

## **ReCarDABLES**

Recycled Carboard for Design  
of Acoustic sustainABLE Solutions

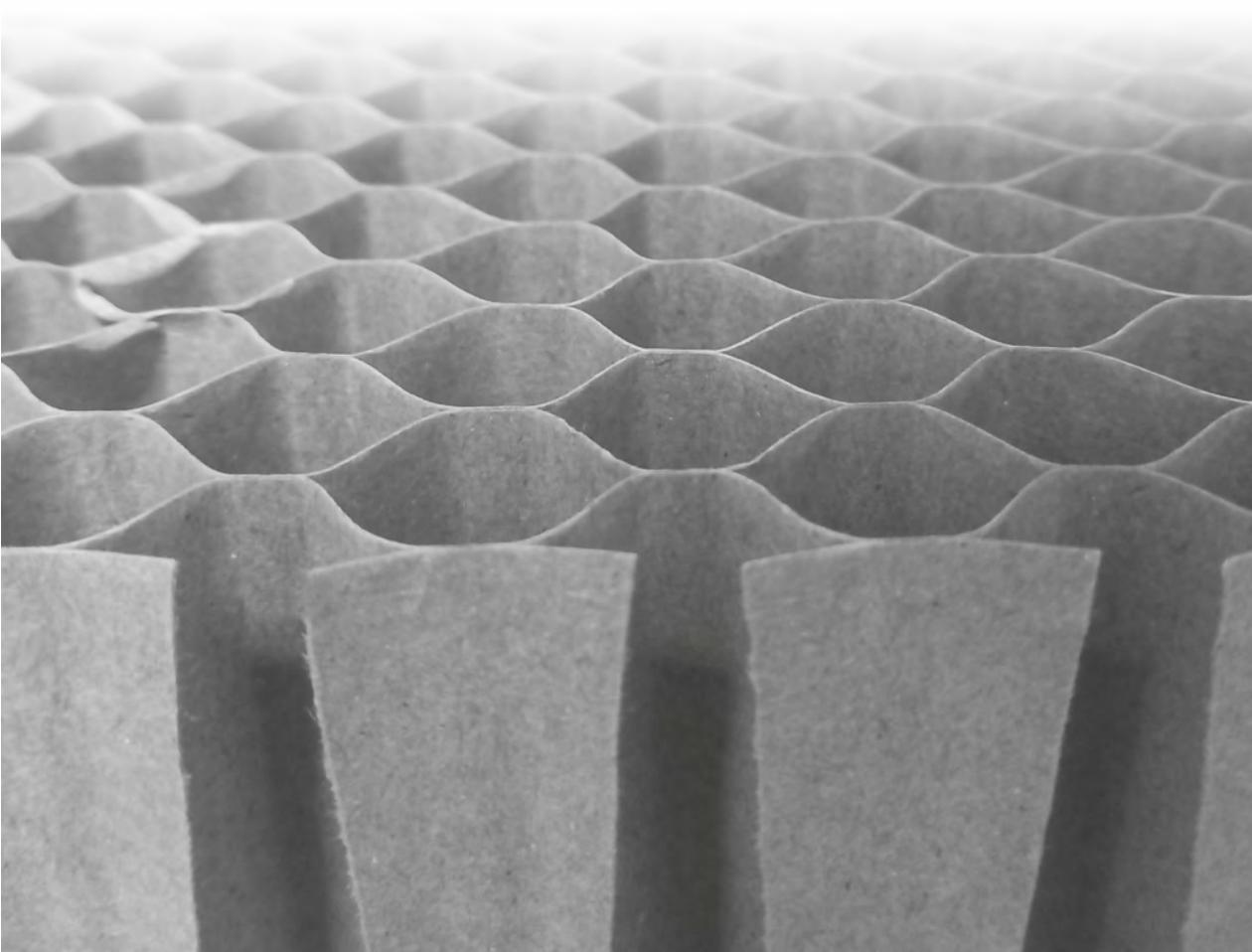
*a cura di*

SIMONE SECCHI  
VERONICA AMODEO

*con contributi di:*

VERONICA AMODEO  
LORENZO BONO  
FABIO BROCCHI  
FEDERICA BRUMEN  
GIUSEPPE LOTTI  
MARCO MARSEGLIA  
SIMONE SECCHI  
MARTA SOMIGLI

*Design di soluzioni innovative  
in carta e cartone  
per il miglioramento acustico di ambienti*



La serie di pubblicazioni scientifiche della **Collana Bianca** ha l'obiettivo di diffondere i risultati delle ricerche e dei progetti realizzati dal Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università degli Studi di Firenze in ambito nazionale e internazionale.

Ogni volume è soggetto a una procedura di accettazione e valutazione qualitativa basata sul giudizio tra pari gestita dal Comitato Scientifico della Collana Ricerche. Architettura, Pianificazione, Paesaggio, Design del Dipartimento di Architettura con Firenze University Press. Tutte le pubblicazioni sono inoltre *open access* sul Web ([didapress.it](http://didapress.it)), per favorire non solo la diffusione ma anche una valutazione aperta a tutta la comunità scientifica internazionale.

Il Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze promuove e sostiene questa collana per offrire un contributo alla ricerca internazionale sul progetto, sia sul piano teorico-critico che operativo.

*The Collana Bianca series of scientific publications has the purpose of disseminating the results of national and international research and project carried out by the Department of Architecture of the University of Florence (DIDA).*

*The volumes are subject to a qualitative process of acceptance and evaluation based on peer review, which is entrusted to the Scientific Publications Committee of the Department of Architecture with Florence University Press. Furthermore, all publications are available on an open-access basis on the Internet ([didapress.it](http://didapress.it)), which not only favors their diffusion, but also fosters an effective evaluation from the entire international scientific community.*

*The Department of Architecture of the University of Florence promotes and supports this series in order to offer a useful contribution to international research on architectural design, both at the theoretico-critical and operative levels.*



### **Editor-in-Chief**

**Saverio Mecca** | University of Florence, Italy

### **Scientific Board**

**Gianpiero Alfarano** | University of Florence, Italy; **Mario Bevilacqua** | University of Florence, Italy; **Daniela Bosia** | Politecnico di Torino, Italy; **Susanna Caccia Gherardini** | University of Florence, Italy; **Maria De Santis** | University of Florence, Italy; **Letizia Dipasquale** | University of Florence, Italy; **Giulio Giovannoni** | University of Florence, Italy; **Lamia Hadda** | University of Florence, Italy; **Anna Lambertini** | University of Florence, Italy; **Tomaso Monestiroli** | Politecnico di Milano, Italy; **Francesca Mugnai** | University of Florence, Italy; **Paola Puma** | University of Florence, Italy; **Ombretta Romice** | University of Strathclyde, United Kingdom; **Luisa Rovero** | University of Florence, Italy; **Marco Tanganelli** | University of Florence, Italy

### **International Scientific Board**

**Francesco Saverio Fera** | University of Bologna, Italy; **Pablo Rodríguez Navarro** | Universitat Politècnica de València, Spain; **Nicola Braghieri** | EPFL - Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland; **Lucina Caravaggi** | University of Rome La Sapienza, Italy; **Federico Cinquepalmi** | ISPRA, The Italian Institute for Environmental Protection and Research, Italy; **Margaret Crawford**, University of California Berkeley, United States; **Maria Grazia D'Amelio** | University of Rome Tor Vergata, Italy; **Carlo Francini** | Comune di Firenze, Italy; **Sebastian Garcia Garrido** | University of Malaga, Spain; **Xiaoning Hua** | NanJing University, China; **Medina Lasansky** | Cornell University, United States; **Jesus Leache** | University of Zaragoza, Spain; **Heater Hyde Minor** | University of Notre Dame, France; **Danilo Palazzo** | University of Cincinnati, United States; **Silvia Ross** | University College Cork, Ireland; **Monica Rossi** | Leipzig University of Applied Sciences, Germany; **Jolanta Sroczynska** | Cracow University of Technology, Poland

*a cura di*  
SIMONE SECCHI  
VERONICA AMODEO

*con contributi di:*  
VERONICA AMODEO  
LORENZO BONO  
FABIO BROCCHI  
FEDERICA BRUMEN  
GIUSEPPE LOTTI  
MARCO MARSEGLIA  
SIMONE SECCHI  
MARTA SOMIGLI

## **ReCarDABLES**

**Recycled Cardboard for Design  
of Acoustic sustainABLE Solutions**

*Design di soluzioni innovative  
in carta e cartone  
per il miglioramento acustico di ambienti*





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIDA**  
DIPARTIMENTO DI  
ARCHITETTURA



**comieco**  
Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo  
degli Imballaggi a base Cellulosica

Il volume è l'esito di un progetto di ricerca promosso dal Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica (Comieco) e condotto dal Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze.

La pubblicazione è stata oggetto di una procedura di accettazione e valutazione qualitativa basata sul giudizio tra pari affidata dal Comitato Scientifico del Dipartimento DIDA con il sistema di *blind review*. Tutte le pubblicazioni del Dipartimento di Architettura DIDA sono *open access* sul web, favorendo una valutazione effettiva aperta a tutta la comunità scientifica internazionale.

Con la partecipazione di:

**LUCENSE**

**Caimi**



*in copertina*

Cartone alveolare, foto di Marta Somigli.

*progetto grafico*

**didacommunicationlab**

Dipartimento di Architettura  
Università degli Studi di Firenze



**didapress**

Dipartimento di Architettura  
Università degli Studi di Firenze  
via della Mattonaia, 8 Firenze 50121

© 2024

ISBN 978-88-3338-220-3

Stampato su carta di pura cellulosa Fedrigoni Arcoset

ELEMENTAL  
CHLORINE  
**FREE**  
GUARANTEED



---

## SOMMARIO

---

I Parte: I presupposti e i fondamenti dello studio	
<b>Introduzione sugli scopi della ricerca</b>	<b>11</b>
Simone Secchi	
<b>Il ruolo del Consorzio nazionale recupero e riciclo di imballaggi a base cellulosica</b>	<b>15</b>
<b>La qualità acustica degli ambienti interni</b>	<b>17</b>
L'importanza del controllo della riverberazione	
Le norme relative al controllo della riverberazione	
Tempo di riverberazione ottimale ed altri descrittori	
Il comportamento acustico dei materiali	
<b>Il cartone e il suo comportamento acustico</b>	<b>21</b>
Il cartone ondulato	
Il cartone a nido d'ape	
La fibra di cellulosa	
I tubi di cartone	
Il comportamento acustico del cartone	
<b>Bibliografia di riferimento</b>	<b>29</b>
II Parte: Risultati del workshop	
<b>Struttura e finalità del workshop</b>	<b>33</b>
<b>ReCarDABLES. Presentazione dei progetti</b>	<b>37</b>
<b>Bibliografia di riferimento</b>	<b>60</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>61</b>



# **I PARTE**

## **I presupposti e i fondamenti dello studio**





Imballaggi  
in cartone  
ondulato  
riciclato dopo  
l'utilizzo

Il volume raccoglie i risultati preliminari di una ricerca svolta in collaborazione tra Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze e Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica (Comieco) volta alla messa a punto e alla sperimentazione di nuove soluzioni di prodotti a base di cellulosa per la correzione acustica di ambienti interni.

