I campioni a base d'amido con successivi sviluppi e accortezze, hanno ottime possibilità di rispettare effettivamente la normativa, e comunque possono essere considerati in relazione a un grado di potere autoestinguente superiore a quello dei polimeri.

I risultati ottenuti dai campioni di riferimento, un pannello fonoassorbente commerciale, sono quelli peggiori nell'ambito di questa analisi. I tempi di afterflame sono confrontabili con quelli della serie P, ma la profondità di estensione della combustione è notevolmente maggiore alle altre serie, non rispettando neppure quella massima prevista dalla norma. Inoltre presentano una percentuale di massa combusta, rispetto a quella iniziale, considerevolmente elevata, arrivando, in un campione quasi al 24% della massa persa durante la combustione. La combustione inoltre si presenta differente rispetto alle altre serie (figura 43): tende a diffondersi sul lato superiore, senza lasciare un eccessivo resi-

duo carbonioso, poiché la quantità di resina utilizzata come collante è minima, e implica solo le fibre, costituite da una miscela di diversi materiali, sintetici, vegetali e animali.

Come giustificazione di tali risultati, subentra nuovamente la densità: all'aumentare di quest'ultima, a parità di mix design, si ha un incremento della resistenza alla fiamma, dovuta al poco ossigeno fornito alla combustione. Ma non costituisce l'unica variabile, poiché quest'ultima dipende anche dai materiali utilizzati all'interno del prodotto. Un materiale non autoestinguente, anche ad elevate densità non è in grado di contrastare la propagazione della fiamma, come avviene ad esempio per il polietilene riciclato.

In definitiva la lana utilizzata dimostra la sua ottima resistenza alla fiamma, dipenderà dal collante impiegato la prestazione dell'intero pannello per quanto concerne questo aspetto. L'amido può essere la soluzione ideale a tale scopo, tuttavia questo tipo di colla deve subire ulteriori studi chimici per verificare i legami tra le molecole e migliorane la resistenza all'umidità.

13

POTENZIALITÀ FUTURE E MOLTEPLICITÀ DI SVILUPPO DEL PRODOTTO

- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283

- https://www.baux.se/, consultato il 26/08/2019.
- https://kvadrat.dk/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.archiproducts.com/en, consultato il 26/08/2019.
- https://www.aleksandragaca.eu/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.dellachiara.it/, consultato il 26/08/2019.
- https://layerdesign.com/#top-page, consultato il 26/08/2019.
- https://i29.nl/projects/the-soft-office, consultato il 26/08/2019.
- http://www.internationalacoustic.com/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.environdec.com/, consultato il 26/08/2019.
- http://www.isprambiente.gov.it/it, consultato il 26/08/2019.
- https://www.iso.org/home.html, consultato il 26/08/2019.
- https://www.minambiente.it/, consultato il 26/08/2019.
- http://www.gbcitalia.org/leed, consultato il 26/08/2019.

Icona copertina ideata e creata da: Noun Project, https://thenounproject.com/

13.1 DESIGN DI TECA PANEL: SOLUZIONI ESEMPI E SUGGESTIONI

Come evidenziato in diversi capitoli precedenti, lo studio relativo al design del prodotto non è stato considerato. Tale progetto si focalizza sullo sviluppo del materiale e sulla sua formazione secondo la configurazione più semplice: pannelli di forma parallelepipeda, ottenuti attraverso l'elaborazione di input progettuali, dai quali derivano tutta una serie di output su cui si fondano le considerazioni esplicitate all'interno di questi capitoli. Tuttavia non si esclude, grazie alle possibilità offerte da TECA panel, un suo successivo sviluppo, in particolare per quanto concerne forma e design. Lo scopo di questo paragrafo è quello di ispirare, attraverso alcuni esempi e suggestioni, la ricerca di un possibile design che valorizzi a pieno le potenzialità del prodotto.

Lo studio qui sviluppato, si pone in stretta relazione con l'analisi effettuata nel capitolo 11, dove sono state individuate quattro categorie in base alla tipologia di prodotto e alle relative fasce di prezzo.

Uno dei punti di forza di TECA panel, è riconoscibile nella sua capacità di adattarsi a qualsiasi forma, piana o tridimensionale, in funzione del contenitore e quindi dello stampo con il quale viene prodotto, indipendentemente dalla serie considerata, che sia essa a base polimerica o a base di colla. Grazie all'esperienza concreta, maturata durante le sperimentazioni effettuate, è possibile stabilire che i pannelli realizzati con i polimeri possono generare forme più complesse e articolate, nonché più definite, per via del diverso processo produttivo, secondo il quale, in seguito alla cottura, il prodotto è pronto per l'utilizzo. Non si esclude comunque, la possibilità di raggiungere i medesimi risultati con una sostanza collante, a seguito di un perfezionamento e miglioramento del processo.

Questa proprietà, unita al vantaggio economico, alle performance acustiche e alla sostenibilità, permette di inserirsi all'interno di tutte le categorie precedentemente evidenziate in modo estremamente competitivo.

Utilizzando la semplice forma di un comune pannello esso può essere impiegato all'interno di intercapedini oppure applicato come tale su qualsiasi superficie interna.
Allo stesso tempo si può sviluppare un design più complesso, in grado di caratterizzare il prodotto e l'ambiente di utilizzo. A questo scopo, nella figura 1, si propone l'esempio dei prodotti acustici ideati e sviluppati dallo studio Baux. Stabilito il mixdesign del prodotto e accertate le performance acustiche, sono state definite sette forme semplici: esse possono essere combinate a piacimento dal

Figura 1: Definite delle forme base, attraverso la loro composizione è possibile creare infinite combinazioni, come negli esempi illustrati. Baux, https://www.baux.se/.

cliente o dal progettista, generando, grazie alla loro alternanza accostata a particolari giochi di colore, una moltitudine di soluzioni differenti, fortemente impattanti da un punto di vista visivo e in grado di caratterizzare l'aspetto di uno spazio interno.
Questa soluzione, a seguito di uno studio approfondito sulle geometrie e sulla loro composizione, potrebbe essere l'ideale per un eventuale design di TECA panel. Inoltre questo si potrebbe evolvere, attraverso la fornitura di una serie di accessori a corredo: si può pensare alla metodologia di attacco oppure a una serie di distanziali intercambiabili, in modo tale da fornire una risposta fonoassorbente differente in base al loro specifico impiego. In questo modo il progettista può procedere all'installazione del pannello in relazione alla destinazione d'uso, attraverso una scheda tecnica fornita insieme al prodotto, che ne illustri le performance in funzione dei distanziali utilizzati. Questa possibilità renderebbe il prodotto più accessibile alle diverse categorie di utenti.

Una possibile soluzione, per evitare l'utilizzo di ulteriori accessori, potrebbe essere data dall'idea di un design che permetta di poter ancorare ogni pannello su quello precedente, o in alternativa che preveda un incastro, del tipo maschio-femmina, sfruttando la propria forma, come nel caso dell'esempio riportato nella figura 2. Attraverso lo studio di queste componenti, si potrebbe dare origine a una sorta di puzzle, le cui "tessere" possano essere intercambiate e combinate per creare un design finale personalizzato (come nella figura 3).

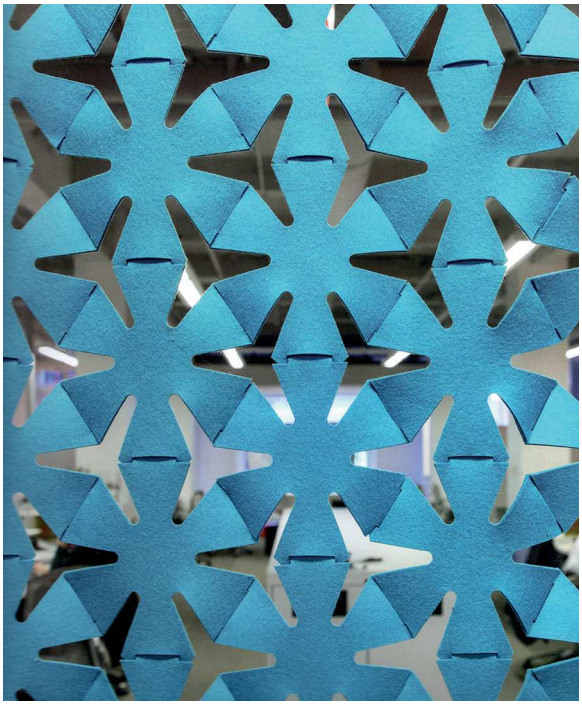


Figura 2: Soluzione a incastro, Tyler Adams, Sound Materials, op cit.

Questa soluzione, così come quella precedente, sarebbe possibile grazie alla rigidità e alla coesione delle fibre raggiunta durante la sperimentazione, per tutte le densità analizzate.
A tal proposito si potrebbe immaginare un pannello stratificato, composto da una parte

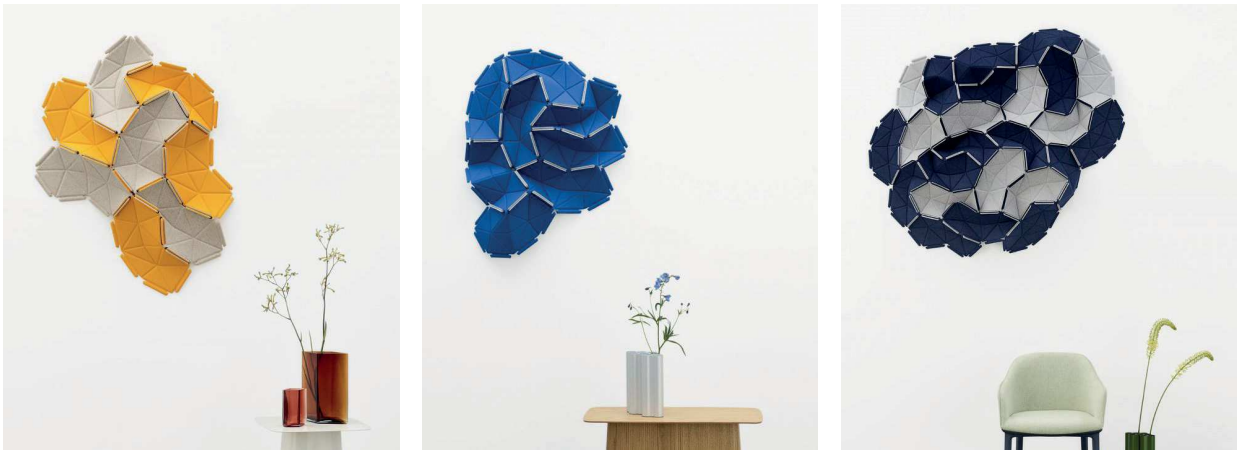


Figura 3: Modulo componibile ad incastro, in svariate combinazioni, Kvdrat Cloud, https://kvadrat.dk/.

strutturale ad alta densità, che possa essere appesa o fissata su una superficie verticale, e da una finitura, ancorata alla precedente, costituita da un prodotto di densità minore. Tale applicazione potrebbe assumere diverse forme e configurazioni, a seconda delle esigenze e delle preferenze dell'utente.

Le soluzioni suggerite fino a questo momento permetterebbero un ulteriore vantaggio acustico, grazie alla loro forma non strettamente lineare e alla superficie esposta all'ambiente. Si potrebbe immaginare un semplice pannello rettangolare, o comunque di forma elementare, sul quale, attraverso l'azione della parte superiore dello stampo, venga impressa una trama, un reticolo o un'incisione, in positivo o in negativo, in modo tale da fornire un aspetto significativamente diverso e più gradevole, rispetto a quello liscio che caratterizzava per esempio i pannelli realizzati nella fase di sperimentazione di questo progetto. A tale ragiona-

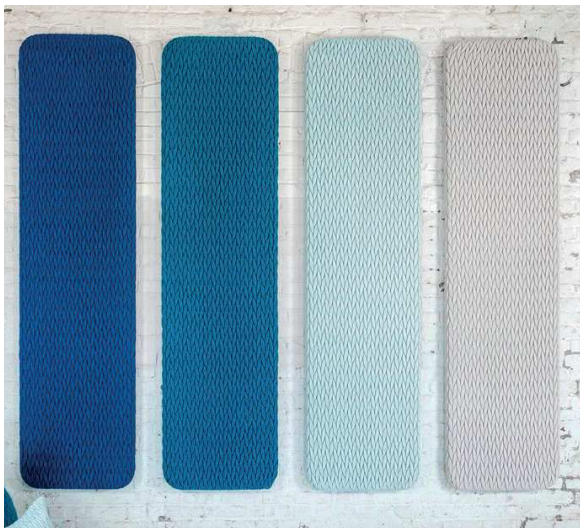


Figura 4: 3D Texture, Aleksandra Gaca, https://www.archiproducts.com/en.

Figura 5: Composizione modulabile per divisione di ambienti, dellachiara, https://www.dellachiara.it/shop/comfort-acustico/kivo-pannello-acustico/.

mento fa riferimento la figura 4, dove un semplice pannello diventa di forte interesse compositivo grazie alla particolare finitura. Questi pannelli potrebbero essere inseriti all'interno di un' ampia varietà di tipologie e di impieghi: appesi, ancorati su una superficie, impiegati come elementi d'arredo, come elementi modulabili, pannelli divisori o da scrivania. Per ogni singola casistica deve essere attentamente valutato il metodo di aggancio, la struttura di supporto o la base a contatto con il pavimento. Non si esclude la possibilità di creare elementi autoportanti integrando internamente alla struttura componenti con il medesimo composto, ma con una densità elevata.

Un'evoluzione dei pannelli, come soluzione per gerarchizzare lo spazio o dividere gli ambienti, potrebbe essere data dalla creazione di elementi o moduli, totalmente o parzialmente autoportanti come quelli mostrati in figura 5. Di particolare interesse è la soluzione proposta dal designer Benjamin Hubert (figura 6), nella quale, a seguito di un profondo studio durato tre anni, ha sviluppato un sistema organico capace di adattarsi alle diverse esigenze, attraverso lo sviluppo di un sistema di aggancio intuitivo e l'utilizzo di un pannello con un'unica forma tridimensionale che si ripete nello spazio e che riveste la struttura creando un effetto di continuo movimento. Tuttavia, in accordo con le finalità

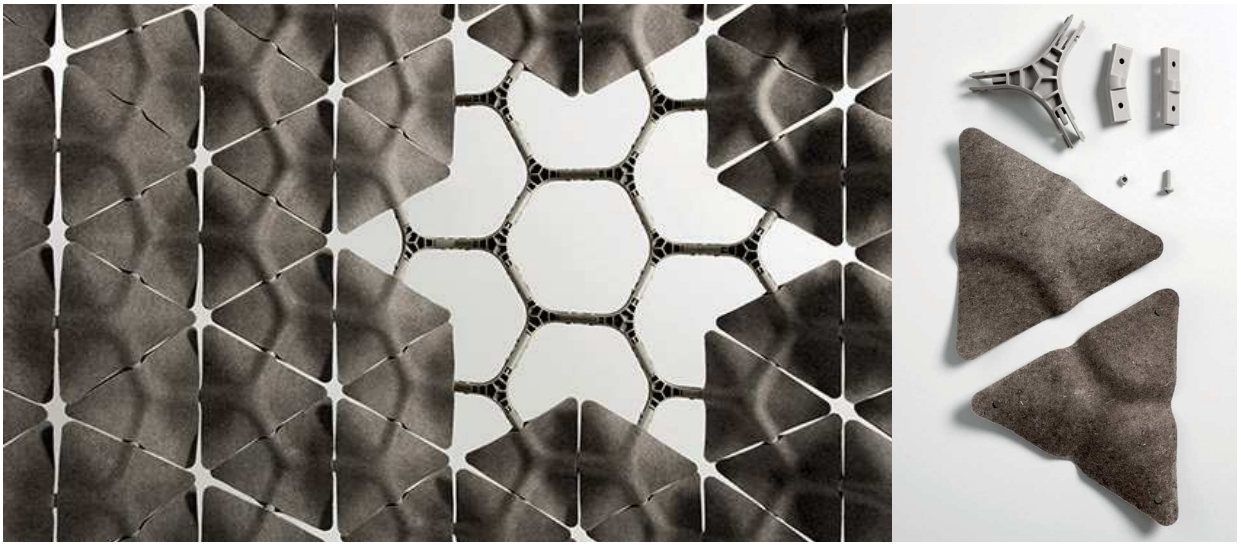


Figura 6: Sistema organico adattabile componibile smontabile, Layer, https://layerdesign.com/project/scale/#top-page.

di questo lavoro, risulterebbe fondamentale un attento studio economico della composizione. Quest'idea potrebbe essere traslata all'interno dell'ecosistema TECA panel e delle sue possibilità.

Un ulteriore campo di sviluppo per il design del prodotto è quello legato al mondo dell'arredamento: lampade, tavoli da lavoro, partizioni e sedie. In questi casi il prodotto fonoassorbente verrebbe alternato con altri materiali, al fine di generare una struttura idonea. La fornitura di questi elementi può essere offerta, come in alcuni casi precedenti, attraverso un kit di montaggio, al fine di portare il potenziale cliente a conoscere concretamente il mondo dell'acustica, evitando così anche una fase aggiuntiva nella filiera del ciclo produttivo. L'idea di arredare completamente uno spazio di lavoro con materiale fonoassorbente, è visibile nella soluzione presentata nella figura 7, che mostra la possibilità di generare e caratterizzare gli spazi attraverso pannellature, sedute, tavoli e superfici orizzontali e verticali funzionali all'acustica dell'ambiente. Al fine di un corretto studio di design del prodotto, è fondamentale ricordare che l'istallazione di questi materiali fonoassorbenti deve avvenire il più possibile vicino alla fonte, e generalmente, parlando di ambienti interni, si fa riferimento alla voce umana. Le pareti spesso risulta-

Figura 7: Ambiente flessibile fonoassorbente, i29, https://i29.nl/projects/the-soft-office.

no lontane dalla sorgente: per gestire questo problema, una soluzione che permette un ampia superficie e che consente di raggiungere i punti più lontani, può essere data dalla collocazione di tali prodotti sul soffitto. Si ricorda, indifferentemente dalla tipologia di prodotto, che essi devono rimanere esposti o visibili rispetto alla fonte sonora e che è preferibile una loro disposizione diffusa ed omogenea. Inoltre, mentre la collocazione su una superficie tiene esposta una sola facciata, l'avere strutture autoportanti o in alternativa una soluzione di pannelli appesi (nel caso di una collocazione verticale prendono il nome di baffles) consente l'esposizione di entrambe le facce, con conseguente aumento delle performance acustiche.

In tutte le soluzioni presentate non si esclude una finitura superficie del prodotto, l'utilizzo di un rivestimento aggiuntivo, il quale tuttavia non deve influenzare l'assorbimento acustico, o in alternativa un ulteriore sviluppo del mix design, per evitare la dispersione di polveri per pannelli caratterizzati da una bassa densità, in funzione alla destinazione d'uso e al campo di applicazione selezionato. Queste costituiscono ulteriori variabili da considerare in uno sviluppo del design del prodotto.

In conclusione a quanto detto in questo pa-

ragrafo, nel quale sono state fornite idee, esempi e suggestioni eventualmente applicabili anche nel caso di Teca panel, appare evidente come lo studio di design del prodotto possa essere decisivo all'interno di un potenziale mondo del mercato. Ovviamente tale studio, dovrebbe essere condotto tenendo sempre in considerazione la fattibilità, le possibilità, le performance acustiche, nonché le esigenze e i requisiti richiesti in base al campo di applicazione. Per questo nel paragrafo successivo verranno suggeriti ulteriori sviluppi futuri per il prodotto.

La vera sfida consiste nell'individuare una composizione che risponda il più possibile, in maniera adeguata, a tutte queste circostanze, e che renda il prodotto TECA panel immediatamente riconoscibile e distinguibile in relazione al suo design, a un particolare dettaglio o a una caratteristica che lo connota.

13.2 LA FLESSIBILITÀ DI SVILUPPO DEL MATERIALE

Come per il design di TECA panel verranno forniti, in questo paragrafo, alcuni punti (per diversi motivi non approfonditi all'interno del progetto), che potrebbero portare a un ulteriore interessante sviluppo.

Con il termine sviluppo del materiale viene fatto direttamente riferimento al mix design del prodotto. Esso infatti potrebbe essere affinato sotto diversi aspetti. Innanzitutto si potrebbe pensare a un'analisi approfondita del rapporto fra densità e assorbimento acustico, generando una miscela in grado di fornire una maggiore porosità senza perdere di rigidità, per esempio diminuendo la percentuale di colla o del polimero e aumentando invece la pressione. Un minor quantitativo della sostanza collante consentirebbe inoltre un risparmio in termini di risorse. In alternativa potrebbe essere inserito al suo interno un'ulteriore prodotto di scarto, al fine di garantire la medesima rigidità. Per esempio, considerando la filiera del riso, si potrebbe pensare alla paglia o alla lolla, scarti disponibili in abbondanti quantità. L' utilizzo di questo ulteriore ingrediente all'interno della ricetta, porterebbe verosimilmente a risultati positivi e deriva dall'esperienza acquisita dalla sperimentazione B, dove la lana fornita era miscelata a piccole quantità di paglia, dando origine a un prodotto e un processo vantaggioso.

Questi elementi potrebbero essere pensati in relazione alla fattibilità e a una filiera concreta, affinando e migliorando il processo produttivo, rispetto a quello prototipale attuato in quest'ambito.

Un'ulteriore perfezionamento potrebbe riguardare la sostanza collante. Nel caso della colla di riso, dovrebbero essere studiati a livello chimico il legame, le proprietà e i possibili miglioramenti, per esempio per aumentare le performance di tenuta, permettendo così di diminuire il quantitativo all'interno della miscela, senza l'esercizio di una pressione maggiore. Inoltre dovrebbe essere analizzato e valutato il comportamento della colla all'umidità. La colla sviluppata, come tutte le colle di derivazione naturale, anche quelle commerciali, è caratterizzata da una bassa resistenza all'umidità, quest'ultima inoltre dovrebbe essere considerata, in funzione dell'igroscopicità della lana. Nel caso del polimero, come è stato più volte evidenziato, dovrebbe esserne esaminata la sostituzione con uno di origine naturale rispetto a uno di origine sintetica, tenendo comunque presente un conseguente aumento del costo. Tuttavia il passaggio non risulta immediato, per via della difficoltà di applicazione e del processo, come sperimentato con l'utilizzo del PLA.

Infine dovrebbe essere pensata nel dettaglio l'intera filiera produttiva, e ogni singola fase del processo. Senza escludere quella della fornitura delle materie poiché, nonostante le quantità elevate di scarti di polvere e fibre corte generate nel territorio biellese, dovrebbero essere valutate anche quelle affini con gli scarti utilizzati o eventualmente comporre un mix design con più tipologie e tenere sempre in conto le conseguenti variazioni acustiche e meccaniche. Lo stesso ragionamento dovrebbe essere esteso allo scarto derivante dalla filiera del riso, l'acqua di bollitura ricca di amido, della quale si conosce l'esistenza, ma non si hanno dati precisi, e per i polimeri, sia quelli di origine sintetica ma derivanti da un processo di riciclo sia per quelli di origine naturale.

Considerando uno sviluppo basato su queste idee, risulta oramai fondamentale considerare il progetto nel suo insieme, e non più per fasi: la variazione del mix design deve avvenire in funzione degli input progettuali, delle performance acustiche, della fattibilità e del relativo processo produttivo, della sostenibilità del prodotto e in questo caso anche del design, che potrebbe caratterizzare e rendere direttamente riconoscibile TECA panel.

13.3 ANALISI E CERTIFICAZIONI DI QUALITÀ DEL PRODOTTO

Un eventuale sviluppo futuro di TECA panel potrebbe considerare anche una serie di ulteriori analisi al fine di verificare in maniera più approfondita le sue proprietà, migliorarle, e valutare la possibilità di rispettare i termini di alcune certificazioni ed etichettature. In questo progetto le analisi effettuate sono state: la resistività al flusso, applicata sui campioni iniziali per permettere una prima valutazione, le misure in camera riverberante sui pannelli rettangolari realizzati, al fine di valutare le performance acustiche di TECA panel, i test alla fiamma, la valutazione della resistenza a compressione e la verifica di fissaggio meccanico. Si sottolinea che tali prove, nell'eventualità di una modifica del mix design o di uno sviluppo del design del prodotto devono essere effettuate nuovamente, per misurare le relative variazioni.

Dall'analisi effettuata nel capitolo 3, emerge come su sperimentazioni simili, oltre alle valutazioni acustiche, ve ne siano state ulteriori. Queste potrebbero essere applicate a TECA panel per verificarne le caratteristiche. Tali analisi consistono in una valutazione delle proprietà termiche, della biodegradabilità del prodotto, soprattutto in relazione alla fibra di lana e alla colla di origine naturale, in misure sulla tossicità e sul comportamento del prodotto all'umidità. Quest'ultima risulta del tutto essenziale per l'applicazione in un ambiente interno: nel caso della serie composta da polimeri solo la lana presenta caratteristiche igroscopiche per natura stessa della fibra, mentre nelle serie in cui vengono utilizzate colle naturali devono essere analizzate entrambe le sostanze, e comunque in seguito a un'evoluzione chimica del collante a base di amido di riso. La schedatura effettuata, suggerisce anche un'analisi del ciclo di vita (LCA, ISO 14040/14044) per valutare l'impatto ambientale del prodotto durante tutta la filiera produttiva. Potrebbe, nel caso specifico, risultare fondamentale anche per consentire un esame e una scelta definitiva tra le due serie analizzate nella seconda parte del progetto.
Inoltre si potrebbe approfondire lo studio sui costi relativo al capitolo 11, effettuando una vera e propria valutazione economica, per definire un prezzo effettivo del prodotto e verificarne la sua competitività nel mercato.

