



**Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile  
ed Edile/Architettura**

*Graduate School in Civil  
and Architectural Engineering*

XXIX Ciclo (XV Nuova serie)

**Materiali da riciclo e da scarto innovativi per  
l'edilizia: caratterizzazione acustica, termica  
ed analisi del ciclo di vita**

Tesi di dottorato  
Francesca Maria Torchia

Relatore  
Prof. Paola Ricciardi

Controrelatore  
Prof. Roberto De Lotto

Dicembre 2016





Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile ed Edile/Architettura  
*Graduate School in Civil and Architectural Engineering*

XXIX Ciclo/Cycle (XV Nuova Serie/New Series)

Settore:	Ingegneria
<i>Field:</i>	<i>Engineering</i>
Sede Amministrativa non consortile:	Università degli Studi di Pavia
<i>Administrative location:</i>	<i>University of Pavia</i>
Durata:	3 anni
<i>Duration:</i>	<i>3 years</i>
Periodo formativo estero:	come previsto dal regolamento del dottorato di ricerca
<i>Period in foreign organizations:</i>	<i>as required by the School rules</i>
Numero minimo di corsi:	6 corsi
<i>Minimum number of courses:</i>	<i>6 courses</i>

## *Recapiti/ Contact numbers and address*



**DICAr**

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura  
Università degli Studi di Pavia

via Ferrata 3 - 27100 Pavia - Italy

Tel. 0382/985450-51

## *Coordinatore/ Coordinator*

CASCIATI Fabio

Professore Ordinario (ICAR/08)

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura

via Ferrata 3 - 27100 Pavia - Italia Tel. 0382/985787

e-mail: fabio.casciati@unipv.it

## *Collegio dei docenti/ Scientific Board*

BERIZZI Carlo

Ricercatore (ICAR/14)

CASCIATI Fabio

Professore Ordinario (ICAR/08)

CASELLA Vittorio

Professore Associato (ICAR/06)

CINQUINI Carlo

Professore Ordinario (ICAR/08)

CIAPONI Carlo

Professore Ordinario (ICAR/02)

COLLIVIGNARELLI Maria Cristina

Ricercatore (ICAR/03)

DE LOTTO Roberto

Professore Associato (ICAR/20)

DEL GROSSO Andrea Enrico	Professore (ICAR/09)
	in quiescenza dal 01/11/2015
FARAVELLI Lucia	Professore Ordinario (ICAR/08)
GALLATI Mario	Professore (ICAR/01)
	in quiescenza dal 01/11/2015
GHILARDI Paolo	Professore Associato (ICAR/01)
GOBETTI Armando	Professore Associato (ICAR/08)
GRECO Alessandro	Professore Associato (ICAR/10)
MAGRINI Anna	Professore Ordinario (ING-IND/11)
MARCELLINI Alberto	Dirigente CNR Milano
	in quiescenza dal 01/11/2014
MOISELLO Ugo	Professore (ICAR/02)
	in quiescenza dal 01/11/2015
MORANDOTTI Marco	Professore Associato (ICAR/10)
PAPIRI Sergio	Professore Associato (ICAR/02)
SALA Roberto	Professore (ING-IND/08)
	in quiescenza dal 01/11/2014

## Organizzazione del corso

Il dottorato di ricerca in *Ingegneria Civile ed Edile/Architettura* presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia è stato istituito nell'anno accademico 2010/11 (XXVI ciclo; XII ciclo Nuova Serie).

L'obiettivo formativo peculiare del dottorato è addestrare giovani laureati allo svolgimento di attività di ricerca e viene perseguito nell'ambito dei settori disciplinari di Ingegneria Civile ed Architettura (ICAR), senza tralasciare alcune interdisciplinarietà, in via di consolidamento, con discipline strumentali o complementari. Il corso consente al dottorando di scegliere tra sei distinti curricula: compositivo, idraulico, sanitario, sismico, strutturale e tecnologico.

In particolare, le tematiche di ricerca sono quelle che caratterizzano i raggruppamenti disciplinari ICAR/01, ICAR/02, ICAR/03, ICAR/06, ICAR/08, ICAR/09, ICAR/10, ICAR/14, ICAR/18, ICAR/20, tutte di pertinenza dell'ingegneria civile e architettura. A questi si aggiungono ING-IND/11 (fisica tecnica ambientale) e ING-IND/08 (macchine a fluido).

L'attività di ricerca si svolge soprattutto presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAr) dell'Università degli Studi di Pavia.

Durante i primi due anni sono previsti almeno sei corsi, seguiti da prove finali che il dottorando è tenuto a sostenere.

Il Collegio dei Docenti organizza i corsi con lo scopo di fornire allo studente di dottorato opportunità di approfondimento su alcune delle discipline di base per i settori componenti, ingegneria idraulica, strutturale ed edile/architettura. Corsi e seminari vengono tenuti da docenti di università nazionali ed estere.

Alla fine di ogni anno i dottorandi devono presentare una relazione sull'attività svolta. Al termine del primo anno viene richiesta una presentazione orale, al contrario al termine del secondo anno il dottorando è tenuto a scrivere una tesi su un argomento pertinente alla propria ricerca di dottorato.

Sulla base di tali relazioni il Collegio dei Docenti, previa valutazione dell'assiduità e dell'operosità dimostrata dall'iscritto, può proporre al Rettore l'esclusione del candidato dal corso o non approvarne il passaggio all'anno successivo.

Il dottorando può svolgere attività di ricerca di tipo teorico, numerico e sperimentale, grazie ai laboratori di cui il Dipartimento dispone.

## *Course Organization*

*The Graduate School in Civil and Architectural Engineering at the School of Engineering of the University of Pavia, was established in the academic year 2010/2011 (XXVI cycle, XII new series cycle).*

*Its peculiar educational aim is to train young graduates to conduct research activities and it is pursued by the disciplinary fields of Civil Engineering and Architecture (ICAR), without omitting some interdisciplinary, which are consolidating, with supporting or complementary disciplines. The course allows the PhD student to choose between six different curricula: composition, hydraulic, sanitary, seismic, structural and technological.*

*The research themes are chosen from the disciplinary areas ICAR/01, ICAR/02, ICAR/03, ICAR/06, ICAR/08, ICAR/09, ICAR/10, ICAR/14, ICAR/18, ICAR/20 belonging to civil engineering and architecture. In addition, there are ING-IND/11 (environmental technical physics) and ING-IND/08 (fluid machines).*

*The research activity takes place mainly at the Department of Civil Engineering and Architecture (DICAr) of the University of Pavia. During the first two years, at least 6 courses are required, followed by final examination that the PhD student has to take. The Teaching Staff organizes courses with the aim of providing the PhD student the opportunity to deepen some basic disciplines in the components fields, such as hydraulic engineering, structural, and building engineering and architecture. Courses and seminars are held by professor of national and foreign universities.*

*At the end of each year, the PhD students have to present an activity report. At the end of the first year, an oral presentation is requested, at the end of the second year the PhD student is required to write a term paper about a topic connected to the doctoral research. On the basis of these reports, the Teaching Staff, after the evaluation of the demonstrated regularity and hard work of the PhD student, may propose to the Rector the exclusion of the candidate from the course or not to approve to the next year. The PhD student can carry out research activities both theoretical and experimental, thanks to the laboratories owned by the Department.*

## Elenco delle tesi/ *Theses List*

1. Valentina Giacometti (XXVI Ciclo, XII Ciclo Nuova Serie), Cultura dell'accessibilità e Accessibilità della Cultura: uno strumento di valutazione per l'edilizia universitaria storica, relatore: Prof. A. Greco, ottobre 2013.
2. Enrico Murari (XXVI Ciclo, XII Ciclo Nuova Serie), Adattamento dei sistemi idropotabili a scenari di carenza idrica, relatore: Prof. C. Ciaponi, ottobre 2013.
3. Emanuele Zamperini (XXVI Ciclo, XII Ciclo Nuova Serie), Evoluzione tecnologica e tipologica delle coperture lignee in Italia nel periodo 1800-1950, relatore: Prof. M. Morandotti, ottobre 2013.
4. Cecilia Morelli di Popolo (XXVI Ciclo, XII Ciclo Nuova Serie), La città flessibile. Le dimensioni della flessibilità nella città contemporanea e futura, relatore: Prof. R. De Lotto, aprile 2014.
5. Umut Yıldırım (XXVI Ciclo, XII Ciclo Nuova Serie), System identification towards diagnosis to prognosis, relatore: Prof. F. Casciati, aprile 2014.
6. Daniele Bortoluzzi (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Control systems for the mitigation of footbridge vibrations, relatore: Prof. L. Faravelli, ottobre 2014.
7. Federico Castagnola (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Applicazione di una tecnologia MBR termofila funzionante in condizioni aerate/non aerate per la minimizzazione di fanghi di depurazione civili ed industriali, relatore: Prof. M.C. Collivignarelli, ottobre 2014.
8. Valentina Cinieri (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Patrimonio edificato diffuso. Un approccio sostenibile alla conservazione e alla gestione, relatori: Proff. M. Morandotti, D. Besana, ottobre 2014.
9. Kan Liu (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Cultural transfer and architecture. Foreign architectural practice in Shanghai after 1949, relatore: Prof. Z. Shiling, ottobre 2014.

10. Edoardo Gino Macchi (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Experimental and numerical studies on RF ablation: advances on physical understanding and efficiency, relatore: Prof. M. Gallati, ottobre 2014
11. Daniele Molognoni (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Microbial Fuel Cells Application to Wastewater Treatment: laboratory experience and controlling strategies, relatore: Prof. A. Capodaglio, ottobre 2014.
12. Marco Sordi (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Applicazione di un sistema MBR termofilo aerobico per il trattamento di rifiuti liquidi ad elevata concentrazione di COD, tensioattivi, solventi e cloruri, relatore: Prof. M.C. Collivignarelli, ottobre 2014.
13. Andrea Fenocchi (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), Circulation dynamics in a shallow fluvial lake - The case of the Superior Lake of Mantua, relatore: Prof. S. Sibilla, giugno 2015.
14. Nawal Benabdelkader (XXVII Ciclo, XIII Ciclo Nuova Serie), The restoration and enhancement. The historical site of Mansourah - Tlemcen, relatore: Prof. M. Morandotti, ottobre 2015.
15. Giovanni Anselmo (XXVIII Ciclo, XIV Ciclo Nuova Serie), Effetti idrologici e idraulici dell'urbanizzazione e possibili interventi di mitigazione, relatori: Proff. S. Papiri e G. Barbero, ottobre 2015.
16. Lorenzo Elia (XXVIII Ciclo, XIV Ciclo Nuova Serie), Metaheuristic optimization tools for structural monitoring, relatore: Prof. L. Faravelli, ottobre 2015.
17. Emanuele Giorgi (XXVIII Ciclo, XIV Ciclo Nuova Serie), Man and environment: looking for the future, relatori: Proff. Z. Shiling e F. Casciati, ottobre 2015.
18. Elena Romano (XXVIII Ciclo, XIV Ciclo Nuova Serie), Uno strumento per il miglioramento prestazionale dell'edilizia esistente: il caso delle residenze universitarie, relatore: Prof. A. Greco, ottobre 2015.

19. Babak Jafarzad Eslami (XXVIII Ciclo, XIV Ciclo Nuova Serie), Impiego di smorzatori sismici nella protezione dei beni architettonici, relatore: Prof. E.A. Del Grosso, aprile 2016.
20. Michele Vece (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Shifting from a standard protocol of communication to an emergency protocol in the monitoring of large infrastructural systems, relatore: Prof. S. Casciati, dicembre 2016.
21. Giammaria Gabbianelli (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Numerical model for framed structures with thin-walled cross-section members, relatore: Prof. A. Gobetti, dicembre 2016.
22. Matteo Locatelli (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Strumento per la valutazione e definizione di strategie per il miglioramento dell'edilizia scolastica esistente. Il tema della scuola primaria e secondaria, relatore: Prof. A. Greco, dicembre 2016.
23. Rosamaria Olivadese (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Il riuso degli edifici esistenti a scopo residenziale in Italia: nuovi standard per l'innovazione dei modelli abitativi, relatore: Prof. C. Berizzi, dicembre 2016.
24. Elisabetta Maria Venco (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), La pianificazione preventiva per la riduzione del rischio: definizione di scenari preventivi nel contesto della città flessibile e resiliente, relatore: Prof. R. De Lotto, dicembre 2016.
25. Francesca Maria Torchia (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Materiali da riciclo e da scarto innovativi per l'edilizia: caratterizzazione acustica, termica ed analisi del ciclo di vita, relatore: Prof. P. Ricciardi, dicembre 2016.
26. Laura Menoni (XXIX Ciclo, XV Ciclo Nuova Serie), Sviluppo di "smart control strategies" per l'automazione di processo negli impianti a fanghi attivi, relatore: Prof. G. Bertanza, dicembre 2016.

# Indice della Tesi

Introduzione .....	1
Capitolo 1 Stato dell'arte sull'impiego dei materiali da riciclo e da scarto.....	4
1.1 Gomma.....	7
1.2 Sughero.....	14
1.3 Carta da macero e cellulosa .....	17
1.4 Lolla di riso.....	18
1.5 Fibre vegetali ed animali.....	19
1.6 Scarti vegetali.....	20
Bibliografia capitolo 1.....	22
Capitolo 2 Selezione dei materiali oggetto di analisi.....	27
2.1 Granulato di gomma e fibra tessile ottenuti da riciclo pneumatici fuori uso (Pfu).....	27
2.2 Granulato di sughero.....	29
2.3 Lolla di riso.....	30
2.4 Pellicola argentea di caffè.....	32
2.5 Carta da macero, TNT e fibre tessili.....	33
Bibliografia capitolo 2.....	36
Capitolo 3 Analisi delle metodologie per la realizzazione di campioni da impiegare in edilizia .....	39
3.1 Prova preliminare - TGA (Thermal Gravim Analysis) .....	39
3.1.1 Granulato di sughero.....	41
3.1.2 Pellicola argentea di caffè.....	42
3.2 Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di materiale sciolto e legante.....	44

3.3	Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa a freddo.....	46
3.4	Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa a freddo.....	47
3.5	Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa ad elevata temperatura.....	48
3.6	Realizzazione e classificazione dei campioni composti da materiale sciolto e legante.....	49
3.7	Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati con pressa e legante.....	52
3.8	Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati mediante pressatura a freddo.....	54
3.9	Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati mediante pressatura ad elevata temperatura.....	56
	Bibliografia capitolo 3.....	58

Capitolo 4	Caratterizzazione acustica dei campioni oggetto di studio: metodologia e risultati.....	59
4.1	Descrizione dei campioni di prova.....	59
4.2	Il coefficiente di assorbimento acustico $\alpha$ .....	60
4.2.1	Metodi di misura del coefficiente di assorbimento.....	62
4.2.2	Misura sperimentale del coefficiente di assorbimento ad incidenza normale con tubo ad impedenza.....	63
4.3	Il potere fonoisolante o Transmission Loss TL.....	67
4.3.1	Metodi di misura del potere fonoisolante.....	68
4.3.2	Misura sperimentale del potere fonoisolante con tubo ad impedenza.....	68
4.4	Risultati.....	70
4.4.1	Coefficiente di assorbimento $\alpha$ .....	70
4.4.1.1	Lolla di riso.....	71
4.4.1.2	Granulato di gomma.....	75
4.4.1.3	Granulato di sughero.....	77

4.4.1.4	Pellicola argentea di caffè.....	79
4.4.1.5	Fibra di gomma.....	82
4.4.1.6	Campioni in carta da macero, TNT e fibre tessili.....	83
4.4.2	Potere fonoisolante o TrasmissionLoss.....	86
4.4.2.1	Lolla di riso.....	86
4.4.2.2	Granulato di gomma.....	87
4.4.2.3	Granulato di sughero.....	88
4.4.2.4	Pellicola argentea di caffè.....	89
4.4.2.5	Fibra di gomma.....	90
4.4.2.6	Campioni in carta da macero, TNT e fibre tessili.....	90
	Bibliografia capitolo 4.....	92

Capitolo 5	Caratterizzazione dei parametri non acustici resistenza al flusso, porosità e tortuosità: metodologia e risultati.....	95
5.1	Resistenza al flusso.....	95
5.1.1	Metodi di misura della resistenza al flusso.....	96
5.1.2	Realizzazione apparato sperimentale di misura della resistenza al flusso.....	98
5.2	La porosità.....	101
5.2.1	Metodi di misura della porosità.....	101
5.2.2	Realizzazione apparato sperimentale di misura della porosità.....	102
5.3	Calcolo della Tortuosità.....	104
5.4	Risultati.....	105
5.4.1	Resistenza al flusso.....	105
5.4.2	Porosità.....	110
5.4.3	Tortuosità.....	112
	Bibliografia capitolo 5.....	114

Capitolo 6	Determinazione sperimentale della conduttività termica: metodologia e risultati.....	115
------------	--	-----

6.1	Conduttività termica di materiali da costruzione.....	115
6.2	Descrizione dei campioni di prova.....	118
6.3	Metodologia di prova .....	120
6.3.1	Descrizione della strumentazione e dell'apparato di misura.....	121
6.3.2	Metodo della doppia camera calibrata (Hot Box).....	124
6.3.3	Metodo dei termoflussimetri.....	126
6.4	Termografia ad infrarossi .....	127
6.5	Risultati sperimentali.....	128
6.5.1	Pannello Tipologia A.....	130
6.5.1.1	Metodo della doppia camera calibrata (Hot Box).....	130
6.5.1.2	Metodo dei termoflussimetri.....	130
6.5.1.3	Termografia ad infrarossi .....	131
6.5.2	Pannello Tipologia B.....	133
6.5.2.1	Metodo della doppia camera calibrata (Hot Box) .....	133
6.5.2.2	Metodo dei termoflussimetri.....	134
6.5.2.3	Termografia ad infrarossi.....	135
	Bibliografia capitolo 6.....	138
Capitolo 7	Analisi del ciclo di vita LCA (Life Cycle Assessment).....	139
7.1	Definizione.....	139
7.1.1	Tipologie ed approcci.....	140
7.1.2	Origini e sviluppo.....	141
7.1.3	Percorso normativo.....	142
7.2	Metodo di calcolo e Software impiegato.....	143
7.2.1	Indici calcolati.....	145
7.3	LCA pannelli in carta da macero, TNT e fibre tessili.....	147
7.4	LCA pannelli in pellicola argentea di caffè.....	151
7.5	LCA pannelli in lolla di riso, granulato di gomma e sughero.....	154
	Bibliografia capitolo 7.....	158

Capitolo 8 Modellazione matematica per la previsione del coefficiente di assorbimento.....	159
8.1    Stato dell'arte sui modelli di calcolo in letteratura.....	159
8.1.1    Approccio empirico .....	160
8.1.2    Approccio microstrutturale.....	163
8.1.3    Approccio fenomenologico.....	170
8.2    Confronto tra le curve sperimentalali e teoriche del coefficiente di assorbimento per incidenza normale.....	172
8.2.1    Verifica dell'influenza dello spessore dei campioni sul coefficiente di assorbimento per incidenza normale.....	179
8.3    Nomenclatura.....	184
Bibliografia capitolo 8.....	185
Conclusioni.....	187
Appendice	

## ***Introduzione***

Efficienza energetica, isolamento acustico e eco-compatibilità sono tra le caratteristiche attualmente richieste in edilizia. Conseguentemente l'attenzione verso componenti dell'involucro che possano garantire condizioni di confort ed eco-sostenibili rilevante risulta crescente. Le nuove ricerche scientifiche non si stanno focalizzando solo verso materiali aventi bassi valori di trasmittanza e di isolamento acustico, ma anche verso lo sviluppo e l'uso di materiali da costruzione naturali e, ove possibile, locali. Un crescente interesse sta nascendo anche verso l'impiego di materiali riciclati come prodotti per l'edilizia, sia per il loro basso costo che per il loro potenziale uso come pannelli isolanti per le nuove costruzioni e per le ristrutturazioni.

Questo lavoro di tesi, dopo un attento excursus sui materiali attualmente in uso per il fonoassorbimento, ed isolamento temo-acustico, è stato quello di concentrarsi su 5 materiali riciclati (granulato e fibra di gomma, granulato di sughero, lolla di riso, pellicola argentea di caffè e carta da meccero) al fine di valutarne, oltre che le intrinseche proprietà legate a possibili tipologie di produzione, le caratteristiche di impatto sull'ambiente.

La volontà di utilizzare come oggetto di studio materiali ecosostenibili, poco costosi e ampiamente disponibili sul territorio, rientra nell'ottica di una gestione efficiente dei rifiuti, volta alla tutela e salvaguardia dell'ambiente, nonché al miglioramento dello stile di vita.

L'inquinamento sonoro ha un rilevante impatto sulla qualità della vita dell'uomo. Tradizionalmente, per ridurre i fastidiosi effetti provocati dalla componente riflessa dell'energia sonora, si utilizzano pannelli capaci di assorbire buona parte del suono incidente. La maggior parte dei materiali esistenti sul mercato, adoperati per la realizzazione di tali pannelli, non sono biodegradabili e possono arrecare danni all'ambiente.

A tale proposito, in questo lavoro di tesi, sono stati realizzati campioni da testare termicamente ed acusticamente.

La prima parte del lavoro riguarda la produzione dei campioni da testare, che è stata realizzata presso sia presso i laboratori di Chimica dell'Università di Pavia che quelli del CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli" di Perugia, ed in parte industrialmente presso lo stabilimento della Seccarta S.r.l a Monza.

I campioni oggetto di studio sono tutti costituiti da materiali ampiamente disponibili sul territorio, facilmente reperibili, a basso costo, e presenti sotto una forma adatta per essere realizzati in diverse dimensioni: diametri di 29 e 100 mm di differente spessore.

Il granulato di gomma utilizzato è derivante dallo smaltimento di pneumatici esausti Pfu. Il granulato di sughero è proveniente da sfridi di lavorazione di tappi da sughero. La lolla di riso viene prodotta dal processo di sbramatura del riso. La pellicola argentea di caffè è

lo scarto del processo di tostatura del chicco di caffè. La carta da macero è lo scarto del cartone per imballaggio.

Sono state utilizzate tre metodologie di produzione dei campioni: materiale sciolto con legante; sistema di pressatura a freddo; sistema di pressatura a caldo.

A causa della diversità di produzione, tutti i campioni di piccole dimensioni (dischi di diametro 29 e 100 mm) sono stati testati acusticamente, mentre quelli realizzati in stabilimento industriale (carta da macero) aventi dimensioni di 1x1m sono stati testati anche termicamente.

La seconda parte del lavoro riguarda la caratterizzazione sperimentale dei campioni realizzati. Sono state effettuate prove sperimentali di caratterizzazione di due parametri non acustici: Porosità e resistenza al flusso. Per la misurazione di questi due parametri sono state realizzate appositamente le apparecchiature sperimentali, presso il DICAR dell'Università di Pavia. È stato inoltre calcolato, con formule utilizzate in letteratura per materiali porosi, il parametro delle tortuosità, in funzione della porosità misurata. Tutti i campioni di tutti i materiali sono stati caratterizzati acusticamente mediante l'utilizzo del tubo ad impedenza, detto anche tubo di Kundt, per determinare il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale ed il potere fonoisolante (Transmission Loss).

I campioni realizzati industrialmente aventi dimensioni di 1 x 1m, costituiti da carta da macero, assemblata con TNT (tessuto non Tessuto) e scarti di fibre tessili, sono stati testati termicamente utilizzando l'apparecchio Hot-Box e con il metodo dei termoflussimetri, secondo la norma UNI EN ISO 8990 e secondo la ISO 10534-2.

Al fine di ottimizzare le caratteristiche di fonoassorbimento dei campioni in esame, una parte del lavoro ha riguardato la previsione del coefficiente di assorbimento acustico attraverso l'analisi e l'applicazione di alcuni modelli di calcolo disponibili in letteratura. Per tale scopo sono state confrontate la curva ottenuta sperimentalmente in laboratorio e le curve teoriche generate da alcuni modelli selezionati tra tutti quelli presenti in letteratura. Successivamente sono stati considerati i casi in cui la curva sperimentale fosse ben approssimata da almeno una delle curve teoriche, al fine di studiare l'andamento del coefficiente di assorbimento acustico al variare dello spessore.

Infine, per valutare l'impatto ambientale dei pannelli, è stata del condotto lo studio sul ciclo di vita LCA (Life Cicle Assessment), effettuando un'analisi del ciclo di vita "cradle to gate" di ipotetici pannelli da realizzare industrialmente, inserendo come dato di input i sistemi di produzione utilizzati per la reale realizzazione dei campioni.

Il lavoro di tesi si articola in 8 capitoli:

- *Capitolo 1.* riguarda lo stato dell'arte sull'utilizzo dei materiali riciclati. È stata riportata un'analisi bibliografica ed è stata effettuata una contestualizzazione nel panorama internazionale sull'utilizzo dei principali materiali riciclati e da scarto convenzionali e non convenzionali. L'approfondimento è mirato ad evidenziare le caratteristiche termo-acustiche e le modalità di applicazione di prodotti appositamente realizzati per l'impiego in edilizia.

- *Capitolo 2:* è stata illustrata la scelta dei materiali selezionati. Sono state evidenziate le principali caratteristiche, la provenienza del materiale ed i relativi processi di lavorazione subiti prima dell'impiego per loro produzione di campioni da realizzare. I materiali utilizzati sono: granulato e fibra di gomma, granulato di sughero, lolla di riso e pellicola argentea di caffè.
- *Capitolo 3:* sono illustrati i processi scelti per l'assemblaggio dei campioni e la loro realizzazione, la strumentazione utilizzata e le principali caratteristiche fisiche dei campioni realizzati. La produzione dei campioni è avvenuta parte in laboratorio e parte in stabilimento.
- *Capitolo 4:* riguarda le prove di caratterizzazione acustica effettuate in laboratorio. Dopo aver illustrato le possibili modalità di misura esistenti in letteratura, è stato descritto l'apparato strumentale utilizzato, le modalità di misura ed i risultati delle prove relative alla determinazione del coefficiente di assorbimento ad incidenza normale e del potere fonoisolante. Le prove sono state effettuate presso i laboratori del CIRIAF di Perugia.
- *Capitolo 5:* vengono riportate le prove sperimentali di caratterizzazione dei parametri non acustici: porosità e resistenza al flusso e tortuosità. Vengono descritte le normative e la letteratura attualmente esistente per la misurazione di questi parametri. Vengono illustrati gli apparati appositamente realizzati presso il DICAR di Pavia. Nel capitolo vengono inoltre riportati i risultati delle prove effettuate.
- *Capitolo 6:* riguarda le prove di caratterizzazione termica effettuata sui campioni realizzati con la carta da macero in stabilimento industriale, in quanto grazie a questa produzione è stato possibile realizzare pannelli di dimensione superiore (1 m x 1 m) utili per determinare la conduttività termica in laboratorio. Sono state effettuate prove in camera calda Hot Box, ed è stata condotta l'analisi mediante l'utilizzo di termoflussimetri. A completare lo studio sono state effettuate anche prove termografiche, che hanno evidenziato le criticità del sistema di produzione.
- *Capitolo 7:* tratta l'analisi del ciclo di vita “cradle to gate” di ipotetici pannelli da realizzare industrialmente, secondo i sistemi di produzione illustrati. Sono state effettuate tre tipologie di analisi differenti e sono stati valutati gli impatti in termini di potenziale di riscaldamento globale (IPCC GWP a 100 anni) e richiesta cumulativa di energia (incorporata) CED.
- *Capitolo 8:* vengono approfonditi i principali modelli matematici di previsione del coefficiente di assorbimento. Sono state effettuate prove di ottimizzazione sui modelli ritenuti più adeguati, sulla base della letteratura esistente ed è stata valutata la variabilità in funzione dell'aumento dello spessore.



## Capitolo 1 Stato dell'arte sull'impiego dei materiali da riciclo e da scarto

Il problema della gestione e dello smaltimento dei rifiuti è stato oggetto di una sempre crescente attenzione da parte dell'uomo. L'aumento dell'urbanizzazione e la crescita dei consumi hanno determinato una maggior produzione di rifiuti. L'articolo 183 del D.Lgs 152/2006 [1] definisce rifiuto qualsiasi oggetto o sostanza di cui il detentore si disfa, abbia intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi.

I dati forniti dal più recente rapporto dell'ISPRA del 2015 [2] (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) indicano che la produzione annuale di rifiuti urbani in Europa, relativa all'anno 2014, è di circa 243 milioni di tonnellate, di cui 29,7 milioni in Italia. Come mostra la figura 1.1, negli stati membri dell'UE è emerso che il 31% dei rifiuti urbani è smaltito in discarica, il 26% è avviato a incenerimento, il 28% viene riciclato e il 15% è inviato al compostaggio.

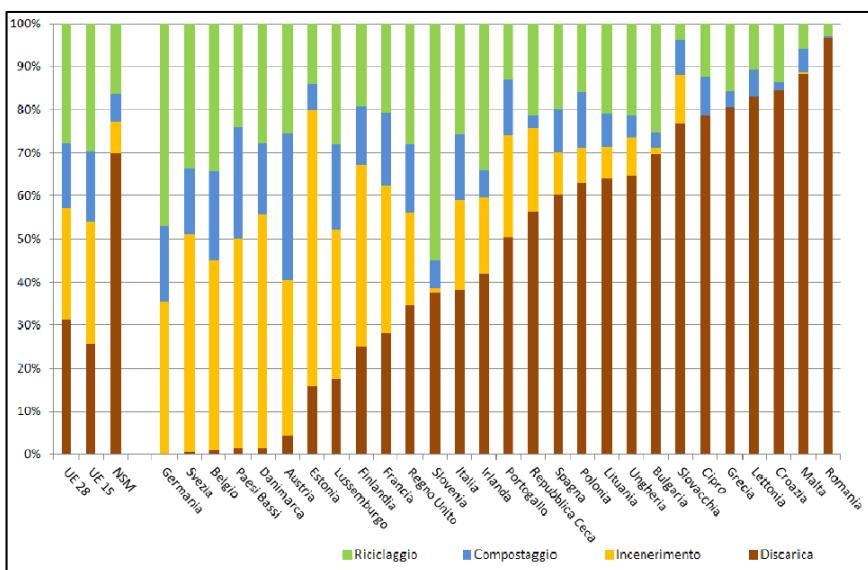
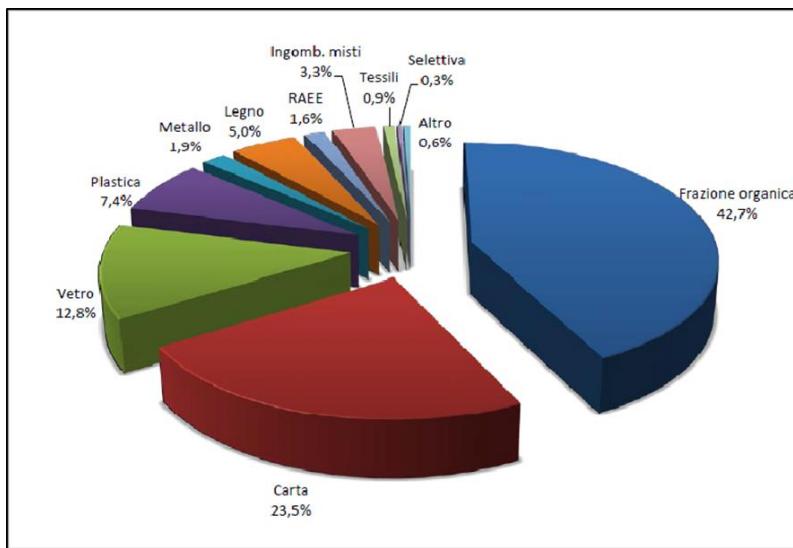


Figura 1: Ripartizione percentuale dei rifiuti urbani nell'UE, anno 2013; Elaborazioni ISPRA su dati Eurostat [2]

Al fine di porre rimedio al problema dei rifiuti sono stati definiti criteri e modalità di intervento. Un mezzo fondamentale adottato per prevenire lo spreco di materiali potenzialmente utili e ridurre il consumo di materie prime è rappresentato dal riciclaggio. Quest'ultimo è definito dall'articolo 218 del D.Lgs 152/2006 [1] come il ritrattamento di un rifiuto per il suo utilizzo per la stessa o per altre funzioni.

La figura 2 evidenzia la ripartizione percentuale della raccolta differenziata svolta in Italia nel 2014.



**Figura 2: Ripartizione percentuale della raccolta differenziata svolta in Italia e riferita all'anno 2014.  
ISPRA [2]**

Tradizionalmente i materiali utilizzati per limitare l'inquinamento acustico sono la lana di vetro, la lana di roccia e le fibre di polimero, ovvero materiali costosi e non biodegradabili, che provocano effetti negativi sull'ambiente.

Alcuni materiali fibrosi, utilizzati in edilizia, con il tempo si degradano, disperdendo microfibre, che se inalate, provocano irritazioni alle mucose e alle vie respiratorie. Per prevenire la disgregazione di questi materiali, si prevede il confinamento all'interno di strati di altri materiali che ne impediscano la dispersione.

Negli ultimi anni, sono stati realizzati molti studi volti a proporre l'uso di nuovi materiali e tecnologie nel settore industriale, edile ed, in particolare, nel campo dell'isolamento termico ed in quello dell'isolamento acustico.

L'uso di questi nuovi materiali a basso costo riduce l'impiego di risorse naturali, evita danni all'ambiente e permette anche, in alcuni casi, di alleggerirlo da rifiuti che altrimenti impiegherebbero un numero considerevole di anni per degradarsi. Per ridurre l'inquinamento è importante anche diminuire il consumo dei combustibili fossili utilizzati nel riscaldamento degli edifici. Questo obiettivo può essere raggiunto attraverso un buon isolamento termico degli stabili sia pubblici che privati, soprattutto, attraverso l'utilizzo dei nuovi materiali proposti dagli ultimi studi.

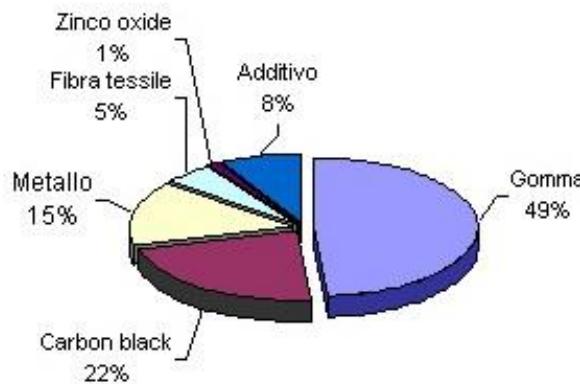
Il materiale proveniente dalle operazioni di riciclaggio si distingue in pre e post consumo a seconda che il rifiuto derivi da manufatti scartati prima o dopo la sua commercializzazione o messa in opera. Per la Direttiva 89/106 CEE [3] un nuovo prodotto, per ottenere la certificazione e la marcatura CE, deve contenere una percentuale maggiore o uguale al 10% di materiale proveniente da riciclo, in sostituzione della materia prima.

I materiali provenienti da riciclaggio sono, quindi, oggetto di una sempre maggior attenzione da parte degli studiosi di tutto il mondo. Gomma, carta, sughero, scarti vegetali e altri materiali provenienti da raccolta differenziata tornano ad essere utili per vari scopi ed in diversi campi di applicazione.

## 1.1 Gomma

Lo smaltimento ed il recupero dei rifiuti di gomma, rappresentati per la maggior parte da pneumatici fuori uso ed in minor parte da scarti industriali e dalla ricostruzione di pneumatici usati, negli ultimi anni ha suscitato crescente interesse, al punto che il relativo flusso è stato inserito tra i flussi prioritari di rifiuti in ambito urbano. La precedente modalità di smaltimento in discarica, infatti, provocava effetti nocivi per l'ambiente [4].

Un pneumatico è definito "fuori uso", e indicato con la sigla PFU, quando non ha più le caratteristiche indispensabili per una prestazione sicura ed efficiente e diventa, pertanto, un rifiuto. I PFU vengono raccolti e recuperati secondo le indicazioni del D. Lgs. 152/2006 [1] e del DM 11/04/2011 n° 82 [5].



**Figura 3: Composizione di uno pneumatico di autovettura [4]**

Come si evince dal diagramma in figura 3, i pneumatici sono composti per il 49% da gomma, che è presente nella forma sia naturale che sintetica, la cui componente elastomerica è costituita dal polimero di Stirene-Butadiene (SBR). I pneumatici sono inoltre composti per il 22% da carbone nero, per il 15% da metallo, l'8% da additivi, il 5% da fibra tessile e dall'1% da zinco [4, 6]. Tali componenti conferiscono loro una buona resistenza da traumi, una lunga durata (circa 40.000 Km) ed una elevata resistenza all'azione dei microrganismi.

Purtroppo, una volta che essi sono diventati rifiuto, le stesse caratteristiche positive risultano un grave problema per l'ambiente. Infatti, i pneumatici non sono biodegradabili (la degradazione da parte dei microrganismi avviene in un tempo di almeno 100 anni), possono dar vita ad incendi e costituiscono una perdita di risorse potenzialmente recuperabili sotto forma di materia ed energia.

L'elevata resistenza dei pneumatici è dovuta ad una serie di processi a cui è sottoposta la gomma di cui essi sono costituiti. Tali processi danno origine a legami tra le molecole che rendono la gomma più robusta ed elastica. L'insieme di tali processi prende il nome di vulcanizzazione. La gomma vulcanizzata è resistente alle abrasioni, impermeabile ai gas, alle azioni chimiche, al calore ed all'elettricità. Questo tipo di gomma è adatto alla produzione di battistrada per pneumatici e nastri trasportatori ed alla realizzazione di tubature che sopportino il passaggio di sostanze abrasive.

La gomma non vulcanizzata, invece, è più debole, morbida e non solubile all'acqua e viene utilizzata per produrre adesivi, isolanti e suole delle scarpe [6]. I pneumatici fuori uso rappresentano oltre l'1% dei rifiuti solidi e richiedono uno smaltimento speciale. Per

questi motivi e per alleggerire l'ambiente da materiali non biodegradabili, negli ultimi anni, si è cercato di riciclare questo tipo di materiale.

Le forme di recupero della gomma possono essere di due tipi: riutilizzo di materiale, dopo opportuno trattamento, per produrre prodotti simili a quelli di partenza o riciclaggio per produrre energia e materiali con destinazione d'uso diversa da quella originaria. Per quanto riguarda il riciclo, esistono vari procedimenti attuabili, come il trattamento termico, la pirolisi, la gassificazione.

In Italia la soluzione di riciclo più attuata consiste nella granulazione, ovvero la macinazione meccanica a temperatura ambiente, volta ad ottenere granuli e polverini di varia dimensione.

La prima fase di questo tipo di processo di riciclaggio è rappresentata dalla “stallonatura”, ossia la rimozione, attraverso specifici macchinari, dell’anello in acciaio chiamato cerchietto, posto in corrispondenza del tallone, ovvero della porzione dello pneumatico che aderisce al cerchione. Dopo la rimozione, il cerchietto viene recuperato in acciaierie e fonderie. Ultimata la stallonatura, avviene una prima fase di frantumazione eseguita con macchinari dotati di lame. Il pneumatico viene ridotto in ciabatte, ovvero frammenti di dimensioni comprese tra 5 e 40 centimetri. Le ciabatte, che contengono anche residui tessili e metallici, possono essere avviate al recupero energetico in cementifici oppure essere sottoposte alla successiva fase di riduzione delle dimensioni [7].

La seconda fase di frantumazione permette di ridurre il materiale in frammenti più piccoli e di separare le tre componenti derivanti dai PFU: acciaio, fibre tessili e gomma. Quest’ultima componente, che rappresenta il 70% circa della composizione dello pneumatico, subisce una frantumazione più spinta [4, 6, 7].

L’output di tale processo è un materiale triturato di varie dimensioni e tipologia, a seconda delle destinazioni d’uso previste:

- Cippato di gomma (dimensioni 30-50 [mm]);
- granulato di gomma (0,8-20 [mm]);
- polverino di gomma (< 0,8 [mm]);
- fibre tessili.

Il cippato di gomma, o chips, è solitamente usato come riempimento per costruzioni, drenaggi, sottofondi di pavimentazione stradale, costruzione discariche. Il granulato è utilizzato per realizzare piastrelle per pavimenti, cordoli e barriere stradali, asfalti di gomma, copertura di tetti e superfici sportive. Inoltre, è utilizzato come riempimento leggero per la costruzione di strade e dighe, per l’isolamento termico di edifici e per la costruzione di discariche. Il polverino è utilizzato, invece, per pavimentazioni sportive, rivestimenti per cavi elettrici, per costituire suole di scarpe, ricambi per auto, inchiostro,

rivestimenti e sigillanti. Spesso è adoperato nella realizzazione di strade, aggiungendolo ad un solvente per formare una sospensione in gomma. Tale prodotto è poi spruzzato per impermeabilizzare la superficie [5, 7].

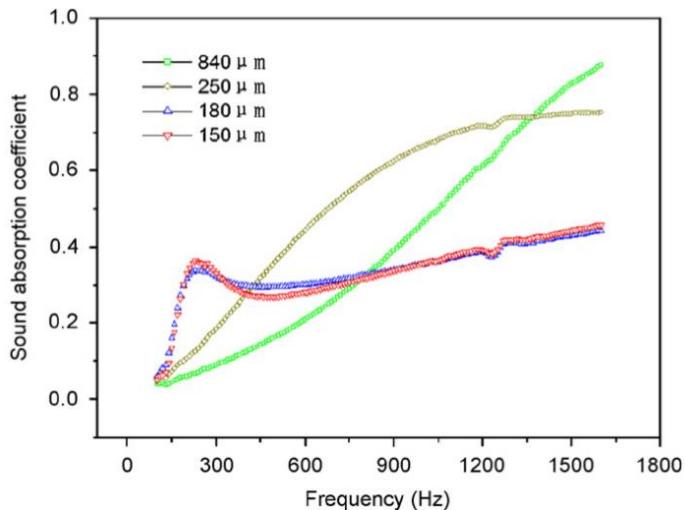
Infine, la fibra tessile ricavata dalla tritazione degli pneumatici diventa rifiuto.

Il costo medio per smaltire un singolo pneumatico risulta elevato. Si stima che si aggiri attorno ai 10 euro. Il riciclaggio completo, ovvero quello volto ad ottenere materie prime, non è attualmente possibile a causa delle difficoltà incontrate nei pretrattamenti di completa devulcanizzazione della gomma. Negli ultimi anni, si stanno affermando nuove tipologie di tritazione, come la granulazione criogenica, che avviene a bassa temperatura in azoto liquido e la granulazione attuata tramite getti d'acqua ad altissima pressione [7].

Un recente rapporto pubblicato da FISE (Federazione imprese di servizi) metti la sigla per esteso di FISE) Assoambiente ha relegato l'Italia nelle posizioni di retrovia fra le nazioni che hanno posto adeguata importanza al recupero di rifiuti ingombranti. Infatti l'Italia si pone solo al decimo posto tra le nazioni dell'UE che hanno mostrato maggior sensibilità al tema.

In Europa, ogni anno, vengono dismessi circa 3,2 milioni di tonnellate di pneumatici, mentre in Italia le tonnellate di gomma che hanno terminato la propria vita utile sono circa 450.000. Il 23% è avviato al recupero, il 25% viene bruciato e la restante parte è smaltita in discarica o trasferita all'estero [4, 7]. Nell'ultimo decennio, gli studi riguardanti la possibilità di utilizzare i pneumatici triturati per la realizzazione di pannelli fonoassorbenti sono sempre più frequenti.

Dalle prove effettuate da Zhou Hong et al. [8] su campioni di spessore di 3 cm, costituiti da granulato di gomma derivante dalla tritazione di pneumatici fuori uso, è emerso che quando le onde sonore incidono normalmente gli strati composti da granuli di diametro di centinaia di  $\mu\text{m}$ , la vibrazione delle particelle contribuisce ad attenuare l'energia sonora. In figura 4 sono mostrati i risultati ottenuti dalle prove su campioni realizzati con granuli di gomma di diverse dimensioni.



**Figura 4:** Coefficiente di assorbimento acustico relativo ad uno strato di particelle di gomma di diverse dimensioni [8]

La perdita di viscosità, dovuta all'attrito tra particelle ed aria e tra particella e particella, spiega i migliori coefficienti di assorbimento ottenuti alle basse frequenze per gli strati composti da granuli di dimensioni minori. Inoltre, le particelle di piccolissimo diametro mostrano un alto coefficiente di riflessione, al contrario delle particelle più larghe, che alle basse frequenze presentano bassi coefficienti di assorbimento e riflessione. Lo stesso studio ha osservato come l'abbinamento di uno strato di schiuma poliuretanica ad uno di gomma produca solo un lieve miglioramento del coefficiente di assorbimento a tutte le frequenze. Sono più rilevanti, invece, i risultati ottenuti utilizzando campioni con una struttura a doppio strato di particelle di gomma e pannelli perforati di spessore 3 mm, con dimensione dei pori di 5 mm e porosità del 4,75%.

I risultati sul coefficiente di assorbimento acustico hanno mostrato che l'accoppiamento con pannelli perforati non produce effetti per i campioni di particelle di gomma di dimensioni più piccole, mentre migliora il coefficiente di assorbimento per i campioni con particelle di gomma di dimensioni maggiori. In altri studi, condotti da Maderuelo-Sanz ed Asdrubali et al. [9, 10], sono stati analizzati campioni composti dallo stesso tipo di granuli in gomma, sciolti e consolidati e da fibre tessili. Questi studi hanno anche valutato i contributi di vari parametri nei confronti del coefficiente di assorbimento. Le prove hanno confermato che il coefficiente di assorbimento, in genere, è direttamente proporzionale allo spessore del campione, poiché influisce sulle proprietà non acustiche come la resistenza al flusso, che cresce con lo spessore.

Altri fattori che influenzano il coefficiente di assorbimento e, quindi, le proprietà non acustiche sono la dimensione dei granuli, il grado di compattazione e la percentuale di legante.

Dalle prove effettuate emerge che il coefficiente di assorbimento, solitamente, decresce aumentando le dimensioni dei granuli di gomma. Per questo motivo, alti coefficienti di assorbimento sono ottenibili con granuli di diametro di circa 1 mm. Una maggiore granulometria, infatti, comporta la riduzione della resistenza al flusso del campione. In particolare, fra le dimensioni di granuli disponibili dal processo di macinazione dei pneumatici fuori uso, quelle che sembrano più appropriate per formare dei campioni sono quelle che vanno da 1 mm, migliori prestazioni in termini acustici, a 3 mm. Si evidenzia che minore è il diametro dei granuli, maggiore è il loro costo.

La porosità dei granuli sciolta di gomma, circa 60%, non è influenzata dalla dimensione dei granuli e lo stesso vale per granuli di gomma consolidata, per i quali la porosità è, tuttavia, molto dipendente da un altro fattore: il grado di compattazione. Infatti, tale proprietà si riduce di circa il 50%, rispetto a quella dei granuli scolti gomma, se il grado di compattazione è maggiore del 40%. Il grado di compattazione influenza anche la resistenza al flusso, che cresce per percentuali sempre più alte, a partire da gradi di compattazione del 15%. Al crescere di questo parametro, cresce anche la tortuosità. Ciò fa slittare le curve dell'andamento del coefficiente di assorbimento verso le basse frequenze. Questo fenomeno provoca la riduzione del coefficiente di assorbimento per granuli di piccole dimensioni, soprattutto tra i 2.000 e i 6.000 Hz.

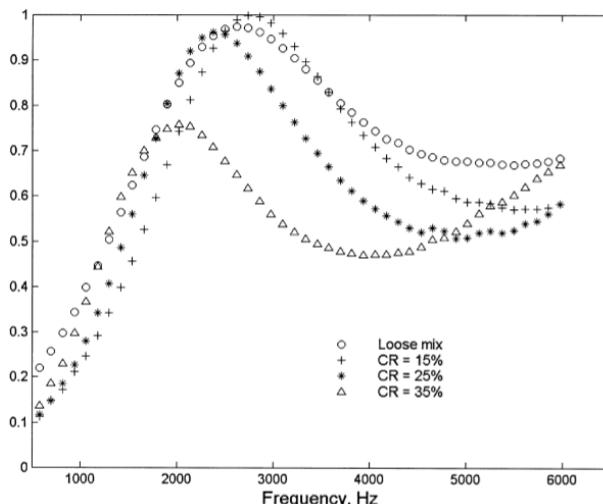
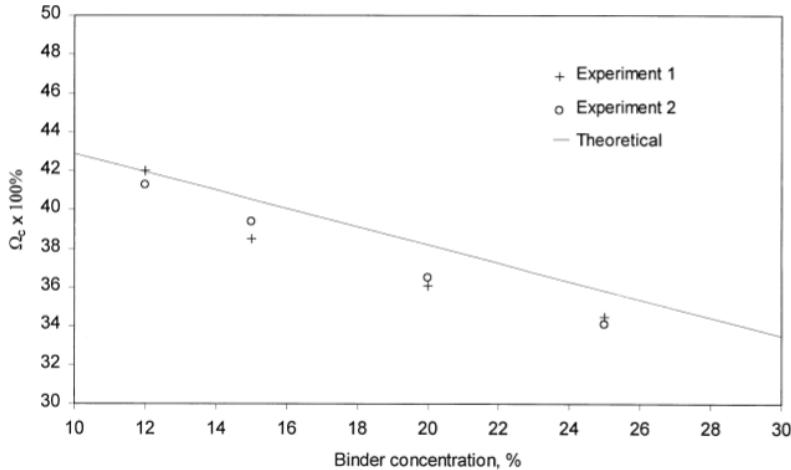


Figura 5: Coefficiente di assorbimento del campione per diversi gradi di consolidazione [11]

Si è notato che i valori ottimali del grado di compattazione, per granuli di medio diametro (1-2 mm), si trovano fra il 15 e il 25 %, poiché corrispondenti ad alte resistenze al flusso e bassi valori di porosità. Si riporta in figura 5 l'andamento del coefficiente di assorbimento, in funzione del grado di compattazione, ottenuto da uno studio condotto da K. Horoshenkov et al. [11].

Mantenendo costante il grado di compattazione, un altro parametro che influisce sulle proprietà non acustiche è la concentrazione di legante. Infatti, al crescere della concentrazione di legante cresce la resistenza al flusso. Questa proprietà influenza, invece, negativamente tortuosità e porosità, riducendo anche il coefficiente di assorbimento del campione; tuttavia, alte concentrazioni di legante migliorano le proprietà meccaniche del campione. Come dimostra la figura 6, la dipendenza fra percentuale di legante e porosità è quasi lineare [11].



**Figura 6: Dipendenza della porosità dalla percentuale di legante [11]**

La concentrazione ottimale di legante si trova fra il 10 % e il 20 %. Questa percentuale si abbassa per granuli più piccoli. Un buon legante deve avere bassa viscosità, affinché i granuli si leghino al meglio, e deve migliorare le proprietà meccaniche del campione rendendolo solido. Per rendere solido il campione sono necessarie concentrazioni comprese tra il 20 - 50 %, ma alti valori influenzano negativamente le prestazioni in termini di assorbimento, riducono la porosità ed aumentano i costi. Le tipologie di legante più utilizzate per la composizione dei campioni di granuli di gomma sono a base di resine poliuretaniche ed epossidiche.

Uno studio condotto da Asdrubali, Baldinelli, D'Alessandro [10], per le prove sui campioni di granuli di gomma, ha scelto proprio queste due tipologie di legante a bassa viscosità.

Anche lo studio effettuato da Maderuelo-Sanz et al. [12] si è posto come obiettivo la valutazione dell'influenza del legante sul fonoassorbimento. Sono stati realizzati dei campioni costituiti da granuli di gomma di pneumatici di varie dimensioni, da fibra tessile di scarto e da un legante a base di poliuretano espanso. Tali campioni sono stati confrontati con altri costituiti da granuli di gomma abbinati a diversi materiali, come vermiculite e malta cementizia. I campioni che hanno mostrato le migliori caratteristiche fonoassorbenti sono risultati quelli composti di soli granuli di gomma e legante.

In definitiva, dagli studi si evince che la consolidazione dei granuli comporta un miglioramento del coefficiente di assorbimento, soprattutto perché provoca l'aumento della resistenza al flusso. I migliori risultati, in termini di assorbimento, sono stati ottenuti dalle prove sui campioni realizzati con granuli di granulometria 0,71 - 1 mm, concentrazione di legante del 15% e grado di consolidazione del 20%.

I materiali commerciali realizzati con gomma riciclata sono caratterizzati da una conducibilità termica tra 0,100 e 0,140 W/mK [13]. Valori più bassi vengono registrati per materiali in gomma vergine od in combinazione con altri materiali.

Sono state inoltre valutate le prestazioni termiche di campioni di rifiuti elastomerici [14]. I materiali caratterizzati da una porosità aperta hanno le migliori proprietà di assorbimento acustico (coefficiente di assorbimento acustico superiore a 0,5 per frequenze oltre 500 Hz), ma anche valori di conducibilità termica elevata (1 W/mK); al contrario per campioni aventi una porosità minore si riscontrano basse conducibilità termiche 0,034 W/ mK, ma sono inefficaci a fini acustici. [15]

## 1.2 Sughero

Il sughero è un tessuto vegetale che si ricava dall'estrazione della corteccia della quercia da sughero. Le principali aree di diffusione dell'albero da sughero sono la Sardegna, il Portogallo de altre regioni che si affacciano sul Mar Mediterraneo. Attualmente, sono sfruttati solo circa 20.000 km<sup>2</sup> dei 36.000 km<sup>2</sup> esistenti [16].

Questo materiale, grazie alle sue particolari caratteristiche viene utilizzato spesso per la produzione dei tappi di vino e nell'industria calzaturiera. L'industria dei tappi per vini costituisce il 70% del mercato mondiale del sughero, che rappresenta il miglior materiale per conservare le caratteristiche organolettiche del vino [17]. Ogni anno vengono prodotti circa 20 miliardi di tappi in sughero. Questo numero è in diminuzione in favore dei meno

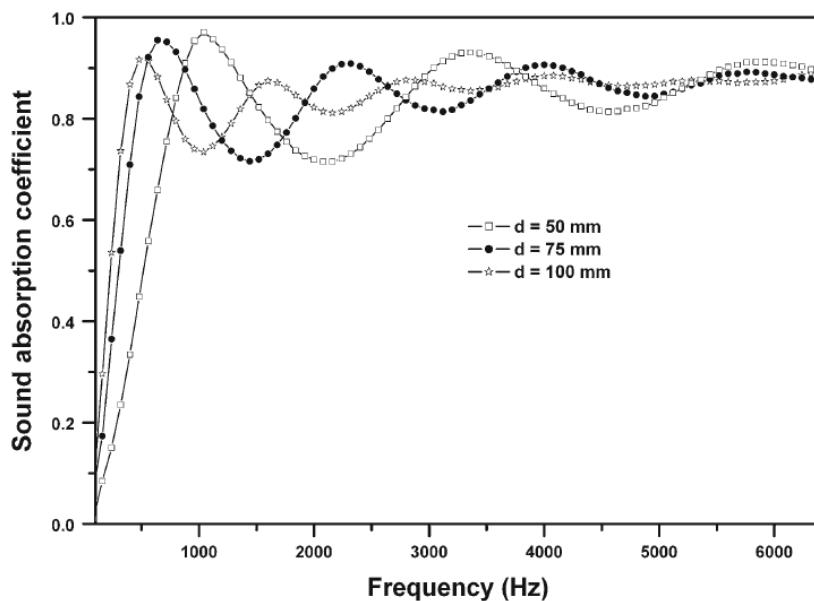
costosi tappi sintetici. Per promuovere la qualità e sostenere il mercato del tappo in sughero di pregio, è stata introdotta la Certificazione di Qualità FSC (Forest Stewardship Council) [18].

Il suo riciclo è ritenuto un processo lento, dispendioso e di difficile programmazione [17, 18, 19, 20]. L'Italia, pur essendo fra i maggiori paesi produttori di vino, non dimostra molta attenzione al recupero dei tappi di sughero. Nel nostro Paese ogni anno vengono gettati nella spazzatura 800 milioni di tappi in sughero. Il suo riciclo riguarda soprattutto i tappi di bottiglia ed è di recente attuazione [19, 21, 22]. Inoltre, negli ultimi anni, in molte regioni italiane sono stati istituiti, dalle grandi aziende produttrici di sughero e tappi, un gran numero di punti di raccolta.