L'interesse per la ricerca nasce sia dalla sempre maggiore sensibilità che si sta affermando anche nel nostro paese sul problema della qualità acustica degli ambienti interni adibiti ad ascolto di parlato o musica, sia dalla necessità di sostituire i materiali sintetici o non riciclabili fino ad oggi impiegati in questo ambito con materiali sostenibili e più facilmente riciclabili. Molti sono i settori in cui elementi in carta e cartone, opportunamente progettati nella loro forma e stratigrafia, potrebbero sostituire o quanto meno affiancare prodotti comunemente usati per la correzione acustica degli ambienti. Si pensi ai locali per l'intrattenimento e la ristorazione, ma anche agli allestimenti fieristici ed alle aule didattiche.

Ad oggi, il mercato dei prodotti fonoassorbenti è occupato in gran parte da fibre minerali, fibre o schiume sintetiche o sistemi costituiti da materiali accoppiati e difficilmente separabili in fase di dismissione dei prodotti. La carta ed il cartone sono certamente materiali che garantiscono un impatto ambientale tra i più bassi al confronto con altri materiali usati nell'architettura, nell'allestimento e nell'arredo. Tuttavia, diversi studi hanno dimostrato come questi materiali abbiano comunemente prestazioni acustiche modeste, garantendo un buon assorbimento acustico solo alle frequenze medie ed alte del suono.

Attraverso una progettazione accurata dei prodotti in cartone, sfruttando i meccanismi della risonanza acustica e dell'interazione tra strati differenti di materiali celluloseici (cartone teso, fiocchi di cellulosa, cartone alveolare, tubi di vario diametro e spessore) è possibile, tuttavia, ottenere prestazioni fonoassorbenti comparabili con quelle di prodotti realizzati ad esempio in materiali a matrice sintetica.

La ricerca ha studiato sistemi innovativi per il miglioramento acustico di ambienti interni coinvolgendo un gruppo selezionato di studenti dei corsi di laurea in Architettura e Disegno

industriale dell'Università di Firenze nello sviluppo di alcuni concept progettuali preliminari.

Al workshop, che si è articolato lungo un'intera settimana di incontri e attività di laboratorio, hanno preso parte, oltre a docenti del Dipartimento di Architettura e a Comieco, anche Lucense, Organismo di Ricerca specializzato nel trasferimento tecnologico alla filiera cartaria, che nel corso degli anni ha sviluppato idee innovative sull'uso di carta e cartone nei vari ambiti dell'arredamento e degli oggetti di uso, l'azienda Caimi, specializzata in sistemi fonoassorbenti innovativi e di design particolarmente curato, e l'azienda Nardi mobili in cartone, con esperienza nella progettazione e realizzazione di arredi in materiale celluloso.

Le attività del workshop sono state possibili anche grazie alla collaborazione di alcune aziende produttrici di elementi in carta e cartone che hanno fornito campioni delle diverse tipologie di materiali.

Nel volume, dopo una sintetica descrizione dei principali meccanismi della fonoassorbenza e delle diverse tipologie di prodotti in carta e cartone esistenti sul mercato, vengono presentati i risultati del workshop, che consistono in undici progetti preliminari di sistemi che, usando solo materiali a base cellulosa, sviluppano prestazioni fonoassorbenti interessanti per il miglioramento acustico di ambienti interni.

Nello sviluppo successivo della ricerca le migliori idee progettuali saranno oggetto di realizzazione di prototipi e successiva prova acustica sperimentale.

---

## IL RUOLO DEL CONSORZIO NAZIONALE RECUPERO E RICICLO DEGLI IMBALLAGGI A BASE CELLULOSICA

---

**Lorenzo Bono, Federica Brumen**

Comieco - Area Ricerca e Sviluppo  
bono@comieco.org  
brumen@comieco.org

Comieco, Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica, orientando le proprie attività di ricerca e sviluppo verso azioni che portano alla prevenzione dei rifiuti nella progettazione, produzione, distribuzione e consumo degli imballaggi, in modo coerente con le priorità dettate dalla strategia europea, da sempre supporta il lavoro delle imprese della filiera cartaria italiana per accelerare processi di innovazione e la diffusione di soluzioni innovative nell'ambito degli imballaggi.

La storia di Comieco e il riconoscimento di un ruolo sempre più importante assunto nel corso degli anni a livello nazionale dimostrano come il macero per l'industria cartaria italiana sia una risorsa strategica e uno degli elementi cardine di una filiera che ha raggiunto ottimi risultati in termini di circolarità delle risorse.

Il mercato spinge verso l'utilizzo di carta e cartone anche in settori notoriamente dominati, fino a poco tempo fa, dall'utilizzo di altri materiali. Questo implica la richiesta di progettazione di imballaggi a base cellulosica complessi, che devono essere capaci di rispondere alla domanda di performance tecniche sempre più sofisticate da parte delle aziende.

Attualmente, accanto alla garanzia del ritiro e della riciclabilità, sta diventando sempre più centrale il tema dell'eco-progettazione, ovvero la capacità di progettare imballaggi che non solo permettano di ridurre il materiale di impiego e la relativa generazione di rifiuti, ma che siano anche facilmente recuperabili e riciclabili.

L'ecodesign risponde anche alle esigenze di progettazione di manufatti diversi dagli imballaggi, ma che utilizzano materie prime seconde. Ne sono esempio i progetti realizzati all'interno dell'accordo stipulato con l'Università di Firenze "Per l'ideazione e la messa a punto di sistemi realizzati con scarti della raccolta differenziata di carta e cartone aventi finalità di assorbimento sonoro".

Il Consorzio, nel costante impegno per promuovere la sostenibilità ambientale e l'innovazione nel settore della carta e del cartone, continua anche il proprio percorso nel favorire studi e ricerche che possano investigare e incoraggiare lo sviluppo di nuove soluzioni in cui poter impiegare le fibre di cellulosa recuperate.

Il cartone è un materiale versatile noto principalmente per la sua applicazione nel settore del packaging. Tuttavia, presenta notevoli proprietà fonoassorbenti, peraltro già indagate circa una decina di anni fa sempre con la collaborazione tecnica dell'Università di Firenze, in uno studio sulla progettazione e valutazione delle prestazioni acustiche di soluzioni realizzate a partire da prodotti a base di fibra di cellulosa, già presenti sul mercato. In particolare, lo studio aveva indagato la possibilità di modificare e di assemblare tra loro questi prodotti allo scopo di realizzare sistemi innovativi dalle proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti per migliorare la qualità acustica di ambienti interni.

Il contesto attuale evidenzia una sempre maggiore consapevolezza riguardo ai problemi legati all'inquinamento acustico, sia in ambito urbano che industriale. La necessità di trovare soluzioni efficaci, e al tempo stesso sostenibili, per limitare questo impatto ambientale, ha spinto Comieco a esplorare nuove frontiere di design di prodotto che mettano al centro un materiale rinnovabile e riciclabile come carta e cartone.

Attraverso questa iniziativa, il Consorzio supporta la ricerca di soluzioni fonoassorbenti innovative e circolari, posizionando l'industria della carta e del cartone all'avanguardia anche nella lotta contro l'inquinamento acustico.

## L'importanza del controllo della riverberazione

Negli ambienti destinati all'ascolto e, più in generale, in tutti i locali in cui la comunicazione verbale è essenziale per il corretto funzionamento, risulta necessario garantire livelli idonei di rumore di fondo e riverberazione.

Vi sono diversi descrittori acustici utili a definire le caratteristiche acustiche interne dei locali: tuttavia, la durata della riverberazione riveste un'importanza peculiare. Una maggiore durata della coda sonora innesca di fatti un effetto di mascheramento del segnale (ad esempio, nel parlato, sovrapponendo le sillabe consecutive, diminuendo l'intelligibilità).

In generale, la riverberazione è un fenomeno naturale, coerente alla percezione stessa dell'acustica degli ambienti chiusi (si pensi, in primo luogo, a spazi quali grandi cattedrali, dove la stessa percezione spaziale è dominata dalle caratteristiche acustiche dell'ambiente). Tuttavia, ove si vogliano valutare le prestazioni di qualità acustica di spazi interni, risulta necessario un controllo del tempo di riverberazione, facendo in modo che l'ambiente rientri nei parametri raccomandati dalle norme e dalla buona tecnica e che, in sostanza, suoni nella maniera desiderata (e, ove risulti necessario per il corretto funzionamento, non alteri la percezione del segnale sonoro emesso dalla sorgente, fino al ricettore).

Cosa si intende, all'atto pratico, per tempo di riverberazione? In breve: tale quantità descrive la velocità affinché la densità di energia sonora all'interno di un ambiente si riduca ad un milionesimo rispetto a quella che l'ambiente presentava allo spegnimento della sorgente.

Il parametro viene proposto per la prima volta dall'acustico Wallace Clement Sabine, il 29 ottobre 1898, che propose anche una formula semplificata per il calcolo, tuttora utilizzata, che porta il suo nome, ed è considerata una tra le formule fondanti dell'acustica degli ambienti interni. Tale relazione vale:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{\alpha S}$$

*pagina a fronte*  
**Fig. 1** - Valori ottimali del Tempo di Riverbero in funzione del volume, per differenti destinazioni d'uso.

Dove  $V$  è il volume dell'ambiente in  $m^3$ ,  $S$  rappresenta l'area totale delle superfici dell'ambiente in  $m^2$  e  $\alpha$  rappresenta il coefficiente di assorbimento apparente medio delle stesse superfici.

Relativamente all'assorbimento acustico, questo risulta essere un coefficiente, compreso tra 0 ed 1, che rappresenta la quantità di energia non riflessa dallo specifico materiale o superficie. Ci concentreremo nel seguito, specificatamente, su tale indice, valutandolo in relazione ai materiali derivati da carta e cartone.

### **Tempo di riverberazione ottimale ed altri descrittori**

Come abbiamo già esposto, l'acustica di una sala è preliminarmente descrivibile mediante il descrittore Tempo di Riverberazione. Sarà necessario, al fine di garantire condizioni ottimali dell'ambiente, riferirsi a valori adeguati al tipo di locale oggetto di analisi. Nello specifico: ambienti destinati all'ascolto di musica avranno caratteristiche differenti da ambienti destinati all'ascolto della parola (quali aule scolastiche). In definitiva, numerosi autori hanno proposto, sulla base di esperienze sperimentali, valori di tempo di riverberazione ottimali in funzione del volume e della tipologia degli ambienti, oltre ad indicare apposite curve di correzione in frequenza.