Si ricordano inoltre alcune certificazioni di qualità, per garantire la sostenibilità del prodotto e del processo, nonché identificare lo stesso come "green". I marchi ambientali di maggior rilievo sono Ecolabel (marchio europeo di certificazione ambientale) ed EPD (Environmental Product Declarations, ISO 21930), basata su un'analisi LCA. Quest'ultima, come molte altre etichette, porterebbe ad avere dei crediti nell'eventuale certifica-

zione LEED[1] di un edificio, nella sezione dedicata ai materiali e alle risorse. Inoltre una dichiarazione ambiatale come EPD, o equivalenti dichiarazioni di Prodotto di Tipo III [2], costituiscono l'unico modo per dimostrare la percentuale di materia riciclata all'interno del pannello. Queste ultime risultano fondamentali per il rispetto dei Criteri Ambientali Minimi[3] (CAM), che per questa tipologia di prodotto, stabiliscono delle limitazioni. Infatti si prevede una percentuale di materiale riciclato che va dal 60% all'80% nel caso in cui venga usato del poliestere (come nel caso delle serie A e P). Percentuale ampiamente soddisfatta da TECA panel poiché risulta riciclato al 100%. Non vi sono invece limitazioni per eventuali pannelli composti al 100% da prodotti naturali, i quali possono anche essere costituiti, in questo caso, da sostanze non riciclate. Potrebbe infine, essere considerata l'idoneità alla marchiatura CE, come contrassegno che attesti la conformità alle direttive comunitarie.

1_Certificazione volontaria (nata grazie a U.S. Green Building Council) che considera l'intero processo, dalla progettazione alla costruzione, valutando la sostenibilità con un approccio olistico. (http://www.gbcitalia.org/leed).

2_ Secondo ISO 14025:2010.

3_"Sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita, tenuto conto della disponibilità di mercato" (https://www.minambiente.it/pagina/i-criteri-ambientali-minimi).

14

CONCLUSIONI

Il percorso ha permesso l'analisi, il progetto e lo sviluppo di pannelli fonoassorbenti per l'ambiente interno, attraverso l'utilizzo di polveri e fibre corte di lana, derivanti da scarti aziendali del territorio biellese.
In conclusione però, a seguito di una trattazione complessa e articolata come quella che si è sviluppata nei numerosi capitoli precedenti, sorge spontaneo tirare le somme e porsi delle domande a cui si è cercato di dare una risposta concreta e concisa in queste righe finali.
Partendo con ordine:

PERCHÉ L'UTILIZZO DI UNA TIPOLOGIA DI SCARTO COME LE FIBRE TESSILI?

Perché rappresenta l'unico scarto aziendale che attualmente non viene riutilizzato e valorizzato, ma viene smaltito in discarica, poiché per via della sua complessa composizione è difficile poter pensare a successivi processi di lavorazione e campi di impiego, ma non si esclude alcuna possibilità considerando questo fatto come uno stimolo per la ricerca di soluzioni innovative e sostenibili.
Inoltre, come si è potuto comprendere durante la trattazione, viene generato in notevoli quantità, per questo si è cercato di promuovere un progetto che si sviluppasse nell'ottica della circular economy e si facesse promotore e garante della filosofia della sostenibilità. Le fibre corte e le polveri non possono più essere considerate uno scarto, ma rappresentano una valida risorsa, se si osservano in relazione a tutta una serie di caratteristiche quali per esempio l'elevato potere di assorbimento acustico, si pensi alla lana e alla sua composizione microscopica che in unione ad altri elementi favorisce il raggiungimento di determinate prestazioni. Tutte queste considerazioni hanno portato a maturare un interesse sempre più giustificato verso gli scarti derivanti dal settore del tessile per lo sviluppo in primis di un materiale e in seguito di un pannello vero e proprio che fosse non solo acusticamente performante ma anche flessibile nelle sue configurazioni e visivamente caratterizzante.

SONO GIÀ PRESENTI SUL MERCATO E IN AMBITO SPERIMENTALE DEI PANNELLI FONOASSORBENTI PRODOTTI DAGLI SCARTI TESSILI? IN COSA DIFFERISCONO RISPETTO A TECA PANEL?

Esistono numerose sperimentazioni riguardanti tipologie di pannelli simili, ma questi utilizzano scarti che a differenza di quelli scelti per questa sperimentazione, attualmente vengono già riutilizzati in processi di valorizzazione (fibre lunghe) e sono caratterizzati da un determinato prezzo di acquisto. Inoltre la sostanza collante in molte soluzioni è costituita da una resina di origine sintetica e non riciclata, quindi non biodegradabi-

le. I pannelli di questa tipologia presenti sul mercato spesso non sono rigidi e quindi non in linea con il fine ricercato da questa sperimentazione.

COME VENGONO TENUTE INSIEME LE POLVERI DI LANA?

Sono state analizzate e testate 12 tipologie di legante per verificare la fattibilità del processo, nonché le loro principali proprietà, portando alla realizzazione finale di oltre 90 campioni. Tra le principali sostanze impiegate si ricordano i polimeri riciclati, le colle a base d'amido, le colle naturali commerciali e quelle di origine animale. Per ciascuna di esse sono stati individuati dei vantaggi e delle problematiche nonché ipotizzate delle possibili soluzioni.

PER LO SVILUPPO DI TECA PANEL QUALE COLLANTE È STATO UTILIZZATO?

Innanzitutto TECA panel non individua un unico prodotto, ma una soluzione, un mix design che sia in grado di produrre pannelli a diverse densità in funzione della destinazione d'uso. Inoltre potrebbe essere realizzato secondo due soluzioni diversificate.

Per valutare il collante da utilizzare è stata analizzata la resistività al flusso presso l'INRiM, al fine di determinare le principali caratteristiche e di elaborare i coefficienti di assorbimento acustico dei provini. Uno dei problemi riscontrati che ha influito maggiormente sulla scelta è stata la differenza di densità che varia in funzione del collante utilizzato; questo ha portato all'elaborazione di modellazioni per definire il coefficiente di assorbimento acustico in funzione di qualsiasi densità ricercata, senza svolgere ulteriori misure. Solo in seguito a questo processo è stato effettuato un confronto fra le diverse sostanze collanti, che hanno portato a risultati spesso confrontabili. Lo sviluppo ha permesso di ottenere delle funzioni attraverso cui è possibile ricavare il mix design in funzione della densità richiesta.

Unendo tali risultati, a una valutazione economica, all'ipotesi di una filiera del prodotto e alla ricerca continua della sostenibilità sono stati determinati i collanti per i successivi sviluppi. In particolare sono state individuate negli scarti polimerici e nella colla di amido di riso, le soluzioni in grado di garantire e integrare tutte le intenzioni di tale prodotto, promuovendo inoltre la possibilità di essere ulteriormente analizzate e migliorate.

UNA VOLTA SELEZIONATI I COLLANTI COME SONO STATI SVILUPPATI I PANNELLI?

Prima di approdare a una soluzione sono emerse diverse problematiche, tra cui la necessità di cambiare fornitura per gli scarti di polveri di lana e il controllo della densità.

Quest'ultimo è avvenuto fino ad una certa fase esclusivamente attraverso il controllo della percentuale di collante utilizzato nel mix design, ma il passaggio da campioni di piccole dimensioni a pannelli di dimensioni maggiori ha portato all'introduzione della pressione nello sviluppo delle "ricette". Sono stati prodotti ulteriori provini, sviluppata un'apposita pressa, analizzato e studiato un processo produttivo prototipale al fine di generare pannelli di 20x30 cm, per qualsiasi densità richiesta, sia attraverso l'utilizzo dell'amido sia mediante i polimeri.

QUAL'È L'ASSORBIMENTO ACUSTICO DEI PANNELLI, ESSENDO UNO DEI PRINCIPALI OBIETTIVI DI TALE RICERCA?

Le performance acustiche sono state misurate grazie alla camera riverberante in scala del Politecnico di Torino (DENERG), attraverso la realizzazione di pannelli di misure 60x80 cm. I risultati ottenuti, elencati nella figura 1, dai test effettuati su questi prototipi (α_w: 0,45 nella soluzione più performante), in funzione della densità, sono direttamente confrontabili con prodotti attualmente presenti in commercio, come pannelli fonoassorbenti realizzati con scarti tessili (α_w : 0,45), o con prodotti di largo uso come il poliuretano espanso (α_w : 0,45). A differenza di questi ultimi, TECA panel, è dotato di rigidità e densità maggiori, e di caratteristiche di sostenibilità che lo rendono unico nel suo genere. Inoltre, sperimentando configurazioni differenti, come l'aggiunta di un air-gap, si favorisce un incremento delle prestazioni. Effettuando i test sui pannelli in configurazione baffles, sono state raggiunte performance acustiche confrontabili con quelle di prodotti noti diffusi sul mercato come quelli realizzati dalla Knauf.

Inoltre pannelli dotati di un'elevata densità, hanno mostrato andamenti di assorbimento tipici dei pannelli vibranti.

Si sottolinea infine come i pannelli di entrambe le serie prese in esame, a parità di densità e altezza, seppur caratterizzati dai rispettivi mix design, abbiano portato a risultati identici. Questo permette di affermare che nel caso di uno sviluppo del prodotto con una matrice di diversa tipologia, a parità di mix design le performance rimangono costanti. In definitiva con TECA panel possono essere prodotte diverse tipologie di soluzioni con differenti densità in funzione della necessità e del design richiesti.

NELL'IPOTESI DI UNA PRODUZIONE INDUSTRIALE, QUALE SAREBBE IL PROCESSO DI REALIZZAZIONE DI TECA PANEL?

Sono state ipotizzate delle filiere produttive ed elaborate delle indicazioni circa la produzione e i macchinari da impiegare per la realizzazione di ciascuno dei due prodotti

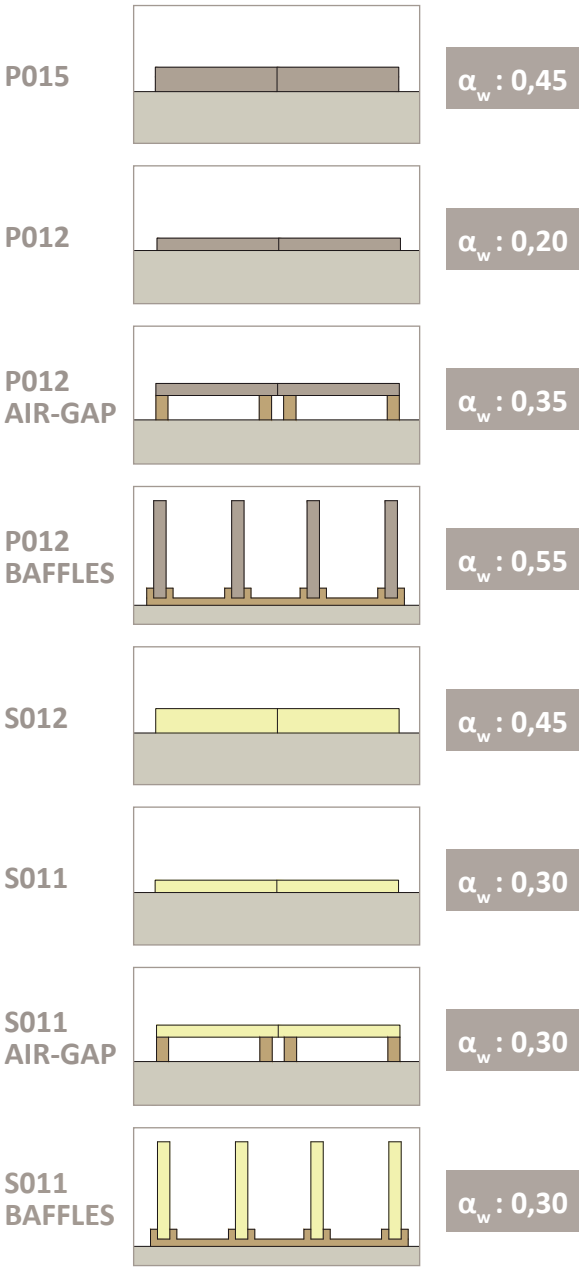


Figura 1: Confronto delle performance acustiche delle serie analizzate in differenti configurazioni. (Serie S: fibre + colla d'amido; Serie P: fibre + polimeri).

selezionati, evidenziando le differenze tra i processi e sottolineando costantemente come questi ultimi costituiscano solo delle ipotesi da valutare attentamente in un eventuale risvolto futuro.

QUANTO COSTA TECA PANEL?

Anche in questo caso sono stati analizzati i potenziali costi del prodotto attraverso diversi scenari: da un lato una realtà artigianale, dall'altro una industriale e automatizzata. Sono state inoltre inserite delle ipotesi per delineare un prezzo realistico. In funzione delle variabili considerate il costo per i pannelli della serie P varia da 54,90 a 13,80 €/m^2, mentre per i pannelli della serie C da 81 a 24 €/m^2. Appare significativo il confronto con pannelli aventi stesse caratteristiche, ma realizzati con matrici o colle commerciali, dove il costo, a parità di condizioni si colloca oltre i 170 €/m^2 per la serie P e oltre i 600 €/m^2 per la serie C. Tali prezzi sebbene ipotetici permettono di sottolineare il forte vantaggio nell'utilizzo di uno scarto industriale in relazione all'acquisto della sostanza legante. Inoltre i costi ottenuti possono essere confrontati con pannelli attualmente venduti sul mercato, in funzione della categoria in cui si collocano.

QUALI SONO LE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL PRODOTTO?

Nonostante queste caratteristiche vengano raramente analizzate su prodotti simili, è stata valutata presso il Laboratorio Lastin del Politecnico di Torino (DAD) la resistenza a compressione al 10% e al 50 % di schiacciamento. I risultati permettono di evidenziare notevoli resistenze, soprattutto a favore dei campioni a base polimerica (figura 2) anche se confrontati con una commerciale fibra di legno o con un pannello fonoassorbente in sughero. Inoltre è stato verificato il fissaggio meccanico dei pannelli su una superficie verticale per rilevare eventuali problemi di lavorabilità, di penetrazione della vite o di rifollamento del foro di applicazione: i risultati relativi ai campioni testati sono stati positivi grazie alla elevata rigidità ottenuta con TECA panel e non hanno presentato alcuna problematica, dimostrando anzi, in questa configurazione, di sopportare carichi applicati, reagire a urti di lieve entità e resistere ad elevate pressioni.

COME REAGISCE TECA PANEL ALLA FIAMMA?

Entrambe le serie analizzate (a base polimerica e di amido), sono classificate come prodotti autoestinguenti (figura 3), raggiungendo prestazioni superiori a quelle ottenute da un pannello fonoassorbente commerciale, realizzato con scarti tessili. Tuttavia il pannello della serie S, prodotto con fibre e amido, raggiunge risultati nettamente migliori, emergendo come quello che potenzialmente potrebbe rispondere ai requisiti richiesti dalla certificazione HF-1 (UL 94).

	PRESSIONE ESERCITATA [MPa]	
	schiacciamento 10 %	schiacciamento 10 %
S012	0,07	0,27
S011	0,68	6,81
P015	0,10	0,34
P012	0,14	1,02

Figura 2: Confronto della resistenza a compressione al 10% e al 50 % di schiacciamento.

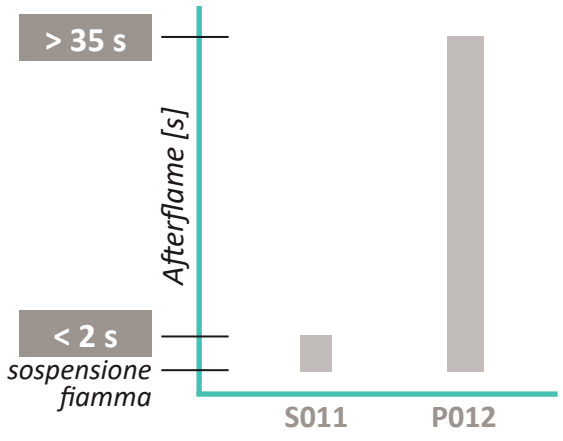


Figura 3: Valutazione afterflame dei due campioni analizzati alla fiamma.

LO SVILUPPO DI TECA PANEL PUÒ RITENERSI CONCLUSO?

Grazie ai risultati positivi ottenuti dalle analisi e dalle sperimentazioni, ci sono ottime opportunità di uno sviluppo futuro per TECA panel. In particolare si fa riferimento all'aspetto legato al design del prodotto, fondamentale per delineare tutte le altre caratteristiche ad esso connesse. Un ulteriore possibile sviluppo è legato invece alle sostanze collanti: queste presentano aspetti positivi e negativi, che potrebbero condurre ad interessanti risultati se ulteriormente approfonditi e analizzati. Per questi motivi la sperimentazione e lo sviluppo di TECA panel non possono considerarsi conclusi ma questo progetto lascia diverse vie aperte verso possibili scenari futuri.

A SEGUITO DEGLI INNUMEREVOLI RISULTATI OTTENUTI, QUALE SERIE RISULTA ESSERE LA MIGLIORE?

Entrambe le serie risultano dare risposta agli obiettivi progettuali prefissati, con alcune differenze e aspetti da valutare in un eventuale concreto sviluppo del progetto, come illustrato nella figura 4.

I prototipi realizzati con fibre di lana e amido permettono di generare un pannello al 100% naturale, biodegradabile e totalmente riciclato. Il rispettivo comportamento al fuoco è ottimo. Tuttavia la principale problematica rilevata consiste in una resistenza minima all'acqua: ciò comparta un inevitabile sviluppo chimico per ovviare al problema. I pannelli realizzati con fibre e polimeri invece non presentano problematiche di resistenza all'umidità ma la loro prestazione al fuoco deve essere migliorata. Un altro aspetto negativo in relazione agli obbiettivi del progetto è legato alla sua origine sintetica nonostante si tratti di un prodotto riciclato: infatti non risulta biodegradabile, ma la sua sperimentazione è stata comunque avanzata nell'ipotesi di sostituire lo scarto sintetico con un polimero biodegradabile come il PLA. Come emerso dalla valutazione economica però in questo caso il prezzo subirebbe un aumento non indifferente. Una analisi LCA a integrazione delle volontà e dei principi imprenditoriali consentirà la scelta dell'uno o dell'altro prodotto, o addirittura la possibilità di un duplice sviluppo e del relativo scenario, per questo non è ancora possibile dire quale serie sia la migliore; entrambe vanno considerate in relazione a una molteplicità di aspetti che ne definiscono i pro e i contro.

TECA PANEL POTREBBE RITAGLIARSI UNA CONCRETA FETTA DI MERCATO, NONOSTANTE LA FORTE CONCORRENZA E LA SCARSA INFORMAZIONE?

Si. Le analisi dimostrano come questa soluzione sia unica nel suo genere, e i risultati

come TECA panel abbia ottime potenzialità. Con la risposta a queste domande emergono in sintesi tutti i punti affrontati durante la sperimentazione che danno conferma del fatto che TECA panel, fin qui, rappresenti l'ottimo risultato di un progetto che merita ancora di essere portato avanti su quei fronti scrutati ma non approfonditi che costituiscono un potenziale importante per sviluppi futuri.

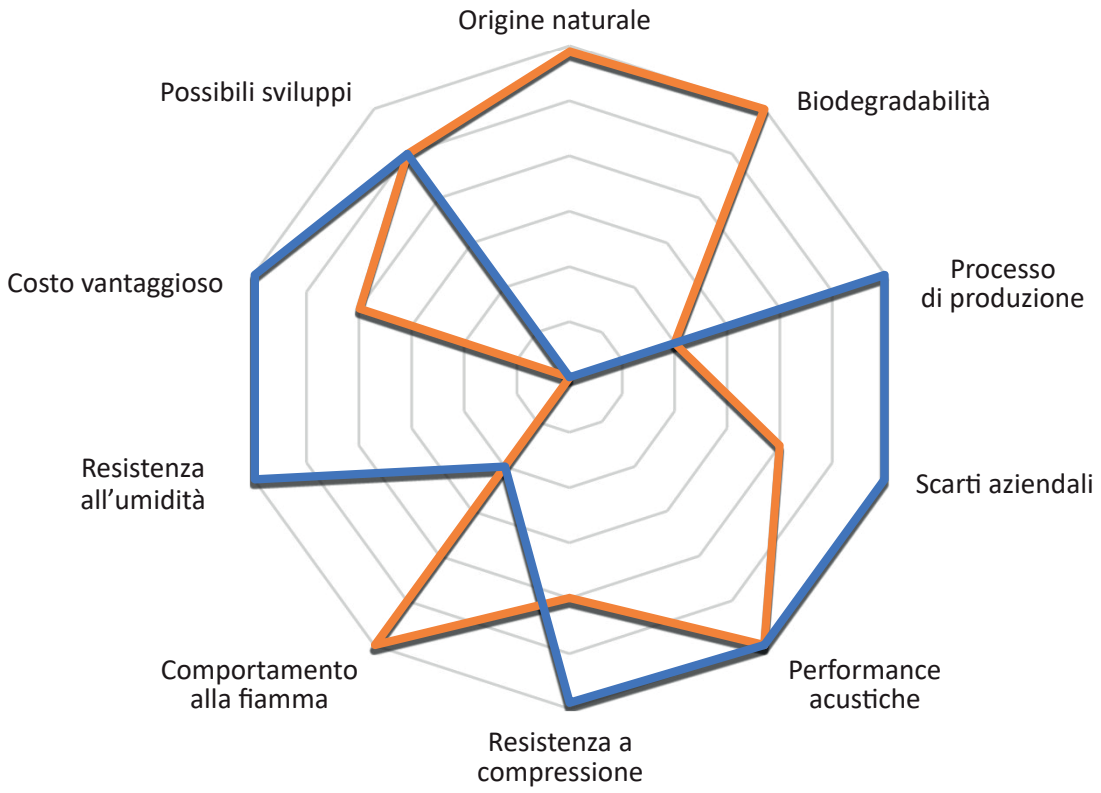


Figura 4: Confronto conclusivo fra le principali caratteristiche dei due leganti selezionati.

Serie S: polveri e fibre + colla d'amido.

Serie P: polveri e fibre + polimeri.

ALLEGATI

- ALLEGATI A: Schede 1-22.
- ALLEGATO B: Lana Vergine Lanificio Reda.
- ALLEGATO C: Esempio di scheda polimeri, Verniciatura Industriale Sassone.
- ALLEGATO D: Scheda tecnica, colla Coccoina, Balma Capoduri & C. s.p.a.
- ALLEGATO E: Scheda tecnica, colla Oko NaturKleister, Creartec.
- ALLEGATO F: Certificazione acustica di prodotto: Knauf AMF.

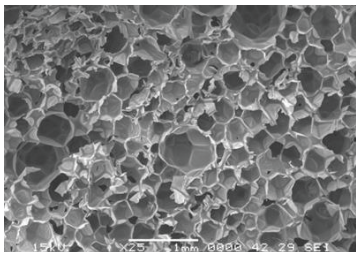
SCHEDA 1

PUBBLICAZIONE
Tiuca Ancuţa-Elena, *et. al, Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste*, in *Energy Procedia*, volume 85, Elsevier, 2015, pp. 559-565

OBIETTIVO
Ridurre i livelli di inquinamento acustico utilizzando uno dei migliori materiali termoisolanti disponibili in combinazioni con scarti tessili. Questo perché nell'UE vengono prodotti circa 5,8 milioni di tonnellate di rifiuti tessili (post-consumo), di cui solo 1,5 milioni vengono riciclati.

MATERIE PRIME
Rifiuti tessili (fibre sintetiche: 15% di poliammide, nylon, 40% di polyacril e 45% modal con densità 0,051 g/cm^3) + schiuma poliuretanica rigida bicomponente.

Rifiuti tessili sintetici.

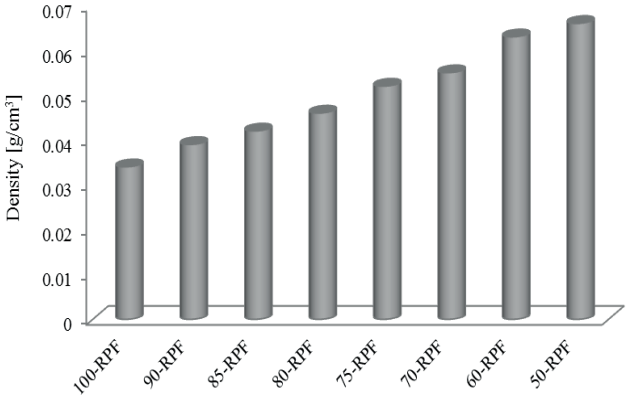

Schiuma poliuretanica, SEM.

ASSEMBLAGGIO
La schiuma poliuretanica è stata preparata a temperatura ambiente (25°C).
Combinazioni diverse di percentuali fra i due materiali, partendo dal 100% di RPF e riducendo fino al al 50% di RPF. Infatti superando questa percentuale il prodotto non risultava omogeneo. I componenti vengono poi mescolati a 2000 rpm per omogeneizzare il prodotto all'interno di stampi cilindrici con diametro di 63,5 mm e spessore do 40 mm.

Campioni composti con differenti percentuali delle materie utilizzate.

TEST ACUSTICI
Coefficiente di assorbimento acustico acquisito tramite tubo di impedenza (ISO 10534-2) da 100 a 3500 Hz.

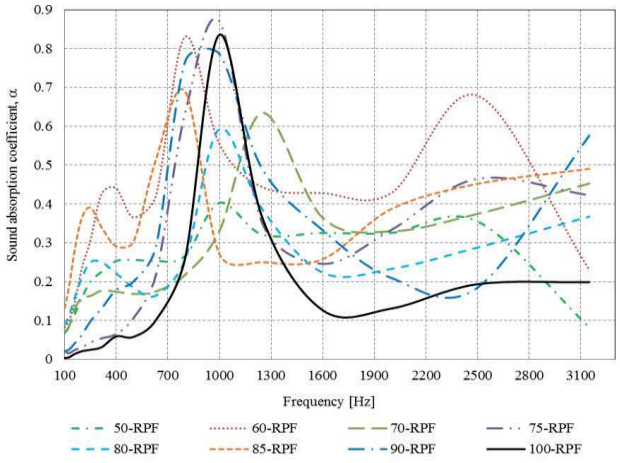
DENSITÀ



Densità dei provini realizzati in funzione del rapporto delle materie.

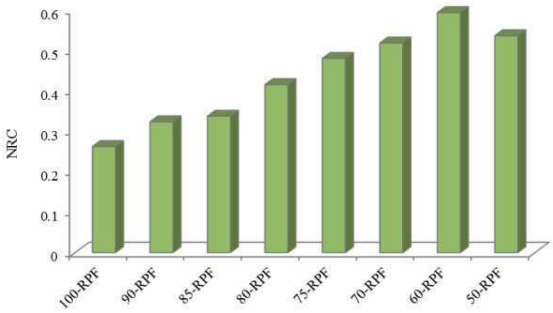
RISULTATI ACUSTICI

Le diverse combinazioni portano ad avere il massimo coefficiente di assorbimento acustico a differenti frequenze. L'apice è individuato nel provino con 75 RPF a 1000 Hz: 0,86.