Il processo di riciclaggio, solitamente, prevede che il tappo venga opportunamente trattato e, successivamente, tritato in granuli. I tappi, principale prodotto del sughero, sono biodegradabili e, grazie alle loro caratteristiche, si prestano al riciclo per produrre oggetti di diversa natura, quali pannelli fonoassorbenti, termoisolanti, componenti per calzature, prodotti per la bioedilizia [17, 21, 22].

Anche sul sughero sono stati effettuati studi aventi come obiettivo il suo possibile utilizzo in campo acustico. Da alcune prove svolte [23] su campioni costituiti da granuli di sughero sciolto, si evince che questo materiale possiede buone caratteristiche fonoassorbenti e possiede bassa conducibilità termica e bassa densità. A mostrare i migliori risultati in termini di assorbimento sono i granuli di piccole dimensioni. La dimensione ottimale è pari a 1 mm e la tortuosità relativa a tale dimensione è pari a 1,65.

Si riporta in figura 7 l'andamento del coefficiente di assorbimento relativo a campioni di diverso spessore costituiti da granuli di sughero sciolto.



**Figura 7:** Coefficiente di assorbimento di campioni realizzati con granuli di sughero di diversa dimensione [23]

I granuli di sughero bianco sciolto sono ricavabili da tappi di vino, champagne ed altre bevande.

Come i granuli di gomma, anche i granuli di sughero consolidati portano, in termini di fonoassorbimento, a risultati migliori rispetto a quelli sciolti.

Vasconcelos et al. [24] hanno evidenziato la buona compatibilità tra sughero e gesso. In edilizia è stata proposta l'unione dei due materiali per la costruzione di blocchi per la realizzazione di muri divisorii interni.

Le prove effettuate da Vasile et al. [25] su un provino composto da uno strato di sughero di spessore di 3 mm, da uno strato di particelle provenienti dalla tritazione di pneumatici (diametro di 1 - 3 mm) e da un legante poliuretanico (15 %), hanno mostrato le differenze tra i valori del coefficiente di assorbimento ottenuti cambiando il lato di misurazione.

I risultati evidenziano che solo per basse frequenze può essere conveniente porre come strato superficiale quello di sughero. Infatti, in genere, le particolari proprietà della gomma, come resistenza al flusso, tortuosità e porosità, portano ad ottenere valori di impedenza superficiale maggiori.

Ciò determina valori del coefficiente di assorbimento ad incidenza normale più elevati alle medie ed alte frequenze ed a preferire l'assunzione dello strato di gomma come superficiale.

Il sughero possiede oltretutto particolari caratteristiche che lo rendono interessante: ha una bassa conducibilità termica, è resistente alle abrasioni, è idrorepellente, imputrescibile, inalterabile nel tempo nelle sue caratteristiche isolanti, non è tossico, non emana polveri nocive, è inattaccabile da insetti e roditori, non si sgretola con il tempo, non necessita protezione da guaine, è resistente al fuoco, impermeabile, leggero [19, 20].

Esso può essere compresso fino a circa la metà del suo spessore senza perdere flessibilità e riprendere la forma iniziale una volta terminata la compressione. Inoltre è biodegradabile, non emette alcun gas nocivo quando brucia ed è ipoallergenico, poiché non assorbe la polvere.

La sua conducibilità termica è compresa tra 0,037 e 0,050 W/mK [26, 27, 28], la densità tra 110 e 170 kg/ <sup>3</sup>, mentre il calore specifico è compreso tra 1,5 e 1,7 kJ/kgK. Questo materiale è commercializzato in pannelli, strisce, sciolto o aggiunti al gesso, ed è in grado di essere facilmente riciclato.

### **1.3 Carta da macero e cellulosa**

Data la grande quantità di carta utilizzata nel mondo, circa 300 milioni di tonnellate l'anno, il riciclo di questo materiale costituisce un'importante soluzione per evitare il disboscamento delle foreste e l'incremento dell'inquinamento nelle discariche.

La cellulosa [29] anche se prodotta in pannelli e tappetini, è più ampiamente commercializzata come materiale sciolto da insufflare nelle cavità delle pareti. Essa è caratterizzata da una conduttività termica tra 0,037 e 0,042 W/mK, una densità compresa tra 30 e 80 kg / m<sup>3</sup> ed un calore specifico tra 1,3 e 1,6 kJ/kgK. La qualità della carta da giornale può influire sulle prestazioni termiche del materiale [30].

Per quanto riguarda le prestazioni acustiche, se vengono utilizzati pannelli, la loro elasticità consente l'utilizzo come materiali resilienti in pavimenti flottanti, mentre la porosità è adeguata per l'assorbimento acustico e l'isolamento cavità.

Le prove effettuate da Yeon et al. [31] su campioni costituiti da materiali provenienti dal riciclo della carta hanno fornito un valore del coefficiente NRC di 0,75.

Ulteriori dettagli sulle proprietà acustiche di materiali cellulosici sono raccolti brevemente [32]. Questi materiali non devono essere compressi dopo l'operazione di soffiaggio per evitare diminuzioni indesiderate in proprietà di isolamento.

Takano et al. [33] hanno constatato che il passaggio dalla lana di roccia alla fibra di cellulosa potrebbe ridurre le emissioni di gas serra del 15%. Allo stesso modo [34] hanno studiato l'influenza di diversi materiali isolanti sull'energia primaria e le emissioni di CO<sub>2</sub> di un edificio residenziale multipiano ed hanno riscontrato che l'utilizzo della carta provoca una riduzione dell'energia globale del 6% e 7% e una diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dalla produzione materiale del 6% e 8%, a seconda degli standard utilizzati.

## 1.4 Lolla di riso

La lolla di riso è l'insieme dei gusci dei chicchi di riso. Essa è uno scarto derivante dalla fase di sbramatura del risone, ovvero il riso grezzo dopo la trebbiatura. Nel mondo ci sono circa 165 milioni di ettari di coltivazioni di riso. Ciò comporta che ogni anno vengano prodotte circa 250 milioni di tonnellate di lolla, di cui 270.000 in Italia, che risulta essere il Paese maggior produttore di riso in Europa [35].

Spesso la lolla di riso, se non bruciata nelle campagne, è utilizzata per realizzare lettieri negli allevamenti, ma ultimamente si è cercato di valorizzare le sue caratteristiche e di ampliarne il campo di utilizzo. Grazie al suo potere calorifico di 14 MJ/Kg la lolla viene utilizzata come combustibile nei motori diesel o in impianti di cogenerazione, spesso nelle stesse risaie in cui viene prodotta [36]. Il residuo della combustione è spesso impiegato come isolante nelle acciaierie.

Un altro impiego di questo materiale è il suo uso come materia prima per la produzione del nylon, di alcune resine e del furfurolo, un solvente utilizzato nella produzione della gomma.

A partire dall'anno 2006, la lolla è liberamente commercializzata. Essa è sempre più utilizzata nel settore del vivaismo. È ricca di alcuni minerali, come potassio e silicio e sembra avere un effetto di protezione della pianta dagli agenti patogeni, come funghi ed insetti. Inoltre, le sue caratteristiche la rendono idonea per la realizzazione di vasi biodegradabili [37].

Ultimamente, Goodyear ha pensato di sfruttare le caratteristiche di questo materiale per produrre pneumatici. Infatti, l'azienda ha pensato di ottenere la silice necessaria alla produzione degli pneumatici dalla cenere di lolla. La silice è utilizzata nei pneumatici ad alte prestazioni per migliorare il risparmio del carburante e l'aderenza sul bagnato. Produrre silice dalla lolla permette un risparmio in termini di energia utilizzata [38].

Da un recente studio condotto da Ramasamy et al. [39], è emerso che la stabilità della schiuma di lattice aumenta incorporando la polvere di gusci di riso.

La lolla di riso è, inoltre, insolubile in acqua, resistente all'abrasione e presenta buone caratteristiche assorbenti. Queste caratteristiche hanno portato ad introdurre questa risorsa nel campo del trattamento delle acque reflue, in particolare, come alternativa al carbone attivo nei processi di filtrazione per la rimozione di vari inquinanti [36].

Yarbrough et al. [40] ha valutato le prestazioni di isolamento termico della lolla di riso, un importante sottoprodotto della coltivazione del riso.

Il coefficiente di assorbimento acustico di campioni realizzati con l'unione di tre materiali, riso, paglia e legno è stato misurato in camera riverberante mostrando coefficienti di assorbimento acustico superiori a quelli ottenuti per pannelli truciolari, di fibra e multistrato [41]. Paglia e lolla di riso sono stati inoltre investigati [42-43].

Come la lolla di riso, anche i materiali di scarto derivanti da pannocchie, semi di lino e agave americana hanno suscitato l'interesse degli studiosi nella ricerca di materiali ecosostenibili. Questi e altri scarti vegetali sono utilizzati per la produzione di strutture di supporto in vari settori o come componenti di pannelli, ad esempio, della portiera dell'auto. Nell'ottica della riduzione dell'impatto ambientale e di un'intelligente gestione delle risorse, in alcuni Paesi, questo materiale è utilizzato come combustibile.

Tali materiali uniti con matrici di polietilene, sia a bassa che ad alta densità, presentano buona resistenza a flessione, come dimostrato dallo studio condotto da T. Thamae, R. Marien, L. Chong [44].

## 1.5 Fibre vegetali ed animali

Fra gli scarti tessili, una tipologia che presenta buone caratteristiche fonoassorbenti e isolanti è rappresentata dagli scarti di fibra di lana. Le fibre di lana potrebbero rappresentare un'alternativa ecosostenibile alla fibra di vetro, materiale largamente utilizzato in edilizia, che presenta, tuttavia, proprietà cancerogene. I vantaggi derivanti dall'uso della lana sono l'assenza di tossicità, il basso costo, il basso consumo di energia per la produzione, la minor produzione di anidride carbonica.

Patnaik et al. [45] hanno effettuato prove volte a verificare le capacità termiche e acustiche della fibra di lana. A causa della non facile reperibilità di tale tipologia di scarti, i campioni realizzati per le prove sono stati ottenuti unendo le fibre di lana, provenienti da due distinte razze di pecore, a fibre di poliestere riciclato (RPET) in rapporto 50:50. Il principale problema della lana è rappresentato dalla suscettibilità all'umidità, che può portare a cadute di rendimento. La conducibilità termica testata è pari a circa 0.038 - 0.054 W/mK [46]

Tra i materiali naturali maggiormente diffusi e investigati negli anni c'è il Kenaf. [47-48] La fibra di Kenaf [49] è ottenuta dalla *cannabinus hibiscus*, una pianta a crescita rapida in grado di raggiungere i 3,5 m di altezza in 2 anni. Il coefficiente di assorbimento acustico di alcuni campioni realizzati con il kenaf risultano avere un coefficiente di assorbimento maggiore di 0,2 per frequenze superiori a 500Hz e oltre 0,4 per frequenze superiori a 1000 Hz.

I valori di conducibilità termica si aggirano intorno a 0.034–0.043 (W/m K) [50] aventi densità comprese tra 30–180 (kg/ m<sup>3</sup>)

La fibra di cocco è uno dei più importanti rifiuti agricoli in Malesia. Le fibre sono ottenuti dal mesocarpo di bucce di cocco (circa 80 g di fibre per ogni noce di cocco) trattati per rimuovere i loro componenti organici putrescibili.

Un'analisi dettagliata delle proprietà acustiche dei materiali in fibra a base di cocco è riportato in [51-52]. misure sperimentali in tubo di impedenza sono condotti per validare i risultati analitici. I risultati mostrano che la fibra di cocco fresco ha un coefficiente di assorbimento medio di 0,8 a f> 1360 Hz e spessore di 20 mm. Aumentando lo spessore migliora l'assorbimento del suono in frequenze più basse, avendo la stessa media al f> 578 Hz e 45 mm di spessore.

I valori di conducibilità termica di questo materiale sono compresi tra 0.040–0.045 (W/m K) [53] aventi densità comprese tra 75–125 (kg/ m<sup>3</sup>).

La pianta da cui si produce la fibra di juta viene coltivata principalmente in India e in Bangladesh così il trasporto incide profondamente sull'impatto ambientale connesso all'uso di questo materiale. Tuttavia l'elasticità delle fibre li rende adatti per essere utilizzati come materiali resilienti in pavimenti flottanti, che è il suo uso commerciale più comune. Un caso studio viene presentato sul controllo del rumore di una asciugatrice domestica, dove è stata rilevata una riduzione di rumore pari a 6 dB [54-55].

La conducibilità termica dei materiali commerciali in juta è compresa tra 0,038 e 0,055 W/mK, mentre la rigidità dinamica è simile a quella dei composti in canapa [56]. Inoltre, Korjenic et al. hanno misurato una conducibilità termica di 0,046 W/mK per un campione di tessuto di juta, e un legante sintetico, caratterizzato da una densità di 26 kg/m<sup>3</sup> [57].

## **1.6 Scarti vegetali**

Le canne utilizzate nel settore delle costruzioni sono principalmente ottenute da *Phragmitesaustralis*. Il coefficiente di assorbimento acustico di canne è stato studiato in dettaglio da Chilekwa et al., che ha valutato l'influenza della configurazione delle stesse sulle prestazioni di alcuni campioni, utilizzando il metodo del tubo di impedenza. I

campioni in cui le canne sono disposte ortogonalmente al suono incidente sono stati caratterizzati da un coefficiente di assorbimento superiore a 0,5 per tutte le frequenze superiori a 300 Hz. Le buone proprietà acustiche sono state confermate anche dai test realizzati in camera riverberante con campioni di dimensioni di 12 m<sup>2</sup> [58- 59].

Altri studi [60] mostrano che campioni realizzati mediante pressatura di paglia e canne (orientate parallelamente alla trasmissione del suono) sono adatti per l'isolamento acustico alle basse frequenze.

La canna da zucchero è uno dei più importanti residui della produzione di zucchero ed è attualmente gestito principalmente come rifiuto. In recenti studi di Doost-Hoseini et al. [61] i campioni analizzati caratterizzati da densità diverse, in tutti i casi hanno prodotto un coefficiente di assorbimento superiore a 0,5 per frequenze superiori a 1000 Hz, mediante il metodo del tubo di impedenza.

Altri materiali di natura cellulosica, che hanno suscitato l'interesse degli studiosi nel campo dell'isolamento acustico e termico, sono quelli provenienti dalla corteccia di alcuni tipi di alberi. L'uso di fibre cellulosiche è un'alternativa eco-sostenibile per il rinforzo di alcune matrici, grazie soprattutto alla bassa densità, alle buone proprietà meccaniche e al basso costo.

I materiali di scarto lignocellulosici, come la farina di legno, abbinati a gomma naturale, hanno trovato impiego in edilizia. Questi scarti, infatti, forniscono alla gomma maggiore rigidezza e migliori caratteristiche termiche [62].

È stato provato che la schiuma di tannino, ricavata dal pino marittimo e dal Quebracho garantisce un buon isolamento e assorbimento acustico alle medie e alte frequenze (> 1000 Hz). Questo materiale possiede alta porosità e bassa tortuosità [63].

La lavorazione del caffè, dal campo alla tazzina, genera una notevole quantità di scarti, come la polpa del frutto, il pericarpo, il pergamino, la pellicola argentea e i residui d'estrazione. Tra i vari scarti della lavorazione del caffè merita una particolare attenzione la pellicola argentea, o “silverskin”, poiché, una volta essiccata, mantiene a lungo le sue caratteristiche. Nell'ottica della riduzione dell'impatto ambientale e di un'intelligente gestione delle risorse, in alcuni Paesi, questo materiale è utilizzato come combustibile [64, 65].

## Bibliografia

- [1] D.Lgs 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale”; [www.camera.it](http://www.camera.it);
- [2] ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Rapporto Rifiuti Urbani; Edizione 2015; ottobre/2015 n°230;
- [3] Certiquality - DT 55 01. Documento tecnico per la certificazione di prodotto relativa a semilavorati e prodotti per l'edilizia con percentuale dichiarata di materiale riciclato (2011);
- [4] Certiquality - DT 55 01. Documento tecnico per la certificazione di prodotto relativa a semilavorati e prodotti per l'edilizia con percentuale dichiarata di materiale riciclato (2011);
- [5] FISE Assoambiente – Rapporto ARGO 2001 sui pneumatici usati; Ed. 2001;
- [6] D.M 11 aprile 2011, n. 82 “Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso (pfu)”; [www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it);
- [7] M. Bergonzoni - Valorizzazione dei pneumatici fuori uso (PFU) attraverso il recupero e riciclaggio per la produzione di prodotti innovativi; Tesi di Dottorato Università degli Studi di Ferrara, 2009;
- [8] Zhou Hong, Li Bo, Huang Guansu, He Jia - A novel composite sound absorber with recycled rubber particles, Journal of Sound and Vibrations, 304 (2007) 400-406;
- [9] R. Maderuelo-Sanz, M. Martin-Castizo, R. Vilchez-Gomez; The performance of resilient layer made from recycled fluff for impact noise reduction; Applied Acoustics 72 (2011) 823-828;
- [10]F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. D'Alessandro – Evaluation of the acoustic properties of materials made from recycled tyre granulates; Inter-noise (28-31 august 2007, Istanbul);
- [11]K.V Horoshenkov, M.J. Swift – The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates; Applied Acoustics 62 (2001) 665-690;
- [12]R. Maderuelo-Sanz, A. Nadal-Gisbert, J. Crespo-Amoros, F. Parrez-Garcia – A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires; Applied Acoustics 73 (2012) 402-408;
  
- [13] Asdrubali F, Baldinelli G, D'Alessandro F, Schiavoni S, Kenny JM, Iannoni A. Manufacturing process optimization of resilient materials made from recycled tyre granules. In: Proceedings of 16th International Congress on Sound and Vibration 2009. Krakow, Poland;

- [14] Benkreira H, Khan A, Horoshenkov KV. Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *ChemEng Sci* 2011;66: 4157–71;
- [15] Asdrubali F, D'Alessandro F. Impact sound insulation and viscoelastic properties of resilient materials made from recycled tyre granules. *Int J AcoustVib* 2011;16(3):119–25;
- [16] L.Berti – Le querce da sughero patrimonio di Sardegna; 50&Più n.10, ottobre 2009;
- [17] [www.amiavr.it](http://www.amiavr.it);
- [18] [www.puntosugheri.it](http://www.puntosugheri.it);
- [19] [www.sugherosardo.it](http://www.sugherosardo.it);
- [20] [www.amorim.com](http://www.amorim.com);
- [21] [www.artimestieri.it](http://www.artimestieri.it);
- [22] [www.abracciaaperte.it](http://www.abracciaaperte.it);
- [23] R. Manderulo-Sanz, J.R. Barrigon-Morillas, V. Gomez Escobar – Acoustical performance of loose cork granulates; *Eur. J. Wood Prod* 72 (2014) 321-330;
- [24] G. Vasconcelos, P.B Lourenco, A. Camoes, A. Martins, S. Cunha – Evaluation of the performance of recycled textile fibres in the mechanical behaviour of a gypsum and cork composite material; *Cement and Concrete Composites* 58 (2015) 29-39;
- [25] A. E. Tiuc, O. Vasile, T. Gabor – Department Environmental Engineering and Sustainable Development Entrepreneurship, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, Department of Mechanics Politehnica of Bucharest, Romania – Determination of antivibrational and acoustical properties of some materials made from recycled rubber particles and sawdust; *RJAV* vol. XI issue 1/2014;
- [26] Gil L. New cork-based materials and applications. *Materials* 2015;8:625–37;
- [27] Maaloufa Y, Mounir S, Khabbazi A, Kettar J, Khaldoun A. Thermal characterizationof materials based on clay and granular: cork or expanded perlite. *Energy Procedia* 2015; 74 : 1150–61;

- [28] Limam A, Zerizer A, Quenard D, Sallee H, Chenak A. Experimental thermalcharacterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and theircomposites) for building insulation. Energy Build 2016; 116: 89–95;
- [29] Hurtado PL, Rouilly A, Vandenbossche V, Raynaud C. A review on the properties of cellulose fibre insulation. Build Environ 2016; 96: 170–7.
- [30] Kwon YC, Yarbrough DW. A comparison of Korean cellulose insulation with cellulose insulation manufactured in the United States of America. J Build Phys 2004;27(3):185–97;
- [31] J. Yeon, K. Kim, K. Yang, J. Kim, M. Kim – Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper; Costruction and Building Materials 70 (2014) 494-500;
- [32] Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov KV. Review of sustainable materials for acoustic applications. J Build Acoust 2012;19(4):283–312;
- [33] A. Takano, M. Hughes, S. Winter, A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: a case study in a Finnish context, Build. Environ. 82 (2014) 526-535;
- [34] U.Y.A. Tettey, A. Dodoo, L. Gustavsson, Effects of different insulation materialson primary energy and CO<sub>2</sub> emission of a multi-storey residential building,Energy Build. 82 (2014) 369-377;
- [35] [www.agromil.it](http://www.agromil.it);
- [36] K.Y. Foo, B.H. Hameed – Utilization of rice husk ash as novel adsorbent: a judicious recycling of the colloidal agricultural waste; Advances in Colloid and Interface Science 152 (2009) 39-47;
- [37] [www.greennews.info](http://www.greennews.info);
- [38] [www.rinnovabili.it](http://www.rinnovabili.it);
- [39] S. Ramasamy, H. Ismail, Y.Munusamy – Effect of rice husk powder on compression behavior and thermal stability of natural rubber latex foam (2012);
- [40] D.W. Yarbrough, K.E. Wikes, P.A. Olivier, R.S. Graves, A. Vohra, Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells, Therm. Cond. 27 (2005) 222–230;
- [41] H.-S. Yang, D.J. Kim, H.-J. Kim, Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials, Bioresour. Technol. 86 (2003) 117–121;

- 
- [42] TengkuIzhar, Tengku N, et al. "Investigation of Noise Reduction Coefficient of Organic Material as Indoor Noise Reduction Panel." *Geopolymer and Green Technology Materials*. Trans Tech Publications, (2014):317-324;
  - [43] Sakamoto, S. "Study for sound absorbing materials of biomass tubule etc. (measured result for rice straw, rice husks, and buckwheat husks *Journal of Environment and Engineering* 6(2):352-364 · January 2011;
  - [44] T. Thamae, R. Maryen, L. Chong, C. Wu, C. Baillie – Developing and characterizing new materials based on waste plastic and agro-fibre; *J Mater Sci* 43 (2008) 4057-4068;
  - [45] A. Patnaik, M. Mvubu, S. Muniyasamy, A. Botha, R. Anandjiwala – Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies; *Energy and Buildings* 92 (2015) 161-169;
  - [46] Zach J, Korjenic A, Petránek V, Hroudová J, Bednar T. Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool, *Energy Build* 2012;49:246–53;
  - [47] Zach J, Hroudova J, Brožovský J, Krejzad Z, Gailiuse A. Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. *Procedia Eng* 2013; 57: 1288–94;
  - [48] Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. Building energy performance: a LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy Build* 2008; 40: 1–10;
  - [49] Technical datasheet available at (<http://www.lacasaditerra.com/>);
  - [50] Korjenic A, Petránek V, Zach J, Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy Build* 2011; 43: 2518–23;
  - [51] HosseiniFouladi, Mohammad, et al. "Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel." *Applied acoustics* 71.3 (2010):241-249;
  - [52] Hosseini Fouladi, Mohammad, Md d Ayub, and MohdJailaniMohd Nor. "Analysis of coir fiber acoustical characteristics." *Applied acoustics* 72.1 (2011):35-42;
  - [53] S. Schiavoni , F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016) 988–1011;
  - [54] Mohanty, A R. "Noise control using green materials." *Sound and Vibration* 49.2 (2015):13-15;

- 
- [55] FassiA, Maina L.L'isolamento e coefficiente. Milano: Edizioni Ambiente; 2009 [in Italian];
  - [56] Zach J, Hroudova J. Utilization of technical hemp for thermal insulating materials production. In: Proceedings of 2nd international conference on suitable construction materials and technologies. Ancona, Italy; 2010;
  - [57] Korjenic A, Petránek V, Zach J, Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. Energy Build 2011; 43: 2518–23;
  - [58] D.J. Oldham, C. Egan, R. Cookson, Sustainable acoustic absorbers from the biomass, Appl. Acoust. 72 (2011) 350–363, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.12.009>;
  - [59] G. Iannace, L. Maffei, P. Trematerra, On the use of “green materials” for the acoustic correction of classrooms, Proceedings of Euronoise2012, Prague, Czech Rep., 2012;
  - [60] Januševičius, Tomas, JurgisMažuolis, and DonatasButkus. "Sound reduction in samples of environmentally friendly building materials and their compositions." Applied acoustics 113(2016):132-136;
  - [61] K. Doost-hoseini, H.R. Taghiyari, A. Elyasi, Correlation between sound absorptioncoefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse, Compos. Part B 58 (2014) 10–15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.011>;
  - [62] Yonghui Zhou, Mizi Fan, Lihui Chen, Jiandong Zhuang – Lignocellulosic fibre mediated rubber composites: An overview; Composites Part B 76 (2015) 180-191;
  - [63] C. Lacoste, M. C. Basso, A. Pizzi, A. Celzard, E. Ella Ebang, N. Gallon, B. Charrier – Pine (*P. pinaster*) and quebracho (*S. Lorentzii*) tanni-based foams as green acoustic absorbers; Industrial crops and Products 67 (2015) 70-73;
  - [64] Y. Narita, K. Inouye - Review on utilization and composition of coffee silver skin, Food Research International, 61 (2014) 16-22;
  - [65] [www.canaleenergia.com](http://www.canaleenergia.com);

## **Capitolo 2 Selezione dei materiali oggetto di analisi**

La prima fase di questo lavoro di tesi ha riguardato la ricerca e la selezione di materiali provenienti da riciclo e da scarto di altre lavorazioni, sia convenzionali che non convenzionali per la realizzazione di pannelli fonoassorbenti da utilizzare in edilizia.

La maggior parte della realizzazione ed assemblaggio dei campioni è stata eseguita in laboratorio, di conseguenza la materia prima era necessario avesse le seguenti caratteristiche:

- essere ampiamente disponibile;
- essere facilmente reperibile;
- essere disponibile sotto forma di granuli o parti di piccole dimensioni;
- essere facilmente maneggiabili;
- avere basso costo;

I materiali scelti per la produzione in laboratorio dei campioni sono i seguenti:

- 1) granulato di gomma e fibra tessile ottenuti da pneumatici esausti (Pfu);
- 2) granulato di sughero proveniente da sfridi di lavorazioni di tappi;
- 3) lolla di riso;
- 4) pellicola argentea di caffè;

In aggiunta, oggetto di questa tesi è stata anche la carta da macero, lavorata industrialmente dall’Agenzia Seccarta s.r.l. che ha commissionato lo studio di alcuni campioni realizzati nel proprio stabilimento, i quali presentano come base la carta da macero, accoppiata ad altri materiali provenienti da riciclo quali il TNT e scarti di fibre tessili.

### **2.1 Granulato di gomma e fibra tessile ottenuti da riciclo pneumatici fuori uso (Pfu)**

Due dei sottoprodotto derivanti dallo smaltimento degli pneumatici fuori uso (Pfu) sono:

- granulato di gomma di diverse dimensioni;
- fibra tessile.

Tali materiali sono ampiamente disponibili e facilmente reperibili presso gli stabilimenti che smaltiscono Pfu. Il suo utilizzo in campo acustico aiuterebbe anche ad alleggerire l'ambiente da materiali non biodegradabili. Inoltre, in particolare il granulato è facilmente maneggiabile ed adatto a costituire campioni di diverse dimensioni.

Il granulato di gomma adoperato in questa tesi proviene dalla ditta Tritogom [1], situata a Cherasco (CN). La Tritogom raccoglie pneumatici derivanti da varie regioni del nord Italia e li riduce a granuli di pezzatura compresa tra 0 e 4 mm. Per lo studio in esame, è stato utilizzato del granulato di gomma di dimensioni comprese tra 0,8 e 2,5 mm. Questa particolare pezzatura presenta, rispetto ad altre granulometrie, caratteristiche tali da permettere di raggiungere migliori risultati in termini di fonoassorbimento [2]. Si riportano in figura 1 e tabella 1 le caratteristiche del materiale fornito dall'azienda.



**Figura 1:** Campione di granulato di gomma 0,8-2,5 mm ricavata dallo smaltimento di Pfu

**Tabella 1:** Caratteristiche dei granuli di gomma

Parametro	Specifiche
Densità	550 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Porosità	50 %
Granulometria	0,8 – 2,5 [mm]

Oltre al granulato di gomma, è stata utilizzata la fibra tessile, che comunemente estratta, presenta percentuali variabili dal 40-60% in peso, di residui di gomma [1].

Bisogna considerare che una lavorazione di pneumatici da 18.000 Ton/aa comporta un'estrazione di tessile pari al 5% del volume, maggiorato dal residuo di un'ulteriore 5% di gomma [3].

In sostanza, occorre pagare il doppio per poter smaltire il rifiuto con gravose problematiche, anche dal punto di vista del volume. Si riporta in figura 2 l'immagine della fibra fornita dall'azienda.



**Figura 2: Campione Fibra tessile ricavata dallo smaltimento di Pfu**

## 2.2 Granulato di sughero

Anche il sughero presenta il vantaggio derivante dalla disponibilità sotto forma di granuli, è ampiamente disponibile e non presenta problemi di putrescibilità.

Il granulato di sughero utilizzato in questo studio è stato fornito dalla ditta Molinas Peppino e Figli Sugherificio S.p.a di Calangianus (OT). Il sughero viene ricavato dall'estrazione della corteccia della Quercia da sughero, che subisce un processo di macinazione per ottenere il granulato con cui vengono realizzati i tappi per il vino. Dallo sfrido di lavorazione dei tappi, sono stati ricavati i granuli utili alla realizzazione dei campioni da testare.

I granuli scelti per questo studio hanno una granulometria compresa tra 0,8 ed 1 mm, in modo da ottenere i migliori risultati in termini di assorbimento [4]. In figura 3 ed in tabella 2 sono illustrate le caratteristiche del granulato di sughero utilizzato.



**Figura 3: Campione di granulato di sughero 0,8-1 mm**

**Tabella 2: Caratteristiche del granulato di sughero**

Parametro	Specifiche
Densità	71,2 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Umidità	14 %
Conducibilità termica	0,041 [W/Mk]
Resistenza a compressione	0,88 [Kg/cm <sup>2</sup> ]
Resistenza a flessione	3,42 [Kg/cm <sup>2</sup> ]
Classe di reazione al fuoco	CLASSE 2

## 2.3 Lolla di riso

La lolla è l'involucro esterno, di colore giallo o marrone chiaro, costituita da più strati di leggere lamelle vegetali (dette glumelle) che proteggono e trattengono sulla spiga il chicco di riso. Essa è un sottoprodotto della lavorazione del riso, si ricava dal processo di sbramatura che subisce il risone (riso greggio o paddy), con il quale viene eliminato il rivestimento esterno del riso (glumelle o lolla). La lolla di riso contiene 75-90% di materia organica come la cellulosa, lignina; il resto sono componenti minerali come la silice, alcali e tracce di altri elementi [5]. Il contenuto di ciascuna di esse dipende varietà del riso, dalla composizione chimica del suolo, dalle condizioni climatiche, ed anche la

localizzazione geografica della piantagione [6]. In figura 4 viene illustrato il chicco di riso e tutte le sue parti [7].

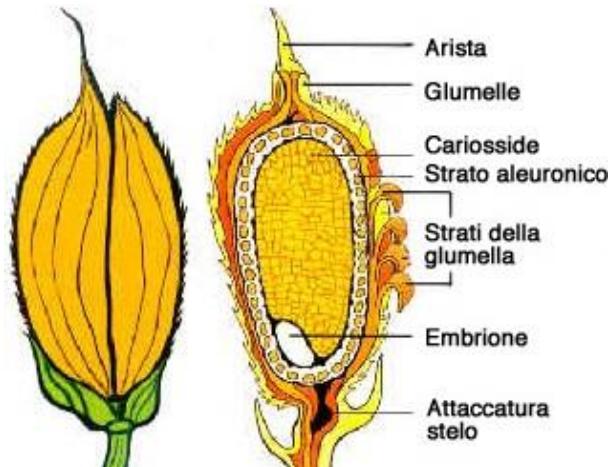


Figura 4: Chicco di riso in tutte le sue parti [7]

La lolla di riso utilizzata in questo studio è stata fornita dalla ditta Agromil Cereali di Gravellona Lomellina (PV) [8]. Tale ditta si occupa della produzione e distribuzione dei derivati di tale materiale. I gusci utilizzati hanno una lunghezza di circa 9 mm ed una larghezza di 1 mm. La figura 5 mostra la lolla di riso utilizzata in questo studio.



Figura 5: campione di lolla di riso

## 2.4 Pellicola argentea di caffè

L'elevata disponibilità di caffè in Italia, il basso costo e la volontà di sperimentare un nuovo materiale, ha indotto a scegliere di testare anche la pellicola argentea di caffè. Tra i vari scarti della lavorazione del caffè, la pellicola argentea, o “silverskin”, merita una particolare attenzione, poiché, una volta essiccata, mantiene a lungo le sue caratteristiche.

La pellicola argentea è la sottile membrana che ricopre e protegge lo strato esterno del chicco di caffè. Essa si stacca parzialmente in campo, durante l'essiccazione e la rimozione dei semi di caffè dai frutti, ed in parte durante la fase di torrefazione. Essa è costituita per circa l'80% da fibra alimentare, per il 15% da cellulosa ed emicellulosa e per il 5% da grassi e da molecole bio-funzionali, come la caffeina [9]. Questo materiale deriva dalla fase di torrefazione, durante la quale i grani di caffè sono sottoposti ad elevate temperature (fino a circa 200 [°C]), e tenuti in continua agitazione. Immediatamente dopo la tostatura, i chicchi vengono riportati a temperatura ambiente grazie a flussi d'aria ed acqua fredda vaporizzata. Il chicco torrefatto aumenta di volume, ma diminuisce di peso, soprattutto a causa della perdita di gran parte dell'acqua in esso contenuta.

La figura 6 chiarisce la posizione della pellicola argentea all'interno del chicco di caffè.

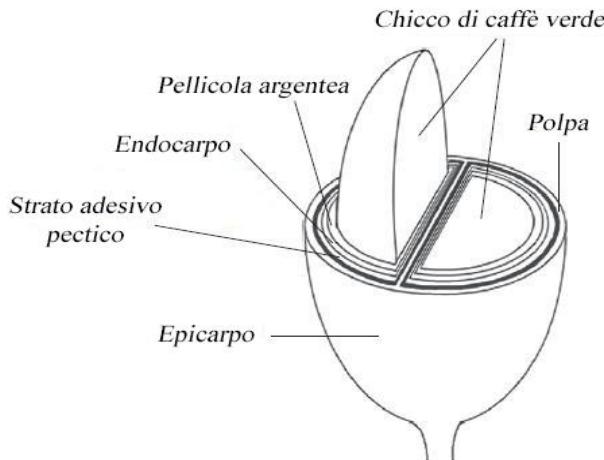


Figura 6: Sezione di un chicco di caffè

Nell'ottica della riduzione dell'impatto ambientale e di un'intelligente gestione delle risorse, in alcuni paesi, questo materiale è utilizzato come combustibile [10, 11]. La

pellicola argentea di caffè utilizzata in questa tesi è stata fornita da Caffè Janko di Pavia [12]. Tale materiale è mostrato in figura 7.



**Figura 7: Campione di pellicola argentea di caffè**

Per questo materiale non esistono dati forniti dall'azienda perché, al momento, questo scarto di lavorazione non è sul mercato, ma è per l'azienda un rifiuto da smaltire.

## 2.5 Carta da macero, TNT e fibre tessili

I materiali illustrati in questo paragrafo, diversamente da quelli esposti nei precedenti, sono stati impiegati per la produzione industriale di alcune tipologie di pannello che hanno come base carta da macero, in accoppiamento a TNT riciclato e scarti di fibre tessili.

La carta da macero può essere distinta in due categorie:

- carta da macero industriale
- carta da macero domestico

La carta da macero industriale deriva dagli scarti di produzione delle industrie. Prevalentemente si tratta di industrie cartarie od editoriali, uffici, attività commerciali e di trasporto, imballaggi ecc. Questa tipologia di macero consente di recuperare una grande quantità di carta della medesima qualità. Ciò consente di standardizzare e di ridurre notevolmente i costi di rilavorazione della materia. La raccolta della carta da macero industriale è svolta da specifiche imprese specializzate, direttamente sul luogo di produzione dello scarto.

La carta utilizzata in questo lavoro di tesi è prodotta dall'azienda Seccarta S.r.l. [13] che si occupa di fabbricazione di carta e cartone ondulato e di imballaggi di carta e cartone. L'azienda ha prodotto, industrialmente appositamente, campioni ottenuti dal riciclaggio di carta da macero, utilizzando un sistema produttivo innovativo brevettato. In figura 8 è riportata l'immagine della carta da macero triturata pronta per la produzione del pannello.



**Figura 8: Campione di carta da macero**

Non sono stati fornite dall'azienda, le caratteristiche specifiche sulla carta da macero impiegata.

Per quanto riguarda le fibre tessili impiegate per la produzione di una tipologia di pannello è stato utilizzato un materiale in commercio, Isolmix [14] che è un fonoassorbente riciclato di alta qualità. Essendo derivato da fibre di scarto (fibra di poliestere e scarti tessili) è un materiale molto economico, facilmente riutilizzabile anche in fase di smontaggio, completamente riciclabile ed atossico. Isolmix non ha bisogno nella manipolazione di alcun accorgimento perché il suo utilizzo è pulito e senza produzione di polvere. In tabella 3 sono illustrate le caratteristiche nel materiale utilizzato.

**Tabella 3: Caratteristiche morfologiche e fisico-meccaniche degli scarti tessili Isolmix**

Parametro	Unità	Specifiche
Struttura	-	Pannelli termolegati senza aggiunta di collanti
Materia prima	-	Fibre miste
Spessore	mm	20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120
Densità standard	Kg/m <sup>3</sup>	Pannelli 40; rotoli 20
Conducibilità termica	$\lambda$	0,039 UNI EN 12939 [15]
Dimensione pannelli	m	0,6x1,2 x1,4
Dimensione rotoli	m	lunghezza 5-20 secondo gli spessori
Umidità di assorbimento	Kg/m <sup>2</sup>	0,130 UNI EN 1609 [16]
Rigidità dinamica	MN/mc	6,1 UNI EN 29052 – 1 [17]
Traspirabilità al vapore H <sub>2</sub> O	$\mu$	1,7 UNI EN 12086 [18]

I fogli di Tessuto Non Tessuto utilizzati per realizzare 3 tipologie di campione prodotti, ottenuti per pressatura, provengono dall'azienda Barbiflex [19]. Sono costituiti da un feltro le cui fibre, di dimensioni molto piccole, presentano un andamento casuale e vengono pressate insieme.

## Bibliografia

- [1] <http://www.tritogom.com/>
- [2] K.V Horoshenkov, M.J. Swift, The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates, ApplAcoust 62 (2001) 665-690.
- [3] <http://www.tiresspa.com/it-it/impianto-pulitura-compattazione-fibra-tessile.aspx>
- [4] R. Manderulo-Sanz, J.R. Barrigon-Morillas, V. Gomez Escobar, Acoustical performance of loose cork granulates, Eur. J. Wood Prod 72 (2014) 321-330.
- [5] Ajay kumar, KalyaniMohanta, Devendra Kumar and Om Parkash; Properties and Industrial Applications of Rice husk: A review, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: [www.ijetae.com](http://www.ijetae.com) (ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 10,October 2012)
- [6] Madhumita Sarangi S. Bhattacharyya and R. C. BeheraRice Effect of temperature on morphology and phase transformations of nanocrystalline silica obtained from rice husk, 82: 5, 377 — 386
- [7] Franco Sannazzaro M, Valutazione di substrati alternativi alla torba: Caratterizzazione chimica, fisica ed agronomica di lolla di riso, Tesi di Dottorato in ricerca in scienze delle produzioni vegetali Ciclo XX, Università degli studi di Padova, 2008.
- [8] <http://www.agromil.it/>
- [9] Oliveira L.S., Franca A.S., Mendonca J.C.F., Barros-Junior M.C., Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans, LWT-Food Science and Technology, 39 (2006), 235-239.
- [10] Narita Y., Inoyoue K., Review on utilization and composition of coffee silverskin, Food Research International 61 (2014), 16-22
- [11] Kondamudi N., Mohapatra S.K., Misra M., Spent coffee grounds as a versatile source of green Energy, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56 (2008), 11757-11760.
- [12] <http://www.janko.it/>
- [13] <http://www.seccarta.it/>
- [14] <http://www.isolmix.com/prodotti/>
- [15] UNI EN 12939:2002 prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica per mezzo della piastra calda con anello di guardia e del metodo del termoflussimetro - Prodotti spessi con resistenza termica elevata e media.
- [16] UNI EN 1609:2013 Isolanti termici per edilizia - Determinazione dell'assorbimento d'acqua per breve periodo per immersione parziale

- [17] UNI EN 29052-1Acustica. Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.
- [18] UNI EN 12086:2013 Isolanti termici per edilizia - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo
- [19] <http://www.barbiflex.it/>



## **Capitolo 3 Analisi delle metodologie per la realizzazione di campioni da impiegare in edilizia**

Dopo aver analizzato le caratteristiche dei singoli materiali sciolti, in questo capitolo vengono illustrate le metodologie di produzione dei pannelli per il loro impiego in edilizia.

Per la realizzazione dei campioni sono state applicate due tipi di produzione:

- *In laboratorio* per i campioni realizzati con lolla di riso, pellicola argentea di caffè, granulato di gomma e granulato di sughero;
- *In stabilimento industriale* per i campioni realizzati con carta da macero, TNT riciclato e scarti di fibre tessili.

La produzione in laboratorio è stata svolta presso i locali del Dipartimento di Chimica dell'Università degli studi di Pavia. La produzione industriale è avvenuta pressi i locali della Seccarta S.r.l.

Le differenti tecniche di produzione influenzano e modificano le caratteristiche delle materie prime scelte, a ragione di ciò per confronto sono stati realizzati campioni dello stesso materiale, utilizzando almeno 2 metodologie differenti. I campioni possono essere classificati in quattro tipologie:

- *Campioni realizzati mediante l'impiego di materiale sciolto di un legante*
- *Campioni realizzati mediante l'impiego di pressa a freddo e di un legante*
- *Campioni realizzati mediante pressa a freddo*
- *Campioni realizzati mediante pressa ad elevata temperatura*

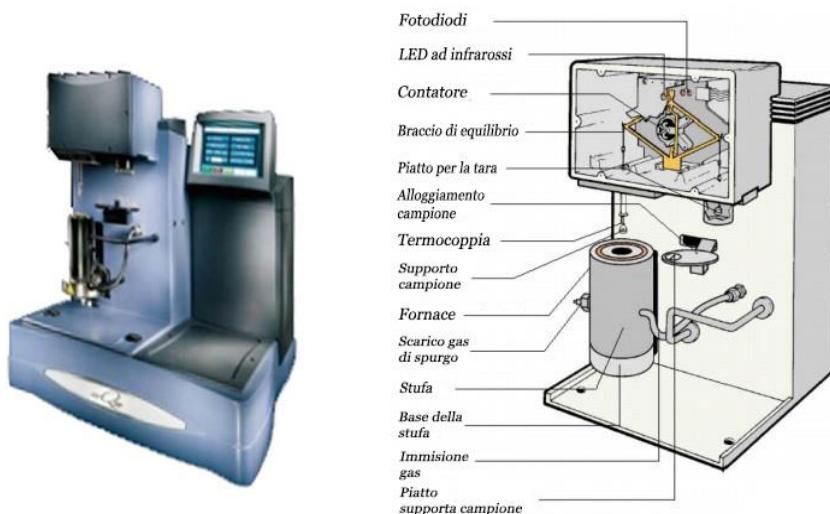
### **3.1 Prova preliminare - TGA (Thermal Gravim Analysis)**

La prova TGA (Thermal Gravim Analysis) od analisi termogravimetrica è un'analisi termica quantitativa con la quale è possibile misurare il peso di un materiale sottoposto ad un riscaldamento con crescita controllata della temperatura. Tale analisi fornisce informazioni sulla stabilità termica del campione testato e permette di conoscere il peso perso all'aumentare della temperatura, senza però fornire alcuna informazione sulla natura delle componenti [1, 2]

La strumentazione è composta dai seguenti componenti:

- bilancia analitica sensibile;
- fornace (25 – 1.000 °C);
- sistema di gas di spurgo;
- sistema di acquisizione ed elaborazione dati.

La bilancia, posta in una fornace, è connessa ad un sistema di gas di spurgo che assicura un'atmosfera controllata e la diffusione del calore in ogni punto. Il controllo dello strumento, l'acquisizione e la visualizzazione dei dati sono effettuati mediante l'uso di un elaboratore. Tale strumentazione, illustrata in figura 1, è semplice, ma delicata e necessita di un controllo e di una taratura periodica. [1, 2]



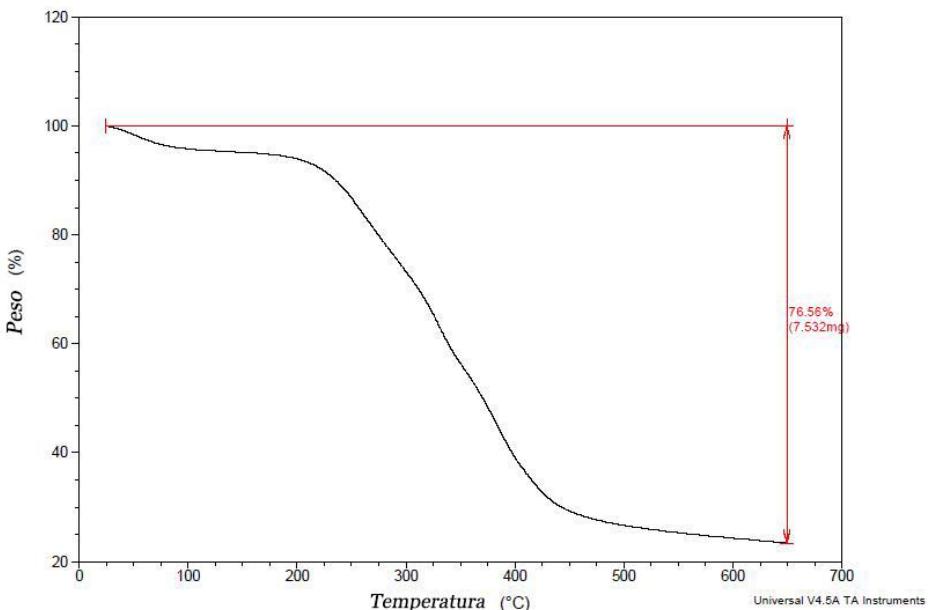
**Figura 1: Apparecchiatura per la prova TGA [2]**

L'incremento di temperatura a cui i campioni sono stati sottoposti è stato di 5 °C ogni minuto e la prova è stata svolta in atmosfera di Azoto. E' stato ritenuto indispensabile sottoporre a prova soltanto i materiali con i quali sono stati realizzati i campioni con la pressa a caldo:

- granulato di sughero;
- pellicola argentea di caffè.

### 3.1.1 Granulato di sughero

Come si evince dalla figura 2, la curva termogravimetrica del granulato di sughero, mette in evidenza che la perdita dell'acqua contenuta in questo materiale, avviene totalmente entro una temperatura di 100 °C ed in una percentuale pari a circa il 5% del peso totale iniziale. Successivamente, il materiale presenta un comportamento stabile fino a 220 °C, per poi degradarsi all'aumentare della temperatura fino a 420 °C. In totale, durante la prova, la percentuale in peso persa dal sughero è risultata essere del 77 % circa. Per tale ragione la temperatura utilizzata per la realizzazione del campione è stata tra i 140 e i 170 °.



Per confronto è stata realizzata la prova sul granulato di gomma. I risultati in figura 3 mostrano come questo materiale, durante la prova, abbia perso solo il 55% del suo peso. In particolare, la perdita d'acqua, avvenuta tutta a temperature inferiori a 180 °C, è risultata pari al 2% del peso totale del materiale testato. La degradazione del materiale testato si è verificata nell'intervallo di temperature 200 – 450 °C.

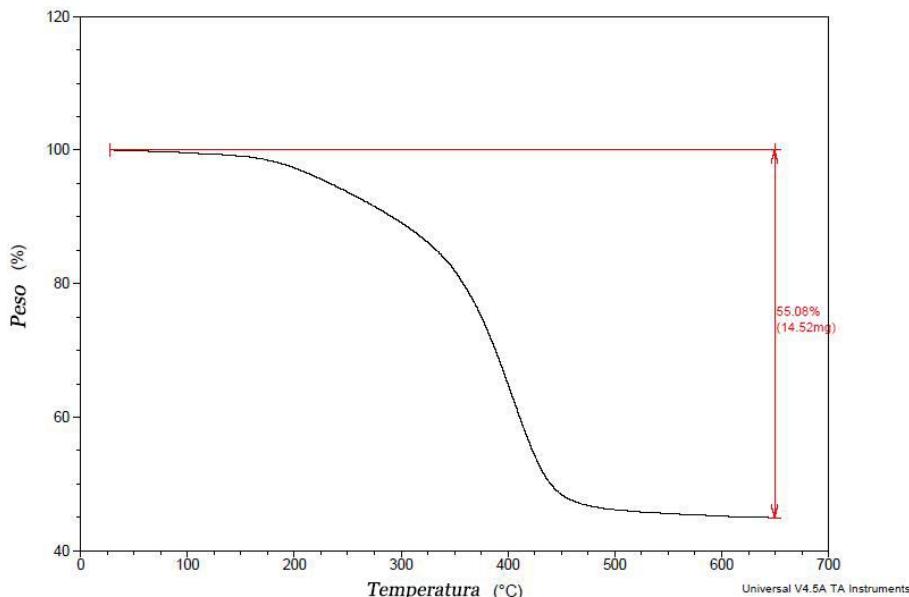


Figura 3: curva termogravimetrica granulato di gomma

### 3.1.2 Pellicola argentea di caffè

Dalla prova TGA effettuata sulla pellicola argentea di caffè, si evince che la percentuale in peso d'acqua persa da questo materiale è pari al 10%. Tale perdita avviene fino ad un aumento di temperatura di 180 °C circa. Successivamente, il materiale si degrada fino ad una temperatura di 320 °C. In totale, la percentuale in peso persa dalla pellicola argentea di caffè, durante questa prova, è risultata pari a circa il 75 % del peso iniziale del materiale. In figura 4, sono mostrati i risultati del test effettuato su questo materiale.

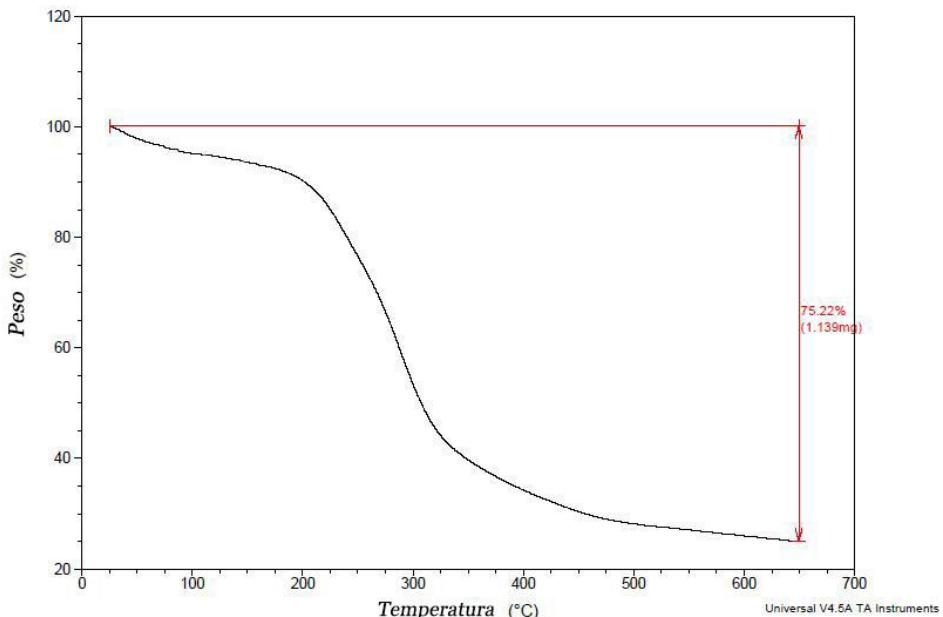


Figura 4: curva termogravimetrica pellicola argentea di caffè

E' stata confrontata la prova sulla pellicola argentea di caffè con quella della lolla di riso, in quanto anch'esso scarto di origine vegetale. Dalla figura 5, si evince che tale materiale, sottoposto ad un aumento di temperatura fino a 100 °C, perde peso a causa dell'evaporazione dell'acqua contenuta in essa. Successivamente, la lolla mantiene un comportamento stabile fino a 220 °C, per poi degradarsi completamente fino ad una temperatura di 320 °C. In totale, durante la prova, il materiale testato ha perso circa il 68% in peso. La perdita d'acqua rappresenta il 5% del totale del materiale testato.

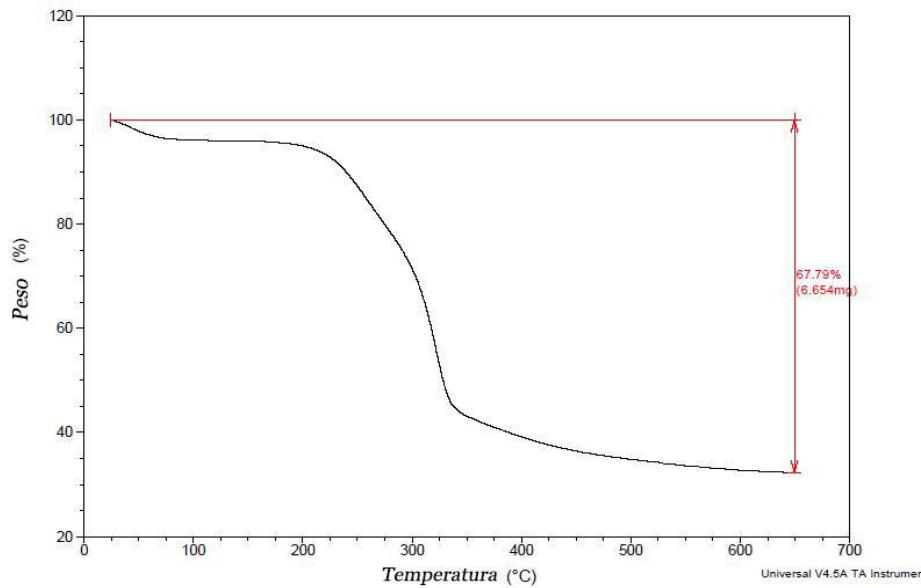


Figura 5: curva termogravimetrica lolla di riso

### 3.2 Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di materiale sciolto e legante

Per realizzare i campioni in laboratorio con il materiale sciolto e legante sono stati utilizzati dei cilindri di acciaio dotati di due piattini di chiusura, estraibili grazie a due aste filettate d'acciaio. All'interno dei cilindri, illustrati nelle figure 6a e 6b, è stata inserita una scala graduata in centimetri per permettere di conoscere in tempo reale lo spessore del materiale presente al suo interno.



**Figura 6: Cilindro di acciaio: a) diametro 100 mm, b) diametro 29 mm**

Dopo aver effettuato una serie di tentativi con colla sintetica e vinilica è stato scelto di utilizzare una colla poliuretanica per la lavorazione del granulato di gomma, granulato di sughero, pellicola argentea di caffè e lolla di riso. Con questa metodologia non è stato realizzato nessun tipo di campione con la fibra di gomma, in quanto, per sua natura, non si presta a questa modalità produttiva.

