

Materiali fonoassorbenti bio-based e a base di scarti*

Chiara Rubino^{a*} | Stefania Liuzzi^a | Francesco Martellotta^a

^a Dipartimento di Architettura,
Costruzione e Design, Politecnico di Bari,
Via Orabona, 4, 70125 Bari

* Corresponding author:
chiara.rubino@poliba.it

Ricevuto: 14/5/2025

Accettato: 18/6/2025

On line first

DOI: 10.3280/riaof-2025oa20130

ISSN: 2385-2615

Per contenere l'impatto ambientale derivante dall'uso di risorse non rinnovabili, cresce l'interesse nella ricerca di materie prime alternative per la produzione di pannelli fonoassorbenti sostenibili. In questo ambito, le direttive europee promuovono soluzioni costruttive innovative finalizzate sia alla riduzione dell'impatto ambientale, sia al miglioramento dell'efficienza degli edifici, nuovi ed esistenti. In linea con i principi dell'economia circolare, il presente studio propone un'indagine sperimentale sulle proprietà acustiche, espresse in termini di coefficienti di assorbimento ad incidenza normale e in campo diffuso, di materiali compositi innovativi ottenuti da scarti e prodotti naturali. I risultati mostrano buone performance fonoassorbenti per tutti i campioni testati, con variazioni correlate alle proprietà microstrutturali, come porosità e resistenza al flusso.

Parole chiave: fonoassorbimento, scarti, leganti naturali, sostenibilità

Bio-based and waste-based sound absorbing materials

To reduce the environmental impact associated with the use of non-renewable resources, increasing attention is being paid to alternative raw materials for the production of sustainable sound-absorbing panels. In this context, European directives promote innovative construction solutions aimed not only at minimizing environmental impact but also at improving the efficiency of both new and existing buildings. Aligned with circular economy principles, this study presents an experimental investigation on the acoustic performance expressed in terms of sound absorption coefficients under normal incidence and in diffuse field of innovative composite materials produced from natural products and waste. The results show good sound absorption performance for all tested samples, with variations linked to microstructural properties such as porosity or air flow resistivity.

Keywords: sound absorption, waste, natural binders, sustainability

1 | Introduzione

I materiali più comunemente impiegati nel settore edilizio per il controllo acustico sono principalmente compositi di origine inorganica e sintetica quali lana di vetro, lana di roccia e polistirene. Sebbene tali materiali garantiscano elevate prestazioni in termini di coefficienti di assorbimento acustico, essi sono associati a significativi impatti ambientali in termini di elevata energia grigia durante la fase di produzione e di difficoltà di riciclo a fine vita [1]. Inoltre, a causa della ridotta durabilità, le fibre potrebbero diventare inalabili, rappresentando un potenziale rischio per la salute umana in caso di esposizione prolungata [2]. In questo contesto, una delle principali sfide nella progettazione degli edifici di nuova generazione è la riduzione del fabbisogno energetico, assicurando al contempo comfort termoacustico indoor mediante l'impiego di componenti in grado di garantire sostenibilità ambientale e salubrità degli ambienti. La necessità di adottare materiali compositi

non tossici, riciclabili ed ecocompatibili sta, quindi, orientando la ricerca verso l'utilizzo di fibre naturali, di origine vegetale o animale, e di materiali da scarto come valide alternative alle fibre minerali e sintetiche. Non solo la selezione della matrice, ma anche quella del legante richiede un'attenta valutazione, poiché l'accoppiamento di una matrice sostenibile con un legante non ecocompatibile può compromettere l'intero bilancio ambientale del materiale, annullando la possibilità di riciclare il composito a fine vita e vanificando così gli sforzi in termini di sostenibilità. La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA, Life Cycle Assessment) è riconosciuta come una metodologia standardizzata [3, 4] per quantificare in modo oggettivo gli impatti ambientali associati a prodotti e processi lungo l'intero ciclo di vita, dalla fase di approvvigionamento delle materie prime fino allo smaltimento finale. Nel caso dei materiali bio-based, l'LCA rappresenta uno strumento essenziale per supportare lo sviluppo sostenibile e l'adozione di strategie di economia circolare [5]. I risultati dell'analisi LCA costituiscono, inoltre, la base tecnica per la redazione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD, Environmental Product Declarations), strumenti di comunicazione trasparente e verificata che permettono il confronto tra prodotti simili in termini di prestazioni ambientali [6], secondo standard internazionali [7].

* Articolo invitato a seguito della presentazione orale al Simposio internazionale AIA "Materiali innovativi in acustica: tra sostenibilità e tecnologia" tenutosi a Bologna il 30 gennaio 2025.

Alla luce delle considerazioni esposte, il presente articolo si propone di sintetizzare i risultati più rilevanti delle ricerche condotte dagli autori sull'impiego di materiali fonoassorbenti innovativi. Tali materiali sono composti, con matrici di natura granulare (come scarti di potatura dell'olivo) o fibrosa (come la paglia), ottenute da scarti industriali (come gli scarti tessili), o da residui vegetali (come gli scarti della mandorla). Il legante impiegato è, nella maggior parte dei casi, ecocompatibile; nei casi in cui non è stato possibile rispettare pienamente il criterio di sostenibilità nella scelta del legante, la miscela è stata progettata in modo da ridurre al minimo la quantità, garantendo comunque benefici nella fase di produzione del materiale finale. Ad esempio, nei casi in cui è stata utilizzata una fibra sintetica come legante, la scelta è ricaduta su una fibra in grado di abbassare significativamente la temperatura richiesta durante il processo produttivo. Pertanto, dopo due sezioni introduttive, una dedicata alla descrizione dei diversi materiali oggetto di studio, delle loro peculiarità e dei relativi processi produttivi, e l'altra finalizzata a fornire una breve analisi dei parametri e delle proprietà esaminate, vengono presentati i risultati sperimentali in termini di coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale e casuale. L'analisi è accompagnata dalla valutazione dei parametri non acustici, misurati o stimati mediante modelli teorici.

L'articolo riassume i risultati di ricerche scientifiche già pubblicate e si configura come supporto scritto ai contenuti presentati durante il Simposio internazionale AIA, tenutosi a Bologna il 30 gennaio 2025. Infatti, l'obiettivo dell'articolo è documentare e valorizzare le attività svolte durante il Simposio, pertanto parte dei contenuti del paper sono già stati pubblicati in altra sede.

2 | Materiali

2.1 | Scarti tessili

Gli scarti tessili, derivanti dalla produzione e dal fine vita dei capi, rappresentano una criticità ambientale crescente; il loro reimpiego come materia prima per la realizzazione di materiali fonoassorbenti consente di valorizzare le proprietà acustiche intrinseche delle fibre tessili, promuovendo al contempo pratiche sostenibili e circolari nel settore tessile/moda e in quello dell'edilizia. Questo approccio si inserisce in continuità con quanto evidenziato da Del Rey et al. [8], che hanno dimostrato l'efficacia della lana di pecora, materiale tessile naturale e rinnovabile, come valida alternativa ai materiali fonoassorbenti convenzionali, grazie alle sue elevate prestazioni acustiche e al ridotto impatto ambientale. I materiali a base di scarti tessili sono stati realizzati mediante due diverse tecnologie: l'incollaggio chimico e il processo di termofusione.

Nel primo caso, il processo produttivo è stato condotto in laboratorio e ha previsto fasi di selezione, preparazione e miscelazione degli scarti tessili, seguite da formatura ed essiccazione. Dapprima gli scampoli di scarto sono stati ridotti alle dimensioni adeguate a poter essere cardati e trasformati in fibre. Dopo l'immersione nella soluzione legante selezionata, le

fibre sono state sottoposte a un processo di strizzatura meccanica per eliminare l'eccesso di liquido. Tale operazione è stata necessaria per evitare che un eccesso di legante, una volta solidificato, potesse compromettere l'omogeneità della porosità nel campione finale, favorendo, ad esempio, la formazione di croste superficiali. La miscela così ottenuta è stata quindi compressa in stampi di PVC per formare campioni cilindrici, successivamente essiccati in stufa a 105 °C. Le fibre sono state legate impiegando soluzioni a base di chitosano (CH) e gomma arabica (GA), ottenendo i campioni successivamente denominati CH-n e GA-n, dove n sta ad indicare la densità del singolo provino (Fig. 1-a) [9]. Sono stati realizzati provini con densità apparente compresa tra 80 e 197 kg/m³ e spessore di 50 mm.