Coefficienti di assorbimento acustico dei campioni analizzati.

Se si considera la metrica NRC, il risultato massimo coincide con il provino 60 RPF, con un valore raddoppiato rispetto al provino composto al 100% di poliuretano.



Confronto fra NRC dei campioni.

SCHEDA 2

PUBBLICAZIONE

Drochytka Rostislav, *et. al, Performance Evaluation and Research of Alternative Thermal, Insulation Based on Waste Polyester Fibers*, in *Procedia Engineering*, volume 195, Elsevier, 2017, 236-243

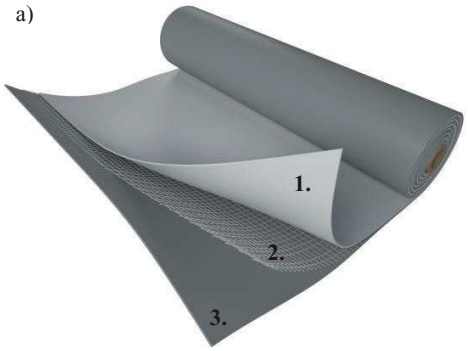
OBIETTIVO

Comporre un isolante termo-acustico rispettoso dell'ambiente al fine di ridurre i rifiuti destinati alle discariche, che vengono generati nella produzione di membrane impermeabilizzanti; inoltre espandere l'industria manifatturiera del produttore.

MATERIE PRIME

Scarti di produzione di polivinilcloruro plastificato di alta qualità (PVC-P) rinforzato con maglia di poliestere.

a)



Polivinilcloruro plastificato multistrato.

b)

Scarti di produzione, poliestere.

ASSEMBLAGGIO

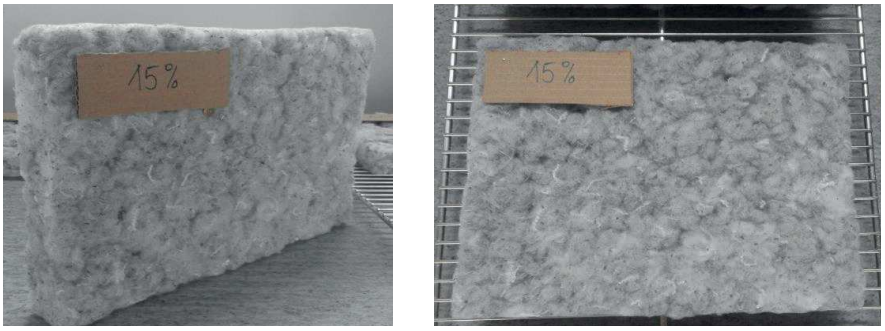
Durante la linea di produzione i bordi frastagliati aventi larghezza di circa 50 - 100 mm vengono tagliati e trasportati alla linea di riciclaggio. In seguito vengono centrifugati e infine separati generando un granulato di polivinilcloruro e fibre di poliestere.
Il prodotto viene assemblato con in legante in proporzione di 80:20.

Processo:
- scomposizione manuale delle fibre di poliestere di scarto.
- separazione del granulato delle PVC-P (dimensione della maglia del setaccio 20 mm).
- scomposizione manuale delle fibre bi-componenti .
- omogeneizzazione manuale delle fibre poliestere e bi-componente con dosaggio di 5, 7,5, 10, 15 e 20%.
- formazione della piastra isolante.
- trattamento termico a una temperatura di 90°C.
- raffreddamento.

Come dose minima di legante per garantire un'adeguata coesione è stato individuato il 15% di fibre bi-componenti.
I campioni di prova sono stati preparati in piastre di dimensioni 300 x 300 x 50 mm e 200 x 200 x 30 mm nella seguente composizione.

Sample	Binder [% by mass]	Polyester fibers [% by mass]
5%_BiCo	5	95
7.5%_BiCo	7.5	92.5
10%_BiCo	10	90
15%_BiCo	15	85
20%_BiCo	20	80

Percentuali utilizzate per la composizione dei provini.



Pannelli composti con il 15% di fibre bi-componenti.

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza secondo EN ISO 11654 tra i 100 e i 5000 Hz.

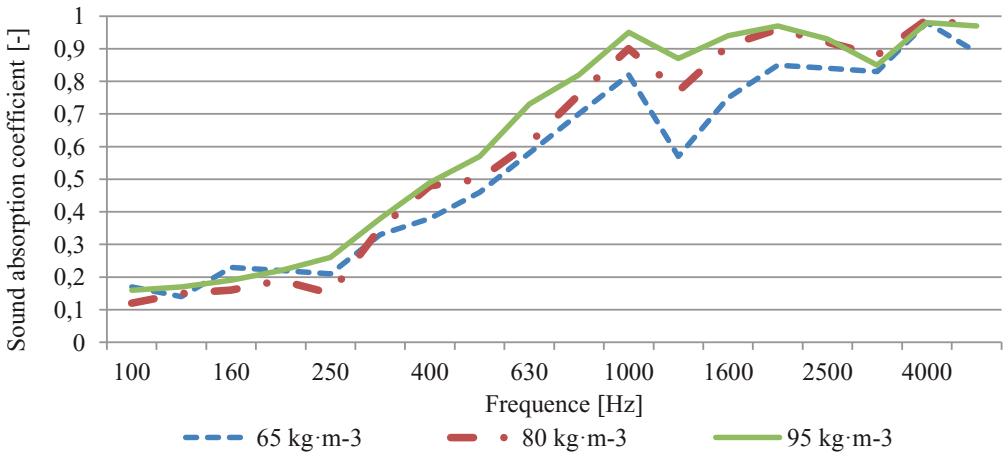
In totale sono stati testati tre campioni di prova con densità di massa di 65, 80 e 95 kgm^3.

RISULTATI ACUSTICI

Come si può notare il coefficiente di assorbimento aumenta con l'aumentare della densità con un risultato massimale di 0,99 a 4000 Hz per il provino con densità di 95 kg/m^3.

Possiamo confrontare i risultati dei tre campioni a 1000 Hz con i seguenti risultati:

- 0.82 per il provino con densità di 65 kg/m^3
- 0.9 per il provino con densità di 80 kg/m^3
- 0.95 per il provino con densità di 95 kg/m^3



Confronto delle performance acustiche in funzione della densità, campione 15% BiCo.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Elevata resistenza all'umidità e agli attacchi biotici (non marciscono).
- Non tossicità, le fibre di poliestere sono esenti da insetticidi e colle.
- Il processo di fabbricazione "Airlay" è privo di leganti chimici e colla.
- Isolamento completamente riciclabile.
- Proprietà termiche (ISO 8301) comparabili con materiali usati tradizionalmente.

SCHEDA 3

PUBBLICAZIONE

Buratti C., *et. al, Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization*, in *Energy Procedia*, volume 101, Elsevier, 2016, pp.

OBIETTIVO

Caratterizzazione acustica di pannelli fonoassorbenti, costituiti da materiali riciclati in grado di fornire benefici ambientali, sociali ed economici, attentamente valutati in questo studio.

MATERIE PRIME

Stuoie di fibre di polietilene, carta straccia e scarti di lana.

Campioni realizzati: da sinistra rispettivamente tipo D, E, G.

ASSEMBLAGGIO

- Tipo D: è composto da carta straccia e tessuto fibre, unite a colla, con uno spessore totale di 18 mm.
- Tipo E: è costituito da un solo strato di carta riciclato, incollato e pressato (spessore 10 mm).
- Tipo G: pannello con uno spessore totale di 50 mm, composto da due strati: un pannello in fibra di lana incollata (spessore 45 mm) e un singolo strato di carta straccia, pressato e incollato (spessore 5 mm).

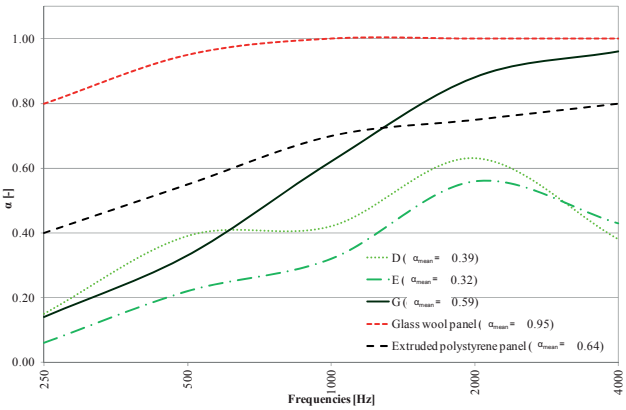
Gli spessori dei pannelli testati sono quelli standard commercializzati dal produttore. Per le prove acustiche sono stati prodotti campioni cilindrici con diametri di 29 e 100 mm.

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza secondo ISO 10534-2 tra i 100 e i 5000 Hz con diametro dei campioni di 29 e 100 mm.

RISULTATI ACUSTICI

Il provino tipo G (coefficiente di assorbimento acustico medio: 0,59)è quello che presenta prestazioni migliori rispetto ai provini D ed E, soprattutto sopra i 1000 Hz. Risulta avere prestazioni maggiori anche rispetto a un pannello commerciale in polistirene estruso al di sopra dei 1000 Hz, mentre appaiano inferiori al di sotto di questa frequenza.
Rispetto alla fibra di vetro le caratteristiche del campione di tipo G risultano nettamente inferiori.



Confronto dei risultati ottenuti dalla misura dei campioni, rispetto alla fibra di vetro.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

A tal proposito è stato esaminato un caso studio: un' aula universitaria dell'Università di Perugia. Attraverso lo sviluppo di un modello software, realizzato con RAMSETE, è stato studiato il reale comportamento della stanza nei casi in cui fossero stati impiegati materiali acustici sostenibili piuttosto che alcune soluzioni standard.

I risultati LCA mostrano che i materiali riciclati possono ridurre significativamente le emissioni di gas serra e il consumo di energia durante l'intero processo produttivo. Le migliori prestazioni ambientali, considerando un'area normalizzata, sono state rilevate in relazione al pannello G, realizzato con scarti di lana e carta riciclata, grazie alla minore quantità di materiale richiesto e alla sua densità.

A seguito della valutazione economica, è stato dimostrato come il pannello di tipo G consenta un risparmio del 68% rispetto al polistirene estruso e del 50% rispetto alla lana di vetro.

SCHEDA 4

PUBBLICAZIONE

Patnaik Asis, *et. al, Thermal and sound insulation materials from waste wool andrecycled polyester fibers and their biodegradation studies,* in *Energy and Buildings*,Elsevier, volume 92, Elsevier, 2015, pp. 161-169

OBIETTIVO

Studio di un pannello termo-acustico realizzato aggiungendo RPET alle fibre di lana riciclate: lo scarto di produzione del primo non sarebbe comunque in grado di rispondere alla domanda. Questi pannelli avranno il compito di ridurre drasticamente le emissioni di carbonio, durante il loro ciclo di vita, rispetto ai materiali tradizionali.

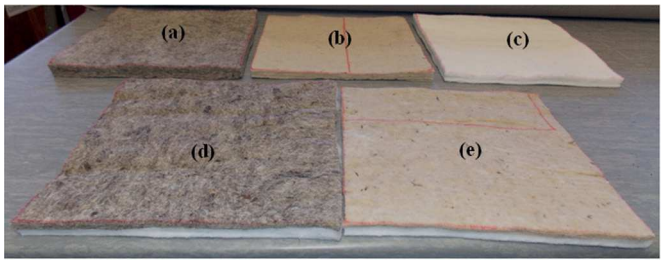
MATERIE PRIME

- Poliestere riciclato (RPET) derivante da bottiglie
- Fibre di lana di scarto derivanti da due diverse produzioni

ASSEMBLAGGIO

Per preparare i provini, le singole fibre sono state inizialmente aperte su un apri balle. Quindi, il nastro di fibra è stato incrociato trasversalmente su un rullo con un ago punzonato su una punzonatrice ad aghi.
Mediante quest'ultimo processo sono stati prodotti 5 provini:
- CW 100% fibre di lana, (a).
- DW 100% fibre di lana, (b).
- RPET 100% poliestere riciclato, (c).
- CWP 50% fibre di lana CW + 50% poliestere riciclato (non miscelati ma sotto forma di tappetino composto dai due materiali), (d).
- DWP 50% fibre di lana DW + 50% poliestere riciclato (non miscelati ma sotto forma di tappetino composto dai due materiali), (e).

In tutti i provini è stata aggiunta una miscela di fosfato di ammonio e tetraborato di sodio per conferire proprietà di resistenza al fuoco e come aiuto per contrastare la nascita di funghi o falene.



Composizione dei pannelli in funzione della tipologia di assemblaggio illustrata.

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza secondo ASTM E 1050-10 tra i 50-5700 Hz. L'intervallo di frequenza è stato suddiviso in tre classi diverse, gamme basse (50-1000 Hz), medie (1000-2000 Hz) e alte (2000-5700 Hz). Cinque letture sono state prese casualmente da ciascun campione per valutare le proprietà acustiche.

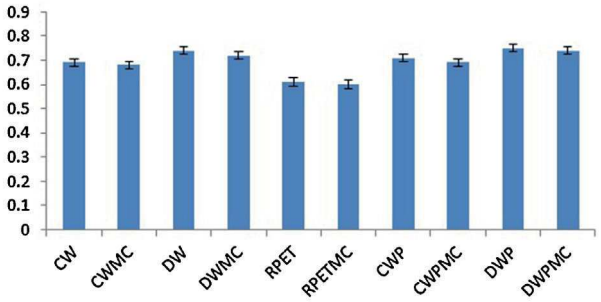
Acoustic coefficients (α) in various frequency ranges.

Sample code	50–1000 [Hz]	1000–2000 [Hz]	2000–5700 [Hz]	50–5700 [Hz]
CW	0.10 (0.050)	0.42 (0.050)	0.85 (0.057)	0.69 (0.058)
DW	0.16 (0.064)	0.55 (0.062)	0.94 (0.062)	0.74 (0.063)
RPET	0.09 (0.012)	0.34 (0.015)	0.81 (0.025)	0.61 (0.029)
CWP	0.13 (0.032)	0.48 (0.031)	0.89 (0.030)	0.71 (0.032)
DWP	0.18 (0.036)	0.58 (0.034)	0.95 (0.033)	0.75 (0.035)

Coefficienti acustici in frequenza dei 5 pannelli analizzati.

RISULTATI ACUSTICI

Alle basse e medie frequenze il coefficiente di assorbimento acustico di RPET risulta inferiore rispetto alle alternative probabilmente per via della presenza di una fibra liscia. Gli altri campioni dimostrano risultati confrontabili con una pendenza favorevole per quelli contenenti DW per via per via della combinazione con una fibra di maggiore lunghezza.



Confronto delle performance acustiche di pannelli.

CONSIDERAZIONI

- Si è riscontrato come la proprietà di assorbimento del suono sia stata migliore per valori di spessore più elevati.
- La struttura più spessa assorbe l'onda sonora causando una perdita di attrito tra l'onda sonora e le fibre, attenuando così gli effetti della propagazione dell'onda stessa.
- Fattore importante è costituito dalla tortuosità delle fibre, ossia il rapporto della lunghezza delle aperture, cioè la lunghezza dei pori interconnessi attraverso lo spessore del materiale. Lo spessore più elevato del campione consente all'onda di essere incanalata attraverso il percorso tortuoso delineato dai pori, creando così maggiori perdite per attrito e aumentando il valore dell'assorbimento acustico.
- Inoltre, DWP era una struttura a due strati, progettata per intrappolare l'onda sonora all'interno della struttura. La struttura a due strati con intercapedine interna tra i due, smorza l'onda sonora all'interno del campione.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Conduttività termica calcolata come previsto dallo standard ASTM C518-10.
Risultati confrontabili tra i cinque campioni con modesti miglioramenti con l'aggiunta di RPET.
- Valutazione dell'assorbimento dell'umidità dei campioni, misurato secondo lo standard SANS 1381-1: 2007.
- Test al fuoco dei campioni secondo lo standard SANS 10177-5: 2007.
- Struttura del materiale determinata mediante scansione al microscopio elettronico (SEM).
- Test sulla biodegradabilità di campioni secondo lo standard ASTM D6400 (metodo di compostaggio per 50 giorni). Alcune fibre di lana dei tappetini CW e CWP hanno subito un degrado, mentre, come previsto, non sono stati osservati cambiamenti nella morfologia del fibre di RPET.

SCHEDA 5

PUBBLICAZIONE
Islam S., *et. al, Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers*, in *International Journal of Clothing Science and Technology*, volume 30, Emerald, 2018, pp. 444-458

OBIETTIVO
Studiare le proprietà acustiche dei non tessuti agugliati prodotti con fibre di bambù, banana e canapa miscelate con poliestere (PET) e polipropilene (PP), in quanto caratterizzati da buone proprietà acustiche.

MATERIE PRIME
- bambù + PET + PP con rapporto 35:35:30
- banana + PET + PP con rapporto 35:35:30
- canapa + PET + PP con rapporto 35:35:30

ASSEMBLAGGIO
Per la produzione dei provini è stata utilizzata la tecnica di punzonatura ad ago, applicata a ciascuno strato per tre volte, in modo da formare un composito tessile non tessuto.

TEST ACUSTICI
Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza secondo ASTM C384.

RISULTATI ACUSTICI
E' emerso che rispetto agli altri campioni il composto di bambù + PET + PP oltre ad avere una minor conduttività termica e una minore permeabilità all'aria presenta il miglior coefficiente di assorbimento. Tuttavia a medie frequenze (800 Hz) il coefficiente risulta più basso del 20% rispetto al composto a base di banana. I valori vengono considerati accettabili ma si consiglia un incremento dello spessore del materiale.

SCHEDA 6

PUBBLICAZIONE

Buratti C., *et. al, Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials*, in *Construction and Building Materials,* volume 171, Elsevier, 2018, pp. 338-349

OBIETTIVO

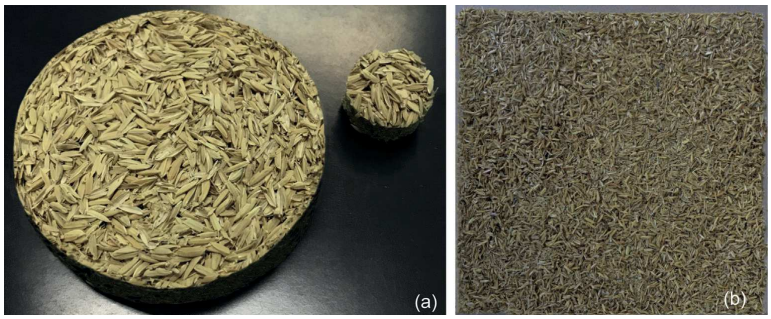
La novità di questo articolo consiste nel presentare i risultati di una caratterizzazione termica, acustica e dell'analisi del ciclo di vita di un materiale innovativo, ottenuto dagli scarti della lavorazione del riso. Il riso infatti risulta essere la terza merce più prodotta al mondo dopo la canna da zucchero e il mais.

MATERIE PRIME

Buccia di riso

ASSEMBLAGGIO

Per la realizzazione del campione, è stata utilizzata, come collante per la buccia di riso, una percentuale di colla poliuretanica del 2,5% del peso totale, con una densità di 1.000 kg/m^3. Si tratta di un adesivo poliuretanico in dispersione acquosa applicato con tecnica a spruzzo. Sono stati quindi composti dei campioni di forma circolare di 2,9 x 10 cm di diametro, per misure acustiche, e pannelli quadrati di 300 x 300 mm per quelle termiche.



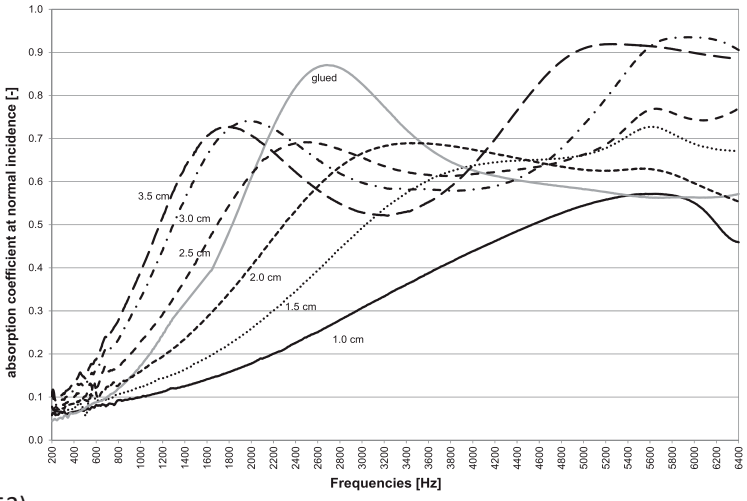
Campioni composti con buccia di riso, di forma circolare per le misure acustiche, quadrati per quelle termiche.

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza.
Sono state considerate due configurazioni: la misurazione nell'intervallo di frequenza 100-1600 Hz, con campioni di diametro pari a 29 e nell'intervallo 500-6400 Hz campioni di diametro pari a 100 mm.

RISULTATI ACUSTICI

Come previsto il materiale sciolto presenta valori di coefficiente di assorbimento più bassi rispetto a quello incollato; Inoltre sono stati valutati i coefficienti per diversi spessori. I valori massimi sono circa 0,74 e 0,91 misurati rispettivamente a 1700 e 5300 Hz per lo spessore massimo di 3,5 cm.



Confronto assorbimenti acustici in funzione dello spessore e della colla.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Test termico (small hot box).
- Resistenza al flusso e porosità (ISO 9053).
- Analisi LCA (ISO 14040).

SCHEDA 7

PUBBLICAZIONE

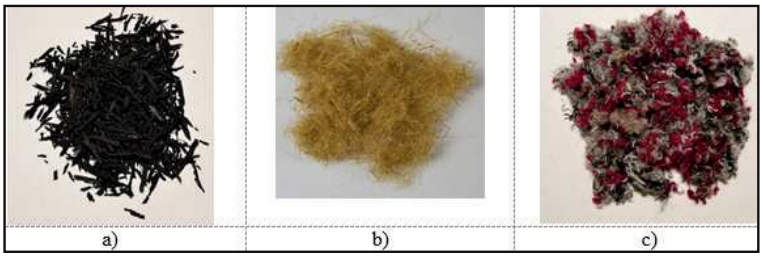
Tiuc Ancuta-Elena, et. al, *Sound Absorbing Insulating Composites Based onPolyurethane Foam and Waste Materials*, in *Materiale Plastice*, volume 55, Syscom 18, 2018, pp. 419-422

OBIETTIVO

Realizzazione di un pannello acustico ottenuto con materiali di scarto in conformità alla direttiva 2010/31/UE, che stabilisce che tutte le nuove costruzioni debbano essere edifici a impatto energetico quasi zero.

MATERIE PRIME

- briciole di gomma riciclata (dimensione di 1 ÷ 10 mm e una densità di 0,3 g /cm^3)
  + schiuma poliuretanica bicomponente
- scarti di fibre di lino (con densità di 0,02 g /cm^3)
  + schiuma poliuretanica bicomponente
- Rifiuti tessili; fibre sintetiche (con una densità di 0,03 g /cm^3)
  + schiuma poliuretanica bicomponente

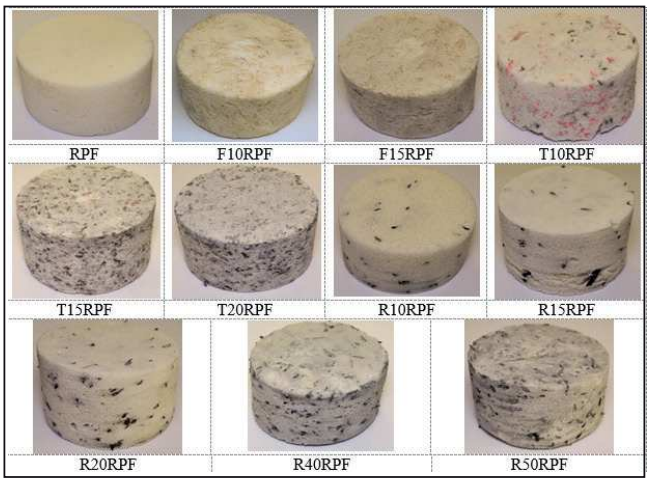


Materie prime unite alla schiuma poliuretanica: a gomma riciclata, b fibre di lino, c fibre sintetiche.

ASSEMBLAGGIO

Per miscelare è stato utilizzato uno mixer fino a 2000 rpm al fine di ottenere un risultato omogeneo.
Sono stati prodotti per ogni combinazione diversi provini in base al peso della schiuma utilizzata come legante. In totale sono stati ottenuti 11 campioni con uno spessore di 40 mm.

Code	Waste materials		Rigid polyurethane foam (wt%)	Apparent density (g/cm^3)
	Type	wt%		
R10RPF	Rubber crumbs	10	90	0.038
R15RPF		15	85	0.044
R20RPF		20	80	0.062
R40RPF		40	60	0.075
R50RPF		50	50	0.102
F10RPF	Flex fibre	10	90	0.034
F15RPF		15	85	0.039
T10RPF	Textile waste	10	90	0.036
T15RPF		15	85	0.053
T20RPF		20	80	0.057
RPF	-	-	100	0.04

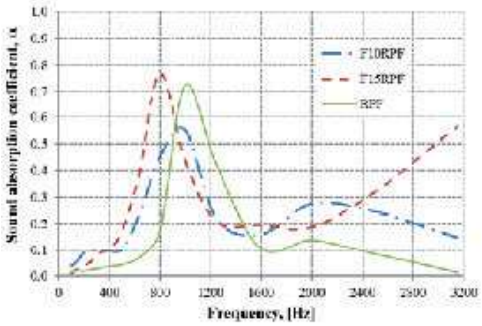


Campioni realizzati, in funzione del mix design riportato nella tabella, spessore di 40 mm.

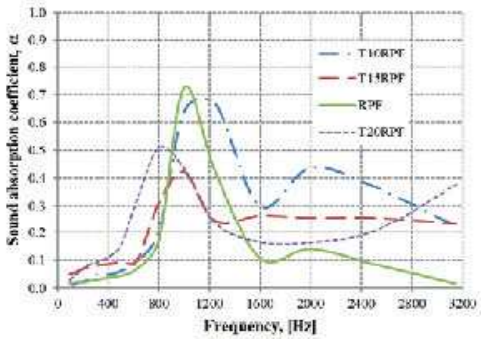
TEST ACUSTICI
Coefficiente di assorbimento acustico calcolato attraverso tubo di impedenza secondo ISO 10534-2 tra i 100 e i 3200 Hz con diametro dei campioni di 63,5 mm.