Soffermandoci sulla questione, occorre ricordare come non sia sufficiente pertanto ottenere, meramente, bassissimi valori di tempo di riverbero affinché un locale risulti avere una buona acustica: di fatti, in questo caso, otterremmo suoni fin troppo "secchi", che possono portare ad una percezione del locale fin troppo sorda ed asettica, mancando lo stesso della spazialità sonora che ci aspettiamo.

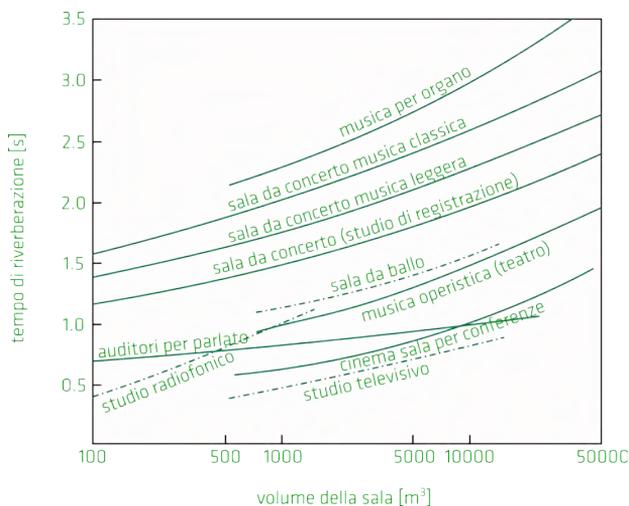
Si riporta, a titolo esemplificativo, un grafico contenente i valori ottimali di tempi di riverbero in funzione del volume per differenti tipologie di ambienti destinati all'ascolto del parlato o di differenti tipologie di musica.

Il tempo di riverberazione non è tuttavia l'unico descrittore atto a caratterizzare la qualità acustica degli ambienti interni. Sono stati proposti infatti numerosi altri descrittori volti a descrivere ed analizzare con maggior profondità la risposta acustica di locali.

Si ricordano, ad esempio:

Lo Speech Trasmission Index (STI), introdotto nel 1971, è dato da rapporto tra la modulazione del segnale al ricevitore ed alla sorgente, definisce l'oggettiva intelligibilità del parlato in ambienti interni ed è funzione delle caratteristiche acustiche dell'ambiente e del rumore di fondo presente.

La chiarezza (C50) e la definizione (D50), indici relativi al rapporto tra la quantità di energia del segnale diretto rispetto all'energia del segnale riflesso. In generale, valutando



la risposta ad un impulso dell'ambiente, si considera la quantità di energia che giunge all'ascoltatore nei primi 50 millisecondi come relativa al raggio diretto del suono ed alle prime riflessioni, e pertanto utile alla percezione del segnale, mentre l'energia che rimane nella coda sonora come disturbante.

Tali descrittori risultano pertanto estremamente utili alla progettazione ed alla verifica degli ambienti, consentendo al progettista acustico di valutare con maggior profondità ambienti che necessitano di maggior attenzione.

### Le norme relative al controllo della riverberazione

Vi sono numerosi studi che esplicitano la correlazione tra problemi di stress, affaticamento e disagio con cattiva qualità acustica degli ambienti. Tale correlazione risulta ancor più evidente negli ambienti scolastici, dove scarse prestazioni acustiche risultano avere effetti negativi sia sugli studenti (relativamente all'apprendimento ed all'attenzione sviluppata) che sugli insegnanti (in termini di sforzo vocale e stress).

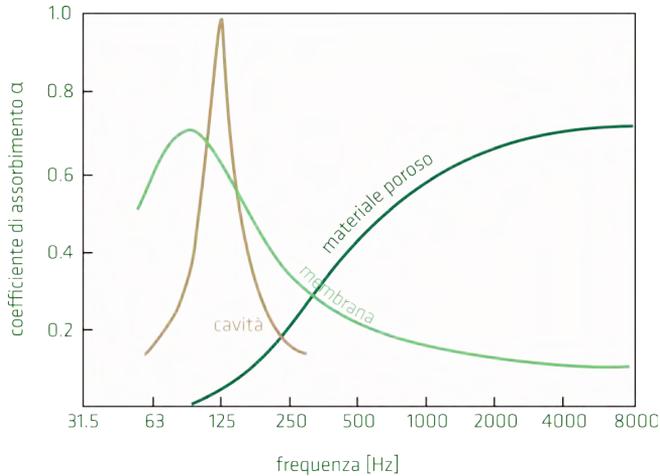
Normativamente, in Italia, il tempo di riverberazione era oggetto di specifici limiti, esposti nel DM 18/12/1975, dove si riportavano limiti legati al volume dell'ambiente, in funzione della frequenza.

Oggi questo risulta superato dal DM 23/06/2022 sui Criteri Ambientali Minimi, applicabile a tutti gli appalti pubblici, che impone, per gli ambienti interni, il raggiungimento dei valori di tempo di riverberazione e di intelligibilità del parlato indicati nella norma UNI 11532-2.



**Fig. 2**  
Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico dei materiali porosi (o fibrosi), dei materiali risonanti a cavità e a membrana.

**Fig. 3**  
Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico dei materiali porosi all'aumentare dello spessore.



## Il comportamento acustico dei materiali

Nel caso in cui il valore del tempo di riverberazione risulti superiore ai valori raccomandati e pertanto si generi nell'ambiente un potenziale discomfort acustico, risulta necessario ricorrere all'applicazione di specifici materiali e superfici che, assorbendo energia acustica, permettono la riduzione del tempo di riverbero.

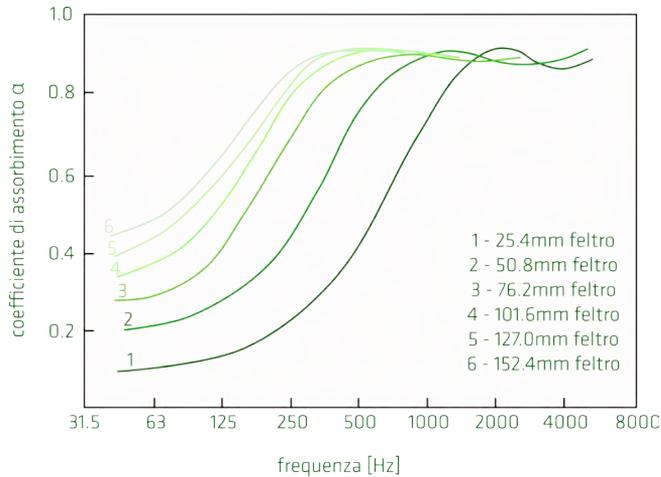
In generale, il suono che incide su una superficie può, in funzione delle frequenze, rispettivamente essere riflesso, assorbito o trasmesso. Viene definito un parametro (assorbimento apparente), corrispondente alla somma tra energia assorbita e trasmessa, indicando pertanto tutto quanto non viene riflesso dalla superficie.

Tali coefficienti hanno valori compresi tra 0 ed 1 ed assumono normalmente valori differenti alle diverse frequenze del suono. Considerando un coefficiente di assorbimento apparente nullo, questo rappresenterà una superficie perfettamente riflettente; viceversa, considerando un coefficiente di assorbimento apparente unitario, questo rappresenterà una superficie perfettamente assorbente, priva pertanto di riflessioni.

Chiaramente, tali valori di fonoassorbimento variano in funzione della frequenza e dipendono inoltre dalle caratteristiche tipologiche del materiale preso ad esame.

Possiamo ragionevolmente distinguere, principalmente, i principali sistemi di fonoassorbimento in tre categorie:

- materiali porosi o fibrosi
- materiali risonanti a cavità
- materiali risonanti a membrana.



I materiali porosi o fibrosi presentano buone prestazioni per le medio-alte frequenze. Tali materiali fonoassorbenti sono caratterizzati da una struttura a celle aperte, con celle intercomunicanti tra loro, oppure fibrosa. Fanno parte di questi materiali fonoassorbenti le fibre vegetali, minerali, sintetiche, i materiali espansi sintetici o naturali a celle aperte.

I fiocchi di cellulosa rientrano in questa tipologia di materiali avendo una struttura fibrosa con una buona permeabilità all'aria.

La dissipazione dell'energia che si innesca in tali materiali è dovuta al fenomeno di attrito viscoso dell'aria all'interno delle celle intercomunicanti.

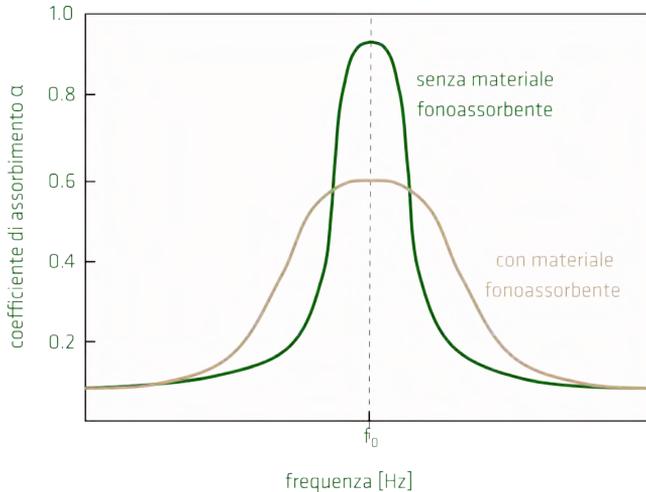
Le prestazioni di tali materiali dipendono principalmente da: spessore, densità, indice dei vuoti, resistività al flusso, tortuosità. L'assorbimento aumenta, in genere, con la frequenza e con lo spessore dello strato del materiale.

I sistemi di assorbimento per risonanza di cavità sono composti da cavità comunicanti con l'esterno attraverso fori praticati su di una parete non troppo sottile (collo del risonatore) e presentano un funzionamento dovuto alla risonanza massa-molla del sistema. L'aria contenuta nel collo si comporta come un pistone oscillante (massa), mentre l'aria contenuta nella cavità agisce come elemento elastico (molla). Tali sistemi, realizzati con materiali rigidi (è l'aria a muoversi, dissipando l'energia grazie alle compressioni e rarefazioni periodiche), generano massimo assorbimento acustico localizzato intorno alla frequenza di risonanza del sistema, in maniera molto selettiva.

Possono essere complementari con materiali porosi, che determinano un allargamento del campo di fonoassorbimento, a fronte di una riduzione del picco.



**Fig. 4**  
Schematizzazione  
del tipico  
andamento del  
coefficiente di  
assorbimento  
dei materiali  
risonanti a cavità.



I sistemi di assorbimento per risonanza di membrana, invece, sono costituiti da pannelli compatti e piani, disposti ad una certa distanza dalla parete. Possono essere assimilati a masse oscillanti (pannello) accoppiate ad un elemento elastico (aria contenuta nell'intercapedine). Il fenomeno dissipativo è generato dalla dissipazione di energia per via meccanica che si innesca con la vibrazione del pannello stesso. Anche in questo caso, abbiamo il massimo assorbimento acustico localizzato intorno alla frequenza di risonanza del sistema.