La colla a base poliuretanica utilizzata ECOSTICK 1815B, fornita dalla ditta Intercom [3], è un adesivo poliuretanico in dispersione acquosa ed è risultato il legante ideale per incollare il tipo di materiale utilizzato in questo lavoro di tesi. In particolare, questo adesivo è risultato facilmente applicabile attraverso tecnica a spruzzo ed ha consentito di ottenere i risultati desiderati con bassi dosaggi. Le caratteristiche del collante utilizzato sono riassunte in tabella 1.

**Tabella 1: Caratteristiche del collante Ecostick 1816B**

Prodotto	Specifiche
Natura del prodotto	Adesivo poliuretanico a freddo a base acqua
Contenuto secco	50 %
Densità	1.000 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Rapporto di diluizione con acqua	3 %
pH (a 20 °C)	6 – 8
Viscosità	2.800 [mPa s]

### **3.3 Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa e legante**

Per realizzare i campioni in carta da macero la Seccarta s.r.l. ha utilizzato un sistema di produzione brevettato, senza l'utilizzo di acqua. La produzione industriale ha consentito la produzione di pannelli di dimensioni di 1 m x 1m dai quali poi sono stati ritagliati dischi di dimensioni 29 e 100 mm.

Per la realizzazione dei pannelli sono stati utilizzati i seguenti macchinari:

- Trituratore e riduzione a fiocchi di carta e cartone di riciclo;
- Pressa a rulli continui con incollatura in linea;
- Incollatore per TNT e scarti di fibre tessili;
- Fustellatura per rifinire i pannelli alla misura di 1m\*1m.

La provenienza dei materiali è la seguente:

- Carta da macero: produttori locali ubicati nel raggio di 10-15 Km
- Isolmix: azienda Euchora (Dosolo MN)
- TNT riciclato: azienda Barbiflex (Carate Brianza MB)
- Collante: azienda Ingessil (Montorio VR) – Sede Seccartasrl (Monza)

La colla utilizzata è a base silicata con un contenuto di Sodio silicato  $3.2 \leq R_m \leq 4$ , ed il nome commerciale è Nacoren F. Le caratteristiche del collante sono riassunte in tabella 2.

**Tabella 2: Caratteristiche del collante Nacoren F.**

Prodotto	Specifiche
Natura del prodotto	Sodio silicato in soluzione acquosa
Densità	0.7 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Rapporto di diluizione con acqua	28-39 %
pH (a 20 °C)	11,3 ± 0,6

### **3.4 Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa a freddo**

La pressa a freddo è stata utilizzata per realizzare esclusivamente i campioni di dimensioni di 29 mm, senza l'utilizzo di nessun collante. La pressa è capace di conferire al provino una pressione massima di 15.000 Kg.



**Figura 7: Pressa a freddo**

Lo strumento, mostrato in figura 7, è composto dai seguenti componenti:

- Un cilindro di acciaio di diametro interno di 29 mm;
- un tappo per chiudere il cilindro inferiormente;
- un pistone di diametro di 29 mm;
- un supporto su cui poggiare il campione;
- una vite funzionante come fermo;
- una leva per aumentare e diminuire la pressione;
- un manometro.

### 3.5 Metodologia di realizzazione dei campioni con utilizzo di pressa ad elevata temperatura

La pressa a caldo, ha consentito di realizzare i campioni senza l'uso di collante. Rispetto alla pressa a freddo, ha fornito la possibilità di regolare la temperatura dei piatti in un intervallo compreso tra 0 e 200 °C. I campioni realizzati con questa metodologia sono stati prodotti in dischi 100 mm da cui sono stati poi ritagliati quelli da 29 mm. La pressa, illustrata in figura 8, è costituita dai seguenti componenti:

- un bicchiere di acciaio di diametro interno di 100 mm;
- due piatti, uno inferiore su cui poggiare il bicchiere e uno superiore fungente come fermo;
- un supporto su cui poggiare il campione;
- una leva per aumentare e diminuire la pressione;
- un manometro differenziale;
- una valvola di sfiato;
- un display;
- due pulsanti per aumentare e ridurre la temperatura dei piatti;
- una termocoppia.

La termocoppia, collegata al piatto inferiore della pressa, ha permesso di limitare la temperatura massima utilizzabile a 200 °C.



**Figura 8 Pressa a caldo**

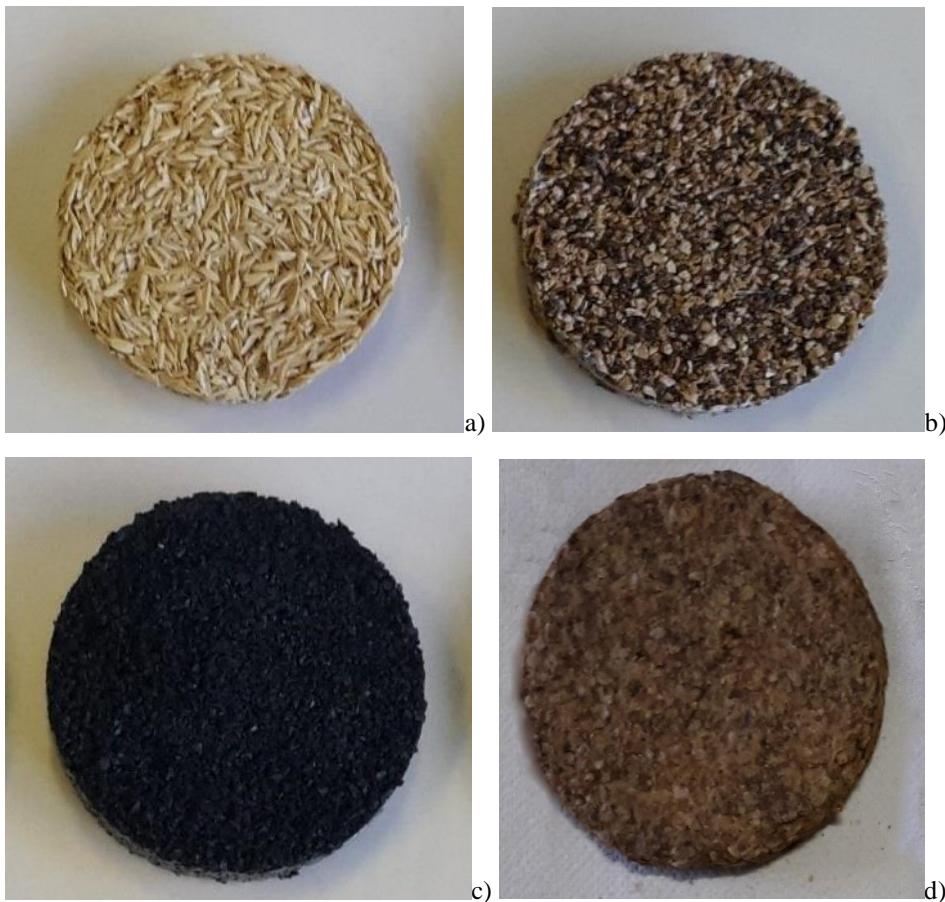
La temperatura di realizzazione è stata scelta in funzione di quanto emerso dall'analisi TGA.

### **3.6 Realizzazione e Classificazione dei campioni composti da materiale sciolto e legante**

Per realizzare i campioni in laboratorio, il materiale è stato immesso in uno dei cilindri di acciaio, illustrati nelle figure 6 a e 6b. Il cilindro è stato chiuso inferiormente da un piattino, ed è stato applicato il collante su ogni strato di materiale. Grazie ad una pistola a spruzzo, dotata di stantuffo per creare la pressione all'interno del contenitore, è stata applicata la colla nebulizzata su ogni strato di granuli inseriti all'interno del cilindro. Ultimata l'immissione dello strato di granuli, è stato inserito l'altro piattino nella parte superiore per regolarizzare la superficie. Tale operazione è stata ripetuta più volte fino al raggiungimento dello spessore desiderato. Una scala graduata, posta all'interno del cilindro, ha permesso di controllare lo spessore del provino. Il campione è stato estratto asciutto. Per accelerare la fase di asciugatura della colla, i campioni sono stati posti per un tempo compreso tra 90 e 120 minuti in stufa alla temperatura di 100 °C.

E' stata utilizzata la quantità minore possibile di colla, poiché un elevato uso di collante incide negativamente sul valore del coefficiente di assorbimento [4]. Tuttavia, l'uso di una quantità troppo bassa dello stesso non assicura un'adesione ottimale della struttura del campione. Le figure 9 a-b-c-d illustrano i campioni realizzati in laboratorio con questa tecnica di produzione:

- a) lolla di riso;
- b) granulato di sughero;
- c) granulato di gomma;
- d) pellicola argentea di caffè (silverskin).



**Figura 9: campioni realizzati con la metodologia materiale sciolto e legante: a) lolla di riso; b) granulato di sughero; c) granulato di gomma; d) pellicola argentea di caffè**

Le irregolarità nella forma dei campioni realizzati in laboratorio sono dovute per la maggior parte alle operazioni di estrazione dei campioni dai cilindri. Non è stato realizzato il campione con fibra tessile perché la struttura di questo materiale non è adatta all’assemblaggio per mezzo di colla. In tabella 3 vengono riportate le caratteristiche dei campioni realizzati in laboratorio, con l’utilizzo di materiale sciolto e legante. La percentuale volume materiale /volume di colla varia nei campioni tra il 2 e il 16 %. I campioni di diametro pari a 100 mm contengono una percentuale di colla molto minore rispetto ai campioni di diametro di 29 mm. In conseguenza a ciò, varia notevolmente la densità dei campioni. Per poter avere i campioni con le stesse caratteristiche di densità e

spessore sono stati ritagliati i campioni da 29 mm da quelli realizzati da 100mm, nello specifico 1B, 2A, 3C, 4A.

Per mantenere legati i singoli gusci di riso è stata sufficiente una quantità di collante molto bassa. Al contrario, per legare la pellicola argentea di caffè è stata necessaria una percentuale di colla più alta rispetto agli altri materiali

**Tabella 3: riepilogo dei campioni realizzati in laboratorio con materiale sciolto e con l'uso di colla**

	M	d [mm]	S [mm]	VTot [m <sup>3</sup> ]	Vcolla [%]	Pfi [g]	P colla [%]	D [Kg/m <sup>3</sup> ]
1A	Lolla di riso	100	18,04	0,000142	2,70	21,84	17,99	154,14
1B	Lolla di riso	100	16,46	0,000129	2,32	21,48	14,29	166,16
1C	Lolla di riso	100	17,47	0,000137	1,84	20,99	12,24	152,98
1D	Lolla di riso	29	17,25	0,000011	6,56	3,81	21,00	334,39
1E	Lolla di riso	29	17,10	0,000011	9,96	4,25	29,41	376,28
1F	Lolla di riso	29	18,20	0,000012	5,94	3,69	20,60	306,95
2A	Gomma	100	16,84	0,000132	4,90	73,34	9,29	554,51
2B	Gomma	100	16,21	0,000127	5,84	68,52	11,53	538,20
2C	Gomma	100	17,10	0,000134	4,41	65,51	9,46	487,78
2D	Gomma	29	18,80	0,000012	10,84	11,04	13,68	889,05
2E	Gomma	29	20,65	0,000014	9,73	9,00	16,33	659,84
2F	Gomma	29	19,40	0,000013	8,69	10,11	12,07	788,98
3A	Sughero	100	17,45	0,000137	6,48	22,61	42,02	164,97
3B	Sughero	100	15,91	0,000125	5,10	21,32	31,52	170,62
3C	Sughero	100	17,15	0,000135	5,86	26,32	31,88	195,40
3D	Sughero	29	18,20	0,000012	4,37	4,20	13,10	349,38
3E	Sughero	29	18,10	0,000012	4,78	7,10	8,45	593,87
3F	Sughero	29	20,05	0,000013	10,53	8,06	19,35	608,60
4A	Silverskin	100	9,38	0,000074	5,55	24,93	17,37	338,40
4D	Silverskin	29	11,73	0,000080	17,12	5,67	28,22	731,81
M=Materiale d= Diametro S= Spessor			Vtot = Volume totale Vcolla= Volume colla P fi =Peso finale			P c= Peso colla D= Densità campione		

### **3.7 Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati con pressa e legante**

La realizzazione dei campioni in carta da macero, TNT e scarti di fibre tessili, è stata effettuata industrialmente presso l'azienda Seccarta s.r.l. Il metodo produttivo utilizzato da Seccarta praticamente non necessita di acqua nella lavorazione; la nuova tecnica non risale attraverso l'acqua alle fibre di cellulosa ed alle loro ramificazioni per ottenere nuovi legami, ma con un'opportuna fase di triturazione a secco della "cartaccia" ottiene macroramificazioni, che formano poi il foglio delle caratteristiche desiderate grazie al collante e la pressione dei cilindri. A parte i vantaggi economici ed ambientali della nuova tecnica, è da sottolineare come questa non imponga lavorazione su ciclo continuo, abbia un consumo energetico infinitesimale e possa essere ubicata a prescindere dalla presenza di corsi d'acqua.

Le figure 10a e 10b illustrano i campioni realizzati con questa metodologia nelle due differenti misure, rispettivamente 100 e 29 mm.



**Figura 10:** campioni realizzati con la metodologia pressa e legante: a) dischi diametro 100 mm; b) dischi diametro 29 mm

I campioni testati sono:

- (G): cartone più strato di materiale di scarti tessili;
- (E): carta da macero pressata e incollata;
- (F): due strati di carta da macero pressati e incollati più fiocchi di carta all'interno;
- (B/C): un foglio di carta da macero pressata e incollata più due fogli di materiale fibroso;

- (D): due fogli di carta da macero pressata e incollata più due fogli di materiale fibroso.

I campioni nominati con la lettera B e C sono della stessa tipologia e nella trattazione sarà considerato solo il campione denominato C. Di seguito in tabella 4 vengono riportate le caratteristiche dei campioni realizzati presso lo stabilimento industriale unitamente ai due campioni testati già esistenti in commercio.

**Tabella 4: Descrizione campioni prodotti industrialmente**

	Primo strato [cm]	Secondo strato [cm]	Terzo strato [cm]	Tot. Spessore [cm]	Densità [kg/m3]
(B/C)	materiale fibroso (0.25 cm)	cartone (0.7 cm)	materiale fibroso (0.25 cm)	1.2	366
(D)	materiale fibroso (0.25 cm)	cartone (1.5 cm)	materiale fibroso (0.25 cm)	2.0	9.52
(E)	carta da macero (1.0 cm)	-	-	1.0	506
(F)	carta da macero (3.0 cm) Fiocchi di carta interposta	-	-	3.0	506
(G)	cartone (0.5 cm)	materiale in scarti tessili Isolmix (4.5 cm)	-	5.0	87.5

### 3.8 Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati mediante pressatura a freddo

Per realizzare i campioni con questa metodologia il materiale sciolto è stato immesso nel bicchiere di acciaio della pressa illustrata in figura 7 fino a raggiungere lo spessore desiderato. I campioni realizzati con questa metodologia hanno un diametro pari a 29 mm. Per realizzare i campioni con questa metodologia, è stato possibile utilizzare i seguenti materiali:

- lolla di riso;
- granulato di sughero;
- pellicola argentea di caffè;
- fibra tessile.

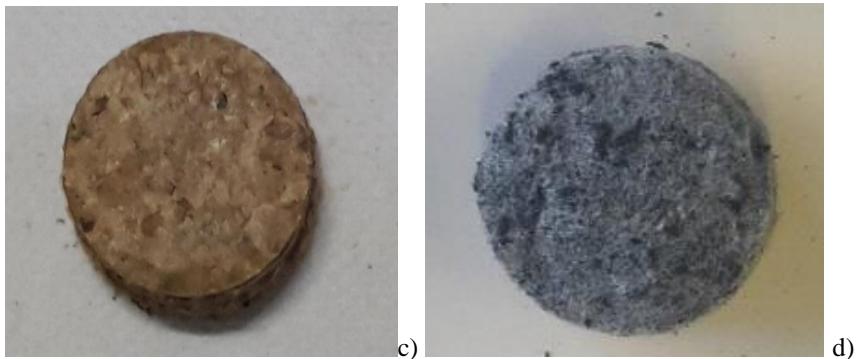
Sono state effettuate diverse prove variando i seguenti parametri:

- Tempo di pressatura
- Pressione
- Quantità di materiale immessa nel cilindro

Modificando tali parametri, si è cercata la miglior combinazione possibile, che permettesse di realizzare dei campioni della compattezza e dello spessore desiderato. Si è notato che con il passare del tempo, i campioni realizzati con questo tipo di metodologia hanno subito un lieve aumento di spessore, che ha portato ad un peggioramento della compattezza degli stessi. Di seguito, nelle figure 11a-b-c-d vengono illustrati i campioni realizzati con la pressa a freddo. La tabella 5 riassume le prove svolte con questa metodologia e fornisce informazioni riguardo i parametri che sono stati variati in fase di realizzazione.



Figura 11: campioni realizzati con la metodologia pressa a freddo: a) lolla di riso; b) granulato di sughero;



**Figura 11:** campioni realizzati con la metodologia pressa a freddo: c) pellicola argentea di caffè; d) fibra di gomma.

**Tabella 5: Riepilogo dei campioni realizzati tramite pressatura a freddo**

	M	d [mm]	P [g]	S [mm]	F max [N]	t press [min]	V [m³]	D [Kg/m³]
1R	Lolla di riso	29	7,82	15,05	88290	30	9,94E-06	786,66
1S	Lolla di riso	29	8,00	15,05	88290	30	9,94E-06	804,76
1T	Lolla di riso	29	7,70	15,40	88290	30	1,02E-05	756,98
3R	Sughero	29	7,27	17,15	68670	30	1,13E-05	641,78
3S	Sughero	29	7,23	16,15	68670	30	1,07E-05	677,77
3T	Sughero	29	7,97	18,20	68670	30	1,20E-05	662,98
4R	Silverskin	29	7,75	12,25	88290	30	8,09E-06	957,81
4S	Silverskin	29	7,90	12,35	88290	30	8,16E-06	968,44
4T	Silverskin	29	7,68	11,10	88290	30	7,33E-06	1047,50
5R	Fibra tessile	29	4,43	14,17	24525	30	9,94E-06	473,31
5S	Fibra tessile	29	4,79	14,62	24525	30	9,66E-06	496,02
5T	Fibra tessile	29	4,76	14,50	24525	30	9,57E-06	497,00

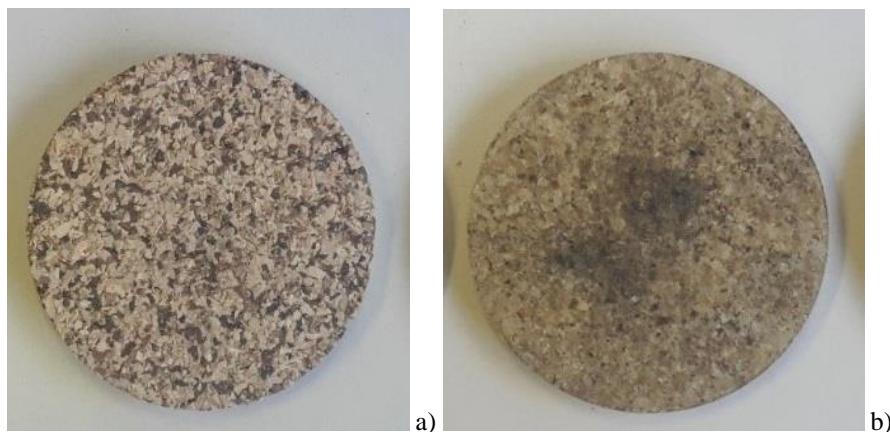
### 3.9 Realizzazione e classificazione dei campioni realizzati mediante pressatura ad elevata temperatura

Per realizzare i campioni con questa metodologia il materiale sciolto è stato immesso in un bicchiere di acciaio appositamente costruito. Tale strumento ha consentito di realizzare i campioni senza l'uso di collante e, rispetto alla pressa a freddo, ha fornito la possibilità di regolare la temperatura dei piatti in un intervallo compreso tra 0 e 200 °C. La pressione massima consentita dalla pressa è di 4 tonnellate.

Sono stati realizzati campioni di dimensioni da 100 e 29 mm con i seguenti materiali:

- granulato di sughero;
- pellicola argentea di caffè.

Di seguito, in figura 12 a-b sono illustrati i campioni realizzati con la pressa ad elevata temperatura.



**Figura 12: Campioni realizzati mediante pressatura ad elevata temperatura: a) granulato di sughero; b) pellicola argentea di caffè**

La tabella 6 mostra il riepilogo dei campioni realizzati con questa metodologia e fornisce informazioni riguardo i parametri che sono stati variati in fase di realizzazione.

Per poter avere i campioni con le stesse caratteristiche di densità e spessore sono stati ritagliati i campioni da 29 mm da quelli realizzati da 100mm, nello specifico 3H e 4H.

**Tabella 6 Riepilogo dei campioni realizzati tramite pressatura ad elevata temperatura**

	<b>M</b>	<b>d</b> [mm]	<b>P</b> [g]	<b>S</b> [mm]	<b>F</b> [N]	<b>t press</b> [min]	<b>T</b> [°C]	<b>V</b> [m <sup>3</sup> ]
3G	Sughero	100	59,17	11,44	39240	22	110	8,99E-05
3H	Sughero	100	56,44	10,00	39240	22	110	7,85E-05
3I	Sughero	100	36,71	6,30	39240	22	110	4,94E-05
3L	Sughero	29	5,10	10,00	39240	22	110	6,60E-06
3M	Sughero	29	5,58	10,40	39240	22	110	6,871E-06
3N	Sughero	29	4,52	11,25	39240	22	110	7,43E-06
4G	Silverskin	100	70,53	9,35	39240	30	120	7,34E-05
4H	Silverskin	100	75,10	9,00	39240	30	120	7,07E-05
4I	Silverskin	100	74,20	10,00	39240	30	120	7,85E-05
4L	Silverskin	29	5,70	9,30	39240	30	120	6,14E-06
4M	Silverskin	29	5,86	9,10	39240	30	120	6,01E-06
4N	Silverskin	29	6,17	10,00	39240	30	120	6,60E-06
M=Materiale		S= spessore				T= temperatura		
D=diametro		F= Forza applicata				V = volume		
P= peso		t press= tempo di pressatura						

## **Bibliografia**

1. F.Montagnaro, R.Turco – Analisi termogravimetrica; Università degli Studi di Napoli;
2. [www.polymertechnology.it](http://www.polymertechnology.it) – Tecniche di analisi termica
3. <http://www.intercomsas.it/>
4. F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. D'Alessandro – Evaluation of the acoustic properties of materials made from recycled granulates; Inter-noise Istanbul, 28-31 august 2007;

## **Capitolo 4 Caratterizzazione acustica dei campioni oggetto di studio: metodologia e risultati**

Per caratterizzare il comportamento acustico dei campioni realizzati, è stato indispensabile misurare il parametro che ne quantifica le capacità fonoassorbenti, ovvero, il coefficiente di assorbimento  $\alpha$ , definito come la frazione di energia sonora assorbita rispetto a quella incidente.

Nel presente lavoro di tesi è stato valutato sperimentalmente il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale mediante il metodo del tubo ad onde stazionarie, detto anche “tubo di Kundt”.

Oltre al coefficiente di assorbimento, che definisce la capacità di un elemento di assorbire l’energia sonora, è stato misurato anche il potere fonoisolante, o Transmission Loss (TL), che definisce la capacità di un divisorio di non trasmettere suoni. Anche per questa misura è stata utilizzata una configurazione particolare del “tubo di Kundt”.

### **4.1 Descrizione dei campioni di prova**

Al fine di caratterizzare acusticamente i campioni, sono stati realizzati dei dischi di dimensioni di 100 e 29 mm. In particolare, sono stati utilizzati un tubo di diametro interno pari a 100 mm, per caratterizzare le proprietà acustiche del campione a frequenze comprese tra 50 Hz e 1600 Hz, e uno di diametro interno pari a 29 mm, per caratterizzare le proprietà acustiche del campione a frequenze comprese tra 500 Hz e 6.400 Hz.

I campioni testati sono stati realizzati con tutte le metodologie di produzione:

- *Campioni realizzati mediante l’impiego di materiale sciolto di un legante*
  - a) lolla di riso;
  - b) granulato di sughero;
  - c) granulato di gomma;
  - d) pellicola argentea di caffè (silverskin).
  
- *Campioni realizzati mediante l’impiego di pressa a freddo e di un legante*
  - a) cartone più strato di materiale di scarti tessili;
  - b) carta da macero pressata e incollata;

- c) due strati di carta da macero pressati e incollati più fiocchi di carta all'interno;
- d) un foglio di carta da macero pressata e incollata più due fogli di materiale fibroso;
- e) due fogli di carta da macero pressata e incollata più due fogli di materiale fibroso.

- *Campioni realizzati mediante pressa a freddo*

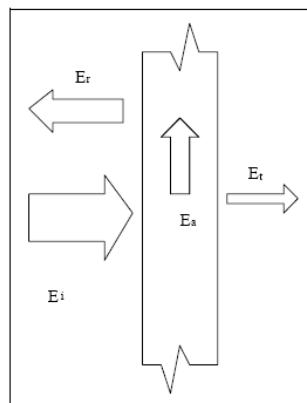
- a) lolla di riso;
- b) granulato di sughero;
- c) pellicola argentea di caffè;
- d) fibra tessile.

- *Campioni realizzati mediante pressa ad elevata temperatura*

- a) granulato di sughero;
- b) pellicola argentea di caffè.

## 4.2 Il coefficiente di assorbimento acustico $\alpha$

L'energia acustica incidente su un materiale verrà in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa, come illustrato in figura 1.



**Figura 1: Ripartizione dell'energia incidente su una parete**

Si può dunque scrivere un equazione di bilancio :

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (1)$$

dove

$E_i$  è l'energia acustica incidente

$E_r$  è l'energia acustica riflessa,

$E_a$  è l'energia acustica assorbita

$E_t$  è l'energia acustica trasmessa

Dividendo l'equazione (1) per  $E_i$  si ottiene l'equazione (2)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2)$$

dove

$\rho$  è il coefficiente di riflessione

$\alpha$  è il coefficiente di assorbimento

$\tau$  è il coefficiente di trasmissione

Le proprietà fonoassorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acustico  $\alpha$ , il quale è definito come rapporto tra la potenza sonora assorbita e la potenza sonora incidente. Il valore di  $\alpha$  rappresenta la frazione di energia sonora assorbita da un determinato materiale e può variare da 0, nel caso in cui tutta l'energia incidente è riflessa, a 1, nel caso in cui tutta l'energia incidente è assorbita.

Per un medesimo materiale, il valore di  $\alpha$  cambia al variare delle frequenze e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica, quindi i coefficienti di assorbimento acustico sono espressi in funzione della frequenza [1].

Nei materiali porosi l'assorbimento dell'energia sonora si manifesta grazie alla dissipazione viscosa creata dalle micro-cavità nella struttura del materiale poroso. L'onda sonora viene dissipata per attrito facendo oscillare l'aria presente all'interno dei pori.

È possibile individuare alcuni parametri fisici che influiscono il valore del coefficiente di assorbimento. Questi parametri sono legati alle caratteristiche del campione realizzato ed alle proprietà intrinseche del materiale in esame. Tra le caratteristiche che appartengono alla prima categoria rientrano la forma, lo spessore e la densità del campione.

Tra le proprietà intrinseche del materiale di cui il campione è costituito, si possono, invece, citare la resistenza al flusso, la tortuosità, la porosità, le lunghezze caratteristiche,

termica e viscosa, ed il fattore di struttura. Queste caratteristiche, proprie del materiale in esame, sono note come proprietà non acustiche e verranno illustrate nel capitolo 5[1, 2].

#### 4.2.1 Metodi di misura del coefficiente di assorbimento

In letteratura per la determinazione sperimentale del coefficiente di assorbimento esistono i seguenti metodi:

- Metodo intensimetrico
- Metodo impulsivo
- Camera riverberante
- Tubo ad onde stazionarie.

Il metodo intensimetrico si effettua sulla base delle indicazioni della norma UNI EN ISO 15186-1 [3]. Tale metodo è sicuramente quello più moderno e permette, prendendo in considerazione onde anche non piane, il calcolo del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  misurando direttamente l'intensità incidente e l'intensità riflessa. I vantaggi derivanti dall'uso del metodo intensimetrico sono i seguenti:

- i risultati non sono dipendenti dalla frequenza, ma valgono per tutto lo spettro sonoro e, perciò, possono essere analizzati campi sonori generati da sorgenti di rumore in banda larga, che non utilizzano una singola frequenza alla volta, ma un intero intervallo di frequenze;
- il coefficiente di assorbimento può essere ricavato a partire da una singola misura effettuata in un solo punto.

Tuttavia, per la realizzazione di tale metodo è richiesta una strumentazione piuttosto sofisticata, comprendente almeno due canali di acquisizione. Inoltre, per la misura dell'intensità, il metodo necessita di alcune operazioni di taratura effettuare molto complesse.

Il *metodo impulsivo* è solitamente utilizzato per la misura “in situ” delle proprietà fonoassorbenti e fonoriflettenti delle barriere antirumore e delle pavimentazioni stradali drenanti. Esso prevede l'attuazione di misure di risposta all'impulso con metodo elettroacustico impiegando un altoparlante di opportune caratteristiche omnidirezionali. Tale altoparlante emette un segnale stazionario e la risposta all'impulso è ottenuta matematicamente, mediante deconvoluzione del segnale di test.

Il metodo con *camera riverberante*, consente di misurare il coefficiente di assorbimento ad incidenza diffusa, e per tale prova si adoperano campioni di dimensioni di circa 10 – 12  $m^2$ . Esaminando una superficie così vasta, si è in grado di modificare significativamente il tempo di riverberazione di un ambiente, in modo che dalla sua

variazione si possa ricavare il coefficiente di assorbimento per incidenza diffusa. Questo metodo è normato dalla ISO 354 [5], che prescrive che la misura venga effettuata in camera riverberante con precise prescrizioni. Si tratta di un ambiente, avente volume di circa 200 m<sup>3</sup>, di forma irregolare, al fine di determinare un campo perfettamente diffuso.

Il tubo ad onde stazionarie consente di misurare il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale. Tale metodo che è quello utilizzato per le misure sperimentali effettuate in questa tesi, verrà approfondito al paragrafo 4.2.2.

#### **4.2.2 Misura sperimentale del coefficiente di assorbimento ad incidenza normale con tubo ad impedenza**

Il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale dei campioni realizzati in questo studio è stato misurato presso il laboratorio di acustica dell'Università degli Studi di Perugia, utilizzando un tubo ad impedenza a due microfoni o “Tubo di Kundt”.

Il tubo di Kundt è stato inventato dal fisico tedesco August Kundt nel 1866 e consiste in un tubo chiuso di materiale non poroso posizionato orizzontalmente, con superficie interna liscia [6]. Il tubo di Kundt consente di osservare i fenomeni di propagazione di onde longitudinali in una dimensione. Grazie a questo strumento è possibile calcolare vari parametri, tra cui l'impedenza specifica superficiale ed il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale, proprietà che sono alla base della ricerca e dello sviluppo dello studio dei materiali fonoassorbenti.

Esistono più configurazioni di tubo di Kundt [7]. In questo studio è stata utilizzata la configurazione denominata “Transfer Function Method” (TF). Questa metodologia è stata per la prima volta descritta da Chung e Blaster [6]. La norma di riferimento per il calcolo del coefficiente di assorbimento acustico mediante tubo ad impedenza è la UNI EN ISO 10534-2 [8]. La norma prevede l'utilizzo di due microfoni ed un sistema di analisi di frequenza per determinare il coefficiente di assorbimento “ $\alpha$ ” di un campione rispetto ad un'onda piana incidente in direzione ortogonale alla sua superficie. La figura 2 mostra lo schema della configurazione Transfer Function di un tubo ad onde stazionarie.

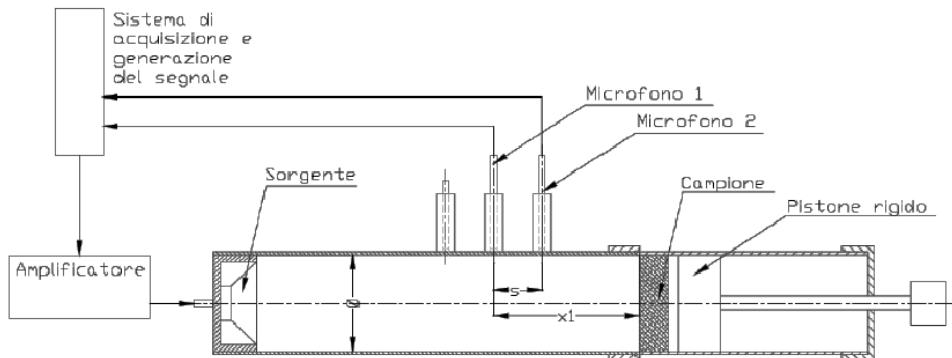


Figura 2: Schema della configurazione Transfer Function (TF) del tubo ad onde stazionarie utilizzato

La strumentazione di misura adoperata è la seguente:

- Sistema di acquisizione multicanale;
- tubo di impedenza;
- amplificatore;
- microfoni a condensatore;
- preamplificatori;
- pistofono;
- software di analisi Brüel&Kjaer PULSE LabShop;
- barometro-termometro-igrometro.

La sorgente è posta ad un'estremità del tubo ed è alimentata, attraverso un amplificatore, da un generatore di segnale con un segnale random stazionario a banda larga. Il campione, invece, è posizionato all'estremità opposta ad una distanza prefissata da una superficie riflettente, mediante un pistone rigido collegato ad un'asta graduata [8].

Grazie alla sorgente, lungo il tubo viene generato un campo di onde stazionario. Un'onda piana stazionaria di tipo casuale colpisce il campione e viene scomposta in una componente incidente ed in una riflessa. La pressione sonora viene acquisita contemporaneamente da due microfoni montati sulla superficie superiore del tubo ad una distanza "s" l'uno dall'altro e viene, quindi, calcolata la funzione di trasferimento tra i microfoni [9-10]. Attraverso queste informazioni è possibile determinare il coefficiente di assorbimento per incidenza normale del campione in funzione della frequenza a partire dal calcolo del coefficiente di riflessione "p".

Come detto, in seguito all'impatto con il campione, l'intensità dell'onda progressiva incidente in modo ortogonale sul campione si divide in due componenti, una riflessa ed una assorbita, ovvero si ha secondo l'equazione (3) che:

$$1 = \rho + \alpha \quad (3)$$

dove

$\rho$  componente  $I_{\text{riflessa}}/I_{\text{incidente}}$

$\alpha$  componente  $I_{\text{assorbita}}/I_{\text{incidente}}$

Considerando che l'intensità delle onde piane è proporzionale al quadrato della pressione [3], si può anche scrivere l'equazione (4)

$$\alpha = 1 - \rho = 1 - \frac{|P^-|^2}{|P^+|^2} = 1 - |CRF|^2 \quad (4)$$

dove

CRF è il coefficiente di riflessione complesso, o complex reflection factor

Il CRF nel metodo utilizzato è esprimibile grazie alla seguente equazione (5) [9]

$$CRF = |CRF|e^{j2kx} = \left[ \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \right] e^{j2kx} \quad (5)$$

dove:

$H_{12}$  è la funzione di trasferimento acustica dedotta dalle pressioni rilevate dai due microfoni nelle posizioni 1 e 2;

$H_i$  è la funzione di trasferimento acustica della sola componente d'onda incidente;

$H_r$  è la funzione di trasferimento acustica della sola componente d'onda riflessa;

$k$  è la costante di propagazione dell'onda ed è espressa come  $k = 2\pi / \lambda$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda;

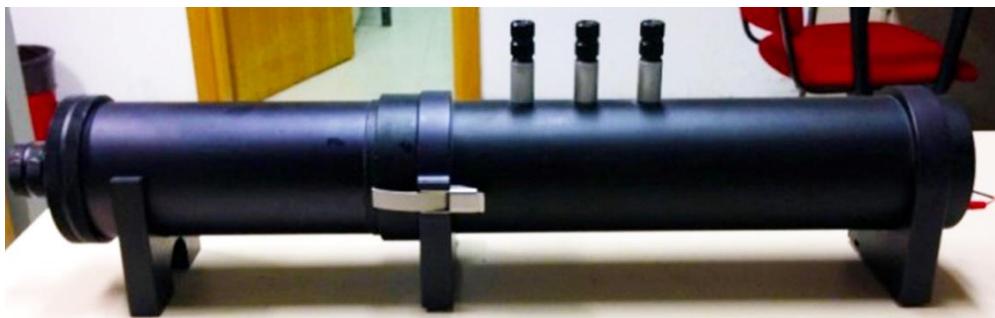
$x$  è la distanza tra il campione ed il microfono più vicino;

$s$  è la distanza tra i microfoni alle posizioni 1 e 2.

Utilizzando le precedenti equazioni (4) e (5), il coefficiente di assorbimento è ricavabile grazie alla equazione (6) [9]:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \right|^2 \quad (6)$$

L'intervallo di frequenza e l'accuratezza della prova dipendono dal diametro del tubo e dalla distanza "s" tra i due microfoni, che rispettivamente determinano il limite ad alta e a bassa frequenza, ovvero la massima e la minima frequenza a cui si propagano solo onde piane all'interno del tubo [9, 10]. Per misurare il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale in un intervallo di frequenze significativo, ovvero compreso tra 50 e 6.400 Hz, è stato necessario l'uso di due tubi di diverso diametro, 100 e 29 mm. La figura 3 mostra il tubo di Kundt utilizzato per l'analisi dei campioni realizzati.



**Figura 3: Tubo ad onde stazionarie o “Tubo di Kundt”**

Per una buona misura è bene prestare particolare attenzione alle seguenti indicazioni [9,10]:

- la base del provino deve aderire perfettamente alla superficie terminale dello strumento;
- la superficie del provino da esporre al segnale deve essere la più regolare possibile;
- lo spazio tra la superficie laterale del campione e la superficie interna dello strumento deve essere il minimo possibile.

L'accuratezza e la ripetibilità del metodo sono legate, quindi, alla preparazione ed all'installazione del campione e ad altre variabili come la precisione nel tagliare il campione. Le prove su uno stesso campione di forma irregolare, o composto da particelle non abbastanza legate, o troppo compattate tra loro possono portare a non ottenere una ripetibilità delle prove [9].

L'utilizzo del tubo di Kundt presenta alcuni svantaggi [3, 11]:

- è necessario effettuare la misurazione per ogni frequenza di oscillazione del pistone;
- la misura di  $\alpha$  eseguita su un singolo campione può non essere rappresentativa per campioni dello stesso tipo, ma di diverse dimensioni.

### 4.3 Il potere fonoisolante o Transmission Loss TL

L'isolamento acustico è definito come la capacità di un elemento di separazione di non trasmettere suoni ed è rappresentato dall'attenuazione in decibel (dB) che il suono subisce nell'attraversare un sistema di separazione di due ambienti [12]. La trasmissione del suono da una sorgente al ricevitore può avvenire per via aerea o strutturale. La propagazione di energia sonora per via aerea avviene direttamente dalla sorgente all'ascoltatore attraverso pareti divisorie, mentre la propagazione per via strutturale è dovuta alle onde generate dagli urti e dalle vibrazioni provocate dalle strutture dell'edificio. L'attenuazione dei rumori che si propagano per via aerea attraverso le pareti divisorie è ottenibile considerando il potere fonoisolante, o Transmission Loss "TL".

Il potere fonoisolante di una parete o di un materiale è espresso dalla equazione (7).

$$TL = 10 \log(1/\tau)[dB] \quad (7)$$

dove

$\tau$  è il fattore di trasmissione.

Il coefficiente di trasmissione indica la percentuale di energia acustica che una parete è in grado di trasmettere ed è definito secondo l'equazione (8) [13]

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (8)$$

dove

$W_t$  è la potenza sonora trasmessa al di là di una parete

$W_i$  è la potenza sonora incidente sulla parete

Il valore del potere fonoisolante varia con la frequenza, con la direzione di provenienza del suono e con le proprietà geometriche e fisiche della parete [12].

### 4.3.1 Metodi di misura del potere fonoisolante

Tale parametro è solitamente misurato in laboratorio attraverso due diverse metodologie:

- Camere riverberanti
- Tubo ad onde stazionarie

Il metodo che utilizza le *camere riverberanti* è normato dalla UNI EN ISO 10140 [14] e prevede che vengano registrate le differenze fra i livelli di pressione sonora rilevate in due camere riverberanti, a seguito dell'immissione di un rumore bianco all'interno di una di esse. Le due camere sono isolate l'una dall'altra per impedire la propagazione acustica per via strutturale ed il campione di prova è installato nell'apertura che le separa.

Per la misura del potere fonoisolante, in questo studio è stato utilizzato una particolare configurazione dello stesso *tubo ad onde stazionarie* che viene illustrato nel paragrafo 4.3.2.

### 4.3.2 Misura sperimentale del potere fonoisolante con tubo ad impedenza

Per la misurazione del potere fonoisolante, è stato utilizzato lo stesso tubo ad impedenza adoperato per il calcolo del coefficiente di assorbimento, ma con una diversa configurazione, che consiste nell'estensione a quattro posizioni microfoniche.

La misura del potere fonoisolante attraverso l'utilizzo del tubo di Kundt non è normata, tuttavia sono disponibili diverse pubblicazioni che descrivono tale metodologia [6].

Tra i metodi riportati in letteratura è stato considerato il cosiddetto “Metodo dei due carichi” [10]. Anche per la misura di questo parametro sono stati utilizzati due tubi di diverso diametro, di 100 mm e di 29 mm, per coprire un intervallo di frequenza significativo. Per effettuare la prova di misurazione del potere fonoisolante è stato necessario aggiungere delle sezioni addizionali al tubo in modo da ottenere una nuova configurazione, avente il campione da testare non più all'estremità, come nel caso del metodo Transfer Function, ma nella parte centrale del tubo. Il campione, nella nuova configurazione, funge da separazione tra la sezione “Source side” e la sezione di “After sample side”. Quest'ultima sezione è seguita dalla sezione “Load termination” [6]. La seguente figura 4 mostra la configurazione descritta.

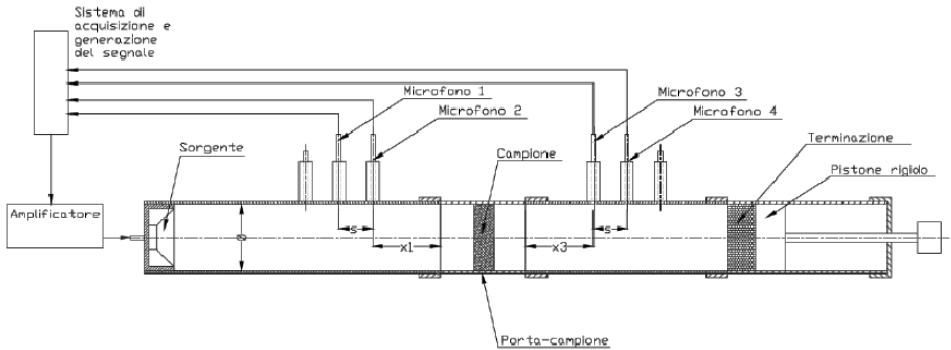


Figura 4: Configurazione adottata per la misura del potere fonoisolante dei campioni [7]

La figura 5 mostra, invece, una foto del tubo nella nuova configurazione.



Figura 5: Tubo di Kundt utilizzato per la misurazione del potere fonoisolante

Il metodo utilizzato per la misura del potere fonoisolante ha previsto che durante la prova, la pressione sonora fosse acquisita simultaneamente dai microfoni a monte ed a valle del campione in due posizioni prefissate. Sono state previste due acquisizioni successive per campione. Per la prima acquisizione, nella parte terminale del tubo, è stata inserita una superficie riflettente, mentre per la seconda acquisizione è stata inserita una superficie assorbente.

Il calcolo del potere fonoisolante, o transmission loss TL, è effettuabile attraverso la seguente equazione (9) [10]:

$$TL = 20 \log_{10} \frac{H_r - H_{12}^u}{H_r - H_{12}^d} - 20 \log_{10} |H_t| \quad (9)$$

dove

$H_t$  è la funzione di trasferimento di pressione acustica in corrispondenza della sorgente;

$H_{12}^d$  e  $H_{12}^u$  sono le funzioni di trasferimento per l'onda acustica ascendente e per l'onda acustica discendente, generate durante la prova;

$H_r$  è la funzione di trasferimento della sola componente riflessa dell'onda acustica.

## 4.4 Risultati

### 4.4.1 Coefficiente di assorbimento $\alpha$

Al fine di ottenere un risultato per un intervallo di frequenze più ampio possibile, è stato necessario l'utilizzo di due diverse tipologie di tubo: uno di diametro interno di 29 mm e l'altro di diametro interno pari a 100 mm.

Le due tipologie di tubo utilizzate sono raffigurate in figura 6.



Figura 6: Tubi di Kundt utilizzati per la misura del fonoassorbimento dei campioni realizzati

Il campo di frequenza relativo alle due tipologie di tubo è differente:

- Con il tubo di diametro di 100 mm il campo di frequenze esaminate è 50-1.600 Hz;
- Con il tubo di diametro di 29 mm il campo di frequenze esaminate è 500- 6.400 Hz.

Il file di output generato dalla prova consiste in un grafico avente in ascissa la frequenza in Hz ed in ordinata il coefficiente di assorbimento “ $\alpha$ ”.

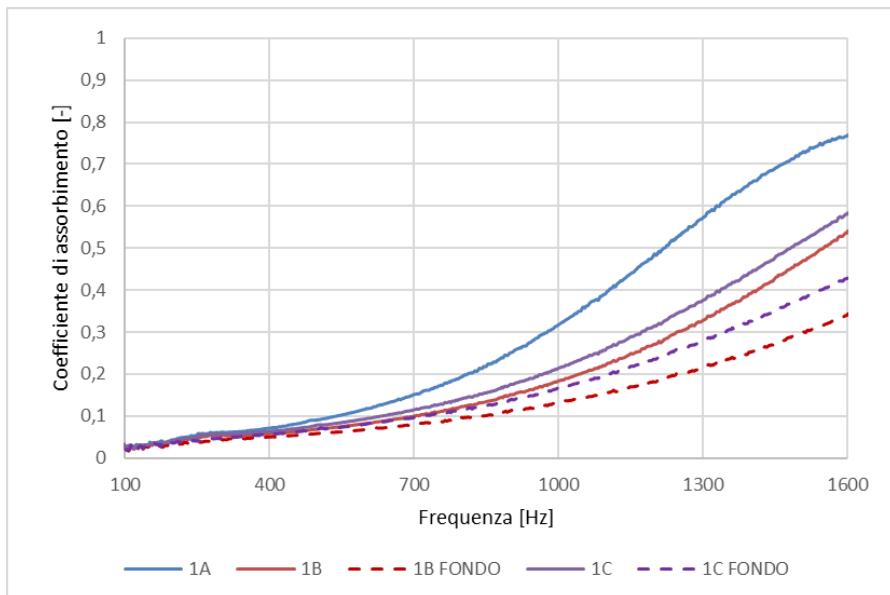
Non è stato possibile effettuare la prova per tutti i campioni realizzati, per motivi legati alle irregolarità perimetrali di molti di essi. Tuttavia, è stato testato almeno un campione di ogni tipologia.

Nel caso di irregolarità dei bordi accettabili, il perimetro del campione è stato sigillato con nastro carta e/o mastice in piccole quantità.

In questo paragrafo sono riportati i grafici ottenuti dalle prove con tubo di Kundt dei campioni realizzati divisi per tipologia di materiale.

#### 4.4.1.1 Lolla di riso

La figura 7, mostra l’andamento del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza per i campioni di lolla di riso realizzati con metodologia materiale sciolto e legante, di diametro pari a 100 mm. Devi indicare di nuovo che cosa rappresentano campioni 1 A etc.



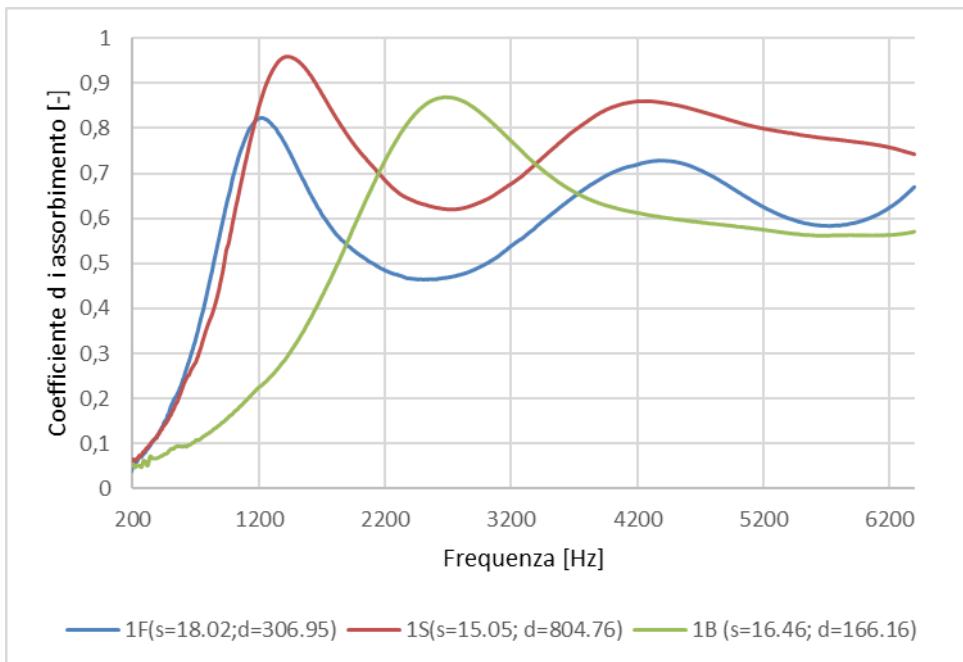
**Figura 7:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale per campioni di lolla di riso, realizzati con metodologia materiale sciolto e legante 1A, 1B, 1C

Come si può notare dalla figura 7, il campione migliore in termini di fonoassorbimento, nel range di frequenza 0 – 1.600 Hz è risultato l'1A

Analizzando le caratteristiche dei tre campioni, non vi è alcun evidente motivo che possa giustificare i migliori risultati in termini di assorbimento acustico di tale campione rispetto agli altri. In questo caso, si ritiene quindi, che la differenza nei risultati di questa tipologia di campioni, possa essere dovuta alla qualità delle superfici. Infatti, il campione 1A presenta una superficie più regolare e priva di imperfezioni, che ha portato ad una miglior aderenza delle sue pareti allo strumento di misura. Inoltre, i risultati evidenziano che un buon intervallo in cui far ricadere il grado di compattazione di questo tipo di materiale è quello compreso fra il 15 ed il 25 %.

Vista la non ripetibilità della prova è stato deciso di testare i campioni 1 A e 1B anche dal lato del fondo, cioè quello che in fase di realizzazione in laboratorio era la superficie di contatto con il bicchiere di acciaio. Il coefficiente di assorbimento testato sul lato del fondo mostra valori più bassi, coerentemente a quanto atteso.

Si può notare che il campione 1B, metti quale è; risultato il peggiore, possiede anche il valore di Resistenza al flusso più basso. E' stato scelto di ricavare dal campione 1 B, il campione da 29 mm per testare le caratteristiche di assorbimento in un campo più ampio di frequenze. I risultati sono riportati in figura 8, dove l'andamento di  $\alpha$  è confrontato con i campioni 1F, assemblato anch'esso con collante, ma avente diversa densità e spessore, e 1S, realizzato attraverso pressatura a freddo.



**Figura 8:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale per campioni di lolla di riso 1F e 1B (metodo materiale sciolto e legante) e 1S (metodo pressatura a freddo)

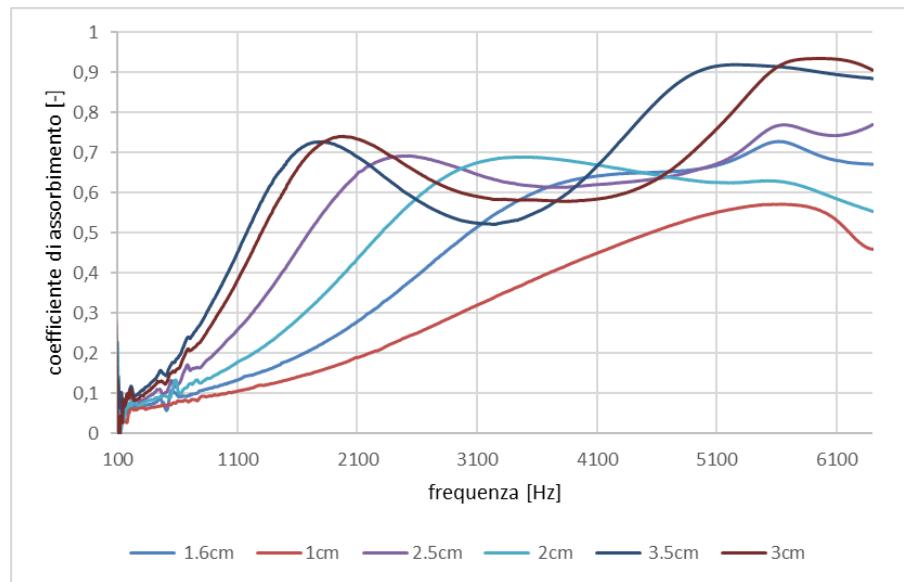
Tutte le curve evidenziano le ottime proprietà di fonoassorbimento della lolla di riso a tutte le frequenze. In particolare, il coefficiente di assorbimento  $\alpha$  del campione 1F risulta essere più elevato nell’intervallo di frequenze 900-1.500 Hz, intervallo in cui è superiore a 0,7, con picco di 0,82 ad una frequenza di 1.200 Hz. Successivamente,  $\alpha$  si riduce, senza scendere mai al di sotto del valore di 0,4, per poi aumentare nuovamente per frequenze maggiori di 3.000 Hz.

Se i risultati ottenuti con i campioni di lolla di riso realizzati con collante possono ritenersi soddisfacenti, quelli dei campioni ottenuti attraverso pressatura a freddo sono anche migliori. La curva del coefficiente di assorbimento del campione 1S risulta traslata verso l’alto e quindi verso valori di assorbimento maggiori. Infatti, il coefficiente di assorbimento raggiunge il valore di 0,97 ad una frequenza di 1.400 Hz ed, in generale, si mantiene alto in tutto l’intervallo di frequenze 1.000 – 5.000 Hz.

Il confronto fra le due curve in figura 8 evidenzia l’effetto della tortuosità sul coefficiente di assorbimento. Infatti, il picco della curva corrispondente al campione 1F, che ha una tortuosità minore del campione 1S, è spostato verso frequenze maggiori. Questo fenomeno conferma quanto affermato da Asdrubali et al. [15]. La maggior tortuosità del

campione 1F, che indica un percorso più difficoltoso da parte dell'onda sonora all'interno del campione, è dovuta alla presenza di colla fra i grani di lolla. L'assenza di colla nel campione 1S, inoltre, si riflette anche sulla porosità, che come si vedrà nel capitolo 5, è maggiore di quella del campione 1F. I migliori risultati del campione 1S, ottenuto attraverso pressatura a freddo, evidenziano come questa metodologia abbia permesso di ottenere dei campioni con una superficie regolare e liscia, ideale per aderire alla parete del tubo di misura. Inoltre, a differenza della pressatura ad elevata temperatura, attraverso la metodologia a freddo sono stati evitati gli effetti negativi delle elevate temperature, come l'occlusione dei pori e l'eccessiva compattazione dei granelli costituenti il campione. Infine, la totale assenza di colla, ha evitato qualsiasi alterazione del campione.

Per completare l'analisi effettuata sulla lolla, essendo un materiale poco investigato dal punto di vista acustico, è stato scelto di eseguire le prove di assorbimento ad incidenza normale per il materiale sciolto. I risultati delle prove sono illustrati in figura 9.