RISULTATI ACUSTICI
I materiali compositi ottenuti aggiungendo degli scarti sopra citati alla matrice rigida in poliuretano espanso risultano avere proprietà di assorbimento migliori rispetto alla schiuma poliuretanica rigida al 100%.

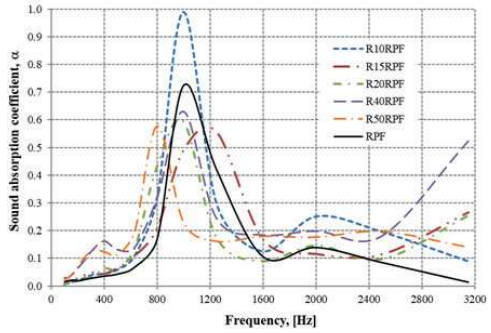
fibre di lino



scarti tessili

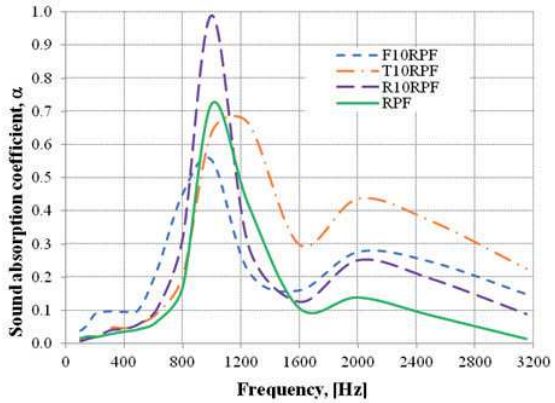


briciole di gomma riciclata



Confronto tra i risultati di assorbimento acustico misurati in funzione del mix design e della materia prima utilizzata. Grafici rispettivamente corrispondenti a fibra di lino, scarti tessili e briciole di gomma riciclata.

- 100 Hz ÷ 800 Hz, il poliuretano espanso rigido al 90% mescolato con fibre di lino al 10% (F10RPF) ha migliori proprietà di assorbimento delle onde sonore.
- 800 Hz ÷ 1100 Hz, il materiale che contiene il 90% di poliuretano rigido in schiuma miscelato con il 10% di gomma riciclata (R10RPF) mostra il miglior valore del coefficiente di assorbimento acustico.
- 1100 Hz ÷ 3200 Hz, il materiale con schiuma poliuretanica rigida al 90% mescolato al 10% i rifiuti tessili (T10RPF) mostra un coefficiente di assorbimento acustico superiore rispetto a quello degli altri materiali.



Confronto delle performance acustiche fra le diverse tipologie di materia prima utilizzata.

SCHEDA 8

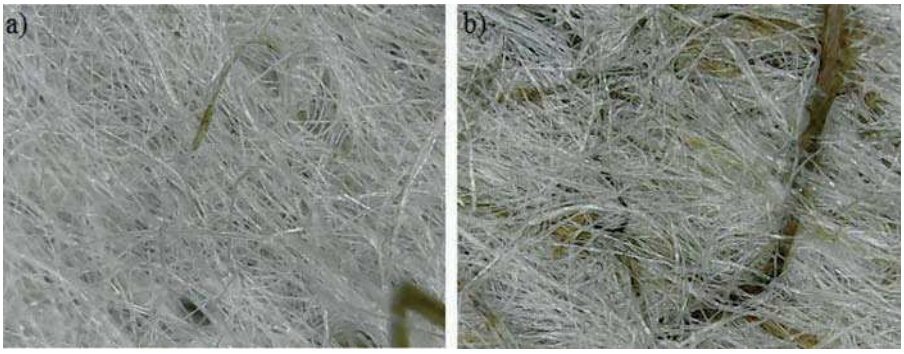
PUBBLICAZIONE
Muthukumar N. , *et. al, Sound and thermal insulation properties of flax/low melt PET needle punched nonwovens*, in *Journal of Natural Fibers,* volume 16, Taylor & Francis, 2019, pp. 245-252

OBIETTIVO
Sviluppo di un pannello termo-acustico utilizzando fibre di lino all'interno di un tessuto non tessuto agugliato.

MATERIE PRIME
Fibre di lino + fibre di poliestere (PET)

ASSEMBLAGGIO
Le fibre di lino sono state trattate con soluzione alcalina e in seguito miscelate.
Le fibre di PET sono state formate usando una carda per modelli di laboratorio attraverso un telaio ad aghi per creare un tessuto non tessuto.
Quindi il tessuto non tessuto è stato passato attraverso una calandra calda a una temperatura di 120 ° C per migliorare le caratteristiche meccaniche e il legame tra le fibre, senza il verificarsi di alcuna reazione chimica tra lino e PET.

I campioni di tessuto non tessuto sono stati sviluppati miscelando fibre di lino con PET a basso punto di fusione a 3 rapporti di miscela (10%, 20% e 30%) con profondità di penetrazione dell'ago di 7 mm e 10 mm.



Fibre di PET prima e dopo il processo di calandratura.

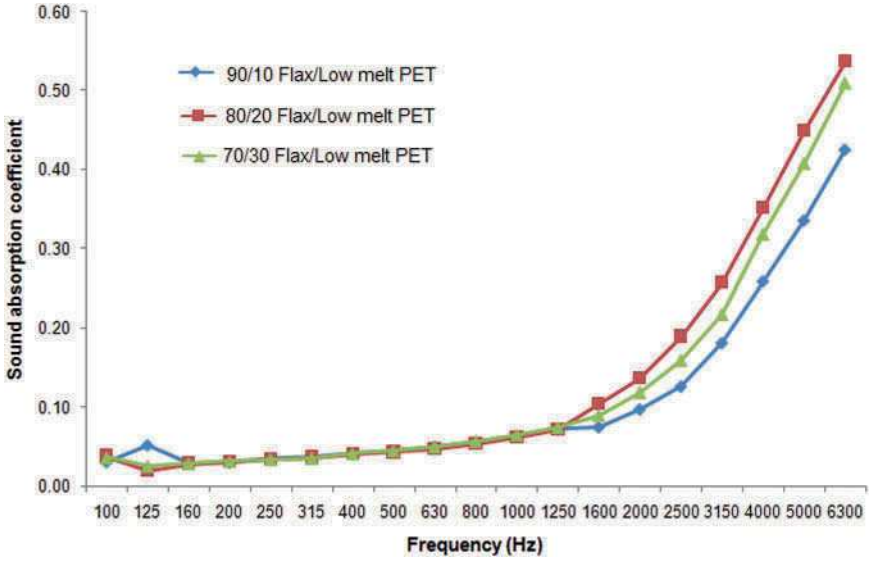
	7 mm needle penetration			10 mm needle penetration		
Flax/low melt PET %	Thickness (mm)	GSM	Density (g/cm^3)	Thickness (mm)	GSM	Density (g/cm^3)
90/10	1.19	320	0.270	1.62	609	0.376
80/20	1.24	404	0.325	1.22	481	0.394
70/30	1.03	358	0.347	1.04	421	0.404

Proprietà e caratteristiche delle fibre di poliestere.

TEST ACUSTICI
Il coefficiente di assorbimento acustico dei non tessuti è stato testato secondo ASTM E-1050 (2008) utilizzando il metodo del tubo di impedenza.
Poichè all'aumentare della permeabilità all'aria aumenta la trasmissione del suono, per la caratterizzazione acustica sono stati scelti i campioni con una penetrazione dell'ago di 10 mm. Essi infatti hanno una permeabilità all'aria inferiore rispetto ai non tessuti con una penetrazione dell'ago di 7 mm.

RISULTATI ACUSTICI

- L'andamento dei grafici è simile per tutti i campioni e i loro valori sono vicini tra loro.
- L'influenza del PET sulle caratteristiche di assorbimento acustico è relativamente bassa ma l'isolamento dei non tessuti sviluppati è diminuito con l'aumento della percentuale di PET basso fuso e profondità di penetrazione dell'ago infatti il coefficiente maggiore risulta essere 0,54 a 6300 Hz per il provino 80/20.
- I non tessuti realizzati con una penetrazione dell'ago di 10 mm hanno una permeabilità all'aria inferiore rispetto ai non tessuti con penetrazione dell'ago di 7 mm.
- Quando il materiale poroso è esposto ad onde sonore incidenti sulla superficie del materiale, quest'ultima è costretta a vibrare e, così facendo perde parte della sua energia originale. Questo è perché parte dell'energia delle molecole d'aria è convertita in calore a causa di perdite termiche e viscose nelle pareti dei pori interni e nei tunnel all'interno del materiale. Alle basse frequenze, questi cambiamenti sono isotermici, mentre alle alte frequenze, sono adiabatici.



Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza dei tre provini realizzati.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Proprietà termiche (ISO 8301-1991).
- Test permeabilità aria (ASTM D-737): risultati esposti in precedenza.
- Densità secondo ASTM D-1910.

SCHEDA 9

PUBBLICAZIONE

Alcaraz Segura, *et. al, Sound absorption of textile material using a microfibres resistive layer*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 254, IOP, 2017

OBIETTIVO

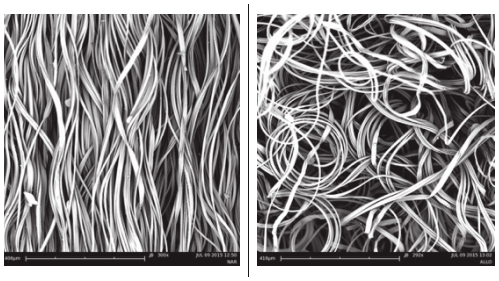
Sperimentazione di tessuti in microfibra poiché risultano assorbitori acustici migliori rispetto ai normali tessuti in fibra, principalmente grazie alla grazie alla maggiore superficie che caratterizza le fibre che li costituiscono e quindi alla maggiore area di contatto con l'aria, che consente una maggiore dissipazione di energia sonora.

MATERIE PRIME

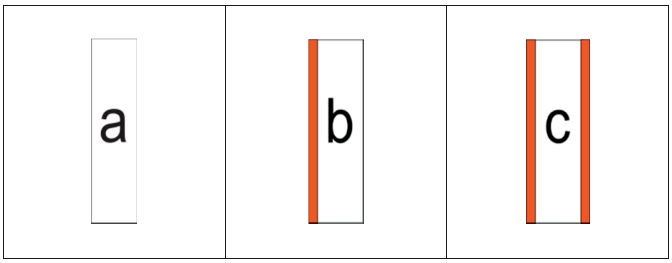
Tessuto in microfibra (strato resistivo) + non tessuto in poliestere.
Tessuto in microfibra realizzato con poliestere (PES) e poliammide (PA) nel rapporto 80/20. Il primo campione presenta un twill incrociato e il secondo è un tessuto di spugna.

ASSEMBLAGGIO

Il tessuto non tessuto è ottenuto, per mezzo di un metodo di posa a secco, da fibre pinzate con incollaggio termico con l'impiego di alcune fibre con un basso punto di fusione. Le parti sono poi state assemblate nel seguente modo:
a) Uno strato di 15 mm non tessuto.
b) Uno strato di tessuto più uno strato di 15 mm non tessuto.
c) Due strati di tessuto e tra questi uno strato di non tessuto.



Microfibra: twil e tessuto di spugna.

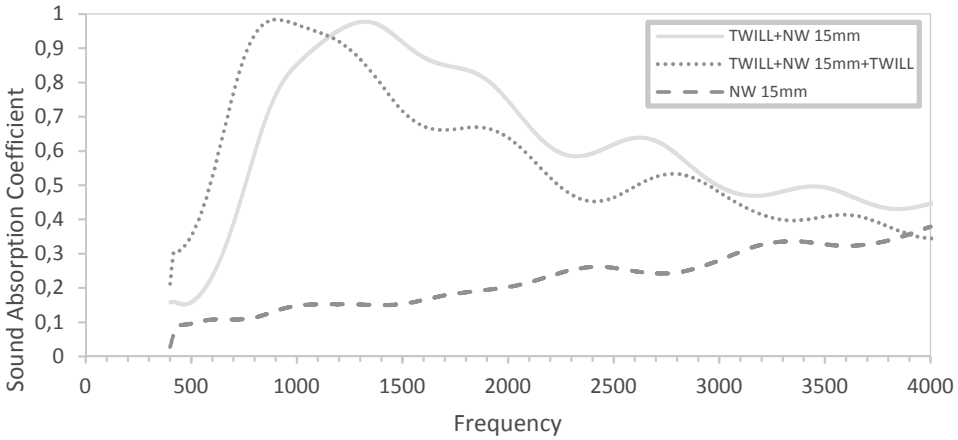


Tipologie di assemblaggio del pannello multistrato.

TEST ACUSTICI

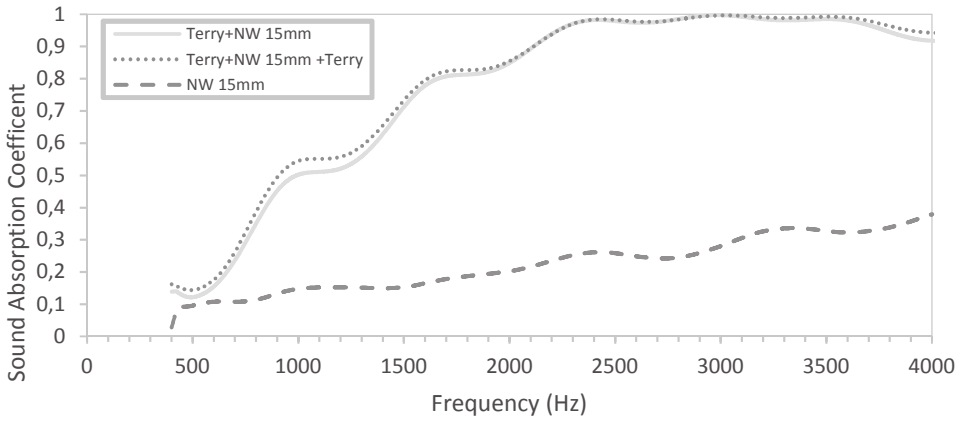
I coefficienti di assorbimento acustico sono misurati seguendo il metodo descritto nella norma ISO 10534-2 attraverso il tubo di impedenza con diametro di 40 mm.

RISULTATI ACUSTICI



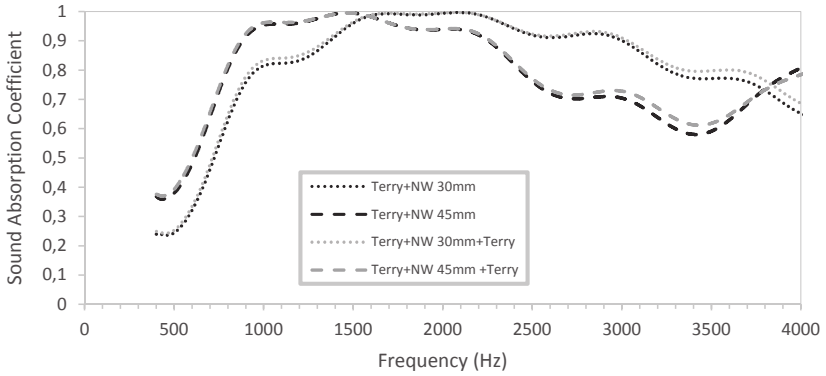
Coefficienti di assorbimento acustico in funzione della configurazione del pannello multistrato, tipologia TWILL.

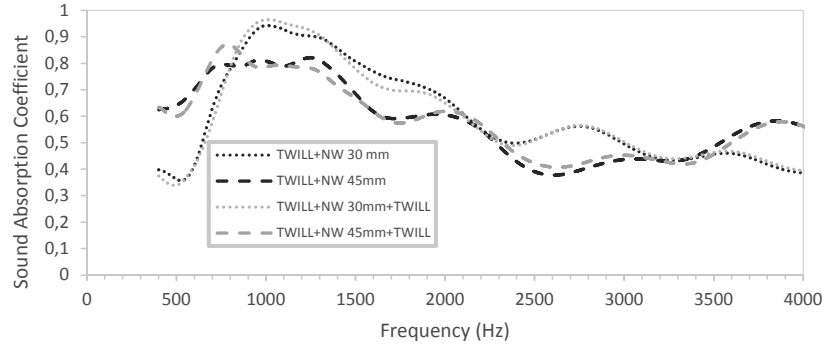
Nel caso del twill, l'aggiunta di un primo strato di tessuto, combinazione b, produce un aumento elevato dell'assorbimento, specialmente a frequenze vicine a 400 Hz.
Quando si aggiunge un secondo strato di tessuto twill, combinazione c, la frequenza con assorbimento massimo diminuisce di circa 400 Hz.



Coefficienti di assorbimento acustico in funzione della configurazione del pannello multistrato, tipologia spugna.

Con l'inserimento di una spugna nella combinazione, anche l'aggiunta di un primo strato di tessuto aumenta l'assorbimento, ma in questo caso gli assorbimenti massimi sono superiori a 2300 Hz. In questa zona, il coefficiente di assorbimento rimane superiore a 0,9 fino a 4000 Hz. Quando un secondo strato di spugna viene aggiunto per formare la combinazione c, la variazione del coefficiente di assorbimento acustico è minimo.





Coefficienti di assorbimento acustico in funzione della configurazione e alla variazione dello spessore dello strato intermedio all'interno del pannello multistrato.

Risulta evidente come, avendo uno strato di non tessuto di spessore 30 e 45mm, l'aggiunta del secondo strato di tessuto non porti a variare in modo significativo la curva.
Inoltre con l'aumento dello spessore, l'effetto di spostare la curva verso le frequenze più basse non appaiono, indipendentemente dal tipo di tessuto.

SCHEDA 10

PUBBLICAZIONE

Bessa J., *et. al, Multi-layer structures with thermal and acoustic properties for building rehabilitation*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* volume 254, IOP, 2017

OBIETTIVO

Confronto tra pannelli termo-acustici multistrato, realizzati con materiali sostenibili al fine di ridure l'impatto degli edifici sull'ambiente. L'United National Environment Program stima che gli edifici consumino circa il 40% dell'energia mondiale, il 25% dell'acqua globale, il 40% delle risorse. Inoltre gli edifici sono anche responsabili di circa 1/3 delle emissioni in relazione all'intero pianeta, costituendo una delle maggiori cause dell'effetto serra.

MATERIE PRIME

Material	Position	Reference	Composition
1	A: interior	A1	Non-woven with recycled cotton and PES fibres
2	B: intermediate	B1	Cork agglomerate (sughero)
3	B: intermediate	B2	Grey PUR foam (schiuma poliuterano)
5	C: exterior	C1	Jute fabric reinforcing biocomposite
7	C: exterior	C3	Polyester fabric reinforcing PVC membrane
8	C: exterior	C4	Polyester fabric

ASSEMBLAGGIO

I diversi strati sono stati fatti aderire l'uno all'altro attraverso una termoplastica adesiva a base di poliolefina. Le strutture multistrato finali sono state ottenute per compressione a 180 °C e 1 bar, per 46 secondi. Dopo questa fase di riscaldamento, i campioni sono stati raffreddati con la stessa attrezzatura, attivando la circolazione dell'acqua fredda su piastre calde, alla stessa pressione, per due minuti. Infine, i compositi sono stati estratti dopo il completo raffreddamento del multistrato finale.

Multi-layer structure	Layer A	Layer B	Layer C
1	A1	B1	C1
3	A1	B1	C3
4	A1	B1	C4
5	A1	B2	C1
7	A1	B2	C3
8	A1	B2	C4

Alternanza degli strati l'interno del pannello multistrato.

TEST ACUSTICI

Le proprietà di isolamento acustico sono state ottenute utilizzando una camera di isolamento acustico, secondo lo standard E90.

RISULTATI ACUSTICI

Emerge come lo strato B (sughero e PUR) abbia una influenza modesta ma maggiormente favorevole al sughero. Per quello che riguarda lo strato C, ossia quello più esterno, risulta fondamentale: presenta performance maggiori a favore del tessuto di juta rispetto a quello in poliestere.

Multi-layer structure	Layer A	Layer B	Layer C	Thermal Resistance, R (m^2 K W^{-1})	Noise Reduction at 500 Hz (dB)
1	A1	B1	C1	0.216	8.3
3	A1	B1	C3	0.214	6.6
4	A1	B1	C4	0.223	5.4
5	A1	B2	C1	0.272	8.1
7	A1	B2	C3	0.218	6.1
8	A1	B2	C4	0.233	3.9

Confronto fra i risultati ottenuti, in funzione della configurazione analizzata.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Analisi delle proprietà termiche.

SCHEDA 11

PUBBLICAZIONE

Trajković D., *et. al, Polyester apparel cutting waste as insulation material,* in *Journal of the Textile Institute,* volume 108, Taylor & Francis, 2017, pp. 1238-1245

OBIETTIVO

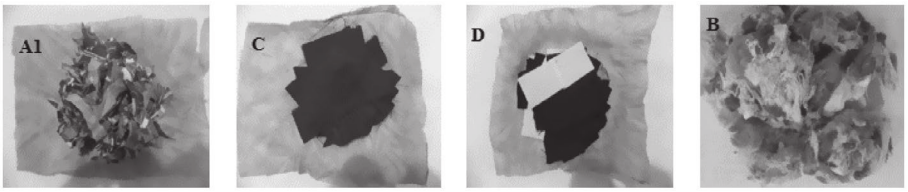
Determinare le prestazioni complessive di scarti da taglio di abbigliamento in poliestere. Secondo Jorgensen & Jensen, 2012, il 55% della produzione mondiale di tessuti per l'abbigliamento è basata su fibre sintetiche, principalmente poliestere, e la fabbricazione di queste fibre si basa sul petrolio. Nell'UE, vengono consumati circa 5,8 milioni di tonnellate di tessuti, di cui circa 4,3 milioni vengono smaltiti in discarica e inceneriti, mentre solo 1,5 milioni (25%) vengono riciclati. Teoricamente, il 97% dei rifiuti tessili potrebbe essere riciclato.

MATERIE PRIME

Rifiuti da taglio in poliestere derivati dall'industria dell'abbigliamento.

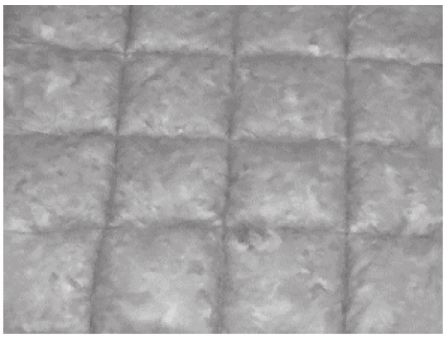
ASSEMBLAGGIO

La differenza nella forma del tessuto deriva da una preparazione diversa dei rifiuti.
Il taglio dei pezzi di forma irregolare è stato realizzato utilizzando una tagliatrice con lame rotanti mentre il taglio a pezzi con una forma e una dimensione esattamente definita è stato realizzato utilizzando una macchina di taglio con un coltello verticale.
Il Campione B è composto da PES riciclato meccanicamente (70/25/5 PES/cotone/ Lycra) mentre i campioni A, C e D sono stati realizzati con scarti di taglio di abbigliamento.



Differenti tipologie di preparazione dei rifiuti tessili, secondo il procedimento indicato.

Infine gli scarti sono stati racchiusi in tessuto non tessuto di polipropilene al 100% per ottenere la struttura di isolamento.



Struttura finale del pannello realizzato.

TEST ACUSTICI

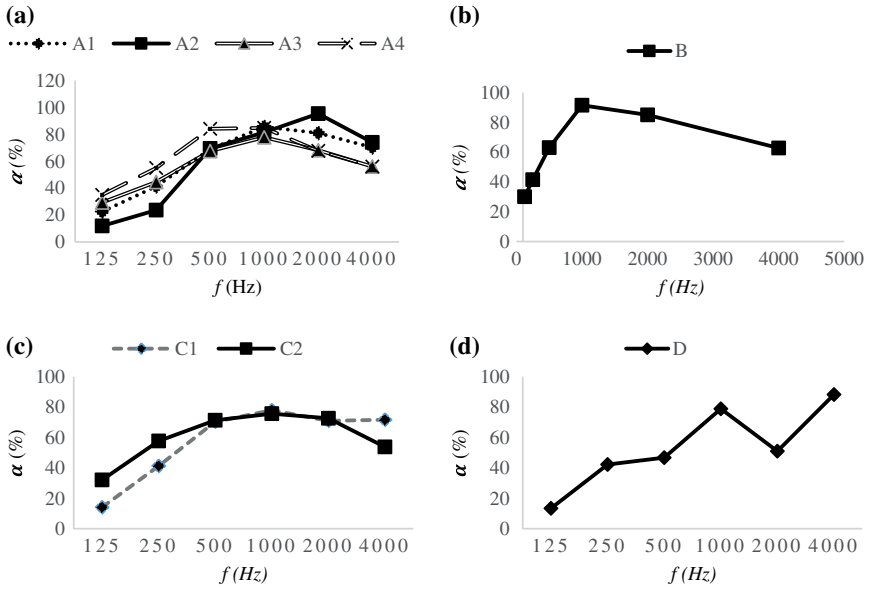
Calcolo del coefficiente di fonoassorbimento (α) e di conseguenza il coefficiente di riduzione del rumore NRC, tramite tubo di impedenza.

RISULTATI ACUSTICI

Le curve di assorbimento dei campioni mostrano come abbiano tutti il massimo assorbimento nell'intervallo 1000-2000 Hz, mentre a frequenze più alte (2000-4000 Hz) l'assorbimento del suono diminuisca. Un'eccezione può essere riscontrata con isolamento contenente Lycra (campione D).

	α (%)						NRC (%)
Sample	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)	250–2000 (Hz)
A_1	22.52	41.36	68.94	85.56	80.99	70.33	69.21
A_2	11.89	23.69	69.45	81.45	95.43	73.99	67.51
A_3	29.37	44.62	67.57	77.83	68.27	56.07	64.57
A_4	34.95	55.01	84.16	84.78	67.78	56.07	72.93
B	30.09	41.53	63.00	91.50	85.05	62.81	70.27
C_1	14.05	41.28	70.40	77.97	70.99	71.68	65.16
C_2	32.07	57.72	71.36	75.70	72.59	53.76	69.34
D	13.33	42.20	46.74	78.89	50.99	88.25	54.71
ABC	16.22	50.60	64.25	69.90	91.98	86.71	69.18
ABD	36.76	50.02	76.93	82.75	89.38	61.27	74.77

Confronto coefficienti di assorbimento acustico in funzione della tipologia e della preparazione eseguita.