**Veronica Amodeo, Marta Somigli**

Università degli Studi di Firenze

veronica.amodeo@unifi.it

martasomigli1@gmail.com

Prodotti a base cellulosica, composti principalmente, o quasi esclusivamente, in carta e cartone riciclati, sono sempre più presenti in molti settori.

Nel seguito viene riportata una classificazione dei principali prodotti presenti sul mercato nazionale e i risultati di alcuni recenti studi sulle prestazioni acustiche di questi prodotti.

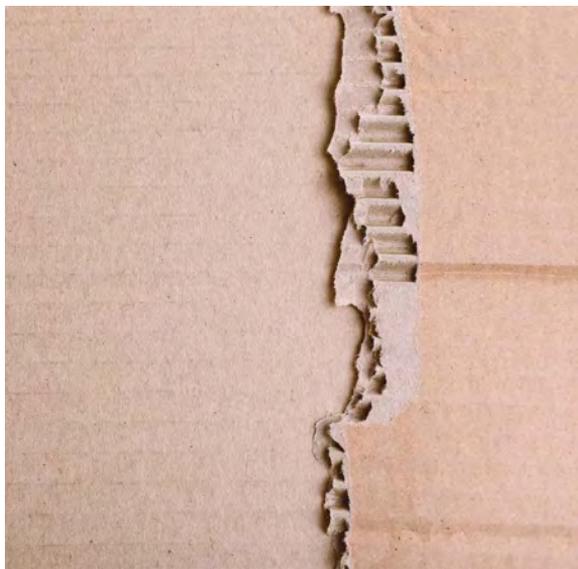
### **Il cartone ondulato**

Il cartone ondulato, nella sua forma più semplice, è costituito da due fogli di carta piana detti “copertine” che racchiudono al loro interno un foglio ondulato; i tre strati si legano tra loro tramite l'utilizzo di collanti naturali derivati da amidi di mais o fecola.

Già nel 1971 i fogli di carta ondulata, privi dello strato di copertina, venivano utilizzati all'interno delle casse di legno come protezione dagli urti al posto della paglia. L'aggiunta di un ulteriore strato di copertina alla carta ondulata permise di ottenere un prodotto leggero in grado di resistere a carichi elevati, il quale finì per sostituire in molti ambiti le casse di legno utilizzate nei trasporti.

Vi sono, inoltre, tipologie di cartone ondulato caratterizzate da un maggior numero di strati, come quella costituita da cinque fogli, di cui tre piani e due ondulati, o quella costituita da sette, di cui quattro piani e tre ondulati. A seconda del numero di fogli a onde presenti si parla di cartone con onda semplice, onda doppia oppure onda tripla. A loro volta, i fogli a onda semplice possono essere classificati in base all'altezza dell'onda.

Oltre al numero di fogli a onda presenti, la qualità del cartone ondulato può essere condizionata dall'altezza dell'onda dei fogli interni, oppure dalla tipologia di carta utilizzata per le copertine, le quali possono essere avana o bianche, per ragioni di stampa.



**Fig. 5** - Fogli di cartone ondulato a doppia onda.

**Fig. 6** - Fogli di cartone ondulato a singola onda senza copertina.

*pagina a fronte*

**Fig. 7** - Pannelli in cartone a nido d'ape di diverse dimensioni, con copertina applicata su un'unica faccia.  
(© Autrice: Veronica Amodeo)

**Fig. 8** - Seduta in cartone MOLLA di Alberto Cecchetto per Città Sottili, edizione 2003.  
Foto scattata presso LUCENSE.  
(© Autrice: Veronica Amodeo)

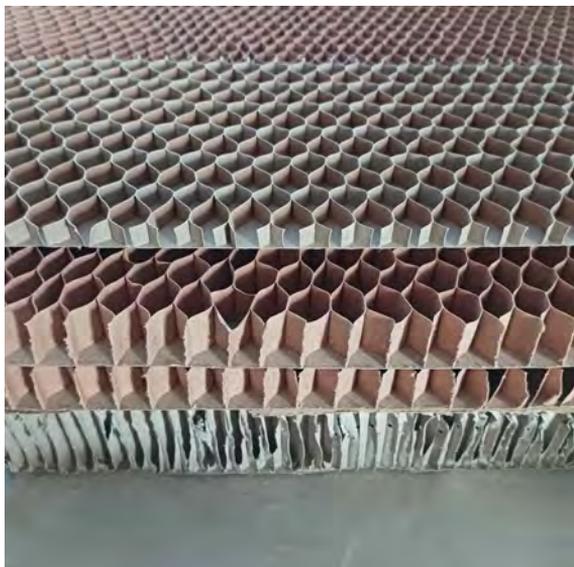
## Il cartone a nido d'ape

Il nido d'ape di cartone viene comunemente utilizzato come riempitivo nella lavorazione del legno e per realizzare pannelli sandwich. Questo tipo di tecnologia è ben consolidata e viene utilizzata nella realizzazione di porte, di mobili, e nell'industria navale e nautica, soprattutto per le elevate caratteristiche di robustezza e leggerezza della sua struttura.

Le carte utilizzate per la produzione del cartone a nido d'ape sono le medesime di quelle utilizzate per il cartone ondulato, così come i macchinari e le modalità di costruzione. I pannelli a nido d'ape di tipo gridcore si differenziano dai precedenti in quanto presentano una faccia piana e una a nido d'ape (Fig. 7).

È possibile accoppiare due pannelli tra loro incollando le facce a nido d'ape. I pannelli così composti possono raggiungere spessori elevati (fino a 150 mm) e possono essere sagomati, dipinti, curvati e anche intonacati.

Poiché le copertine esterne conferiscono alla struttura a nido d'ape una certa stabilità e rigidità, questi pannelli sono ormai abitualmente utilizzati per realizzare pareti divisorie e tamponamenti di ogni tipo, stand espositivi, oggetti di design e di arredo.



### La fibra di cellulosa

La fibra di cellulosa è classificata tra i materiali isolanti di origine vegetale a struttura fibrosa. Da più di 60 anni la fibra di cellulosa viene utilizzata in alcuni paesi come materiale per l'isolamento termico ed acustico.

La materia prima è carta di giornale riciclata; per la precisione, l'88% della carta utilizzata proviene direttamente dalle eccedenze delle tipografie, quindi si tratta di materiale riciclato pre-consumo, ossia con qualità elevata.

Le principali caratteristiche della fibra di cellulosa sono l'inattaccabilità da parte di insetti, roditori e muffe, un buon isolamento termico ed acustico, elevata traspirabilità e igroscopicità e una discreta capacità di reazione al fuoco.

La fibra di cellulosa si trova sul mercato nelle seguenti forme:

- focchi;
- granuli;
- pannelli.

La fibra di cellulosa sotto forma di focchi viene utilizzata principalmente nell'edilizia, come riempimento di intercapedini, di pareti sia in muratura che in legno, che abbiano uno spessore superiore ai 10 cm. Inoltre, trova applicazione in intercapedini di solai e coperture con



**Fig. 9** - Fiocchi di cellulosa.

*pagina a fronte*  
**Fig. 10** - Tubi in cartone.



struttura in legno, pareti divisorie interne, controsoffitti e sottotetti non praticabili. Altro metodo di utilizzo dei fiocchi è quello a spruzzo, per intervenire sulle prestazioni fonoassorbenti di pareti e soffitti, di qualsiasi tipo.

I granuli di fibra di cellulosa, invece, possono essere utilizzati, per esempio, per l'isolamento di solai, tramite un getto a secco.

La fibra di cellulosa mantenuta sotto forma di fiocchi o di granuli rimane completamente riciclabile e riutilizzabile se non trattata.

Il trattamento con i sali di boro, al fine di aumentare le prestazioni ignifughe del materiale, rende la fibra di cellulosa non adatta al compostaggio.

I pannelli ottenuti da agglomerati di fiocchi di cellulosa con aggiunta di fibra poliestere come legante pongono problemi alla loro riciclabilità; la presenza della fibra di poliestere, in alcuni casi in percentuale elevata, ne rende infatti problematico il riciclaggio e impossibile il compostaggio.

### **I tubi di cartone**

I tubi di cartone consentono una notevole varietà di applicazioni, con prestazioni fisico-meccaniche significative, ampia gamma di diametri e spessori disponibili, lunghezze notevoli, finitura esterna personalizzabile (impermeabilizzazione, colore, disegni).



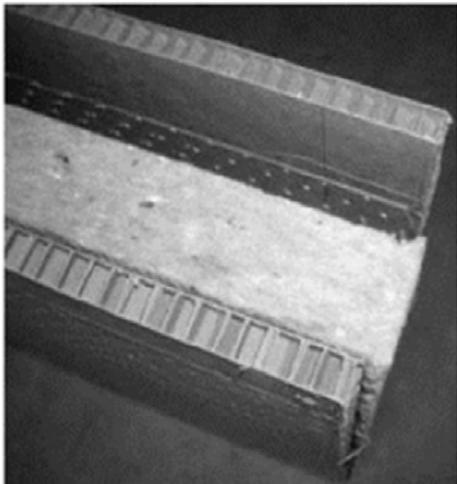
Di contro, un fattore che può rappresentare un limite per alcuni impieghi dei tubi ad alto spessore è il peso, che, essendo piuttosto elevato (per densità di  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) deve sempre essere valutato in fase di progettazione.

Il cartone utilizzato per produrre i tubi proviene al 100% dal riciclaggio, quindi anche il prodotto finito è costituito per il 90-95% da fibre riciclate e il restante 5-10% da collanti, resine o carte speciali.

### **Il comportamento acustico del cartone**

Sempre più crescente è l'interesse per i materiali fibrosi naturali poiché rappresentano una alternativa ai materiali sintetici più comuni consentendo al tempo stesso di combinare le prestazioni acustiche ad aspetti di sostenibilità, biodegradabilità, riciclo ed economia. Questa tendenza trova riscontro anche in molti studi scientifici che trattano le potenzialità di nuovi materiali con minor impatto ambientale (Kishore et al. 2021). Tra i materiali di origine naturale che maggiormente suscitano interesse, troviamo quelli derivati dalla cellulosa, come il cartone riciclato, sia nelle sue tipologie più comuni, quali il cartone ondulato e alveolare, sia in quelle meno ordinarie ma di uso quotidiano, come i cartoni delle uova, oppure i bicchieri usa e getta da tè o caffè.