**Figura 9 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale per campioni di lolla sciolta a diverso spessore**

Sono state effettuate le prove a partire da uno spessore di 1 cm, fino a 3.5 cm, con incremento di 0.5 cm. E' stata effettuata una misura aggiuntiva a 1.6 cm, che è lo spessore medio dei campioni realizzati. L'andamento della curva è simile a quelle trovate dai risultati precedenti con un andamento dunque caratteristico con due picchi alle medie-basse e alle alte frequenze.

Nello specifico, al crescere dello spessore, il coefficiente di assorbimento aumenta alle medio-basse frequenze, e si nota la formazione di un secondo picco al crescere dello spessore, evidente dai risultati delle prove con spessori di 3.0 - 3.5 cm.

#### 4.4.1.2 Granulato di gomma

La figura 10 mostra i risultati ottenuti dalla prova con tubo di Kundt sui campioni di granulato di gomma di diametro pari a 100 mm realizzati con collante.

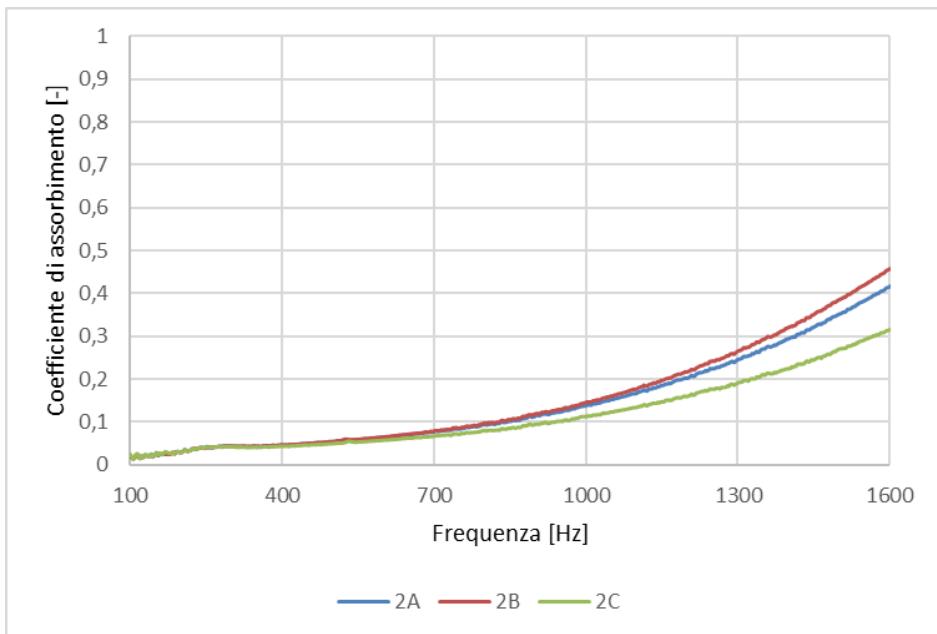


Figura 10: Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale dei campioni di granulato di gomma 2A, 2B e 2C

Come si evince dalla figura 10, i campioni 2A e 2B presentano un andamento simile, anche se il secondo presenta valori del coefficiente di assorbimento a leggermente superiori per frequenze maggiori di 1000 Hz. Il campione 2B, oltre ad avere delle pareti più regolari, è stato realizzato con un grado di compattazione del 23%, che conferma come l'intervallo ottimale di compattazione dei granuli sia del 20 – 25 %. La struttura del campione 2C presenta dei leggeri difetti dovuti ad un'eccessiva perdita di granuli che si è verificata successivamente alla sua realizzazione e che ha determinato una non perfetta aderenza della superficie del campione a quella del tubo. Si desume che l'esigua

pressatura, che ha comportato un grado di compattazione del 17%, non abbia permesso ai granuli di legarsi al meglio tra loro.

Il granulato di gomma derivante dalla triturazione degli pneumatici non presenta caratteristiche fonoassorbenti particolarmente elevate alle frequenze analizzate dal tubo di diametro pari a 100 mm, ma le ottime caratteristiche di questo materiale possono essere rilevate dai risultati della prova in tubo ad impedenza di diametro di 29 mm, prova, che ha permesso di analizzare il coefficiente di assorbimento per frequenze maggiori. In particolare, la figura 11 presenta i risultati relativi alla prova svolta sui campioni 2A e 2E aventi densità e spessori differenti.

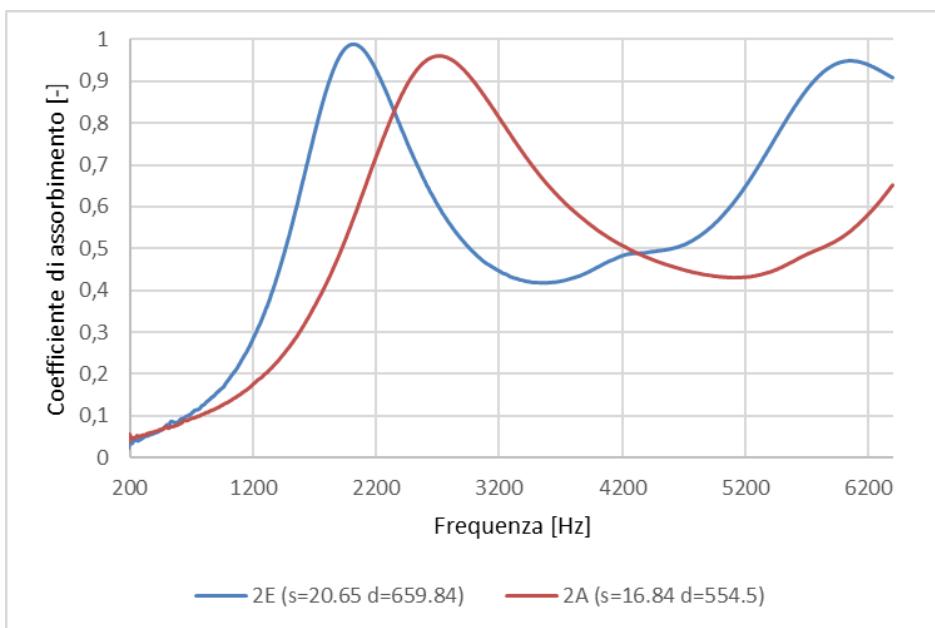


Figura 11: Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale dei campioni in granulato di gomma 2A e 2E

A differenza dei campioni di lolla di riso, la gomma raggiunge la sua massima efficacia in termini di fonoassorbimento a frequenze maggiori di 1.500 Hz. Più precisamente, la curva di  $\alpha$  presenta valori superiori a 0,7 nell'intervallo 1.500 – 2.500 Hz con un picco di 0,99 a 2.000 Hz.

Si può affermare che le proprietà fonoassorbenti di questo materiale siano ottime per tutte le frequenze maggiori di 1.500 Hz.

#### 4.4.1.3 Granulato di sughero

La figura 12 mostra i risultati ottenuti dalle prove effettuate su campioni di granulato di sughero di diametro pari a 100 mm, attraverso assemblaggio con collante 3A 3B 3C e la figura 13 mostra i risultati dei campioni 3G e 3H realizzati con lo stesso materiale, ma con pressatura ad elevata temperatura.

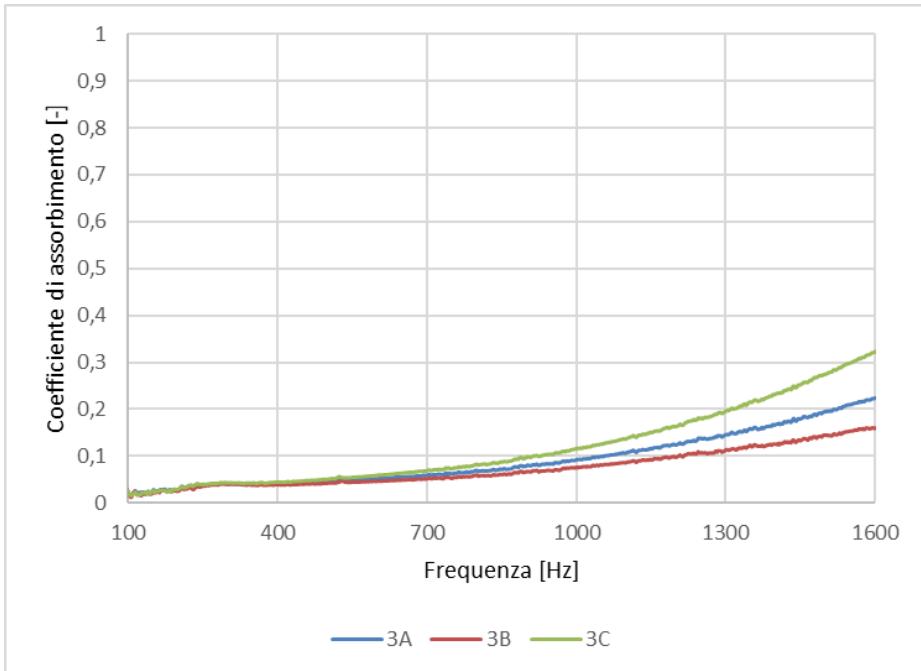
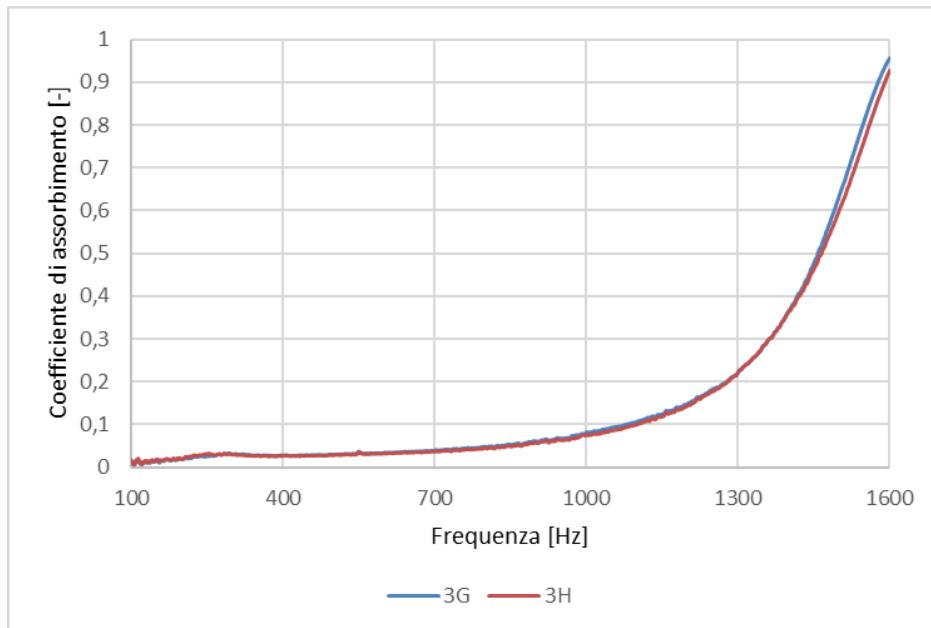


Figura 12: Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale dei campioni di granulato di sughero 3A, 3B, 3C realizzati con metodologia materiale sciolto e legante



**Figura 13:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale dei campioni di granulato di sughero 3G e 3H realizzati con pressa a caldo

I risultati dei campioni realizzati attraverso pressatura ad elevata temperatura, per frequenze maggiori di 1.300 Hz presentano un rapido incremento di  $\alpha$  fino a valori anche superiori a 0,9. Non è stato possibile approfondire in un campo di frequenze maggiori perché i valori sono risultati poco attendibili, probabilmente per la non aderenza alle pareti dei campioni nel tubo piccolo. Analogamente è stato scelto di non illustrare i risultati ottenuti con il tubo da 29mm per i campioni pressati a freddo perché, a causa della scarsa resistenza meccanica, i campioni durante l'inserimento nel tubo si esfoliavano.

I risultati ottenuti per quest'ultima tipologia di campioni dunque andrebbero approfonditi.

In figura 14 è riportato il risultato della prova di assorbimento per il campo esteso del campione 3C che mostra elevati valori di coefficiente di assorbimento tra 2200 e 3200 Hz.

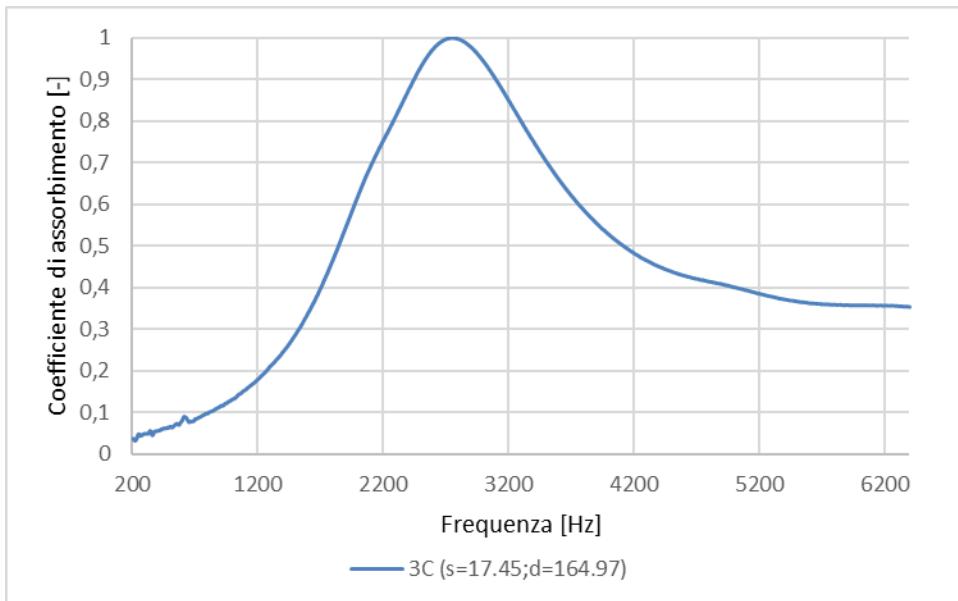


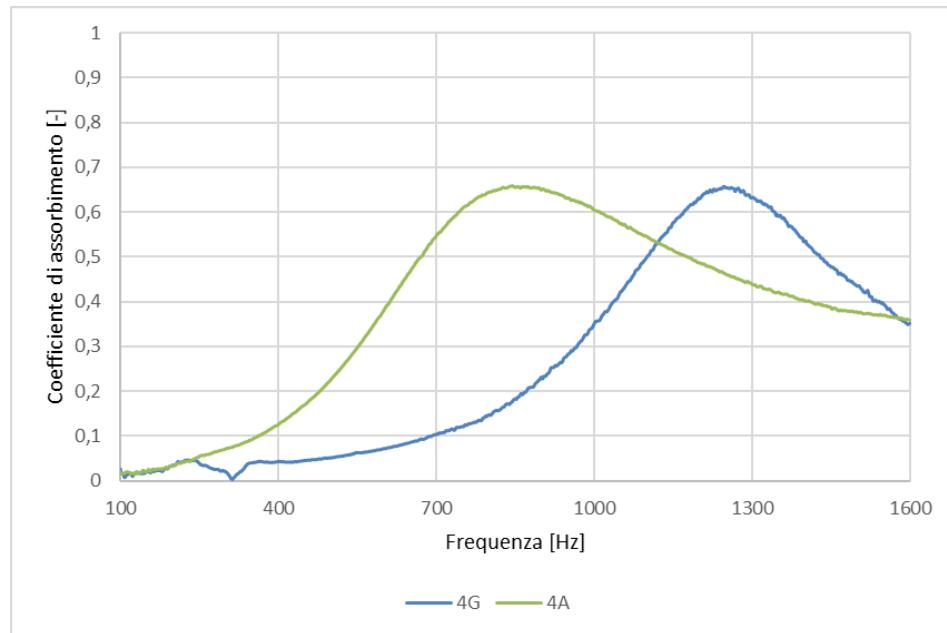
Figura 14: Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale del campione di granulado di sughero 3C

#### 4.4.1.4 Pellicola argentea di caffè

La figura 15 mostra i risultati ottenuti dalle prove sui campioni di diametro pari a 100 mm di pellicola argentea di caffè, il 4A realizzato con materiale sciolto e legante e 4G realizzato con pressatura ad elevata temperatura.

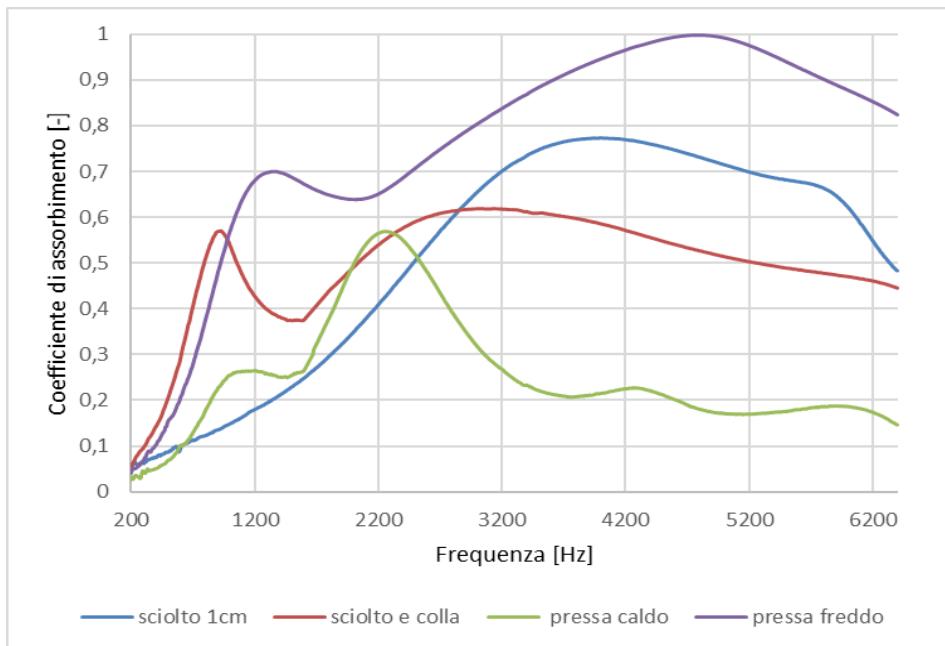
Il campione 4A possiede buone proprietà fonoassorbenti nell'intervallo di frequenze compreso tra 700 e 1.000 Hz, con picco a 850 Hz, frequenza per cui  $\alpha$  è pari a 0,66.

La curva relativa al campione 4G ha un picco spostato verso un intervallo compreso tra 1100 e 1350 Hz.



**Figura 15:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale dei campioni di pellicola argentea di caffè 4A e 4G

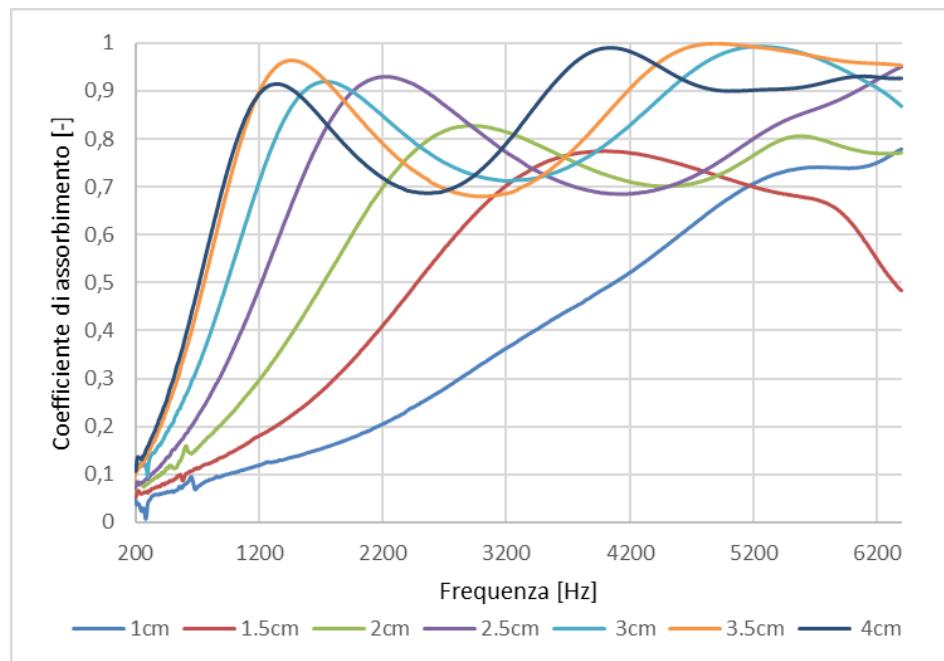
E' stato possibile caratterizzare i campioni di pergamino con tutte le metodologie di realizzazione, utilizzando i campioni d 29 mm, dunque investigando sul comportamento nel campo esteso di frequenze. Si riportano in figura 16 i risultati a confronto dei campioni di pergamino di caffè, completi anche della prova sul materiale sciolto di spessore analogo 1cm.



**Figura 16:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale del campione di pellicola argentea di caffè 4T

La modalità realizzativa con pressa a freddo, in questo caso, si è rivelata quella più idonea per la pellicola argentea di caffè. La maggior compattazione del campione e le superfici sufficientemente regolari hanno permesso di mettere in risalto le proprietà fonoassorbenti di questo materiale. Questo campione presenta una curva con due picchi ai valori di 1350 e 4800 Hz. Il campione realizzato con la colla invece pur avendo due picchi, con andamento caratteristico analogo, supera appena il valore di 0.6 di coefficiente di assorbimento.

Incuriositi dall'andamento particolare con due picchi a differenti frequenze, è stato scelto di effettuare le misure di coefficiente di assorbimento anche per il materiale sciolto, come effettuato per la lolla di riso. I risultati sono riportati in figura 17.



**Figura 17:** Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale per campioni di pellicola argentea di caffè sciolta

Le misure sul materiale sciolto sono state effettuate con le due tipologie di tubo 100 e 29 mm e i risultati sono stati combinati per avere un campo di frequenza 200 - 6400 Hz.

In generale, questo tipo di materiale è molto efficace a frequenze medie-alte. Considerando uno spessore totale del materiale di circa 2 cm il primo valore di picco è di circa 0,83 a 3000 Hz. Spessori superiori causano un miglioramento delle proprietà di assorbimento grazie all'aumento della resistività flusso: infatti l'ampiezza dei picchi cresce con valori crescenti di spessori, soprattutto l'ampiezza del secondo picco. Per uno spessore di 3,5-4 cm il secondo picco presenta valori di coefficiente di assorbimento 1,0. La differenza dell'ampiezza dei due picchi diminuisce ulteriormente con l'aumento dello spessore del campione.

#### 4.4.1.5 Fibra di gomma

La figura 18 mostra l'andamento della curva relativa al coefficiente di assorbimento dei campioni di diametro pari a 29 mm, realizzati tramite pressatura a freddo e costituiti da fibra tessile ricavata da riciclo di pneumatici fuori uso.

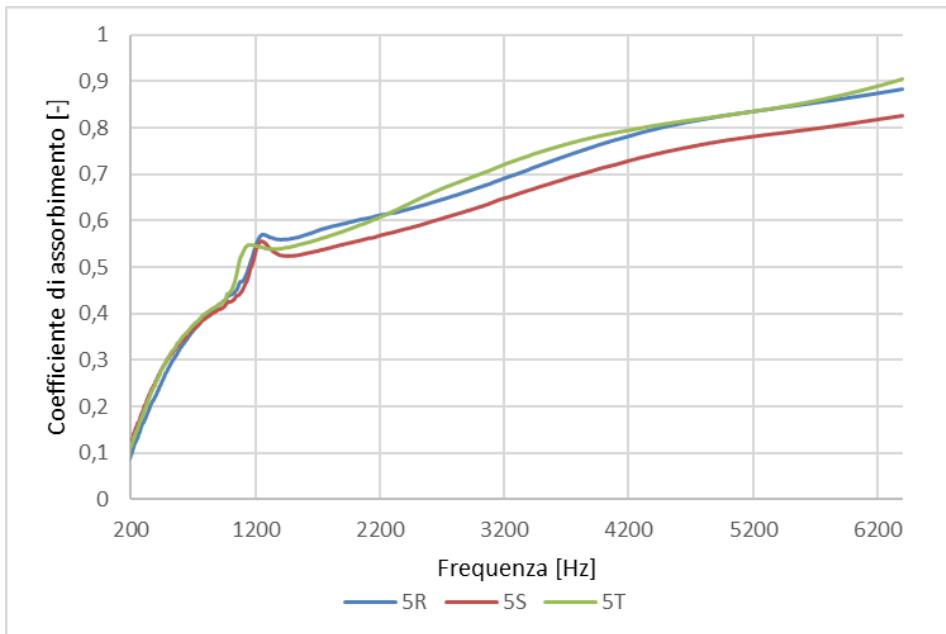


Figura 18: Andamento del coefficiente di assorbimento per i campioni di fibra tessile 5R, 5S, 5T

Si può notare che il materiale possiede un buon fonoassorbimento a tutte le frequenze di prova. In particolare, il coefficiente di assorbimento per incidenza normale  $\alpha$  è maggiore del valore 0,5 a tutte le frequenze maggiori di 1.000 Hz e raggiunge valori anche superiori a 0,8 per frequenze vicine ai 4.000 Hz.

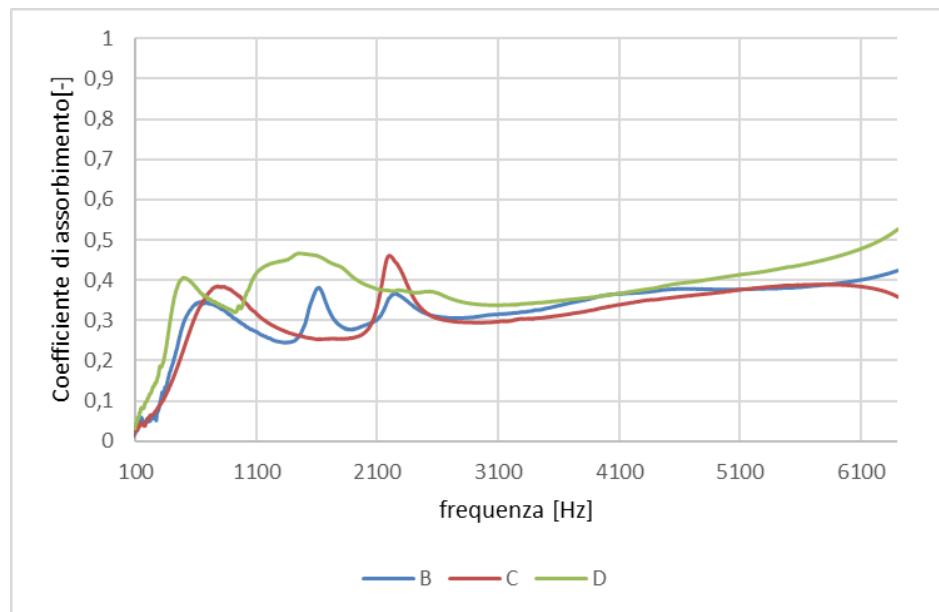
Infine, si sottolinea come la regolarità delle superfici di questi campioni ha permesso di ottenere un'ottima ripetibilità delle misure. Gli andamenti delle curve sono molto vicini fra loro e le piccole differenze dipendono solo dallo spessore dei campioni.

#### 4.4.1.6 Campioni in carta da macero, TNT e fibre tessili

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove effettuate su diverse tipologie di campioni.

I campioni B, C e D sono stati confrontati in un unico grafico (figura19) poiché presentano la stessa stratigrafia costituita da materiale poroso in superficie e cartone in corrispondenza della zona centrale, unica caratteristica che li differenzia è lo spessore

complessivo, che può variare da 1.3 a 1.8 cm. Si osservano picchi di assorbimento alle frequenze medio – basse, che variano in base allo spessore del campione. Per la medesima tipologia di campione, ma diversi provini, si possono avere anche delle leggere variazioni probabilmente dovute alle caratteristiche superficiali e spessori differenti. L’andamento complessivo risulta comunque analogo con valori di  $\alpha$  crescenti che tendono ad un coefficiente di assorbimento di 0.4 – 0.5 a 6400 Hz.



**Figura 19: Andamento del coefficiente di assorbimento per i campioni B,C D**

Il campione G, i cui risultati sono riportati in figura 20, è realizzato in materiale omogeneo non stratificato costituito da particelle di dimensioni ridotte rispetto al diametro del campione. Il coefficiente di assorbimento è più stabile, con andamento crescente all'aumentare della frequenza. I valori massimi di  $\alpha$  si hanno alla frequenza di 1600 Hz (0.98). I campioni E ed F, i cui risultati sono riportati in figura 21 presentano un andamento del coefficiente di assorbimento alle basse e medie frequenze molto irregolare. L’andamento si stabilizza intorno ai 2700 Hz, presentando comunque valori molto bassi. I valori di picco sono di 0.4 per il campione E e 0.53 per il campione F.

Globalmente quindi i campioni realizzati interamente con carta da macero non hanno mostrato buone caratteristiche di fono assorbimento ad esclusione del campione G.

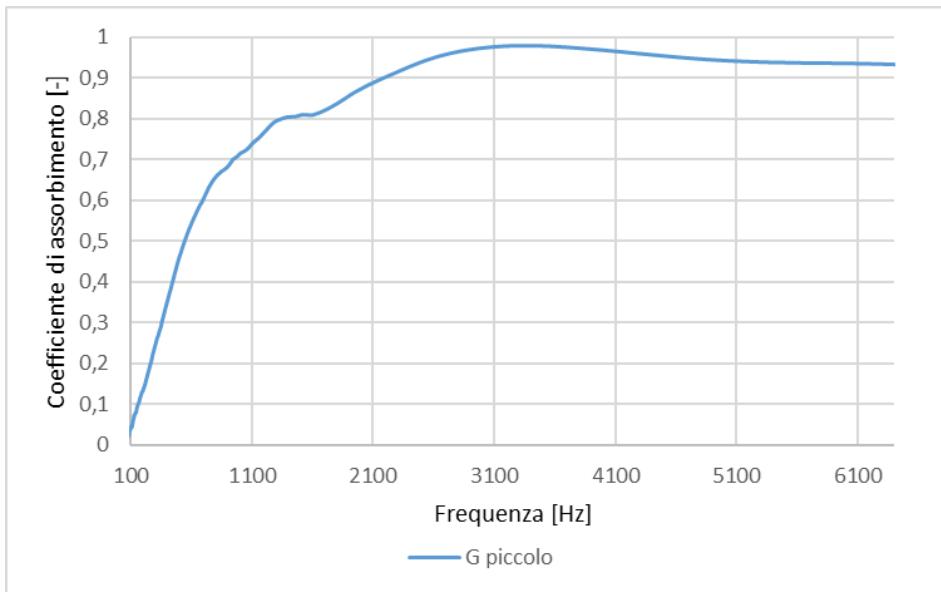


Figura 20: Andamento del coefficiente di assorbimento per il campione G

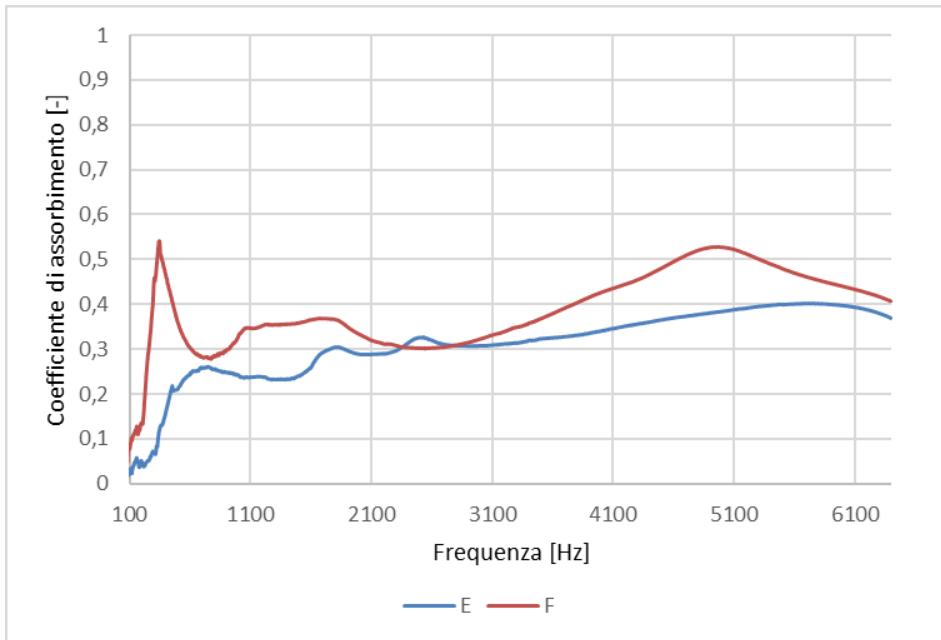


Figura 21: Andamento del coefficiente di assorbimento per i campioni E ed F

#### 4.4.2 Potere fonoisolante o TransmissionLoss

I risultati delle prove del potere fonoisolante, o Transmission Loss, sono di seguito riportati, considerando separatamente quelli ottenuti con tubo da 29 mm e da 100 mm di diametro.

In generale, la tecnica di realizzazione dei campioni con collante nebulizzato ha permesso di mettere in risalto le caratteristiche fonoassorbenti dei materiali, ma è risultata meno adatta quelle per quelle fonoisolanti. Al contrario, la tecnica di assemblaggio attraverso pressatura ad elevata temperatura, che come visto nel capitolo 3 ha condizionato negativamente le caratteristiche fonoassorbenti dei materiali, in questo caso risulta più idonea delle altre al fine di ottenere un miglior isolamento acustico.

##### 4.4.2.1 Lolla di riso

La figura 22 mostra l'andamento della curva relativa al potere fonoisolante in funzione della frequenza per i campioni di lolla di riso assemblati per mezzo di collante di diametro di 100 mm.

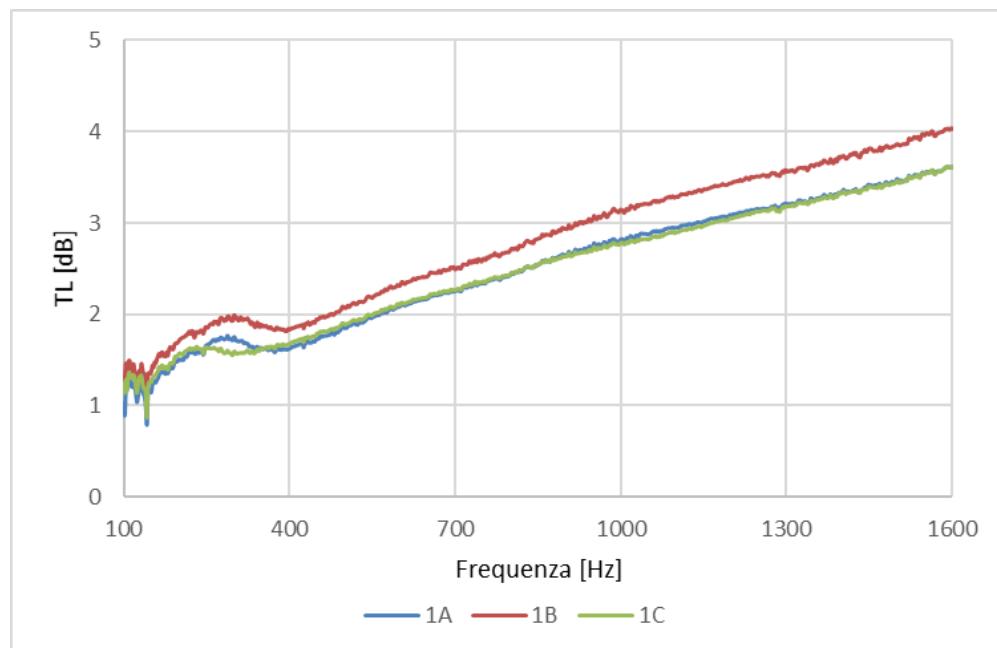


Figura 22: Andamento del potere fonoisolante per i campioni di lolla di riso 1A, 1B, 1C

Come si evince dalla figura 22, considerando frequenze minori di 1.600 Hz, il potere fonoisolante dei campioni di lolla di diametro di 100 mm varia tra 2 e 4 dB.

I campioni di lolla di tale diametro, come anticipato all'interno del terzo capitolo del presente lavoro di tesi, sono stati realizzati solo attraverso l'uso di collante, data l'impossibilità di assemblarli con le altre tecniche.

#### 4.4.2.2 Granulato di gomma

La figura 23 presenta l'andamento del potere fonoisolante per i campioni di granulato di gomma, realizzati con collante, di diametro pari a 100.

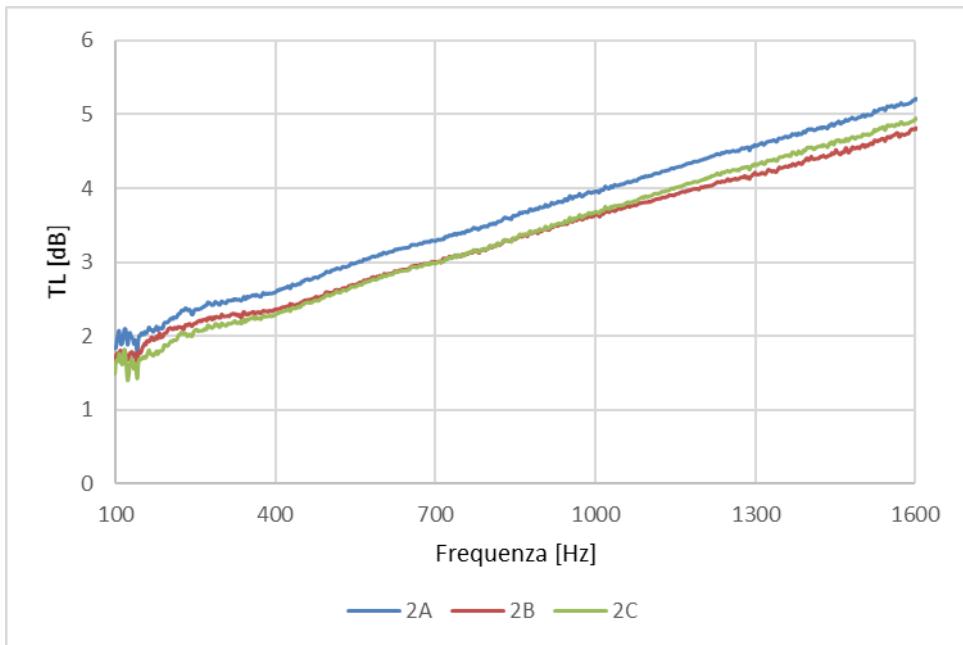


Figura 23: Andamento del potere fonoisolante per i campioni di granulato di gomma 2A, 2B, 2C

I risultati ottenuti dalle prove su campioni di questo tipo di materiale sono leggermente migliori rispetto a quelli ottenuti sulla lolla di riso. In particolare, come si evince dalla figura 23, il potere fonoisolante dei campioni di diametro di 100 mm e costituiti da granulato di gomma varia tra 2 e 6 dB nell'intervallo di frequenze 0 – 1.600 Hz.

Anche per il granulato di gomma sono stati realizzati solo campioni attraverso l'uso di collante, per questo motivo valgono le stesse considerazioni esposte per i campioni di lolla di riso.

#### 4.4.2.3 Granulato di sughero

I risultati ottenuti sui campioni costituiti da granulato di sughero sono illustrati in figura 24, riferite alle misure effettuate nel tubo di diametro interno pari a 100. In questo caso, i campioni di diametro di 100 mm testati sono di due tipologie: il 3C, assemblato per mezzo di collante, e il 3H, realizzato attraverso pressatura ad elevata temperatura.

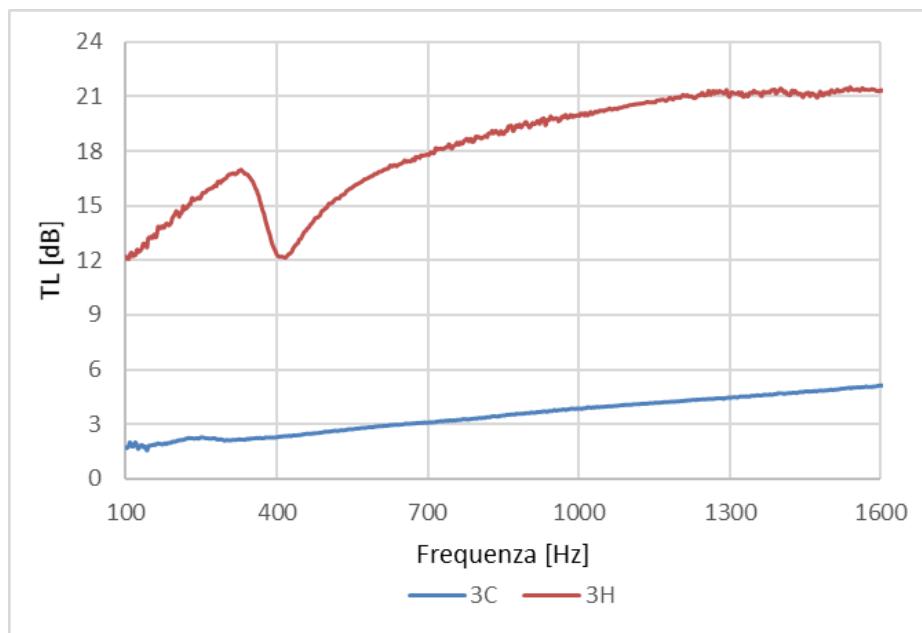


Figura 24: Andamento del potere fonoisolante per i campioni di granulato di sughero 3C e 3H

La figura 24 evidenzia che, mentre per il campione 3C i risultati sono simili a quelli ottenuti con il granulato di gomma, per il campione 3H il potere fonoisolante raggiunge anche valori superiori a 20 dB per frequenze maggiori di 1.000 Hz.

Come anticipato, la tecnica realizzativa ha inciso sui risultati più dello stesso tipo di materiale utilizzato. La pressatura ad elevata temperatura ha permesso, infatti, di ottenere migliori risultati rispetto alle altre tecniche da un punto di vista del fonoisolamento. Gli elevati gradi di compattazione, abbinati alle elevate temperature raggiunte in fase

realizzativa hanno modificato la struttura interna del materiale comportando solo benefici al campione.

Al contrario di quanto osservato nel caso del fonoassorbimento, la parziale occlusione dei pori interconnessi, non ha causato effetti negativi dal punto di vista dell'isolamento acustico, che non è interessato a valori di porosità elevati, ma solo ad una riduzione della componente trasmessa dell'onda incidente.

#### 4.4.2.4 Pellicola argentea di caffè

Le figure 22 e 23 presentano l'andamento del potere fonoisolante per i campioni realizzati con pellicola argentea di caffè di diametro 100 e 29 mm.

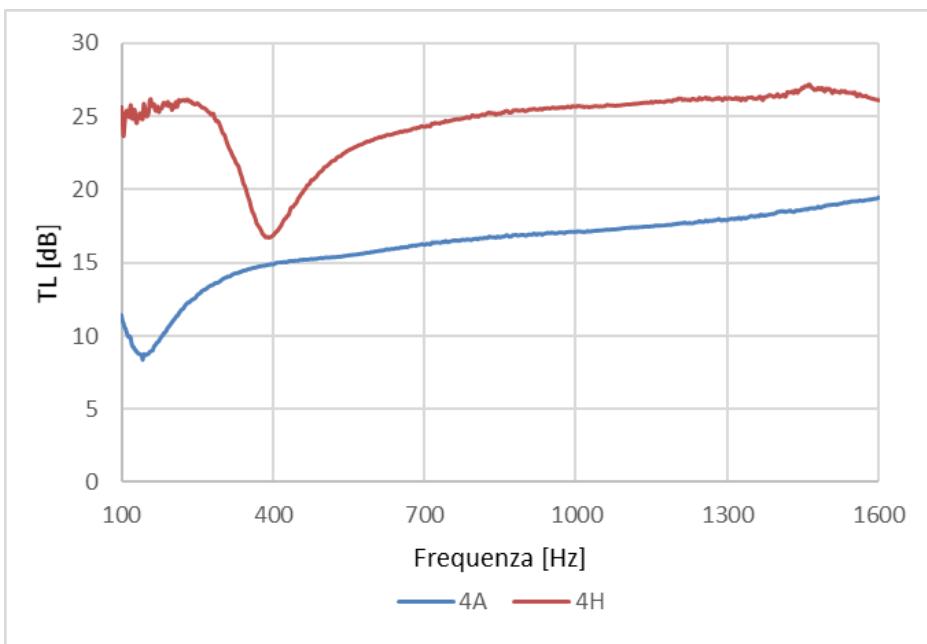


Figura 25: Andamento del potere fonoisolante per i campioni di pellicola argentea di caffè 4A e 4H

La figura 25 illustra le curve rappresentanti l'andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza nell'intervallo 200 – 1.700 Hz, dei campioni 4A, assemblato grazie all'utilizzo di un collante, e 4H, realizzato tramite pressatura ad elevata temperatura.

Come per il sughero, anche per la pellicola argentea di caffè il campione realizzato con pressa a caldo possiede migliori caratteristiche fonoisolanti. Anche in questo caso valgono le stesse considerazioni fatte precedentemente sulla modalità realizzativa.

#### 4.4.2.5 Fibra di gomma

La figura 26 mostra l'andamento del potere fonoisolante per il campione 5T costituito da fibra tessile derivante da riciclo dei pneumatici ed avente diametro pari a 29 mm. Anche in questo caso la misura sui campioni piccoli è risultata poco affidabile e la curva del potere fonoisolante presenta un andamento poco regolare con picchi anomali alle alte frequenze.

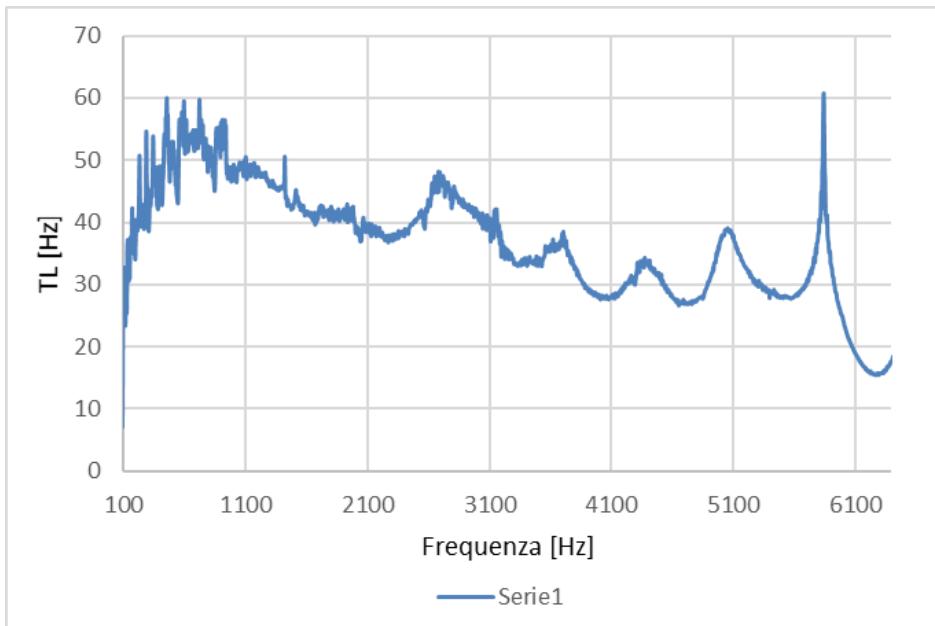


Figura 26: Andamento del potere fonoisolante per il campione di fibra tessile 5T

#### 4.4.2.6 Campioni in carta da macero, TNT e fibre tessili

Si riportano, infine, gli andamenti in frequenza della Transmission Loss confrontando i diversi campioni che hanno come base la carta da macero.

In figura 27 si rappresenta l'andamento complessivo da 100 a 6400 Hz, ottenuto attraverso le misure sui campioni di diametro da 29 mm.

I comportamenti dei campioni B, C, D ed E sono analoghi e presentano perdite di Transmission Loss in corrispondenza delle stesse frequenze: questo è imputabile alla stessa tipologia del materiale di base di cui sono costituiti (carta da macero compressa). Il campione F presenta un andamento singolare, probabilmente a causa della presenza di due materiali molto differenti, plastica e cartone. Il materiale plastico è posto in corrispondenza del perimetro del provino ed avvolge completamente il cartone compresso di cui è costituito. La non perfetta aderenza tra i due elementi è stata parzialmente colmata apportando plastilina.

Il campione G è quello che maggiormente si differenzia per effetto della natura stessa del materiale. Presenta valori più elevati di TL, l'andamento è crescente e si raggiungono i 40 – 45 dB alle alte frequenze.

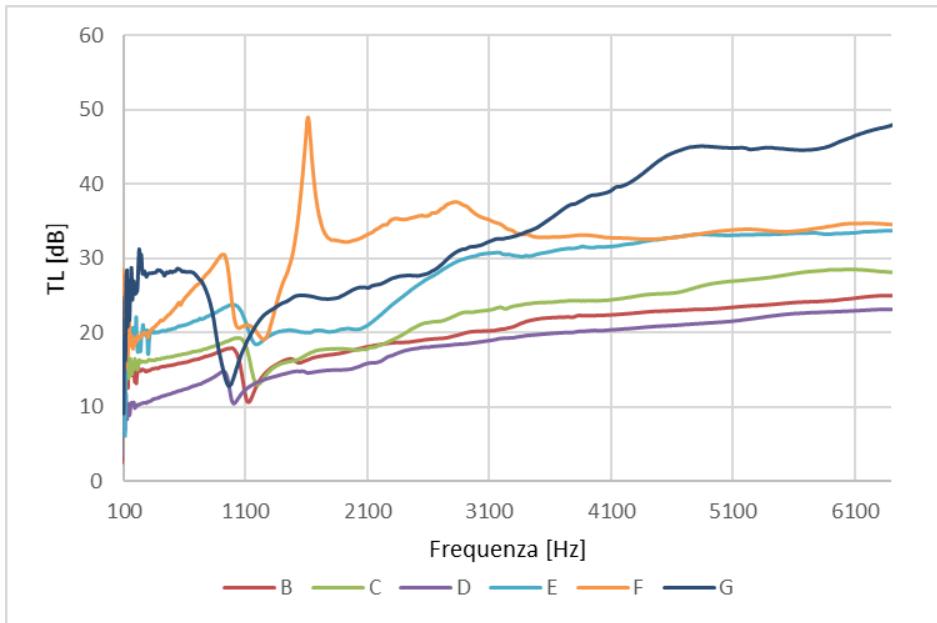


Figura 27: Andamento del potere fonoisolante per i campioni in carta da macero TNT e scarti di fibre tessili

## Bibliografia

- [1] L. Mattevi – Assorbimento acustico, manuale tecnico-pratico; [www.inquinamentoacustico.it;](http://www.inquinamentoacustico.it;)
- [2] SEI – Coefficiente di assorbimento acustico dei materiali;progettazione-costruzioni-impianti, Aprile 2012 : 27\_4; ;
- [3] Farina – Misura assorbimento acustico; Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Parma, 2011;
- [4] UNI EN ISO 15186-1:2003 Acustica - Misurazione mediante intensità sonora dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazione in laboratorio;
- [5] UNI EN ISO 354: 2003 Acustica – Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante
- [6] G. Amadasi – Kundt tube: acoustic absorption and transmission loss; SCS EuroAcoustics,Technical note (<http://www.scs-controls.com/systems/pdf/SCS-MT-PRO-KIT-ABSORPTION.pdf>) ;
- [7] P. Ruggeri, Analisi teorico-sperimentale delle caratteristiche di fonoassorbimento di materiali, tesi di dottorato, Unipd XXIV ciclo;
- [8] UNI EN ISO 10534:2001, Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza – Parte 1: Metodo con le onde stazionarie; Parte 2: Metodo della funzione di trasferimento
- [9] P. Datt, J.C Capil, A. Kumar, P.K. Srivastava – Experimental measurements of the acoustical properties and inverse characterization of its geometrical parameters; Applied Acoustics 101 (2016) 15-23;
- [10]Ciriaf – Misure in tubo ad onde stazionarie del coefficiente di assorbimento acustico e di potere fonoisolante per incidenza normale di materiali di cartone; Università degli Studi di Perugia (2012);
- [11]D. Turo, J. Vignola, A. Glean - Impedance Tube Part. 1, Surface impedance, reflection and absorption coefficient measurements; The Catholic University of America (2012) Washington D.C.;
- [12]ISPESL – Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro, Manuale di buona pratica 16-12-2004, rev Agosto 2009, conferenza dei presidenti delle regioni e delle province autonome
- [13]R. E. Halliwell, A.C.C Warnock – Sound transmission loss: comparison of conventional techniques with sound intensity techniques; The journal of the Acoustical Society of America, vol. 77 (1985) 2094-2103;
- [14]UNI EN ISO 10140-2:2010Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Part 2: Misurazione dell'isolamento acustico per via aerea

---

[15]F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. D'Alessandro – Evaluation of the acoustic properties of materials made from recycled tyre granulates; Inter-noise Istanbul, 28-31 august 2007;



## **Capitolo 5 Caratterizzazione dei parametri non acustici resistenza al flusso, porosità e tortuosità: metodologia e risultati**

Per completare la caratterizzazione fisica dei campioni sono state realizzate alcune strumentazioni necessarie alla misurazione di due importanti proprietà non acustiche, proprie dei materiali porosi, necessarie a stimare, mediante metodi di calcolo, il coefficiente di assorbimento dei campioni:

- la resistenza al flusso, ovvero la capacità di un materiale poroso a non lasciarsi attraversare da un flusso d'aria;
- la porosità, ossia il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale del campione.

Per testare la resistenza al flusso dei campioni sono stati utilizzati i dischi di dimensioni 100 mm; per testare la porosità invece sono stati utilizzati i campioni da 29mm. Sono stati testati tutti i campioni testati anche per la caratterizzazione acustica, tranne il campione realizzato con la metodologia pressa a freddo e legante, nello specifico quello realizzato con due strati di carta da macero pressati e incollati più fiocchi di carta all'interno.

Grazie alle informazioni ottenute attraverso queste prove, è stato possibile, in seguito, ricavare anche una terza proprietà non acustica:

- la tortuosità, un parametro che indica la complessità del cammino dell'onda che si propaga nel materiale.

### **5.1 Resistenza al flusso**

La resistenza al flusso è l'attitudine di un materiale a non lasciarsi attraversare da un flusso d'aria e, grazie alla sua misura sperimentale, si è in grado di quantificare indirettamente la dissipazione di energia sonora all'interno di un materiale. Questo parametro tiene conto della viscosità dell'aria ed è un rivelatore indiretto di alcune caratteristiche strutturali del materiale. tale parametro è espresso in  $[(\text{Pas})/\text{m}^3]$  ed è definito [1] come nella seguente equazione (1)

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (1)$$

dove

$\Delta p$  è la differenza di pressione valutata tra le due facce del campione;

$q_v$  è la portata d'aria che attraversa il campione.

### 5.1.1 Metodi di misura della resistenza al flusso

La misura della resistenza al flusso può avvenire attraverso metodi diretti o comparativi. Per la stima di questo parametro tramite metodi diretti, si calcola il rapporto tra i risultati di due misurazioni distinte: una di pressione differenziale ed una di portata. La stima tramite metodi comparativi necessita, invece, di due misurazioni di pressione differenziale.

I metodi diretti sono definiti dalla norma UNI EN 29053 [1], che li suddivide in:

- Metodo con flusso d'aria continuo (figura 1)
- Metodo con flusso d'aria alternato

Il metodo con flusso d'aria continuo utilizza un provino a forma di cilindro o di parallelepipedo rettangolo. Il provino è attraversato da un flusso d'aria continuo unidirezionale. Si misura la caduta di pressione tra le due facce libere del provino [1,2]. La figura 1 mostra lo schema del metodo con flusso d'aria continuo descritto dalla norma UNI EN 29053[1].