Comparazione dei coefficienti di assorbimento acustico in frequenza in funzione della tipologia realizzata.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Misura dell'isolamento termico (ISO8301: 1991).
- Misura della resistenza al fuoco: i campioni non consentono la propagazione della fiamma.
- Misurazione della biodegradabilità secondo ISO 11721: 2001: i campioni sono stati sepolti nel terreno e vi sono stati lasciati per 3 mesi. I risultati confermano che il poliestere è un materiale biologicamente non degradabile.

SCHEDA 12

PUBBLICAZIONE

Zach J., *et. al, Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers,* in *Journal of Chemical Technology and Biotechnology,* volume 91, Wiley-Blackwell, 2016, pp. 2156-2161

OBIETTIVO

Sviluppo di materiali basati su fibre naturali e di scarto, in grado di sostituire gli isolanti convenzionali e salvaguardare l'ambiente. I prodotti finali dovrebbero possedere proprietà temo-acustiche comparabili con gli isolanti comunemente utilizzati.

MATERIE PRIME

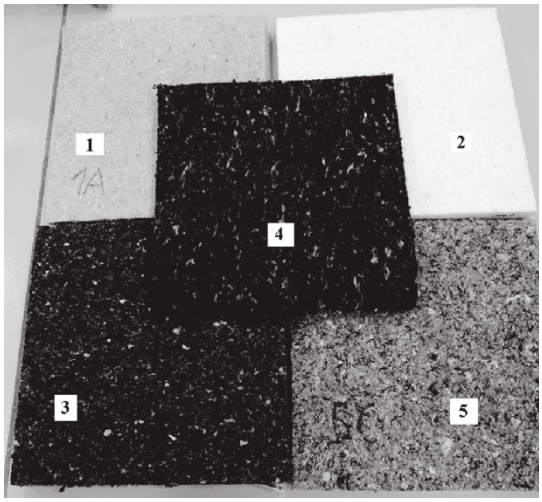
- fibre di lino con basso contenuto di canapa fino al 5% (ID FLAX)
- fibre di cotone grezzo riciclato (defibrato al 95%) pulito solo durante lo smistamento e l'elaborazione di base (ID COT 1)
- fibre di puro cotone riciclato (defibrato al 95% in fili), lavato e pulito (ID COT 2)
- fibre di poliestere derivate da tessuti per la casa riciclati (95% defibrato) pulite solo durante lo smistamento e l'elaborazione di base (ID PES)

ASSEMBLAGGIO

E' stato utilizzato il metodo di incollaggio airlay che si basa sulla sagomatura aerodinamica dei singoli strati del tappeto. L'aria agisce sulle fibre e gradualmente le impila in strati. In questo modo, le fibre sono uniformemente distribuite su tutta l'area. Questa tecnologia consente la sostituzione dei processi meccanici tradizionali, come per esmpio l'uso di carde, inoltre, può garantire una maggiore produzione capacità e minori investimenti e costi per la produzione stessa. Un grande il vantaggio è dato dalla facilità di lavorazione delle fibre di scarto e dall'elevata efficienza energetica in quanto il consumo d'aria dipende dall'immediato bisogno. Tuttavia, la stessa tecnologia airlay stratifica solo le fibre e non le unisce insieme. Dopo aver scelto le fibre appropriate e aver utilizzato la tecnologia disponibile a una produzione ottimale, sono state progettate un totale di cinque miscele. L'incollaggio per tutte le miscele prodotte è avvenuto attraverso l'utilizzo di fibre bicomponenti in poliestere (ID BiCO).

Table 1. Percentage composition of the specimens

Specimen ID	Mixture composition
1	75% FLAX, 25% BiCO
2	40% COT 2, 40% PES, 20% BiCO
3	80% PES, 20% BiCO
4	80% PES, 20% BiCO
5	40% COT 1, 45% PES, 15% BiCO



Tipologie di pannelli prodotti e rispettive composizioni utilizzati per il mix design.

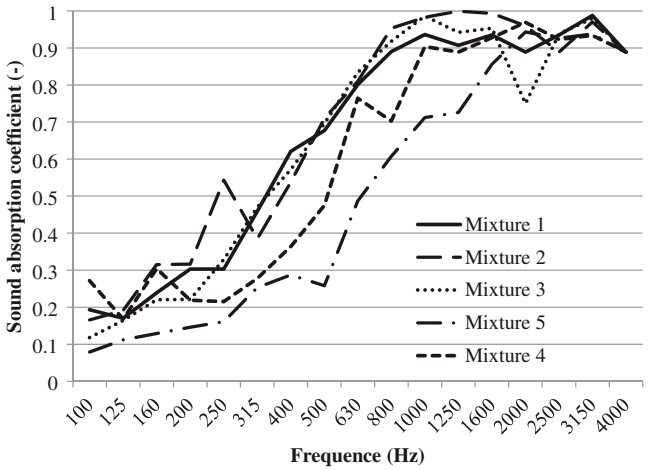
TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico (secondo CSN ISO 10534-1, EN ISO 11654) da 100 a 4000 Hz, con diametro dei campioni 100 mm e 30 mm.

Un'altra proprietà acustica esaminata è la la rigidità dinamica che è stata misurata secondo ISO 9052-1 su tre campioni di dimensioni 200 mm × 200 mm.

RISULTATI ACUSTICI

Il campione che presenta performance migliori è il numero 2 con un coefficiente massimo di 0,95 a 1400 Hz e un coefficiente medio di 0,60. Tuttavia anche i campioni numero 1 e 3 risultano avere un coefficiente medio di 0,55. I campioni numero 4 e 5 risultano avere un assorbimento minore su tutto l'intervallo.



Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza in funzione dei 5 pannelli realizzati.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Valutazione dello spessore e delle dimensioni lineari dei campioni + densità apparente.
- Valutazione della conduttività termica secondo: CSN 72 7012-3, EN 12667 e ISO 8301.
- Valutazione delle proprietà meccaniche: in seguito ai test è possibile valutare che il campione numero 4 ha resistenze migliori a compressione, mentre risulta il campione numero 1 quello con migliori caratteristiche a trazione.
- Inoltre è stato valutato che i materiali basati esclusivamente su fibre naturali hanno alta sensibilità all'umidità mentre i campioni derivati da fibre tessili mostrano un basso assorbimento di umidità, dallo 0,6% al 2,7% (per il lino).

SCHEDA 13

PUBBLICAZIONE

Lou C.-W., *et. al, Sound-absorbing and flame-retarding property of nonwoven compounded PU foam planks,* in *Journal of Engineered Fibers and Fabrics,* volume 10, Assoc Nonwoven Fabrics Ind, 2015, pp. 29-38

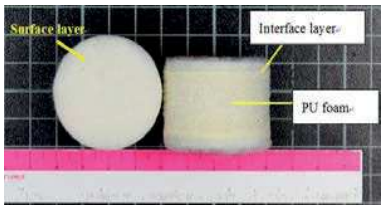
OBIETTIVO

Utilizzare fibre di cimossa riciclata per preparare non tessuti compositi, e assemblarli con schiuma poliuretanica con lo scopo di creare un prodotto che garantisca buone prestazioni di isolamento acustico.

MATERIE PRIME

- Fibra di Nylon di diverse lunghezze derivanti da scarti di cimossa
- Fibre di PET
- Schiuma poliuretanica bicomponente

Campione multistrato composto.



ASSEMBLAGGIO

In primo luogo, il 60% in peso di fibre di nylon, il 20% in peso di fibre LPET e il 20% in peso di fibre RPET sono stati formati in tessuto non tessuto in Nylon/PET tramite processi che includono apertura, miscelazione, cardatura, lappatura e punzonatura.
In secondo luogo, i non tessuti Nylon/PET sono stati agugliati nei non-tessuti compositi. In seguito è stata fatta una pressatura a caldo. Infine, il provino di Nylon/PET/PU è stato fabbricato con combinazioni di materiale composito non tessuto e schiuma PU: dopo aver agitato per 10 s, sono stati iniettati degli agenti schiumogeni all'interno dello stampo contenente uno strato di non tessuto composito. Quindi un altro tessuto non tessuto composito è stato aggiunto sullo stampo e ha proceduto alla reticolazione per un giorno a temperatura ambiente. Durante la schiumatura, la densità della schiuma è stata modificata a 40, 50, 60, 70 e 80 kg/m^3.

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico ottenuto secondo ASTM E1050-12 con frequenza di test variabile da 125 Hz a 4000 Hz. I campioni erano circolari con un diametro di 30 mm.
Sono state effettuate numerose prove variando la lunghezza delle fibre e metodi di produzione.

RISULTATI ACUSTICI

- Quando la densità punzonata dall'ago è andata a ridursi, per le basse e alte frequenze i campioni hanno mostrato un migliore effetto fonoassorbente.
- Il tessuto non tessuto in nylon / PET è stato utilizzato come strato superficiale del pannello composito. Ha svolto il ruolo di assorbire le onde sonore ad alta frequenza e proteggere l'interstrato.
- Il campione composto da Nylon / PET / PU con densità di schiuma di 60 kg /m^3 ha mostrato un picco di assorbimento acustico di 0,83 a 856 Hz mediante combinazioni di assorbimenti sonori porosi e vibranti.

Density (kg/m^3)	Frequency (Hz)						Maximum coefficient	Peak-Frequency (Hz)
	125	500	1000	2000	3000	4000		
40	0.081	0.174	0.767	0.263	0.333	0.424	0.77	900
50	0.063	0.550	0.773	0.255	0.320	0.527	0.80	936
60	0.071	0.187	0.760	0.261	0.397	0.615	0.83	856
70	0.063	0.164	0.787	0.231	0.374	0.510	0.86	920
80	0.057	0.120	0.794	0.278	0.415	0.502	0.85	1028

Coefficienti di assorbimento acustico in funzione delle densità realizzate.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Test permeabilità all'aria (ASTM D737-04)
- Test al fuoco (ASTM D2863-08)

SCHEDA 14

PUBBLICAZIONE

Iasnicu Iuliana, *et. al, The Analysis of sound Absorbing Performances for compisite Plates Containing Recycled Textile Wastes,* in *Sci. Bull.,* volume 78, U.P.B., 2016, pp. 213-218

OBIETTIVO

Riutilizzo di scarti di fibre tessili, reintroducendole in un processo produttivo al fine di comporre un isolante acustico multistrato.

MATERIE PRIME

- Scarti di fibre tessili (con fibre corte) comprendente 85% di PNA (poliacrilonitrile) più 15% PE (poliestere).
  + Placca in sughero con spessore di 3 mm
  + Lastra di polistirolo estruso con spessore di 7 mm
  + Piastra di polietilene espanso con struttura spaziale a celle chiuse, coperta su un lato con foglio di alluminio, spessore del materiale 10 mm

ASSEMBLAGGIO

Le piastre sono state composte attraverso un incollaggio a freddo utilizzando colla policloroprene, a base di solventi organici.

I tre provini sono stati realizzati affiancando gli scarti tessili a ognuna delle placche elencate secondo il seguente schema.

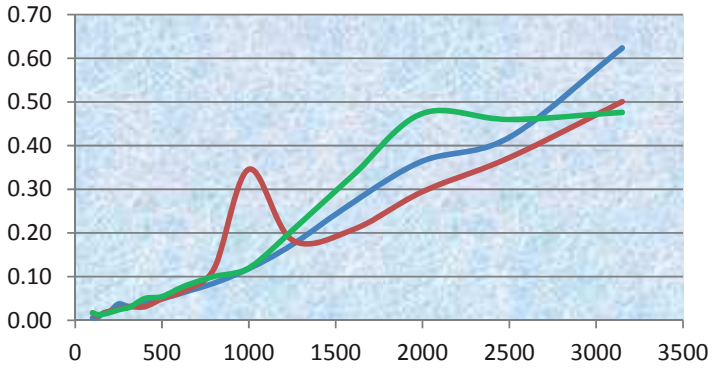
a) Recovered textile+ cork | b) Recovered textile+ polystyrene | c) Recovered textile+ polyethylene

TEST ACUSTICI

Coefficiente di assorbimento acustico calcolato tramite tubo di impedenza secondo SR EN ISO 10534-2: 2005 con frequenza da 100 a 3200 Hz [dal quale è possibile calcolare la riduzione complessiva del rumore].

RISULTATI ACUSTICI

Si può notare come tutti i materiali non sviluppino proprietà fonoassorbenti fino a 800 Hz. Dal grafico emerege come il coefficiente di assorbimento sia direttamente proporzionale all'aumentare della frequanza con un picco massimo alla massima frequenza calcolata, 3200 Hz. In particolare per il campione C1 si ha un coefficiente massimo di 0,54, per il campione C2 di 0,51 e per il campione C3 di 0,63. I coefficienti medi corrispondono invece rispettivamente ad ogni campione a 0,37, 0,30, 0,36.



Performance acustiche in frequenza dei tre provini realizzati.

SCHEDA 15

PUBBLICAZIONE

Ricciardi P., *et. al, Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment,* in *Applied Energy,* volume 134, Elsevier, 2014, pp. 150-162

OBIETTIVO

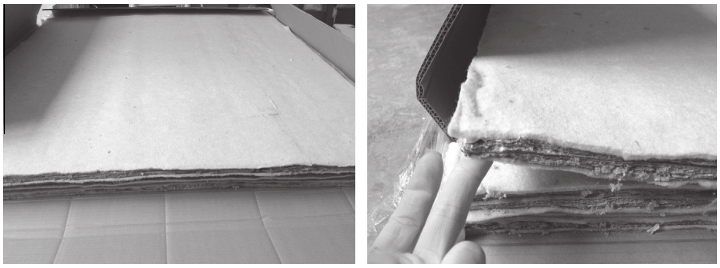
Analizzare un pannello termo-acustico a basso impatto ambientale, costituito da materiali low cost per rispondere alla direttiva 2010/31/UE, che stabilisce che tutte le nuove costruzioni debbano essere a energia quasi zero.

MATERIE PRIME

Rifiuti di carta + scarti tessili (uniti a colla)

ASSEMBLAGGIO

Dettaglio dei campioni composti: N7 e N15.



- Campione N7: due strati esterni (spessore 2,5 mm ciascuno) di fibre di polietilene e uno interno di carta da macero (7 mm di spessore) incollati e pressati. Spessore totale 12 mm.
- Campione N15 come il precedente ma con strato interno di spessore 15 mm. Spessore totale 20 mm.

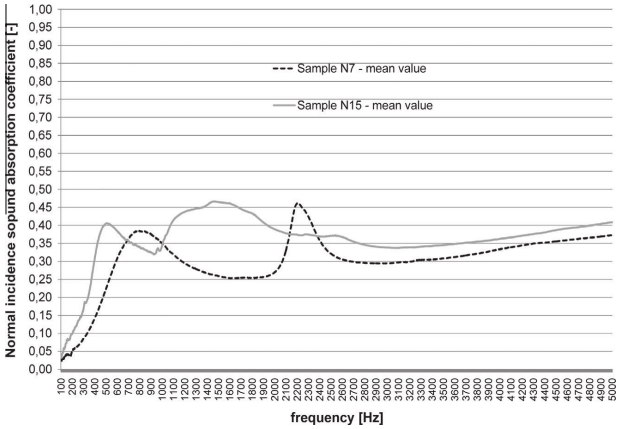
La carta utilizzata per i pannelli è riciclata al 100%: è stata utilizzata carta di diversi pesi i quali sono stati macinati e spezzati in piccoli pezzi.
Gli scarti tessili sono composti da fibre di polipropilene riciclato le quali vengono incollate per mezzo di rulli. La punzonatura è l'ultima fase del processo.

TEST ACUSTICI

Il coefficiente di assorbimento è stato misurato attraverso il tubo di impedenza con diametri di 29 e 100 mm (frequenza combinata da 50 a 6400 Hz), secondo la norma ISO 10534-2.
E' stata calcolata successivamente la Transmission Loss come chiave di efficacia dei materiali acustici.
Infine è stato ricavato il coefficiente di riduzione del rumore (NRC) dei due campioni.

RISULTATI ACUSTICI

Si può notare che aumentando lo spessore (campione N15) si ha uno spostamento dell'assorbimento verso le frequenze più basse.
Il coefficiente di riduzione del rumore (NRC) dei campioni varia nell'intervallo 0,23-0,38.



Risultati: coefficienti di assorbimento acustico dei campioni N7 e N15.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Le prestazioni termiche valutate mediante hot-box secondo UNI EN ISO 8990.
- Analisi LCA secondo ISO 14040: anche se il pannello è composto da materiali riciclati il campione possiede un'elevata energia incorporata e un elevato potenziale di riscaldamento globale. Inoltre il pannello presentato ha una densità elevata (circa 433 kg/m^3). Un miglioramento potrebbe essere ottenuto modificando il processo di fabbricazione, per esempio introducendo colle riciclate.

SCHEDA 16

PUBBLICAZIONE

Bosia Daniela, *et. al, Sheep wool for sustainable architecture,* in *Energy Procedia,* volume 78, Elsevier, 2015, pp. 315 – 320

OBIETTIVO

Migliorare i pannelli in lana di pecora attualmente sul mercato realizzando un pannello termo-acustico (cartonlana) con caratteristiche di rigidità e un basso impatto ambientale, attraverso l'utilizzo di lana di pecora riciclata locale, che verrebbe altrimenti smaltita.

MATERIE PRIME

Lana di bassa qualità, non adatta all'industria tessile, raccolta nella Regione Piemonte.

ASSEMBLAGGIO

La rigidità di Cartonlana è il risultato dei processi termici e chimici sviluppati dal CNR ISMAC e Davifil s.r.l che consistono nel degradare parzialmente le fibre di lana producendo una colla proteica, che aderisce alle restanti fibre tenendole unite.

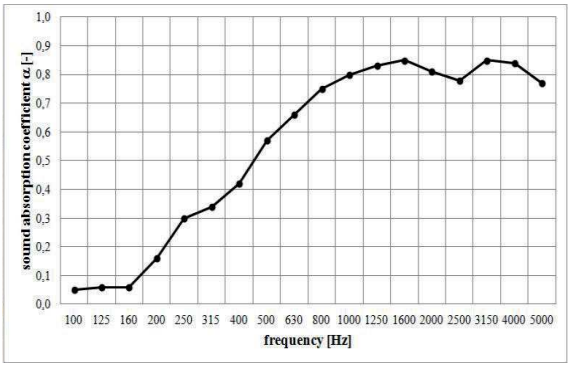
Assemblaggio dei pannelli per effettuare la misura in camera riverberante.

TEST ACUSTICI

Il coefficiente di assorbimento acustico è stato valutato mediante una sala riverberante (INRIM - Torino). Il campione di prova era costituito da 12 m^2 di Cartonlana rigida in pannelli da 50 mm di spessore e 130 kg/m^3 di densità, montati sul pavimento della stanza riverberante. Test efettuato secondo la norma EN ISO 354 nell' intervallo di 100-5000 Hz in terza d'ottava.

RISULTATI ACUSTICI

Il coefficiente ottenuto assume un valore medio di 0,55 e un valore massimo di 0,85 a 1600 Hz.



Coefficienti di assorbimento acustico della Cartonlana, misurati in camera riverberante.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Conducibilità termica secondo EN ISO 12667 e ASTM C518.
- Misurazione dell'assorbimento di formaldeide: lana di pecora, grazie alla composizione chimica della (82% di cheratina, 17% di proteine non cheratiniche, 1% di lipidi e polisaccaridi), è in grado di assorbire e neutralizzare il particolato, i metalli pesanti e altri gas pericolosi come ossidi di azoto, ossidi di zolfo e VOC, come per esempio la formaldeide. L'abbattimento di queste risulta efficace.

SCHEDA 17

PUBBLICAZIONE

Del Rey R. *et. al, Acoustic barriers made from textiles wastes and PET, in 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 [],* volume 5, 2013, pp. 4204-4208

OBIETTIVO

Sviluppo di elementi di controllo del rumore; in particolare di una barriera antirumore, attraverso la sperimentazione e l'utilizzo di nuovi materiali riciclati.

MATERIE PRIME

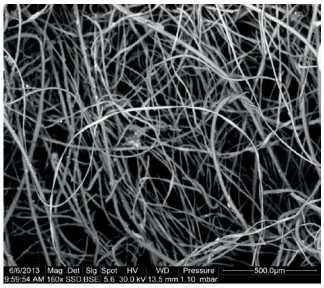
Scarti tessili drivanti da cimossa varia (75% di fibre di cotone e 25% di puro poliestere) + PET come legante.

ASSEMBLAGGIO

Sono stati realizzati 5 campioni combinando in percentuali diverse le due materie prime, cotone e poliestere, e per due è stato sostituito il PET con colle fenoliche come test comparativo, (come illustrato nella tabella seguente).

Sample	Multi-fibers	Binder
M1	80% (75% CO–25% PES)	Polyester
M2	80% (75% CO–25% PES)	Polyester
M3	80% (75% CO–25% PES)	Polyester
M4	74% (75% CO–25% PES)	Polyester
M5	74% (75% CO–25% PES)	Phenolic
M6	74% (75% CO–25% PES)	Phenolic
M10	80% (75% CO–25% Bicopet)	Polyester
M13	80% (75% CO–25% Bicopet)	Polyester

Composizione dei pannelli raffigurati e relativo mix design



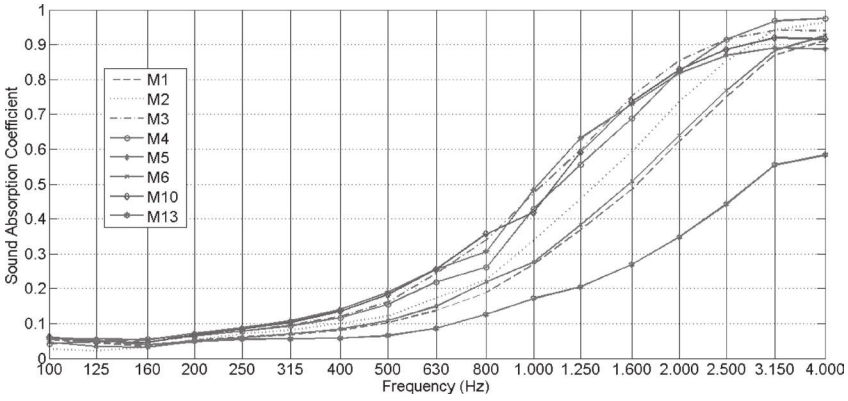
Struttura pannello, SEM.

TEST ACUSTICI

I coefficienti di assorbimento acustico dei campioni dei materiali di riempimento, sono misurati, seguendo il metodo descritto nella norma ISO 10534-2, attraverso tubo di impedenza da 100 a 4000 Hz.

RISULTATI ACUSTICI

Il materiale etichettato come M13 mostra l'assorbimento acustico inferiore e la maggiore resistività del flusso. I materiali M3, M5 e M10 riportano i valori più alti di incidenza normale.



Comparazione dei risultati acustici ottenuti dalla misura de pannelli composti.

In seguito è stato assemblato il pannello o barriera antirumore utilizzando dell'acciaio inox 3mm con una piastra forata sul lato esposto. Le dimensioni della barriera sono di 70 cm in lunghezza, 40 cm in larghezza per uno spessore totale della struttura di 4 cm.
L'efficacia delle barriere forate è stata studiata da Tayong. Il suo lavoro suggerisce che l'uso distribuito in modo non uniforme della foratura migliori l'assorbimento a bassa frequenza della piastra.
Al suo interno sono stati inseriti i materiali riciclati esposti in precedenza con uno spessore di 2 cm. Di conseguenza risultano circa 2 cm di spazio libero fra parete forata e pannelli riciclati.

Composizione della barriera antirumore.

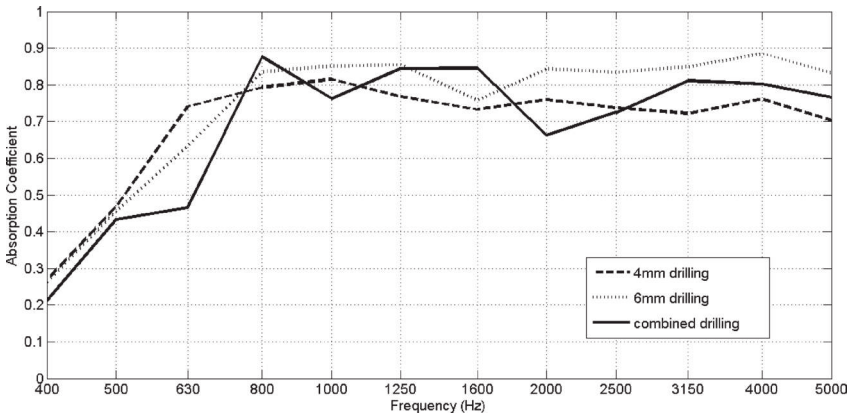
TEST ACUSTICI

In seguito è stato montato il campione e i test sono stati effettuati secondo lo standard ISO 354: 200324 al fine di ottenere il coefficiente di assorbimento. Ogni test sviluppato durante questa ricerca è stato effettuato in una camera riverberante in scala 1: 6 (uno studio dettagliato dimostra come i valori ottenuti durante i test in una piccola camera riverberante siano comparabili con quelli ottenuti in una camera di riverbero standardizzata).

RISULTATI ACUSTICI

Dopo una lunga serie di calibrazioni e dopo aver scelto un taglio inferiore ai 500 Hz per via delle dimensioni della camera, é stato calcolato l'indice di assorbimento acustico di tutti i prototipi con tre diverse percentuali di foratura della piastra forata sul lato esposto.
Si osserva come tutti i prototipi rientrino nella categoria A2 secondo lo standard UNE EN 1793-1: 201428.

Noise barrier design	$DL\alpha$ (dB)	Category
Absorbent: recycled materials (M1, M2, M3, M4, M10, M13) Hole size diameter: 4 mm. Perforation rate: 11%	6	A2
Absorbent: recycled materials (M1, M2, M3, M4, M10, M13) Hole size diameter: 6 mm. Perforation rate: 28%	7	A2
Absorbent: recycled materials (M1, M2, M3, M4, M10, M13) Combined drilled. Perforation rate: 15%	6	A2



Confronto dei risultati acustici in funzione delle differenti percentuali di foratura della piastra sul lato esposto della barriera antirumore.

Nell'intervallo di bassa e media frequenza una bassa percentuale di perforazione aumenta leggermente il valore del coefficiente di assorbimento. A valori elevati di assorbimento acustico corrisponde un alto tasso di perforazione in relazione alle alte frequenze.