Le tecniche di misura utilizzate in letteratura per la verifica delle proprietà fonoassorbenti



↑  
**Fig. 11 - Il prototipo realizzato nello studio di Secchi et al.**

*pagina a fronte*  
**Fig. 12 - I risultati delle misure di coefficiente di assorbimento acustico in camera riverberante, al confronto con i risultati di stime previsionali nello studio di Secchi et al.**

dei prodotti a base di carta e cartone fanno riferimento alla misura tramite tubo ad impedenza o in camera riverberante (Łatka et al., 2022); la prima richiede meno tempo e permette di utilizzare piccoli campioni di materiale (UNI ISO 13472-1:2004), mentre la seconda necessita di una superficie di materiale pari a circa 10 m<sup>2</sup> (UNI EN ISO 354:2003).

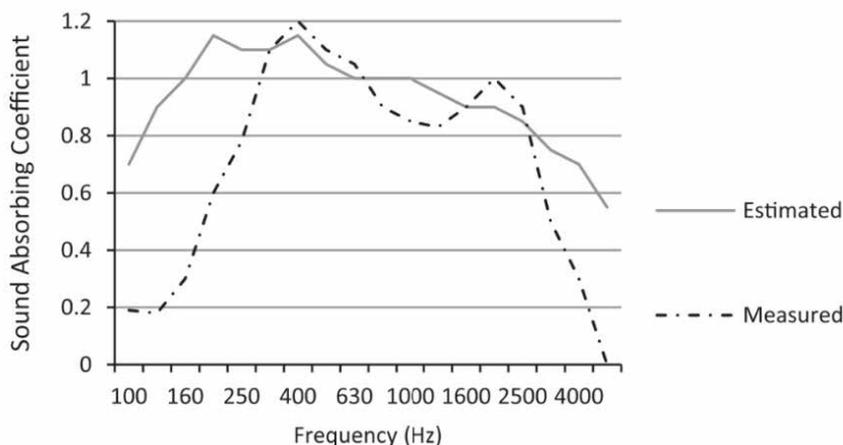
Uno studio del 2015 conferma che i campioni di cartone ondulato testati presentano un comportamento di assorbimento acustico piuttosto scarso, a causa della struttura interna del materiale stesso e della sua eccessiva resistività al flusso (Asdrubali et al., 2015). Al contrario, si sono evidenziate interessanti proprietà relative all'isolamento acustico, ed è possibile constatare

che l'orientamento degli elementi in cartone provoca dei cambiamenti: se i pannelli sono disposti nella stessa direzione dell'onda sonora che li investe si hanno migliori valori di isolamento acustico, mentre nella configurazione ortogonale si hanno meno oscillazioni, comportando un sistema più rigido e quindi meno performante da un punto di vista acustico.

Alcuni campioni di cartone ondulato testato di taglio tramite un tubo a impedenza, con il foglio ondulato disposto in modo da formare dei canali di foratura lungo la direzione del tubo, hanno messo in luce, invece, come la particolare disposizione, presentando una bassa resistività al flusso d'aria, dovuta al passaggio dell'aria nei lunghi canali aperti ( $250 \pm 50$  Rayl/m), mostri una buona fonoassorbenza alle medio-alte frequenze, con scarso contributo al di sotto dei 400 Hz (Berardi e Iannace, 2015).

Sempre nel 2015, Secchi et al., dopo un'analisi comparativa e una successiva verifica in camera riverberante, evidenziano come fra i prodotti a base cellulosa più promettenti vi sia un pannello sandwich, composto da due pannelli in cartone alveolare e riempito con fibre di cellulosa. Dall'analisi emerge come questo prototipo, oltre ad avere un coefficiente di assorbimento acustico superiore rispetto ad altri materiali fonoassorbenti tradizionali, rappresenti una soluzione più interessante in termini di sostenibilità (Secchi et al., 2015). Anche Kang et al. hanno ottenuto risultati interessanti testando pannelli in cartone ondulato perforati, con forature diverse (Kang et al. 2021).

In occasione dell'International Conference on Advanced Material Technologies (ICAMT) del 2016 Amelia Trematerra e Ilaria Lombardi hanno analizzato le proprietà



acustiche della cellulosa, sia allo stato fuso, sia mescolata con del collante. In entrambi i casi, si riscontrano valori di assorbimento accettabili oltre frequenze di 500 Hz, mentre a frequenze inferiori il materiale perde in parte la capacità di assorbire il suono, qualunque sia lo spessore dell'elemento in esame. Sebbene le prestazioni non subiscano particolari miglioramenti, unire la cellulosa sfusa con della colla permette di ottenere uno scheletro più rigido e quindi più facilmente utilizzabile (Trematerra e Lombardi, 2016).

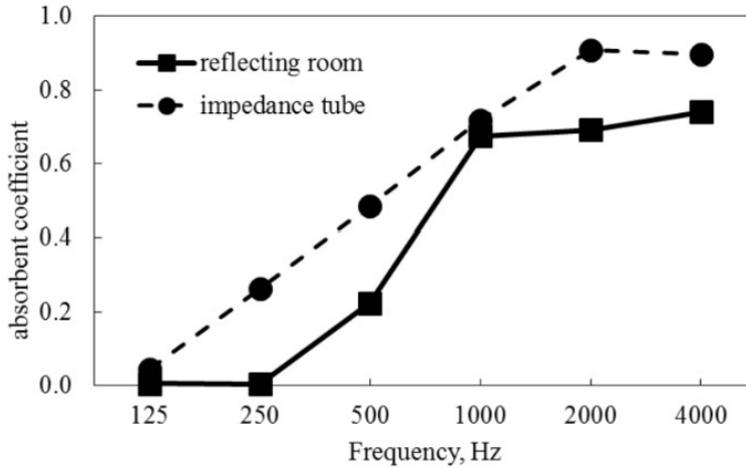
Ulteriori studi sono stati eseguiti relativamente alle prestazioni sia fonoassorbenti che fonoisolanti dei classici “cartoni da uova”, considerati come economici succedanei dei materiali specifici per il trattamento acustico degli ambienti.

Lo studio condotto da Prasasto Satwiko et al. nel 2017 ha portato a sviluppare due tipologie potenziate di cartoni per uova. Per raggiungere un miglior livello prestazionale, le cavità degli elementi vengono riempite con materiali naturali porosi che ne aumentano le prestazioni di assorbimento, soprattutto alle frequenze medio-basse e medio-alte, mentre i cartoni di comune utilizzo dimostrano prestazioni di fonoassorbimento non irrilevanti solo a partire dalle frequenze medio alte (Prasasto et al., 2017). Tali risultati vengono confermati da uno studio più recente, dove, oltre a misure di laboratorio mediante l'utilizzo di un tubo ad impedenza, sono riportate anche misurazioni ante e post opera, relativamente all'installazione di detto materiale cartaceo all'interno di una stanza con un elevato tempo di riverbero iniziale (Iannace e Beraldi, 2020).

Dai risultati esposti, si deduce pertanto che sia possibile utilizzare i cartoni delle uova come elementi fonoassorbenti, soprattutto alle frequenze medie e alte, tuttavia il trascurabile



Fig. 13 - Risultati ottenuti nello studio di Iannace ed al.



contributo di assorbimento apportato alle basse frequenze conferma l'inadeguatezza generale di questi elementi come sistemi fonoassorbenti in differenti bande di frequenza.

Degni di nota risultano essere anche i pannelli di design realizzati e testati nel 2023 da Sel et al., i quali sono realizzati in fondi di tè e caffè riciclati, e rivestiti frontalmente da un layer di tazze usa e getta di carta, forate sul fondo e applicate in aderenza. Tale sistema risulta avere un buon assorbimento alle medio-alte frequenze, con un particolare incremento a 500 Hz (Sel et al., 2023).

In generale, pertanto, dall'analisi della letteratura scientifica si può dedurre come i materiali a base cellulosa siano fonte di un consolidato interesse, date le loro caratteristiche ecologiche. Purtroppo però, a causa principalmente della composizione del materiale, nonostante presenti spesso delle buone caratteristiche acustiche dalle medio-alte frequenze, permangono ancora perplessità relativamente alle sue performance alle basse frequenze.

Oggetto dello studio eseguito dal Dipartimento di Architettura di Firenze e Comieco, i cui risultati preliminari sono riportati in questa pubblicazione, è pertanto quello di indagare nuove forme e modalità di accoppiamento di prodotti in carta e cartone al fine di ottenere prestazioni acustiche significative in un ampio intervallo di frequenze.

## Bibliografia di riferimento

- Asdrubali, F., Pisello, A. L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Cornicchia, M., & Fabiani, C. (2015). *Innovative cardboard-based panels with recycled materials from the packaging industry: Thermal and acoustic performance analysis*. *Energy Procedia*, 78, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.652>
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*. *Building and Environment*, 94, 840–852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>
- Iannace, G., Berardi, U., Ciaburro, G., & Trematerra, A. (2020). *Egg cartons used as sound absorbing systems*. Conference: 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Inter-Noise, Seoul – Corea.
- Kang, C. W., Kim, M. K., & Jang, E. S. (2021). *An experimental study on the performance of corrugated cardboard as a sustainable sound-absorbing and insulating material*. *Sustainability (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105546>
- Kishore, S. E., Sujithra, R., & Dhatreyi, B. (2021). *A review on latest acoustic noise mitigation materials*. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4700–4707. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.600>
- Łątka, J. F., Jasiołek, A., Karolak, A., Niewiadomski, P., Noszczyk, P., Klimek, A., Zielińska, S., Misiurka, S., & Jezierska, D. (2022). *Properties of paper-based products as a building material in architecture – An interdisciplinary review*. *Journal of Building Engineering* (Vol. 50). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104135>
- Satwiko, P., Gharata, V. D., Setyabudi, H., & Suhedi, F. (2017). *Enhancing egg cartons' sound absorption coefficient with recycled materials*. *Building Acoustics*, 24(2), 115–131. <https://doi.org/10.1177/1351010X17709986>
- Secchi, S., Asdrubali, F., Cellai, G., Nannipieri, E., Rotili, A., & Vannucchi, I. (2016). *Experimental and environmental analysis of new sound-absorbing and insulating elements in recycled cardboard*. *Journal of Building Engineering*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.10.005>
- Sel, E., Duzova, I., Sü, Z., Düzova, İ., & Gül, Z. S. (2023). *From waste to design: the potentials of recycled coffee, tea residue and cardboard cups as acoustical panels*. Conference: 10th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum, Torino.
- Trematerra, A., & Lombardi, I. (2017). *Acoustic Properties of Cellulose*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 225, 012082. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/225/1/012082>
- UNI ISO 13472 Parte1 (2004) *Acustica - Misurazione in situ del coefficiente di assorbimento acustico di superfici stradali - Metodo della superficie estesa*.
- UNIEN ISO 354 (2003) *Acustica - Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante*.



# **II PARTE**

## **Risultati del workshop**



↑  
L'immagine qui sopra e quelle nelle pagine finali sono state scattate durante il workshop (© Autrice: Veronica Amodeo).