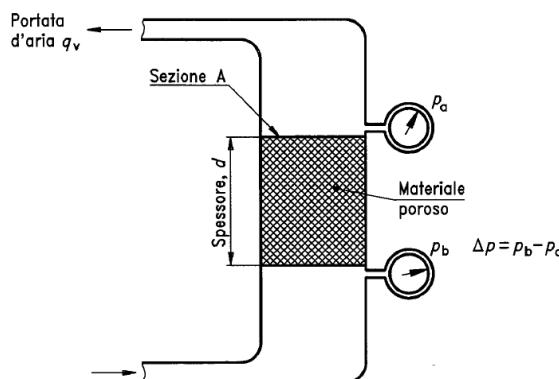


Figura 1: schema del metodo di misurazione a flusso continuo [1]

Esistono più varianti di questa tipologia di metodo.

La prima fu proposta da Morse, Bolt e Brown e prevede che si mantenga un flusso d'aria stazionario attraverso il campione da testare [3]. Si fa fuoriuscire acqua da un sistema a depressione costituito da un serbatoio, in modo da creare un flusso d'aria attraverso il campione. Si assume che la portata d'acqua fuoriuscita dal serbatoio sia uguale alla portata d'aria che attraversa il campione. La variazione di pressione attraverso il materiale è misurata con un manometro differenziale. La resistenza al flusso si ottiene dal rapporto tra la variazione di pressione misurata e la portata d'aria che attraversa il campione.

Nel 1945, Leonard [4] realizzò un diverso dispositivo di misura. Esso prevede l'uso di una bilancia a due bracci: un braccio sostiene un cilindro avente il bordo inferiore immerso in un disco di kerosene, che funge da guarnizione liquida per l'aria confinata tra il campione in prova e lo stesso cilindro. Aggiungendo o sottraendo massa dall'altro braccio della bilancia, si determina la traslazione del cilindro e l'attraversamento del campione da parte di un flusso d'aria. Il salto di pressione è calcolato dal rapporto tra la massa moltiplicata per l'accelerazione di gravità e l'area della sezione interna del cilindro. La portata volumetrica d'aria che attraversa il campione è, invece, data dal prodotto nel tempo di prova, tra spostamento verticale del cilindro ed area della sezione interna del cilindro. È necessario che la spinta idrostatica sulla porzione di cilindro immersa sia minima. Quindi le pareti del cilindro devono essere sottili ed il fluido utilizzato come guarnizione liquida deve avere bassa viscosità.

In alternativa al metodo a flusso continuo, è possibile utilizzare il metodo a flusso alternato.

Tale metodologia fu proposta da James [1] nel 1969. In questo caso, il campione, di forma cilindrica o di parallelepipedo rettangolo, è investito da un flusso d'aria lento alternato, prodotto da un pistone avente moto sinusoidale con frequenza di circa 2 Hz. Si misura la componente alternata di pressione nel volume di prova delimitato dal provino attraverso l'uso di un microfono a condensatore.

Oltre ai metodi diretti, esistono anche metodi comparativi [5]. Questi prevedono l'uso di due elementi resistivi, che vengono disposti in serie lungo la linea dell'aria e sono investiti da una corrente stazionaria di portata  $q_v$ . Tramite due trasduttori differenziali di pressione, si misura la caduta di carico in ognuno dei due elementi resistivi. Poiché la portata  $q_v$  è costante lungo la linea, si avrà secondo l'equazione (2) che:

$$q_v = \frac{\Delta p_c}{R_c} = \frac{\Delta p_x}{R_x} \quad (2)$$

dove

$\Delta p_c$  è la caduta di carico attraverso l'elemento resistivo noto

$\Delta p_x$  è la caduta di carico attraverso il campione in prova

$R_c$  è la resistenza al flusso dell'elemento resistivo noto

$R_x$  è la resistenza al flusso del campione di prova

Il valore della resistenza al flusso del campione di prova è espresso secondo l'equazione (3).

$$R_x = R_c \frac{\Delta p_x}{\Delta p_c} \quad (3)$$

Utilizzando la legge di Poiseulle sono facilmente calcolabili le perdite di pressione relative, ad esempio, a dei tubicini di vetro. La misurazione rappresenta la resistenza al flusso nota, necessaria al calcolo della portata  $q_v$ .

Il vantaggio dei metodi comparativi è l'assenza della necessità di misurare direttamente la portata d'aria. Infatti, utilizzando due trasduttori elettronici di pressione è possibile acquisire i dati tramite un calcolatore, con la possibilità di ottenere l'andamento della resistenza al flusso del campione, in funzione della portata.

### 5.1.2 Realizzazione apparato sperimentale di misura della resistenza al flusso

Per misurare la resistenza al flusso d'aria dei campioni è stato utilizzato un metodo diretto con flusso continuo, ovvero il “metodo A” descritto dalla norma UNI EN 29053 [1]. Il metodo prevede che venga mantenuto un flusso d'aria unidirezionale stazionario attraverso il campione da testare e che si misuri la differenza di pressione tra le facce libere del provino.

La normativa prevede che l'apparecchiatura di misura sia costituita dai seguenti componenti:

- una cella di misurazione nella quale posizionare il provino;
- un dispositivo per la produzione del flusso d'aria costante;
- un dispositivo per la misurazione della portata d'aria;
- un dispositivo per la misurazione della differenza di pressione tra le due facce del provino.

Inoltre, la normativa pone alcuni vincoli per la scelta degli strumenti da utilizzare. La cella di misurazione deve avere forma cilindrica e il suo diametro deve essere maggiore

di 95 mm. L'altezza totale della cella deve essere maggiore di almeno 100 mm rispetto all'altezza del provino. Il supporto sul quale poggiare il provino deve avere una superficie forata non inferiore al 50% e il diametro dei suoi fori non deve essere minore di 3 mm. Per la produzione del flusso d'aria è permesso l'utilizzo di qualsiasi sistema che non contamini l'aria e che possa garantire una regolazione della velocità del flusso fino ad un valore massimo di 0,5 mm/s. Inoltre, la normativa specifica che per la misurazione della differenza di pressione tra le facce del provino, è necessario utilizzare uno strumento che sia in grado di leggere pressioni con la precisione del decimo di Pascal con un'accuratezza di +/- 0,5% rispetto al valore indicato [1].

Considerate le prescrizioni indicate in normativa, è stato realizzato appositamente uno strumento composto dai seguenti elementi:

- un cilindro chiuso inferiormente nel quale poter alloggiare il campione, dotato di due prese di pressione;
- una tanica dotata di rubinetto a sfera da  $\frac{1}{2}$ " per la produzione del flusso d'aria;
- un tubo in gomma del diametro di 6 mm, necessario a collegare serbatoio e cilindro;
- un manometro differenziale.

Il cilindro è chiuso inferiormente, ha un diametro interno pari a 100 mm e un'altezza totale di 300 mm. All'interno del cilindro, a 180 mm dal fondo, è stato realizzato un alloggiamento per i campioni da testare. Sono inoltre presenti due prese di pressione, una al di sopra e una al di sotto dell'alloggiamento per i campioni. In figura 2 è rappresentata la configurazione di prova utilizzata.

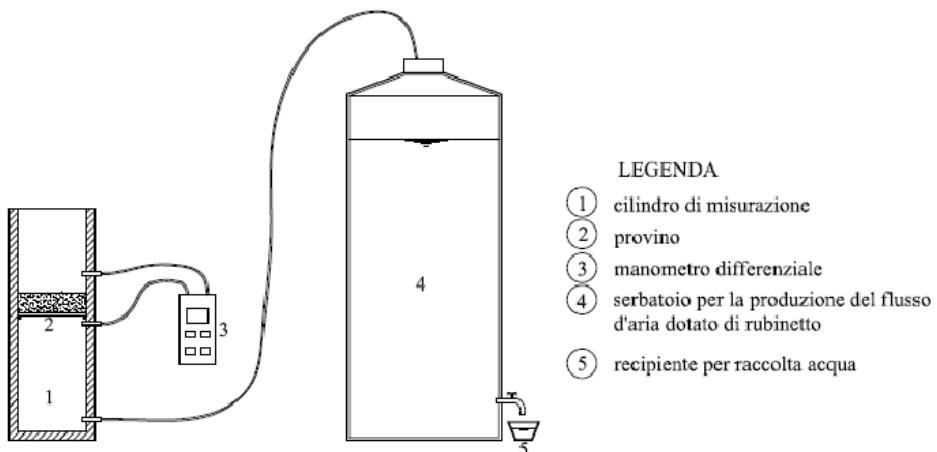


Figura 2: Schema della strumentazione realizzata per la misura della resistenza al flusso d'aria

Per la produzione del flusso d'aria è stato utilizzato un sistema a depressione, costituito da una tanica di capacità pari a 25 litri, dotato di un rubinetto a sfera da  $\frac{1}{2}$ ". Il serbatoio è stato collegato al cilindro di vetro tramite un tubo in gomma da  $\frac{1}{2}$ ". Per la misura della pressione si è utilizzato un manometro differenziale modello Dwyer477AV. In tabella 1, sono riportate le caratteristiche principali del manometro.

**Tabella 1: Principali caratteristiche tecniche del manometro utilizzato**

Parametro	Specifiche
Accuratezza	+/- 0,5%
Range di pressione	0 – 966 Pa
Pressione massima misurabile	5 psi(pound per squareinch)

Prima di iniziare la prova, il campione è stato posizionato nell'apposito alloggiamento all'interno del cilindro e la tanica è stata riempita d'acqua. Quindi è stato preparato il contenitore per raccogliere l'acqua ed è stato aperto il rubinetto. La fuoriuscita d'acqua ha generato un flusso d'aria costante, che ha attraversato il campione dall'alto verso il basso.

Assumendo che la portata d'aria sia uguale alla portata d'acqua fuoriuscita dal rubinetto, si è ottenuto il valore di quest'ultima calcolando il rapporto tra il volume d'acqua raccolto nel recipiente e il tempo di prova. Spostando il recipiente dal flusso d'acqua uscente dal rubinetto, si è posto termine alla prova ed è stato annotato il tempo indicato dal cronometro.

La portata volumetrica d'aria  $q_v$  che ha attraversato il campione è stata ottenuta attraverso la l'equazione (4)

$$q_v = \frac{P}{\rho t} \quad (4)$$

dove

$P$  è il peso dell'acqua raccolta nella bacinella durante la prova

$t$  è il tempo di prova

$\rho$  è la densità dell'acqua

Per tutta la durata della prova, il manometro differenziale ha permesso di conoscere la differenza di pressione fra le prese a monte e a valle del campione. La resistenza al flusso d'aria  $R$  [Pa s / m<sup>3</sup>] è stata ottenuta utilizzando l'equazione (1).

Le operazioni descritte sono state svolte per tutti i campioni di diametro di 100 mm e per ogni tipo di materiale sciolto. Per sostenere i granuli sciolti, è stata adoperata una griglia con maglie di dimensioni di 5 mm. Ogni prova è stata ripetuta tre volte per verificare la riproducibilità dei risultati.

## 5.2 La porosità

La porosità è definita come il rapporto tra il volume d'aria contenuto nei pori e il volume complessivo del materiale [5], espressa in equazione (5).

$$\Omega = \frac{V_{PORI}}{V_{totale}} \quad (5)$$

Quando il suono si propaga in un materiale poroso, l'aria per muoversi ha a disposizione solo lo spazio non occupato dalla struttura solida. Tuttavia, non tutta l'aria contenuta in un materiale partecipa alla propagazione del suono, infatti una parte di essa è o confinata in "sacche" interne al materiale non accessibili all'aria esterna oppure va a riempire pori senza uscita (pori non interconnessi), creando canali in cui l'elasticità dell'aria è troppo bassa perché l'onda si propaghi in essi. Occorre, quindi, considerare tali zone come non disponibili e solo l'aria contenuta nei pori interconnessi [5].

### 5.2.1 Metodi di misura della porosità

Esistono diversi metodi per la misura della porosità. Essi si distinguono in base alle seguenti caratteristiche:

- mezzo utilizzato per saturare i pori del materiale: aria o acqua;
- metodo di calcolo del volume d'aria interno al campione: diretto o indiretto.

I metodi che prevedono la saturazione del campione con aria sono preferibili, in quanto è più difficile saturare completamente i pori con acqua e, l'impossibilità di sapere se e quando tutta l'aria è stata sostituita da acqua, porta facilmente a sottostimare il valore della porosità.

I metodi più comuni vengono riportati in tabella 2.

**Tabella 2: Metodi di misura della porosità e dipendenza dalla presenza di sacche d'aria e di pori interconnessi**

Metodi di misura	il valore della porosità tiene conto di	
	sacche d'aria	pori non-interconnessi
Porosimetro di Beranek [6]	<i>no</i>	<i>si</i>
Fluidi di riempimento	<i>no</i>	<i>si</i>
Picnometro a elio	<i>in parte</i>	<i>si</i>
Fluidi di riempimento	<i>no</i>	<i>si</i>
Metodo dell'immersione	<i>no</i>	<i>si</i>
Prova distruttiva	<i>si</i>	<i>si</i>
Metodo dinamico di Leonard [7]	<i>no</i>	<i>no</i>

L'unico metodo, tra quelli qui presentati, che misura il valore acustico della porosità, è quello dinamico, proposto da Leonard [7].

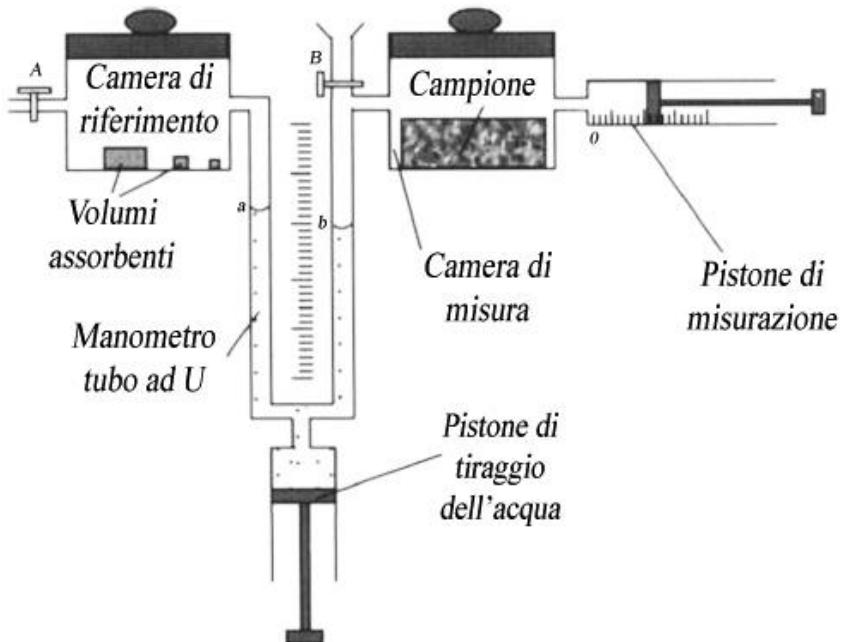
### **5.2.2 Realizzazione apparato sperimentale di misura della porosità**

Per misurare la porosità dei campioni è stata adottata la metodologia proposta da Umnova, Horoshenkov e Maillet [8]. Questo metodo prevede che la porosità venga misurata attraverso una comparazione di volumi.

La misurazione è stata effettuata grazie ad uno strumento appositamente realizzato e composto dai seguenti elementi:

- una camera di misurazione in cui alloggiare il campione da testare;
- una camera di riferimento di dimensioni leggermente maggiori rispetto alla camera di misurazione;
- un pistone di misurazione;
- un pistone di tiraggio dell'acqua;
- un manometro ad U;
- due valvole.

In figura 3 è schematizzata la configurazione di prova realizzata.



**Figura 3: Schema realizzativo metodo di comparazione di volumi per la misura della porosità [8]**

Prima di svolgere la prova è stato necessario effettuare la calibrazione dello strumento. Questa fase preliminare è servita per equalizzare i volumi delle due camere in assenza del campione da testare. Tenendo le due valvole inizialmente aperte, è stato riempito il manometro con acqua e nella camera di riferimento è stato introdotto del materiale non poroso (acciaio) fino ad egualare il volume d'aria disponibile nella camera di misura. La taratura è stata considerata ultimata una volta raggiunto l'equilibrio dei volumi delle due camere, ovvero quando la differenza fra il livello dell'acqua nei due bracci del manometro è risultata essere uguale a zero.

Terminata la fase di calibrazione, tenendo le valvole aperte, è stato inserito il campione da testare nella camera di misurazione. La riduzione di volume in questa camera, dovuta all'introduzione del campione, è stata compensata grazie al pistone di misurazione. Infatti, tirare lo stantuffo del pistone di misurazione, di una quantità pari al volume del campione inserito, equivale a riportare a zero la differenza di livello fra i due menischi del manometro. Successivamente le valvole sono state nuovamente chiuse.

A questo punto, è stato tirato lo stantuffo del pistone di “tiraggio dell'acqua”. Questa operazione ha determinato, nel sistema realizzato, una variazione di pressione, tradotta in una variazione della differenza di livello tra i due menischi d'acqua nel manometro. Tale

differenza di livello, dovuta all'operazione di tiraggio dell'acqua da parte del pistone, corrisponde al volume dei vuoti del campione testato.

È stato possibile, così, calcolare la porosità secondo quanto previsto dall'equazione (5).

### **5.3 Calcolo della Tortuosità**

La tortuosità riveste un ruolo di fondamentale importanza per la comprensione dei processi che regolano la propagazione sonora nei materiali porosi [9,10,11]. In particolare, essa descrive la complessità del cammino dell'onda che si propaga nel materiale. Questo parametro è, inoltre, definito in equazione (6) come il limite, a frequenze finite, del rapporto tra la velocità dell'onda acustica nel materiale e nell'aria.

$$\alpha_{\infty} = \left\{ \lim_{\omega^{-1/2} \rightarrow 0} \frac{c}{c_0} \right\}^{-2} \quad (6)$$

Per la valutazione della tortuosità sono stati proposti diversi metodi.

Nel 1980 Brown [11] ha proposto una tecnica basata sulla misura della resistività elettrica, saturando il mezzo con un fluido conduttore di resistività  $r_s$ . Definita  $r_f$  la resistività della struttura saturata, Il valore della tortuosità  $q$  è dato secondo l'equazione (7).

$$q = \Omega \frac{r_s}{r_f} \quad (7)$$

Il metodo di Brown è stato successivamente ottimizzato da Champoux e Stinson [5]. Successivamente, Allard et al. [11-12] hanno proposto un metodo di misura basato sul limite ad alta frequenza della velocità di fase all'interno del mezzo poroso. Il metodo si basa sulla misura della risposta all'impulso di un'onda acustica ultrasonica che attraversa un campione di materiale poroso. Dalla determinazione dello sfasamento tra l'onda che attraversa il materiale e la stessa onda che si propaga in aria, è possibile calcolare la velocità di fase all'interno del materiale e, quindi, la tortuosità.

Recentemente Attenborough e Fellah [11, 13] hanno proposto altre tecniche per calcolare questo parametro. La tecnica proposta dal primo si basa sulla misura ad alta frequenza del coefficiente di riflessione e trasmissione, quella proposta dal secondo, si basa sulla misura del coefficiente ad incidenza obliqua.

Spesso, la stima della tortuosità viene fatta attraverso espressioni empiriche espresse in funzione della porosità.

Per materiali fibrosi, è possibile utilizzare l'equazione (8) definita come formula di Tarnow [14].

$$q = 1 + (1 - \Omega) \quad (8)$$

Quest'equazione è stata utilizzata per il calcolo della tortuosità dei campioni realizzati con la fibra tessile ricavata dallo smaltimento degli pneumatici fuori uso.

Per materiali di tipo granulare, aventi granuli della stessa forma e dimensione, si può, invece, utilizzare l'equazione (9) definita come formula di Berryman[10].

$$q = 1 + \frac{1 - \Omega}{2\Omega} \quad (9)$$

Quest'equazione è stata utilizzata per il calcolo della tortuosità dei campioni realizzati con il granulato di gomma, granulato di sughero, lolla di riso, pellicola argentea di caffè, carta da macero;

## 5.4 Risultati

### 5.4.1 Resistenza al flusso

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla misurazione della resistenza al flusso "R", ottenuti grazie all'utilizzo dello strumento realizzato seguendo le direttive della norma UNI EN 29053 [1].

La difficoltà maggiore nell'eseguire tale prova è stata legata alla generazione di un flusso d'aria che fosse abbastanza lento da non influenzare i valori misurati.

Come riportato dalla normativa, i risultati più affidabili si ottengono generando una velocità del flusso d'aria minore o uguale a 0,5 mm/s, poiché per velocità maggiori, la misura della resistenza al flusso potrebbe essere influenzata dalla velocità dell'aria e ciò porterebbe a sottostimare i risultati.

Per la produzione del flusso d'aria, come illustrato al paragrafo 5.2.1.1, è stato utilizzato un serbatoio a depressione, poiché fra le possibili soluzioni indicate in normativa, è quella che permette di generare i valori più bassi e, quindi, più vicini a quello consigliato.

Nonostante l'utilizzo di tale modalità, il raggiungimento di valori di velocità così bassi è risultato di difficile attuazione e non sempre è stato possibile ottenere valori sufficientemente vicini a 0,5 mm/s.

Per questo motivo, per evitare di sottostimare la resistenza al flusso dei campioni, tra tutti i risultati ottenuti dalle prove svolte, si è scelto di considerare validi solo quelli corrispondenti al più piccolo valore di velocità dell'aria. Si evidenzia, comunque, che le misure di resistenza al flusso effettuate presentano una buona riproducibilità.

La tabella 3 mostra i risultati della resistenza al flusso dei campioni realizzati in laboratorio.

La tabella 4 invece quelli della resistenza al flusso misurati sui campioni realizzati industrialmente. Non è stato possibile misurare il campione F, in quanto il rivestimento di contenimento realizzato per non fare disperdere la cellulosa in fiocchi, ha leggermente aumentato il diametro del campione, dunque lo stesso non si inseriva facilmente nello strumento. Per quanto riguarda i campioni realizzati industrialmente non si conoscono le percentuali di colla utilizzate, perché non sono stati forniti dall'azienda. La classificazione dei campioni è quella illustrata al capitolo 3. Si riporta, invece, in appendice, la tabella contenente il riepilogo di tutte le misurazioni effettuate per questa prova sperimentale.

**Tabella 3: Riepilogo dei risultati ottenuti dalle prove di misura sperimentale della resistenza al flusso d'aria effettuate sui campioni realizzati in laboratorio**

Campione	S [mm]	% c. in V [%]	P H <sub>2</sub> O [g]	t [s]	Q H <sub>2</sub> O = Qa [m <sup>3</sup> /s]	V a [mm/s]	R [Pa s/m <sup>3</sup> ]
1A	18,04	2,69	61	9,15	6,667E-06	0,85	13500,00
1B	16,46	2,32	77	10,02	7,685E-06	0,98	11711,69
1C	17,47	1,83	57	9,97	5,717E-06	0,73	15742,11
1D	17,25	6,56	65	11,85	5,485E-06	8,30	18230,77
1E	17,1	9,96	49	10,30	4,757E-06	7,20	18918,37
1F	18,2	5,95	32	6,49	4,931E-06	7,47	18253,13
1R	15,05	0,00	54	11,72	4,608E-06	6,98	21703,70
1S	15,05	0,00	40	9,14	4,376E-06	6,63	22850,00
1T	15,4	0,00	60	13,24	4,532E-06	6,86	22066,67
2A	16,84	4,89	49	9,94	4,930E-06	0,63	20285,71
2B	16,21	5,84	44	10,02	4,391E-06	0,56	22772,73
2C	17,10	4,41	46	10,00	4,600E-06	0,59	21739,13
2D	18,80	10,84	28	7,79	3,594E-06	5,44	27821,43
2E	20,65	9,73	40	10,65	3,756E-06	5,69	26625,00
2F	19,40	8,69	33	8,90	3,708E-06	5,61	26969,67
3A	17,45	6,48	74	9,74	7,598E-06	0,97	11845,95
3B	15,91	5,10	67	9,91	6,761E-06	0,86	13311,94

3C	17,15	5,86	58	9,75	5,949E-06	0,76	16810,35
3D	18,20	4,37	39	8,02	4,863E-06	7,36	18507,69
3E	18,10	4,78	47	9,85	4,772E-06	7,22	18861,70
3F	20,05	10,54	48	10,29	4,665E-06	7,06	19293,75
3G	11,44	\	43	10,08	4,266E-06	0,54	210976,74
3H	10,00	\	43	10,03	4,287E-06	0,55	233255,81
3I	6,30	\	44	9,90	4,444E-06	0,57	202500,00
3L	10,00	\	41	10,40	3,942E-06	5,97	228292,68
3M	10,40	\	45	11,61	3,876E-06	5,87	232200,00
3N	11,25	\	42	10,55	3,981E-06	6,03	226071,43
3R	17,15	\	39	9,90	3,939E-06	5,96	25384,62
3S	16,15	\	42	10,78	3,896E-06	5,90	25666,67
3T	18,20	\	42	10,70	3,925E-06	5,94	25476,19
4A	9,38	5,55	41	9,83	4,171E-06	0,53	335658,54
4D	11,73	17,12	48	10,00	4,800E-06	7,27	604166,67
4G	9,35	\	42	9,98	4,208E-06	0,54	2162333,33
4H	9,00	\	43	9,95	4,322E-06	0,55	2151976,74
4I	10,00	\	44	9,97	4,413E-06	0,56	2084636,36
4L	9,30	\	45	10,55	4,265E-06	6,46	2156888,89
4M	9,10	\	42	9,59	4,380E-06	6,63	2123500,00
4N	10,00	\	44	10,02	4,391E-06	6,65	2117863,64
4R	12,25	\	49	10,44	4,693E-06	7,11	404816,33
4S	12,35	\	45	9,98	4,509E-06	6,83	421377,78
4T	11,10	\	47	10,19	4,612E-06	6,98	411936,17
5R	14,17	\	61	10,28	5,934E-06	8,98	15167,21
5S	14,62	\	60	10,23	5,865E-06	8,88	15345,00
5T	14,50	\	61	10,33	5,905E-06	8,94	15240,98
S=spessore % c. in V=percentuale colla in volume P=peso dell'acqua			T= tempo della prova Q H <sub>2</sub> O portata acqua Qa= portata aria			V a= velocità dell'aria R= resistenza al flusso	

**Tabella 4: Riepilogo dei risultati ottenuti dalle prove di misura sperimentale della resistenza al flusso d'aria effettuate sui campioni realizzati industrialmente**

Campione	S [mm]	P H <sub>2</sub> O [g]	t [s]	Q H <sub>2</sub> O = Q <sub>a</sub> [m <sup>3</sup> /s]	V <sub>a</sub> [mm/s]	R [Pa s/m <sup>3</sup> ]
B1	12	50	10,10	4,950E-06	0,630	484800,000
B2	12	40	10,04	3,984E-06	0,507	502000,000
B3	12	46	10,08	4,563E-06	0,581	504000,000
C1	12	40	10,03	3,988E-06	0,508	827475
C2	12	38	10,00	3,800E-06	0,484	842105,263
C3	12	37	9,60	3,854E-06	0,491	830270,270
D1	20	33	9,90	3,333E-06	0,424	870000,000
D2	20	32	9,80	3,265E-06	0,416	918750,000
D3	20	33	10,01	3,297E-06	0,420	910000,000
E1	10	45	10,12	4,447E-06	0,566	742133,333
E2	10	36	10,06	3,579E-06	0,456	754500,000
E3	10	40	10,08	3,968E-06	0,505	730800,000
G1	50	37	10,00	3,700E-06	0,471	27027,027
G2	50	40	10,02	3,992E-06	0,508	25050,000
G3	50	41	10,06	4,076E-06	0,519	24536,585
S=spessore P=peso dell'acqua		T= tempo della prova Q H <sub>2</sub> O portata acqua Q <sub>a</sub> = portata aria		V aria= velocità dell'aria R= resistenza al flusso		

In generale, per un materiale poroso, un elevato valore di resistenza al flusso è sinonimo di buon assorbimento. Tuttavia, non sempre campioni con una resistenza al flusso più elevata risultano anche i migliori da un punto di vista del fonoassorbimento. Ad esempio, un'eccessiva compattazione dei granuli che costituiscono il campione, porta a misurare un elevato valore di resistenza al flusso, che non si traduce, però, in una migliore attitudine ad assorbire i suoni.

Infatti, come si può notare dalla tabella 3, i valori maggiori di resistenza al flusso sono stati misurati per i campioni realizzati con pressatura a caldo. Questi campioni posseggono, infatti, una densità molto più elevata rispetto a quelli realizzati con le altre modalità, che impedisce all'aria di attraversare il campione con facilità.

Le elevate densità che si riscontrano per questo tipo di campioni sono sicuramente da attribuire ai maggiori gradi di compattazione e quindi alla maggior pressatura a cui sono stati sottoposti i materiali durante la fase realizzativa.

Considerando l'enorme influenza della modalità realizzativa sui valori di resistenza al flusso d'aria, per un giudizio sulla resistenza al flusso dei campioni realizzati, si ritiene più utile avvalersi dei risultati ottenuti sulla base di un confronto fra i campioni di diametro pari a 100 mm assemblati attraverso l'uso di collante.

Come si evince dalla tabella 3, fra i campioni appartenenti a questa categoria, i valori di resistenza al flusso più alti sono stati ottenuti con quelli costituiti da pellicola argentea di caffè. Il campione 4A possiede, infatti, una resistenza al flusso di un ordine di grandezza superiore rispetto agli altri realizzati con l'uso di collante.

Si evidenzia che non sono a disposizione in letteratura dati per verificare la corretta misurazione della resistenza al flusso di questo materiale.

Anche dalle prove effettuate su campioni di gomma sono stati misurati valori di resistenza al flusso elevati e nello specifico compresi tra circa 20.000 e 23.000 Pa s / m<sup>3</sup>. In particolare, il campione avente resistenza al flusso più elevata è risultato essere il 2B. Non essendoci particolari differenze di densità, compattazione o percentuale di collante fra i tre campioni, il risultato è probabilmente dovuto all'ottima fattura di questo campione, che presenta meno difetti di realizzazione. Inoltre, si precisa che il campione 2B possiede un grado di compattazione del 23%, che come riporta lo studio condotto da Horoshenkov [16] per granulato di gomma, rientra nell'intervallo ideale, del 20 % – 25 %, per ottenere i migliori risultati in termini di fonoassorbimento.

Al contrario della pellicola argentea di caffè, per la gomma sono disponibili in letteratura dati relativi alla misura di questo parametro da poter confrontare con i risultati ottenuti nel presente studio. Tali valori sono risultati simili a quelli riportati da altri studiosi per campioni dello stesso tipo [16].

I campioni di lolla e di sughero presentano valori molto simili di resistenza al flusso. Le misure di questo parametro hanno portato ad ottenere valori compresi tra 11.000 e 17.000 Pa s / m<sup>3</sup>. Come si può notare in tabella 3, i campioni di lolla raggiungono tali valori con una percentuale in volume di colla ed un grado di compattazione molto minori rispetto a quelli costituiti da granulato di sughero. Tale caratteristica potrebbe spiegare, come si vedrà in seguito in questo capitolo, i migliori risultati ottenuti con i campioni di lolla di riso in termini di fonoassorbimento. Come per la gomma, anche per la lolla di riso, è stato il campione con grado di compattazione del 23% circa, a riportare il valore più elevato di resistenza al flusso. Non esistono, però, in letteratura dati sulla resistenza al flusso della lolla di riso, né sulla dipendenza di questo parametro dal grado di compattazione.

### 5.4.2 Porosità

La misura della porosità è stata effettuata attraverso l'utilizzo di uno strumento appositamente realizzato, come descritto nel paragrafo 5.3.1.1, basandosi sul metodo suggerito da Umnova, Horoshenkov e Maillet [6].

Il presente metodo ha consentito di stimare la porosità dei campioni con buona approssimazione e con una buona ripetibilità dei risultati. Si precisa, inoltre, che non tutta l'aria contenuta all'interno di un materiale partecipa alla propagazione del suono, ma che per una corretta valutazione per fini acustici, occorrerebbe considerare solo il volume d'aria contenuto nei pori interconnessi.

I valori di porosità ottenuti attraverso la prova svolta in questo studio comprendono anche l'apporto dell'aria presente nei pori non-interconnessi, ovvero in quelli "senza uscita", dove l'aria non ha una velocità sufficientemente bassa per permettere al suono di propagarsi.

Attualmente, i metodi di misura della porosità non prevedono la possibilità di considerare come pieni i pori non-interconnessi, ma per una stima più precisa, è previsto l'utilizzo del fattore di struttura, parametro correttivo della porosità che non è stato investigato nel presente lavoro di tesi. La misura del fattore di struttura è complicata e, solitamente la sua stima è effettuata scegliendo fra alcuni valori tabellati e relativi ai materiali di uso comune in campo acustico.

Tuttavia, poiché misurando la porosità con il metodo utilizzato si commette un errore trascurabile [6], si è deciso di non tener conto della differenza tra porosità misurata e porosità influente per fini acustici.

I risultati ottenuti dalla prova sono riassunti in tabella 5

**Tabella 5: Riepilogo dei risultati ottenuti dalla prova sperimentale di misura della porosità dei campioni**

Materiale campione	Metodologia	Diametro [mm]	Volume misurato [cm <sup>3</sup> ]	Δ [cm]	a [cm <sup>3</sup> ]	Ω [%]
Lolla di riso	Collante	100	5,652	11,9	3,365	59,70
Lolla di riso	Collante	29	11,394	20,0	5,655	48,97
Lolla di riso	Pressa a freddo	29	3,631	6,8	1,923	52,69
Gomma	Collante	100	5,400	13,8	3,902	71,38
Gomma	Collante	29	6,000	10,5	2,969	50,27
Sughero	Collante	100	8,400	19,1	5,400	64,18
Sughero	Collante	29	4,050	8,8	2,488	60,50
Sughero	Pressa a freddo	29	3,672	7,5	2,121	58,01
Sughero	Pressa a caldo	29	2,543	4,0	1,131	42,61
Pellicola argentea di caffè	Collante	100	4,973	8,0	2,262	45,11
Pellicola argentea di caffè	Collante	29	4,621	5,9	1,668	36,30
Pellicola argentea di caffè	Pressa a freddo	29	3,169	4,5	1,272	39,56
Pellicola argentea di caffè	Pressa a caldo	29	2,971	3,4	0,961	32,99
Fibra tessile	Pressa a freddo	29	2,916	7,3	2,064	71,75
B TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	29	3,6	3,8	1,07	28,85
C TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	29	5,35	5,2	1,47	27,29
D TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	29	3,63	3,3	0,93	25,7
E Carta	Pressa e collante	29	4,81	2,5	0,71	14,71
F carta-fiocchi-carta	Pressa e collante	29	6,0	3	0,85	12,85
G Carta+ scarti tessili	Pressa e collante	29	6,6	3,7	1,05	15,85
Legenda:						
- Δ: dislivello tra i menischi [cm];						
- a: sezione del tubo moltiplicata per il dislivello tra i menischi;						
- Ω: porosità calcolata						

Come si evince dalla tabella 5, come per la resistenza al flusso d'aria, anche in questo caso la tecnica utilizzata per la realizzazione dei campioni ha influenzato i risultati. Tutti i campioni realizzati in laboratorio attraverso la tecnica di pressatura a caldo chiaramente presentano valori di porosità più bassi rispetto a quelli realizzati con collante. Ancora di

più è evidente che l'abbinamento della pressa alla colla riduce drasticamente i valori della porosità.

La maggior pressatura, e quindi la maggior compattazione dei granuli costituenti il campione, unita alle elevate temperature di esercizio, ha portato ad una parziale occlusione dei pori interconnessi del materiale.

Considerando i soli campioni realizzati con collante, quelli di diametro di 29 mm posseggono una porosità inferiore rispetto a quelli di 100 mm. Anche in questo caso, l'esigenza di pressare in modo maggiore il materiale, ha portato ad avere gradi di compattazione più elevati che hanno generato una riduzione della porosità dei campioni.

Come si evince dallo studio condotto da Horoshenkov [16] su campioni costituiti da granulato di gomma, anche la percentuale di legante influenza la porosità. Infatti, una maggior presenza di colla riduce la porosità del campione in modo quasi lineare. Tuttavia, le basse percentuali di colla utilizzate per realizzare i campioni di questo lavoro di tesi, non hanno determinato perdite significative di porosità.

### **5.4.3 Tortuosità**

Come anticipato nel paragrafo 5.4 il calcolo della tortuosità è stato effettuato per mezzo di alcune espressioni empiriche presenti in letteratura che legano la tortuosità alla porosità  $\Omega$  del campione.

In particolare sono state utilizzate le seguenti formule:

- Formula di Berryman[10], utilizzata per gomma, sughero, lolla di riso e pellicola argentea di caffè e carta da macero (equazione 8);
- Formula di Tarnow[14], utilizzata per i campioni di fibra tessile ricavata dagli pneumatici(equazione 9);
- 

La tabella 6 riepiloga i risultati ottenuti mediante l'utilizzo delle sopra citate formule. A bassi valori di porosità, corrispondono elevati valori di tortuosità. Come prevedibile, i campioni realizzati con pressatura ad elevata temperatura presentano i valori più elevati di tortuosità.

Per questi campioni, il cammino dell'onda sonora è reso più difficoltoso dalla minor presenza di pori interconnessi, dovuta alle elevate temperature e pressature a cui sono stati sottoposti in fase realizzativa.

**Tabella 6: Riepilogo dei risultati ottenuti dal calcolo della tortuosità dei campioni**

<b>Materiale</b>	<b>Metodologia</b>	<b><math>\Omega</math> [%]</b>	<b>Q [-]</b>
Lolla di riso	Collante	60,00	1,33
Lolla di riso	Collante	49,00	1,52
Lolla di riso	Pressa a freddo	53,00	1,44
Gomma	Collante	71,38	1,20
Gomma	Collante	50,27	1,49
Sughero	Collante	64,00	1,28
Sughero	Collante	60,97	1,32
Sughero	Pressa a caldo	42,98	1,66
Sughero	Pressa a caldo	42,98	1,66
Sughero	Pressa a freddo	58,26	1,36
Pellicola argentea di caffè	Collante	45,00	1,61
Pellicola argentea di caffè	Collante	36,00	1,89
Pellicola argentea di caffè	Pressa a caldo	33,00	2,02
Pellicola argentea di caffè	Pressa a caldo	33,00	2,02
Pellicola argentea di caffè	Pressa a freddo	40,00	1,75
Fibra tessile	Pressa a freddo	72,00	1,28
B TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	29,00	1,71
C TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	28,00	1,72
D TNT-Carta-TNT	Pressa e collante	26,00	1,74
E Carta	Pressa e collante	15,00	1,85
F carta-fiocchi-carta	Pressa e collante	13,00	1,87
G Carta+ scarti tessili	Pressa e collante	16,00	1,84

## Bibliografia

- [1] Norma UNI EN29053 – Materiali per applicazioni acustiche – Determinazione della resistenza al flusso d’aria; febbraio 1994;
- [2] R. Dragonetti, C. Iannello, R. A. Romano – Measurement of the resistivity of porous material with an alternating air-flow method; Journal of Acoustical Society of America Vol. 129 No. 2 (2011) 753-764;
- [3] Brown R.L., Bolt R.H., 1942, The Measurements of Flow Resistance of Porous Acoustic Materials, Journal of the Acoustical Society of America, 13:337-344
- [4] Leonard R.W., 1945, Simplified Flow Resistance Measurements, Journal of the Acoustical Society of America, 17: 240-241
- [5] N. Richeri Vivaldi Pasqua – Determinazione sperimentale di parametri caratteristici di materiali porosi fonoassorbenti; Tesi di Laurea, 1998/1999;
- [6] Beranek L., 1960, *Noise Reduction*, McGraw-Hill, New York
- [7] Leonard L.W., 1948, Simplified Porosity Measurements, Journal of the Acoustical Society of America, 20: 39-41.
- [8] P. Leclaire, O. Umnova, K. Horoshenkov, L. Maillet – Porosity measurement by comparison of air volumes; Review of Scientific Instruments Vol. 74 No. 3 (2003);
- [9] O. Umnova, K. Attenborough, Ho-Chul Shin, A. Cummings – Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements of thick samples of rigid-porous materials; Applied Acoustics 66, 6 (2004) 607-624.
- [10] J. G. Berryman - Confirmation of Biot's theory; Applied Physics Letters 37, (1980) 382-384;
- [11] P. Bonfiglio, F. Pompoli – Misura sperimentale della tortuosità di materiali a cella aperta con tecnica ad ultrasuoni; Associazione Italiana di Acustica, 34° Convegno Nazionale Firenze, 13 – 15 giugno 2007;
- [12] J. F. Allard, B. Castagnede, M. Henry, W. Lauriks – Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air; Review of Scientific Instruments 65, 3 (1994);
- [13] O. Doutres, Y. Salissou, N. Atalla, R. Panetton – Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube; HAL www.harchives-ouvertes.fr (2010);
- [14] V. Tarnow - Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials; The Journal of Acoustical Society of America 100 (1996) 3706;
- [15] [www.apmr.matelys.com](http://www.apmr.matelys.com);
- [16] K.V Horoshenkov, M.J. Swift – The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates; Applied Acoustics 62 (2001) 665-690

## **Capitolo 6 Determinazione sperimentale della conduttività termica: metodologia e risultati**

### **6.1 Conduttività termica di materiali da costruzione**

La conduttività termica  $\lambda$  è il flusso di calore  $\varphi$  [W] che attraversa una superficie unitaria  $A$  [ $m^2$ ] di spessore unitario  $d$  [m] sottoposta ad un gradiente termico  $\Delta T$  [K] di un grado Kelvin, espressa in  $W/mK$ . E' dunque definita secondo l'equazione (1)

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot d}{A \cdot \Delta T} \text{ metti unità misura} \quad (1)$$

La definizione sopraesposta deriva dalla legge di Fourier che determina il flusso di calore in  $J/s$  che attraversa una superficie unitaria di spessore unitario sottoposta ad un gradiente termico, secondo l'equazione (2)

$$\varphi = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \text{ metti unità misura} \quad (2)$$

La conduttività termica dipende dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale preso in esame.

Nella seguente Tabella 1 si riportano dei valori di conduttività termica per alcuni materiali isolanti realizzati in pannelli ed in Tabella 2 i valori per materiali sciolti.

**Tabella 1: sintesi materiali isolanti e relativi valori di conducibilità e densità.**

<b>Materiali isolanti</b>	<b><math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m³]</b>
Cotone	0,04	20 - 40
Vermiculite espansa	0,07	90
Argilla espansa	0,09	350
Polietilene espanso in lastre	0,04	30
Polistirene espanso in lastre	0,04	20
Polistirene estruso in lastre	0,035	35
Materassino in lino	0,04	30
Lana di vetro	0,04	20
Canapa	0,045	25
Trucioli di legno	0,05	100
Pannelli extraporosi in fibra di legno (130)	0,04	130
Pannelli porosi in fibra di legno (190)	0,045	190
Pannelli di calcio silicato	0,06	250
Fibra di cocco	0,045	70
Granuli di sughero	0,05	100
Pannelli di sughero espanso	0,045	110
Pannelli in fibre minerale	0,045	115
Perlite espansa	0,05	90
Poliuretano	0,03	30
Lana di pecora	0,04	25
Vetro cellulare (120)	0,041	120
Canneto	0,055	190
Lana di roccia	0,04	30
Paglia	0,09	340
Fiocchi di cellulosa	0,04	50

I materiali con elevata conducibilità termica sono detti conduttori (termici) mentre quelli a bassa conducibilità termica sono definiti isolanti (termici). Per materiali isolanti si intendono materiali con coefficiente  $\lambda$  (coefficiente lambda) minore di 0,1 W/mK.

La conduttività termica ha un ruolo fondamentale nella progettazione di case a basso consumo energetico: materiali che hanno bassi valori garantiscono un elevato isolamento termico dell'edificio, permettendo un basso consumo di energia per mantenere la temperatura interna [1].

Al concetto di conduttività termica sono associati i termini resistenza e trasmittanza termica. La trasmittanza termica  $U$ , secondo la norma UNI EN ISO 6946 [2] si definisce come il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad un grado Kelvin (o Celsius) ed è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico liminare. Essa si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati che compongono la superficie considerata, è espressa in W/K secondo l'equazione (3)

$$U = \frac{1}{\sum R_{tot}} \quad (3)$$

dove

$R_{tot}$  è la resistenza termica totale di una parete composta

La resistenza termica di una parete composta da più strati sarà la somma delle resistenze termiche di ciascun strato. La resistenza termica  $R$  definita in equazione (4) è il rapporto tra lo spessore  $d$  dello strato considerato e la sua conduttività termica  $\lambda$ . Come si evince da questa definizione, la trasmittanza termica è l'inverso della resistenza termica.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4)$$

## 6.2 Descrizione dei campioni di prova

Lo studio della conduttività termica è stato condotto soltanto su due tipologie di campioni che hanno come base la carta da macero accoppiata al TNT (Tessuto Non Tessuto). E' stato possibile testare questi due campioni perché sono stati prodotti industrialmente, campioni di dimensioni compatibili alla strumentazione di laboratorio disponibile per la realizzazione di tali prove (1.23 x 1.48 m).

I campioni presi in esame per questo studio sono i seguenti:

- tipologia A

Composto da un foglio di carta incollata e pressata di 7 mm circa di spessore, accoppiato a due fogli di TNT agugliato di polietilene da 2.5 mm ciascuno (peso circa pari a  $0.4 \text{ kg/m}^2$ ). Lo spessore complessivo medio è di 12 mm.

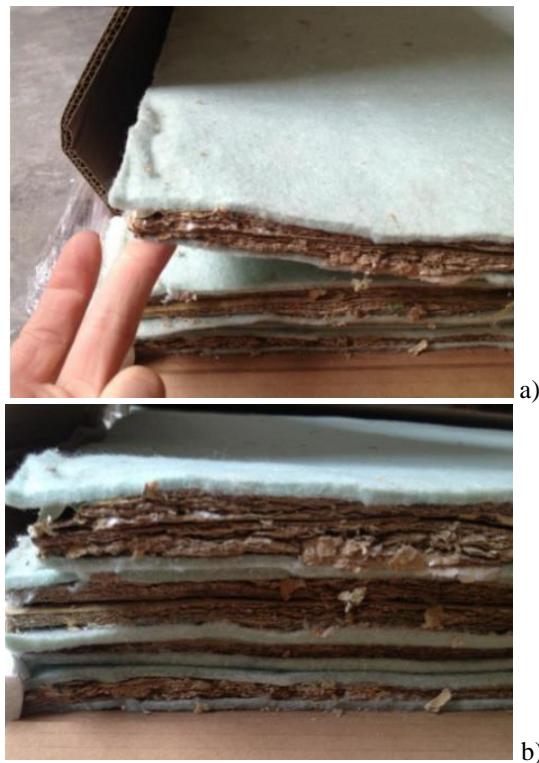
- tipologia B

Composto da due fogli di carta incollata e pressata di 15 mm circa di spessore, accoppiati a due fogli di TNT agugliato di polietilene da 2.5 mm ciascuno posti all'esterno (peso circa pari a  $0.4 \text{ kg/m}^2$  ). Lo spessore complessivo medio è di 20 mm.

In figura 1 e in figura 2a e 2b si riportano alcune immagini dei campioni sottoposti a prova.



**Figura 1: Immagini fotografiche del pannello sottoposto a prova**



**Figura 2: Pannelli sottoposti a prova: a) tipologia A; b) tipologia B**

Il pannello presenta una lunghezza e larghezza pari a 1.23 x 1.48 m, in conformità alle dimensioni dell'apertura di prova dell'apparato di misura Hot Box. Il pannello è omogeneo dal punto di vista delle caratteristiche intrinseche, tuttavia si possono osservare alcune non uniformità nella realizzazione dovute, principalmente, ad uno spessore non costante del campione stesso, ai fogli di TNT che, in alcuni punti, sono stati giuntati e anche alle modalità di incollaggio e pressatura della carta da macero. La pressatura del materiale non può avere lo stesso effetto su tutta la superficie del pannello ed è per questo che potrebbero essere presenti dei vuoti d'aria all'interno del pannello.

### **6.3 Metodologia di prova**

Per la determinazione della trasmittanza termica si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 8990 [3]. La norma specifica i principi per la progettazione dell'apparecchiatura di prova e stabilisce i requisiti minimi che devono essere soddisfatti per la determinazione in laboratorio della proprietà di trasmissione termica in regime stazionario di componenti per edilizia e di componenti simili per uso industriale. Essa descrive inoltre le apparecchiature, le tecniche di misura ed i dati da indicare nel resoconto di prova. Molti materiali isolanti termici e sistemi sono tali che il calore trasferito attraverso di essi è una complessa combinazione di conduzione, convezione e radiazione; i metodi descritti da questa norma internazionale misurano la quantità totale di calore trasferito da un lato all'altro del provino, per una data differenza di temperatura, indipendentemente dai modi di trasmissione del calore individuali.

Le proprietà di trasmissione termica spesso dipendono dal provino, dalle condizioni al contorno, dalle dimensioni del provino stesso, dalla direzione del flusso termico, dalle temperature, dalle differenze di temperatura, dalla velocità dell'aria e dall'umidità relativa; di conseguenza le condizioni di prova devono riprodurre quelle dell'applicazione stabilita.

Le proprietà che possono essere misurate sono la trasmittanza termica e la resistenza termica; nella norma sono descritti due metodi alternativi: il metodo della doppia camera calibrata (Hot Box) e il metodo della doppia camera con anello di guardia, entrambi adatti a provini verticali. L'apparecchiatura deve essere abbastanza grande da poter studiare componenti in scala reale. Entrambi i tipi di apparecchiatura riproducono le condizioni al contorno convenzionali di un campione posto tra due fluidi, di solito aria a pressione atmosferica, entrambi a temperatura uniforme.

Il provino viene posto tra una camera calda e una fredda, le cui temperature interne sono note; quindi, dalle misure effettuate in regime stazionario dell'aria sono calcolate le proprietà di trasmissione termica del campione. La componente convettiva dipende dalla temperatura e dalla velocità dell'aria, mentre la componente radiativa dipende dalla temperatura e dall'emissione totale emisferica delle superfici del provino; gli effetti di tali componenti sono conglobati nel concetto di "temperatura ambiente" e di un "coefficiente di scambio termico superficiale".

Il campione deve essere selezionato o costruito in modo da essere rappresentativo e deve essere montato o sigillato in modo che né l'aria né l'umidità possano entrarvi dai bordi o passare dal lato caldo a quello freddo e viceversa. Il periodo di misura deve essere tale da garantire il raggiungimento della stabilità per le prove in regime stazionario ed esso dipende da molti fattori come la resistenza termica e la capacità termica del provino, i

coefficienti superficiali, la presenza di trasporto di massa e/o di ridistribuzione dell'umidità all'interno del provino, il tipo e la prestazione dei regolatori automatici dell'apparecchiatura.

### **6.3.1 Descrizione della strumentazione e dell'apparato di misura**

L'apparato strumentale impiegato, costruito presso i laboratori del CIRIAF (Università degli Studi di Perugia), illustrato in figura 3 è quello della doppia camera calibrata (Hot-Box), che si compone di due parti principali:

- una struttura di sostegno, dove viene alloggiato il campione di prova, costruita in legno dello spessore di 19 mm ed isolata internamente da 160 mm di polistirene espanso ( $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ ). La struttura è munita di organi di spinta pneumatica che agiscono sia orizzontalmente che verticalmente sul perimetro del campione, serrandolo alla struttura. L'intera struttura di separazione è composta da un pacchetto legno – polistirene espanso – legno, di spessore pari a 158 mm e con parti in gomma nelle zone di contatto con il campione;
- due camere climatizzate (calda e fredda), anche esse in legno di noce tanganica dello spessore di 19 mm, le cui pareti presentano un elevato isolamento grazie a 240 mm di polistirene espanso. Le camere, di forma parallelepipedo, presentano un volume interno di  $4.8 \text{ m}^3$ , sono identiche e fissate alla base su di un'armatura in ferro dotata di ruote per la movimentazione (Figure 3 e 4).

La camera calda è dotata di un sistema scaldante costituito da un filo resistivo al NichelCromo, controllata da un regolatore PID, per una potenza massima di 500 W. La potenza immessa in camera calda viene calcolata per mezzo di una pinza amperometrica collegata ad un contatore di energia. La camera fredda è dotata di un impianto frigorifero completo di unità condensatrice, con una potenza di 2.21 kW, e di un sistema scaldante a filo della stessa tipologia della camera calda, che si accende per mantenere la temperatura stazionaria in camera fredda. In entrambe le camere è presente un pannello (schermo radiativo) con note proprietà emissive note, che evita il contatto visivo tra la sorgente di calore ed il provino, per evitare gli effetti dell'irraggiamento diretto tra le sorgenti di calore e le sonde posizionate sul campione e per valutare in maniera appropriata la temperatura ambiente. Inoltre, per evitare la stratificazione dell'aria ed assicurare un corretto scambio convettivo, ciascuna camera è dotata di sistemi di ventilazione.



**Figura 3:** Hot Box impiegata per la misura della trasmittanza dei campioni.

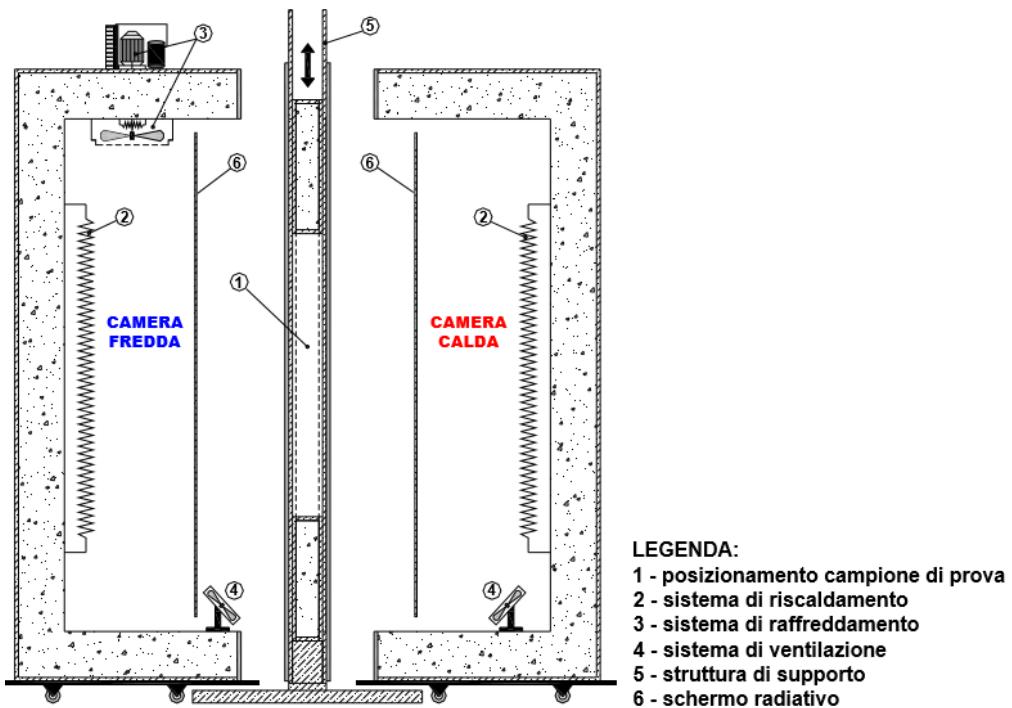


Figura 4: Sezione verticale dello schema dell'apparato di prova

Il sistema è munito di 94 termocoppie interne di tipo T (Cu-Ni) (47 per ogni camera) per il monitoraggio delle temperature dell'aria e delle superfici interessate dallo scambio termico: campione in prova, pannelli di schermatura, parete di separazione e bordi di appoggio del campione secondo lo schema illustrato in figura 4. Sono installate inoltre 8 termoresistenze esterne per monitorare la temperatura del laboratorio. La struttura è predisposta per gestire misure anche con sonde termoflussimetriche necessarie per effettuare la messa a punto ed il confronto con altre metodologie di misura proposte da altre normative tecniche. Il campione è posto tra la camera calda e quella fredda, le cui temperature ambiente sono misurate. Le caratteristiche geometriche delle camere e le proprietà di isolamento ed emissività delle superfici rispondono alle prescrizioni riportate nella EN ISO 8990[3]. Le misure sono eseguite in condizioni di regime stazionario dell'aria, delle temperature delle superfici e dell'energia immessa nella camera calda. Da questi dati sono calcolate le proprietà di trasmissione termica del provino. La doppia camera calibrata è circondata da uno spazio in cui la temperatura è controllata, ma non è necessariamente uguale a quella della camera di misura: gli scambi di calore attraverso le pareti sono mantenuti bassi grazie all'alta resistenza termica della struttura. La potenza

termica totale immessa  $\Phi_p$  deve essere corretta per le perdite attraverso le pareti  $\Phi_3$  e per le perdite laterali  $\Phi_4$ , come mostrato in figura 5. Le correzioni per le perdite attraverso le pareti e le perdite laterali sono determinate attraverso prove di calibrazione su provini di resistenza termica nota. Entrambe le camere hanno dimensioni di 3.2 metri di altezza, 2.5 di larghezza e 1.2 di profondità, per dare spazio alle strumentazioni necessarie per la climatizzazione.

