

Design di pannelli fonoassorbenti sostenibili costituiti da macroalga bruna *Sargassum*

Francesco Pompoli^{a*} | Ilaria Dicarlantonio^b | Joselina Hernandez^b | Cristina Marescotti^a

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli Studi di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

^b Corso di Laurea in Design
del Prodotto Industriale,
Università degli Studi di Ferrara,
Via Ghiara, 36, 44121 Ferrara

* Autore di riferimento:
francesco.pompoli@unife.it

Ricevuto: 29/2/2024

Accettato: 10/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17362

ISSN: 2385-2615

L'alga marina bruna *Sargassum* costituisce un problema ambientale sempre più importante sulle coste affacciate all'Oceano Atlantico, ed in particolare nella zona caraibica e nell'Africa equatoriale. Enormi distese galleggianti di queste alghe si ammassano in mare e lungo le coste rendendo più difficile le attività turistiche e di pesca. Negli ultimi anni si è cercato di sviluppare diversi progetti che consentano l'utilizzo di tali alghe come risorsa per varie applicazioni industriali. In questo ambito, nel seguente articolo verrà proposto un percorso di design di pannelli fonoassorbenti ricavati a partire da *Sargassum* essiccato al sole, che comprende una caratterizzazione acustica e fisica del materiale in funzione della sua densità apparente, una modellazione analitica del campo acustico all'interno del materiale considerato come un fluido dissipativo equivalente ed una proposta prototipale di pannelli modulari fonoassorbenti con notevole contenuto di design.

Parole chiave: assorbimento acustico, sostenibilità, materiale poroso, alga *Sargassum*

Design of sustainable sound-absorbing panels based on *Sargassum* brown macroalgae

The brown seaweed *Sargassum* poses an increasingly significant environmental challenge along the coasts bordering the Atlantic Ocean, particularly in the Caribbean and in the equatorial Africa. Vast floating expanses of this seaweed accumulate in the sea and along the coasts, posing obstacles to fishing and tourism activities. In recent years, efforts have been underway to develop various projects aimed at utilizing these algae as a resource for various industrial applications. In this context, the following article will propose a design approach for sound-absorbing panels made from sun-dried *Sargassum*. This approach includes an acoustic and physical characterization of the material as a function of its bulk density, an analytical modeling of the acoustic field within the material considered as an equivalent dissipative fluid, and a prototype proposal for modular sound-absorbing panels with a significant design content.

Keywords: sound absorption, sustainability, porous material, *Sargassum* algae

1 | Introduzione

L'obiettivo di riduzione mondiale delle emissioni di CO₂ ha dato grande impulso alla ricerca di materiali fonoassorbenti sostenibili, ricavati dal riciclo di materiali a fine-vita, da scarti di lavorazione oppure da piante invasive che rappresentano un problema ambientale.

In letteratura sono presenti molti articoli di review che raccolgono numerose ricerche sulle proprietà fonoassorbenti di materiali sostenibili, ed in particolare [1] e [2] si concentrano sui materiali di origine naturale (vegetale e animale). Alcuni di questi materiali derivano da scarti di lavorazione agricola (residui di foglie di tè [3], foglie di ananas [4], fibre di paglia e residui di potatura di ulivo [5], fibre di cocco [6]) mentre altri da piante invasive che non hanno altre applicazioni (Ginestra [7], *Yucca gloriosa* [8]).

Esigui risultano invece gli studi per l'utilizzo di materiali di scarto di origine marina, nonostante i mari ricoprano il 70% della superficie terrestre. In [9] vengono studiate le proprietà acustiche delle fibre di *Posidonia*, pianta marina endemica del Mediterraneo che produce, a seguito di mareggiate, grandi

quantitativi di residui fogliari che si spiaggiano sulle coste costituendo un problema per lo sfruttamento turistico degli arenili. In [10] vengono presentati alcuni risultati di fonoassorbimento ottenuti su diverse tipologie di alghe essiccate raccolte sulle coste ucraine del mare di Azov.

L'idea alla base di questa ricerca deriva dal problema ambientale costituito dall'enorme incremento di distese galleggianti di *Sargassum*, una macroalga bruna diffusa nella zona caraibica dell'Oceano Atlantico ed ultimamente in espansione sulle coste africane equatoriali (Fig. 1). Queste alghe, presenti come specie pelagiche *Fluitans* III, *Natans* I e *Natans* VIII, si ammassano in mare e lungo le coste rendendo difficili le attività di pesca e turistiche (Fig. 2) [11].

Occorre precisare che il *Sargassum* in natura è sempre esistito, principalmente nel Golfo del Messico e nel Mar dei Sargassi; esso viene descritto da Colombo nel suo primo viaggio di "scoperta" del 1492 [12]:

"Dopo cento miglia con vele spiegate, il vento cala e il mare si calma. [...] Ci siamo diretti con cautela verso la strana massa. Lentamente, abbiamo scoperto che c'erano

alge galleggianti, ovunque, a perdita d'occhio. Abbiamo iniziato a tagliare le alge, la barca ha rallentato gradualmente, finché non siamo rimasti intrappolati. [...] Ci sono volute diverse settimane per navigare attraverso questo strano tappeto, alla ricerca di Antilla. Lentamente, abbiamo affrontato la verità e siamo tornati a nord-est per trovare un po' di vento. Lentamente, la copertura di alge si è diradata, lasciando qua e là chiazze isolate, e all'improvviso non c'era più."



Fig. 1 – Fotografia del Sargasso, Miami, Florida, 15 maggio 2023
Sargassum photography, Miami, Florida, May 12, 2023



Fig. 2 – Sargassum spiaggiato, foto concesse da SOS Carbon
Sargassum beached, photos courtesy of SOS Carbon

Questa macro alga bruna ricordava agli esploratori un'uva presente in Portogallo, chiamata "salgazo" ed i relativi banchi fluttuanti vengono denominati "Sargaços". Il mare caratterizzato dalla presenza di queste alge prende da esse il nome di Mar dei Sargassi. Esistono inoltre numerosi riferimenti storici all'impiego di alge spiaggiate da parte delle popolazioni costiere; ad esempio nell'arte pittorica si trovano riferimenti in dipinti che hanno rappresentato l'attività di raccolta delle alge, utilizzate per fertilizzare il terreno o per integrare la dieta di animali erbivori. Si vedano ad esempio i dipinti del XIX secolo riportati in Figg. 3 e 4.