Per quanto riguarda i materiali ottenuti tramite termofusione, la produzione su scala di laboratorio [10] è stata successivamente ottimizzata per un'applicazione industriale [11]. In entrambi i casi, è stata impiegata una fibra legante bicomponente costituita da un nucleo in poliestere e da un rivestimento esterno in copoliestere, con punto di fusione a 100 °C. Il rivestimento si ammorbidisce durante la fase di riscaldamento, fungendo da agente legante, mentre il nucleo in poliestere, grazie al suo punto di fusione più elevato (270 °C), preserva la forma e conferisce integrità meccanica al materiale finale. I provini a scala di laboratorio sono stati realizzati cardando proporzioni definite di fibre tessili e fibra legante (quest'ultima in modo da risultare il 20% del peso totale del provino), in modo da ottenere una miscela uniforme che è stata predisposta in appositi stampi e compressa e riscaldata tramite una piastra idraulica, controllando l'abbassamento della piastra superiore fino ad un'altezza prestabilita di 50 mm. Sono stati realizzati cinque tipi di provini (successivamente indicati come BICO-n) con densità apparente compresa tra 51 e 167 kg/m³ e spessore di 50 mm.

Grazie alla collaborazione con un'azienda toscana, è stato possibile realizzare l'up-scaling industriale di alcune miscele testate in laboratorio. Utilizzando la tecnologia air-laying, le fibre di scarto cardate sono state trasformate in un materassino omogeneo e consolidate per termofusione a 100 °C, impiegando il 15% in peso di fibra bicomponente come legante. La riduzione della percentuale di legante rispetto ai campioni da laboratorio è dovuta alla composizione mista degli scarti utilizzati a livello industriale, rispetto alla sola lana impiegata in precedenza. La Figura 1-b mostra i campioni ottenuti (con densità compresa tra 68 e 134 kg/m³ e spessore variabile compreso tra 25 e 50 mm), denominati TW-n.



Fig. 1 – Materiali a base di scarti tessili ottenuti con la tecnica ad incollaggio chimico a), e con il processo air-laying b) Textile waste materials obtained following the chemical binding method a), and the air-laying technique b)

2.2 | Scarti della mandorla

La realizzazione di materiali a base di scarti di mandorla ha previsto l'impiego della pellicina, il sottile strato a diretto contatto con il frutto [12]. Dopo la sbucciatura delle mandorle in acqua ad alta temperatura, la pellicina viene raccolta e accumulata in serbatoi esterni rappresentando il principale scarto di lavorazione delle aziende che producono prodotti a base di mandorle pelate. Pertanto, prima di essere impiegato come materia prima per materiali innovativi, lo scarto è stato essiccato in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$). Gli aggregati vegetali raffreddati a temperatura ambiente sono stati, quindi, legati tra loro impiegando due diverse soluzioni di legante chimico. Il primo provino, denominato GA (235 kg/m³ e spessore 50 mm) e mostrato in Fig. 2-a, ha previsto l'utilizzo dei residui di mandorla "tal quali", mescolati con una soluzione acquosa di gomma arabica (GA). Le dimensioni medie degli aggregati erano di 10 mm di larghezza, 20 mm di lunghezza e 0,5 mm di spessore. Il secondo provino, denominato PVA (373 kg/m³ e spessore 50 mm) e mostrato in Fig. 2-b, ha comportato l'inclusione di bucce di mandorla macinate e trasformate in fibre di dimensione media 3 mm x 3 mm e spessore di 0,2 mm, legate con una soluzione acquosa di alcol polivinilico (PVA). La scelta di impiegare gli aggregati in dimensioni diverse è conseguenza della consapevolezza, ampiamente dimostrata in letteratura [13], dell'influenza del mix design sul comportamento fonoassorbente dei materiali. Le due miscele testate sono il risultato di numerosi tentativi condotti in laboratorio al fine di valutare il miglior rapporto legante/aggregato vegetale in grado di garantire una porosità adeguata alla struttura del materiale. Pertanto, le due miscele sono state realizzate rispettando un rapporto legante/aggregato che assume un valore pari a 0.30 nella miscela GA e 0.62 nella miscela PVA.

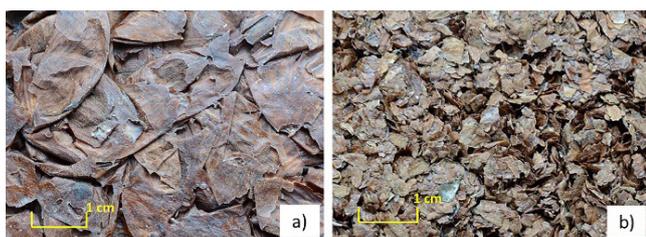


Fig. 2 – Materiali a base di scarti di mandorla impiegati "tal quali" e legati con una soluzione a base di gomma arabica (GA) a), o ridotti in dimensioni più piccole e legati con una soluzione a base di alcol polivinilico (PVA) b)

Almond waste materials with almond skin used "as is," mixed with a gum arabic water solution (GA) a), or with grounded almond skin bonded with a polyvinyl acetate water solution (PVA) b)

2.3 | Paglia

Nonostante la paglia di orzo sia un residuo agricolo ampiamente riutilizzato in agricoltura come lettiera per gli animali o ammendante per il suolo e impiegato con successo come bio-

massa per la produzione di energia rinnovabile, si è cercato di dare un valore aggiunto immaginando di impiegarlo come materiale fibroso nel settore dell'edilizia [14]. La canapa [15], così come altre varietà di fibre vegetali [16], sono state oggetto di crescente interesse. Tutte queste tipologie di fibre naturali, grazie alla loro struttura porosa e alla capacità di assorbire il suono, si prestano all'utilizzo in pannelli fonoassorbenti o isolanti termici, offrendo un'alternativa ecocompatibile ai materiali convenzionali. In questo contesto, dopo aver essiccato le fibre di paglia in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$), queste sono state legate tra loro impiegando una soluzione di silicato di sodio in quantità pari al 30% del peso totale del provino (Fig. 3). Sono stati ottenuti due provini SF-25 e SF-50 con densità apparente di 152 kg/m³ e spessore di 25 e 50 mm.



**Fig. 3 – Materiali a base di paglia di orzo e silicato di sodio
Straw based materials obtained using sodium silicate solution as binder**

2.4 | Scarti di potatura dell'olivo

Studi recenti [17, 18] confermano il potenziale dei residui vegetali agricoli per la realizzazione di isolanti termici e materiali fonoassorbenti innovativi. Le foglie di olivo, così come gli aggregati precedentemente analizzati, se opportunamente combinate con leganti naturali, possono rappresentare una soluzione efficace nel campo dell'edilizia [19]. Tutti i provini testati sono stati confezionati dopo aver essiccato le foglie di olivo in stufa a 50°C, fino al raggiungimento di una massa costante ($\pm 0,5\%$). In un primo momento lo scarto è stato testato "tal quale", senza l'aggiunta di leganti chimici, ma considerando tre diverse lunghezze dello scarto che hanno dato vita a tre campioni differenti: S00_G1 con lunghezza media delle foglie intorno ai 40 mm, S00_G2 con lunghezza media delle foglie intorno ai 15 mm e S00_G3 ottenuto tritando le foglie fino a raggiungere una lunghezza intorno a 5 mm o anche meno (Fig. 4-a). In un secondo momento, lo scarto vegetale impiegato per ottenere le matrici G1, G2 e G3, è stato legato impiegando una soluzione legante a base di chitosano, ottenendo i campioni S01_G1, S01_G2 ed S01_G3 (Fig. 4-b). Infine, le frazioni di scarto sono state combinate tra loro ottenendo i campioni S02 (50% G1 + 30% G2 + 20% G3) ed S03 (50% G1 + 30% G2

+ 20% G3 con applicazione di una pressione di 3kPa durante la produzione del provino, fino a maturazione completa). Il campione S04 è stato invece ottenuto usando la calce come legante e le foglie di lunghezza media di 40 mm (G1) come matrice. Tutti i provini hanno uno spessore di 50 mm.