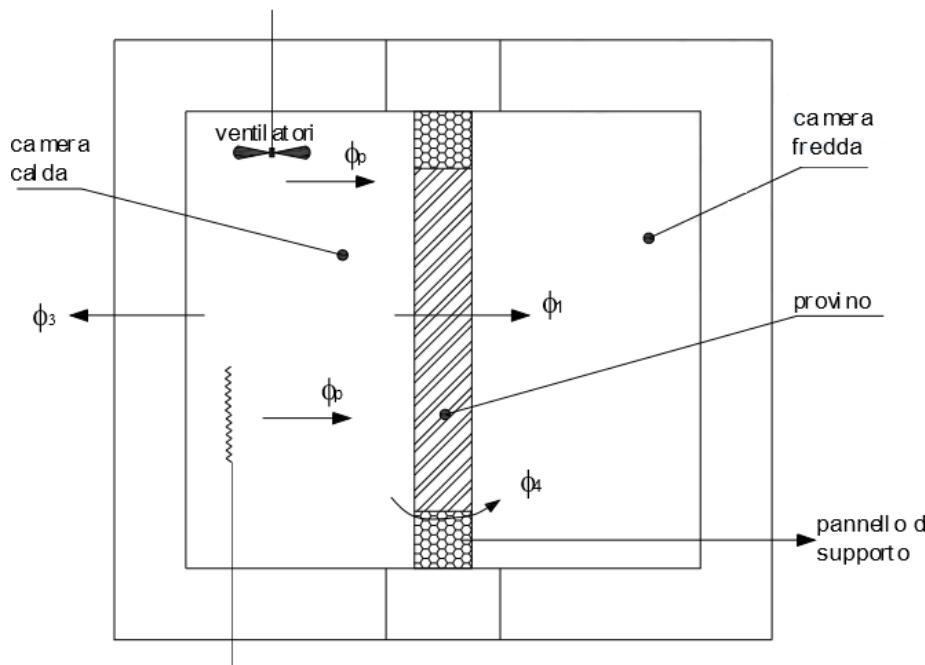


Figura 5: Doppia camera calibrata: potenze termiche entranti e uscenti

### 6.3.2 Metodo della doppia camera calibrata (Hot Box)

La procedura stabilisce che le prove siano effettuate ad una temperatura media di 10°C nel periodo di prova e mantenendo una differenza di temperatura di almeno 20°C tra le due camere. Alcune aree del campione soggette a condensazione o formazione di ghiaccio potrebbero influenzare la misura della trasmittanza termica; è per questo che l'umidità relativa nella camera di misura deve essere mantenuta sufficientemente bassa.

Il flusso termico specifico  $\phi'$  attraverso il campione di prova è espressa dall'equazione (5).

$$\varphi' = \frac{\varphi_{in} - \varphi_{sur} - \varphi_{edge}}{A_{sp}} [\text{W}/\text{m}^2] \quad (5)$$

dove

$A_{sp}$  è l'area proiettata del campione di prova ( $\text{m}^2$ );

$\varphi_{in}(\Phi_p)$  è il flusso termico in ingresso (W);

$\varphi_{sur}(\Phi_4)$  è il flusso termico attraverso il pannello di supporto (W);

$\varphi_{edge}(\Phi_{p4})$  è il flusso termico di bordo (W).

Il flusso attraverso il pannello di supporto è dato dall'equazione 6.

$$\varphi_{sur} = \frac{A_{sur} \cdot \Delta\theta_{s,sur}}{R_{sur}} [\text{W}] \quad (6)$$

dove

$R_{sur}$  è la resistenza determinata attraverso la curva di calibrazione ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );

$A_{sur}$  è l'area del pannello di supporto ( $\text{m}^2$ );

$\Delta\theta_{s,sur}$  è la differenza di temperatura superficiale media tra i lati caldo e freddo ( $^\circ\text{C}$ ).

Il flusso termico di bordo è dato dall'equazione (7).

$$\varphi_{edge} = L_{edge} \cdot \Psi_{edge} \cdot [\text{W}] \quad (7)$$

dove

$L_{edge}$  è la lunghezza del perimetro tra il pannello di supporto e il provino (m)

$\Delta\theta_C$  è la differenza di temperatura dell'aria del lato caldo e freddo ( $^\circ\text{C}$ );

$\Psi_{edge}$  è la trasmitanza lineica della zona di bordo tra pannello e provino ( $\text{W}/\text{mK}$ )

$\Psi_{edge}$  è fornita dalla EN ISO 12567 [4] in appendice B in funzione dello spessore del pannello e della sua conduttività termica.

Noto il flusso termico attraverso il pannello è possibile determinare la resistenza termica del campione conoscendo le sue temperature superficiali in corrispondenza di una zona di misura centrale ampia 50x50 cm, in corrispondenza della quale sono state posizionate 9 termocoppie su ciascun lato ( $\Delta T_{s \text{ misura}}$ ).

### 6.3.3 Metodo dei termoflussimetri

Nella sperimentazione sono stati impiegati termoflussimetri in ceramica illustrati in Figura 6a, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 3; questi sono collegati ad un sistema di acquisizione dati DeltaLogger illustrato in figura 6b. I sensori sono stati applicati in corrispondenza di punti strategici, per poter misurare il valore puntuale del flusso termico attraverso il campione.

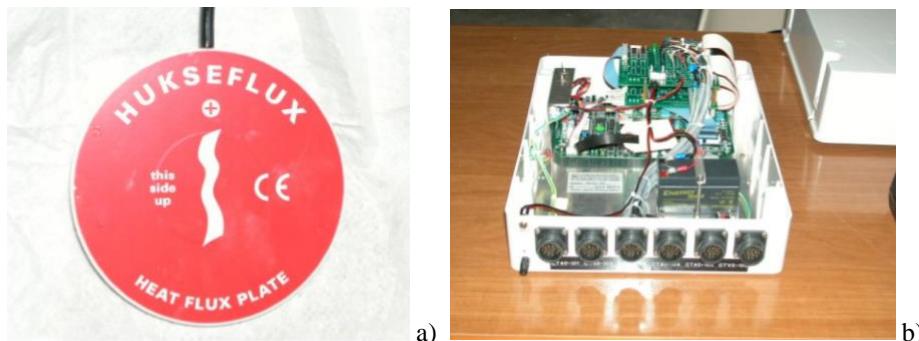


Figura 6: a) a sinistra termoflussimetro in ceramica; b) a destra il sistema di acquisizione

Tabella 3: Caratteristiche tecniche dei termoflussimetri Modello BSR 240

Parametro	Specifiche
dimensioni	$\Phi = 30 \text{ mm}$ ; $s = 4 \text{ mm}$
Elemento sensibile	termopila
Campo di funzionamento	-125 $\div$ +1500 W/m <sup>2</sup>
Temperatura di esercizio	-40 $\div$ +70 °C
Tolleranza	3 % VL $\pm$ 1 W/m <sup>2</sup>
Non linearità	<1.5 %

## 6.4 Termografia ad infrarossi

La termografia è una tecnica non invasiva che permette di visualizzare la distribuzione delle temperature su di una superficie mediante la rilevazione dell'energia raggiante emessa dal campione. Lo strumento rileva radiazioni nel campo dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico e compie misure correlate con l'emissione di queste radiazioni. La termocamera è costituita da una lente che focalizza l'energia infrarossa su un rilevatore, in grado di convertire l'impulso in un segnale elettrico, che può essere a sua volta tradotto in dati di temperatura. Lo strumento consente l'acquisizione di dati termici quando non è possibile impiegare termocoppie. Sebbene la radiazione IR ricopra il campo di lunghezze d'onda compreso tra 0.7 e 1000  $\mu\text{m}$ , la tecnica termografica si limita a rilevare fino ad una lunghezza d'onda massima di 20  $\mu\text{m}$ .

Esistono diversi modelli di termocamere, ognuna con caratteristiche differenti in relazione ai dati ottici e ai parametri di elaborazione dell'immagine; tuttavia le caratteristiche fondamentali di cui tener conto sono:

- emissività dell'oggetto;
- temperatura riflessa;
- temperatura atmosferica;
- umidità relativa;
- distanza dell'oggetto.

L'emissività dell'oggetto può essere determinata con tecniche comparative di misura della temperatura superficiale o impiegando nastri di emissività nota da applicare alle superfici in esame. Gli altri parametri sono necessari a correggere la lettura dall'influenza degli oggetti presenti e dell'atmosfera. Un'immagine della termocamera ad infrarossi impiegata nell'analisi di laboratorio è riportata in figura 7. Prodotta dalla FLIR System, modello FLIR B360, è dotata di detector non raffreddato da 320x240 pixel e garantisce un'estrema precisione nella misura della temperatura, con una sensibilità termica di 0.06°C. Le immagini possono essere acquisite sia nel campo del visibile che dell'infrarosso, grazie ad un obiettivo dotato di due lenti normali, consentendo elaborazioni di fusione delle due acquisizioni per una migliore lettura del termogramma. Le caratteristiche sono riportate in tabella 4. Nel caso di misure in camera calda, la termocamera ad infrarossi ha la doppia funzione di analizzare la corretta sigillatura lungo il perimetro del campione e di osservare eventuali disomogeneità costruttive all'interno dell'area dei pannelli.

**Figura 7: Termocamera modello FLIR B360****Tabella 4: Caratteristiche tecniche della termocamera ad infrarossi**

<b>Parametro</b>	<b>Specifiche</b>
Campo visivo	25x19
Distanza di messa a fuoco minima	0.4 m
Lunghezza focale	18 mm
Sensibilità termica	< 0.06°C a +30°C/60 mK
Messa a fuoco	Automatica e manuale
Zoom digitale	1÷4x continuo
Mappatura	Mappatura su immagini ingrandite
Tipo di rilevatore	FPA (FocalPlane Array)
Intervallo spettrale	7.5 ÷ 13µm
Risoluzione IR	320 x 240 pixel
Intervallo di temperatura dell'oggetto	Da -20°C a +120°C
Precisione	Precisione ±2°C o ±2% della lettura

## 6.5 Risultati sperimentali

Le prove in camera calda sono state effettuate nel periodo di Maggio-Luglio. Sono state effettuate due misure:

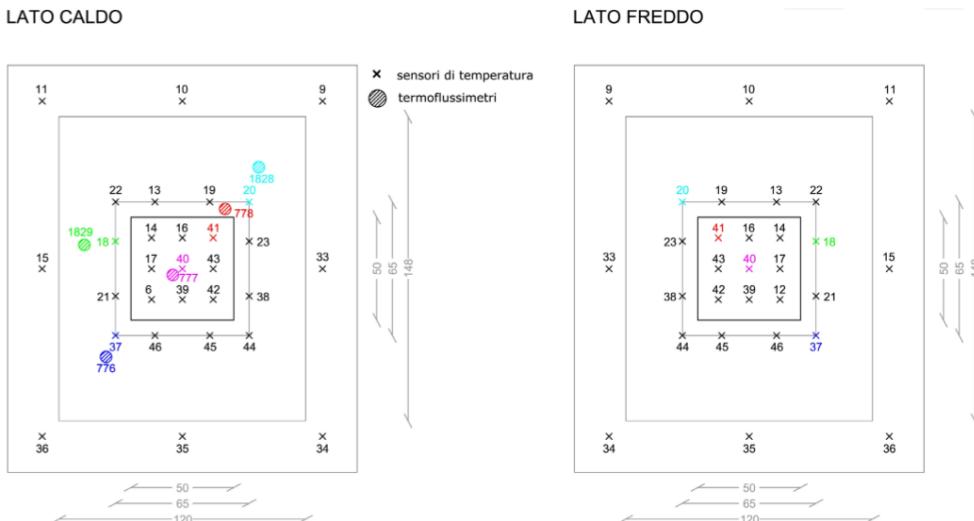
- La prima prova è stata effettuata istallando il campione in corrispondenza del pannello di sostegno semplicemente sigillando il suo perimetro con del silicone. Tuttavia il campione è risultato estremamente flessibile, a causa del modesto spessore e della tipologia di materiale impiegato. Per questo il serraggio del campione mediante pistoni all'interno dell'apparato non è stato semplice ed ha comportato una leggera inflessione del pannello stesso.

- La seconda prova, quindi, è stata effettuata creando un telaio in legno di modesto spessore in corrispondenza del perimetro del campione per poter conferire maggiore rigidezza al pannello stesso. Il telaio, una volta installato nell'alloggiamento dell'Hot Box, è stato sigillato con del silicone.

In entrambe le prove, oltre alle termocoppe necessarie per la valutazione della resistenza termica del campione mediante metodo Hot Box, sono state inserite una serie di termocoppe aggiuntive in corrispondenza della superficie del campione sia dal lato caldo che dal lato freddo.

I sensori di temperatura superficiale sono stati disposti all'interno di un'area di misura centrale di dimensione 50 x 50 cm (n. 9 sensori), altre 12 termocoppie sono state disposte in corrispondenza del centro di una zona di guardia, di larghezza pari a 15 cm. In prossimità di alcune termocoppie sono stati installati anche alcuni termoflussimetri per valutare il flusso in alcuni punti specifici del pannello.

In figura 8 si riporta lo schema delle sonde installate nel corso delle prove.



**Figura 8:** Posizionamento dei sensori nel corso delle prove

## 6.5.1 Pannello Tipologia A

### 6.5.1.1 Metodo della doppia camera calibrata (Hot Box)

Il valore complessivo ottenuto dalla prova Hot Box è di 0.034 W/mK, analogo al valore medio ottenuto dalle prove termoflussimetriche riportate al paragrafo 6.5.1.2.

Poiché la campagna di misura è stata eseguita in giornate con temperature relativamente alte, le prove sono state effettuate impostando la temperatura della camera calda a 25°C e quella del lato freddo a 0°C, per cercare di ridurre la differenza di temperatura tra la camera calda e il laboratorio. La differenza di temperatura tra lato caldo e freddo è maggiore di 20°C e la temperatura media è superiore a 10°C.

Si riportano in tabella 5 i principali parametri rilevati nel corso della prova Hot Box.

**Tabella 5: Valori medi delle grandezze misurate per il pannello di tipo A (S=0.012 m)**

<b>Valori misurati lato caldo</b>	
Temperatura media dell'aria ( $\theta_{ci}$ )	24.68 [°C]
Potenza immessa in camera calda ( $\phi_{in}$ )	80.64 [W]
Temperatura media superficiale lato caldo (zona misura) ( $\theta_{ici}$ )	18.13 [°C]
<b>Valori misurati lato freddo</b>	
Temperatura media dell'aria ( $\theta_{ce}$ )	-0.06 [°C]
Temperatura media superficiale lato freddo (zona misura) ( $\theta_{ife}$ )	2.45 [°C]
<b>Valori calcolati</b>	
Flusso attraverso il provino ( $\phi$ )	43.85 [W/m <sup>2</sup> ]
Differenza di temperatura ambiente lato caldo-lato freddo( $\Delta_{0n}$ )	24.74 [°C]
Differenza di temperatura superficiale tra lato caldo-latofreddo ( $\Delta_{0t}$ )	15.68 [°C]
<b>CONDUTTIVITÀ TERMICA</b>	
<b>0.034[W/(mK)]</b>	

### 6.5.1.2 Metodo dei termoflussimetri

I valori di flusso termico puntuale e della conduttività calcolata in corrispondenza dei termoflussimetri sono riportati in tabella 6.

Complessivamente il valore di conducibilità termica relativo alla tipologia A varia tra 0.030 e 0.039 W/mK, considerando diversi punti di misura.

**Tabella 6: Flusso medio e conducibilità termica valutata attraverso termoflussimetri (Tipo A).**

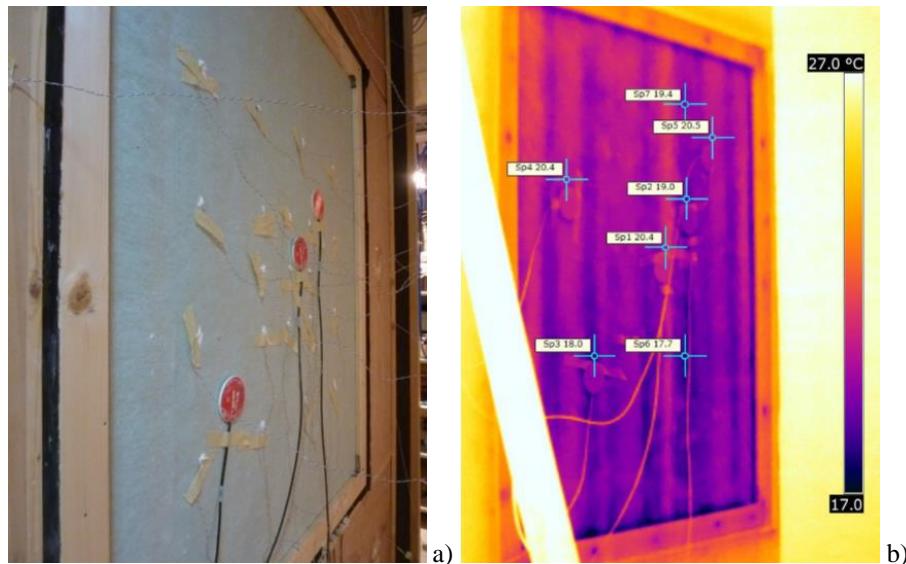
Termoflussimetro	$\dot{\phi}$ medio [W/m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\lambda$ [W/mK]	$\lambda_{\text{medio}}$ [W/mK]
777- centro	40.96	15.34	0.032	<b>0.034</b>
778-alto a destra	50.95	15.56	0.039	
776 basso a sinistra	49.15	16.68	0.035	
1828	44.66	16.07	0.033	
1829	40.09	16.25	0.030	

### 6.5.1.3 Termografia ad infrarossi

Durante la prova sono state, inoltre, scattate numerose immagini termografiche. In figura 9 si riportano le immagini del pannello A, scattate dal lato caldo.

Queste hanno evidenziato un comportamento poco uniforme del campione stesso. Si notano delle zone fortemente calde a contrasto con aree più fredde; le massime differenze di temperatura superficiale, tuttavia, non superano i 5°C.

Le striature rilevate nelle immagini termografiche sono imputabili alla posa del materiale per la realizzazione del pannello: i fogli di carta sono incollati e pressati tra loro ma, sicuramente, il trattamento non è eseguito uniformemente su tutta l'area del campione e questo risulta evidente dalla foto. Le zone di colore più scuro sono quelle in cui si evidenzia un maggiore flusso termico (il flusso rilevato dai termoflussimetri 776 e 778 è superiore di circa 10 W/m<sup>2</sup> rispetto alla zona centrale, in cui si riscontrano temperature superficiali leggermente più alte (20.4°). Qui il passaggio di calore attraverso il pannello potrebbe essere favorito da una minore percentuale di aria intrappolata al suo interno per effetto di una pressatura più efficace. Inoltre, anche lo spessore del pannello non risulta essere costante: si è considerato un valore medio di 12 mm ma, da misure eseguite mediante calibro, è risultato estremamente variabile da punto a punto. Complessivamente si ha una variazione massima della conducibilità termica del pannello di circa un 23%, valutata nei diversi punti del campione stesso.



**Figura 9: Immagini fotografiche e termografiche del pannello A installato all'interno dell'Hot Box (Lato Caldo)**

Dall'analisi dei risultati è emerso che il pannello, realizzato dalla Seccarta s.r.l. e costituito da materiali prevalentemente di riciclo (carta da macero, fogli di Tessuto Non Tessuto e collante) ha delle buone prestazioni complessive, in termini di conducibilità termica. I pannelli possono essere considerati dei buoni isolanti termici poiché la conducibilità misurata risulta sempre inferiore a 0.07 W/mK.

I valori di conducibilità ottenuti variano in un campo compreso tra 0.030 e 0.039 W/mK e sono quindi confrontabili con quelli di altri materiali isolanti attualmente in commercio illustrati nelle tabelle 1 e 2.

Il valore medio di conducibilità termica rappresentativo del campione testato è di 0.034 W/mK, ottenuto sia attraverso i termoflussimetri che dalla prova Hot Box. Tuttavia le modalità costruttive dei pannelli possono penalizzare le prestazioni termiche complessive degli stessi poiché, come è emerso oltre che dai test, anche dalle immagini termografiche scattate, il comportamento è estremamente disomogeneo. Si sono riscontrate differenze di conducibilità termica da un punto ad un altro della superficie dell'ordine del 20%.

## 6.5.2 Pannello Tipologia B

### 6.5.2.1 Metodo della doppia camera calibrata (Hot box)

Per il pannello B sono state effettuate tre misure: una a Maggio (test n°1), una Giugno (test n°2) e una Luglio (test n°3).

La configurazione delle sonde per le prove è la stessa utilizzata per la tipologia di pannello A, illustrata in figura 1.

Le prove 1 e 2 della Hot box non hanno condotto a risultati attendibili dunque si riportano in tabella 7 solo i risultati del test n°3: non sono state raggiunte sufficienti condizioni di stazionarietà all'interno delle camere e il flusso termico di bordo non è risultato trascurabile.

La conducibilità termica complessiva ottenuta con il metodo della doppia camera calibrata dal test n.3 è di 0.038 W/mK, valore prossimo a quello medio ottenuto con il metodo termoflussimetrico (variazione massima del 9.5%), illustrato nel paragrafo 6.5.2.2

**Tabella 7: Valori medi delle grandezze misurate per il pannello di Tipo B (S=0.020 m)**

<b>Valori misurati lato caldo</b>	
Temperatura media dell'aria ( $\theta_{ci}$ )	24.88 [°C]
Potenza immessa in camera calda ( $\Phi_{in}$ )	65.96[W]
Temperatura media superficiale lato caldo (zona misura) ( $\theta_{tc}$ )	19.68 [°C]
<b>Valori misurati lato freddo</b>	
Temperatura media dell'aria ( $\theta_{ce}$ )	-0.44 [°C]
Temperatura media superficiale lato freddo (zona misura) ( $\theta_{tf}$ )	2.05 [°C]
<b>Valori calcolati</b>	
Flusso attraverso il provino ( $q_{sp}$ )	33.85 [W/m <sup>2</sup> ]
Differenza di temperatura ambiente lato caldo-lato freddo( $\Delta_{th}$ )	25.32[°C]
Differenza di temperatura superficiale tra lato caldo-lato freddo ( $\Delta_{st}$ )	17.63 [°C]
<b>CONDUCIBILITÀ TERMICA</b>	
<b>0.038[W/(mK)]</b>	

### 6.5.2.2 Metodo dei termoflussimetri

I test sono stati effettuati ad una temperatura media del lato caldo di 23°C e di 0°C per la camera fredda ( $\Delta T$  medio maggiore di 20°C). I valori di flusso termico puntuale e della conducibilità calcolata in corrispondenza dei termoflussimetri sono riportati in tabella 8. Sono riportati i risultati delle 3 prove effettuate.

La conducibilità termica varia in un campo compreso tra 0.037 e 0.045 W/mK; la sua variazione massima tra un punto e un altro è pari al 16% ed è imputabile ad un comportamento disomogeneo del pannello, legato alle modalità di realizzazione e allo spessore, che risulta estremamente variabile (in alcuni punti è addirittura inferiore a 15 mm).

**Tabella 8: Flusso medio e conducibilità termica valutata attraverso termoflussimetri (Tipo B).**

N°	Termoflussimetro	$\varphi'$ medio [W/m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\lambda$ [W/mK]	$\lambda_{\text{medio}}$ [W/mK]
1	777- centro	37.61	16.64	0.045	<b>0.041</b>
	778-alto a destra	33.43	17.47	0.038	
	776 basso a sinistra	37.63	17.30	0.043	
	1828	33.43	17.01	0.038	
	1829	38.42	17.54	0.044	
2	777- centro	36.47	16.45	0.044	<b>0.042</b>
	778-alto a destra	32.10	17.19	0.037	
	776 basso a sinistra	36.34	16.98	0.043	
	1828	33.08	16.76	0.039	
	1829	37.12	17.11	0.043	
3	777- centro	33.20	18.04	0.039	<b>0.039</b>
	778-alto a destra	36.08	17.07	0.040	
	776 basso a sinistra	37.19	17.69	0.042	
	1828	33.74	17.56	0.038	
	1829	36.17	18.99	0.038	

### 6.5.2.3 Termografia ad infrarossi

Si possono analizzare i risultati ottenuti osservando le immagini termografiche scattate durante i test.

In figura 10 si riporta la termografia relativa alle prove n. 1 e n. 2, mentre in figura 11 si riportano le immagini fotografiche e termografiche del test n. 3 (campione installato con telaio perimetrale di sostegno).



**Figura 10:** Immagini fotografiche e termografiche del pannello B installato all'interno dell'Hot Box (Lato Caldo) (test n.1 e n.2).

Per i test n. 1 e n. 2 le conducibilità termiche puntuali massime calcolate con il metodo dei termoflussimetri sono pari a 0.043-0.045 W/mK: questi valori si riscontrano proprio in corrispondenza di quelle zone in cui sono visibili maggiori perdite (zona centrale e lato sinistro in basso, rispettivamente corrispondenti ai termoflussimetri 777 e 776). Anche tutta la fascia inferiore del pannello ha una colorazione più scura, imputabile ad un flusso termico maggiore. Il flusso misurato varia tra 32 e 38 W/m<sup>2</sup> circa.

Dall'analisi termografica eseguita prima del test n. 3 si osservano ancora disomogeneità superficiali (Figura 11). Analizzando, infatti, l'immagine termografica scattata dal lato caldo dell'apparato si può notare, anche per questo campione, un comportamento abbastanza disomogeneo, con perdite in corrispondenza del lato sinistro del campione

stesso. Le temperature superficiali variano tra i 17 e i 20°C. Il flusso misurato varia tra 33 e 37 W/m<sup>2</sup> circa, mentre la conducibilità termica puntuale corrispondente è compresa tra 0.038 e 0.042 W/mK, valori analoghi a quelli riscontrati per le prove n. 1 e n. 2. Anche in questo caso il flusso massimo è quello misurato in basso a sinistra, in corrispondenza del termoflussimetro 776 (37.19 W/m<sup>2</sup>), nella zona in cui si sono riscontrate le temperature superficiali più basse (17.69 °C).



**Figura 11: Immagini fotografiche e termografiche del pannello B installato all'interno dell'Hot Box (Lato Caldo) (test n.3).**

Anche per questo pannello si suppone che le striature rilevate nelle immagini termografiche siano imputabili alla posa del materiale per la realizzazione del pannello.

Le zone di colore più scuro sono quelle in cui si evidenzia un maggiore passaggio di flusso termico. Qui il passaggio di calore attraverso il pannello potrebbe essere favorito da una minore percentuale di aria intrappolata al suo interno per effetto di una pressatura più efficace. Inoltre, anche lo spessore del pannello non risulta essere costante: si è considerato un valore medio di 20 mm ma, da misure eseguite mediante calibro, è risultato estremamente variabile, in alcuni punti è addirittura pari a 15 mm. Complessivamente si

ha una variazione massima della conducibilità termica del pannello di circa un 15%, valutata nei diversi punti del campione stesso.

Dall'analisi dei risultati ottenuti è emerso che anche il pannello di tipo B, ha delle buone prestazioni complessive, in termini di conducibilità termica. Il pannello può essere considerato un buon isolante termico poiché la conducibilità misurata risulta sempre inferiore a 0.07 W/mK. I valori di conducibilità misurati variano in un range compreso tra 0.037 e 0.045 W/mK e sono quindi confrontabili con quelli di altri materiali isolanti attualmente in commercio.

Sarebbe consigliato standardizzare le modalità costruttive dei pannelli per renderli maggiormente omogenei dal punto di vista delle proprietà di isolamento termico. Ulteriori problematiche potrebbero essere legate al fatto che i materiali di cui sono costituiti questi campioni risultano facilmente impregnabili. I pannelli, impiegati come isolanti all'interno degli elementi costruttivi perimetrali (tamponature e solai), dovranno essere accoppiati a barriere al vapore che, a ridosso del pannello, proteggono l'isolante stesso dalle infiltrazioni di acqua dovute all'eventuale formazione di condensa negli strati interni della tamponatura: i materiali isolanti perdono quasi totalmente la loro capacità termo-isolante quando vengono a contatto con l'acqua.

## **Bibliografia**

- [1] UNI 10351:2015 Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto
- [2] UNI EN ISO 6946:2008 Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo
- [3] UNI EN ISO 8990: 1996 - Isolamento termico - Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario - Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia
- [4] EN ISO 12567-1:2010 Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. Complete windows and doors

## **Capitolo 7 Analisi del ciclo di vita LCA (Life Cycle Assessment)**

### **7.1 Definizione**

La consapevolezza del ritmo di crescita esponenziale dell'inquinamento globale, di pari passo con l'espansione industriale e con l'aumento dei progressi delle nuove tecnologie, pone al centro del grande dibattito sull'ambiente la ecosostenibilità di attività produttive, di servizi e di sistemi di gestione. Un qualsiasi processo produttivo può considerarsi ecosostenibile se riesce a soddisfare i bisogni delle generazioni presenti e considera la protezione ambientale come condizione necessaria per uno sviluppo duraturo a beneficio delle generazioni future. In questo contesto sta assumendo notevole importanza un nuovo strumento analitico: la Life Cycle Assessment (LCA), conosciuta in Italia come "Analisi del ciclo di vita". La LCA ha come ultimo obiettivo l'identificazione dei carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, percorrendo l'oggetto dello studio in tutta la sua storia. Tale percorso, che si esplica sia a monte sia a valle della fase di utilizzo, inizia con l'estrazione delle materie prime dalla terra, attraversa la fase di lavorazione ed utilizzo del prodotto e termina con il ritorno delle materie prime alla terra sotto forma di rifiuti, cioè lo smaltimento finale. L'insieme di queste macrofasi viene comunemente detto percorso "from cradle to grave", vale a dire "dalla culla alla tomba".

Il termine LCA, con cui in principio si intendeva indistintamente Life Cycle Assessment o Life Cycle Analysis, fu coniato durante il congresso della Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) di Smuggler Notch (Vermont-USA) nel 1990 per caratterizzare più dettagliatamente le analisi svolte fino ad allora con il nome di REPA (Resource and Environmental Profile Analysis).

La definizione stabilita è la seguente: "è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale."

Nella definizione vengono sottolineati alcuni aspetti: l’oggettività del procedimento, vale a dire l’esecuzione di fasi analitiche precise e ben determinate, nonché lo studio di dati confrontabili e scientificamente verificabili e la considerazione dell’intero ciclo di vita, che presuppone una visione globale del sistema in esame, poiché le fasi di uno stesso processo produttivo possono svolgersi in situazioni geografiche molto distanti l’una dall’altra.

L’obiettivo da perseguire, nella prospettiva di un miglioramento futuro, è rappresentato dalla valutazione degli impatti ambientali imputabili allo stato in essere del processo o dell’attività studiata, in modo da sviluppare in futuro interventi di natura preventiva. La quantificazione dei carichi ambientali del ciclo di vita di un prodotto o servizio avviene attraverso la contabilizzazione di tutti i consumi di materie prime, acqua e fonti energetiche, detti “input” e di tutte le emissioni gassose, liquide e solide, di rifiuti e di altri rilasci, detti “output”. In particolare l’analisi LCA valuta anche i “risparmi ambientali” dovuti alla produzione evitata di materiali ed energia grazie al riuso, al riciclo o alla termovalorizzazione del prodotto considerato. Infatti, è proprio grazie all’identificazione di criticità ambientali, in gergo “bottle neck” cioè “colli di bottiglia”, che si può mirare all’ottimizzazione dei processi e dell’uso delle risorse.

### **7.1.1 Tipologie ed approcci**

Esistono diversi tipi di approcci per uno studio di LCA su specifiche macrofasi di un sistema produttivo. In particolare:

- From cradle to grave: “dalla culla alla tomba”:

si intende un’analisi LCA che comprende all’interno dei confini di sistema tutte le unità di processo dalla culla alla tomba, ossia dall’estrazione delle materie prime necessarie al processo produttivo allo smaltimento del prodotto a fine vita.

- From cradle to cradle: “dalla culla alla culla”:

si intende una tipologia di analisi LCA all’interno della quale la dismissione di un prodotto a fine vita coincide con un processo di riciclaggio. Secondo questa filosofia vi è un continuo ciclo di utilizzo e riutilizzo di materiali senza produzione di rifiuti.

- From cradle to gate: “dalla culla al cancello”:

si intende un’analisi LCA di un prodotto dalla fase di estrazione delle materie prime all’uscita dallo stabilimento. È la base di analisi per la costruzione dell’ecoprofilo di prodotto.

Non è stata effettuata un'analisi “from cradle to grave”. L'analisi si ferma, infatti, al cancello e non è stato considerato quindi l'impatto relativo al termine di vita dei pannelli [1-2-3].

### **7.1.2 Origini e sviluppo**

Le origini del concetto di “ciclo di vita” nell’ambito di un corretto sfruttamento delle risorse per realizzare uno sviluppo sostenibile risalgono agli anni ’60. Fu nel 1966 che l’economista Kenneth Boulding usò per la terra la metafora dell’astronave, all’interno della quale la sopravvivenza dell’equipaggio dipende da un’oculata gestione delle risorse esistenti, per indicare la necessità di guardare alla biosfera come ad un ambiente limitato nella capacità di fornire risorse e di assorbire scorie. Partendo dai contributi di Boulding e di Georgescu Roegen, leader della bioeconomia, lo statunitense Dalymaturò il concetto che sia le persone che i prodotti rappresentano “un sistema aperto che, attraverso il processo produttivo, necessita di un flusso ininterrotto di materia-energia o throughput”. Tale flusso deriva dallo sfruttamento di risorse naturali a bassa entropia, le quali, tuttavia, una volta passate attraverso il processo economico, divengono delle scorie inutilizzabili, ad alta entropia. Il primo studio di analisi del ciclo di vita, mai pubblicato a causa della riservatezza delle informazioni contenute, fu quello commissionato dalla Coca Cola Company al Midwest Research Institute nel 1969. Si volevano determinare le conseguenze ambientali della produzione di diversi tipi di contenitori per bevande per individuare il migliore da un punto di vista ambientale. Lo stesso istituto pubblicò alcuni anni dopo, nel 1974, una ricerca denominata REPA, Resource and Environmental Profile Analysis, integrando l’energia come appartenente alle risorse naturali nell’ambito della valutazione del ciclo di vita di alcuni materiali. Intanto diventavano di interesse generale alcune tematiche quali il crescente livello d’inquinamento globale, la limitatezza delle risorse e il loro sfruttamento sfrenato, le crisi energetiche e petrolifere e il problema della destinazione dei rifiuti. Agli inizi degli anni ’70 anche in Europa, specie Germania e Gran Bretagna, si avviarono i primi studi con approccio “dalla culla alla tomba” relativi a imballaggi per bevande.

In Italia la necessità di uno strumento di contabilizzazione per i carichi ambientali associati alla produzione delle merci si delineò nel 1977-79 quando, presso l’Istituto di Merceologia dell’Università di Bari, l’economista Nebbia svolgeva ricerche sull’analisi dei flussi di energia attraverso i vari cicli produttivi distinguendo fra energia impiegata nell’impianto di produzione e energia incorporata nelle materie prime. In quegli anni fu pubblicato quello che sarà poi il punto focale nella storia della metodologia LCA, il manuale di analisi energetica industriale di Boustead e Hancock, il primo ad offrire un reale procedimento analitico e operativo. Il decennio successivo non vide delle vere spinte propulsive verso uno strumento di analisi del ciclo di vita; fu infatti nel 1990 che la

SETAC, in seguito sede scientifica per la redazione delle norme ISO serie 14040 [4], coniò il termine Life Cycle Assessment nella stesura del “Code of Practice”, primo documento guida ufficiale per tale metodologia. Nel giugno del 1992, si formò la Society for Promotion of Life Cycle Development (SPOLD), che in cinque anni sviluppò un formato standard per i dati di LCA tentando di standardizzare le caratteristiche dei dati contenuti nei database dei diversi software. Oggi l'utilizzo dell'LCA è in forte crescita in molti paesi europei, nonché in America ed in Asia, anche se la maggior parte degli studi non è pubblicata. La Svezia resta il paese più avanzato nell'uso sistematico della LCA a livello aziendale e ciò è ulteriormente confermato dal sempre crescente numero di EPD, Environmental Product Declaration, cioè un sistema codificato di certificazione ambientale di prodotto. Nella ricerca della migliore ecoefficienza produttiva, un ulteriore passo in avanti è rappresentato dal Life Cycle Design (LCD), costituito da tutte le varie discipline che conducono ad una sostanziale riprogettazione di un sistema industriale. I prodotti che un LCD vuole garantire sono di elevata qualità avendo al contempo impatti ambientali minimi, nonché parametri di risparmio energetico e di protezione della salute dei lavoratori. Un Life Cycle Design necessita dell'applicazione della metodologia LCA per ricavare tutte le informazioni e i dati occorrenti alla fase di progettazione.

### **7.1.3 Percorso normativo**

Dopo che la SETAC ne coniò il termine, la LCA vide il suo primo riferimento legislativo nell'art. 5 del Regolamento CEE 92/880 [5] concernente il sistema comunitario di assegnazione di una etichetta di qualità ecologica. In esso si afferma che: “...i criteri specifici per ogni gruppo di prodotti sono stabiliti secondo un metodo globale (dalla culla alla tomba)...”.

Difatti, l'unico modo per assegnare un marchio Ecolabel è quello di valutare il ciclo di vita complessivo del prodotto in esame per poi impostare restrizioni sulle fasi del sistema maggiormente responsabili di danni ambientali. In seguito, dal 1993 fino ad oggi, la International Standard Organization (ISO) e nello specifico il suo Technical Committee 207 (TC 207) [6] ha provveduto a sviluppare una serie di norme relative a vari aspetti della gestione ambientale di impresa, abbracciando le esigenze di organizzazioni governative e non, consumatori e aziende. La valutazione del ciclo di vita, come detto, è utilizzata anche come metodologia indispensabile per qualsiasi schema di etichettatura ambientale di prodotto. Lo strumento normativo che le aziende hanno a disposizione per migliorare la gestione ambientale delle proprie attività, dei prodotti e dei servizi è rappresentato dalle norme internazionali della serie ISO 14000 elaborate con lo scopo di fornire:

- una guida pratica per l'attuazione e il miglioramento di un sistema di gestione ambientale;

- gli strumenti di valutazione degli aspetti specifici della propria gestione ambientale;
- i principi e le indicazioni pratiche per dare informazioni sugli aspetti ambientali di prodotti e servizi.

## 7.2 Metodo di calcolo e Software impiegato

I campioni realizzati sono stati analizzati dal punto di vista del Ciclo di Vita, per verificare ed accettare l'impatto ambientale dei prodotti e cercare di esaminare tutti gli effetti da essi causati sull'ambiente. Tale analisi è stata svolta tramite l'impiego del SimaPro.

Il SimaPro è un software sviluppato negli anni '90 da un'azienda olandese, utilizzato per studiare gli impatti ambientali di una LCA; è molto affidabile, programmato seguendo le norme ISO 14040 [4], contiene banche dati di riferimento modificabili e contenenti i dati più frequentemente richiesti nelle diverse fasi del ciclo.

Le banche dati forniscono alcuni degli elementi base per eseguire lo studio, SimaPro contiene le seguenti: EcoinventProcesses, DK Input Output Database 99, BUWAL 250, ETH-ESU 96 Processes, Franklin USA 98, IDEMAT 2001, Industry Data, LCA Food DK, USA Input Output Database 99.

I processi sono suddivisi, secondo l'ambito dal quale traggono origine, in 7 categorie:

- Materiali;
- Energia;
- Trasporto;
- Processo;
- Uso;
- Scenario di smaltimento;
- Processo di Smaltimento.

Ognuna di questa categorie è ulteriormente suddivisa in sottocategorie.

Ogni processo può essere collegato ad un altro processo creando delle reti, formando così una struttura ad albero di un intero sistema di produzione.

Il programma è strutturato in quattro parti fondamentali, in cui sono analizzati gli scopi ed obiettivi, seguiti da un'analisi di inventario, da un'analisi degli impatti e da una fase di interpretazione e miglioramento.

All'avvio del programma, il primo step, *Obiettivo e Ambito*, richiede una descrizione del progetto, data, autore, tipo di analisi, area geografica, confini del sistema, obiettivo dello studio ed unità funzionale. Devono inoltre essere selezionate le librerie nel caso in cui si scelga di prelevare i dati da alcune delle banche dati.

Entrando nel secondo comparto, *Inventario*, i punti essenziali che l'operatore deve compilare sono: nome del processo, input noti da natura, input noti da tecnosfera, emissioni in aria, emissioni in acqua, emissioni al suolo, output noti a tecno sfera, rifiuti ed emissione al trattamento. Negli input noti da natura troviamo tutte le materie prime necessarie per il processo disponibili appunto in natura, mentre quelle da tecnosfera sono materiali derivanti da ulteriori processi di tipo industriale. Per quanto riguarda gli output da tecnosfera invece troviamo rifiuti destinati a specifici trattamenti per lo smaltimento. I processi di produzione sono suddivisi in altri sottogruppi: materiali, energia, trasporto (di persone e merci), trattamento rifiuto. Vengono quindi inseriti i dati relativi a consumo di materie prime, energia ed emissioni e vengono create tutte le unità di processo che servono per la produzione del prodotto studiato. La vita del prodotto è descritta mediante le categorie assemblaggio, ciclo di vita, scenario di smaltimento, disassemblaggio, riuso.

Completata l'analisi d'inventario, viene scelto il metodo di *valutazione degli impatti* ed il calcolo restituisce l'impatto di tutte le unità del processo prese in considerazione. Le funzioni di calcolo disponibili sono di network, ad albero, di analisi, di confronto, e analisi di incertezza. Per quanto riguarda gli impatti, Simapro fornisce un'ampia varietà di metodi di valutazione che comprende i seguenti: CML 2001, Eco-Indicator 99, EPS 2000, EDIP 2003, IMPACT 2002+, BEES, IPCC 2007 GWP. Sta all'utente scegliere che tipo di metodo di valutazione utilizzare.

Infine all'ultimo passo all'operatore viene richiesto di elencare le principali osservazioni che si possono trarre *dall'analisi dei risultati*.

Quindi la struttura LCA del caso di studio, in accordo con le norme ISO 14040 [4] e ISO 14044 [7], si articola nelle seguenti fasi:

1. definizione dell'obiettivo;
2. analisi inventario;
3. valutazione impatti;
4. interpretazione dei risultati.

I principali indicatori di uno studio LCA per un prodotto edilizio sono essenzialmente di due tipi:

- Energetico – ossia i consumi di energia necessari a produrre l'unità funzionale (es. 1 m<sup>2</sup> di prodotto isolante).

Sono valutati attraverso il parametro GER (Gross Energy Requirement), espresso in MJ, che evidenzia il fabbisogno energetico complessivo, attraverso il metodo Cumulative Energy Demand (CED), che si basa sulla traccia pubblicata da Ecoinventversion 1.01 e ampliato da PRéConsultants per le risorse energetiche disponibili nel database SimaPro.

- Ambientale – rappresenta il consumo di risorse naturali, le emissioni in aria e in acqua e i rifiuti solidi prodotti, sempre riferiti all'unità funzionale generata.

Sono valutati attraverso il parametro GWP100 (Global Warming Potential che il potenziale di riscaldamento globale a 100 anni) espresso in kg di CO<sub>2</sub>. Si valutano gli impatti finali di un processo produttivo dal punto di vista del rilascio dei gas climalteranti che concorrono al surriscaldamento globale ed a tutti gli effetti negativi ad esso correlati sugli ecosistemi e sul pianeta.

Sono state effettuate 3 tipi di analisi:

- 1) Pannelli in carta da macero, TNT e fibre tessili, prodotti industrialmente e messi a confronto.
- 2) Pannelli realizzati con pellicola argentea di caffè e differenti metodi di produzione.
- 3) Pannelli realizzati con colla (Lolla di riso, sughero e granulato di gomma)

### **7.2.1 Indici calcolati**

Nel software Simapro sono disponibili vari metodi di analisi dei risultati; possono essere valutati diverse categorie di danno e diversi indici di impatto ambientale. Sono stati considerati per questa analisi:

- la richiesta cumulativa di energia (energia incorporata);
- il potenziale di riscaldamento globale (GWP 100).

L'energia incorporata è definita come l'energia disponibile che è stata consumata durante di realizzazione di un prodotto. Le unità di riferimento tipicamente adottate per l'energia incorporata sono MJ/kg (megajoule di energia necessaria per produrre un chilogrammo di prodotto) e tCO<sub>2</sub> (tonnellate di anidride carbonica emessi per la produzione dell'energia necessaria per un chilogrammo di prodotto).

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) quantifica l'impronta di carbonio. Si basa su una scala relativa che confronta il gas serra specifico con una massa equivalente di CO<sub>2</sub>, il cui GWP è per definizione pari a 1.

Le considerazioni e valutazioni degli impatti dei processi di produzione dei campioni sono stati determinati, rispettivamente, per mezzo degli ecoindicatori:

- IPCC GWP a 100 anni
- CUMULATIVE ENERGY DEMAND 1.08.

I fattori di caratterizzazione applicati per la conversione delle emissioni di gas ad effetto serra in anidride carbonica equivalente sono rispettivamente 1, 25 e 298 per l'anidride carbonica, il metano e il protossido di azoto.

Sono state adottate due diverse unità funzionali:

- la superficie di pannello prodotta ai fini del confronto dell'impatto globale dei diversi scenari di intervento proposti nel caso studio;
- la superficie necessaria ( $m^2$ ) ad ottenere 1'unità di assorbimento acustico per ciascun materiale, al fine di confrontare i materiali convenzionali ed innovativi considerando anche le proprietà acustiche che li caratterizzano.

Al fine di confrontare le soluzioni innovative con materiali standard presenti sul mercato e generalmente impiegati come pannelli assorbenti all'interno delle sale (in lana di vetro e polistirene estruso), sono stati presi in esame gli andamenti dei coefficienti di assorbimento per incidenza diffusa in bande di ottava da 250 a 4000 Hz ed è stato preso in considerazione un coefficiente di assorbimento medio di tutte le frequenze. In questo modo è stato possibile ottenere un indice a singolo numero che è in grado di caratterizzare acusticamente il materiale: questo parametro, indicato come  $\alpha_{medio}$ , è il coefficiente di normalizzazione scelto per l'analisi LCA al fine di confrontare i risultati a parità di prestazioni acustiche ottenute.

L'analisi LCA è stata condotta secondo l'approccio "dalla culla al cancello" dell'azienda produttrice dei materiali, mediante software Simapro (PreConsultants); sono inclusi gli input di materie prime ed energia per le operazioni necessarie al riciclo della materia originaria per i materiali innovativi e tutti i consumi energetici per la realizzazione dei pannelli presso l'azienda produttrice.

I dati, laddove disponibili, sono stati raccolti direttamente a livello di singolo processo (dato primario) presso l'azienda produttrice, come ad esempio i consumi del processo di produzione dei pannelli e le distanze con i fornitori delle materie riciclate e del collante. I dati secondari e terziari sono stati desunti da banche dati internazionali (Ecoinvent), di supporto nelle valutazioni ambientali, o calcolati con opportuni modelli di stima (IPCC).

### 7.3 LCA pannelli in carta da macero, TNT e fibre tessili

In questa fase sono stati analizzati e confrontati i campioni prodotti industrialmente.

Sono state considerate 3 tipologie diverse di campioni:

- (D) è formato da uno strato di carta da macero pressata e incollata da 1 cm più due fogli di materiale fibroso in poliestere (ciascuno di 0.4 cm) per uno spessore complessivo di 1.8 cm;
- (E) è costituito da fogli di carta da macero pressati ed incollati tra di loro a formare un pannello di spessore complessivo pari a 1 cm;
- (G) è composto da uno strato di carta da macero incollata, a cui è stato applicato un pannellino di 4.5 cm di spessore di fibre tessili pressate, di spessore complessivo 5 cm.

Entrando nella fase di inventario, che riguarda la descrizione di tutte le operazioni e dei materiali necessari per la realizzazione del prodotto finale risalendo fino all'estrazione delle materie prime, si costruisce un modello di schematizzazione della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra i singoli processi appartenenti alla catena produttiva analizzata.

A seguire si riportano i sottoprocessi analizzati dei tre pannelli isolanti:

- produzione di colla;
- trasporto materiali;
- produzione pannello.

Non risulta, invece, necessario creare un sottoprocesso dei materiali come cartone, carta da macero, materiali in scarti tessili e fiocchi di carta in quanto materiali totalmente riciclati: in questo caso è stato considerato solamente il trasporto.

Per quanto riguarda l'installazione e la manutenzione, gli impatti sono stati trascurati in quanto si tratta di nuovi materiali e non sono noti dati su questa fase. L'analisi si ferma, infatti, al cancello. Al contrario, il consumo di energia per la fabbricazione della colla non può essere trascurata.

Per quanto riguarda i trasporti, si è ipotizzato che il trasporto sia nazionale ed il mezzo di trasporto sia un camion di portata massima di 3,5 tonnellate. Il camion considerato ha dimensioni di 5,32 m di lunghezza e 1,95 m di larghezza. La carta da macero proviene da zone limitrofe (Monza, nord-ovest d'Italia, circa 10 km dalla fabbrica). Le colle impiegate per l'articolazione del pannello sono composte di silicato di sodio (33% del peso totale) e acqua (66% del peso totale). Le colle e gli scarti tessili provengono da una società a circa

165 km dalla fabbrica. Consumi di carburante ed emissioni in aria nelle fasi di trasporto sono stati valutati, a seconda delle modalità di trasporto e la distanza tra i siti. Durante l'intero processo di produzione il consumo di acqua è di circa 0,6 kg/m<sup>2</sup> e il consumo di energia elettrica è pari a 0,04 kWh/m<sup>2</sup>.

Altri dati mancanti provengono da stime, database del programma e Letteratura, come ad esempio il peso dei pallet per il trasporto all'interno del camion delle fibre tessili, della carta e della colla, e dei contenitori in polietilene per il trasporto della colla. Ogni valore inserito è stato rapportato all'unità funzionale.

Per valutare l'impatto ambientale del processo è necessario elaborare un inventario di tutti gli ingressi e le uscite noti: l'unità funzionale del pannello è stata calcolata per una superficie A di 1 m<sup>2</sup>.

In tabella 1 vengono riportati i dati di inventario utilizzate come input per la valutazione LCA.

**Tabella 1: Analisi di inventario (impatti riferiti ad 1 m<sup>2</sup> di pannello prodotto).**

Pannello D	Processo	Quantitativo (per 1 kg di materiale)
<i>Cartone riciclato (6.8 kg)</i>	Cartone riciclato	1 kg
	Trasporto (30 km a/r)	0.03 t km
<i>TNT riciclato (2.72 kg)</i>	Polipropilene riciclato	1 kg
	Trasporto (28 km a/r)	0.028 t km
<i>Collante (1.4 kg)</i>	Sodio silicato	0.33 kg
	Acqua	0.67 kg
	Polietilene per imballaggio	0.0357 kg
	Trasporto (320 km a/r)	0.32 t km
<i>Produzione pannello</i>		Quantitativo (per 1 m <sup>2</sup> di pannello)
	Energia elettrica	0.04 kW
	Acqua	0.7 kg

<b>Pannello E</b>	<b>Processo</b>	Quantitativo (per 1 kg di materiale)
<i>Carta da macero (5.06 kg)</i>	Carta riciclata	1 kg
	Trasporto (30 km a/r)	0.03 t km
<i>Collante (1.4 kg)</i>	Sodio silicato	0.33 kg
	Acqua	0.67 kg
	Polietilene per imballaggio	0.0357 kg
	Trasporto (320 km a/r)	0.32 t km
<i>Produzione pannello</i>		Quantitativo (per 1 m <sup>2</sup> di pannello)
	Energia elettrica	0.04 kW
	Acqua	0.7 kg
<b>Pannello G</b>	<b>Processo</b>	Quantitativo (per 1 kg di materiale)
<i>Cartone riciclato (3.4 kg)</i>	Cartone riciclato	1 kg
	Trasporto (30 km a/r)	0.03 t km
<i>Scarti tessili (1.4 kg)</i>	Lana riciclata	1 kg
	Energia elettrica	0.03 kW
	Trasporto (360 km a/r)	0.36 t km
<i>Collante (0.7 kg)</i>	Sodio silicato	0.33 kg
	Acqua	0.67 kg
	Polietilene per imballaggio	0.0357 kg
	Trasporto (320 km a/r)	0.32 t km
<i>Produzione pannello</i>		Quantitativo (per 1 m <sup>2</sup> di pannello)
	Energia elettrica	0.04 kW
	Acqua	0.7 kg

La determinazione dell'impatto dovuto alla produzione dei campioni imballati e pronti per l'uso, al netto dei trasporti necessari a trasportare le materie prime all'azienda per le premesse specificate al paragrafo precedente, ha prodotto i seguenti risultati in termini di energia incorporata in ciascuna fase.

Per effettuare un confronto sono estratti e riportati in tabella 3 i dati corrispondenti al valore di energia primaria totale in MJ dei campioni.

**Tabella 3: Valutazione dell'impatto ambientale legato alla produzione dei pannelli in termini di CED (MJ/f.u.).**

Pannelli fonoassorbenti	$\alpha_{\text{medio}} [-]$	CED (MJ) (1 m <sup>2</sup> di pannello)	CED (MJ) (1 unità assorbente)
D	0.39	73.5	188.7
E	0.32	14.8	46.3
G	0.59	14.4	24.4

L'impatto dovuto alla produzione dei campioni imballati e pronti per l'uso, al netto dei trasporti necessari a trasportare le materie prime all'azienda per le premesse specificate al paragrafo precedente, ha prodotto i seguenti valori riportati in tabella 4. Il risultato del metodo IPCC GWP 100a è stato valutato in termini di superficie prodotta è stato scelto il m<sup>2</sup> di pannello, mentre per tenere conto delle performance di fonoassorbimento ci si è riferiti ai m<sup>2</sup> di superficie fonoassorbente necessari ad ottenere 1'unità di assorbimento acustico (1/  $\alpha_{\text{medio}}$ ) e riferito ad uno spessore convenzionale di 5 cm.

**Tabella 4: Valutazione dell'impatto ambientale legato alla produzione dei pannelli in termini di IPCC GWP100a (kg CO<sub>2eq</sub> /u.f.).**

Pannelli fonoassorbenti	$\alpha_{\text{medio}} [-]$	GWP 100 anni (kg CO <sub>2eq</sub> ) (1 m <sup>2</sup> di pannello)	GWP 100 anni (MJ) (1 unità assorbente)
D	0.39	8.0	20.7
E	0.32	4.7	14.7
G	0.59	3.1	5.2

Dai risultati dello studio LCA si evince che l'impiego di materiali riciclati, per i quali è nullo l'impatto legato alla produzione della materia prima di origine, consente di ridurre notevolmente i gas serra emessi dal processo produttivo. In termini di superficie prodotta, le prestazioni ambientali risultano migliori per il pannello G, costituito da scarti tessili e carta riciclata, grazie al minor quantitativo di materiale necessario ed alla minor densità. In riferimento alla superficie assorbente, le prestazioni ambientali dei materiali convenzionali e di quelli innovativi tendono ad avvicinarsi grazie alle migliori capacità di assorbimento acustico della lana di vetro e del polistirene estruso; confrontando però due materiali con similari proprietà acustiche quali il polistirene estruso e il pannello G,

in entrambi i confronti, si apprezza il vantaggio ambientale significativo ottenibile dall'adozione di pannellature in materiale riciclato.