Fig. 3 – Georges Clairin, Inceneritore di alge a Point du Raz, Museo d'arte e di storia, Saint-Brieuc, Francia, 1882.
Ph. Credit: Gérard Yvergniaux
Georges Clairin, Kelp-burning at the Point du Raz, Musée d'art et d'histoire, Saint-Brieuc, France, 1882.
Ph. Credit: Gérard Yvergniaux



Fig. 4 – Henry George Todd, Raccoglitori di alge, Bury Art Museum England, ca 1847–1898. Ph. credit: Bury Art Museum
Henry George Todd, Seaweed Gatherers, Bury Art Museum England, ca 1847–1898. Ph. credit: Bury Art Museum

Negli ultimi anni, a causa dei cambiamenti climatici, si è assistito ad un progressivo aumento della presenza di Sar-

gassum nei mari e dei fenomeni di spiaggiamento sulle coste, ed una estensione delle zone di diffusione di queste alghe nell'Atlantico fino a raggiungere le coste africane occidentali (Fig. 5).

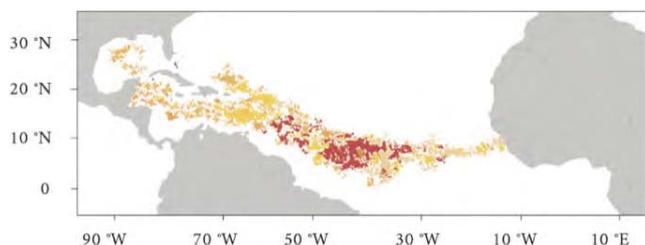


Fig. 5 – La Grande Cintura Atlantica di Sargasso, luglio 2022, riprogettazione grafica delle autrici a partire da NOAAclima
The Great Atlantic Sargassum Belt, July 2022, graphic redesign by the authors starting from NOAAclima

L'invasiva presenza di Sargassum rappresenta una "nuova normalità" a cui le comunità locali devono adattarsi. L'incessante inondazione delle spiagge con biomasse di alghe crea una situazione di emergenza in termini di impatto ambientale ed economico. La rimozione della biomassa in decomposizione è costosa ed è diventata un onere sia per l'industria turistica che per i governi locali. Tipicamente, il Sargassum recuperato viene inviato in discarica o lasciato degradare in cumuli vicino alla spiaggia; gli effetti generati dal Sargassum in decomposizione come il rilascio di anidride carbonica e idrogeno solforato sono probabilmente eterni in alcune aree, dove interi ecosistemi costieri sono stati alterati [13], [14].

La grande disponibilità di Sargassum ha stimolato un forte interesse nel suo utilizzo come materia prima per realizzare un'ampia gamma di prodotti, trasformando così un rifiuto in una risorsa. Imprenditori e gruppi di ricerca lavorano allo sviluppo di imprese e progetti innovativi [13], [15], [16].

Varie sono le tecniche e le metodologie prese in considerazione, dalla digestione anaerobica agli estratti cosmetici, della produzione di plastica ai materiali da costruzione. D'altra parte la variabilità in termini di quantità, qualità e ubicazione crea una profonda incertezza per lo sviluppo di processi industriali affidabili: non conoscere i volumi approssimativi di alga bruna che si presenteranno in un determinato luogo e in un determinato tempo rende molto difficile determinarne l'impiego industriale. Questo, inoltre, limita la capacità dei potenziali investitori di eseguire proiezioni e analisi complete dei costi per valutare la fattibilità economica e la sostenibilità delle iniziative proposte. Altro fattore fondamentale riguarda la variabilità compositiva. Le specie Sargassum, citate inizialmente, sono pelagiche: non essendo ancorate ai fondali marini percorrono grandi distanze dalla loro sorgente nell'Atlantico equatoriale alle diverse località di spiaggiamento lungo le coste caraibiche per mezzo delle correnti oceaniche. Pertanto, i diversi "lotti" differiscono nella loro composizione chimica e, in particolare, nel carico di microinquinanti, richiedendo test continui.

In questo ambito, nel presente articolo verrà proposto un percorso di design di pannelli fonoassorbenti ricavati a partire da Sargassum essiccato al sole, fornito da SOS Carbon, una organizzazione spinoff del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) operante a Santo Domingo [17].

La ricerca si è sviluppata in due fasi successive: una prima caratterizzazione acustica del materiale essiccato, volta a costruire un modello analitico che consenta di ottimizzare le proprietà acustiche dei pannelli proposti, ed una successiva che ha riguardato lo sviluppo di una proposta di design di un possibile prodotto finale realizzato con materiale a base di Sargassum. In questa seconda fase aspetti importanti hanno riguardato la valorizzazione della sostenibilità e dell'origine naturale del materiale, e l'individuazione di un legante di origine naturale che consenta di realizzare un pannello dimensionalmente stabile e definito.

È importante sottolineare che negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi prodotti fonoassorbenti di design basati su materiali naturali, soprattutto nei paesi nord-europei.

L'esempio più vicino al prodotto proposto in questa ricerca è costituito dal pannello Sould [18] a base di erba del mare del nord (*eelgrass*) e prodotto dall'omonima ditta danese.

Altri esempi di pannelli ispirati a materiali naturali sono basati su:

- aghi di conifera (prodotti dalla ditta russa Eoacoustic [19];
- muschio verde (prodotti su misura dalla ditta tedesca Freund [20];
- lana e polpa di legno (prodotti dalla ditta svedese Baux [21];
- sughero (prodotti dalla ditta portoghese Gencork [22]).

Ciò che accomuna tali prodotti è l'attenzione al design, in termini di resa estetica, valore architettonico e al richiamo alla natura e alla sostenibilità; questo conferisce ai prodotti un altissimo valore aggiunto che consente di commercializzarli a cifre notevolmente maggiori rispetto ai materiali fonoassorbenti tradizionali.

Le fasi di questa ricerca, illustrate nei paragrafi successivi, sono state le seguenti:

- caratterizzazione acustica e fisica del materiale in funzione della sua densità apparente, in forma sciolta (cioè privo di legante);
- modellazione analitica del campo acustico all'interno del materiale considerato come un fluido dissipativo equivalente, finalizzata alla individuazione delle densità apparente ottimali del materiale per ottenere determinate prestazioni acustiche;
- proposta prototipale di pannelli modulari fonoassorbenti con notevole contenuto di design, legati con resina di pino per mantenere la sostenibilità del prodotto finito; su tali pannelli sono stati condotti test acustici volti a valutare l'effetto del legante sulla prestazione del pannello.

È importante sottolineare che questo studio è stato sviluppato nell'ambito di una tesi di Design Industriale senza il coinvolgimento di aziende interessate alla produzione

industriale dei pannelli: esso è pertanto limitato agli aspetti di ottimizzazione acustica e di design del prodotto, e non ha approfondito altri aspetti fondamentali per la loro commercializzazione come ad esempio la resistenza al fuoco, all'umidità, all'invecchiamento o l'emissione di odori.