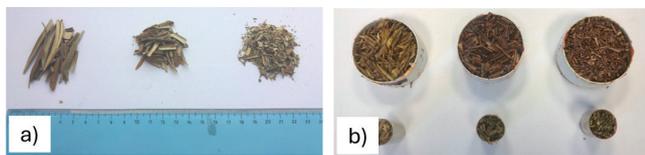


Fig. 4 – Esempi di scarti di olivo impiegati come matrice a); campioni con scarti legati con una soluzione a base di chitosano b)

Example of olive pruning waste used as matrix a), samples with waste bonded with a chitosan solution b)

2.5 | Scarti della carta

La letteratura scientifica evidenzia la possibilità di utilizzare la cellulosa nel settore edilizio per la produzione di pannelli con proprietà fonoassorbenti [20]. A tal fine, è stata sviluppata una matrice composita a base di polpa di carta, legata con colla vinilica e integrata con tre differenti aggregati leggeri: fondi di caffè esausti (ottenendo la miscela CG 318 kg/m³), segatura (ottenendo la miscela SP di 200 kg/m³) e paglia di favino (ottenendo la miscela FB di 348 kg/m³) (Fig. 5) [21]. Gli scarti cartacei sono stati idratati per 24 ore a temperatura ambiente per favorire la disgregazione della matrice fibrosa. Gli aggregati leggeri sono stati essiccati a 90 °C fino a massa costante ($\pm 0,5\%$). La miscela è stata omogeneizzata meccanicamente e successivamente disidratata tramite strizzatura e sgocciolamento per 15 minuti. Dopo la miscelazione del composto, il materiale è stato versato in stampi con spessore di 40 mm, successivamente essiccati in stufa a 90° C. Le percentuali degli aggregati impiegate nelle miscele sono state ottimizzate in laboratorio, con l'obiettivo di bilanciare tre parametri quali la lavorabilità dell'impasto, la compattezza del prodotto finale e la sua porosità.



Fig. 5 – Materiali a base di polpa di carta con paglia di favino a), fondi di caffè b) e segatura c)

Paper waste with fava bean residues a), coffee grains b) and sawdust powder c)

Al fine di sintetizzare le tipologie di materiali analizzati e i relativi risultati in termini di assorbimento acustico, in Tab. 1 sono elencati i campioni testati, suddivisi per tipologia. Per ciascun

provino sono riportati: il codice identificativo *ID*, le fibre o gli scarti utilizzati, il tipo di legante impiegato e lo spessore *s*.

Tab. 1 – Riassunto dei campioni testati
Summary of tested samples

<i>ID</i>	<i>Scarto base</i>	<i>Legante</i>	<i>s</i> [mm]
CH-n	Fibre tessili	Chitosano	50
GA-n	Fibre tessili	Gomma Arabica	50
BICO-n	Fibre tessili	Fibra bicomponente termofusione	50
TW-n	Fibre tessili	Fibra bicomponente air-laying	25÷40
GA	Mandorla tal quale	Gomma Arabica	50
PVA	Mandorla sminuzzat	Alcol polivinilico	50
SF_25	Paglia di orzo	Silicato di sodio	25
SF_50	Paglia di orzo	Silicato di sodio	50
S00_G1	Foglie olivo, 40 mm	–	50
S00_G2	Foglie olivo, 15 mm	–	50
S00_G3	Foglie olivo, 5 mm	–	50
S01_G1	Foglie olivo, 40 mm	Chitosano	50
S01_G2	Foglie olivo, 15 mm	Chitosano	50
S01_G3	Foglie olivo, 5 mm	Chitosano	50
S02	Foglie olivo, dimensioni miste	Chitosano	50
S03	Foglie olivo, dimensioni miste	Chitosano	50
S04	Foglie olivo, 40 mm	Calce	50
CG	Carta e caffè	Colla vinilica	40
SP	Carta e segatura	Colla vinilica	40
FB	Carta e paglia	Colla vinilica	40

3 | Metodi

3.1 | Proprietà acustiche

Il coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale è stato determinato in accordo alla procedura di misura prevista dalla norma ISO 10534-2 [22]. Un rumore a banda larga è generato da un altoparlante (20 W) posto all'estremità del tubo ad impedenza BSWA SW 260; mentre all'estremità opposta è presente una terminazione rigida su cui è alloggiato il materiale in prova. Il tubo include due configurazioni diverse che prevedono un diametro di 60 e 30 mm, coprendo la gamma di alte frequenze da 100 Hz a 6.3 kHz. Per ogni materiale sono stati testati tre campioni e i risultati sono analizzati in termini di curva di assorbimento acustico ottenuta come media delle tre misure.

3.2 | Proprietà non acustiche

Le principali proprietà non acustiche che rivestono un ruolo fondamentale nella modellazione della propagazione dell'onda sonora nei materiali e che saranno, pertanto, analizzate per i materiali oggetto di studio sono la porosità ϵ , la resistività al

flusso d'aria σ e la tortuosità τ . Ciascuno di questi parametri è stato sia misurato sperimentalmente in laboratorio, sia stimato mediante un algoritmo di ottimizzazione basato sul modello teorico più adeguato al comportamento del materiale analizzato. L'analisi delle curve di assorbimento acustico farà tuttavia riferimento ai parametri stimati e, ove non disponibile una stima attendibile, a quelli direttamente misurati.

3.2.1 | Misure sperimentali

La misura sperimentale della porosità aperta dei materiali ha richiesto la misura del volume reale occupato dal campione di prova, all'interno del picnometro ad elio ULTRAPYC 1200- e Quantachrome, attraverso l'applicazione del principio dello spostamento di gas come l'elio. La resistenza al flusso d'aria è stata misurata in accordo alla ISO 9053:2018 [23], generando un flusso continuo attraverso il campione e rilevando la caduta di pressione. Infine, la tortuosità è stata ottenuta utilizzando la resistenza elettrica del materiale come parametro indicativo della sua capacità di condurre la corrente, e quindi della lunghezza e sinuosità dei canali che lo caratterizzano. Pertanto, la misura della tortuosità implica la necessità di rendere conduttivo il materiale, immergendolo in una soluzione elettrolitica (soluzione acquosa di solfato di rame). Questa operazione è spesso in contrasto con la morfologia del materiale, con la natura solubile dei leganti impiegati e con la struttura chimica degli scarti impiegati come materia prima. Pertanto, nella maggior parte dei casi, la tortuosità è stata solo ottenuta tramite applicazione di un modello matematico, come sarà meglio spiegato nel paragrafo successivo.

3.2.2 | Modelli previsionali

I coefficienti di assorbimento acustico misurati sono stati confrontati con quelli previsti dal modello teorico sviluppato da Johnson, Champoux e Allard (JCA) [24, 25] e con la versione integrata da Lafarge (JCAL) [26]. Il modello JCA esprime l'impedenza caratteristica e il numero d'onda in funzione della densità effettiva ρ_e (Eq. (1)) e del modulo di densità dinamica K_e (Eq. (2)), a loro volta funzione di numerosi parametri fisici in ingresso quali la densità ρ , la porosità ϵ , la tortuosità τ , le lunghezze caratteristiche viscosa Λ e termica Λ' , e la resistività al flusso σ :

$$\rho_e = \frac{\tau\rho}{\epsilon} \left[1 + \frac{\sigma\epsilon}{j\omega\rho\tau} \sqrt{1 + j \frac{4\tau^2\eta\rho\omega}{\sigma^2\Lambda^2\epsilon^2}} \right] \quad (1)$$

$$K_e = \frac{\gamma P_0 / \epsilon}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8k}{\Lambda'^2 C_p \rho \omega} \sqrt{1 + j \frac{\Lambda'^2 C_p \rho \omega}{16k}} \right]} \quad (2)$$

Questo modello è stato successivamente incrementato da Lafarge che, al fine di considerare gli effetti termici alle basse frequenze, ha introdotto un ulteriore termine definito permeabilità termica statica k_0' (Eq. (3)):

$$K_e = \frac{\gamma P_0 / \epsilon}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{\epsilon k}{k_0' C_p \rho \omega} \sqrt{1 + j \frac{4k_0' C_p \rho \omega}{k \Lambda'^2 \epsilon^2}} \right]} \quad (3)$$

Una trattazione più approfondita del significato fisico di tali parametri esula dallo scopo del presente articolo; pertanto, si rimanda il lettore ai lavori originali [25, 26] o a testi di riferimento [27]. Poiché non è stato possibile misurare direttamente tutti i parametri richiesti dai modelli, è stato utilizzato un metodo inverso [28] per stimare quelli mancanti. Sfruttando i coefficienti di assorbimento misurati, i valori delle proprietà fisiche mancanti, insieme a quelli misurati direttamente, sono stati determinati tramite un algoritmo in grado di individuare il set di parametri che permettesse la migliore corrispondenza tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche.