## 7.4 LCA pannelli in pellicola argentea di caffè

I confini del sistema comprendono tre fasi:

- La produzione della pellicola argentea di caffè ed il trasporto;
- la produzione di colla e trasporto;
- Produzione di pannelli con tre diverse metodologie.

La pellicola argentea di caffè è un sottoprodotto della catena di torrefazione del caffè dunque il suo impatto ambientale è trascurato in termini di consumo energetico in fase di produzione: E' stato considerato solo l'impatto ambientale dovuto al trasporto per il luogo di produzione dei pannelli (autocarro per una distanza media di 100 km). Al fine di valutare l'impatto ambientale della fase di produzione dei pannelli, sono state analizzate le presse a caldo e freddo disponibili in commercio. Sulla base delle caratteristiche dell'apparecchiatura a scala di laboratorio (pressione, tempo di pressione e temperatura massima) sono state scelte le opportune attrezzature industriali. I dati di inventario relativi al sistema produzione di pannelli incollati sono quelli già utilizzati per la produzione dei pannelli in carta da macero. I dati di inventario per i tre scenari di produzione sono riportati nella Tabella 5.

**Tabella 5: dati di inventario per pannelli con pellicola argentea di caffè (f.u.= 1 m<sup>2</sup> di pannello).**

Dati di input: Materiali e Energia	Unità	Quantità
<b>Pannello pressa a caldo</b>		
<i>Elettricità</i>	kWh	0.90
<i>Pellicola argentea di caffè</i>	kg	9.00
<b>Pannellopresa a freddo</b>		
<i>Elettricità</i>	kWh	0.30
<i>Pellicola argentea di caffè</i>	kg	11.63
<b>Pannello con colla</b>		
<i>Pellicola argentea di caffè</i>	kg	3.07
<i>Colla</i>	kg	0.18
<i>Elettricità</i>	kWh	0.04
<i>Acqua</i>	kg	0.70

In tabella 6 e 7 vengono riportati i risultati rispettivamente di CED e GWP espressi in unità funzionale ( $1\text{m}^2$ ) riferiti ad 1 kg di materiale utilizzato.

**Tabella 6: Valutazione dell'impatto ambientale legato alla produzione dei pannelli in termini di CED (MJ/f.u.).**

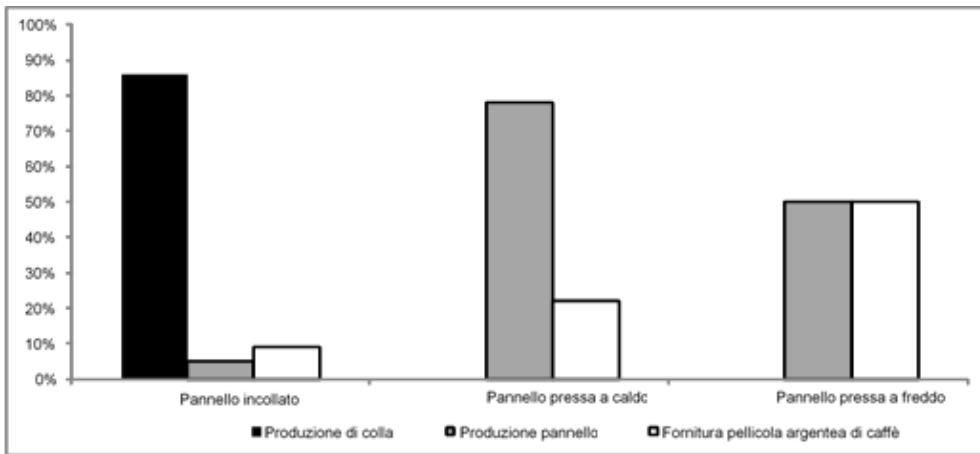
MATERIALE	ENERGIA INCORPORATA [MJ/u.f.]	ENERGIA INCORPORATA [MJ/kg]
incollato	11.54	30.37
pressa a caldo	13.09	62.33
pressa a freddo	6.84	14.60

**Tabella 7: Valutazione dell'impatto ambientale legato alla produzione dei pannelli in termini di IPCC GWP100a (kg CO<sub>2eq</sub> /u.f.).**

MATERIALE	QUANTITA' DI CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> /u.f.]	QUANTITA' DI CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> / kg]
incollato	0.56	1.47
pressa a caldo	0.73	3.45
pressa a freddo	0.39	0.83

Le emissioni di gas serra (GHG emission)[8]relative a diversi scenari di produzione risultano più elevati per il pannello realizzato con pressa a caldo, a causa del consumo di energia per il riscaldamento della pressa e la maggiore densità del campione.

Per valutare nel dettaglio l'influenza delle diverse fasi sulle emissioni totali di gas serra, la figura 3 mostra le percentuali di impatto per fornitura di pellicola argentea di caffè, la produzione di pannelli e la produzione di colla (solo per il pannello incollato).



**Figura 3: Impatto in percentuale delle differenti fasi di produzione dei pannelli in pellicola argentea di caffè sulle emissioni di gas serra (GHG emissions)**

Il comportamento del pannello incollato è negativamente influenzato dal processo di produzione collante che causa il 86% delle emissioni totali; il consumo per la produzione del pannello è trascurabile.

Per il pannello prodotto con pressa a caldo, si nota che quasi l'80% delle emissioni di gas serra sono legate alla produzione del pannello, a causa del consumo di calore per la pressatura ad elevata temperatura.

La pressatura a freddo, invece, presenta un particolare comportamento: l'impatto è perfettamente attribuito alla fase di produzione e quella dell'approvvigionamento del materiale; questo fatto permette di affermare che questo tipo di produzione, nonostante la più alta densità del materiale, è la soluzione migliore per minimizzare l'impatto ambientale a parità di prestazioni acustiche.

Il confronto sulla base di 1'unità di assorbimento permette di valutare le prestazioni ambientali di ciascun pannello legate alle proprietà acustiche.

Questa valutazione conferma che i valori degli indicatori di GWP e CED per pannelli pressati a freddo sono i migliori, gli stessi indicatori per pannelli incollati e pressati a caldo sono notevolmente più elevati.

## 7.5 LCA pannelli in lolla di riso, granulato di gomma e sughero

I pannelli analizzati in questa fase sono stati ottenuti dallo stesso sistema di produzione; l'impatto del ciclo di vita dipende dunque dalla diversa natura del materiale riciclato utilizzato: granulato di gomma proveniente da pneumatici esausti, scarti di lavorazione da tappi da sughero e lolla di riso.

Nella Figura 4 sono delineati i confini del sistema. Sono stati considerati tre fasi del ciclo di vita: fornitura di componenti del pannello, trasporto in tutte le fasi e la produzione di pannelli.

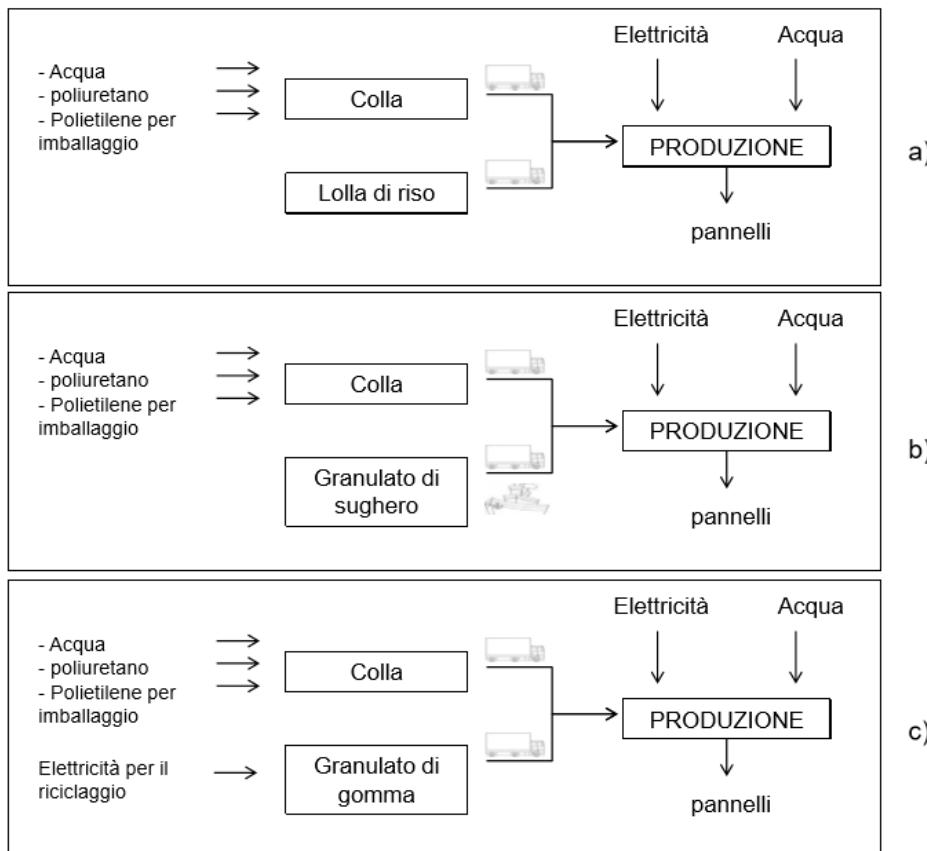


Figura 4: Confini del Sistema per l'analisi LCA

Il luogo ipotetico di produzione si presume essere Pavia, Italia del Nord. I produttori del granulato di gomma derivante da pneumatico e di lolla di riso si trovano a una distanza media di 160 km, perché la produzione di riso è concentrata nelle regioni Piemonte e Lombardia ed il granulato di gomma è prodotto da una società che raccoglie e smaltisce pneumatici esausti si trova in Nord Italia. Il granulato di gomma nella fase del riciclo subisce una lavorazione, che è la tritazione per la quale è stato dunque previsto un consumo di energia.

Per quanto riguarda gli scarti di sughero, tipicamente la produzione avviene in Sardegna, dunque si presume che la materia prima venga fornita e spedita a Livorno e poi in camion fino al sito di produzione (650 km). La produzione della colla avviene a circa 300 km dal sito ipotetico di produzione del pannello.

Nella Tabella 8 e Tabella 9 sono rispettivamente riportati i dati di inventario per 1 kg di componenti del pannello e per 1 m<sup>2</sup> di pannello incollato prodotto.

**Tabella 8: dati di inventario relative ai componenti (riferiti a 1kg di pannello prodotto)**

Dati di input: Materiali e Energia	Unità	Quantità
<b>Lolla di riso</b>		
<i>Trasporto</i>	tkm	0.32
<b>Granulato di gomma</b>		
<i>Elettricità per riciclaggio</i>	kWh	0.2
<i>Transport</i>	tkm	0.32
<b>Granulato di sughero</b>		
<i>Trasporto marino</i>	tkm	0.7
<i>Trasporto</i>	tkm	0.6
<b>Colla</b>		
<i>Poliuretano</i>	kg	0.5
<i>acqua</i>	kg	0.5
<i>Polietilene per imballaggio</i>	kg	0.0357
<i>Trasporto</i>	tkm	0.6

**Tabella 9: dati di inventario (f.u.= 1 m<sup>2</sup> di pannello)**

Dati di input: Materiali e Energia	Unità	Quantità
<i>Elettricità</i>	kWh	0.04
<i>acqua</i>	kg	0.7
<b>Pannello in lolla di riso</b>		
<i>Lolla di riso</i>	kg	2.36
<i>colla</i>	kg	0.38
<b>Pannello in granulato di sughero</b>		
<i>Granulato di sughero</i>	kg	2.26
<i>colla</i>	kg	1.08
<b>Pannello in granulato di gomma</b>		
<i>Granulato di gomma</i>	kg	8.51
<i>colla</i>	kg	0.85

Nelle figure 5 and 6 gli impatti vengono riportati mediante l'utilizzo rispettivamente degli indici GWP e CED per tre tipi di pannelli e le due diverse unità funzionali 1A e 1m<sup>2</sup>.

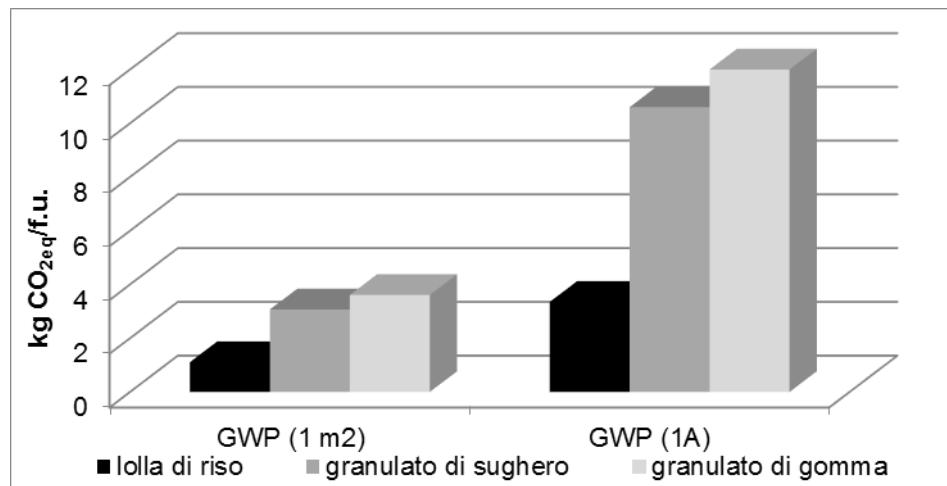


Figura 5: GWP (kg CO<sub>2</sub>eq/f.u.) dei tre tipi di pannelli

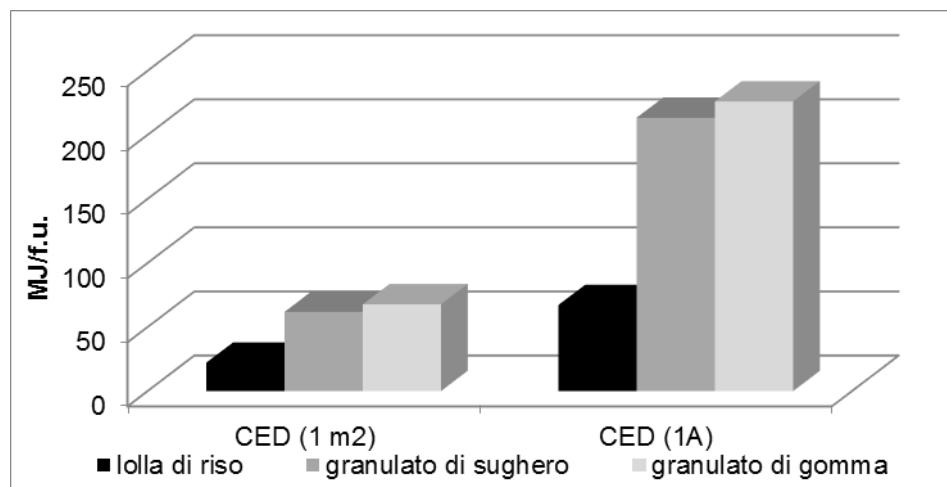


Figura 6: CED (MJ/f.u.) dei tre tipi di pannelli

In termini di superficie prodotta, le migliori prestazioni ambientali si ottengono per il pannello in lolla di riso (1.11 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>e 22.13 MJ/m<sup>2</sup> di energia non rinnovabile),

grazie alla minore quantità di materiale richiesto ed al fatto che non serve energia aggiuntiva per il riciclaggio della materia base.

Prendendo come riferimento l'unità di assorbimento acustico, a causa di non significative proprietà di assorbimento dei tre materiali, l'impatto ambientale ha un andamento simile a quello ottenuto per unità funzionale di superficie: il pannello in lolla di riso è la soluzione migliore assorbimento acustico, considerando gli impatti del ciclo di vita, rispetto all'utilizzo del granulato di sughero e del granulato di gomma.

## Bibliografia

- [1] C. Sbicego, Strumenti di valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici: i metodi di certificazione ambientale e la metodologia LIFE CYCLE ASSESSMENT, tesi di dottorato, Unipd XXII;
- [2] P. Ricciardi, E. Belloni, F. Cotana, “Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment”, Energy and Buildings 134 (2014) 150–162;
- [3] I.Z. Bribian, A.V. Capilla, A.A. Uson, Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, Build Environ 49 (2011) 1133–1140;
- [4] ISO 14040, Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and frame work, 2006;
- [5] REGOLAMENTO (CEE) N. 881/92 DEL CONSIGLIO del 26 marzo 1992
- [6] ISO/TC 207 Environmental management 1993;
- [7] ISO 14044 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines 2006;
- [8] C. Buratti, M. Barbanera, F. Fantozzi, Assessment of GHG emissions of biomethane from energy cereal crops in Umbria, Italy, Appl. Energy 108 (2013) 128–36;

## **Capitolo 8 Modellazione matematica per la previsione del coefficiente di assorbimento**

Al fine di prevedere il comportamento acustico in termini di fonoassorbimento dei materiali porosi, a partire dagli anni '50, sono state svolte numerose ricerche riguardanti lo studio della propagazione sonora nei materiali. Ciò ha portato alla nascita dei modelli di calcolo.

I materiali porosi, oggetto di studio dei modelli di calcolo, possiedono una struttura in cui sono presenti delle micro-cavità.

Una possibile classificazione di tali materiali è quella che li distingue in materiali porosi a celle chiuse e materiali porosi a celle aperte. [1, 2]

Quelli che presentano una struttura porosa a celle aperte interconnesse costituiscono un mezzo in cui l'energia sonora è dissipata in modo efficace.

Ipotizzando una struttura del materiale rigida, è possibile affermare che la dissipazione sia associata agli effetti della viscosità dell'aria negli interstizi del mezzo poroso ed agli effetti dello scambio termico tra l'aria e le superfici solide a contatto con essa [3, 4, 5, 6].

Su questa ipotesi si basa la validità di molti dei modelli matematici che sono stati realizzati per prevedere, nella maniera più corretta possibile, la propagazione sonora nei materiali porosi.

In questo capitolo, dopo una presentazione delle tipologie più diffuse dei modelli di calcolo utilizzati in letteratura, ne sono stati applicati alcuni ai materiali oggetto di studio della presente tesi, al fine di confrontare le curve teoriche con quelle sperimentali ottenute in laboratorio. Successivamente, sono stati considerati i casi in cui la curva sperimentale è risultata ben approssimata da almeno una curva teorica, al fine di studiare un possibile modo di ottimizzazione dei materiali. Infine, per ogni caso selezionato, servendosi sempre dei modelli di calcolo, è stato valutato il comportamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al crescere dello spessore dei campioni.

### **8.1 Stato dell'arte sui modelli di calcolo in letteratura**

I modelli presenti in letteratura possono essere classificati in teorici e numerici [1].

Il fine comune nelle ricerche dei modelli teorici è rappresentato dal calcolo di due proprietà acustiche intrinseche dei materiali, il numero d'onda complesso, ovvero il numero di oscillazioni dell'onda nell'unità di lunghezza, e l'impedenza caratteristica complessa, ovvero il rapporto tra la pressione sonora e la componente normale della velocità di vibrazione delle particelle in un punto. Queste due proprietà consentono di trattare il materiale come un fluido comprimibile dissipativo equivalente, per cui la descrizione del campo sonoro può essere basata sui formalismi della propagazione del suono nell'aria.

Grazie al calcolo delle due proprietà sopra citate, tutti i modelli permettono il calcolo del coefficiente di assorbimento per incidenza normale  $\alpha$ [1], definito in equazione (1):

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

dove CRF è il fattore di riflessione complesso e vale:

$$CRF = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \quad (2)$$

dove

$c_0$  rappresenta la velocità del suono nell'aria libera e vale 344 m/s,

$\rho$  è la densità dell'aria e vale 1,2 Kg/m<sup>3</sup> e

$Z_s$  è l'impedenza acustica superficiale espressa in Pa s / m

In ambito acustico, i modelli di calcolo teorici seguono tre diversi approcci:

- empirico;
- microstrutturale;
- fenomenologico.

Di seguito si descrivono queste tre categorie e i principali modelli di calcolo che ne fanno parte.

### 8.1.1 Approccio empirico

I modelli empirici utilizzano il solo parametro della resistenza al flusso d'aria  $R$  [(Pa s)/m<sup>2</sup>] per valutare l'impedenza caratteristica  $Z_C$ . Questi modelli non considerano la

struttura interna del materiale e, quindi, sono idonei solo per lo studio di materiali porosi aventi struttura non complessa.

I primi a proporre un modello di tipo empirico sono stati Delany e Bazley nel 1970 [2]. Essi hanno sviluppato una serie di formule per stimare l'impedenza caratteristica e la costante di propagazione di materiali fibrosi, aventi elevata resistenza al flusso (2.000-80.000 [ $\text{Pa s}$  /  $\text{m}^2$ ]). L'ipotesi fondamentale su cui si basa questo modello prevede che il materiale testato abbia una struttura rigida. Assumendo tale condizione, si giunge a risultati prossimi alla realtà, specialmente per elevate resistenze al flusso.

Il maggiore difetto del modello di Delany e Bazley è la sua applicabilità solo nel caso di materiali aventi porosità prossima ad 1 e solo nell'intervallo  $f/R$  compreso tra  $10^{-2}$  e 1, dove  $f$  è la frequenza e  $R$  la resistenza al flusso d'aria.

Inoltre, il modello può portare al calcolo di valori negativi del coefficiente di assorbimento per frequenze inferiori a 250 Hz ed è poco preciso in caso di strutture multistrato.

Il modello di Delany e Bazley, come la maggior parte dei modelli empirici, per calcolare il coefficiente di assorbimento, si serve di un parametro adimensionale  $X$ , funzione della resistenza al flusso [1]:

$$X = \frac{\rho_0 f}{R} \quad (3)$$

dove

$\rho_0$  è la densità dell'aria metti unità misura

$f$  è la frequenza metti unità misura

$R$  è la resistenza al flusso metti unità misura

La costante di propagazione complessa  $\Gamma_c$  è fornita dalla seguente equazione:

$$\Gamma_c = \frac{\omega}{c_0} (c_5 X^{-c_6} + i(1 + c_7 X^{c_8})) \quad (4)$$

dove

$\omega$  è la frequenza angolare

$c_5$   $c_6$   $c_7$  e  $c_8$  sono i coefficienti illustrati in tabella 1

Mentre, il calcolo dell'impedenza superficiale  $Z_s$  è reso possibile dalla seguente formula:

$$Z_s = ((\rho_0 c_0 (1 + c_1 X^{c_2} - i c_3 X^{c_4})) \coth(\Gamma_c d)) \quad (5)$$

dove

d è lo spessore del campione

Come per tutti i modelli di tipo empirico, il fattore di riflessione complesso CRF, può essere calcolato servendosi dell'equazione (2).

In seguito, un miglioramento a tale modello è stato suggerito da Bies e Hansen (1980), da Quinli (1988) e, successivamente, da Hence e Miki (1990), i quali lo hanno reso utilizzabile per tutte le frequenze [2]. Questi modelli presentano la stessa struttura di quello di Delany e Bazley [1, 4].

Un ulteriore modello di tipo empirico è stato suggerito da Allard e Champoux nel 1992 [1]. Il modello si basa sull'ipotesi che gli effetti termici siano indipendenti dalla frequenza. A differenza degli altri modelli di tipo empirico, Allard e Champoux hanno utilizzato due nuovi parametri: la densità dinamica  $\rho_x$ , espressa in  $\text{Kg/m}^3$ , ed il modulo di massa  $K_x$ , in  $\text{Kg}/(\text{m}^3\text{s})$ : espressi rispettivamente in equazione 6 e 7.

$$\rho_x = 1,2 + \sqrt{-0,0364X^{-2} + i 0,1144X^{-1}} \quad (6)$$

$$K_x = P_0 \frac{i 29,64 + \sqrt{2,82X^{-2} + i 24,9X^{-1}}}{i 21,17 + \sqrt{2,82X^{-2} + i 24,9X^{-1}}} \quad (7)$$

Il modello modifica le espressioni dell'impedenza caratteristica  $Z_c$  e della costante di propagazione  $\Gamma_c$  nel seguente modo.

$$Z_c = \sqrt{\rho_x K_x} \quad (8)$$

$$\Gamma_c = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (9)$$

L'impedenza superficiale  $Z_s$ , come per la maggior parte dei modelli, si ricava grazie alla seguente equazione.

$$Z_s = Z_c \coth(-i\Gamma_c d) \quad (10)$$

Si riportano in tabella 1 i valori dei coefficienti c1-c7 utilizzanti dai metodi citati.

**Tabella 1: Coefficienti c1-c7 relativi ad alcuni modelli empirici [1]**

Metodo	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
Delany e Bazley	0,0571	-0,7540	0,0870	-0,7320	0,1890	-0,5950	0,0970	-0,7000
Quinli	0,2090	-0,5480	0,1050	-0,6070	0,1630	-0,5920	0,1880	-0,5540
Hence e Miki	0,0700	-0,6320	0,1070	-0,6320	0,1600	-0,6180	0,1090	-0,6180
Allard e Champoux	0,0720	-0,66228	0,1870	-0,5370	0,2880	-0,5260	0,0980	-0,6850

In seguito, sono stati pubblicati altri modelli semiempirici, come quello di Voronina (1994) [2, 7], che introduce un nuovo parametro rappresentante la media della dimensione dei pori  $\sigma$ .

I modelli empirici presentano il vantaggio della semplicità d'uso, infatti, per il calcolo delle caratteristiche acustiche del materiale è richiesta la conoscenza della sola resistenza al flusso, parametro facilmente misurabile. Tuttavia, essi sono validi solo per un intervallo di frequenze limitato, infatti, portano a risultati irrealistici sia per basse frequenze, sia per frequenze molto alte [1, 3, 8]. Inoltre, spesso, questi modelli non sono adatti a prevedere il comportamento acustico dei materiali di natura granulare.

### 8.1.2 Approccio microstrutturale

Un secondo tipo di approccio è quello microstrutturale. Esso studia dettagliatamente la propagazione sonora in un singolo poro di geometria semplice, considerando separatamente gli effetti della viscosità e degli scambi termici dell'aria con le pareti del poro. Successivamente, tramite alcune correzioni, che tengono conto della complessità della struttura, i risultati vengono estesi all'intero materiale poroso.

Su questo tipo di approccio, utilizzato per la prima volta da Rayleigh nel 1945, si basa il modello di Zwikker e Kostendel 1949, i quali hanno modellato i materiali porosi come se fossero una struttura rigida con pori cilindrici dritti [3,4].

Si riportano, di seguito, le equazioni (11) e (12) che permettono il calcolo della densità complessa  $\rho_x$  e del modulo di elasticità complessa  $\varepsilon_x$  [9].

$$\rho_x = \frac{\rho_0}{1 - \frac{\omega \rho_0 r^2}{\eta} \sqrt{-i} \frac{J_1}{J_0}} \quad (11)$$

dove  $J_1$  e  $J_0$  sono rispettivamente le funzioni di Bessel di ordine 1 e 0

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{\gamma}{\rho_0}}{1 + \frac{2}{\sqrt{\frac{\omega \rho_0 r^2}{\eta} \sqrt{-i\eta \frac{\gamma}{\rho_0 v}}}}} \quad (12)$$

dove  $\gamma_x$  è espressa in equazione (13)

$$\gamma_x = -i \omega \sqrt{\frac{\rho_0}{K_x}} \quad (13)$$

L'equazione che permette il calcolo dell'impedenza superficiale è espressa dall'equazione (14).

$$Z_S = \sqrt{K \rho_x} \frac{e^{2,5\gamma_x} + e^{-2,5\gamma_x}}{e^{2,5\gamma_x} - e^{-2,5\gamma_x}} \quad (14)$$

I modelli microstrutturali differiscono tra loro, oltre che per la forma delle equazioni, anche per gli effetti dei fattori di forma, parametri che cercano di tenere conto della struttura geometrica dei pori rispetto alla geometria semplice del poro di base.

Biot [3,5], basandosi sullo stesso tipo di approccio, ha formulato la teoria della propagazione delle onde elastiche per la propagazione acustica nei materiali porosi.

Questa teoria ipotizza che la struttura porosa sia rigida, ovvero che al passaggio dell'onda acustica, la struttura non vibri.

Il modello di Biot, introdotto nel 1956, per la previsione della propagazione sonora, si basa su cinque parametri, anche noti come parametri di Biot. Questi parametri sono la resistenza al flusso, la tortuosità, la porosità, la lunghezza caratteristica viscosa e la lunghezza caratteristica termica [2].

Questo modello è il più indicato per lo studio di materiali aventi struttura elastica porosa.

In seguito, nel 1987 Johnson e Allard [3] hanno studiato un modello completo per strutture rigide, che svincola il fattore di forma dalla frequenza e tratta i materiali porosi come un fluido equivalente.

In questo modello, noto anche come modello del fluido equivalente, l'interazione tra il fluido e la parte fissa della struttura solida è tenuta in considerazione tramite i parametri delle perdite viscosa e termica.

Per descrivere le caratteristiche del materiale poroso, il modello richiede in totale la conoscenza di cinque parametri non acustici: resistenza al flusso, porosità, tortuosità e le due lunghezze caratteristiche viscosa e termica.

Tale modello esprime la costante di propagazione  $\Gamma_c$  e l'impedenza acustica  $Z_c$  del materiale mediante due grandezze, la densità complessa  $\rho(\omega)$  e il modulo di elasticità complessa  $K(\omega)$ , che rispettivamente tengono conto degli effetti viscosi e termici.

Per calcolare il modulo di elasticità complessa si può utilizzare l'espressione di Zwikker e Kosten [5] espressa in equazione (12), mentre l'equazione (15) permette di ricavare la densità dinamica.

$$\rho(\omega) = \rho_0 q - \left( \frac{i\omega R}{\omega} \right) F(\lambda) \quad (15)$$

Johnson e Allard[3] hanno introdotto il coefficiente di correzione viscosa  $F(\lambda)$ , che indica quanto il moto del fluido all'interno del poro si discosta da quello teorico di Poiseulle (Equazione (16)).

$$F(\lambda) = -\frac{1}{4} \left[ \frac{\sqrt{-i\lambda} \frac{J_1(\xi)}{J_0(\xi)} (\sqrt{-i\lambda})}{1 - \frac{2 \frac{J_1(\xi)}{J_0(\xi)} (\sqrt{-i\lambda})}{\sqrt{-i\lambda}}} \right] \quad (16)$$

Il parametro  $\lambda$  espresso in equazione (17) è adimensionale e serve per adattare il modello alla forma dei pori.

$$\lambda = s \left( \frac{8\omega\rho q}{\Omega R} \right) \quad (17)$$

Il fattore  $s$ , invece, varia a seconda della forma dei pori (poro circolare:  $s=1$ ; poro triangolare:  $s=1,095$ ). Combinando le due variabili, si ottengono l'impedenza caratteristica  $Z_c$  e la costante di propagazione  $\Gamma_c$  utilizzando le equazioni (8) e (9). Calcolati questi due parametri, è facile risalire all'impedenza superficiale  $Z_s$  utilizzando l'equazione 10. Il modello di Johnson e Allard ha il difetto di essere complicato da utilizzare, soprattutto in caso di campioni multistrato.

Successivamente, nel 1992 Champoux e Stinson [10, 11] hanno proposto un nuovo modello basato sui cinque parametri di Biot. Rispetto al modello di Johnson e Allard, le espressioni della densità complessa  $\rho_x$  e del modulo di massa  $K_x$  sono modificate e sono espresse rispettivamente in equazioni (18) e (19).

$$\rho_x = \frac{\rho_0 q}{\Omega} + \frac{R}{i\omega} \sqrt{\left(1 + \frac{4iq^2\eta\rho_0\omega}{R^2\Lambda^2\Omega^2}\right)} \quad (18)$$

$$K_x = \frac{\frac{\gamma P_0}{\Omega}}{\gamma - (\gamma - 1) \left[ 1 + \frac{8\eta}{i\Lambda'^2\rho_0\Pr\omega} \sqrt{1 + \frac{i\Lambda'^2\rho_0\Pr\omega}{16\eta}} \right]^{-1}} \quad (19)$$

Utilizzando le equazioni (8), (9) e (10) si giunge al calcolo dell'impedenza superficiale. Per il calcolo del coefficiente di assorbimento, Champoux propone la seguente equazione (20):

$$\alpha_n = \frac{4 \operatorname{Re}(Z_s)\rho_0 c_0}{|Z_s|^2 + 2\rho_0 c_0 \operatorname{Re}(Z_s) + (\rho_0 c_0)^2} \quad (20)$$

La formulazione delle equazioni presentata da Champoux e Stinson è complicata, ma porta a risultati molto prossimi alla realtà.

Fra gli studi aventi come obiettivo l'estensione dell'uso dei modelli microstrutturali al maggior numero di casi possibili, si ricordano quelli condotti da Attenborough, Stinson, Yanamoto e Turgut [2, 4, 12].

Attenborough [11] ha reso possibile l'utilizzo dei modelli microstrutturali per materiali aventi struttura di forma complessa e ha indicato come tali modelli possano essere utilizzati sia per materiali di natura fibrosa che granulare. Inoltre, nel 1993 egli ha dimostrato che la presenza di una distribuzione variabile della dimensione dei pori incide maggiormente, rispetto alla forma degli stessi, sulle caratteristiche acustiche di un materiale poroso.

Nel 1991 Stinson [2, 12] ha ottenuto ottimi risultati sul coefficiente di assorbimento per materiali aventi pori di forma cilindrica, rettangolare e triangolare, mentre Yanamoto e Turgut, nel 1988, hanno trattato il caso di una distribuzione della dimensione dei pori lognormale.

Un'evoluzione dello studio condotto da Yanamoto e Turgut è rappresentata dall'utilizzo dell'approssimante di Padé. Nel 1995 Horoshenkov, Attenborough e Chandler-Wilde [13,

14] hanno osservato come questo metodo permetta di considerare al meglio il contributo della distribuzione dei pori di varie forme. Questa soluzione, per essere adottata, richiede la conoscenza della porosità  $\Omega$ , della resistenza al flusso  $R$ , della tortuosità  $q$  e della deviazione standard della dimensione dei pori  $\sigma$ . Per determinare l'impedenza acustica  $Z_c$  e il numero d'onda complesso  $K_x$ , il modello suggerisce l'uso delle equazioni (21) e (22).

$$Z_c = (\rho_0 c_0)^{-1} \sqrt{\frac{\rho_b(\omega)}{C_b(\omega)}} \quad (21)$$

$$K_x = \omega \sqrt{\rho_x(\omega) C_x(\omega)} \quad (22)$$

In questo approccio gli effetti viscosi e termici nei pori tortuosi sono trattati separatamente, introducendo un'espressione per la densità dinamica  $\rho_x$  e per la compressibilità del fluido  $C_x$ . Si può solitamente assumere che la struttura rigida dei pori possa essere modellata come una serie di tubi capillari paralleli. In questo caso la densità dinamica  $\rho_x$  e la compressibilità del fluido  $C_x$  per una massa porosa possono essere espresse secondo le equazioni (23) e (24).

$$\rho_x = \rho_0 \frac{q^2}{\Omega} \left[ 1 + \frac{F(\varepsilon)}{(q\varepsilon)^2} \right] = \rho_0 \frac{q^2}{\Omega} \rho_x(\varepsilon) \quad (23)$$

$$C_x = \frac{\Omega}{\gamma P_0} \left[ \gamma - \frac{\gamma - 1}{\rho_x(\varepsilon N_{pr})} \right] \quad (24)$$

dove

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{-i\omega\rho_0 q^2}{R\Omega}} \quad (25)$$

La funzione correttiva della viscosità  $F(\varepsilon)$  può essere scritta nella forma suggerita dall'approssimazione di Padé:

$$F(\varepsilon) \cong \frac{1 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2}{1 + b_1\varepsilon} \quad (26)$$

dove  $a_1, a_2$ , e  $b_1$  sono dei coefficienti uguali a:

$$a_1 = b_1 = \frac{\theta_1}{\theta_2}; \quad a_2 = \theta_1 \quad (27)$$

Come si evince dalla tabella 2,  $\theta_1, \theta_2$  dipendono dalla geometria dei pori. In particolare, per pori circolari  $\theta_1, \theta_2$  sono espressi secondo le equazioni (28) e (29).

$$\theta_1 = \frac{4}{3}e^{4\xi} - 1 \quad (28)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{\frac{3}{2}\xi} \quad (29)$$

dove  $\xi = (\sigma \ln 2)^2$  con  $\sigma$  deviazione standard delle dimensioni dei pori.

**Tabella 2: Parametri  $\theta_1$  e  $\theta_2$  per varie forme di pori**

-	Pori simili a tagli	Pori triangolari	Pori circolari
<b><math>\theta_1</math></b>	$\frac{6}{5}e^{4\xi} - 1$	$\frac{10}{7}e^{4\xi} - 1$	$\frac{4}{3}e^{4\xi} - 1$
<b><math>\theta_2</math></b>	$\frac{1}{\sqrt{3}}e^{3/2\xi}$	$\frac{3}{5}e^{3/2\xi}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}e^{3/2\xi}$

L'impedenza acustica di superficie può essere, come sempre, calcolata utilizzando l'equazione 10. Infine, il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale è pari a:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - 1}{Z_s + 1} \right|^2 \quad (30)$$

L'uso dell'approssimante di Padé può condurre al calcolo di valori del coefficiente di assorbimento irreali per basse frequenze. Tuttavia, questo metodo conduce a una buona approssimazione delle misure sperimentali, soprattutto nel caso di materiali granulari [5, 13, 14].

Nel 2007 Kino e Ueno [15] hanno introdotto alcune correzioni al modello di Johnson e Allard, producendo un modello che presenta caratteristiche sia dell'approccio microstrutturale che empirico. Grazie all'introduzione di due nuovi parametri  $G_n$  e  $G'_n$ , è possibile giungere ad una nuova espressione del modulo di massa e prevedere in modo più preciso il coefficiente di assorbimento acustico per i materiali fibrosi. La densità dinamica  $\rho_\omega$  è espressa in equazione (31).

$$\rho_\omega = \rho_0 q \left( 1 + \frac{R\Omega}{iq\omega\rho_0} \right) G_n \quad (31)$$

dove

$$G_n = \sqrt{2\eta\rho_0\omega} \sqrt{\Lambda(1+i)\frac{\sqrt{N}}{R\Lambda\Omega}} \quad (32)$$

$$N = 8,622 e^{1,969*10^{-6}R} - 5,54 e^{-3,682*10^{-5}R} \quad (33)$$

Il modulo di massa  $K_X$  è, invece, ricavato con la seguente equazione (34)

$$K_X = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left( 1 + \frac{8\eta}{i\Lambda'\rho_0 N_{Pr}\omega} G'_n \right)^{-1}} \quad (34)$$

dove

$$G'_n = \sqrt{2\eta\rho_0\omega} \sqrt{\Lambda'(1+i)\frac{\sqrt{N'}}{8\eta}} \quad (35)$$

$$N' = 560,3 e^{-5,563*10^{-4}R} + 50,02 e^{-3,682*10^{-5}R} \quad (36)$$

L’impedenza caratteristica  $Z_c$  e la costante di propagazione  $\Gamma_c$  sono fornite dalle seguenti equazioni 8 e 9, mentre l’impedenza superficiale  $Z_s$  è calcolabile con l’equazione 10.

Sebbene con una scelta adeguata dei parametri e, in particolare, dei fattori di forma, i modelli microstrutturali portino a previsioni precise del coefficiente di assorbimento per tutte le frequenze, la necessità di conoscere ben cinque parametri non acustici e la particolare forma delle equazioni rendono questo tipo di modellazione di difficile utilizzo [2, 7].

### 8.1.3 Approccio fenomenologico

Un terzo tipo di modellazione è quella fenomenologica, che considera il mezzo poroso come un fluido comprimibile dissipativo. Questo tipo di approccio, utilizzato per la prima volta nel 1944 da Morse e Bolt [3] e, successivamente, nel 1968 da Morse e Ingard [3], tratta il materiale nella sua interezza e rappresenta un buon compromesso tra il numero di parametri richiesti, la complessità modellistica e la correttezza della previsione.

È stato riscontrato che, per bassi valori della resistenza al flusso, i coefficienti di assorbimento calcolati con l’approccio fenomenologico classico presentano differenze rispetto ai valori trovati sperimentalmente, poiché in tale metodologia non vengono considerati i fenomeni di dissipazione termica.

In seguito, nel 1992 Hamet [5, 16] ha apportato modifiche al modello classico di Morse e Ingard, modificando l’equazione del modulo di comprimibilità, che nella nuova formulazione diviene una quantità complessa che tiene conto dell’apporto dei fenomeni di dissipazione termica. La correzione apportata da Hamet ha reso valido l’utilizzo dell’approccio fenomenologico anche per materiali aventi bassa resistenza al flusso. Inoltre, la nuova formulazione di Hamet non necessita della definizione del tipo di processo in atto in funzione della frequenza, a differenza del modello di Morse e Ingard, per il quale è obbligatorio stabilire se la trasformazione sia isoterma o adiabatica. Il modello di Hamet è funzione di tre parametri: resistenza al flusso  $R$ , porosità  $\Omega$  e fattore di struttura  $s$ . Tale modello è una formulazione in termini di gas equivalente dissipativo [4, 6]. I suoi risultati portano alla determinazione dell’impedenza caratteristica  $Z_c(\omega)$  e del numero d’onda  $k_m(\omega)$ :

$$Z_c = \frac{\rho_0 c_0}{\Omega} \sqrt{q\gamma} \frac{\sqrt{1 - i \frac{f_u}{f}}}{\sqrt{1 - \frac{1 - \frac{1}{\gamma}}{1 - i \frac{f_\theta}{f}}}} \quad (37)$$

$$k_m = k_0 \sqrt{q\gamma} \sqrt{1 - i \frac{f_u}{f}} \sqrt{1 - \frac{1 - \frac{1}{\gamma}}{1 - i \frac{f_\theta}{f}}} \quad (38)$$

dove

la resistenza viscosa  $f_u$  e la resistenza termica  $f_\theta$  sono espresse dalle equazioni (39) e (40).

$$f_u = \frac{R\Omega}{2\pi q \rho_0} \quad (39)$$

$$f_\theta = \frac{R}{2\pi \rho_0 N_{Pr}} \quad (40)$$

L'impedenza superficiale  $Z_s$ , che in questo caso è meglio nota come impedenza superficiale specifica  $Z_s$ , è definita dalla equazione (41).

$$Z_s = \frac{Z_c}{\rho_0 c_0} \coth(-ik_m d) \quad (41)$$

Infine, il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale è calcolabile utilizzando l'equazione (30).

Il modello fenomenologico esteso di Hamet fornisce buoni risultati di previsione delle proprietà acustiche, soprattutto nel caso di materiali porosi a struttura rigida. La richiesta di due parametri in meno rispetto ai modelli microstrutturali, rende questo tipo di approccio di più semplice utilizzo.

Jinkyo nel 1992 [17] ha studiato un assorbente multistrato assemblato con una griglia perforata e un'intercapedine d'aria grazie all'approccio del circuito elettrico equivalente (EECA).

Nel 2001 Lee e Chen [2] hanno studiato dei pannelli multistrato con intercapedine d'aria, usando una nuova tecnica chiamata Acoustic – transmission approach (ATA). Questo nuovo approccio considera l'effetto della camera d'aria e i suoi risultati sono migliori rispetto all'EECA.

Sobolev et al. nel 2009 [18] hanno studiato un nuovo metodo per il calcolo dei parametri d'onda e dell'impedenza superficiale di una struttura di materiale omogeneo perforato. È risultato che il modello fornisce ottimi risultati di impedenza per qualsiasi struttura complessa e per qualsiasi spessore, diametro e percentuale perforata. Inoltre, ultimamente è stata studiata una tecnica che sfrutta il fenomeno noto come effetto Helmholtz. Questa tecnica permette di stimare l'impedenza di un pannello perforato posto davanti ad un materiale poroso e ad una intercapedine d'aria. L'abbinamento produce un aumento del coefficiente di assorbimento alle basse frequenze, mentre alle medie e alte frequenze si verifica una leggera riduzione dello stesso [2].

## **8.2 Confronto tra le curve sperimentali e teoriche del coefficiente di assorbimento per incidenza normale**

I modelli teorici applicati ai risultati sperimentali dei materiali oggetto di studio sono i seguenti:

- Modello di Hamet (fenomenologico a 3 parametri) (1992)
- Modello di Champoux e Stinson (microstrutturale a 5 parametri) (1992)
- Modello dell'approssimante di Padé (microstrutturale a 5 parametri) (1995)
- Modello di Kino&Ueno (microstrutturale a 5 parametri) (2007)

I dati di input utilizzati sono riportati di seguito in tabella 3, nella quale si è indicato con  $R$  la resistenza al flusso d'aria, con  $\Omega$  la porosità e con  $q$  la tortuosità. I parametri sono stati determinati sperimentalmente attraverso le prove illustrate rispettivamente ai paragrafi 5.1.1, 5.2.1 e 5.3.

**Tabella 3: Dati di input**

Campione	Spessore [mm]	R [Pa/ms]	$\Omega$	q
1A	18,04	13500	0,60	1,33
1F	18,20	18253	0,49	1,52
1S	15,05	22850	0,53	1,44
2B	16,21	22772	0,71	1,20
2E	20,65	26625	0,50	1,49
3C	17,15	16810	0,64	1,28
3D	18,20	18508	0,61	1,32
4A	9,38	335659	0,45	1,61
4T	11,10	411936	0,40	1,75
5T	14,50	15240	0,72	1,28

Grazie ai parametri riassunti in tabella 3, è stato possibile mettere a confronto le curve del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale generate dai quattro modelli di calcolo, con la curva di  $\alpha$ , ottenuta sperimentalmente in laboratorio.

Le figure dalla 1 alla 10 mettono a confronto le curve generate per mezzo dei modelli matematici con la curva ottenuta sperimentalmente. In ogni grafico sono presenti cinque curve di diverso colore:

- curva sperimentale – colore rosso;
- curva ottenuta con il modello di Hamet – colore verde;
- curva ottenuta con il modello di Champoux e Stinson – colore celeste;
- curva ottenuta con il modello dell'approssimante di Padé – colore blu;
- curva ottenuta con il modello di Kino e Ueno – colore viola.

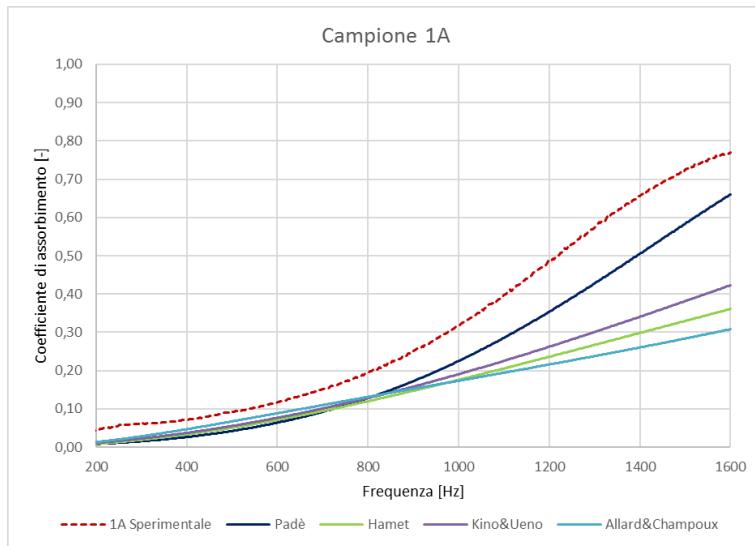


Figura 1: Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall’uso di alcuni modelli per il campione 1A (campione di lolla di riso di diametro di 100 mm assemblato con collante)

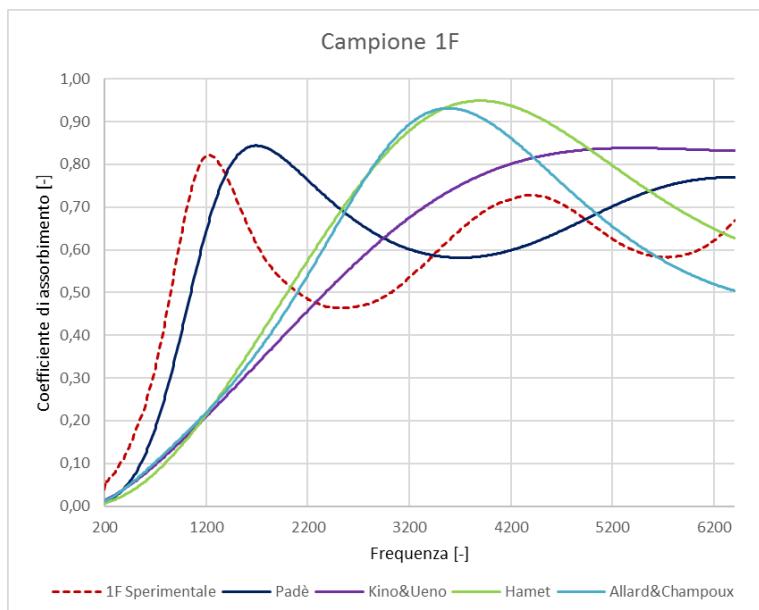
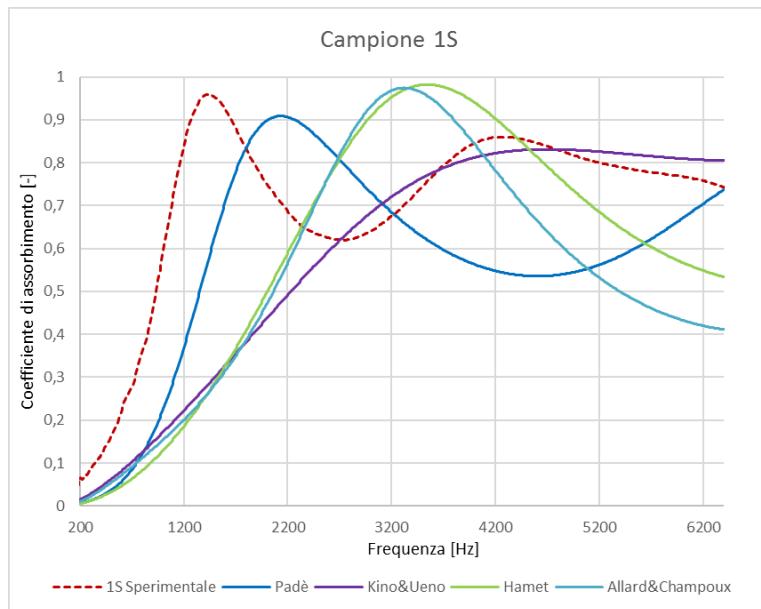
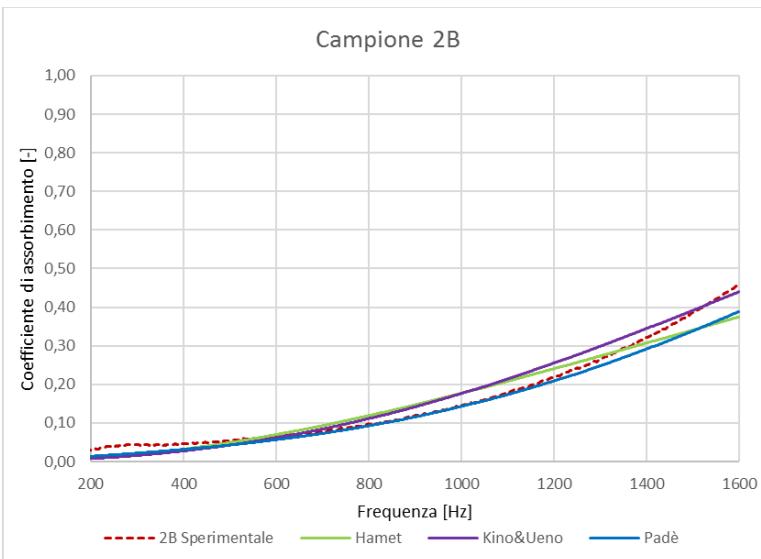


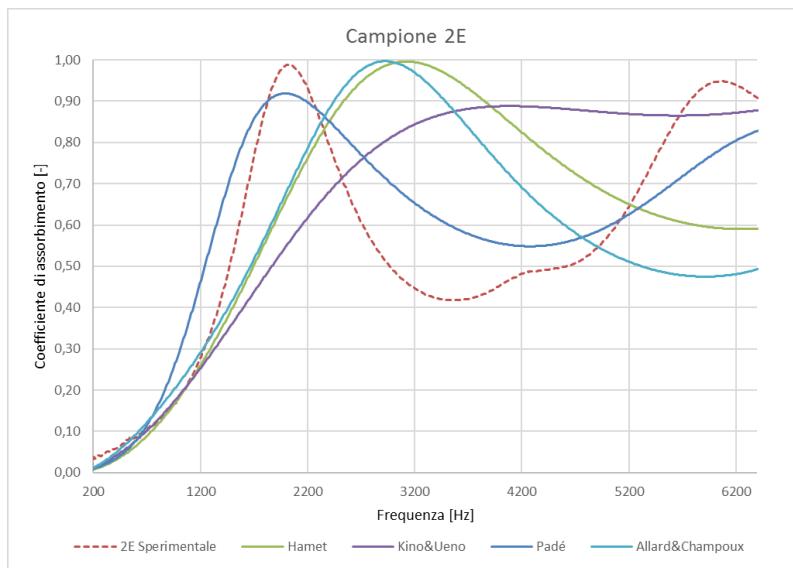
Figura 2: Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall’uso di alcuni modelli per il campione 1F (campione di lolla di riso di diametro di 29 mm assemblato con collante)



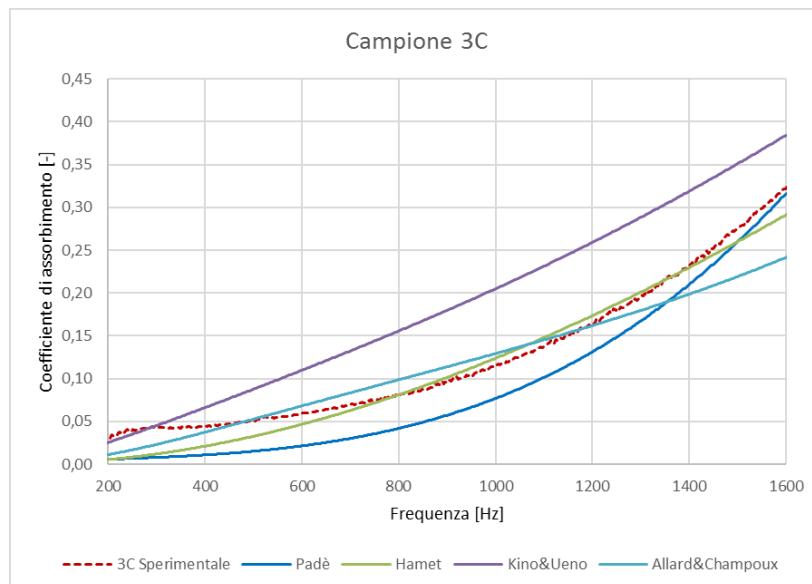
**Figura 3:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 1S (campione di lolla di riso di diametro di 29 mm realizzato con pressatura a freddo)



**Figura 4:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 2B (campione di granulato di gomma di diametro di 100 mm assemblato con collante)



**Figura 5:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall’uso di alcuni modelli per il campione 2E (campione di granulato di gomma di 29 mm assemblato con collante)



**Figura 6:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall’uso di alcuni modelli per il campione 3C (campione di granulato di sughero di diametro di 100 mm assemblato con collante)

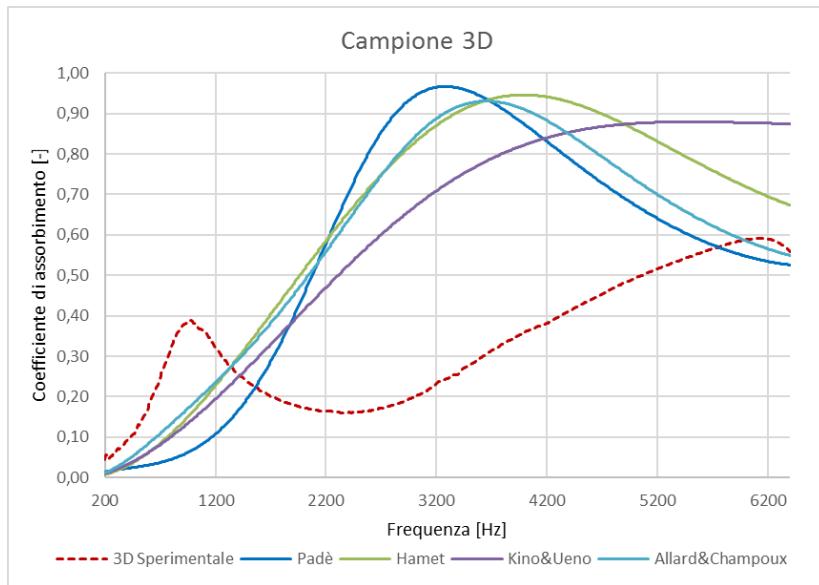


Figura 7: Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 3D (campione di granulato di sughero di diametro di 29 mm assemblato con collante)

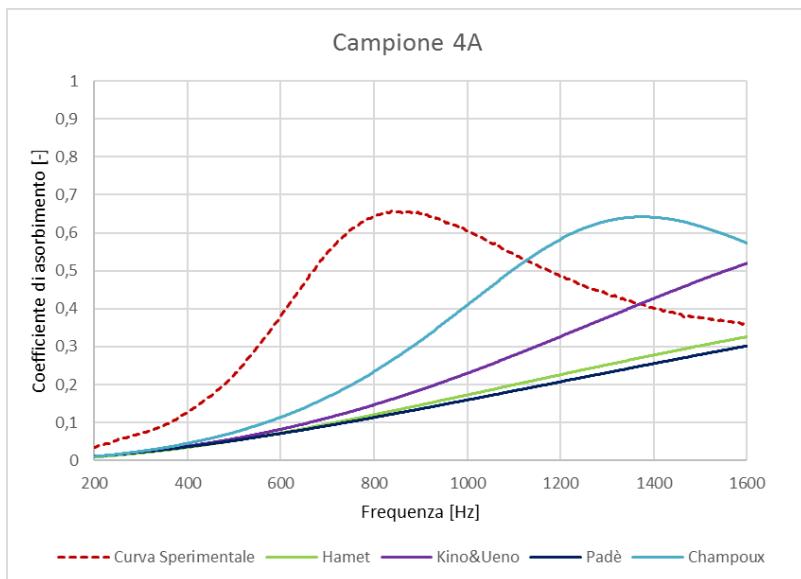
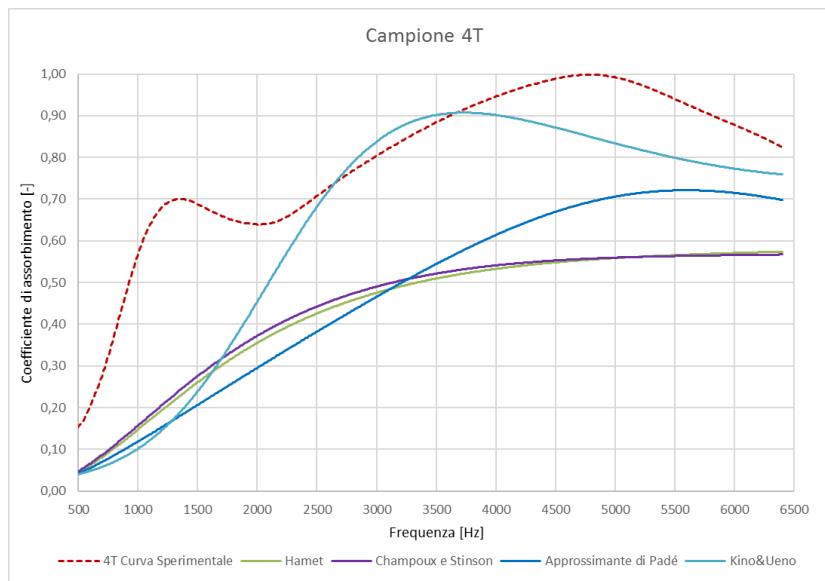
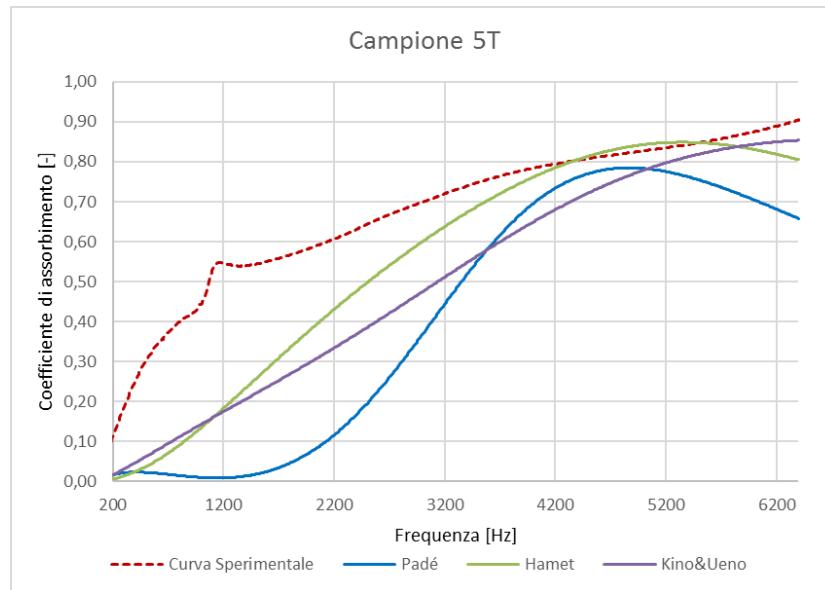


Figura 8: Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 4A (campione di pellicola argentea di caffè di diametro di 100 mm assemblato con collante)



**Figura 9:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 4T (campione di pellicola argentea di caffè di diametro di 29 mm realizzato con pressatura a caldo)



**Figura 10:** Confronto fra la curva sperimentale ricavata in laboratorio e le curve teoriche generate dall'uso di alcuni modelli per il campione 5T (campione di fibra tessile di diametro di 29 mm realizzato con pressatura a freddo)

Si sottolinea che i materiali oggetto di studio del presente lavoro di tesi, in particolare lolla di riso e pellicola argentea di caffè hanno una struttura diversa da quelli generalmente studiati finora e, che per una previsione più corretta del loro comportamento, potrebbero non essere adeguati i modelli di studio esistenti in letteratura.