SCHEDA 18

PUBBLICAZIONE

Pennacchio R., *et. al, Fitness: sheep-wool and hemp sustainable insulation panels,* in *Energy Procedia*, volume 111, Elsevier, 2017, pp. 287 – 297

OBIETTIVO

Evoluzione del precedente studio, la Cartonlana, implementando l'uso di canapa al fine di realizzare un pannello semirigido a basso impatto ambientale. La canapa presenta forti vantaggi nel campo agricolo e può inoltre essere considerata un'interessante fonte alternativa di valorizzazione energetica. Inoltre presenta buone caratteristiche riguardo riciclabilità, permeabilità al vapore acqueo e igroscopicità, durabilità, resistenza agli attacchi di muffa e funghi, porosità delle fibre, basso impatto ambientale e basso costo.

MATERIE PRIME

Lana di pecora di bassa qualità + Canapa

ASSEMBLAGGIO

La canapa dopo il taglio viene lasciata a macerare per 4 mesi nei campi.

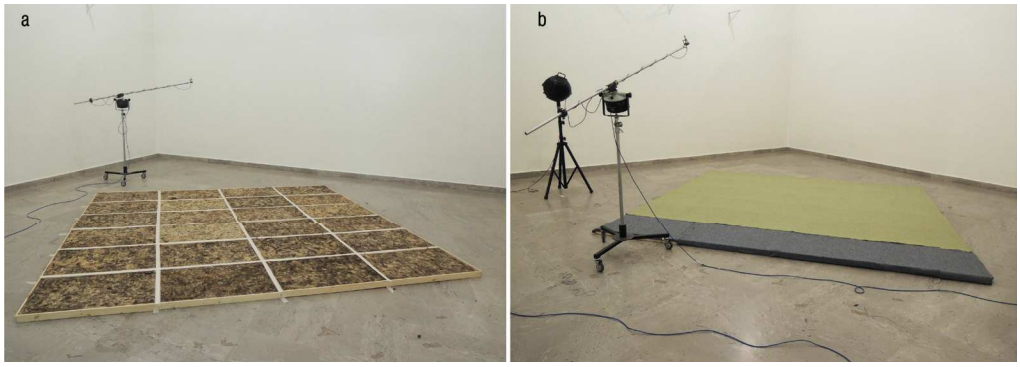
- Il trattamento avviene attraverso una soluzione di soda per fare in modo che le fibre di lana rilascino parte della proteina, la cheratina, che funzionando come una colla naturale, fa si che lana e fibre di canapa si incollino insieme.
- Rimozione della soluzione di soda ed essiccazione del pannello nel forno.
- Trattamento con soluzioni alcaline per aumentare il grado di separazione delle fibre vegetali che di conseguenza si separano dalle sostanze incrostanti.
- Variazione dei parametri del processo al fine di produrre differenti campioni con diverse porosità, densità e prestazioni fisiche e meccaniche finali, identificando il processo ottimale.
- Composizione pannello (90,00 cm x 52,00 cm), con spessore di 4,50 cm e un peso di 3 kg, realizzato in lana e canapa in egual peso.

Lana di pecora a, fibra di canapa b, pannello composto c.

TEST ACUSTICI

Il coefficiente di assorbimento acustico è stato calcolato attraverso il tubo di impedenza secondo la norma EN ISO 10534-2 con diametro di 50 mm per basse frequenze (100-800 Hz) e 30 mm per misurazioni ad alte frequenze (1000-5000 Hz).

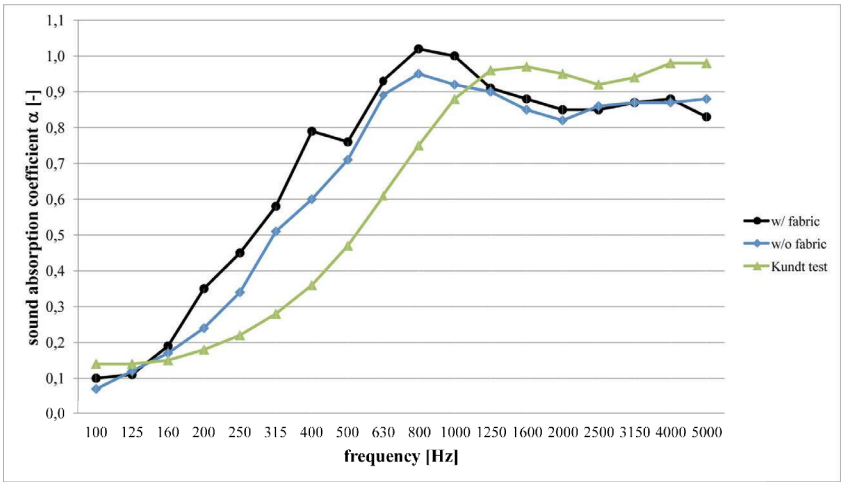
Un'ulteriore valutazione del coefficiente di assorbimento acustico è stata condotta attraverso la camera riverberante all'INRIM secondo la norma EN ISO 354 (due set di misurazioni nell'intervallo da 100 a 5000 Hz): il campione di prova era costituito da 12 m^2 di pannelli rigidi con spessore 45 mm e densità 142 kg/m^3, montato sul pavimento della camera di riverbero. In particolare sono state condotte due prove, una con solo l'utilizzo dei pannelli e una successiva utilizzando un tessuto acustico di rivestimento che eventualmente sarà impiegato nelle applicazioni pratiche per fini estetici e di igiene.



Assemblaggio dei pannelli per la misura in camera riverberante, rispettivamente senza e con la copertura in tessuto.

RISULTATI ACUSTICI

- I risultati di due test condotti nella camera riverberante (pannelli avvolti con tessuto, pannelli senza tessuto) e col metodo del tubo di Kundt vengono confrontati all'interno dello stesso grafico.
- Per quanto riguarda il test della camera riverberante, i pannelli ricoperti di tessuto mostrano un risultato migliore anche a frequenze più basse (da 160 Hz a 500 Hz) in quanto vi è uno spazio d'aria di 10 mm tra la superficie di ogni pannello e il tessuto.
- Il diverso comportamento dei campioni testati dal tubo di Kundt è dovuto principalmente dall'incidenza normale dell'energia acustica sul campione piuttosto che dall'incidenza casuale che si verifica nella camera riverberante.
- In conformità con la norma EN ISO 11654, i risultati acquisiti nella camera di riverbero sono stati ponderati ottenendo un valore di αw = 0,65 per i pannelli senza tessuto e αw = 0,75 per i pannelli ricoperti di tessuto. Vale la pena ricordare che nel precedente progetto di ricerca chiamato "Cartonlana", i pannelli basati solo sulla lana di pecora hanno mostrato un coefficiente di assorbimento acustico inferiore di 0,55 .



Confronto fra i coefficienti di assorbimento acustico ottenuti dalla misura in camera riverberante e quelli ottenuti nel tubo di Kundt.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Conducibilità termica EN ISO 12667.
- LCA secondo UNI EN ISO 14040/44: l'approccio LCA mostra come i pannelli siano paragonabili ad altri materiali isolanti in fibre in termini di densità a livello di energia incorporata. Però i materiali ad alta densità mostrano un valore di domanda di energia non rinnovabile relativamente elevato se confrontato con materiali a bassa densità, ma, allo stesso tempo, questi prodotti consentono maggiori prestazioni termiche e acustiche. Inoltre, come ulteriore risultato, dall'analisi LCA si può affermare che la presenza della fibra di canapa nei pannelli di lana di pecora contribuisce a diminuire l'impatto ambientale del prodotto, garantendo in aggiunta una maggiore rigidità e consentendo così una facile installazione.

SCHEDA 19

PUBBLICAZIONE

Echeverria Claudia A. , *et. al, Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications,* in *Resources, Conservation & Recycling*, volume 143, Elsevier, 2019, pp. 1–14

OBIETTIVO

Integrare due aspetti ambientali relativi ai problemi di inquinamento, come il rumore urbano, e le fibre di scarto, modulando il loro impatto attraverso i materiali da costruzione, per mirare a una duplice soluzione sostenibile, con benefici ambientali, economici e sociali.

MATERIE PRIME

- fibre polimeriche provenienti da abiti di seconda mano
- polipropilene tessile (PPT) riciclato da rifiuti di imballaggio
- lattice di materassi in poliuretano
- segatura residua di legno
- polvere di particellare in polipropilene derivante da contenitori per il cibo
- fibre marine organiche provenienti dalle alghe
- gusci di molluschi bivalvi

ASSEMBLAGGIO

Le singole materie prime sono state soggette a pulizia meccanica e successiva omogeneizzazione in tre categorie: frammenti, filamenti e particelle.

- Gli scarti di tessuto misto sono stati tagliati a mano e poi triturati con coltello-mulino per la durata di due minuti.
- La segatura mista di legno è stata setacciata e asciugata in forno a 103 °C per le 24 ore precedenti alla compressione a temperatura.
- Per quello che riguarda i prodotti marini sono stati soggetti a pulizia, smerigliatura, risciacquo a freddo, taglio e schiacciamento nelle dimensioni di particelle attraverso la polverizzazione in un mulino ad anello in acciaio per un ciclo di 1 min.

Infine sono stati realizzati 7 prodotti per ciascuna serie: Textile Fleece (TF), Mattresses Foam (MF), Wood/Plastic (WP).

Campioni composti per ogni serie.

TEST ACUSTICI

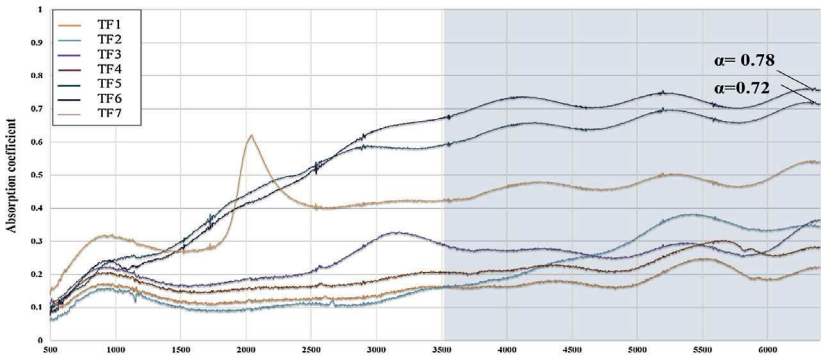
Il coefficiente di assorbimento acustico è stato calcolato mediante il tubo di impedenza nell'intervallo da 500-6400 Hz, secondo lo standard internazionale ASTM C384-04 i cui dati sono in seguito stati elaborati attraverso il software MATLAB. L'analisi microscopica è stata condotta per mezzo di un microscopio elettronico a scansione (SEM) Hitachi-S3400X per esaminare la morfologia delle fibre e delle particelle.

RISULTATI ACUSTICI

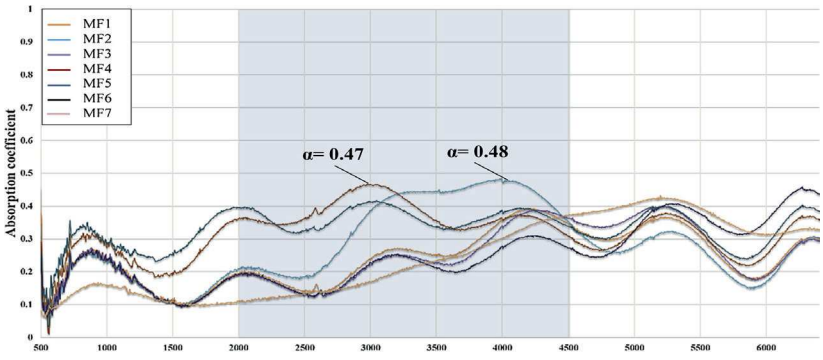
Come emerge dalla tabella i migliori risultati sono attribuibili alle serie TF, in particolare con il provino composto da lana-acrilico con α=0,78 e lana-poliestere con α=0,72.

Composite prototype	Physical characteristics					Acoustic		
Material Series	n	Mesh size mm	Nominal Macropore size µm	Nominal Particle size mm	Mass g	Nominal thickness mm	Nominal density $g \cdot cm^{-3}$	Sound Absorption α
TF	**1**	1.0	20	1.0	1.9	4.3	0.4	0.1-0.25
	2	1.0	20	1.0	1.7	3.4	0.5	0.09-0.39
	3	1.0	5.0	1.0	1.9	4.4	0.4	0.18-0.38
	4	1.0	10	1.0	1.5	3.8	0.4	0.12-0.3
	5	1.0	5.0	1.0	1.2	5.9	0.2	0.1-0.72
	6	1.5	50	15	1.4	5.8	0.2	0.1-0.78
	7	1.0	30	1.0	1.5	6	0.3	0.17-0.62
MF	**1**	1.0	100	2.0	2.1	3.8	0.6	0.09-0.39
	2	1.0	100	2.0	2.1	3.4	0.6	0.05-0.48
	3	1.0	50	2.0	2.1	3.8	0.6	0.1-0.4
	4	1.0	50	2.0	2.1	4.8	0.4	0.03-0.47
	5	1.0	50	2.0	2	5.5	0.4	0.03-0.41
	6	1.0	15	2.0	1.9	3.4	0.6	0.07-0.45
	7	1.0	100	1.0	1.6	3.3	0.5	0.08-0.42
WP	**1**	0.85	80	0.85	1.7	3.9	0.4	0.1-0.39
	2	0.85	30	0.85	2.3	4.4	0.5	0.08-0.41
	3	0.85	30	0.85	2.3	4.7	0.5	0.08-0.34
	4	0.42	30	0.42	2.3	4.1	0.6	0.1-0.27
	5	0.85	30	0.85	2.4	5.5	0.4	0.1-0.39
	6	1.0	50	3.0	1.6	5.8	0.3	0.1-0.69
	7	0.85	10	0.85	2.8	4.7	0.6	0.1-0.27

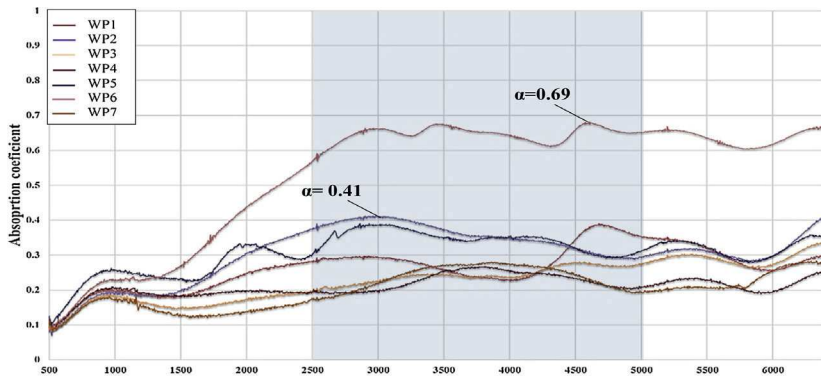
Caratteristiche e proprietà acustiche dei campioni composti.



Confronto delle performance acustiche ottenute dalla serie Textile Fleece (TF).



Confronto delle performance acustiche ottenute dalla serie Mattresses Foam (MF).



Confronto delle performance acustiche ottenute dalla serie Wood/Plastic (WP).

SCHEDA 20

PUBBLICAZIONE

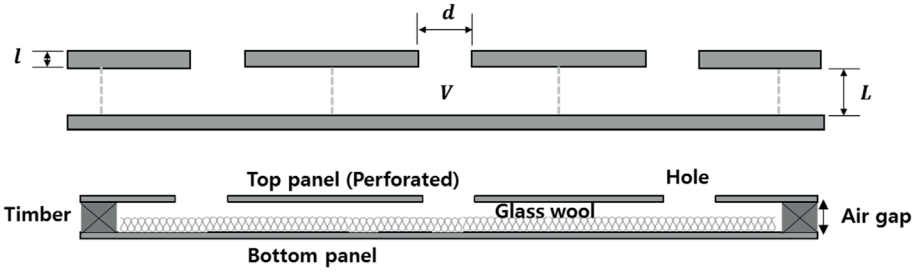
Jongkwan Ryu, *et. al, Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panel absorber on heavyweight floor impact sound in the building*, in *Building and Environment,* volume 139, Elsevier, 2018, pp. 1–7

OBIETTIVO

Composizione di un assorbitore a pannelli risonanti a bassa frequenza.

ASSEMBLAGGIO

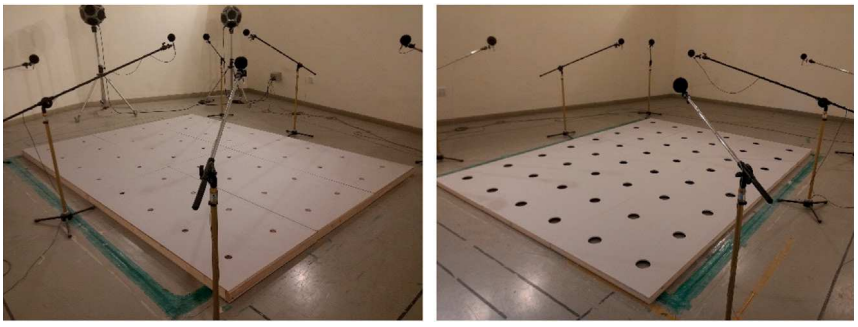
Come mostrato nella figura il pannello di risonanza consiste in un pannello superiore forato, una intercapedine con e senza materiale poroso (lana di vetro) e un pannello inferiore. L'area dell'unità dell'assorbitore del pannello di risonanza è di 1.62m^2 (900mm × 1800 mm). Gli strati superiore e inferiore sono stati realizzati con cartongesso di spessore 9,5 mm.



Schema della realizzazione dell'assorbitore a pannelli risonanti rispettivamente con e senza materiale poroso.

TEST ACUSTICI

Le misure del coefficente di assorbimento dei campioni sono state condotte in camera di riverbero secondo ISO 354. Sono stati analizzati 10 campioni variando lo spessore del materiale isolante, l'intercapedine d'aria e la percentuale di foratura nella pannellatura superiore.

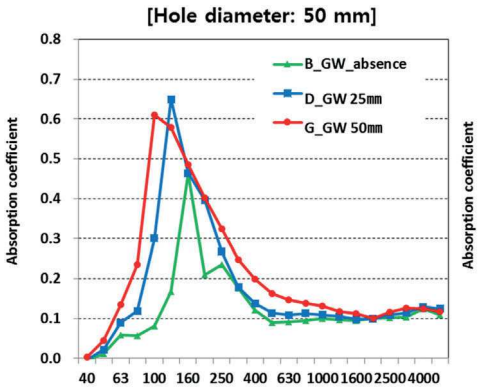


Misura del coefficiente acustico in camera riverberante.

RISULTATI ACUSTICI

Il pannello del soffitto con il miglior assorbimento risulta il Tipo G: foro 50 mm + intercapedine 50 mm con lana di vetro 50 mm. Dalle misurazioni risulta che la massima influenza sul coefficiente di assorbimento derivi dalla lana di vetro rispetto agli altri componenti del pannello. Si è anche scoperto che il pannello risonante con foro di diametro pari a 50 mm e intercapedine di 50 mm con lana di vetro da 50 mm presenta il maggiore assorbimento intorno a 100 Hz.

Inoltre, il livello del rumore di impatto sul pavimento, per effetto della macchina normalizzata, è diminuito di 6 dB nella banda di ottava 125 Hz dopo l'installazione del pannello a soffitto rispetto al cartongesso comunemente utilizzato.



Performance acustiche misurate.

SCHEDA 21

PUBBLICAZIONE

Desmond Daniel Vui Sheng Chin, *et. al, Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel(BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA),* in *Applied Acoustics,* volume 138, Elsevier, 2018, pp. 179–187

OBIETTIVO

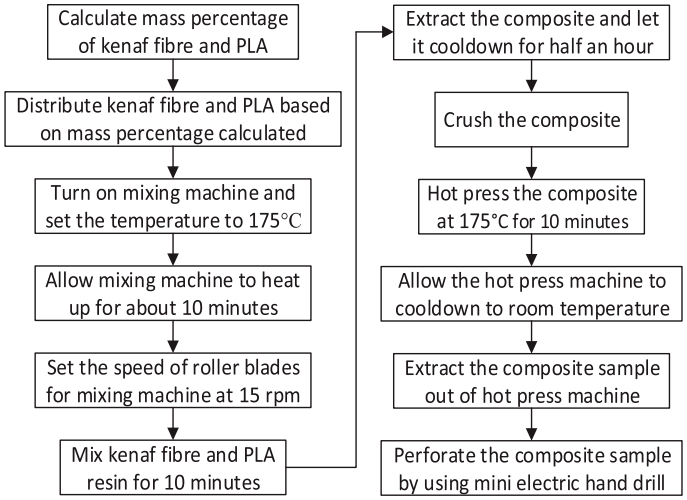
Analizzare un pannello microforato (MPP) in quanto rappresenta una delle alternative più promettenti in termini di assorbimento acustico rispetto ai materiali porosi. MPP è un pannello molto sottile con un grande numero di microfori che ne coprono la superficie; esso viene solitamente installato davanti a una parete rigida con la presenza di un air-gap fra i due materiali.

MATERIE PRIME

Fibra di kenaf + polimero biodegradabile (PLA)

ASSEMBLAGGIO

Pannello microforato realizzato.



Fasi per la composizione del pannello microforato.

TEST ACUSTICI

Il coefficiente d'assorbimento del campione è stato calcolato attraverso il tubo di impedenza secondo lo standard ASTM E1052-12, con diametro di 100 mm e intervallo di frequenza da 350 a 2000 Hz.

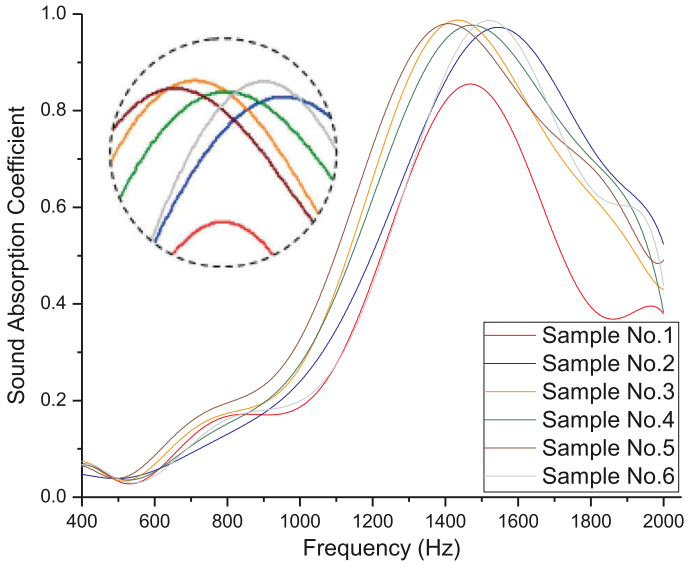
RISULTATI ACUSTICI

I test sono stati effettuati andando a variare le percentuali delle materie prime utilizzate ed, ad esclusione del campione n 1, risultano coefficienti d'assorbimento confrontabili fra di essi.
In particolare il campione n 6 (con la percentuale maggiore di fibre di kenaf) ha registrato i migliori risultati con un coefficiente di 0,987 alla frequenza di 1521,02 Hz.

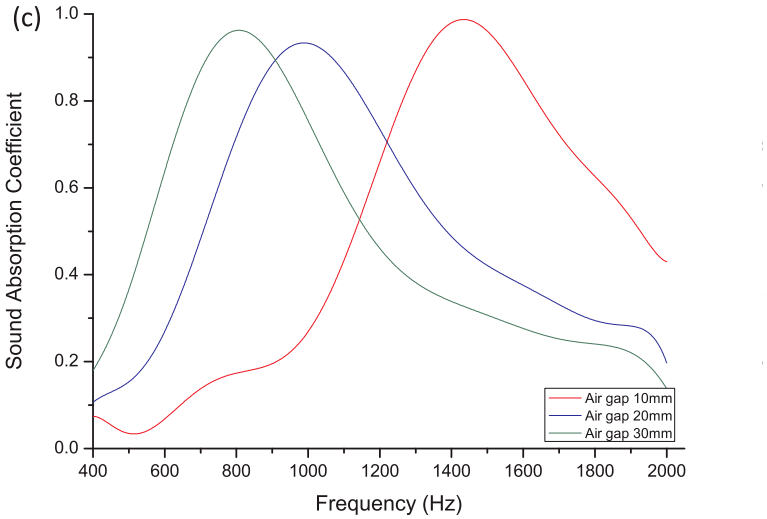
Percentage of kenaf fibre and PLA composition for each sample.

Sample No.	Kenaf fibre (%)	PLA (%)
1	5	95
2	10	90
3	15	85
4	20	80
5	25	75
6	30	70

Percentuali di fibra di kenaf e PLA utilizzate per realizzare i campioni.



Confronto delle performance acustiche ottenute dai provini realizzati, in funzione delle percentuali delle materie.



Confronto delle performance acustiche in funzione dell'air-gap inserito dietro al pannello microforato.

Inoltre è stato studiato e approfondito l'effetto del vuoto d'aria dietro al campione analizzato. Riferendosi ai dati ottenuti, si può notare che il picco del coefficiente di assorbimento acustico si sposta verso la gamma di frequenza più bassa all'aumentare dello strato d'aria.

ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Prova a trazione ISO 527-2: l'aumento della percentuale di kenaf provoca una diminuzione della resistenza a trazione del prodotto.
- Porosità del prodotto ISO 5017: dai risultati acquisiti, si può notare che all'aumentare della presenza di fibre di kenaf nella composizione si verifica un aumento della porosità del campione, di conseguenza anche del coefficiente di assorbimento acustico poichè la struttura porosa può andare letteralmente ad "intrappolare" l'onda sonora, consentendo la riflessione interna del suono e causando una perdita di energia acustica.
- Possibilità di applicazione sul retro del campione di uno strato di materiale poroso al fine di allargare l'intervallo di assorbimento.