4 | Risultati

4.1 | Scarti tessili

In Tab. 2 sono riportati i valori delle proprietà non acustiche misurate e stimate per i materiali a base di scarti tessili realizzati a scala di laboratorio. I parametri ottenuti con l'algoritmo di ottimizzazione, sulla base del modello teorico JCA sono affiancati da un asterisco.

Tab. 2 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione del modello JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ kN·s/m ⁴	τ –
CH-1	197	0.86	66.3	1.08*
CH-2	145	0.89	46.0	1.06*
CH-3	122	0.91	16.5	1.05*
CH-4	80	0.94	11.7	1.03*
GA-1	177	0.87	44.7	1.08*
GA-2	143	0.90	23.6	1.06*
GA-3	93	0.93	14.4	1.04*
BICO-1	167	0.88	86.0*	2.55
BICO-2	136	0.90	54.1*	1.82
BICO-3	115	0.91	48.6*	2.16
BICO-4	90	0.93	33.2*	1.09
BICO-5	51	0.95	23.4*	1.32

Al fine di valutare l'influenza dei processi di fabbricazione sul comportamento fonoassorbente dei diversi campioni, le curve di assorbimento sono analizzate confrontando materiali con simile resistenza al flusso, indipendentemente dalla tecnologia produttiva impiegata. Nella Fig. 6, sono confrontati i campioni BICO-2 e CH-1 che, nonostante una differenza del 31% nella densità apparente, presentano valori di resistenza al flusso d'aria simili, con una differenza del 15%. Come si osser-

va in Tab. 2, questo comportamento è attribuibile alla maggiore tortuosità del materiale BICO-2 che genera percorsi dell'aria più complessi, compensando così la differenza di densità apparente e restituendo valori di resistenza al flusso comparabili.

Nella Fig. 7, il campione BICO-3 è confrontato con i campioni CH-2 e GA-1. Il campione BICO-3, pur avendo una densità apparente inferiore del 21% rispetto a CH-2, presenta una resistenza al flusso solo leggermente inferiore (circa 5%), grazie a una maggiore tortuosità (Tab. 2) che ne incrementa la permeabilità e consente prestazioni di assorbimento acustico comparabili. Considerazioni analoghe valgono per il confronto con il campione GA-1. Tuttavia, il campione BICO-3 ha mostrato un valore di resistenza al flusso d'aria circa l'8% superiore rispetto al campione GA-1, pur con una densità apparente inferiore del 35%.

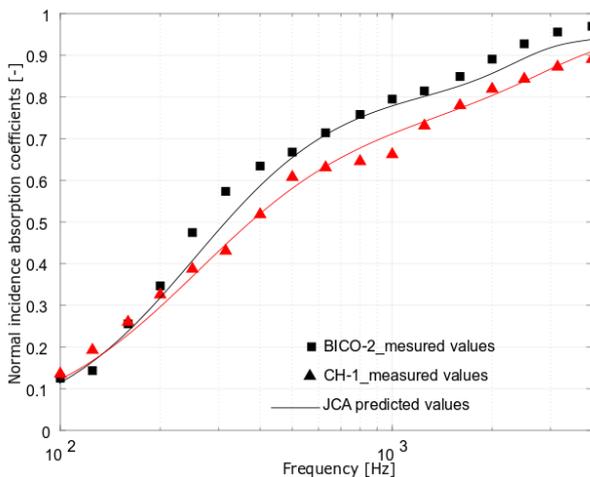


Fig. 6 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-2 e CH-1 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-2 and CH-1 samples (thicknesses of 40 mm)

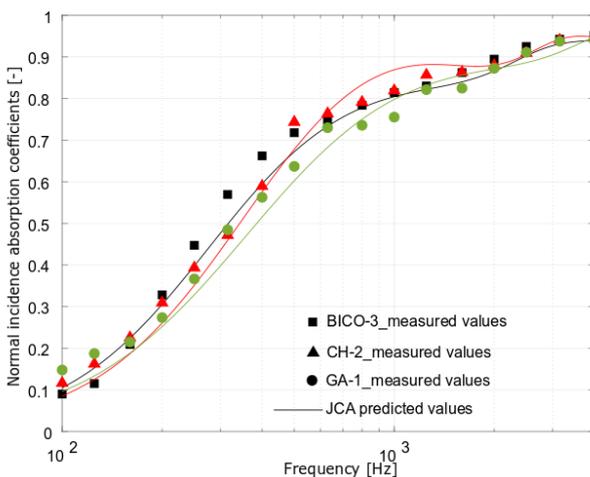


Fig. 7 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-3, CH-2 e GA-1 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-3, CH-2 and GA-1 samples (thicknesses of 40 mm)

La Fig. 8 riporta le curve di assorbimento acustico misurate per i campioni BICO-5 e GA-2 che, con resistenze al flusso quasi identiche (differenza del 2%), ma densità apparente che differiscono del 64%, mostrano curve di assorbimento acustico sovrapponibili fino a 630 Hz. A 1.25 kHz, BICO-5 raggiunge un picco di assorbimento prossimo all'unità, mentre GA-2 si ferma a 0,9, verosimilmente a causa della maggiore densità. Il confronto tra le figure evidenzia che, indipendentemente dalla tecnologia produttiva, i materiali con resistenza al flusso più bassa seguono un comportamento acustico simile a quello teorico dei materiali porosi, con coefficienti di assorbimento bassi alle basse frequenze, che aumentano repentinamente alle frequenze medie fino a raggiungere un picco con valori α vicini all'unità alle alte frequenze. All'aumentare della resistenza al flusso, l'andamento delle curve di assorbimento acustico rimane pressoché invariato, ma si osserva una riduzione dei valori del coefficiente di assorbimento α .

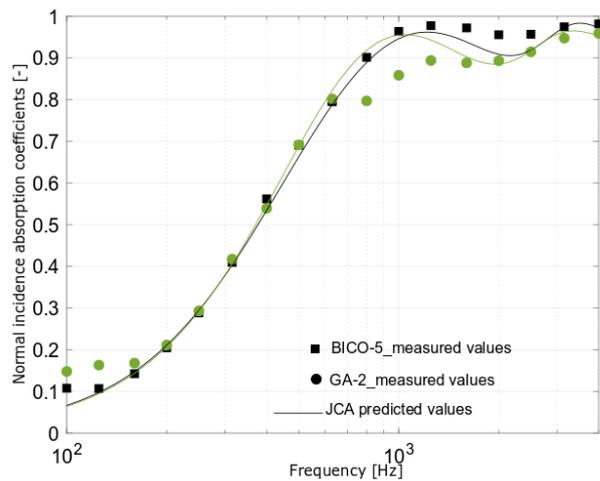


Fig. 8 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni BICO-5, e GA-2 (spessore 40 mm)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for BICO-5 and GA-2 samples (thicknesses of 40 mm)

Il confronto delle curve di assorbimento misurate con quelle teoriche mostra come entrambi i modelli teorici siano in grado di predire i valori sperimentali con una certa accuratezza.

La Tab. 3 riassume i parametri non acustici misurati e stimati (questi ultimi asteriscati) che si riveleranno utili per meglio descrivere le curve di assorbimento ad incidenza normale dei materiali a base di scarti tessili realizzati a scala industriale, rappresentate in Fig. 9.