2 | Materiale e metodi

2.1 | Descrizione dei campioni di Sargassum

Il materiale utilizzato nell'ambito di questo progetto è costituito di Sargassum essiccato al sole, fornito dalla organizzazione spin-off SOS Carbon, che lo raccoglie direttamente in mare sulla superficie d'acqua con mezzi navali attrezzati. Si tratta di una organizzazione fondata da ricercatori e docenti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) che ha sviluppato una tecnica di raccolta economica ed a basso impatto ambientale che utilizza un macchinario chiamato Littoral Collection Module (LCM). Tale sistema può essere montato su una qualsiasi imbarcazione artigianale presente nei Caraibi e consente di raccogliere le alghe off-shore senza presenza di sabbia (Fig. 6). L'alga è stata infine essiccata al sole per 48 ore.

I test acustici sperimentali sono stati inizialmente condotti sul materiale privo di leganti (Fig. 7), inserendo un quantitativo di alghe essiccate noto in peso e comprimendolo progressivamente per misurarne le proprietà per diverse densità apparente (range compreso tra 94 kg/m^3 e 240 kg/m^3).



Fig. 6 – Processo di raccolta del Sargassum in mare, foto concesse da SOS Carbon
Harvesting process of Sargassum in the sea, photos courtesy of SOS Carbon

Successivamente sono state svolte prove al fine di realizzare un pannello di design compatto e resistente. Il processo proposto per la realizzazione di questi pannelli modulari verrà descritto nel paragrafo 2.3.



Fig. 7 – Sargassum essiccato privo di leganti oggetto dei test
Binder-free dried Sargassum tested

2.2 | Caratterizzazione fisica ed acustica dei campioni di Sargassum

Obiettivo della prima fase della ricerca è stato quello di sviluppare un modello analitico che consenta di calcolare le proprietà acustiche del Sargassum essiccato al variare della densità apparente del campione. Le misure sperimentali di assorbimento acustico sono state condotte su aggregati sciolti di Sargassum, privi di legante. Uno schema del processo di caratterizzazione e modellazione è riportato in Fig. 8.



Fig. 8 – Schema del processo di caratterizzazione e modellazione acustica

Diagram of the acoustic characterization and modeling process

La procedura utilizzata prevede l'inserimento di un peso noto di fibre all'interno di un porta-campione cilindrico, il cui spessore viene progressivamente ridotto in modo da ottenere

misure sperimentali a densità apparente variabile. Le misure del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale sono state condotte secondo la norma ISO 10534-2 [23] in un range di densità apparente ρ_a compreso tra 94 kg/m³ e 240 kg/m³ ed un range in frequenza compreso tra 100 Hz e 4300 Hz (diametro del campione cilindrico pari a 45 mm). Per comprimere progressivamente il campione durante i test sul lato esposto al campo acustico è stata applicata una rete metallica fissa priva di effetti acustici sulla misura (Fig. 9).



Fig. 9 – Apparato di misura del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale e modalità di montaggio del campione
Apparatus for measuring the sound absorption coefficient at normal incidence and sample mounting method

Sul materiale è stata inoltre effettuata una misura sperimentale di porosità utilizzando un'apparecchiatura basata sul metodo della compressione d'aria di un volume noto [24]. Attraverso questa misura, descritta in [25] e [26], è possibile ricavare la densità media della struttura del materiale ρ_m (risultata pari a 1191 kg/m³) e da questa calcolare la porosità dei campioni al variare del grado di compressione attraverso la formula:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{1191} \quad (1)$$

Il modello analitico adottato per la propagazione acustica nel materiale è quello proposto da Johnson-Champoux-Allard [27], [28] per fluido dissipativo equivalente.

Esso esprime la densità effettiva complessa ρ e il modulo di compressibilità complesso K in funzione di cinque parametri: porosità ϕ , resistività al flusso σ , tortuosità α_∞ , lunghezza caratteristica viscosa Λ e termica Λ' :

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} + \frac{\sigma}{i\omega} \sqrt{1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \quad (2)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\eta}{i\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2} \sqrt{1 + \frac{i\rho_0 \omega N_{Pr} \Lambda'^2}{16\eta}} \right)^{-1} \right] \quad (3)$$

dove ρ_0 è la densità, η la viscosità, P_0 la pressione statica e γ il rapporto dei calori specifici dell'aria.

Dalla densità effettiva e dal modulo di compressibilità è possibile calcolare l'impedenza caratteristica Z_c e la costante di propagazione del mezzo k_c :

$$Z_c = \sqrt{\rho K} \quad (4)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}} \quad (5)$$

e da queste, per uno spessore h del materiale, l'impedenza superficiale Z_s e l'assorbimento acustico ad incidenza normale α_n :

$$Z_s = -iZ_c \cot(k_c h) \quad (6)$$

$$\alpha_n = \frac{4Re\left(\frac{Z_s}{\rho_0 c_0}\right)}{\left|\frac{Z_s}{\rho_0 c_0}\right|^2 + 2Re\left(\frac{Z_s}{\rho_0 c_0}\right) + 1} \quad (7)$$

I parametri fisici inseriti nel modello di JCA sono stati calcolati per inversione dalle misure acustiche sperimentali, attraverso il metodo numerico descritto in [29]: esso prevede la minimizzazione numerica dello scarto quadratico medio tra una curva sperimentale (assorbimento acustico o impedenza superficiale) e la curva analitica calcolata con il modello di fluido dissipativo equivalente. L'unico parametro fissato per ciascuna densità apparente è la porosità, misurata sperimentalmente e calcolata secondo la relazione (1), mentre gli altri quattro parametri sono stati calcolati nel processo di minimizzazione.

2.3 | Design di pannelli modulari a base di Sargassum

Il ruolo del design nella ricerca è legato ai principi di un design per il territorio, volto a sostenere le iniziative per uno sviluppo locale, che agisce nella direzione della salvaguardia ambientale. Il designer, infatti, ha il compito di pensare per un mondo che non deve crescere all'infinito, ma deve preoccuparsi delle difficoltà esistenti. L'intero studio segue le logiche del "design sistemico": dalle cause che generano l'approdo sulle spiagge fino alla raccolta, l'essiccazione e la valorizzazione. Dunque, una rivalutazione dello scarto marino e la sua conversione in pannelli fonoassorbenti, al fine di sfruttare al meglio le proprietà del materiale di partenza.

La geometria dei pannelli di design trae ispirazione da forme organiche presenti in natura, in particolar modo dalle vesciche circolari chiamate pneumatocisti che rappresentano

una vera e propria particolarità del Sargassum: bolle d'aria che permettono il galleggiamento. Il pannello proposto (Fig. 10) ha una geometria modulare che permette di realizzare superfici a parete di dimensione variabile che rappresentino un elemento di arredo.