SCHEDA 22

PUBBLICAZIONE

Xiaoning Tang, et. al, *Facile dip-coating method to prepare micro-perforated fabric acoustic absorber,* in *Applied Acoustics,* volume 130, Elsevier, 2018, pp.133–139

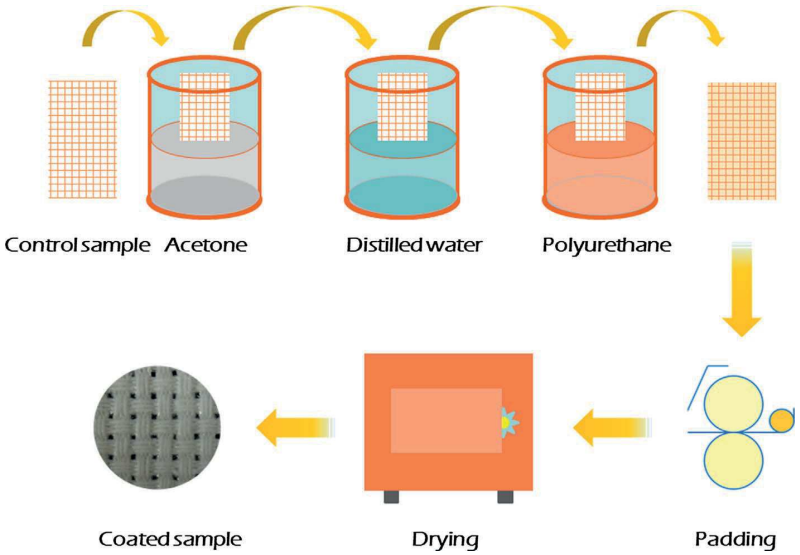
OBIETTIVO

Migliorare le prestazioni acustiche dei prodotti tessili a basse frequenze rispetto ai materiali fibrosi, attualmente ampiamente utilizzati nella riduzione del rumore, grazie alle loro buone proprietà di assorbimento acustico.

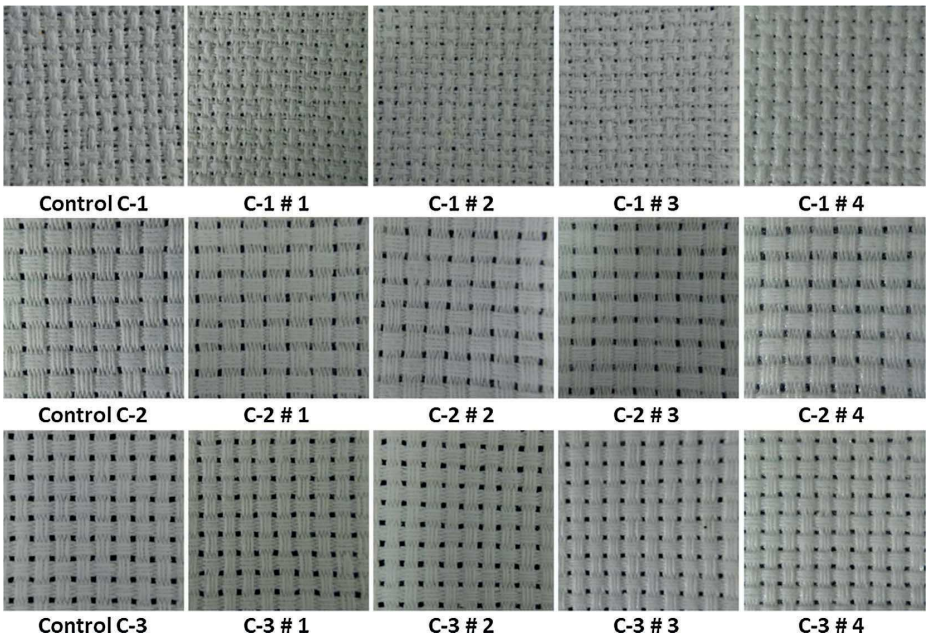
MATERIE PRIME

Tessuti con diverse caratteristiche + Poliuretano a base acquosa

ASSEMBLAGGIO



Sono stati realizzati 15 campioni in funzione del diametro, della quantità di poliuterano e dello spessore delle fibre.

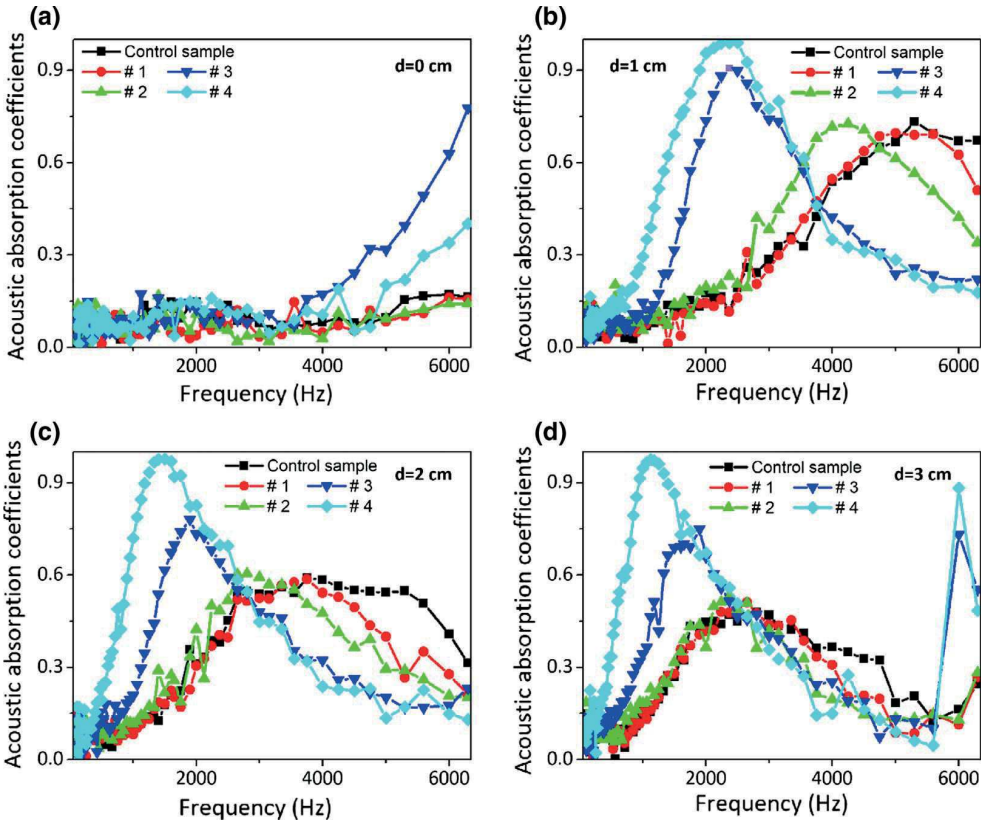


Tipologie differenti di realizzazione in funzione del diametro della foratura, della dimensione delle fibre e del quantitativo di collante.

Il diametro è gradualmente diminuito con l'aumento di poliuretano a base acquosa e di conseguenza lo spessore e il peso dell'area sono aumentati con l'aumentare delle concentrazioni della soluzione di rivestimento. Anche la permeabilità all'aria si è gradualmente ridotta con l'aumento delle concentrazioni della soluzione.
Lo spessore di tutti i campioni varia da 0,7 mm a 0,9 mm, che è significativamente inferiore alla lunghezza d'onda delle onde acustiche.

TEST ACUSTICI
Il coefficiente d'assorbimento del campione è stato calcolato attraverso il tubo di impedenza secondo lo standard ASTM E 1050, con diametro di 35 mm 80 mm e intervallo di frequenza da 100 a 6300 Hz.

RISULTATI ACUSTICI
Come risulta dalla figura a, i campioni mostrano scarse proprietà di assorbimento acustico.
In seguito sono stati studiati gli effetti dell'aggiunta di un air-gap con la distanza di 1 cm, 2 cm e 3 cm. Come emerge dalle figure b,c e d, all'aumentare dell'air-gap il picco dell'assorbimento acustico si sposta gradualmente verso le basse frequenze.
Anche la diminuzione del diametro della perforazione dei tessuti rivestiti, e il conseguente aumento del poliuretano generano uno spostamento dell'assorbimento verso le basse frequenze.



Confronto delle performance acustiche ottenute, in funzione della tipologia e dell'air-gap utilizzato.

ULTERIORI OSSERVAZIONI
Coefficienti di assorbimento acustico analizzati e previsti attraverso l'utilizzo del modello Maa: dal confronto dei risultati ottenuti attraverso questo modello con quelli ottenuti con il tubo di impedenza, si evince che il modello Maa potrebbe prevedere l'andamento delle curve di assorbimento acustico anche se generalmente presenta la tendenza a sovrastimare l'assorbimento alle basse frequenze, e a sottostimarlo a quelle più alte.

LANA VERGINE, LANIFICIO REDA 1865

CARATTERISTICHE FISICHE MEDIE

Lunghezza media: 71 mm
Diametro fibra media: 17,3 µm

CARATTERISTICHE CHIMICHE MEDIE

Estrazione con diclorometano

Normativa di riferimento :			UNI 8476 (metodo interno tecnica Randall)		
Strumento utilizzato :			Estrattore soxhlet VELP SER 148		
Risultati riferiti alla massa della provetta estratta essicata					
Prova 1 :	0,55	%	Prova 2 :	0,53	%
Prova 3 :	0,53	%			
			Media :	**0,54**	**%**

Estrazione con alcool etilico

Normativa di riferimento :			Interna (tecnica Randall)		
Strumento utilizzato :			Estrattore soxhlet VELP SER 148		
Risultati riferiti alla massa della provetta estratta essicata					
Prova 1 :	0,52	%	Prova 2 :	0,49	%
Prova 3 :	0,48	%			
			Media :	**0,50**	**%**

Determinazione ceneri

Normativa di riferimento :			UNI 8047		
Strumento utilizzato :			Forno a muffola		
Risultati :					
Prova 1 :	0,44	%	Prova 2 :	0,43	%
Prova 3 :	0,42	%			
			Media :	**0,43**	**%**

pH estratto acquoso

Normativa di riferimento :		UNI EN ISO 3071		
Strumento utilizzato :		pH-metro		
pH acqua distillata :	5,6	Temperatura :	24°C	
Risultati :				
Prova 1 :	9,48	Prova 2 :	9,55	
Prova 3 :	9,51			
		Media :	**9,51**	

ESEMPIO DI SCHEDA POLIMERI, VERNICIATURA INDUSTRIALE SASSONE

EURO POLVERI	EUROPOLVERI S.P.A. 9067A7380 DURPOL EPOSSIPOL. RAL5014 ca. BLUE BUCCIATO/L TS E.M.P.	Revisione n. 2 Data revisione 26/07/05 Stampata il 18/04/06 Pagina n. 1 / 4

Scheda Dati di Sicurezza

1. Identificazione della sostanza / preparato e della Società

1.1 Identificazione della sostanza o preparato

Denominazione: 9067A7380 DURPOL EPOSSIPOL. RAL5014 ca. BLUE BUCCIATO/L TS E.M.P.

1.2 Utilizzazione della sostanza / preparato

Descrizione/Utilizzo: Destinato unicamente ad uso di utilizzatori professionali

1.3 Identificazione della Società

Ragione Sociale: EUROPOLVERI S.P.A.
Indirizzo: Via Galvani, 69
Località e Stato: 36066 Sandrigo (VI)
ITALIA
tel. 0444750643
fax 0444750653

1.4 Telefono di emergenza

Per informazioni urgenti rivolgersi a: 0444750643

2. Composizione / Informazione sugli ingredienti

Contiene:

Denominazione	Concentrazione (C)	Classificazione	
TETRADECIL TRIMETIL AMMONIO BROMURO	0,1 <= C < 0,15	Xn	R 20/22
Cas No 1119-97-7		Xi	R 37/38
CE No 214-291-9		Xi	R 41
		N	R 50

Il testo completo delle frasi di rischio (R) è riportato alla sezione 16 della scheda.

3. Identificazione dei pericoli

Il preparato non è classificato pericoloso ai sensi delle disposizioni di cui alle direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e successive modifiche ed adeguamenti. Il preparato, comunque, contenendo sostanze pericolose in concentrazione tale da essere dichiarate alla sezione n.2, richiede una scheda dati di sicurezza con informazioni adeguate, in conformità alla direttiva 91/155/CE e successive modifiche.

4. Interventi di primo soccorso

Non sono noti episodi di danno al personale addetto all'uso del prodotto. Tuttavia, in caso di necessità, si adottino le seguenti misure generali:
INALAZIONE: Portare il soggetto all'aria aperta. Se la respirazione è difficoltosa, praticare la respirazione artificiale e consultare il medico.
INGESTIONE: Consultare il medico; indurre il vomito solo su istruzione del medico; non somministrare nulla per via orale se il soggetto è incosciente.
OCCHI e PELLE: lavare con molta acqua; se l'irritazione persiste, consultare il medico.

5. Misure antincendio

Raffreddare i contenitori per evitare la decomposizione del prodotto e lo sviluppo di sostanze potenzialmente pericolose per la salute e la sicurezza. Indossare sempre l'equipaggiamento completo di protezione antincendio.

6. Provvedimenti in caso di dispersione accidentale.

Raccogliere il prodotto solido con mezzi meccanici antiscintilla. Evitare la formazione di polvere spruzzando il prodotto con acqua, se ciò non è controindicato. Queste precauzioni valgono per polveri potenzialmente infiammabili o esplosive in miscela con l'aria.

7. Manipolazione e immagazzinamento

Coloro che soffrono di problemi alle vie respiratorie o di reazioni allergiche devono evitare l'esposizione alle vernici in polvere e la loro manipolazione.

MANIPOLAZIONE
E' necessario prendere delle precauzioni per evitare la formazione di concentrazioni di polveri superiori ai limiti di infiammabilità, di esplosività e di esposizione professionale.
Le apparecchiature elettriche e di illuminazione devono essere adeguatamente protette in conformità agli standard appropriati per evitare che la polvere venga a contatto con superfici calde, scintille o altre possibilità di innesco.
Il preparato può caricarsi elettrostaticamente: usare sempre i collegamenti a terra quando lo si trasferisce da un contenitore ad un altro. Gli operatori devono indossare calzature e indumenti antistatici e i pavimenti devono essere di tipo conduttivo.
Tenere i recipienti ben chiusi e lontano da fonti di calore, scintille o fiamme vive. Usare attrezzi antiscintilla.
Evitare il contatto con la pelle e gli occhi. Non respirare le polveri, gli aerosoli e la nebbia di spruzzatura che si formano in fase di applicazione del preparato. Evitare l'inalazione della polvere in fase di sabbiatura.
Nella zona di utilizzazione non si deve fumare, né mangiare né bere.
Per i mezzi protettivi personali si veda la sezione 8.
Tenere sempre i contenitori dello stesso tipo di quello originale.
Mettere in atto le norme di sicurezza e di igiene del lavoro previste dalle leggi vigenti.

STOCCAGGIO
Rispettare le indicazioni riportate sull'etichetta.
Stoccare a temperatura inferiore a 25'C.in luogo asciutto e ben ventilato, lontano da fonti di calore e raggi diretti del sole.
Tenere lontano da ogni sorgente di fiamma o scintilla. Non fumare. Vietare l'accesso alle zone di stoccaggio alle persone non autorizzate.
I contenitori che sono stati aperti devono essere chiusi con cura e tenuti diritti in modo da evitare fuoriuscita del prodotto.

8. Protezione personale / controllo dell'esposizione.

TETRADECIL TRIMETIL AMMONIO BROMURO
- TLV TWA 10 mg/m3 ACGIH

PRECAUZIONI IMPIANTISTICHE

Evitare l'inalazione delle polveri. Gli ambienti di lavoro devono essere adeguatamente aerati. Ove possibile, installare fonti di aspirazione localizzata ed efficaci sistemi di ricambio d'aria generale. Se queste misure non sono sufficienti a mantenere concentrazioni delle polveri al di sotto del limite di esposizione, sara' necessario far uso di mezzi di protezione delle vie

respiratorie.

PROTEZIONE PERSONALE
PROTEZIONE DELLE VIE RESPIRATORIE:Quando si verificano concentrazioni superiori ai limiti di esposizione obbligatorio l'uso di sistemi di protezione delle vie respiratorie.
PROTEZIONE DELLE MANI: In caso di contatto prolungato o ripetuto si raccomanda l'impiego di guanti adeguati. Creme protettive possono essere utili per proteggere le zone della pelle esposte; non devono essere comunque applicate quando il contatto ha gia' avuto luogo. PROTEZIONE DEGLI OCCHI: Utilizzare occhiali di sicurezza che assicurino la protezione dagli sbruffi.
PROTEZIONE DELLA PELLE: Il personale deve indossare indumenti protettivi e tutte le parti del corpo devono essere lavate dopo il contatto.Bisogna porre attenzione nella scelta degli indumenti protettivi per evitare infiammazione e irritazione della pelle del collo e dei polsi a causa del contatto con la polvere.

9. Proprietà fisiche e chimiche

Colore		BLU	
Odore		INODORE	
Stato Fisico		POLVERE	
Solubilità		IMMISCIBILE	
Viscosità		N.D.	
Densità Vapori		N.D.	
Velocità di evaporazione		N.D.	
Proprietà comburenti		N.D.	
Coefficiente di ripartizione: n-ottanolo/acqua:		N.D.	
pH		N.D.	
Punto di ebollizione		N.D.	
Punto di infiammabilità		N.A.	
Proprietà esplosive		N.D.	
Temperatura di autoaccensione	>	480	°C
Tensione di vapore		N.D.	
Peso specifico		N.D.	

10. Stabilità e reattività

Il prodotto è stabile nelle normali condizioni di impiego e di stoccaggio. Per effetto del calore o in caso di incendio si possono liberare ossidi di carbonio e vapori, che possono essere dannosi per la salute. I vapori possono formare miscele esplosive con l'aria.

11. Informazioni tossicologiche

Non sono noti episodi di danno alla salute dovuti all'esposizione al prodotto. In ogni caso si raccomanda di operare nel rispetto delle regole di buona igiene industriale. Il preparato può, in soggetti particolarmente sensibili, provocare lievi effetti sulla salute per esposizione all'inalazione e/o assorbimento cutaneo e/o contatto con gli occhi e/o ingestione.

12. Informazioni ecologiche

Utilizzare secondo le buone pratiche lavorative, evitando di disperdere il prodotto nell'ambiente. Avvisare le autorità competenti se il prodotto ha raggiunto corsi d'acqua o fognature o se ha contaminato il suolo o la vegetazione.

EURO POLVERI	EUROPOLVERI S.P.A. 9067A7380 DURPOL EPOSSIPOL. RAL5014 ca. BLUE BUCCIATO/L TS E.M.P.	Revisione n. 2 Data revisione 26/07/05 Stampata il 18/04/06 Pagina n. 4 / 4

13. Osservazioni sullo smaltimento

Se il prodotto è solido si può smaltire in discarica, la cui tipologia deve essere individuata secondo i criteri previsti.

14. Informazioni sul trasporto

Il preparato non è da considerarsi pericoloso ai sensi delle disposizioni vigenti in materia di trasporto di merci pericolose su strada (A.D.R.), su ferrovia (RID), via mare (IMDG Code) e via aerea (IATA).

15. Informazioni sulla normativa

Simboli di pericolo: Nessuno

Frasi di rischio (R): Nessuna

- S23 NON RESPIRARE GLI AEROSOLI

Scheda dati di sicurezza disponibile su richiesta per gli utilizzatori professionali.

Etichettatura di pericolo ai sensi delle direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e successive modifiche ed adeguamenti

16. Altre informazioni.

Testo delle frasi di rischio (R) citate alla sezione 2 della scheda:

R 20/22	NOCIVO PER INALAZIONE E INGESTIONE.
R 37/38	IRRITANTE PER LE VIE RESPIRATORIE E LA PELLE.
R 41	RISCHIO DI GRAVI LESIONI OCULARI.
R 50	ALTAMENTE TOSSICO PER GLI ORGANISMI ACQUATICI.

BIBLIOGRAFIA GENERALE:

1. Direttiva 1999/45/CE e successive modifiche
2. Direttiva 67/548/CEE e successive modifiche ed adeguamenti (XXIX adeguamento tecnico)
3. Direttiva 91/155/CEE e successive modifiche
4. The Merck Index. Ed. 10
5. Handling Chemical Safety
6. Niosh - Registry of Toxic Effects of Chemical Substances
7. INRS - Fiche Toxicologique
8. Patty - Industrial Hygiene and Toxicology
9. N.I. Sax - Dangerous properties of Industrial Materials-7 Ed., 1989

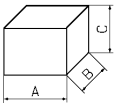
Nota per l'utilizzatore:
Le informazioni contenute in questa scheda si basano sulle conoscenze disponibili presso di noi alla data dell'ultima versione.
L'utilizzatore deve assicurarsi della idoneità e completezza delle informazioni in relazione allo specifico uso del prodotto.
Non si deve interpretare tale documento come garanzia di alcuna proprietà specifica del prodotto.
Poichè l'uso del prodotto non cade sotto il nostro diretto controllo, è obbligo dell'utilizzatore osservare sotto la propria responsabilità le leggi e le disposizioni vigenti in materia di igiene e sicurezza. Non si assumono responsabilità per usi impropri.

Modifiche rispetto alla revisione precedente
Sono state apportate variazioni alle seguenti sezioni:
01 / 02 / 03 / 08 / 15

SCHEDA TECNICA, COLLA COCCOINA, BALMA, CAPODURI & C. s.p.a

COLLE IN PASTA BIANCA "COCCOINA"

Articolo		Peso Netto/Lordo (g)	Pezzi per scatola	Pezzi per cartone	Dimensioni cartone (AxBxC) (cm)	Peso cartone (Kg)
607 - 50 g.	Barattolo in plastica con pennello	50 / 70	20	240	48 x 30,5 x 35,5	18
608 - 125 g.	Barattolo in plastica con pennello	125 / 160	20	120	45,5 x 38 x 29,5	20
603 - 125 g.	Barattolo in alluminio con pennello	125 / 160	10	120	43,5 x 36 x 27	21
603/P - 125g.	Barattolo in alluminio con pennello	125 / 160	10	120	43,5 x 36 x 27	21
610 - 1000 g.	Contenitore in plastica	1000 / 1080	-	18	41 x 38 x 27	21
615 - 5000 g.	Contenitore in plastica	5000 / 5400	-	2	48 x 28,5 x 27	13



Composizione: colla a base di destrina di fecola di patate in acqua (senza solventi).

Conservazione: per la migliore conservazione del prodotto si raccomanda di richiudere bene il barattolo dopo ogni utilizzo. Affinché il prodotto mantenga inalterate tutte le sue caratteristiche si consiglia un periodo massimo di stoccaggio non superiore ai 12 mesi.

Note descrittive:

Prima fra tutte le paste adesive italiane, anche in ordine cronologico di produzione, unica ad essere ancor oggi facilmente riconoscibile grazie all'inconfondibile profumazione, la colla "Coccoina" in pasta incolla carte, stoffe, fotografie, etichette, ecc.
Varie sono le confezioni disponibili, tra le quali spicca l'intramontabile e sempre apprezzato barattolo in alluminio, affiancato oggi dagli altri formati con contenitori in plastica, dotati di pennellino.
Di facile uso, "Coccoina" in pasta è ideale per la creatività dei più piccoli, essendo assolutamente non nociva.

SCHEDA TECNICA, COLLA OKO NATURKLEISTER, CREARTEC

CREARTEC trend-design-gmbh **Verordnung** **D 88 161 Lindenberg/Allgäu** **(REACH)**	**Sicherheitsdatenblatt gemäss** **Nr. 1907/2006/EG**

Hersteller:			**CREARTEC trend design-gmbh**
Produkt-Nummer:	**77 686**	**Handelsname:**	**Öko-Naturkleister**
Druckdatum:	**20.01.2016**	**überarbeitet am: 20.01.2016**	**Seite: 001/004**

01 Stoff-/Zubereitungs- und Firmenbezeichnung:

Handelsname:	**Öko- Naturkleister**
Hersteller/Lieferant:	CREARTEC trend-design-gmbh
Straße:	Lauenbühlstr. 59
Nat.-Kenn./PLZ/Ort:	D 88 161 Lindenberg
Telefon/Telefax:	Tel. 0 83 81 80 74 00 – Fax 083 81 80 740 10
Notfallauskunft:	0 75 22 79 76 60 oder 0 83 81 80 74 00

02 Mögliche Gefahren:

- **Einstufung des Stoffs oder Gemischs**
  Einstufung gemäss Verordnung (EG) Nr. 1272/2008
  Das Produkt ist als nicht gefährlich eingestuft im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 [CLP].
  Einstufung (RL 67/548/EWG /1999/45/EG)
  Entfällt.
- **Kennzeichnungselemente**
  Kennzeichnung gemäss Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 [CLP]
  Entfällt.
  Gefahrenpiktogramme --
  Gefahrenhinweise --
  Sicherheitshinweise --
- **Sonstige Gefahren**
  Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung
  Nicht anwendbar.

03 Zusammensetzung/Angaben zu den Bestandteilen:

- **Produktbeschreibung / Chemische Charakterisierung: Stoffe**
  Dextrin, Zucker und Glycerin

04 Erste-Hilfe-Massnahmen:

- **Beschreibung der Erste-Hilfe-Massnahmen**
  Nach Hautkontakt
  Beschmutzte, getränkte Kleidung sofort ausziehen. Bei Berührung mit der Haut sofort abwaschen mit viel Wasser und Seife.
  Keine Lösemittel oder Verdünnungen verwenden.
  Nach Augenkontakt
  Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen.
  Weiter ausspülen. Sofort ärztlichen Rat einholen.
  Nach Verschlucken
  Bei Verschlucken Mund mit Wasser ausspülen (nur wenn Verunfallter bei Bewusstsein ist). Sofort ärztlichen Rat einholen.
  Betroffenen ruhig halten. KEIN Erbrechen herbeiführen.
- **Wichtigste akute oder verzögert auftretende Symptome und Wirkungen**
  Bei Auftreten von Symptomen oder in Zweifelsfällen ärztlichen Rat einholen.
- **Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung**

05 Massnahmen zur Brandbekämpfung:

- **Löschmittel**
  Das Produkt selbst brennt nicht.
  Geeignete Löschmittel
  Nicht anwendbar
  Aus Sicherheitsgründen ungeeignete Löschmittel:
  Nicht anwendbar
- **Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren**
  Bei Brand entsteht dichter schwarzer Rauch.
  Das Einatmen gefährlicher Zersetzungsprodukte kann ernste Gesundheitsschäden verursachen.
- **Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung:**
  Atemschutzgerät bereit halten.
  Zusätzliche Hinweise
  Geschlossene Behälter in der Nähe des Brandherdes mit Wasser kühlen. Löschwasser nicht in Kanalisation,
  Erdreich oder Gewässer gelangen lassen.