**Marco Marseglia, Giuseppe Lotti**

Università degli Studi di Firenze

marco.marseglia@unifi.it

giuseppe.lotti@unifi.it

Il workshop progettuale è stato strutturato in tre fasi distinte dove il ruolo del design è stato quello di facilitatore del processo creativo e progettuale. Come evidenziato da molte ricerche questa modalità di approccio al progetto risulta essere molto produttiva se impostata seguendo determinati step.

In particolare attraverso il workshop è possibile ottenere numerose idee sullo stesso tema, tra loro divergenti, in un ridotto lasso di tempo (Saakes D. and van der Lug, 2009); in questo caso la tematica centrale riguardava la realizzazione di oggetti di arredo e complementi in materiale a base cellulosica, volti al miglioramento della qualità acustica degli ambienti.

Complessivamente il workshop ha avuto la durata di cinque giornate di cui due teoriche e di approfondimento e tre progettuali.

La prima fase ha riguardato le lezioni introduttive, l'intervento di Comieco e la visita presso Lucense volta a comprendere il materiale oggetto del workshop dai punti di vista della filiera, tecnico ed estetico; durante la seconda fase è stata svolta una lezione di approfondimento sul metodo e sul pensiero progettuale al fine di impostare il successivo brainstorming tra i partecipanti, finalizzato alla definizione degli scenari progettuali; la terza fase, di tipo pratico, ha visto gli studenti progettare in aula per tre giorni consecutivi, con l'aiuto di docenti e ricercatori, con l'obiettivo di generare nuove idee per semilavorati e prodotti a base di carta e cartone con proprietà fonoassorbenti.

L'approccio generale adottato è quello che viene definito Design Thinking (IDEO, 2015) o Design Process (Design Council 2019). Per questo nella lezione introduttiva svolta nella seconda fase sono state espone le principali teorie del metodo progettuale (Cross, 1993) come ad esempio il concetto di macrostruttura proposto da Bonsiepe (1993, I ed. 1981), l'epistemologia della prassi di Schön (1993, I ed. 1983) ed i wicked problems di Buchanan (1992), con l'obiettivo di indirizzare gli studenti verso un metodo da seguire al fine di rispondere in modo creativo ma strutturato, in un breve lasso di tempo.

Nella prima fase gli studenti si sono quindi disposti in una posizione di 'ascolto' e comprensione del contesto di riferimento, approfondendo gli aspetti tecnici e di filiera negli interventi di



**Fig. 14**  
Diagramma a centri concentrici predisposto durante il Workshop ReCardABLES per la registrazione delle idee generate durante il brainstorming.

Comieco e di Lucense, e visitando i laboratori del Centro Qualità Carta dove si eseguono test e sperimentazioni sui prodotti a base cellulosa dove è stato possibile toccare con mano il materiale e la tipologia di semilavorati disponibili per la progettazione - cartone in lastra, focchi di cellulosa, cartone alveolare, tubolari in cartone di diverse dimensioni -. Sebbene questi materiali non potranno sostituire altri materiali per alcune tipologie di prodotti realizzati con materiali più durevoli, alcuni studi evidenziano che potrebbero offrire importanti opportunità dal punto di vista della sostenibilità nel settore del complemento e dell'arredo, soprattutto per tipologie di prodotti non convenzionali (Sales et al., 2018).

Seguendo il Design Process succitato, nella seconda fase, al termine della lezione di approfondimento sul metodo e sull'impostazione progettuale sono stati mostrati alcuni esempi di prodotti cercando di far comprendere agli studenti il flusso mentale del progettista o del team progettuale in risposta ai vincoli e alle opportunità progettuali iniziali. Successivamente si è passati alla fase di elaborazione concettuale attraverso l'applicazione di un brainstorming condiviso volto ad individuare il maggior numero di idee possibili sulla tematica del workshop, considerata anche la potenzialità del materiale appresa nella giornata introduttiva.

La tipologia di brainstorming usata in questa fase del workshop può essere considerata uno dei primi metodi progettuali teorizzati (Jones, 1992 - I ed 1970) e viene utilizzata per portare il pensiero progettuale lontano da soluzioni di problem solving immediate e di facile applicazione. Sulla base del Design Process può essere definito il cuore del pensiero progettuale che anticipa e dà l'impostazione della fase di progettazione pratica. Esistono diverse varianti di brainstorming; in questo caso la sessione è stata impostata seguendo il metodo De Bono (1970), ovvero con un facilitatore a presiedere e guidare il brainstorming ed un segretario verbalizzante ad annotare le idee scaturite dal gruppo progettuale. La sessione ha avuto la durata di circa cinquanta minuti con l'obiettivo di favorire una stimolazione incrociata dei partecipanti e generare idee combinatorie tra menti diverse oltre a garantire la sospensione del giudizio, ovvero l'impossibilità di valutare le idee in corso di sessione ma solo durante un'analisi successiva.

Per la registrazione delle idee generate è stato predisposto un diagramma a centri concentrici (Fig. 17) con al centro la problematica progettuale del workshop "Valorizzazione della carta e derivati per il comfort acustico", nell'area mediana i requisiti del progetto e all'esterno le tematiche di riferimento. Nei due poli est e ovest sono invece state poste rispettivamente le parole 'prodotti' e 'sistemi', al fine di identificare le idee progettuali caratterizzate secondo questi aspetti.





**ReCarDABLES**

**Presentazione dei progetti**



↑  
L'immagine qui sopra e quelle nelle pagine finali sono state scattate durante il workshop (© Autrice: Veronica Amodeo).

Nelle pagine che seguono sono riportate le schede degli undici progetti elaborati dagli studenti nel corso del workshop.

I progetti sono sviluppati a livello di semplice concept progettuale; è riportata la descrizione del componente e una stima preliminare della fonoassorbenza e del fonoisolamento espressa con un acronimo che rimanda al seguente significato:

A: Prestazioni di fonoassorbimento

I: Prestazioni di fonoisolamento

+ : Medie

++: Buone

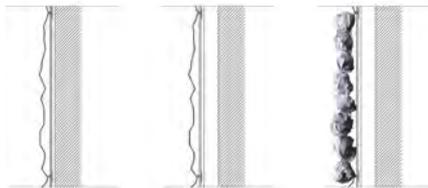
+++: Ottime

L,M,H: Basse, medio, alte frequenze

El: Elemento singolo (da valutare mediante area equivalente di assorbimento acustico)

Pan: Pannello, inseribile a parete o soffitto (da valutare in base alla sua superficie)

**Fig. 15** - Tre tipologie del sistema 7:  
1. finitura foglio 600g/m<sup>2</sup> e intercapedine d'aria 2 cm.;  
2. finitura foglio 600g/m<sup>2</sup> e intercapedine con fiocchi di cellulosa;  
3. finitura in palline accartocciate e intercapedine con fiocchi di cellulosa.



**Fig. 16** - Carta accartocciata, prove tattili sul materiale.



**Fig. 17** - Finitura in carta accartocciata del pannello.



**Figg. 18 e 19** - Fotoinserimento del sistema acustico con finitura in carta accartocciata, applicato a parete.





## **7 - Pannelli fonoassorbenti in carta, cartone e cellulosa**

Un progetto di Giulia Soldi

Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

Il numero 7 rappresenta il numero massimo di volte in cui un qualsiasi foglio di carta può essere ripiegato su sé stesso. Solo piegandolo disordinatamente si supera questo limite numerico, accartocciandolo possiamo arrivare a infinito.

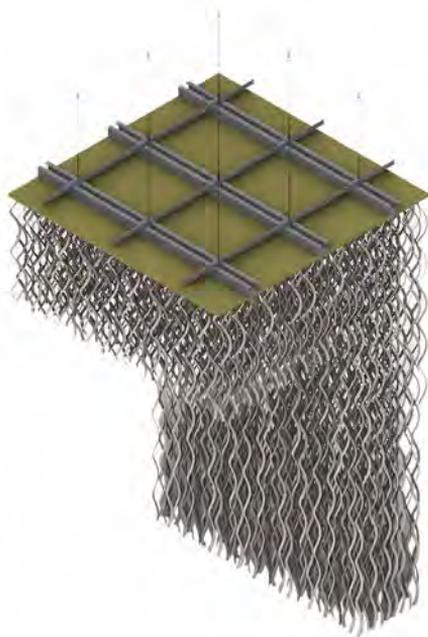
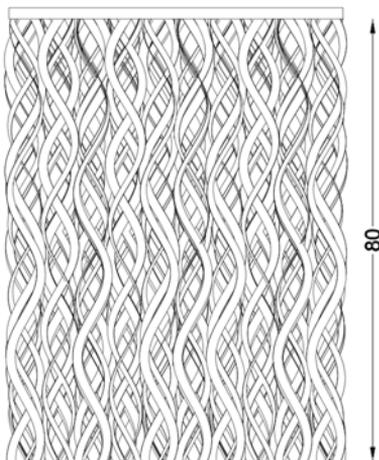
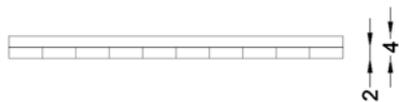
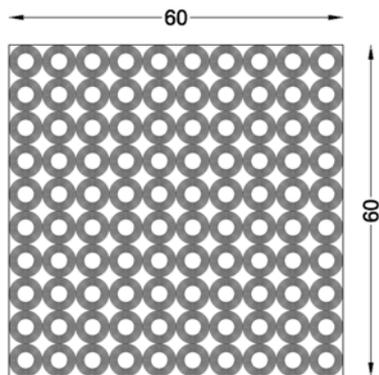
Il sistema ha una composizione modulare applicabile sia a parete che a soffitto. Il modulo esiste in più versioni, due varianti di finiture e due sezioni con diverse prestazioni, una più semplice e una composta da quattro strati: una finitura esterna, una camera d'aria, un cartoncino di sostegno e un'intercapedine con fiocchi di cellulosa. Le due finiture proposte, e valide per entrambe le soluzioni, sono una in cartoncino bagnato e increspato, l'altra in paline di carta.

Il progetto sfrutta l'estetica e le proprietà delle pieghe della carta per agire in qualità di elemento fonoassorbente. In particolare, secondo le ipotesi di funzionamento, il pacchetto più prestazionale andrebbe ad assorbire maggiormente le frequenze del parlato. Nonostante risulti difficile una valutazione preliminare, sulla base di studi precedenti è possibile ipotizzare che il presente sistema abbia un valore di alfa intorno a 0.5/0.6 alle medio-alte frequenze (A:+MH; PAN).

**Fig. 20** - (in alto) Pianta del sistema, (al centro) prospetto con le strisce di carta chiuse e (in basso) prospetto con le strisce da 80cm aperte.