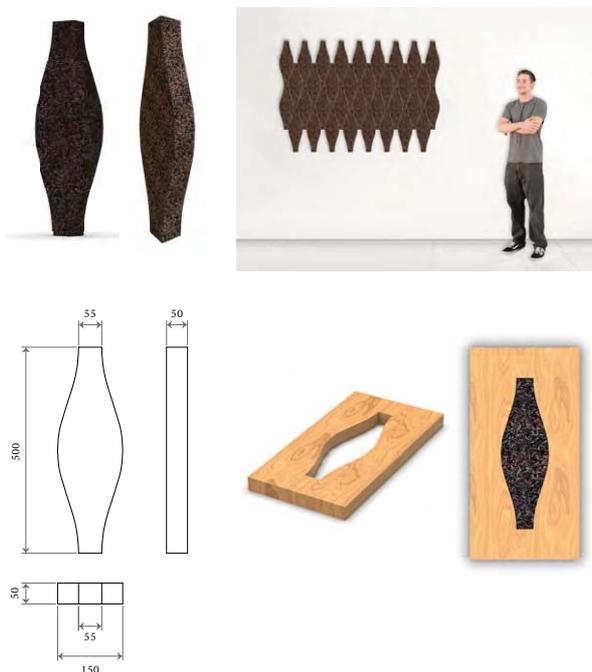


Fig. 10 – Prototipo di pannello modulare
Modular panel prototype

Dopo un primo studio legato alle proprietà acustiche di fibre di Sargassum sciolte si è passati al processo di realizzazione del pannello prototipale/artigianale realizzando uno stampo in due semi-gusci e definendo un processo di trattamento del Sargassum con un legante sciolto in acqua (Fig. 11).

Per raggiungere un risultato ottimale è stata presa in considerazione l'ipotesi di utilizzare leganti naturali, in particolare la resina di pino. Questo fa sì che vengano tenuti saldi gli obiettivi principali del progetto: un prodotto sostenibile dal punto di vista ambientale e biodegradabile.

Per verificare il processo di realizzazione dei pannelli e l'effetto sulle performance acustiche della resina aggiunta come legante, sono stati realizzati dei campioni cilindrici con diametro di 100 mm e spessore nominale pari a 60 mm. L'alga essiccata è stata mescolata con resina di pino fusa in acqua (*Kiefernharz aus Portugal*, prodotta da *beegut GmbH*), poi compressa in uno stampo cilindrico per circa 48 ore (Fig. 12) e lasciata asciugare con ventilazione forzata per altre 48 ore.

Per verificare l'effetto della resina sono stati realizzati tre diversi campioni a partire da 66 g di alga: uno privo di resina, per verificare se la presenza della resina fosse necessaria alla realizzazione del pannello ed avere una misura acustica di riferimento, uno con 50 g di resina (rapporto 1:0.75) ed uno con 75 g di resina (rapporto 1:1.14). Si sono ottenuti così tre campioni con densità effettiva crescente tra 150 e 300 kg/m³.



Fig. 11 – Foto sulla realizzazione dei prototipi
Photos of the creation of the prototypes



Fig. 12 – Compressione del campione nello stampo
Compression of the sample in the mold

3 | Risultati sperimentali sul materiale sciolto

In questo paragrafo verranno presentati i risultati sperimentali e la modellazione acustica ottenuti sui campioni di materiale sciolto.

3.1 | Misure di assorbimento acustico

In Fig. 13 vengono riportate le curve di fonoassorbimento ad incidenza normale dei campioni testati, al variare di densità apparente e spessore. Si tratta di una prova a compressione progressiva pertanto le densità apparenti minori si riferiscono a campioni di spessore maggiore, e viceversa.

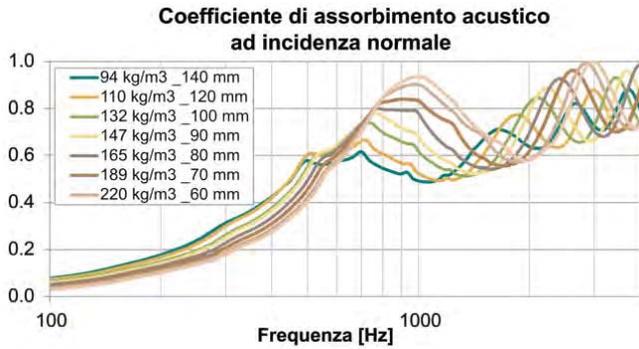


Fig. 13 – Assorbimento acustico per diverse combinazioni di densità apparente e spessore
Sound absorption for different combinations of bulk density and thickness

Dalle curve si può notare che per raggiungere valori massimi di assorbimento elevati è necessario utilizzare densità apparenti maggiori di 200 kg/m³.

3.2 | Inversione dei parametri fisici e loro interpolazione in funzione della densità apparente

In Tab. 1 vengono riportati i risultati delle inversioni effettuate sulle misure di assorbimento in funzione della densità apparente. Il valore della porosità è stato fissato per ciascuna inversione in quanto misurato sperimentalmente e calcolato tramite la formula (1). Gli altri quattro parametri fisici sono stati ricavati con un processo di minimizzazione numerica dello scarto tra la curva di assorbimento acustico sperimentale e quella calcolata con il modello analitico descritto nel paragrafo 2.2.

Per poter estendere il modello analitico a qualsiasi densità apparente, è necessario interpolare i risultati delle inversioni con formule analitiche funzione della densità apparente. La struttura delle formule utilizzate è proposta in [26], mentre i coefficienti sono stati calcolati tramite minimizzazione dello scarto quadratico medio rispetto ai valori di Tab. 1.

Tab. 1 – Parametri fisici del Sargassum al variare della densità
Physical parameters of Sargassum as density varies

Densità [kg/m ³]	σ [Ns/m ⁴]	ϕ [-]	α_{∞} [-]	Λ [μm]	Λ' [μm]
94.3	336	0.92	1.29	631	949
110.0	660	0.91	1.38	516	991
132.0	1143	0.89	1.46	412	835
146.7	1216	0.88	1.55	386	607
165.0	1270	0.86	1.62	279	897
188.6	2253	0.84	1.73	255	581
220.1	3384	0.82	1.9	203	518
240.1	3686	0.80	2	177	460

Il processo di interpolazione ha portato alle seguenti relazioni:

$$\sigma = \frac{\eta}{(2a)^2} \frac{\sqrt{1-(1-\phi)}}{0.21 \left(\frac{0.71}{1-\phi} - 3 \sqrt{\frac{0.71}{1-\phi} + 3} - \sqrt{\frac{1-\phi}{0.71}} \right)} \text{ [Ns/m}^4\text{]} \quad (8)$$

con $a = 120 \mu\text{m}$,

$$\alpha_{\infty} = \left(\frac{1}{\phi} \right)^{3,178} \text{ [-]} \quad (9)$$

$$\Lambda = 20,92(1-\phi)^{-1,35} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (10)$$

$$\Lambda' = 135,3(1-\phi)^{-0,79} \text{ [}\mu\text{m]} \quad (11)$$

Nelle figure successive sono riportati confronti tra le curve ottenute dalle formule analitiche ed i dati ottenuti dalle inversioni e presentati in Tab. 1.