06 Massnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung:

- **Personenbezogene Vorsichtsmassnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren**
  Siehe Schutzmassnahmen unter Punkt 7 und 8.
- **Umweltschutzmassnahmen**
  Nicht in die Kanalisation oder Gewässer gelangen lassen. Bei Verschmutzung von Flüssen, Seen oder Abwasserleitungen entsprechend den örtlichen Gesetzen die jeweils zuständigen Behörden informieren.
- **Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung**
  Ausgetretenes Material mit unbrennbarem Aufsaugmittel (z.B. Sand, Erde, Vermiculite, Kieselgur) eingrenzen und zur Entsorgung nach den örtlichen Bestimmungen in den dafür vorgesehenen Behältern sammeln (siehe Kapitel 13). Nachreinigung mit Reinigungsmitteln durchführen, keine Lösemittel benutzen.
- **Verweis auf andere Abschnitte**
  Schutzvorschriften (siehe Kapitel 7 und 8) beachten.

07 Handhabung und Lagerung:

- **Schutzmassnahmen zur sicheren Handhabung**
  Hinweise zum sicheren Umgang
  Kontakt mit Haut, Augen und Kleidung vermeiden. Bei der Arbeit nicht essen und trinken.
- **Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten**
  Anforderungen an Lagerräume und Behälter
  Behälter sorgfältig verschlossen aufrecht lagern, um jegliches Auslaufen zu verhindern.
  Weitere Angaben zu Lagerbedingungen
  In gut belüfteten und trockenen Räumen zwischen 5 °C und 25 °C lagern. Vor Sonnenbestrahlung schützen.
  Hinweise auf dem Etikett beachten.
  Schützen gegen: Frost
- **Spezifische Endanwendungen**
  Technisches Merkblatt beachten. Gebrauchsanweisung beachten.

08 Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstung:

- **Zu überwachende Parameter**
  Arbeitsplatzgrenzwerte:
  n.a.
- **Begrenzung und Überwachung der Exposition**
  Begrenzung und Überwachung der Exposition am Arbeitsplatz
  Atemschutz
  Nicht anwendbar.
  Handschutz
  Für längeren oder wiederholten Umgang ist zu verwenden das Handschuhmaterial:
  PVC (Polyvinylchlorid)
  Empfohlene Handschuhfabrikate DIN EN 374
  Schutzcremes können helfen, ausgesetzte Bereiche der Haut zu schützen.
  Nach einem Kontakt sollten diese keinesfalls angewendet werden.
  Augenschutz
  Bei Spritzgefahr dicht schliessende Schutzbrille tragen.
  Körperschutz
  Nicht anwendbar.
  Schutzmassnahmen
  Nach Kontakt Hautflächen gründlich mit Wasser und Seife reinigen oder geeignetes Reinigungsmittel benutzen.
- **Begrenzung und Überwachung der Umweltexposition**
  Nicht in die Kanalisation oder Gewässer gelangen lassen. Siehe Kapitel 7.
  Es sind keine darüber hinausgehenden Massnahmen erforderlich.

09 Physikalische und chemische Eigenschaften:

Grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften
Erscheinungsbild:

Aggregatzustand:	flüssig
Farbe:	farblos
Geruch:	geruchlos

- **Sicherheitsrelevante Basisdaten**

pH-Wert:	5
Zustandsänderung	
Schmelzpunkt/-bereich:	~18 °C
Siedepunkt/-bereich:	~256 °C
Flammpunkt:	180 °C
Dampfdruck bei 20 °C:	22 hPa
Dichte bei 20 °C:	~1,05 g/m³
Löslichkeit in / Mischbarkeit mit:	
Wasser:	vollständig mischbar
Verteilungskoeffizient (n-Octanol):	nicht bestimmt
Viskosität, dynamisch:	nicht bestimmt
kinematisch:	nicht bestimmt
Wasser:	0,5 – 14

- **Sonstige Angaben** -

10 Stabilität und Reaktivität:

Reaktivität

- **Chemische Stabilität**
  Bei Anwendung der empfohlenen Vorschriften zur Lagerung und Handhabung stabil.
  Weitere Informationen über sachgemässe Lagerung: siehe Kapitel 7.
- **Möglichkeit gefährlicher Reaktionen**
  Nicht anwendbar.
- **Zu vermeidende Bedingungen**
  Nicht anwendbar.
- **Unverträgliche Materialien**
  Nicht anwendbar.
- **Gefährliche Zersetzungsprodukte**
  Bei hohen Temperaturen können gefährliche Zersetzungsprodukte entstehen,
  z.B.: Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Rauch, Stickoxide.

11 Angaben zur Toxikologie:

Es gibt keine Daten über die Zubereitung selbst.

- **Angaben zu toxikologischen Wirkungen**

Erfahrungen aus der Praxis/beim Menschen
Sonstige Beobachtungen:
Längerer und wiederholter Kontakt mit dem Produkt führt zum Fettverlust der Haut und kann nicht-allergische Kontakthautschäden (Kontaktdermatitis) und/oder Schadstoffresorption verursachen. Spritzer können Reizungen am Auge und reversible Schäden verursachen.

Zusammenfassende Bewertung der CMR-Eigenschaften
Die Inhaltsstoffe dieser Zubereitung erfüllen nicht die Kriterien für die CMR Kategorien 1 oder 2 gemäss 67/548/EWG.
Es sind keine Angaben über die Zubereitung selbst vorhanden.
Die Zubereitung wurde beurteilt nach der konventionellen Methode der Zubereitungs-Richtlinie 1999/45/EG und nicht klassifiziert.

12 Angaben zur Ökologie:

Gesamtbeurteilung
Es sind keine Angaben über die Zubereitung selbst vorhanden.
Nicht in die Kanalisation oder Gewässer gelangen lassen.

- **Toxizität**
  Es liegen keine Informationen vor.
  Langzeit Ökotoxizität
  Toxikologische Daten liegen keine vor.
- **Persistenz und Abbaubarkeit**
  Toxikologische Daten liegen keine vor.
- **Bioakkumulationspotenzial**
  Toxikologische Daten liegen keine vor.
  Biokonzentrationsfaktor (BCF)
  Toxikologische Daten liegen keine vor.
- **Mobilität im Boden**
  Toxikologische Daten liegen keine vor.
- **Ergebnis der Ermittlung der PBT-Eigenschaften**
  Die Stoffe im Gemisch erfüllen nicht die PBT/vPvB Kriterien gemäss REACH, Anhang XIII.
- **Andere schädliche Wirkungen**
  Die Zubereitung wurde anhand der konventionellen Methode der Zubereitungsrichtlinie (1999/45/EG) bewertet und nicht als umweltgefährlich eingestuft

13 Hinweise zur Entsorgung:

- **Verfahren der Abfallbehandlung**

Sachgerechte Entsorgung / Produkt
Empfehlung
Nicht in die Kanalisation oder Gewässer gelangen lassen. Abfälle und Behälter müssen in gesicherter Weise beseitigt werden.
Entsorgung gemäss EG-Richtlinien 75/442/EWG und 91/689/EWG über Abfälle und über gefährliche Abfälle in den jeweils aktuellen Fassungen.
Vorschlagsliste für Abfallschlüssel/Abfallbezeichnungen gemäss EAKV
080111 Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten
Verpackung
Empfehlung
Nicht kontaminierte und restentleerte Verpackungen können einer Wiederverwertung zugeführt werden.
Nicht ordnungsgemäss entleerte Gebinde sind Sonderabfall.

14 Angaben zum Transport:

Dieses Gemisch ist nach den internationalen Transportvorschriften (ADR/RID, IMDG, ICAO/IATA) nicht als gefährlich eingestuft.
Kein Gefahrgut im Sinne der Transportvorschriften.

- **UN-Nummer**
  n.a.
- **Ordnungsgemässe UN-Versandbezeichnung**
  Transportgefahrenklassen
  n.a.
- **Verpackungsgruppe**
  n.a.
- **Umweltgefahren**
  Landtransport (ADR/RID) n.a.
  Marine pollutant n.a.
  Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender
  Transport immer in geschlossenen, aufrecht stehenden und sicheren Behältern. Sicherstellen, dass Personen, die das Produkt transportieren, wissen, was im Falle eines Unfalls oder Auslaufens zu tun ist.
  Hinweise zum sicheren Umgang: siehe Abschnitte 6 - 8
  Weitere Angaben
  Landtransport (ADR/RID)
  Tunnelbeschränkungscode
  Seeschiffstransport (IMDG)
  EmS-Nr. n.a.
- **Massengutbeförderung gemäss Anhang II des MARPOL-Übereinkommens 73/78 und gemäss IBC-Code**
  nicht anwendbar

15 Vorschriften:

- **Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch**
  EU-Vorschriften
  Nationale Vorschriften
  -
  Wassergefährdungsklasse (WGK)
  1 schwach wassergefährdend
  Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
  n.a.
- **Sonstige Vorschriften, Beschränkungen und Verbotsverordnungen**
  Berufsgenossenschaftliche Regeln (BGR)
- **Stoffsicherheitsbeurteilung**
  Stoffsicherheitsbeurteilungen für Stoffe in dieser Zubereitung wurden nicht durchgeführt.

16 Sonstige Angaben:

Wortlaut der R- und H-Sätze (Nummer und Volltext):
n.a.

Der Inhalt dieses Sicherheitsdatenblattes entspricht unserem gegenwärtigen Wissensstand und genügt der nationalen sowie der EG-Gesetzgebung. Die gegebenen Arbeitsbedingungen des Benutzers entziehen sich jedoch unserer Kenntnis und Kontrolle. Der Benutzer ist für die Einhaltung aller notwendigen gesetzlichen Bestimmungen verantwortlich. Dieses Sicherheitsdatenblatt beschreibt die Sicherheitserfordernisse unseres Produktes und stellt keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar.
Die Angaben sind erforderlich nach Paragraph 14 der Gefahrstoffverordnung vom 26.10.93.

Sound Research Laboratories

Holbrook House, Little Waldingfield,
Sudbury, Suffolk CO10 0TH
Tel: (01787) 247595
e-mail: srl@srltsl.com

Test Certificate No. 8771

Contract: C/22704

Page: 1 of 1

Date: 22 October 2014

Confidential

See SRL report C/22704/T04 for full details

The Laboratory Measurement of Random Incidence Sound Absorption to BS EN ISO 354:2003

Client: Knauf AMF

Test Date: 10/10/2014

Empty Room:	**Temperature:**	15.4	°C	**Humidity:**	69	%RH	**Pressure:**	1001	mbar
Room with Sample:	**Temperature:**	15.4	°C	**Humidity:**	68	%RH	**Pressure:**	1002	mbar

Sample Description: Knauf AMF Baffles, thickness 50mm, 1200x300mm / 300mm centres / 100mm cavity

Mounting Method: E- 400

Sample Area: 10.8 m2

Chamber Volume: 300 m3

	Test 105			
Freq Hz	**T1 sec**	**T2 sec**	**Absorp Coeff**	**Practical Absorp Coeff #**
*50**	*4.60*	*4.35*	*0.06*	
*63**	*5.20*	*5.19*	*0.00*	*n/a*
*80**	*6.40*	*4.68*	*0.26*	
100	7.34	5.63	0.19	
125	7.51	4.90	0.32	0.35
160	6.87	4.02	0.47	
200	7.05	4.29	0.41	
250	7.39	4.54	0.38	0.40
315	7.13	4.58	0.35	
400	6.58	4.33	0.36	
500	5.57	3.40	0.52	0.55
630	5.18	2.66	0.83	
800	5.61	2.72	0.86	
1000	6.08	2.76	0.89	0.90
1250	5.87	2.69	0.91	
1600	5.37	2.53	0.94	
2000	4.89	2.47	0.90	0.90
2500	4.40	2.31	0.93	
3150	3.70	2.14	0.88	
4000	3.07	1.90	0.90	0.90
5000	2.45	1.63	0.91	
*6300**	*1.75*	*1.31*	*0.84*	
*8000**	*1.42*	*1.11*	*0.86*	*n/a*
*10000**	*0.99*	*0.80*	*1.03*	

α_w 0.60(MH)

Class C

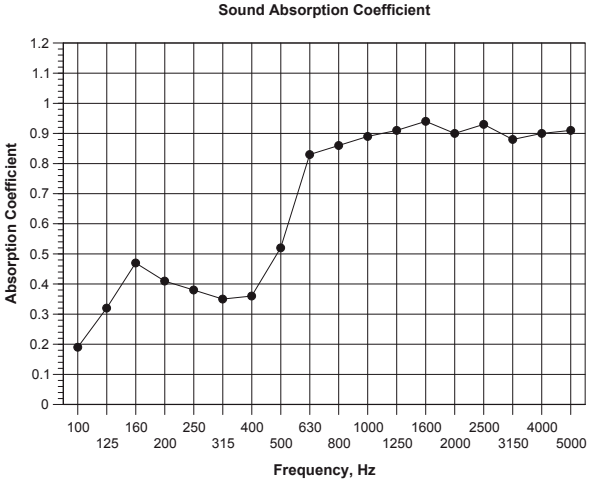
Calculated to EN ISO 11654:1997

NRC 0.65

Calculated to ASTM C 423-01

** Denotes frequencies outside the range covered by BS EN ISO 354:2003*

T1, empty room reverberation time
T2, room reverberation time with sample



Practical absorption coefficient, BS EN ISO 11654:1997

v4.3

BIBLIOGRAFIA

TESTI E ARTICOLI

- ASSOSISTEMA Servizi S.r.l, *Studio di settore sul fine vita dei prodotti tessili*, Ambienteitalia, 2015, pp. 1-48.
- Berardi Umberto, Iannace Gino, *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*, in *Building and Environment*, volume 94, Elsevier, 2015, pp. 840-850.
- Bonfiglio Paolo, Pompoli Francesco, *Inversion Problems for Determining Physical Parameters of Porous Materials: Overview and Comparison Between Different Methods,* in *Acta Acustica united with Acustica,* volume 99, S.Hirzel, 2013, pp.1-11.
- Castagnède Bernard, et. al, *Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials,* in *Applied Acoustics*, volume 61, Elsevier, 2000, pp. 173-182.
- Circular Economy Network, *Rapporto sull'economia circolare in Italia – 2019*, ENEA, 2019, pp. 77-118.
- Dansero E. , Caldera G. , *Green economy e tessile: chi passa per la cruna dell'ago*, Università degli studi di Torino, 2012, pp. 9-66.
- Duval A. , *et. al, Diffuse field absoption coefficient simulation of porous materials in small reverberant rooms: finite size and diffusivity issues,* Hal, 2010, pp. 12–16.
- Fiorina S. , Tesi di laurea magistrale, *ReCashplaster Recycled Cashmere for plaster*, Politecnico di Torino, 2018, pp. 2-46.
- ISO 14044:2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.
- ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- ISO 21930:2017. Sustainability in buildings and civil engineering works -- Core rules for environmental product declarations of construction products and services.
- Latorella F. , *Validazione delle misure dell'assorbimento acustico in base alla ISO-354 in una camera riverberante in scala*, Politecnico di Torino, 2018, pp.10-115.
- Maggiolini M. A., *Il distretto tessile biellese – L'eccellenza sfida la crisi*, Quaderni fondazione Milano, 2018-2019, pp 9-205.

- Ronchi E. , *Le sfide della circular economy, Fondazione per lo sviluppo sostenibile*, 2018, pp. 1-37.
- Schiavi A., *et. al, Definizione di un modello geometrico per la determinazione della porosità effettiva e della tortuosità in mezzi fibrosi, Associazione Italiana di Acustica 41° Convegno Nazionale,* 2014, pp. 1-8.
- Schiavi A., *et. al, Effect and importance of static-load on airflow resistivity determination and its consequences on dynamic stiffness,* in *Applied Acoustics,* volume 72, Elsevier, 2011, pp. 705-710.
- Spagnolo R. , *Acustica*, fondamenti e applicazioni, Utet, 2015.
- Tartaglione C. *et. al*, *Il "Fine Vita" dei prodotti nel sistema moda*, Fondoimpresa, 2013, pp. 6-53.
- Tyler Adams, *Sound Materials*, Frame Publisher, 2018, pp. 4-283.
- UL 94:2004. Test di infiammabilità di materie plastiche per parti in dispositivi ed elettrodomestici.
- UNI EN ISO 11654:1998. Acustica - Assorbitori acustici per l'edilizia - Valutazione dell'assorbimento acustico.
- UNI EN 826:1998. Isolanti termici per edilizia - Determinazione del comportamento a compressione.
- UNI EN ISO 354:2003. Acustica - Misura dell assorbimento acustico in camera riverberante.
- UNI EN ISO 14025:2010. Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure.
- UNI EN 13162:2013. Isolanti termici per edilizia - Prodotti di lana minerale (MW) ottenuti in fabbrica - Specificazione.
- UNI EN ISO 9053-1:2019. Acustica - Determinazione della resistenza del flusso d'aria - Parte 1: Metodo del flusso d'aria statico.
- Voronina N., *Acoustic Properties of Fibrous Materials,* in *Applied Acoustics*, volume 42, Elsevier, 1994, pp. 165-174.
- Xiaoning Tang, Xiong Yan, Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review, in Composites: Part A, volume 101, Elsevier, 2017, pp. 360-380.

SCHEDATURA - ALLEGATI A

- SCHEDA 1: Tiuca Ancuţa-Elena, *et. al, Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste*, in *Energy Procedia*, volume 85, Elsevier, 2015, pp. 559-565.
- SCHEDA 2: Drochytka Rostislav, *et. al, Performance Evaluation and Research of Alternative Thermal, Insulation Based on Waste Polyester Fibers*, in *Procedia Engineering*, volume 195, Elsevier, 2017, 236-243.
- SCHEDA 3: Buratti C., *et. al, Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization*, in *Energy Procedia*, volume 101, Elsevier, 2016, pp. 972-979.
- SCHEDA 4: Patnaik Asis, *et. al, Thermal and sound insulation materials from waste wool andrecycled polyester fibers and their biodegradation studies,* in *Energy and Buildings*,Elsevier, volume 92, Elsevier, 2015, pp. 161-169.
- SCHEDA 5: Islam S., *et. al, Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers*, in *International Journal of Clothing Science and Technology*, volume 30, Emerald, 2018, pp. 444-458.
- SCHEDA 6: Buratti C., *et. al, Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials*, in *Construction and Building Materials,* volume 171, Elsevier, 2018, pp. 338-349.
- SCHEDA 7: Tiuc Ancuta-Elena, et. al, *Sound Absorbing Insulating Composites Based onPolyurethane Foam and Waste Materials*, in *Materiale Plastice*, volume 55, Syscom 18, 2018, pp. 419-422.
- SCHEDA 8: Muthukumar N. , *et. al, Sound and thermal insulation properties of flax/low melt PET needle punched nonwovens*, in *Journal of Natural Fibers,* volume 16, Taylor & Francis, 2019, pp. 245-252.
- SCHEDA 9: Alcaraz Segura, *et. al, Sound absorption of textile material using a microfibres resistive layer*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 254, IOP, 2017.
- SCHEDA 10: Bessa J., *et. al, Multi-layer structures with thermal and acoustic properties for building rehabilitation*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* volume 254, IOP, 2017.
- SCHEDA 11: Trajković D., *et. al, Polyester apparel cutting waste as insulation material,* in *Journal of the Textile Institute,* volume 108, Taylor & Francis, 2017, pp. 1238-1245.

- SCHEDA 12: Zach J., *et. al, Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers,* in *Journal of Chemical Technology and Biotechnology,* volume 91, Wiley-Blackwell, 2016, pp. 2156-2161.
- SCHEDA 13: Lou C.-W., *et. al, Sound-absorbing and flame-retarding property of nonwoven compounded PU foam planks,* in J*ournal of Engineered Fibers and Fabrics,* volume 10, Assoc Nonwoven Fabrics Ind, 2015, pp. 29-38.
- SCHEDA 14: Iasnicu Iuliana, *et. al, The Analysis of sound Absorbing Performances for compisite Plates Containing Recycled Textile Wastes,* in *Sci. Bull.,* volume 78, U.P.B., 2016, pp. 213-218.
- SCHEDA 15: Ricciardi P., *et. al, Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment,* in *Applied Energy,* volume 134, Elsevier, 2014, pp. 150-162.
- SCHEDA 16: Bosia Daniela, *et. al, Sheep wool for sustainable architecture,* in *Energy Procedia,* volume 78, Elsevier, 2015, pp. 315 – 320.
- SCHEDA 17: Del Rey R., *et. al, Acoustic barriers made from textiles wastes and PET, in 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 [],* volume 5, 2013, pp. 4204-4208.
- SCHEDA 18: Pennacchio R., *et. al, Fitness: sheep-wool and hemp sustainable insulation panels,* in *Energy Procedia*, volume 111, Elsevier, 2017, pp. 287 – 297.
- SCHEDA 19: Echeverria Claudia A., *et. al, Engineered hybrid fibre reinforced composites for sound absorption building applications,* in *Resources, Conservation & Recycling*, volume 143, Elsevier, 2019, pp. 1–14.
- SCHEDA 20: Jongkwan Ryu, *et. al, Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panel absorber on heavyweight floor impact sound in the building*, in *Building and Environment,* volume 139, Elsevier, 2018, pp. 1–7.
- SCHEDA 21: Desmond Daniel Vui Sheng Chin, *et. al, Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel(BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA),* in *Applied Acoustics,* volume 138, Elsevier, 2018, pp. 179–187.
- SCHEDA 22: Xiaoning Tang, et. al, *Facile dip-coating method to prepare micro-perforated fabric acoustic absorber,* in *Applied Acoustics,* volume 130, Elsevier, 2018, pp.133–139.

SITOGRAFIA

- https://www.scopus.com/home.uri, ultima consultazione il 20/01/19.
- https://www.researchgate.net/, ultima consultazione il 20/01/19.
- https://www.sciencedirect.com/, ultima consultazione il 20/01/19.
- *http://www.antichitabelsito.it/colle.htm, consultato il 20/04/2019.*
- *https://www.coccoina.it/, consultato il 25/04/2019.*
- *https://stilenaturale.com/, consultato il 28/04/2019*
- *https://www.creartec.de/, consultato il 28/04/2019.*
- *https://www.ilcercartigianodiqualita.it/it/attivita/549-verniciatura-industriale-sassone-sas, consultato il 28/04/2019.*
- https://www.prometeia.it/atlante/tessile-italiano-a-10-anni-crisi, consultato il 23/07/2019.
- https://www.icribis.com/it/osservatorio-imprese/tessile-Italia, consultato il 23/07/2019.
- http://dati.istat.it/Index.aspx, consultato il 23/07/2019.
- https://www.milomb.camcom.it/la-rivista-impresa-e-stato-indice-n.-72/2005-il-tessile-abbigliamento-moda-nel-mondo, consultato il 23/07/2019.
- http://www.ytongplanet.it/yblog/da-uneconomia-lineare-ad-uneconomia-circolare/, consultato il 23/07/2019.
- http://unicircular.org/index.php/unicircular/settori/conau, consultato il 23/07/2019.
- https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10205dl.htm, consultato il 26/07/2019.
- https://www.catasto-rifiuti.isprambiente.it/index.php?pg=rs, consultato il 26/07/2019.
- http://www.aerecologia.it/cer_rifiuti.htm#cer4, consultato il 30/07/2019
- https://artsandculture.google.com/exhibit/il-tessile-biellese/gQHHvQ4V?hl=it, consultato il 30/07/2019
- https://www.informazione-aziende.it/, consultato il 30/07/2019.

- LFT, http://lft.unich.it/laboratorio-fisica-tecnica/images/pdf/lezioni/rumore.pdf, consultato il 30/07/2019.
- http://www.treccani.it/enciclopedia/lana/, consultato il 30/07/2019.
- *https://www.reda1865.com/it/,consultato il 2/08/2019.*
- *https://feltrificiobiellese.it/index.php/it/, consultato il 2/08/2019.*
- *https://www.informazione-aziende.it/13_INDUSTRIE-TESSILI/Provincia_BIELLA?qPgGeo=1#luogo, consultato il 2/08/2019.*
- https://www.acustica-eternoivica.com/it/prodotti, consultato il 19/08/2019.
- https://www.masacoustics.it/, consultato il 19/08/2019.
- http://www.isolmant.com/it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.keyhelmshop.it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.theitaliantimes.it/, consultato il 19/08/2019.
- http://www.annekyyroquinn.com/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.acustico.com/index.html, consultato il 19/08/2019.
- http://www.fonoisolamento.it/, consultato il 19/08/2019.
- https://www.baux.se/, consultato il 26/08/2019.
- https://kvadrat.dk/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.archiproducts.com/en, consultato il 26/08/2019.
- https://www.aleksandragaca.eu/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.dellachiara.it/, consultato il 26/08/2019.
- https://layerdesign.com/#top-page, consultato il 26/08/2019.
- https://i29.nl/projects/the-soft-office, consultato il 26/08/2019.

- http://www.internationalacoustic.com/, consultato il 26/08/2019.
- https://www.environdec.com/, consultato il 26/08/2019.
- http://www.isprambiente.gov.it/it, consultato il 26/08/2019.
- https://www.iso.org/home.html, consultato il 26/08/2019.
- https://www.minambiente.it/, consultato il 26/08/2019.
- http://www.gbcitalia.org/leed, consultato il 26/08/2019.
- https://www.acustico.com/index.html, consultato il 3/09/2019.
- http://www.uni.com/, consultato il 9/09/2019.

RINGRAZIAMENTI

A tutte le persone che mi hanno sostenuto e supportato in questo percorso: i docenti, i ricercatori, i professionisti, gli imprenditori, i responsabili, i dipendenti e tutte le aziende del territorio biellese che hanno contribuito nel lavoro.

Ringrazio i colleghi, i compagni, e tutte le figure che hanno dedicato in questo progetto tempo e conoscenze.

I ringraziamenti più grandi sono rivolti alla famiglia, il punto di riferimento in tutta la mia carriera universitaria, la forza che mi ha permesso di raggiungere questo traguardo, credendo sempre in me, sopportandomi, incoraggiandomi e aiutandomi nei momenti di maggior difficoltà.
Semplicemente grazie dal profondo del cuore.

Un ringraziamento speciale alla mamma, senza di lei, tutto questo, non sarebbe stato possibile.

Ringrazio tutti i parenti, gli zii, i cugini e le nonne, per la loro presenza e la loro immensa disponibilità.

Un sentito ringraziamento a una persona importante.

Infine ringrazio gli amici, quelli veri, quelli presenti in ogni situazione, con i quali ho condiviso i momenti più belli di questi fantastici anni.