Il campione TW-1 evidenzia un comportamento fonoassorbente coerente con quello di un materiale poroso ideale, con un picco di assorbimento acustico ($\alpha \approx 1$) a 2.125 kHz. Tale prestazione è attribuibile all'elevata porosità e alla bassa resistenza al flusso d'aria (Tab. 3), che conferiscono al materiale un'impedenza superficiale prossima a quella dell'aria. La tortuosità prossima all'unità non ha influenzato la frequenza del picco, che si verifica in corrispondenza della condizione di risonanza per un quarto di lunghezza d'onda rispetto allo

Tab. 3 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione del modello JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ kN·s/m ⁴	τ –
TW-1	68	0.92	19.2*	1.0*
TW-2	96	0.91	38.0*	1.0*
TW-3	134	0.89	81.2*	1.0*

spessore del campione. Ben diversi sono i risultati per il campione TW-2 che, sebbene fosse caratterizzato da una porosità e da un valore di tortuosità pari all'unità (Tab. 3), ha mostrato una curva di assorbimento senza alcun picco evidente. Questo comportamento è attribuibile all'elevata resistenza al flusso d'aria che ha determinato una riduzione della velocità del suono nel materiale, penalizzando l'assorbimento alle alte frequenze. Considerazioni simili potrebbero essere fatte per il campione TW-3, che ha mostrato la resistenza al flusso d'aria più alta (Tab. 3). In questo caso, i coefficienti di assorbimento sonoro sono risultati inferiori a quelli mostrati dagli altri due campioni su tutta la gamma di frequenze, a causa dell'elevata resistenza al flusso d'aria e dello spessore ridotto del campione.

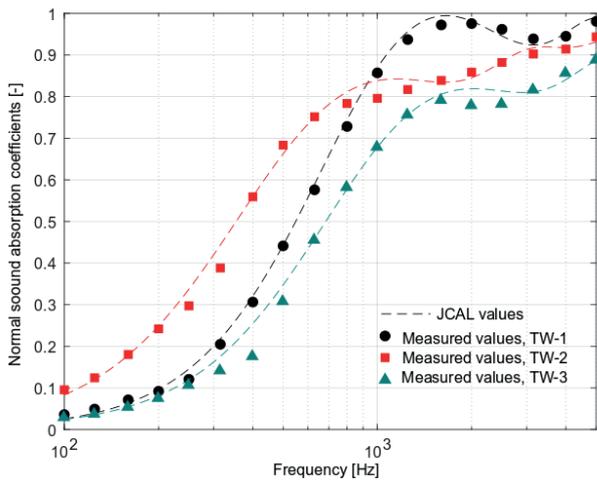


Fig. 9 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati per i campioni TW-1, TW-2 e TW-3, con spessori rispettivamente di 40 mm, 50 mm e 25 mm
Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted for TW-1, TW-2 and TW-3 samples with thicknesses respectively of 40 mm and 25 mm

Come osservato in Fig. 9, il confronto tra le curve sperimentali e quelle ottenute con il modello teorico JCAL conferma la buona capacità predittiva del modello in grado di stimare accuratamente posizione, altezza e larghezza del primo picco, soprattutto per il campione TW-1. Per i campioni TW-2 e TW-3, il modello ha mostrato una buona corrispondenza fino a frequenze medio-basse, ma ha presentato lievi discrepanze alle alte frequenze.

4.2 | Scarti della mandorla

La Tab. 4 riporta i parametri non acustici sperimentali e stimati tramite il modello teorico JCA (indicati con asterisco) con riferimento ai campioni realizzati con gli scarti della mandorla. I valori ottenuti evidenziano un'elevata tortuosità del materiale, parametro che successivamente contribuirà a spiegare la deviazione osservata tra le curve di assorbimento sperimentali e l'andamento teorico atteso, in particolare per quanto riguarda lo spostamento del primo picco.

Tab. 4 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati).
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ –	σ kN·s/m ⁴	τ –
GA	235	0.81	13.4	5.50*
PVA	373	0.68	23.4	4.40*

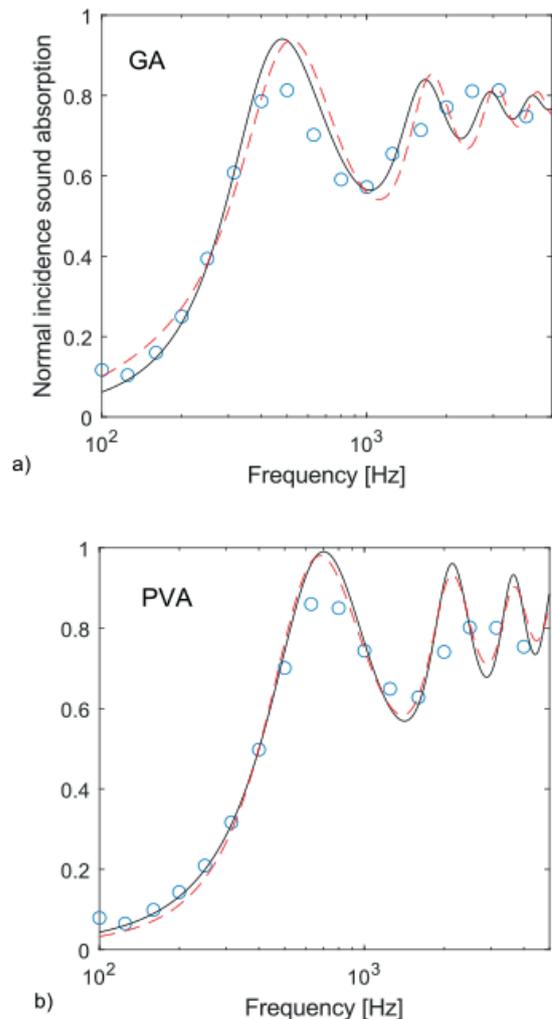


Fig. 10 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati e stimati dai modelli JCA (curva nera) e JCAL (curva rossa) per i campioni GA a) e PVA b) spessi 50 mm
Comparison between normal incidence sound absorption coefficients measured and predicted by JCA (black curve) and JCAL (red curve) models for GA a) and PVA b) samples 50 mm thick

La Fig. 10 riporta le curve di assorbimento ad incidenza normale, in bande di terzi d'ottava, nel range di frequenze da 100 Hz a 5 kHz. I due campioni mostrano un comportamento simile, con due picchi separati da un avvallamento, mantenendo un andamento analogo fino a 160 Hz, punto in cui le curve assumono un trend di crescita differente. Infatti, il campione GA ha registrato un primo picco a 500 Hz, con un valore di α prossimo a 0.8. Il campione PVA, invece, ha mostrato coefficienti di assorbimento inferiori rispetto a quelli di GA fino a 630 Hz, dove compare il primo picco ($\alpha = 0.9$), mentre la curva di GA continua a diminuire con un valore di α pari a 0.7. In entrambi i casi, il primo picco è stato rilevato a una frequenza inferiore a 1.7 kHz (valore teorico al quale ci si aspetterebbe il primo massimo di assorbimento per un pannello di 50 mm di spessore), indicando una significativa riduzione della velocità del suono nel materiale, attribuibile alla complessa microstruttura porosa e all'elevata tortuosità. In entrambi i casi, il primo picco è seguito da un avvallamento con un valore minimo di α intorno a 0.6, registrato a 1 kHz per il campione GA e a 1.6 kHz per il campione PVA. Successivamente, le due curve crescono fino a raggiungere un secondo picco intorno a 3.15 kHz.

Come mostrato in Fig. 10, l'applicazione del modello fenomenologico JCA ha fornito una buona corrispondenza con i dati sperimentali in termini di frequenze di picco, sebbene con leggere discrepanze nei valori assoluti. Il modello JCAL, utilizzato per confronto, non ha fornito un miglioramento significativo rispetto al modello JCA.

4.3 | Paglia

La Tab. 5 riporta i valori dei parametri non acustici misurati e stimati tramite il modello JCA (questi ultimi asteriscati). Analogamente ai compositi a base di scarti di mandorla, il valore di tortuosità prossima a 2 indica una morfologia interna complessa, la cui configurazione strutturale incide significativamente sulle prestazioni fonoassorbenti del materiale.