Come si può notare, per tutti i parametri le interpolazioni risultano ottimali e quindi le equazioni proposte sono idonee a calcolare i parametri fisici al variare della densità apparente del materiale sciolto.

La determinazione dei parametri fisici del materiale permette di comprendere il motivo della prestazione acustica ridotta del materiale, almeno alle densità inferiori: si può notare come la resistività al flusso d'aria del materiale sia molto bassa e cominci ad essere significativa (>3 kNs/m⁴) soltanto sopra i 200 kg/m³. Questa bassa resistività è dovuta alla dimensione molto elevata dei filamenti delle alghe essiccate, che determina una elevata grandezza caratteristica viscosa, dell'ordine delle centinaia di micron contro le decine di micron di materiali fibrosi tradizionali.

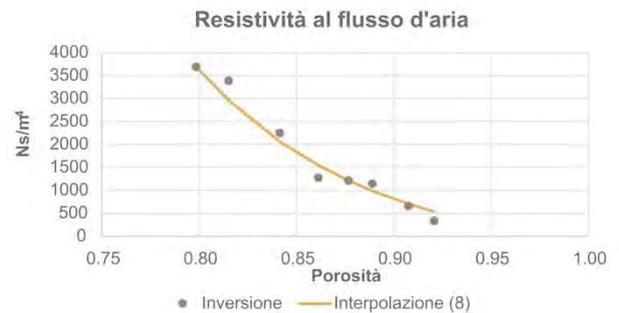


Fig. 14 – Confronto tra la resistività al flusso d'aria ottenuta per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazione (8)
Comparison between the airflow resistivity obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (8)

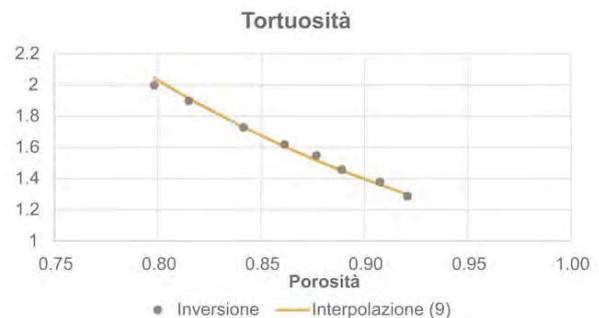


Fig. 15 – Confronto tra la tortuosità ottenuta per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazione (9)
Comparison between the tortuosity obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (9)

Altri due parametri che si discostano molto dai materiali fibrosi tradizionali sono la porosità (piuttosto bassa quando si comprime il materiale) e la tortuosità che tende notevolmente a salire per alti gradi di compattazione. Questo dimostra come la struttura del materiale compresso sia più simile ad un materiale poroso aggregato piuttosto che un materiale fibroso, e la curva di assorbimento altamente fluttuante ne è la dimostrazione.

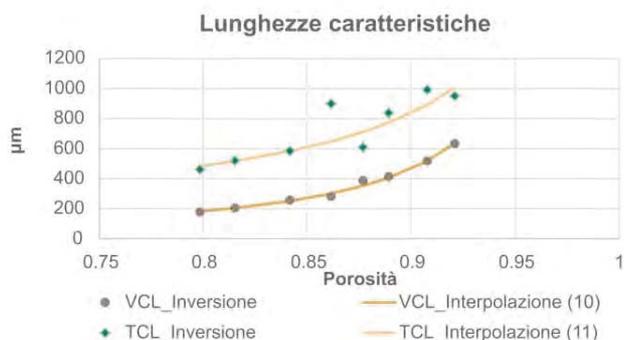


Fig. 16 – Confronto tra le grandezze caratteristiche viscosa (VCL) e termica (TCL) ottenute per inversione dalle misure sperimentali e l'interpolazioni (10) e (11)

Comparison between the viscous (VCL) and thermal (TCL) characteristic length obtained by inversion from the experimental measurements and the interpolation (10) and (11)

3.3 | Confronto tra modello analitico e misure sperimentali e simulazioni a parità di spessore

In Fig. 17 viene riportato un confronto tra le misure sperimentali e quelle ottenute dall'utilizzo del modello analitico proposto, per alcune delle densità apparenti testate.

Si può osservare che il modello è in grado di prevedere con ottima precisione il fonoassorbimento del materiale alle diverse densità apparenti.

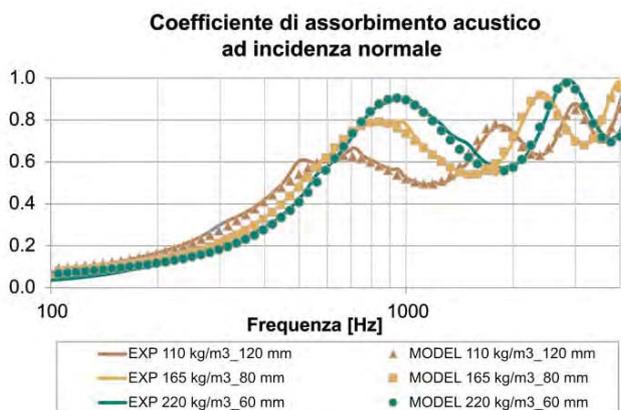


Fig. 17 – Confronto tra l'assorbimento acustico sperimentale e quello calcolato dal modello analitico proposto

Comparison between the experimental sound absorption and that calculated by the proposed analytical model

Per un confronto più immediato si può utilizzare il modello analitico per calcolare le curve di assorbimento a parità di spessore (ad esempio 50 mm) al variare della densità apparente (Fig. 18): è possibile notare che per raggiungere buone prestazioni fonoassorbenti con questo spessore il materiale necessita di elevata densità apparente, maggiore di 200 kg/m³.