**Fig. 21** - Assonometria dei pannelli Curtain e del sistema di sostegno leggero applicato al soffitto.

**Fig. 22** - Fotoinserimento del sistema Curtain all'interno di uno spazio di coworking.





### **CURTAIN – Pannelli modulari per tendaggi in carta riciclata**

Un progetto di Alessia Domenica La Novara e Maria Greta Libri  
 Corso di laurea in Architettura Magistrale a ciclo Unico

Con un approccio sostenibile e creativo, questo prodotto unisce funzionalità e design garantendo un ambiente acusticamente confortevole.

“Curtain” si compone di elementi modulari a soffitto: a partire da un pannello di supporto in cartone alveolare, fissato tramite un sistema simile a quello utilizzato nei controsoffitti in cartongesso, *piovono* tante strisce di carta spiraliformi.

Sono previste due tipologie di sistemi e a cambiare è la lunghezza delle spirali: nel primo caso misurano circa 80 cm e sono da utilizzare su tutta la superficie del soffitto per contribuire alla riduzione del riverbero; nella seconda variante hanno invece lunghezza di circa 3m e, scendendo dall’alto, suddividono in più parti un unico grande ambiente.

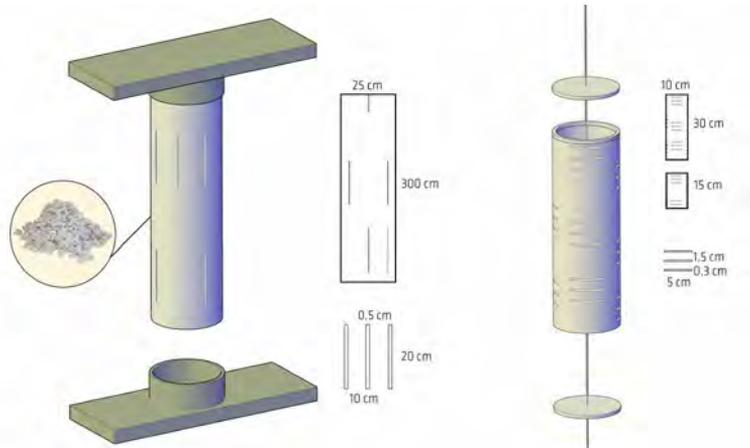
La soluzione proposta risulta essere versatile in termini di installazione e si adatta perfettamente ad ambienti di diverse dimensioni, forme e destinazioni d’uso.

Solo formalmente identificabile come “pannello”, il sistema presenta prestazioni di fonoassorbimento alle alte frequenze molto interessanti, dovute alla fibrosità e all’ampia superficie occupata (A:++MH; PAN).



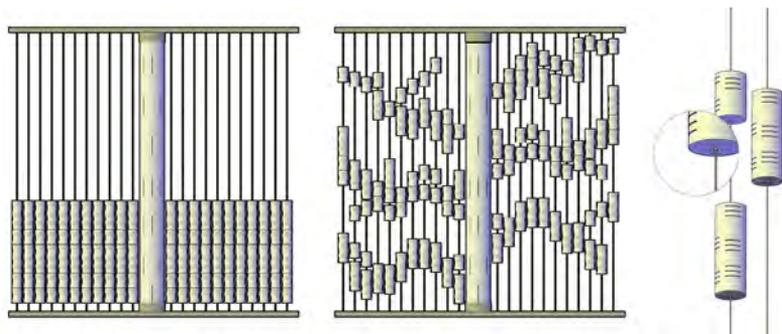
**Fig. 23** - La natura è ispirazione dell'architettura. La statica, la rigidità, sono concetti che in natura esistono, e si uniscono ai principi di bellezza e ordine.

**Fig. 24** - L'elemento centrale è un tubo con tagli verticali, riempito con fiocchi di cellulosa e fissato su una piastra metallica, mentre i tubi laterali hanno fessure orizzontali.



**Fig. 25** - I tubi sono fissati con dei dadi su dei cavi metallici, possono quindi scorrere per creare immagini diverse

**Fig. 26** - Vista di uno spazio espositivo, allestito con gli elementi di progetto.





### **FLYING TUBES – Pannelli divisori fonoassorbenti per spazi espositivi e ricreativi, in tubi di cartone riciclato**

Un progetto di Lucia Magnini

Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

Il progetto nasce da una riflessione sulla carta, un materiale riciclabile, riutilizzabile e naturale, di cui l'albero rappresenta l'inizio del ciclo di vita. Ritrovarlo nella fase finale del suo utilizzo significa portare rispetto e consapevolezza per questo percorso.

Questo elemento di design è pensato per dare spazialità ad ambienti ampi, come musei o ristoranti, e per migliorarne l'acustica in maniera velata. L'elemento è composto da tubi di vario tipo, che cambiano per lunghezza, diametro, foratura e riempimento. In questo modo si ricerca anche una componente progettuale di tipo partecipativo, in quanto i tubi possono essere spostati manualmente e si possono ricreare combinazioni sempre nuove.

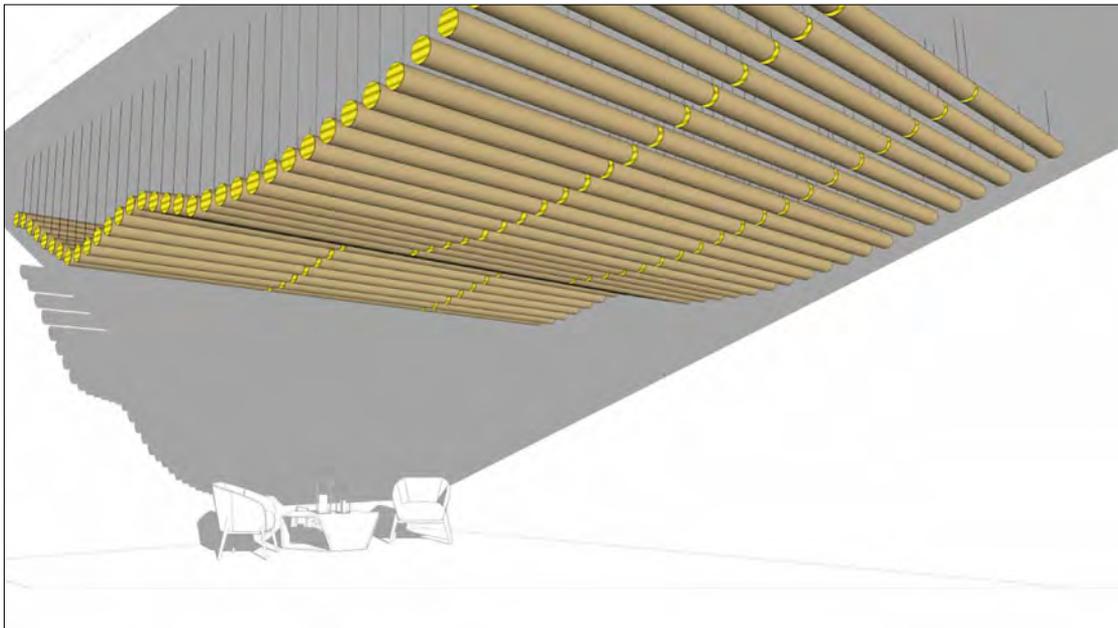
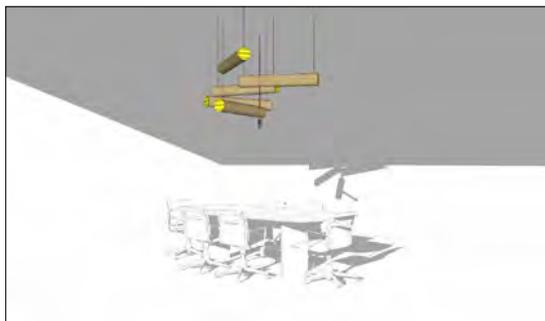
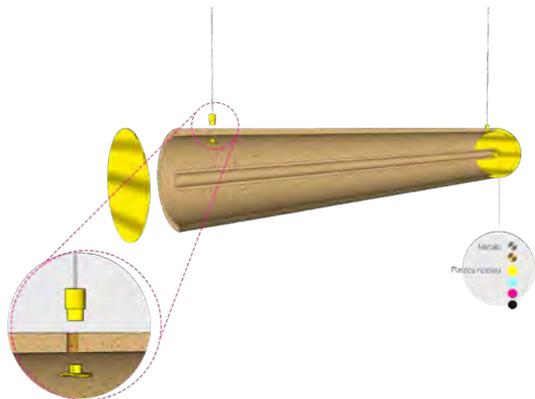
Da un punto di vista acustico il sistema funziona per risonanza: d'altro canto il complesso di fissaggio deve essere opportunamente studiato per non inficiare il funzionamento risonante del tubo stesso. Attraverso una valutazione preliminare si è stimato che i tubi più piccoli siano idonei ad assorbire soprattutto le medie-basse frequenze (A:++LM; EL).

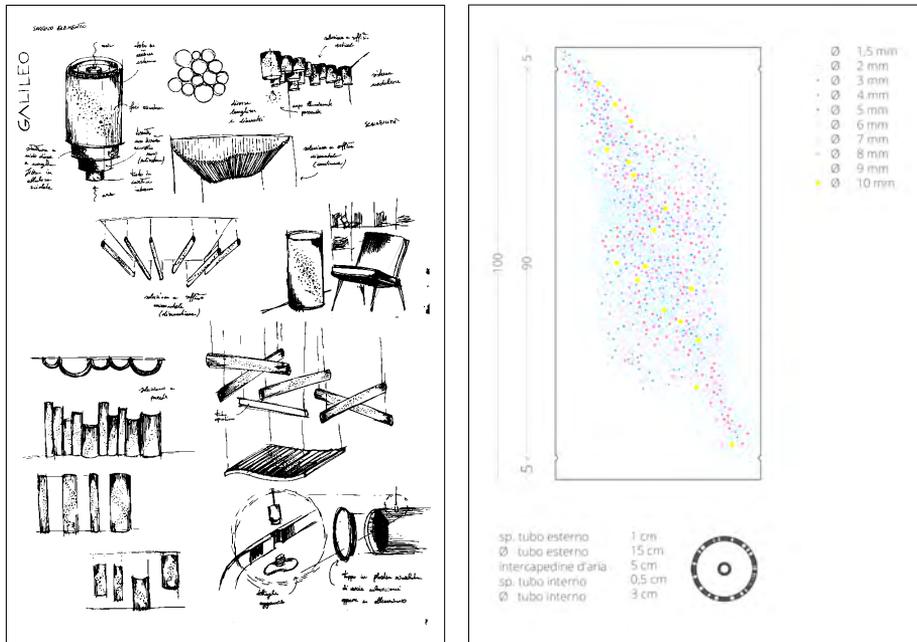
**Fig. 27** - Sezione assometrica di Galileo.