Tab. 5 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ -	τ -
SF	152	0.90	1.9*

In Fig. 11 sono mostrati i coefficienti di assorbimento sonoro ad incidenza normale in bande di terzi d'ottava, nel range di frequenze da 100 Hz a 5000 kHz. Trattandosi di due campioni estratti dalla stessa miscela, il diverso comportamento fonoassorbente osservato può essere attribuito alla differenza di spessore con cui sono stati realizzati i campioni (50 e 25 mm). Entrambi i campioni mostrano coefficienti di assorbimento trascurabili (inferiori a 0.2) alle medie-basse frequenze. A partire da 500 Hz, i valori di α subiscono incrementi gradua-

li, sebbene seguendo andamenti di crescita differenti. In effetti, per entrambi i campioni è stato osservato un primo picco con un valore di α di circa 0.8, ma questo è stato localizzato a 2 kHz per il campione di 25 mm e a 1.25 kHz per quello da 50 mm. La posizione dei massimi di assorbimento a frequenze più basse al crescere dello spessore era un fenomeno atteso in virtù del fatto che il primo picco si colloca normalmente a una frequenza la cui lunghezza d'onda quartica corrisponde allo spessore del campione. Tuttavia, come già evidenziato per i compositi precedentemente analizzati, lo spostamento del primo picco di assorbimento verso frequenze più basse di quella teorica, può essere una conseguenza della tortuosità che caratterizza la struttura porosa del materiale. Per entrambi i materiali, al primo picco di assorbimento segue un avvallamento con valore di α pari a 0.80 per il campione di 25 mm e pari a 0.65 per il campione spesso 50 mm. Alle alte frequenze, i coefficienti di assorbimento raggiungono valori di α superiori a 0.9, a partire da 4 kHz per il campione spesso 25 mm e da 3.15 kHz per il campione da 50 mm.

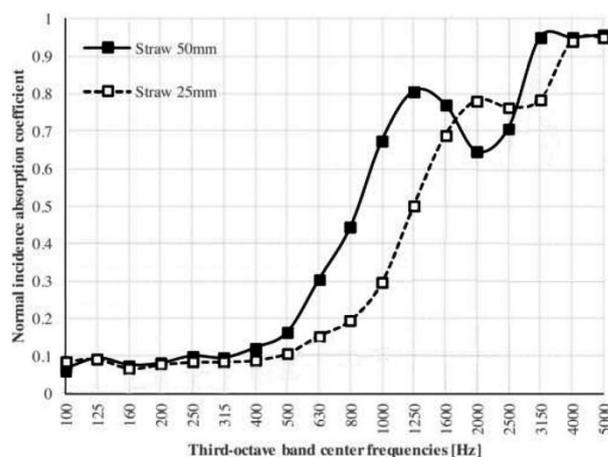


Fig. 11 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni SF_25 ed SF_50 rispettivamente di 25 e 50 mm

Normal incidence sound absorption coefficients measured for SF_25 and SF_50 samples, respectively 25 and 50 mm thick

4.4 | Scarti di potatura dell'olivo

In Tab. 6 sono elencati i valori dei parametri non acustici misurati e stimati (questi ultimi asteriscati) per i materiali a base di scarti di potatura dell'olivo. I dati indicano che i campioni ottenuti tramite miscelazione di granulometrie diverse mostrano valori di resistenza al flusso circa due volte superiori rispetto a campioni di densità simile ma con granulometria singola, suggerendo che la miscelazione non sempre migliora le proprietà acustiche del materiale, come sarà illustrato successivamente.

In Fig. 12 sono mostrati i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per le configurazioni con (S01_G1, S01_G2 ed S01_G3) e senza legante (S00_G1, S00_G2, S00_G3). Tutti i campioni mostrano un comportamento simile fino a 400 Hz, mentre a frequenze più alte emergono differenze significative. Nel caso del campione S00_G1,

**Tab. 6 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati).
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model**

ID	ρ kg/m ³	ϵ -	σ kN·s/m ⁴	τ -
S00_G1	66.2	0.98	-	-
S00_G2	127.3	0.98	-	-
S00_G3	218.9	0.83	-	-
S01_G1	79.5	0.96	49.1	1.90*
S02_G2	143.5	0.94	58.2	-
S03_G3	244.4	0.81	107	-
S0_2	143.8	0.89	98.5	-
S0_3	218.5	0.84	210.2	2.03*
S0_4	900	-	-	-

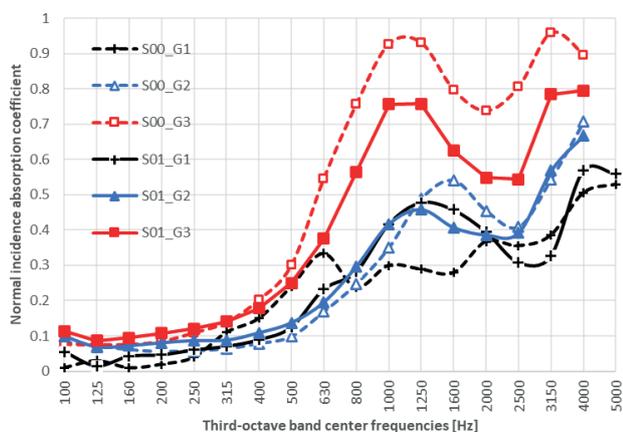


Fig. 12 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni (spessi 50 mm) con granulometria singola con (S01_G1, S01_G2 ed S01_G3) e senza legante (S00_G1, S00_G2, S00_G3)

Normal incidence sound absorption coefficients measured for samples (50 mm thick) with single granulometry, with (S01_G1, S01_G2, and S01_G3) and without binder (S00_G1, S00_G2, S00_G3)

i coefficienti di assorbimento acustico assumono un valore stabile intorno a 0.3 tra 500 Hz e 1.6 kHz, per poi aumentare fino a 0.5 a 5 kHz. Il campione S01_G1, con la stessa matrice di S00_G1 ma con il chitosano come legante, ha registrato un primo picco intorno a 1.25 kHz, con α pari a 0.5, seguito da un avvallamento tra 2.5 kHz e 3.15 kHz, e infine un nuovo picco a 4 kHz. I campioni S00_G2 e S01_G2 hanno mostrato un comportamento simile alle basse e alte frequenze, con differenze tra 1 e 2 kHz, dove i picchi di assorbimento sono apparsi rispettivamente a 1.6 kHz e 1.25 kHz, evidenziando l'effetto del legante sulla risposta acustica. Dal confronto tra i campioni S01_G1 e S01_G2 emerge che le due curve di assorbimento hanno un andamento pressoché sovrapponibile fino a 2 kHz. Tuttavia, nel range di frequenze più elevate, la granulometria G2 ha determinato un incremento delle prestazioni di assorbimento acustico. I campioni S00_G3 e S01_G3 hanno mostrato i più alti coefficienti di assorbimen-

to acustico, con picchi allineati in frequenza. Tuttavia, l'inclusione del legante nel campione S01_G3 ha comportato una riduzione del 20% dell'assorbimento, attribuibile alla parziale occlusione della porosità e alla conseguente diminuzione della permeabilità del materiale.

Per i campioni con granulometria mista (Fig. 13), il campione S02 ha mostrato un assorbimento lievemente superiore fino a 800 Hz rispetto ai campioni con densità simile, un picco più ampio intorno a 1.25 kHz, e un incremento finale di α fino a 0.8 a 4 kHz e oltre. Il campione S03, avente la stessa composizione di S02, ma compresso durante il processo di formatura, ha evidenziato un assorbimento leggermente inferiore alle basse frequenze. Nel range di frequenze medio-alte, si è manifestato il consueto picco a 1.25 kHz, con un valore massimo di α pari a 0.85, seguito da valori di α prossimi a 0.9 per frequenze superiori a 3.15 kHz. Anche in questo caso, così come evidenziato per i precedenti materiali compositi analizzati, il primo picco di tutte le curve ottenute risulta spostato verso frequenze più basse rispetto al valore teorico. Nonostante non sia stata effettuata una misura o una stima della tortuosità per tutti i materiali, la matrice costituita da più foglie sovrapposte lascia pensare ad un percorso tortuoso del suono. Il campione S04, contenente malta come legante, ha mostrato un comportamento diverso dagli altri campioni, con una curva piatta e α variabile tra 0.30 e 0.35, raggiungendo il massimo tra 415 Hz e 400 Hz. Questo comportamento è probabilmente dovuto alla malta che, riempiendo gli spazi tra le foglie, ha fatto sì che il campione si comportasse come un pannello vibrante invece che come un assorbitore poroso, riducendo l'efficacia dell'interazione visco-termica.