Nella Fig. 18 le prestazioni del Sargassum sono confrontate con un materiale tradizionale come le fibre di roccia (densità 50 kg/m³). È evidente che il comportamento acustico del Sargassum presenta un assorbimento più selettivo caratterizzato da un picco di assorbimento vicino all'unità ma che poi tende a scendere prima e dopo del picco e fluttuare alle alte frequenze, mentre per un materiale fibroso tradizionale l'assorbimento acustico copre una banda in frequenza più ampia e l'oscillazione ad alta frequenza è limitata e intorno a valori unitari.

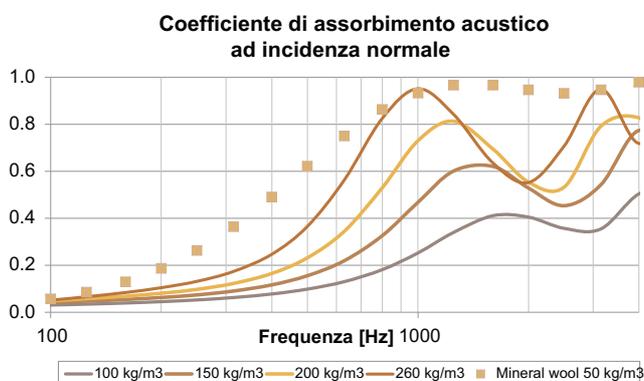


Fig. 18 – Coefficiente di assorbimento acustico al variare della densità a parità di spessore e confronto con materiale tradizionale (lana di roccia con densità 50 kg/m³)

Sound absorption coefficient as density varies with the same thickness and comparison with traditional material (mineral wool with density 50 kg/m³)

4 | Risultati sperimentali sui pannelli

La realizzazione di pannelli prototipali basati sul Sargassum, descritta nel paragrafo 2.3, può impattare sul comportamento acustico del pannello stesso, principalmente per la presenza di legante che può alterare la geometria della struttura e quindi le proprietà fisiche che determinano il fonoassorbimento; sono pertanto stati testati tre campioni cilindrici con spessore pari a 60 mm e quantitativo variabile di resina, in modo da determinare l'effetto della presenza del legante e di verificare la rigidità del materiale risultante.

In Fig. 19 sono riportate le curve di assorbimento acustico sperimentali per i tre campioni: risulta evidente che l'uso della resina determina un progressivo incremento del fonoassorbimento, dovuto principalmente ad un aumento della resistività al flusso d'aria del campione.

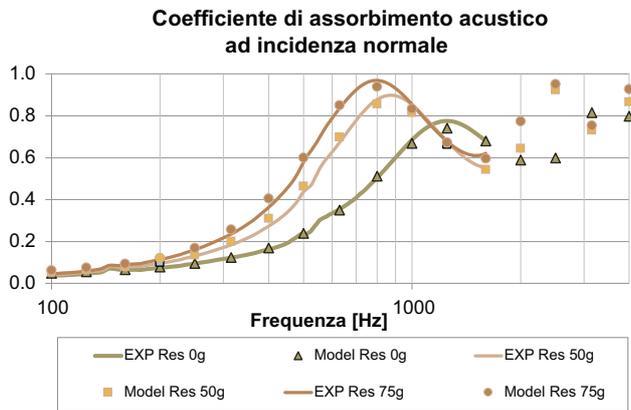


Fig. 19 – Variazione del fonoassorbimento ad incidenza normale in funzione della quantità di resina applicata
Variation of normal incidence sound absorption as a function of the quantity of resin applied

In Tab. 2 sono infatti riportati i valori dei parametri fisici ricavati per inversione [28] dalle misure acustiche. Nella stessa Fig. 19 sono riportate anche le curve di assorbimento ottenute dal modello di JCA con i parametri di Tab. 2, come validazione del processo di inversione.

Tab. 2 – Parametri fisici dei campioni di pannello di Sargassum al variare della quantità di resina
Physical parameters of Sargassum panel samples as the amount of resin varies

Densità [kg/m ³]	σ [N s/m ²]	φ [-]	α_{∞} [-]	Λ [μ m]	Λ' [μ m]
155	1085	0.89	1.36	236	735
240	3299	0.85	1.93	232	985
300	3991	0.82	1.9	170	868

Per valutare le potenzialità tecnico-commerciali di pannelli modulari realizzati con Sargassum, si è calcolato il possibile coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale ed il relativo α_{w} determinabile secondo la norma ISO 11654 [30].

Per effettuare questo calcolo si utilizza la formula di London [31], che consente di calcolare per una lastra infinita il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale a partire dall'impedenza superficiale calcolata per incidenza normale, e si applica una correzione per dimensione finita del pannello proposta da Rhazi [32] e calcolata in questo caso per una dimensione pari a 1.79 x 1.25 m (immaginando una applicazione a muro di 34 moduli come da Fig. 11 e trascurando il fatto che il perimetro dei pannelli non è rettangolare ma ha una geometria più complessa).

In Fig. 20 vengono riportate le curve di assorbimento ad incidenza diffusa per tre diversi spessori dei pannelli (40 mm, 60 mm e 80 mm) ed una superficie pari a 2.24 m², ipotizzando l'impiego del quantitativo di resina massimo testato (75 g su 66 g di Sargassum essiccato). Si noti che valori del coefficiente di assorbimento acustico in campo diffuso maggiori di uno sono determinati dall'effetto della dimensione finita (ridotta) del pannello.

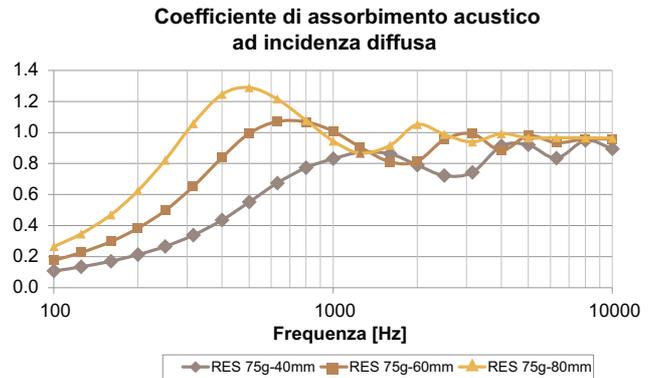


Fig. 20 – Variazione del fonoassorbimento ad incidenza diffusa in funzione della quantità di resina applicata
Variation of diffuse incidence sound absorption as a function of the quantity of resin applied

In Fig. 21 viene riportato un esempio di calcolo di α_{w} , per il pannello con maggior quantitativo di resina, uno spessore di 80 mm ed una superficie pari a 12 m² (come da procedura di misura secondo ISO 354 [33]).