Al contrario, le curve relative al coefficiente di assorbimento per incidenza normale, dei campioni costituiti da granuli di forma approssimativamente sferica, sono risultate meglio approssimate, in particolare dal modello dell'Approssimante di Padé, risultato il più adatto per questo tipo di materiali

### **8.2.1 Verifica dell'influenza dello spessore dei campioni sul coefficiente di assorbimento per incidenza normale**

Per ogni campione sono state valutate le differenze tra la curva sperimentale e quelle determinate dai modelli di calcolo esaminati. Successivamente, per ognuno di essi, sono state isolate due curve: quella sperimentale e quella teorica che meglio approssimasce l'andamento della prima.

Fra tutti i campioni presi in esame, sono stati scelti solo quelli in cui la curva del campione fosse adeguatamente approssimata da almeno una delle curve teoriche generate dai modelli di calcolo.

Grazie a tali operazioni, si è commesso un errore trascurabile facendo coincidere le curve sperimentali e teoriche selezionate ed è stato possibile, così, prevedere il comportamento del coefficiente di assorbimento, modificando solo i dati di input dei modelli matematici. Tutto ciò è stato pensato perché, solitamente, i pannelli resistivi, ovvero quelli che sfruttano l'assorbimento per porosità, e che trasformano l'energia sonora in calore, funzionano al meglio alle medie e medio-alte frequenze.

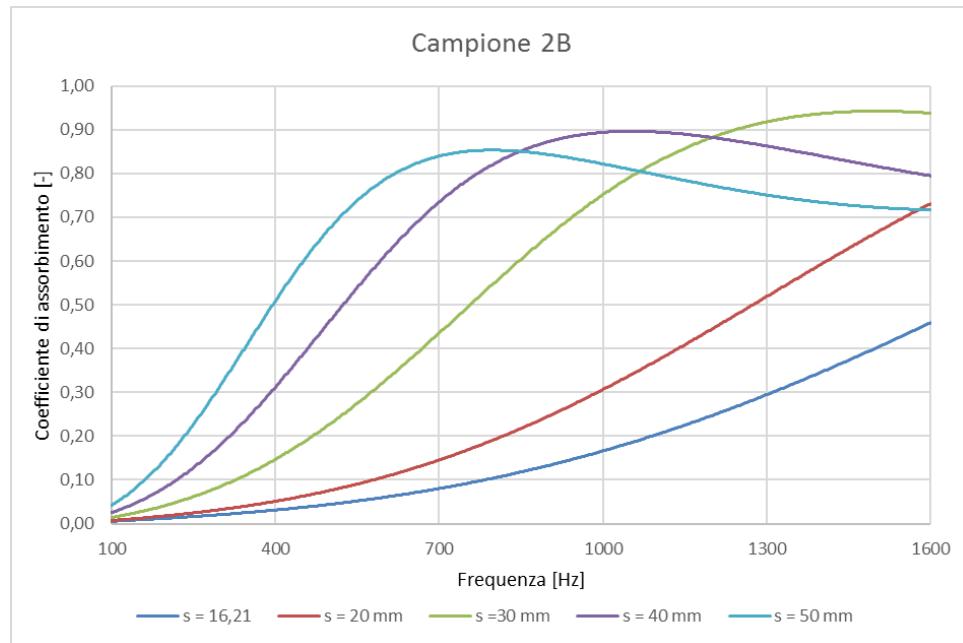
Tuttavia, la capacità di un pannello di essere efficace in tutto lo spettro di frequenze medie (315-2.500 [Hz]) dipende fortemente dal suo spessore [19].

In questo lavoro di tesi, a causa dei limiti imposti dagli strumenti a disposizione, non è stato possibile realizzare campioni di spessore elevato e, per questo, si è deciso di ricorrere all'uso dei modelli di calcolo per prevedere il miglioramento delle capacità fonoassorbenti al crescere di tale parametro. Di seguito, nelle figure 11 - 14 si riportano i grafici relativi alle curve del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  dei campioni per i quali la curva teorica simula il comportamento della curva sperimentale. La curva di colore rosso è stata generata inserendo nel modello, come dato di input, lo spessore originale del campione.

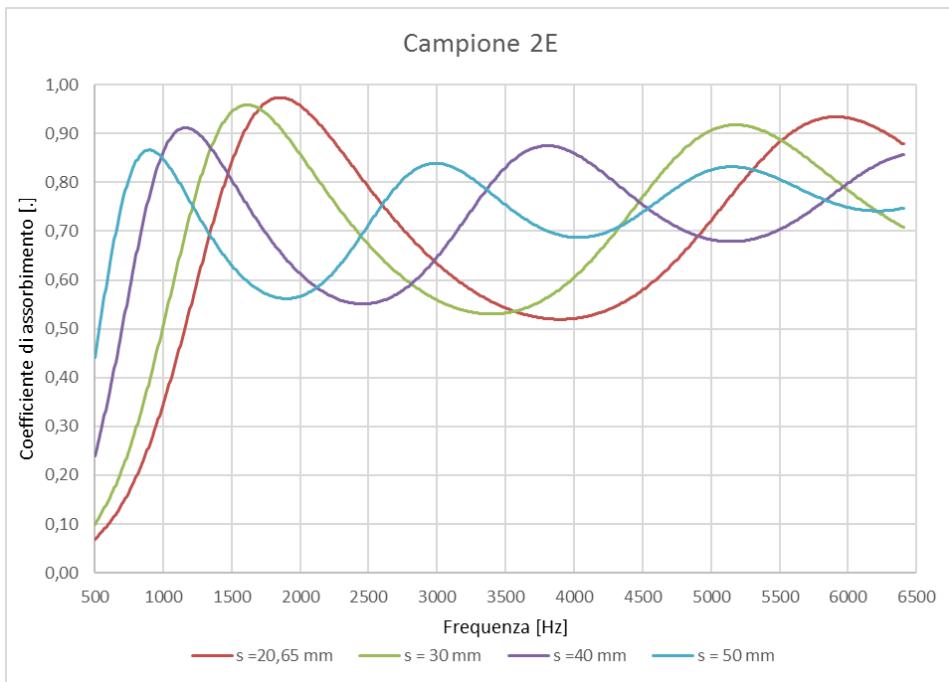
A tale curva ne sono state affiancate delle altre, che rappresentano le previsioni dell'andamento del coefficiente di assorbimento al crescere dello spessore.

Fra le curve relative al coefficiente di assorbimento dei campioni realizzati con granulato di gomma, quella del campione 2B è risultata ben approssimata dalla curva teorica generata con il modello di Kino e Ueno[15].

La figura 11, illustra l'andamento curva coefficiente di assorbimento per incidenza normale al variare dello spessore con modello di Kino e Ueno [15] per il campione 2B.



**Figura 11:** Studio del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al crescere dello spessore utilizzando il modello di Kino e Ueno per il campione 2B (campione di granulato di gomma di diametro di 100 mm assemblato con collante)



**Figura 12:** Previsione del comportamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al crescere dello spessore utilizzando il modello dell'approssimante di Padé per il campione 2E (campione di granulato di gomma di diametro di 29 mm assemblato con collante)

In figura 12 sono illustrate le curve relative al coefficiente di assorbimento per incidenza normale, ricavate adottando il modello dell'Approssimante di Padé [13, 14], al crescere dello spessore per il campione 2E.

La figura 13 illustra, invece, la previsione circa l'andamento di  $\alpha$  al crescere dello spessore del campione 3C, previsto dal modello di Hamet [4, 16].

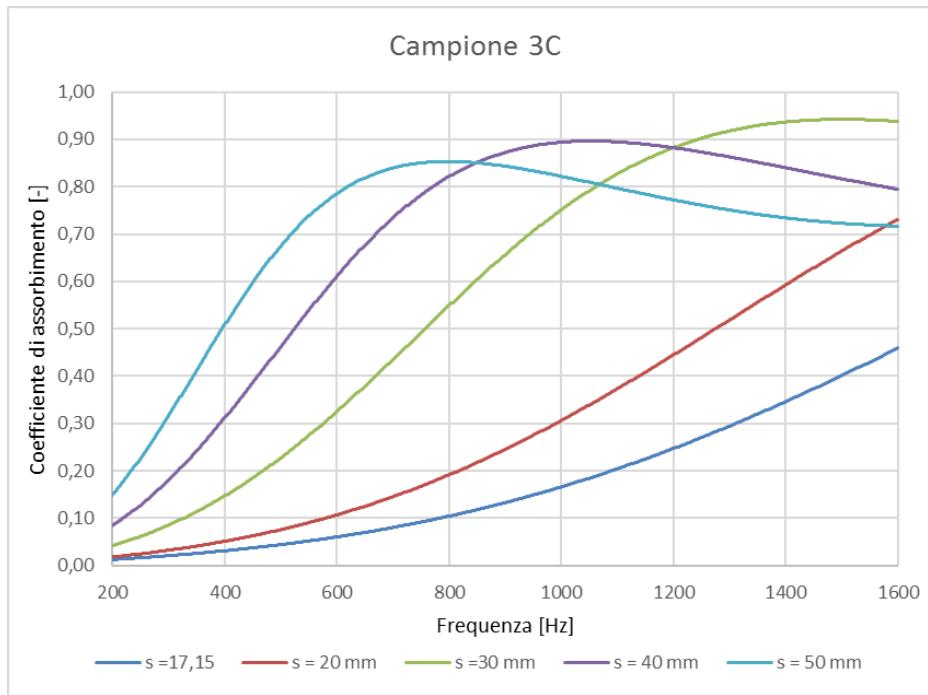
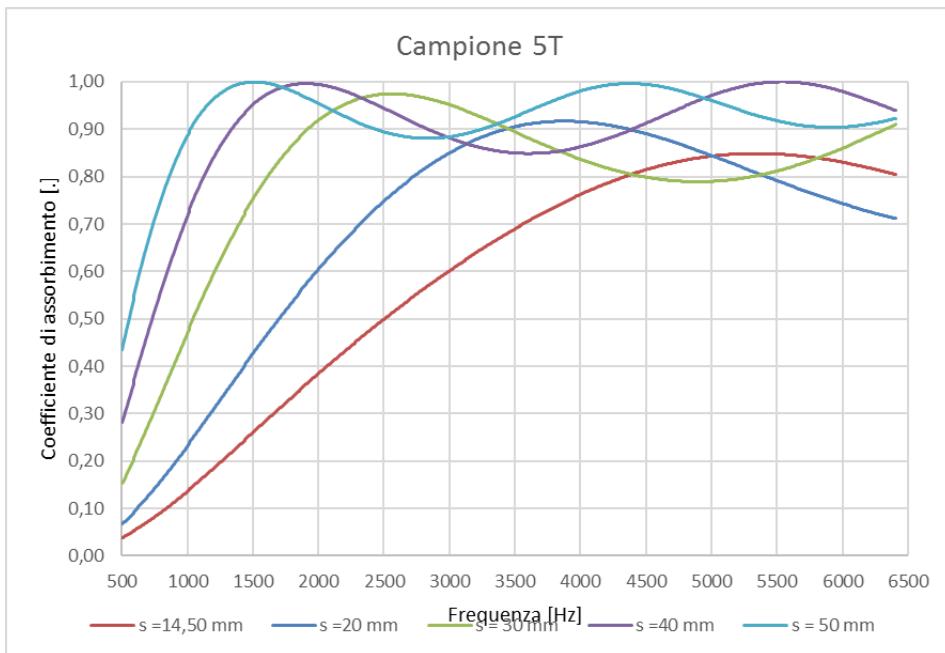


Figura 13: Previsione del comportamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al crescere dello spessore utilizzando il modello dell'approssimante di Hamet per il campione 3C (campione di granulato di sughero di diametro di 100 mm assemblato con collante)

La figura 14, mostra la previsione, effettuata grazie all'uso del modello di Hamet [4, 16], circa l'andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al variare dello spessore del campione 5T.



**Figura 14:** Previsione del comportamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale al crescere dello spessore utilizzando il modello dell'approssimante di Hamet per il campione 5T (campione di fibra tessile di diametro di 29 mm realizzato con pressatura a freddo)

Le figure 11 – 14 confermano che aumentando lo spessore è possibile ottenere un buon assorbimento anche a frequenze sempre più basse.

Inoltre, in tutti i casi esaminati, è evidente un miglioramento complessivo delle proprietà fonoassorbenti dei campioni, anche nel caso in cui è rilevabile un picco più basso, come nel caso del campione 2E. Si evidenzia che per quest'ultimo caso è stato utilizzato il modello dell'approssimante di Padé che pare accentuare più degli altri l'effetto dello spessore sopra descritto.

Da quanto emerso dall'utilizzo dei modelli, per prevedere il comportamento dei campioni al crescere dello spessore, sembra che sia conveniente adottare uno spessore di almeno 30 mm per ottenere ottimi risultati a tutte le frequenze maggiori di 1500 Hz. Sembra, invece, necessario uno spessore di almeno 50 mm per estendere le stesse proprietà fonoassorbenti anche a frequenze prossime ai 1000 Hz. Inoltre, adottando campioni dallo spessore sempre maggiore, l'andamento delle curve risulta sempre meno altalenante e con punti di minimo più alti.

### 8.3 Nomenclatura

Di seguito viene riportata la nomenclatura utilizzata nel capitolo.

- $\alpha$ : coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale;
- $R$ : resistenza al flusso d'aria [Pa s / m<sup>3</sup>];
- $q$ : tortuosità;
- $\Omega$ : porosità;
- $\Lambda$ : lunghezza caratteristica viscosa;
- $\Lambda'$ : lunghezza caratteristica termica;
- $\rho_0$ : densità dell'aria, che vale 1,2 [Kg/m<sup>3</sup>];
- $c_0$ : velocità del suono nell'aria libera, che vale 344 [m/s];
- $f$ : frequenza [Hz];
- $\omega$ : frequenza angolare [rad/s];
- $d$ : spessore del campione [m];
- $\eta$ : viscosità dinamica dell'aria, che vale circa 1,81\*10<sup>-5</sup> [Pa s];
- $P_0$ : pressione atmosferica, che vale 101325 [Pa]
- $N_{Pr}$ : numero di Prandtl, che per la maggior parte dei gas, tra cui l'aria, vale 0,71;
- $\gamma$ : media dei calori specifici a pressione e a volume costante;
- $k_0$ : numero d'onda =  $\omega/c_0$  [m<sup>-1</sup>].

## Bibliografia

- [1] D. Oliva, V. Hongisto - Sound absorption of porous materials: accuracy of prediction models, *Applied Acoustics*, 74 (2013) 1473-1479;
- [2] L. Egab, X. Wang, M. Fard - Acoustical charatcerisation of porous sound absorbing materials: a riewiew, *Int. J. Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 10 Nos. 1/2 (2014);
- [3] M. Ayub, M. JaylaniMohdNor, M. H. Fouladi, R. Zulkifli, N. Amin - A practical absorption analysis of coir fiber based on rigid frame modelling, UniversitiKebangsaan Malaysia;
- [4] J. F. Hamet – Reduction of tire road noise by acoustic absorption: numerical evaluation of the by-pass noise level reduction using normal incidence acoustic absorption coefficient, INRETS (2010)
- [5] J. Cuenca, L. De Rick - In-situ sound absorption of ground surfaces: innovative processing and characterisation methods, Siemens industry software, Interleuvenlaan 68;
- [6] N. Richeri Vivaldi Pasqua – Determinazione sperimentale di parametri caratteristici di materiali porosi fonoassorbenti;
- [7] K. V. Horoshenkov, N.N. Voronina - A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media, *Applied Acoustics* 64 (2003) 415-432;
- [8] M. E. Delaney, E. N. Bazley – Acoustical properties of fibrous absorbent materials, National physical laboratory, 1969;
- [9] M. R. F. Kidner, C. H. Hansen - A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials, University of Adelaide (20080);
- [10] N. Kino – Further investigations of empirical imrpovements of the Johnson-Allard-Champoux model, *Applied Acoustics* 96 (2015) 153 - 170
- [11] K. Attenborough - Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials – *The Journal of Acoustical Society of America*; 73 (1985) 785;
- [12] F. Pompoli, P. Bonfiglio - Tecniche avanzate di caratterizzazione fisico-acustica di materiali porosi, 35° Convegno Nazionale AIA, Milano 11-13 giugno 2008;
- [13] K. V. Horoshenkov, K. Attenborough – S. N. Chandler White - Padé approximants for the acoustic properties of rigid frame porous media with pore size distributions, *Journal of the acoustical society of America* (1998);
- [14] K. V. Horoshenkov, M. J. Swift – The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal, *Journal of the acoustical society of America* (2001)
- [15] N. Kino, T. Ueno - Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-framed fibrous materials, *Applied Acoustics* 68 (2007) 1468-1484;

- 
- [16] G. Iannace, R. Dragonetti, C. Ianniello – Determinazione dei parametri non acustici di materiali porosi sulla base di un'ottimizzazione parametrica; 31° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, 2004;
  - [17] L. Jinkyo, W. George, J. Swenson – Compact sound absorbers for low frequencies; Noise Control Engineering Journal, 38 (1992), 109-117;
  - [18] A. Sobolev, V. Ushakov, R. Filippova - Homogeneous sound-absorbing structures for aircraft engine ducts; Acoustical Physics 55 (2005), 805;

## ***Conclusioni***

Questo lavoro di tesi appartiene al settore scientifico della fisica tecnica volto alla ricerca di nuovi materiali da impiegare in ambito edile ed industriale. In particolare, ha avuto come obiettivo quello di testare e proporre l'uso di alcuni materiali da riciclo e da scarto, quali la lolla di riso, il granulato e fibra di gomma, granulato di sughero, la pellicola argentea di caffè e la carta da macero accoppiata a TNT (tessuto non tessuto), e scarti di fibre tessili. Alcuni materiali, quali ad esempio la pellicola argentea di caffè non sono mai stati studiati come applicazioni in ambito edilizio pertanto il loro studio riveste caratteristiche di estrema originalità.

Utilizzando i materiali selezionati, sono stati realizzati in laboratorio ventuno tipologie di campioni a forma di dischi di diametro pari a 100 e 29 mm. Due di queste tipologie (carta da macero) sono state anche prodotte in dimensioni maggiori di 1 x 1 m, utili per la loro caratterizzazione termica.

E' stato svolto un approfondimento su alcuni parametri non acustici, come la resistenza al flusso, la porosità e la tortuosità, che hanno permesso di giustificare in modo completo i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione acustica.

Per la determinazione dei parametri non acustici, resistenza al flusso d'aria e porosità, sono stati realizzati appositamente due apparati di misura presso la sezione di Idraulica di Ingegneria dell'Università di Pavia.

Dalle misure della resistenza al flusso d'aria è emerso che il materiale che ha presentato i valori più elevati di tale parametro è stata la pellicola argentea di caffè. Si è riscontrato, inoltre, che i campioni assemblati mediante pressatura a caldo, riportano i valori (valore medio 2162333,33 [Pa s/m<sup>3</sup>]) più alti di resistenza al flusso d'aria, ma poiché ciò è derivato dall'effetto combinato di temperatura e pressione, tale risultato non è da considerarsi vantaggioso da un punto di vista del fonoassorbimento.

Dalle misure della porosità è risultato, al contrario, che i campioni realizzati mediante pressatura a caldo presentano valori inferiori (ad esempio 32,99 % pellicola argentea di caffè) rispetto a quelli assemblati con le altre due tecniche per i campioni realizzati in laboratorio. Mentre quelli realizzati in stabilimento industriali hanno valori che non superano il 28% di porosità. Ciò perché le elevate temperature di realizzazione hanno causato la parziale occlusione dei pori interconnessi nella struttura dei materiali. Si ritiene, pertanto, che le elevate temperature di realizzazione (140-170°Cmetti tra parenti valore) rappresentino un fattore negativo se si vuole ridurre la componente riflessa delle onde sonore.

Il lavoro svolto, ha riguardato la caratterizzazione acustica dei campioni avvenuta grazie all'approfondimento dei parametri acustici, quali il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale ed il potere fonoisolante, le quali prove sono state svolte presso il laboratorio di acustica dell'Università degli Studi di Perugia.

Da una valutazione dei risultati ottenuti dalle prove sul fonoassorbimento, è emerso che i campioni costituiti da granulato di sughero presentano i più bassi valori del coefficiente di assorbimento  $\alpha$ , poco superiori a 0,30 a 1600 Hz per i campioni realizzati con materiale sciolto e legante; con la metodologia di realizzazione con pressa a caldo invece, a partire dal 1400 Hz, il valore del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  subisce un incremento fino ad arrivare a valori prossimi allo 0,9 a 1600 Hz. Quasi tutti i materiali hanno mostrato soddisfacenti proprietà fonoassorbenti, soprattutto per frequenze superiori a 1000 Hz. In particolare, le prove su granulato di gomma ricavato dalla tritazione di pneumatici fuori uso, o PFU, confermano che questo materiale possiede ottime proprietà fonoassorbenti per frequenze maggiori di 1500 Hz. In questo caso, infatti è stato registrato uno dei due picchi più alti del coefficiente di assorbimento  $\alpha$ , che ha raggiunto alla frequenza di 2028 Hz il valore di 0,99. Anche i campioni realizzati con fibra tessile ricavata dal riciclo dei PFU hanno mostrato come questo materiale, che solitamente diventa rifiuto, possa continuare ad essere utile nel campo del fonoassorbimento. Le ottime proprietà fonoassorbenti di questo materiale sono riscontrabili soprattutto nel caso del campione 5T, realizzato tramite pressatura a freddo, per il quale è stato ottenuto, come per il campione 2E, il picco più alto di  $\alpha$ . In particolare, in questo caso, il coefficiente di assorbimento  $\alpha$  è risultato pari a 0,99 ad una frequenza di 4784 Hz. Diverso, ma ugualmente soddisfacente, è stato il comportamento acustico rilevato sui campioni di pellicola argentea di caffè. Rispetto agli altri, tale materiale ha mostrato migliori risultati anche a frequenze minori arrivando ad un coefficiente di assorbimento  $\alpha$  di 0,70 a 1400 Hz, e raggiungendo valori che supero lo 0,90 alle alte frequenze tra 3700 e 5700 Hz, con la metodologia di realizzazione dei campioni con pressa a freddo. Fra i materiali testati, quello che ha fatto registrare i risultati più sorprendenti nel più ampio intervallo di frequenze è stato la lolla di riso, che possiede ottime proprietà fonoassorbenti a tutte le frequenze maggiori di 1000 Hz, con valori che superano lo 0,90 a 1400 Hz. Le sue ottime proprietà fonoassorbenti, abbinate alle caratteristiche di eco-compatibilità, economicità ed elevata disponibilità in natura, suggeriscono la convenienza e l'opportunità di effettuare nuovi studi per fini acustici su tale materiale al fine di valutare il suo utilizzo per la realizzazione di pannelli fonoassorbenti.

La pellicola argentea di caffè come anche la lolla di riso mostrano un andamento particolare del coefficiente di assorbimento, verificato con la prova del materiale sciolto, in cui appare per tutti gli spessori misurati un andamento con due picchi di frequenza che variano al variare dello spessore.

I campioni realizzati in carta da macero, monostrato o in accoppiamento con il TNT, hanno un coefficiente di assorbimento che arriva al massimo a 0,53 con picchi variabili tra i 200 e i 2200 Hz, con un andamento che poi diventa costante alle alte frequenze. Diverso il caso del campione realizzato in carta da macero in accoppiamento agli scarti di fibre tessili che ha mostrato buoni risultati, raggiungendo un valore di 0,98 di coefficiente di assorbimento a 3000 Hz.

Per quanto riguarda le tecniche di assemblaggio dei campioni, da un punto di vista del fonoassorbimento, i migliori risultati sono stati rilevati sui campioni assemblati con collante e con pressatura a freddo. Le caratteristiche della colla a base poliuretanica utilizzata ha consentito di legare i granelli di materiale in modo da ottenere campioni con una bassa percentuale di collante, riducendo al minimo l'occlusione dei pori presenti nella struttura dei materiali. Anche la tecnica di assemblaggio con pressatura a freddo è risultata ottimale per la realizzazione dei campioni perché, attraverso essa, si sono potuti evitare gli effetti negativi del collante e dell'elevata temperatura (110°C per il sughero e 120°C per la pellicola argentea di caffè). L'elevata temperatura, infatti, influenza negativamente sulle proprietà fonoassorbenti per i campioni realizzati con pressatura a caldo.

La metodologia utilizzata è stata ancora più determinante per i risultati relativi al fonoisolamento. Al contrario delle prove sul fonoassorbimento, le prove sul potere fonoisolante hanno evidenziato che, per ottenere un buon fonoisolamento, l'utilizzo di elevate temperature in fase realizzativa è conveniente. Infatti, i campioni realizzati con la pressa a caldo sono risultati più idonei a ridurre la trasmissione delle onde sonore.

In questo caso, il materiale costituente i campioni è risultato poco influente. Si evidenzia comunque che il materiale che ha riportato i migliori risultati sotto questo aspetto sono stati riscontrati per i campioni di pellicola argentea di caffè, sughero e carta da macero.

In riferimento all'importanza dello spessore, al fine di ottenere un buon fonoassorbimento per un intervallo di frequenza più ampio, è stata svolta una ricerca sui modelli di calcolo esistenti per prevedere il comportamento acustico dei materiali. Tra i modelli esistenti in letteratura, ne sono stati esaminati alcuni ritenuti maggiormente idonei sulla base dei materiali a cui sono stati applicati da precedenti studiosi. Utilizzando i parametri non acustici misurati, è stato dunque verificato quali di essi maggiormente approssimassee l'andamento delle prove sperimentali del coefficiente di assorbimento dei campioni realizzati. Si evidenzia che non per tutti i campioni selezionati è stato trovato un modello di calcolo adatto ad approssimarne il comportamento in termini di fonoassorbimento. In modo particolare, per quelli di pellicola argentea di caffè, aventi una struttura molto diversa dai materiali studiati finora in letteratura.

Il comportamento termico dei materiali è stato valutato soltanto per due tipologie di campioni realizzati in carta da macero accoppiata a due strati di TNT di fibra mista riciclata, in quanto tali campioni sono stati assemblati in stabilimento industriale di dimensioni compatibili con la strumentazione a disposizione in laboratorio per le prove termiche.

I pannelli possono essere considerati dei buoni isolanti termici poiché la conducibilità misurata risulta sempre inferiore a 0.07 W/mK, determinata mediante la Camera calda (Hot-Box) e con i termo-flussimetri. L'analisi termografica inoltre ha evidenziato le criticità legate alla produzione dei pannelli, relativamente alla non omogeneità della trasmissione del flusso termico, a causa della distribuzione non omogenea della colla per l'assemblaggio dei pannelli multistrato.

Ulteriori problematiche potrebbero essere legate al fatto che i materiali di cui sono costituiti questi campioni risultano facilmente impregnabili. I pannelli, impiegati come isolanti all'interno degli elementi costruttivi perimetrali (tamponature e solai), dovrebbero essere accoppiati a barriere al vapore che, a ridosso del pannello, al fine di proteggere l'isolante dalle infiltrazioni di acqua dovute all'eventuale formazione di condensa negli strati interni della tamponatura.

Nell'ultima fase della tesi, i campioni sono analizzati dal punto di vista del loro Ciclo di Vita LCA (Life Cycle Assessment), effettuando un'analisi "cradle to gate" di ipotetici pannelli da realizzare industrialmente, utilizzando i sistemi di produzione realmente impiegati per la loro realizzazione. Il fine è stato quello di verificare ed accertare l'impatto ambientale dei prodotti e cercare di esaminare tutti gli effetti da essi causati sull'ambiente, analisi svolta tramite l'impiego del software SimaPro. Sono stati valutati gli impatti in termini di potenziale di riscaldamento globale (IPCC GWP a 100 anni) e richiesta cumulativa di energia (incorporata) CED, utilizzando come due differenti unità funzionali: la superficie di pannello prodotta ai fini del confronto dell'impatto globale dei diversi scenari di intervento proposti nel caso studio; la superficie necessaria ( $m^2$ ) ad ottenere 1 unità di assorbimento acustico per ciascun materiale, al fine di confrontare i materiali convenzionali ed innovativi considerando anche le proprietà acustiche che li caratterizzano.

E' stata effettuato l'analisi ed il confronto per tre casi: (1) pannelli in carta da macero, TNT e fibre tessili, prodotti industrialmente; (2) pannelli realizzati con pellicola argentea di caffè con differenti metodi di produzione (descritti al Capitolo 3); (3) pannelli realizzati con la stessa metodologia di produzione artigianale, utilizzando materiale sciolto e colla per campioni in lolla di riso, sughero e granulato di gomma.

Dai risultati del primo caso (carta da macero) si evince che l'impiego di materiali riciclati, per i quali è nullo l'impatto legato alla produzione della materia prima di origine, consente di ridurre notevolmente i gas serra emessi dal processo produttivo. In termini di superficie prodotta, le performance ambientali risultano migliori per il pannello G (costituito da scarti tessili e carta riciclata), grazie al minor quantitativo di materiale necessario e alla minor densità.

Dal secondo caso, i pannelli realizzati in pellicola argentea di caffè con tecniche di assemblaggio differenti, si riscontra che il comportamento del pannello incollato è negativamente influenzato dal processo di produzione del collante che causa il 86% delle emissioni totali; il consumo per la produzione del pannello è trascurabile. Per il pannello prodotto con pressa a caldo, si nota che quasi l'80% delle emissioni di gas serra sono legate alla produzione del pannello, a causa del consumo di calore per la pressatura ad elevata temperatura. La pressatura a freddo, invece, presenta un particolare comportamento: l'impatto è perfettamente attribuito alla fase di produzione e quella dell'approvvigionamento del materiale; questo fatto permette di affermare che questo tipo di produzione, nonostante la più alta densità del materiale, è la soluzione migliore per minimizzare l'impatto ambientale a parità di prestazioni acustiche.

Dai risultati del terzo caso (lolla, granulato di sughero e gomma), in termini di superficie prodotta, le migliori prestazioni ambientali si ottengono per il pannello in lolla di riso, grazie alla minore quantità di materiale richiesto e al fatto che non serve energia aggiuntiva per il riciclaggio della materia base. Prendendo come riferimento l'unità di assorbimento acustico, a causa di non significative proprietà di assorbimento dei tre materiali, l'impatto ambientale ha un andamento simile a quello ottenuto per unità funzionale di superficie: il pannello in lolla di riso è la soluzione migliore assorbimento acustico, considerando gli impatti del ciclo di vita, rispetto all'utilizzo del granulato di sughero e del granulato di gomma.

Considerando le buone proprietà possedute dai materiali oggetto di studio, i risultati positivi registrati durante le prove di laboratorio a cui essi sono stati sottoposti ed i notevoli vantaggi che essi offrono sia sul piano economico che ambientale, si conferma l'opportunità di proseguire nel loro studio e nella ricerca di altri materiali ecocompatibili alternativi a quelli attualmente in uso.

Considerati i risultati del presente lavoro, le ricerche future potrebbero essere volte ad affinare le tecniche di realizzazione proposte, per produrre campioni più regolari e di maggiore spessore. Potrebbe essere estesa la tipologia di materiali da scarto, non analizzati nel presente lavoro. Inoltre, potrebbero essere svolti ulteriori studi che riguardino altri parametri fisici come la resistenza meccanica, la durabilità e la reazione al fuoco dei campioni. Infine, per quanto riguarda l'ottimizzazione del comportamento acustico, si potrebbe prevedere un'analisi volta a sviluppare un modello di calcolo capace di approssimare meglio il comportamento acustico, in quanto i modelli analizzati non risultano perfettamente in accordo con i risultati sperimentali.

## Appendice

*Tabella 1: Riepilogo della prova di misura della resistenza al flusso d'aria campioni realizzati in laboratorio*

Campione	Spessore [mm]	Colla [% V/V]	Prova	Peso acqua [g]	Tempo di prova [s]	Portata acqua = Portata aria [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Velocità aria [mm/s]	Resistenza al flusso [Pa s/m <sup>3</sup> ]
1A	18,04	2,699	1	69	9,19	7,508E-06	0,956	13318,841
1A	18,04	2,699	2	71	9,30	7,634E-06	0,972	13098,592
1A	18,04	2,699	3	61	9,15	6,667E-06	0,849	13500,000
1B	16,46	2,320	1	81	10,20	7,941E-06	1,011	11333,333
1B	16,46	2,320	2	77	10,02	7,685E-06	0,978	11711,688
1B	16,46	2,320	3	80	10,23	7,820E-06	0,996	11508,750
1C	17,47	1,839	1	65	10,00	6,500E-06	0,828	13846,154
1C	17,47	1,839	2	57	9,97	5,717E-06	0,728	15742,105
1C	17,47	1,839	3	67	10,02	6,687E-06	0,851	13459,701
1D	17,25	6,56	1	65	11,85	5,485E-06	8,304	18230,769
1D	17,25	6,56	2	66	11,98	5,509E-06	8,341	18151,515
1D	17,25	6,56	3	58	10,24	5,664E-06	8,575	17655,172
1E	17,1	9,96	1	49	10,30	4,757E-06	7,202	18918,367
1E	17,1	9,96	2	48	9,97	4,814E-06	7,289	18693,750
1E	17,1	9,96	3	47	9,68	4,855E-06	7,351	18536,170
1F	18,2	5,95	1	37	7,20	5,139E-06	7,780	17513,514
1F	18,2	5,95	2	36	7,18	5,014E-06	7,591	17950,000
1F	18,2	5,95	3	32	6,49	4,931E-06	7,465	18253,125
1R	15,05	0,00	1	51	10,78	4,731E-06	7,163	21137,2549
1R	15,05	0,00	2	54	11,72	4,608E-06	6,976	21703,7037
1R	15,05	0,00	3	53	11,34	4,674E-06	7,076	21396,22642
1S	15,05	0,00	1	40	9,14	4,376E-06	6,626	22850
1S	15,05	0,00	2	38	8,39	4,529E-06	6,857	22078,94737
1S	15,05	0,00	3	37	8,16	4,534E-06	6,865	22054,05405
1T	15,4	0,00	1	60	13,24	4,532E-06	6,861	22066,66667
1T	15,4	0,00	2	62	13,58	4,566E-06	6,912	21903,22581
1T	15,4	0,00	3	65	14,21	4,574E-06	6,925	21861,53846
2A	16,84	4,897	1	55	9,51	5,783E-06	0,736	17290,909

2A	16,84	4,897	2	49	9,94	4,930E-06	0,628	20285,714
2A	16,84	4,897	3	52	9,29	5,597E-06	0,713	17865,385
2B	16,21	5,843	1	49	9,86	4,970E-06	0,633	20122,449
2B	16,21	5,843	2	44	10,02	4,391E-06	0,559	22772,727
2B	16,21	5,843	3	44	9,99	4,404E-06	0,561	22704,545
2C	17,10	4,413	1	48	10,08	4,762E-06	0,606	21000,000
2C	17,10	4,413	2	46	10,00	4,600E-06	0,586	21739,130
2C	17,10	4,413	3	52	9,91	5,247E-06	0,668	19057,692
2D	18,80	10,842	1	30	8,23	3,645E-06	5,519	27433,333
2D	18,80	10,842	2	28	7,79	3,594E-06	5,442	27821,429
2D	18,80	10,842	3	25	6,81	3,671E-06	5,558	27240,000
2E	20,65	9,729	1	40	10,65	3,756E-06	5,686	26625,000
2E	20,65	9,729	2	38	10,05	3,781E-06	5,724	26447,368
2E	20,65	9,729	3	36	9,45	3,810E-06	5,767	26250,000
2F	19,40	8,693	1	35	9,41	3,719E-06	5,631	26885,714
2F	19,40	8,693	2	33	8,90	3,708E-06	5,614	26969,697
2F	19,40	8,693	3	36	9,69	3,715E-06	5,625	26916,667
3A	17,45	6,482	1	81	9,66	8,385E-06	1,068	10733,333
3A	17,45	6,482	2	78	9,94	7,847E-06	0,999	11469,231
3A	17,45	6,482	3	74	9,74	7,598E-06	0,967	11845,946
3B	15,91	5,103	1	84	10,23	8,211E-06	1,045	10960,714
3B	15,91	5,103	2	79	10,11	7,814E-06	0,995	11517,722
3B	15,91	5,103	3	67	9,91	6,761E-06	0,861	13311,940
3C	17,15	5,864	1	63	9,85	6,396E-06	0,814	14071,429
3C	17,15	5,864	2	58	9,75	5,949E-06	0,757	16810,345
3C	17,15	5,864	3	65	9,99	6,507E-06	0,828	13832,308
3D	18,20	4,375	1	39	8,02	4,863E-06	7,362	18507,692
3D	18,20	4,375	2	41	8,30	4,940E-06	7,479	18219,512
3D	18,20	4,375	3	38	7,78	4,884E-06	7,395	18426,316
3E	18,10	4,779	1	45	9,38	4,797E-06	7,263	18760,000
3E	18,10	4,779	2	47	9,85	4,772E-06	7,224	18861,702
3E	18,10	4,779	3	50	10,44	4,789E-06	7,251	18792,000
3F	20,05	10,538	1	43	9,17	4,689E-06	7,099	19193,023
3F	20,05	10,538	2	45	9,63	4,673E-06	7,075	19260,000

3F	20,05	10,538	3	48	10,29	4,665E-06	7,062	19293,750
3G	11,44	\	1	45	9,91	4,541E-06	0,578	198200,000
3G	11,44	\	2	43	10,08	4,266E-06	0,543	210976,744
3G	11,44	\	3	45	10,06	4,473E-06	0,570	223555,556
3H	10,00	\	1	43	10,03	4,287E-06	0,546	233255,814
3H	10,00	\	2	44	10,04	4,382E-06	0,558	228181,818
3H	10,00	\	3	44	10,02	4,391E-06	0,559	227727,273
3I	6,30	\	1	45	9,96	4,518E-06	0,575	199200,000
3I	6,30	\	2	44	9,90	4,444E-06	0,566	202500,000
3I	6,30	\	3	45	10,02	4,491E-06	0,572	200400,000
3L	10,00	\	1	41	10,40	3,942E-06	5,968	228292,683
3L	10,00	\	2	39	9,85	3,959E-06	5,994	227307,692
3L	10,00	\	3	37	9,14	4,048E-06	6,129	222324,324
3M	10,40	\	1	42	10,70	3,925E-06	5,943	229285,714
3M	10,40	\	2	44	11,28	3,901E-06	5,906	230727,273
3M	10,40	\	3	45	11,61	3,876E-06	5,868	232200,000
3N	11,25	\	1	42	10,55	3,981E-06	6,027	226071,429
3N	11,25	\	2	41	9,90	4,141E-06	6,270	217317,073
3N	11,25	\	3	42	10,44	4,023E-06	6,091	223714,286
3R	17,15	\	1	40	10,03	3,988E-06	6,038	25075,000
3R	17,15	\	2	40	10,09	3,964E-06	6,002	25225,000
3R	17,15	\	3	39	9,90	3,939E-06	5,964	25384,615
3S	16,15	\	1	42	10,78	3,896E-06	5,899	25666,667
3S	16,15	\	2	41	10,10	4,059E-06	6,146	24634,146
3S	16,15	\	3	40	9,94	4,024E-06	6,092	24850,000
3T	18,20	\	1	40	9,38	4,264E-06	6,456	23450,000
3T	18,20	\	2	42	10,70	3,925E-06	5,943	25476,190
3T	18,20	\	3	42	10,50	4,000E-06	6,056	25000,000
4A	9,38	5,551	1	44	9,92	4,435E-06	0,565	315636,364
4A	9,38	5,551	2	41	9,83	4,171E-06	0,531	335658,537
4A	9,38	5,551	3	52	9,96	5,221E-06	0,665	306461,538
4D	11,73	17,116	1	48	10,00	4,800E-06	7,267	604166,667
4D	11,73	17,116	2	50	10,30	4,854E-06	7,349	576800,000
4D	11,73	17,116	3	48	9,82	4,888E-06	7,400	572833,333

4G	9,35	\	1	43	9,87	4,357E-06	0,555	2111720,930
4G	9,35	\	2	42	9,98	4,208E-06	0,536	2162333,333
4G	9,35	\	3	44	9,95	4,422E-06	0,563	2080454,545
4H	9,00	\	1	43	9,95	4,322E-06	0,550	2151976,744
4H	9,00	\	2	45	10,08	4,464E-06	0,568	2083200,000
4H	9,00	\	3	46	10,1	4,554E-06	0,580	2041956,522
4I	10,00	\	1	44	9,97	4,413E-06	0,562	2084636,364
4I	10,00	\	2	45	10,01	4,496E-06	0,572	2068733,333
4I	10,00	\	3	45	10,03	4,487E-06	0,571	2072866,667
4L	9,30	\	1	43	9,91	4,339E-06	6,569	2120279,070
4L	9,30	\	2	44	10,03	4,387E-06	6,641	2097181,818
4L	9,30	\	3	45	10,55	4,265E-06	6,458	2156888,889
4M	9,10	\	1	46	10,33	4,453E-06	6,742	2088456,522
4M	9,10	\	2	42	9,59	4,380E-06	6,630	2123500,000
4M	9,10	\	3	45	10,13	4,442E-06	6,725	2093533,333
4N	10,00	\	1	44	10,02	4,391E-06	6,648	2117863,636
4N	10,00	\	2	45	10,21	4,407E-06	6,673	2110066,667
4N	10,00	\	3	43	9,77	4,401E-06	6,663	2113046,512
4R	12,25	\	1	49	10,44	4,693E-06	7,106	404816,327
4R	12,25	\	2	47	9,88	4,757E-06	7,202	399404,255
4R	12,25	\	3	48	10,15	4,729E-06	7,160	401770,833
4S	12,35	\	1	46	10,14	4,536E-06	6,868	418826,087
4S	12,35	\	2	45	9,98	4,509E-06	6,826	421377,778
4S	12,35	\	3	46	10,12	4,545E-06	6,882	418000,000
4T	11,10	\	1	47	10,19	4,612E-06	6,983	411936,170
4T	11,10	\	2	47	10,00	4,700E-06	7,116	404255,319
4T	11,10	\	3	46	9,88	4,656E-06	7,049	408086,957
5R	14,17	\	1	61	10,01	6,094E-06	9,226	14768,852
5R	14,17	\	2	60	9,70	6,186E-06	9,365	14550,000
5R	14,17	\	3	61	10,28	5,934E-06	8,984	15167,213
5S	14,62	\	1	59	9,94	5,936E-06	8,986	15162,712
5S	14,62	\	2	60	10,23	5,865E-06	8,880	15345,000
5S	14,62	\	3	59	9,88	5,972E-06	9,041	15071,186
5T	14,50	\	1	60	10,06	5,964E-06	9,030	15090,000

5T	14,50	\	2	61	10,33	5,905E-06	8,940	15240,984
5T	14,50	\	3	59	9,79	6,027E-06	9,124	14933,898

**Tabella 2: Riepilogo della prova di misura della resistenza al flusso d'aria campioni realizzati industrialmente**

Campione	Peso [g]	Prova	Peso acqua [g]	Tempo di prova [s]	Portata acqua [m <sup>3</sup> /s]	Portata aria [m <sup>3</sup> /s]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Velocità aria [mm/s]	Resistenza al flusso [Pa s/m <sup>3</sup> ]
B1	36,09	1	50	10,10	4,950E-06	4,950E-06	0,00785	0,630	484800,000
B2	36,09	2	40	10,04	3,984E-06	3,984E-06	0,00785	0,507	502000,000
B3	36,09	3	46	10,08	4,563E-06	4,563E-06	0,00785	0,581	504000,000
C1	36,16	1	40	10,03	3,988E-06	3,988E-06	0,00785	0,508	827475
C2	36,16	2	38	10,00	3,800E-06	3,800E-06	0,00785	0,484	842105,263
C3	36,16	3	37	9,60	3,854E-06	3,854E-06	0,00785	0,491	830270,270
D1	53,49	1	33	9,90	3,333E-06	3,333E-06	0,00785	0,424	870000,000
D2	53,49	2	32	9,80	3,265E-06	3,265E-06	0,00785	0,416	918750,000
D3	53,49	3	33	10,01	3,297E-06	3,297E-06	0,00785	0,420	910000,000
E1	39,92	1	45	10,12	4,447E-06	4,447E-06	0,00785	0,566	742133,333
E2	39,92	2	36	10,06	3,579E-06	3,579E-06	0,00785	0,456	754500,000
E3	39,92	3	40	10,08	3,968E-06	3,968E-06	0,00785	0,505	730800,000
G1	34,79	1	37	10,00	3,700E-06	3,700E-06	0,00785	0,471	27027,027
G2	34,79	2	40	10,02	3,992E-06	3,992E-06	0,00785	0,508	25050,000
G3	34,79	3	41	10,06	4,076E-06	4,076E-06	0,00785	0,519	24536,585

**Tabella 3: Riepilogo dei risultati della prova di misura della porosità campioni realizzati in laboratorio**

Materiale campione	Metodologia	Diametro originale campione [mm]	Volume testato [cm <sup>3</sup> ]	Prova	$\Delta$ [cm]	a [cm <sup>3</sup> ]	$\Omega$ [%]
Lolla di riso	Collante	100	5,652	1	11,9	3,365	59,53
Lolla di riso	Collante	100	5,652	2	11,9	3,365	59,53
Lolla di riso	Collante	100	5,652	3	12,0	3,393	60,03
Lolla di riso	Collante	29	11,394	1	20,0	5,655	49,63
Lolla di riso	Collante	29	11,394	2	19,4	5,485	48,14
Lolla di riso	Collante	29	11,394	3	19,8	5,598	49,13
Lolla di riso	Pressa a freddo	29	3,631	1	6,8	1,923	52,95

Lolla di riso	Pressa a freddo	29	3,631	2	6,7	1,894	52,17
Lolla di riso	Pressa a freddo	29	3,631	3	6,8	1,923	52,95
Gomma	Collante	100	5,400	1	13,8	3,902	72,26
Gomma	Collante	100	5,400	2	13,5	3,817	70,69
Gomma	Collante	100	5,400	3	13,6	3,845	71,21
Gomma	Collante	29	6,000	1	10,5	2,969	49,48
Gomma	Collante	29	6,000	2	10,8	3,054	50,89
Gomma	Collante	29	6,000	3	10,7	3,025	50,42
Sughero	Collante	100	8,400	1	19,1	5,400	64,29
Sughero	Collante	100	8,400	2	18,9	5,344	63,62
Sughero	Collante	100	8,400	3	19,2	5,429	64,63
Sughero	Collante	29	4,050	1	8,8	2,488	61,44
Sughero	Collante	29	4,050	2	8,7	2,460	60,74
Sughero	Collante	29	4,050	3	8,5	2,403	59,34
Sughero	Pressa a freddo	29	3,672	1	7,5	2,121	57,75
Sughero	Pressa a freddo	29	3,672	2	7,5	2,121	57,75
Sughero	Pressa a freddo	29	3,672	3	7,6	2,149	58,52
Sughero	Pressa a caldo	29	2,543	1	4,0	1,131	44,47
Sughero	Pressa a caldo	29	2,543	2	3,8	1,074	42,24
Sughero	Pressa a caldo	29	2,543	3	3,7	1,046	41,13
Pergamino	Collante	100	4,973	1	8,0	2,262	45,49
Pergamino	Collante	100	4,973	2	7,9	2,234	44,92
Pergamino	Collante	100	4,973	3	7,9	2,234	44,92
Pergamino	Collante	29	4,621	1	5,9	1,668	36,10
Pergamino	Collante	29	4,621	2	5,9	1,668	36,10
Pergamino	Collante	29	4,621	3	6,0	1,696	36,71
Pergamino	Pressa a freddo	29	3,169	1	4,5	1,272	40,15
Pergamino	Pressa a freddo	29	3,169	2	4,4	1,244	39,26
Pergamino	Pressa a freddo	29	3,169	3	4,4	1,244	39,26
Pergamino	Pressa a caldo	29	2,971	1	3,4	0,961	32,36
Pergamino	Pressa a caldo	29	2,971	2	3,5	0,990	33,31

Pergamino	Pressa a caldo	29	2,971	3	3,5	0,990	33,31
Fibra tessile	Pressa a freddo	29	2,916	1	7,3	2,064	70,78
Fibra tessile	Pressa a freddo	29	2,916	2	7,4	2,092	71,75
Fibra tessile	Pressa a freddo	29	2,916	3	7,5	2,121	72,72

-  $\Delta$ : dislivello tra i menischi [cm];  
 - a: sezione del tubo moltiplicata per il dislivello tra i menischi;  
 -  $\Omega$ : porosità calcolata

*Tabella 4: Riepilogo dei risultati della prova di misura della porosità campioni realizzati industrialmente*

Campione	Volume [cm <sup>3</sup> ]	$\Delta$ [cm]	a [cm <sup>3</sup> ]	$\Omega$ [%]
B1	3,60	3,7	1,05	29,06
B2	3,60	3,8	1,07	29,85
B3	3,60	3,8	1,07	29,85
C1	5,35	5,4	1,53	28,55
C2	5,35	5,2	1,47	27,49
C3	5,35	5,1	1,44	26,97
D1	3,63	3,3	0,93	25,70
D2	3,63	3,3	0,93	25,70
D3	3,63	3,4	0,96	26,48
E1	4,81	2,5	0,71	14,71
E2	4,81	2,6	0,74	15,30
E3	4,81	2,5	0,71	14,71
F1	6,60	3	0,85	12,85
F2	6,60	3	0,85	12,85
F3	6,60	2,9	0,82	12,42
G1	6,60	3,7	1,05	15,85
G2	6,60	3,8	1,07	16,27
G3	6,60	3,7	1,05	15,85