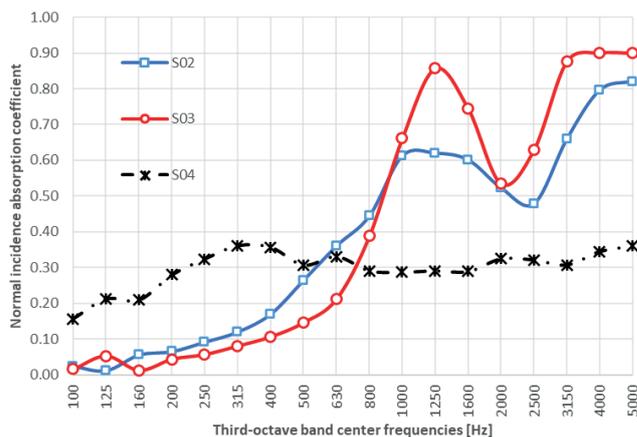


Fig. 13 – Coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati per i campioni (spessi 50 mm) con granulometria mista (S02, S03 ed S04)
Normal incidence sound absorption coefficients measured for samples (50 mm thick) with mixed granulometry (S02, S03 ed S04)

Infine, le curve sperimentali ottenute per i campioni S01_G1 e S03 sono state confrontate con quelle stimate applicando il modello teorico JCA, mostrando un ottimo accordo tra i valori misurati e quelli stimati (Fig. 14).

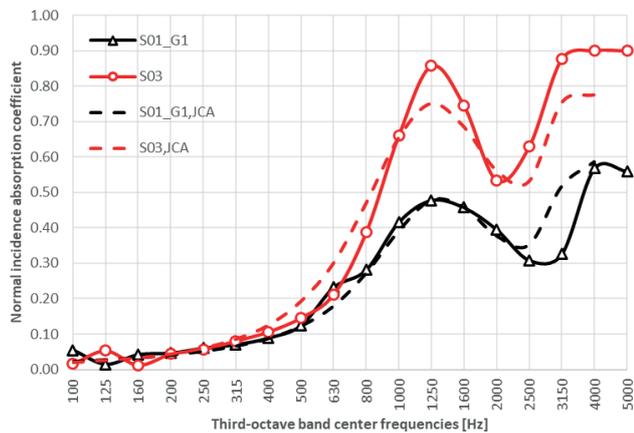


Fig. 14 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati sperimentalmente e le curve di assorbimento previste dal modello JCA per i campioni SO1_G1 ed S03

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients experimentally measured and sound absorption curves predicted by JCA model for SO1_G1 and S03 samples

4.5 | Scarti della carta

La Tab. 7 riporta i valori dei parametri non acustici misurati e stimati attraverso l'applicazione del modello JCA per i materiali a base di scarti della carta. Analogamente a quanto accaduto per i materiali a base di diatomite, l'elevata deviazione standard delle misure sperimentali ha reso necessario ricercare i parametri non acustici con riferimento ai coefficienti minimi e massimi misurati. Per ciascuna miscela, i valori massimi di resistenza al flusso sono generalmente associati ai valori minimi di assorbimento, tipicamente rilevati sulla faccia inferiore del provino. Tale superficie risulta infatti più densa e compatta per via della distribuzione manuale della miscela all'interno dello stampo e all'azione della gravità durante il processo di essiccazione.

Tab. 7 – Riassunto dei parametri non acustici misurati o derivati indirettamente dall'applicazione dei modelli JCA (asteriscati)
Summary of non-acoustical parameters measured or indirectly derived from the application of the JCA (with a star) model

ID	ρ kg/m ³	ϵ -	σ 10 ⁴ kN·s/m ⁴		τ -	
			min	max	min	max
CG	318	0.78	160*	48.0*	4.9*	4.3*
SP	200	0.87	68.0*	32.0*	2.2*	4.9*
FB	348	0.68	37.0	22.0	14.8*	6.6*

In Fig. 15, sono riportate le curve di assorbimento acustico ad incidenza normale misurate nel range di frequenze da 125 Hz a 5 kHz rispettivamente per i campioni CG, SP e FB.

È possibile osservare una marcata differenza prestazionale tra la faccia superiore dei provini, esposta all'aria (up) e quella inferiore, a diretto contatto con la base dello stampo (down). Le differenze riscontrate sono attribuibili a disomogeneità microstrutturali derivanti dal processo di realizzazione

manuale del provino e al diverso comportamento delle due facce durante il ritiro e la fase di essiccazione. Nella miscela CG (con il caffè), tali differenze si manifestano principalmente alle alte frequenze (> 1.3 kHz); mentre per la miscela FB (con paglia di favino) emergono già a partire da 500 Hz, intensificandosi oltre i 2 kHz, verosimilmente a causa dell'effetto della granulometria irregolare del residuo di paglia di favino sulla superficie ridotta del campione testato alle alte frequenze. La miscela SP (con la segatura), invece, mostra un comportamento più uniforme delle due facce, riconducibile alla capacità della segatura di mitigare il ritiro durante l'essiccazione. Il campione con paglia di favino presenta una risposta acustica più piatta, associata a bassa resistività al flusso, bassa porosità e alta tortuosità, probabilmente dovute a una microstruttura di tipo granulare. In tutti i casi, le ampie deviazioni standard (identificate con l'area colorata intorno alla curva) segnalano una variabilità tra i campioni non trascurabile.

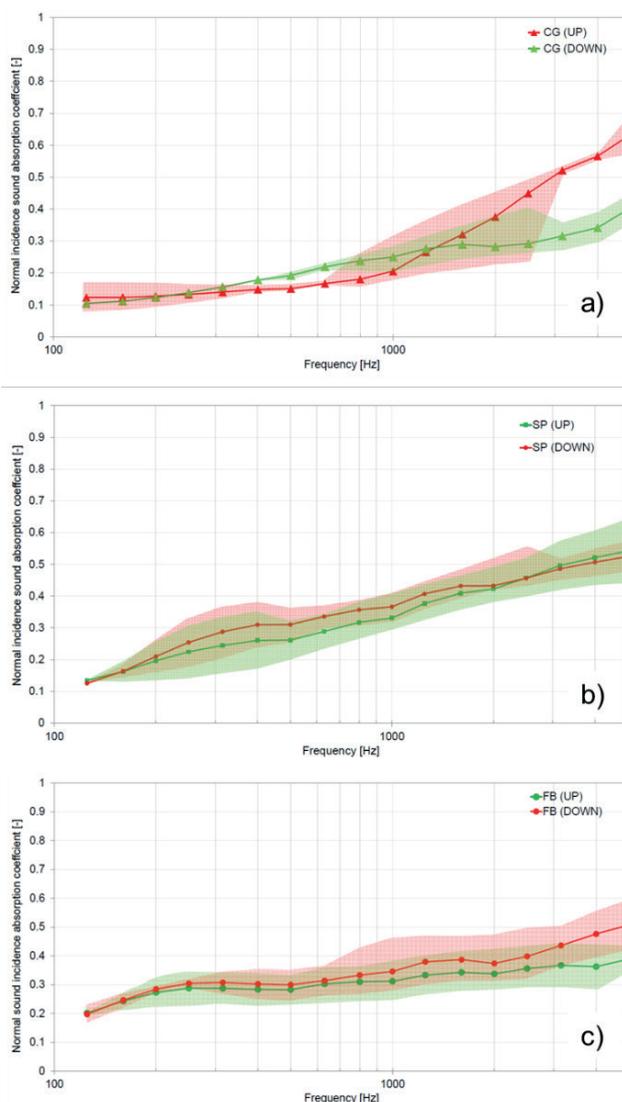


Fig. 15 – Confronto tra i coefficienti di assorbimento acustico ad incidenza normale misurati sperimentalmente e le curve di assorbimento previste dal modello JCA per i campioni CG a), SP b) e FB c)

Comparison between normal incidence sound absorption coefficients experimentally measured and sound absorption curves predicted by JCA model for CG a), SP b) e FB c) samples

5 | Conclusioni

Il presente articolo ha l'obiettivo di sintetizzare i principali risultati delle attività di ricerca condotte dagli autori. Le sperimentazioni hanno riguardato numerose materie prime naturali e scarti di origine industriale o vegetale, combinati con differenti tipologie di leganti. Tali combinazioni hanno dato origine a materiali compositi, prevalentemente a matrice fibrosa o granulata, la cui struttura è stata fortemente influenzata dalla tecnica di produzione impiegata, influenzando in modo significativo le proprietà acustiche.