Il risultato in termine di α_{w} è piuttosto elevato, pari a 0.90, e corrisponde ad un materiale di classe A. Il pannello a base di Sargassum pertanto presenta ottime potenzialità fonoassorbenti, raggiunte grazie alla presenza della resina che incrementa la prestazione acustica del materiale di base aumentandone la resistività al flusso d'aria.

Occorre sottolineare che il processo di realizzazione studiato in questa ricerca non è di tipo industriale ma volto semplicemente ad esplorare le potenzialità dell'applicazione. Nel caso di una futura produzione del pannello occorrerà studiare un procedimento industriale ed il suo effetto sulle prestazioni acustiche finali.

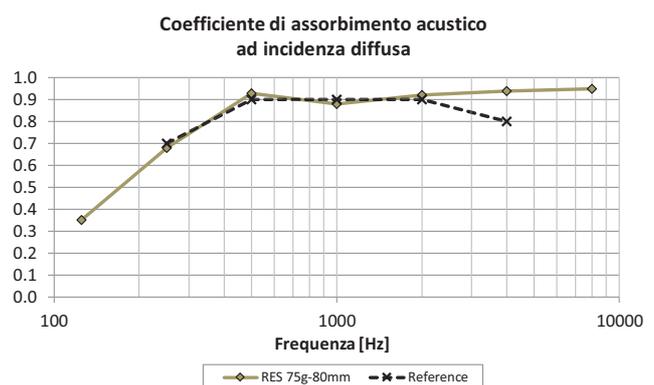


Fig. 21 – Determinazione del valore di $\alpha_{w}=0.9$
Determination of the $\alpha_{w}=0.9$

5 | Conclusioni

Alla base di questa ricerca vi è un'idea di progettazione che parte dall'ambiente e dai problemi ad esso correlati, seguendo una progettazione circolare, che implichi condivisione, prestito,

riutilizzo e riciclo dei materiali il più a lungo possibile, soprattutto se si tratta di materiali di origine naturale. Le fibre naturali hanno acquisito un'importanza significativa nel mondo di oggi per diversi motivi. Innanzitutto il loro aspetto legato alla sostenibilità non può essere sottovalutato. Con la crescente attenzione sulle questioni ambientali, le fibre naturali forniscono un'alternativa sostenibile alle fibre sintetiche, grazie a un'impronta di carbonio inferiore rispetto alle loro controparti sintetiche, che sono tipicamente derivate da fonti non rinnovabili come i combustibili fossili. La biodegradabilità delle fibre naturali è un altro fattore cruciale, a differenza delle fibre sintetiche che possono persistere nell'ambiente per centinaia di anni.

Lo studio è partito da uno specifico problema ambientale, localizzato sulle coste atlantiche dei Caraibi e dell'Africa equatoriale, ed è orientato a proporre un possibile riutilizzo delle alghe di Sargassum che attualmente costituiscono un rifiuto difficilmente gestibile nei paesi interessati.

Questo materiale, una volta raccolto ed essiccato al sole, potrebbe costituire la materia prima per realizzare pannelli fonoassorbenti da applicare a parete.

Nella prima parte della ricerca, dedicata alla caratterizzazione e modellazione acustica del materiale sciolto, si sono evidenziate le proprietà ed i limiti di tale materiale, riassumibili sostanzialmente in una necessità di raggiungere elevate densità apparenti per poter ottenere risultati acustici interessanti.

Una volta sviluppato un modello analitico che consenta di dimensionare pannelli di qualsiasi spessore e densità, si è passati ad una seconda fase, nella quale si sono pensate soluzioni di design che potessero valorizzare i pannelli, proponendo un sistema modulare con una geometria che ricorda il materiale di base.

Per realizzare questi pannelli, si è investigato sull'utilizzo di un legante naturale, a base di resina di pino, che, disciolto in acqua, consente di compattare le alghe essiccate e mantenerne la geometria. Sono stati fatti alcuni test per valutare il quantitativo di resina necessario ed il relativo effetto sulle prestazioni acustiche, da cui si è notato che la resina incrementa significativamente la resistività al flusso d'aria del campione e le proprietà fonoassorbenti del pannello.

Sulla base dei prototipi realizzati si è visto che un pannello con spessore 80 mm può raggiungere un $\alpha_w=0.90$ e quindi essere classificato come materiale di classe A secondo la norma [30].

Si può quindi concludere che questo progetto ha confermato la possibilità di realizzare pannelli fonoassorbenti basati su questo materiale, e che le prestazioni acustiche finali dipendono dal processo di realizzazione del pannello: sarà quindi fondamentale, in una eventuale industrializzazione del prodotto, valutare l'effetto acustico del processo di realizzazione dei pannelli, compresa la tipologia di legante utilizzato, seguendo la metodologia illustrata in questo articolo.

Sarà inoltre necessario approfondire aspetti fondamentali quali la resistenza al fuoco, all'umidità, all'invecchiamento di questi pannelli poiché tali aspetti non sono stati affrontati nell'ambito della tesi di laurea in Design Industriale che ha sviluppato il progetto illustrato in questo articolo.

Conclusions

At the basis of this research there is a design idea that starts from the environment and related problems to it, following a circular design, which implies sharing, borrowing, reusing and recycling materials for as long as possible, especially if these are materials of natural origin. Natural fibers have gained significant importance in today's world for several reasons. First of all, their sustainability aspect cannot be underestimated. With growing attention on environmental issues, natural fibers provide a sustainable alternative to synthetic fibres, thanks to a lower carbon footprint than their synthetic counterparts, which are typically derived from non-renewable sources such as fossil fuels. The biodegradability of natural fibers is another crucial factor, unlike synthetic fibers which can persist in the environment for hundreds of years.

This study started from a specific environmental problem, located on the Atlantic coasts of the Caribbean and equatorial Africa, and is aimed at proposing a possible reuse of Sargassum algae which currently constitute waste that is difficult to manage in the countries concerned.

This material, once collected and dried in the sun, could constitute the raw material for making sound-absorbing panels to be applied to walls.

In the first part of the research, dedicated to the characterization and acoustic modeling of the loose material, the properties and limitations of this material were highlighted, which can essentially be summarized in a need to achieve high apparent densities in order to obtain interesting acoustic results.

Once an analytical model was developed that allows panels of any thickness and density to be sized, we moved on to a second phase, in which design solutions were thought of that could enhance the panels, creating a modular system with a geometry that recalls the nature of the material.

To create these panels, the use of a natural binder, based on pine resin, was investigated: this resin, dissolved in water, allows the dried algae to be compacted and its geometry maintained. Some tests were carried out to evaluate the quantity of resin necessary and the relative effect on the acoustic performance, from which it was noted that the resin significantly increases the airflow resistivity of the sample and the sound-absorbing properties of the panel.

On the basis of the prototypes created, it was seen that a panel with a thickness of 80 mm can reach an $\alpha_w=0.90$ and therefore be classified as a class A material according to the standard [29].

It can therefore be concluded that this project has confirmed the possibility of creating sound-absorbing panels based on Sargassum algae, and that the final acoustic performances depend on the panel manufacturing process: it will therefore be fundamental, in a possible industrialization of the product, to evaluate the acoustic effect of the panel manufacturing process, including the type of binder used, following the methodology illustrated in this article.

It will also be necessary to delve into fundamental aspects such as the resistance to fire, humidity and aging of these panels since these aspects were not addressed in the degree thesis in Industrial Design which developed the project illustrated in this article.

Bibliografia

- [1] T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petru, M.T. Noman, R. Mishra, J. Militký, Sound Absorption Properties of Natural Fibers: A Review, *Sustainability* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12208477>
- [2] S. Bousshine, M. Ouakarrouh, A. Bybi, N. Laaroussi, M. Garoum, A. Tilioua, Acoustical and thermal characterization of sustainable materials derived from vegetable, agricultural, and animal fibers, *Appl. Acoust.* 187 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108520>
- [3] X. Tang, X. Liu, X. Yan, Investigation on the Sound Absorption Properties of Waste Green Tea Residues Covered by Woven Fabric, *J. Nat. Fibers* 19 (2020) 1323–1332. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764455>
- [4] A. Putra, K.H. Or, M.Z. Selamat, M.J.M. Nor, M.H. Hassan, I. Prasetyo, Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres, *Appl. Acoust.* 136 (2018) 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.029>
- [5] 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). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>
- [6] H. Bhingare Nirmala, S. Prakash, An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics, *MaterialsToday:Proceedings* 43 (2021) 1545–1551. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- [7] G. Iannace, G. Ciaburro, A. Trematerra, Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks, *Appl. Acoust.* 163 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107239>
- [8] P. Soltani, E. Taban, M. Faridan, S.E. Samaei, S. Amininasab, Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber, *Appl. Acoust.* 157 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.106999>
- [9] F. Pompoli, Acoustical Characterization and Modeling of Sustainable Posidonia Fibers, *Appl.Sci.* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13074562>
- [10] T. Astrauskas, V. Monin, T. Januševičius, Sound absorption of dried brown, red, green algae, *Proceedings of Forum Acusticum 2023, Torino 11-15 Settembre 2023*.
- [11] D. Robledo, E. Vázquez-Delfín, Y. Freile-Pelegrín, R.M. Vázquez-Elizondo, Z.N. Qui-Minet, A. Salazar-Garibay, Challenges and Opportunities in Relation to Sargassum Events Along the Caribbean Sea, *Front. Mar. Sci.* (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.699664>
- [12] W. Cristoforo Colombo Melcer, *Il libro delle profezie, Novecento* (1995), ISBN-13: 9788837301514
- [13] A. Desrochers, S.-A. Cox, H.A. Oxenford, B. van Tussenbroek, Pelagic sargassum – A guide to current and potential uses in the Caribbean, *FAO* (2022), ISBN: 978-92-5-137320-0. <https://doi.org/10.4060/cc3147en>
- [14] J.T. Arita, L.A.R. Iporac, N.K. Bally, M.T. Fujii, L. Collado-Vides, Integrative Literature Analysis of Holopelagic Sargassum (Sargasso) in the Western Atlantic (2011–2022): Status, Trends, and Gaps. *Phycology* 2023, 3, 447–458. <https://doi.org/10.3390/phycolgy3040030>
- [15] J.L. López Miranda, L.B. Celis, M. Estévez, V. Chávez, B.I. van Tussenbroek, A. Uribe-Martínez, E. Cuevas, I. Rosillo Pantoja, L. Masia, C. Cauich-Kantun, R. Silva, Commercial Potential of Pelagic Sargassum spp. in Mexico, *Front. Mar. Sci.* (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.768470>
- [16] H. Affan, K. Touati, M.-H. Benzaama, D. Chateigner, Y. El Mendili, Earth-Based Building Incorporating Sargassum muticum Seaweed: Mechanical and Hygrothermal Performances, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13040932>
- [17] SOS Carbon, Copyright © 2022 SOS Carbon – All Rights Reserved. <https://soscarbon.com/>
- [18] Søuld, Copyright © Søuld – All Rights Reserved. www.sould.dk/contact
- [19] EOACOUSTIC, Copyright © 2018 EOACOUSTIC – All Rights Reserved. www.eoacoustic.com/
- [20] FREUND – material fur ideen, Copyright © FREUND – All Rights Reserved. <https://freundgmbh.com/en/>
- [21] BAUX AB, Copyright © 2024 BAUX AB – All Rights Reserved. www.baux.com/
- [22] GENCORK, Copyright © 2022 GENCORK/SOFALCA – All Rights Reserved. www.gencork.com/2020/
- [23] ISO 10534-2:2023, Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes. Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. www.iso.org/standard/81294.html
- [24] Y. Champoux, M.R. Stinson, G.A. Daigle, Air-based system for the measurement of porosity, *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (1991). <https://doi.org/10.1121/1.1894653>
- [25] F. Pompoli, P. Bonfiglio, *Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta, ATTI 34° Convegno AIA, Firenze 13-15 Giugno 2007*.
- [26] F. Pompoli, Acoustical Characterization and Modeling of Sustainable Posidonia Fibers, *Appl. Sci.* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13074562>
- [27] D.L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid-Saturated Porous Media, *J. Fluid. Mech.* 176 (1987), 379–402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>
- [28] Y. Champoux, J.F. Allard, Dynamic Tortuosity and Bulk Modulus in Air-Saturated Porous Media, *J. Appl. Phys.* 70 (1991), 1975–1979. <https://doi.org/10.1063/1.349482>
- [29] P. Bonfiglio, F. Pompoli, Inversion problems for determining physical parameters of porous materials: Overview and comparison between different methods, *Acta Acust. United Acust.* 99 (2013), 341–351. <https://doi.org/10.3813/AAA.918616>
- [30] ISO 11654:1997, Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption www.iso.org/standard/19583.html
- [31] A. London, "The determination of reverberant sound absorption coefficient from acoustic impedance measurements", *Journal of Acoustical Society of America*, 22(2), 263–269 (1950). <https://doi.org/10.1121/1.1906600>
- [32] D. Rhazi, N. Atalla, Transfer matrix modeling of the vibroacoustic response of multi-materials structures under mechanical excitation, *J.Sound Vib.*, 329 (2010), 2532–2546. <https://doi.org/10.1121/1.3280237>
- [33] ISO 354:2003, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room www.iso.org/standard/34545.html