I materiali a matrice fibrosa hanno mostrato un comportamento acustico caratteristico dei materiali fonoassorbenti porosi, con bassi coefficienti di assorbimento alle basse frequenze, seguiti da un rapido incremento nel range delle medie frequenze, fino a raggiungere un picco massimo alle alte frequenze. Al contrario, i materiali a matrice granulata hanno mostrato curve di assorbimento caratterizzate da molteplici picchi, con valori dei coefficienti fortemente condizionati dalla resistenza al flusso del materiale. Tutti i materiali analizzati risultano idonei all'impiego come strati interni fonoassorbenti o come pannelli per sistemi di controsoffittatura.

Dal punto di vista ambientale, le ricerche in corso sono orientate alla valutazione dell'impatto ecologico dei materiali. Ad ogni modo, specialmente nel caso di utilizzo degli scarti, il loro reimpiego consente di evitare il conferimento in discarica o l'incenerimento, conferendo così ai materiali una marcata valenza in termini di sostenibilità. Sviluppi futuri della ricerca prevedono l'ottimizzazione delle miscele dei compositi al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni acustiche, la sperimentazione di nuovi leganti a basso impatto ambientale e la standardizzazione delle tecniche di produzione per garantire la ripetibilità dei risultati. Inoltre, verranno approfondite le analisi LCA (Life Cycle Assessment) e sviluppate relative Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD), con l'obiettivo di posizionare i materiali nel mercato edilizio secondo criteri di trasparenza ambientale e circolarità. Ulteriori studi valuteranno anche la durabilità e il comportamento igrotermico dei materiali in condizioni operative reali, al fine di validarne l'applicazione in contesti edilizi diversi.

Conclusions

The paper aims to summarize the main results of research activities carried out by the authors. The experiments involved numerous natural raw materials and waste products of industrial or vegetal origin, combined with different types of binders. Different composite materials were obtained, predominantly with fibrous or granular matrices, whose structure was strongly influenced by the adopted manufacturing technique, significantly affecting their acoustic properties.

Fibrous matrix materials exhibited acoustic behavior typical of porous sound-absorbing materials, characterized by low absorption coefficients at low frequencies, followed by a sharp increase in the mid-frequency range, reaching a maximum peak at high frequencies. Conversely, granular matrix materials showed absorption curves with

multiple peaks, with coefficient values influenced by the material's air-flow resistivity. All analyzed materials are suitable for use as internal sound-absorbing layers or as panels for suspended ceiling systems.

From an environmental perspective, ongoing research focuses on assessing the ecological impact of these materials. In any case, particularly when using waste materials, their reuse avoids landfill disposal or incineration, thus giving the materials considerable value in terms of sustainability. Future developments of the research include the optimization of the blend composite to further improve the acoustic performance, the testing of new low environmental impact binders and the standardization of the production techniques to ensure the repeatability of the results. Furthermore, the Life Cycle Assessment (LCA) analysis will be deepened, and the related Environmental Product Declarations (EPD) will be developed, with the aim of introducing these materials in the construction market according to the principles of environmental transparency and circularity. Further studies will also evaluate the durability and hygrothermal behavior of the materials in real operating conditions, in order to validate their application in different building contexts.

Bibliografia

- [1] S.V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora, Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35 (2004) 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.
- [2] T.W. Hesterberg, G.A. Hart, Synthetic Vitreous Fibers: A Review of Toxicology Research and Its Impact on Hazard Classification, *Critical Reviews in Toxicology* 31 (2001) 1–53. <https://doi.org/>.
- [3] ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [4] ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [5] S. Fuchsl, F. Rheude, H. Röder, Life Cycle Assessment (LCA) of Thermal Insulation Materials: A Critical Review. *Cleaner Materials* 5 (2022) 100119. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>.
- [6] F. Asdrubali, G. Grazieschi, D.M. Gandola, The Role of Environmental Product Declarations in the Decarbonization of Building Materials and Components. *Energies* 18 (2025) 1308. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.0255.v1>.
- [7] ISO 14025:2010. Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures. International, Geneva, Switzerland.
- [8] R. Del Rey, A. Uris, J. Alba, P. Candelas, Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications. *Materials* 10 (2017) 1277. <https://doi.org/10.3390/ma10111277>.
- [9] C. Rubino, M. Bonet Aracil, J. Gisbert-Payá, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, M. Zamorano Cantó, F. Martellotta, Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textile waste and biopolymers, *Materials* 12 (2019) 4020. <https://doi.org/10.3390/ma12234020>
- [10] C. Rubino, M. Bonet Aracil, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications, *Journal of Cleaner Production* 278 (2021) 123905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123905>

- [11] C. Rubino, S. Liuzzi, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Characterization of sustainable building materials obtained from textile waste: From laboratory prototypes to real-world manufacturing processes, *Journal of Cleaner Production* 390 (2023) 136098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136098>
- [12] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Performance characterization of broad band sustainable sound absorbers made of almond skins. *Materials*, 13 (2020) 5474. <https://doi.org/10.3390/ma13235474>.
- [13] L. Shtrepi, A. Astolfi, E. Badino, G. Volpatti, D. Zampini, More than just concrete: Acoustically efficient porous concrete with different aggregate shape and gradation. *Applied Sciences* 11 (2021) 4835. <https://doi.org/10.3390/app11114835>.
- [14] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, P. Stefanizzi, C. Casavola, G. Pappaletta, Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste. *Industrial Crops and Products* 147 (2020) 112229. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>.
- [15] A. Santoni, P. Bonfiglio, P. Fausti, C. Marescotti, V. Mazzanti, F. Mollica, F. Pompoli, Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres. *Applied Acoustics* 150 (2019) 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.022>.
- [16] G. Iannace, G. Ciaburro, A. Trematerra, Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks. *Applied Acoustics* 163 (2020) 107239. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107239>.
- [17] M. Ali, A. Alabdulkarem, A. Nuhait, K. Al-Salem, G. Iannace, R. Almuzaiqer, Characteristics of agro waste fibers as new thermal insulation and sound absorbing materials: hybrid of date palm tree leaves and wheat straw fibers. *Journal of Natural Fibers* 19 (2022) 6576-6594. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929647>.
- [18] H. Lenormand, P. Glé, N. Leblanc, Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. *Acta Acustica united with Acustica* 103 (2017) 149-157. <https://doi.org/10.3813/AAA.919040>.
- [19] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, U. Ayr, Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder. *Applied Acoustics* 141 (2018) 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.022>.
- [20] J. P. Arenas, J. Rebollo, R. del Rey, J. Alba, Sound Absorption Properties of Unbleached Cellulose Loose-Fill Insulation Material. *Bio Resources* 9 (2014). <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6227-6240>.
- [21] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, F. Martellotta, Sustainable materials from waste paper: Thermal and acoustical characterization. *Applied Sciences* 13 (2023) 4710. <https://doi.org/10.3390/app13084710>.
- [22] ISO 10534-2, 1998. Acoustics e Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes e Part 2: Transfer-Function Method, Geneva, Switzerland.
- [23] ISO 9053: 2018. Acoustics – Determination of airflow resistance – Part 1: static airflow method. Geneva, Switzerland.
- [24] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *Journal of Fluid Mechanics* 176 (1987) 379e402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>.
- [25] J.F. Allard, Y. Champoux, New empirical equation for sound propagation in rigid frame fibrous material. *Journal of the Acoustical Society of America* 91 (1992) 3346e3353. <https://doi.org/10.1121/1.402824>.
- [26] D. Lafarge, P. Lemarinier, J.F. Allard, V. Tarnow, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, *Journal of the Acoustical Society of America* 102 (1997) 1995-2006. <https://doi.org/10.1121/1.419690>
- [27] T.J. Cox, P.K. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*. Spon Press, London, pp. 141-145, 2004.
- [28] Y. Atalla, R. Panneton, Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. *Canadian Acoustics* 33 (2005) 11-24. <http://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1711>.