**Figg. 28-30** - Vista di alcune possibili configurazioni di Galileo.

**Fig. 31** - Schizzi di progetto.

**Fig. 32** - Le forature possibili nel sistema Galileo.





## **GALILEO - Elementi appesi fonoassorbenti in tubi di cartone riciclato**

Un progetto di Francesca Ratti e Antonella Salluce

Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

Il progetto Galileo riprende la forma del cannocchiale e, posizionato in alto, punta alle stelle. Caratterizzato da un tubo in cartone, con fori di diversi diametri che assolvono alla funzione tecnica del fonoassorbimento, è personalizzabile grazie ai diversi colori dei tappi in plastica riciclata o metallo alle due estremità.

L'idea progettuale ha origine dalla reinterpretazione del risonatore di Helmholtz, il quale, da recipiente sferico in ottone, diviene tubo in cartone.

Attraverso un sistema di foratura di diversi diametri, l'elemento ha buone prestazioni alle medio-basse frequenze. La quantità e la tipologia di forature potrà essere opportunamente dimensionata per effettuare un apposito *tuning* delle frequenze che si vogliono controllare.

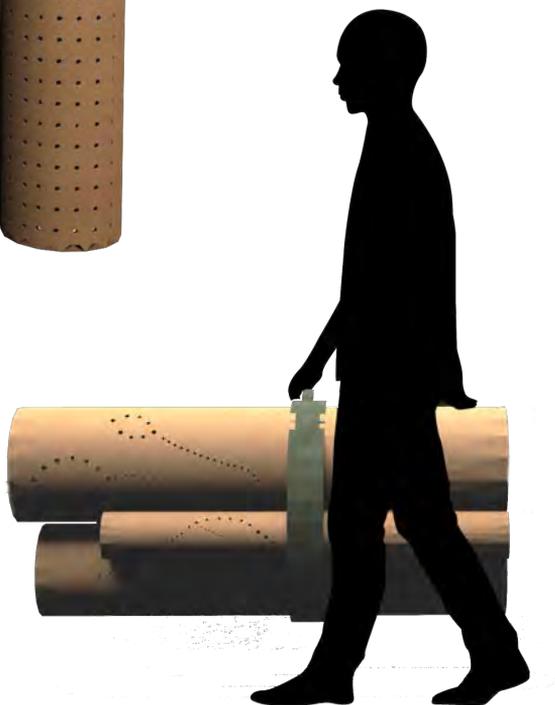
Il sistema potrebbe risultare analogo a un controsoffitto forato e potrebbe funzionare anche come un insieme di risonatori acustici "diffusi" (A:++LM; EL/PAN).



**Fig. 33** - Modulo free-standing per allestimento di parete divisoria.

**Fig. 34** - Modulo Gemme chiuso per il trasporto.

**Fig. 35** - Tubo forato, con design "in negativo".



## **GEMME – Concept per il riutilizzo dei tubi forati come divisori versatili e trasportabili**

Un progetto di Marella Santini

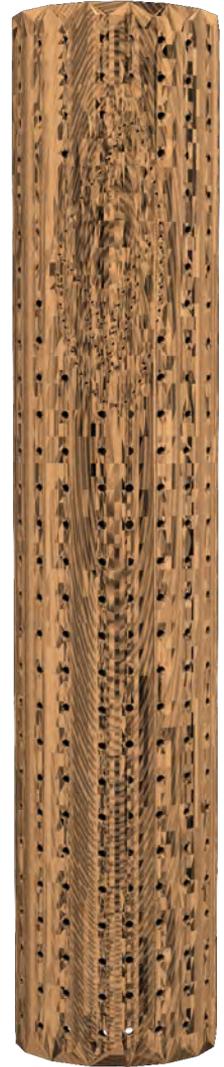
Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

Gemme è un sistema autoportante di tubi forati, formalmente ispirato alle gemme dei fiori che generano un nuovo ciclo di vita, proprio come in questo concept fanno i tubi di cartone.

L'idea di partenza di questo progetto è il riuso dei tubi in cartoni di medie e grandi dimensioni, usati ad esempio nell'industria tessile, i quali rappresentano i principali scarti del processo di riciclo della filiera.

Il sistema è formato da gruppi di cinque tubi uniti fra loro da una cintura che velocizza l'assemblaggio e facilita il trasporto: il singolo tubo di cartone viene forato per l'intera superficie e poi riempito con materiale fonoassorbente. La quantità e la tipologia di forature possono essere opportunamente dimensionate per effettuare un apposito tuning delle frequenze da controllare: i tubi possono avere lunghezza fino a 180 cm, un diametro di dimensioni comprese fra i 15 e i 40 cm e uno spessore che può raggiungere un massimo di 2,5 cm.

Questa soluzione funziona per risonanza e, se applicata a parete, può dar luogo ad una sorta di bass trap in funzione delle dimensioni e della tipologia di foratura. Preliminarmente si possono ipotizzare buone prestazioni fonoassorbenti alle medio-basse frequenze (A:++LM; PAN/EL).



**Fig. 36** - Sezione del modulo principale.

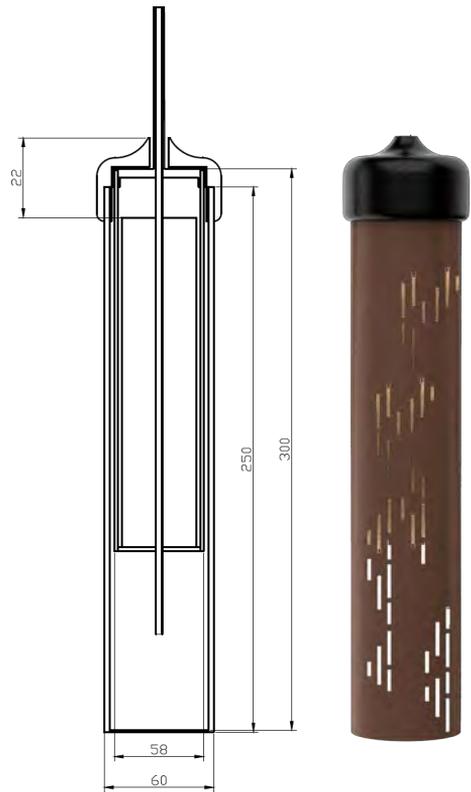
**Fig. 37** - Modulo principale.

**Fig. 38** - Versione lampada applique a muro e piantana free-standing.

**Fig. 39** - Lampada a soffitto composta da quattro moduli.

**Fig. 40** - Descrizione del sistema tramite schizzi di progetto.

**Fig. 41** - Descrizione del funzionamento del sistema tramite schizzi di progetto.

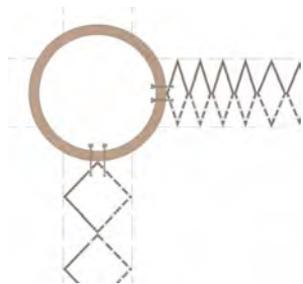
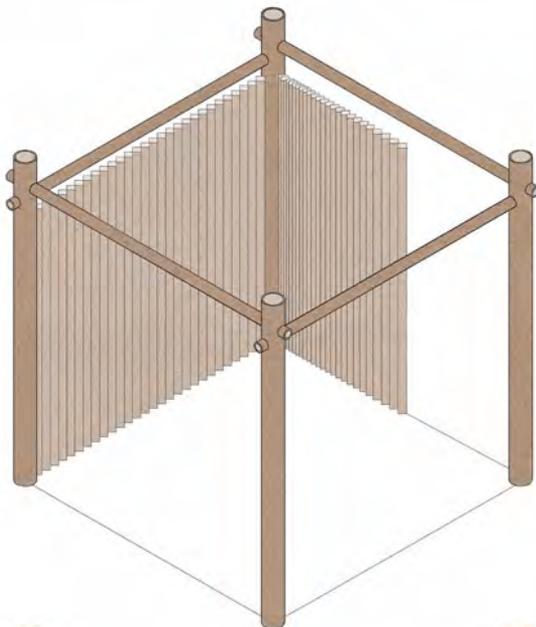




**Fig. 42** - Assonometria di progetto e rappresentazione dell'elemento divisorio in apertura.

**Fig. 43** - Particolare d'angolo del sistema.

**Fig. 44** - Possibile disposizione spaziale di un allestimento con Paper Bellow.





### **PAPER BELLOW – Elemento divisorio estensibile in cartone ondulato**

Un progetto di Marta Somigli

Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

In questo progetto il cartone è utilizzato per comporre degli elementi divisorii estensibili e adattabili, da applicare in contesti fieristici ed espositivi.

La scelta di progettare con il cartone in questo contesto deriva dalla facile reperibilità, trasportabilità e riciclabilità del materiale, ma anche dal tentativo di attenuare il rumore che generalmente viene a crearsi in tali ambienti.

La soluzione proposta si compone di 4 tubi verticali in cartone di 3 m di altezza e di 20 cm di diametro incastrati con 4 tubi orizzontali di 10 cm di diametro: il risultato finale richiama una sorta di telaio composto da travi e pilastri che conferiscono rigidità alla struttura.

I tamponamenti sono realizzati con due fogli di cartone ondulato di 3 mm, nei quali vengono effettuate delle forature di 1 cm: i fogli vengono successivamente fustellati e uniti in modo speculare a creare un motivo che crea dinamismo e simula il funzionamento degli infissi a soffitto.

Il progetto presenta prestazioni acustiche medie, sia dal punto di vista di assorbimento che di isolamento: tuttavia la conformazione presentata permette di sfruttare questi elementi come cubicoli che possano fornire privacy e miglioramenti acustici localizzati (A:+H; I:+H; EL).

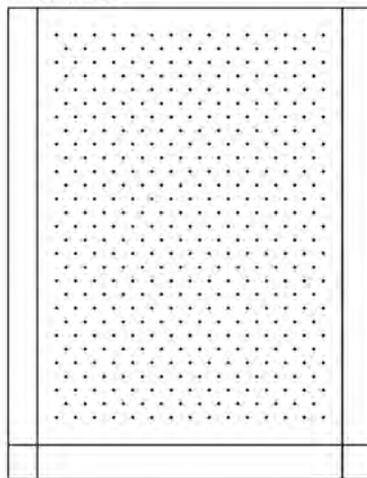
**Fig. 45** - Disegno tecnico del modulo principale.

**Fig. 46** - Sezione del modulo principale.

**Fig. 47** - Spaccato assometrico del modulo principale.

**Fig. 48** - Fotoinserimento del sistema free-standing Sinuous all'interno di un contesto domestico.

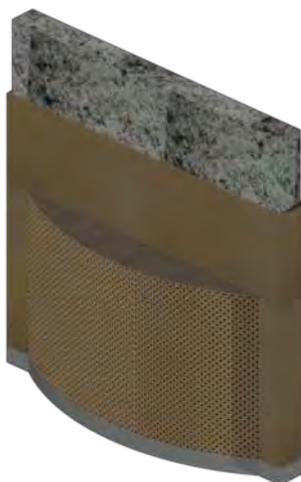
VISTA FRONTALE



VISTA LATERALE



VISTA DALL'ALTO





### **SINUOUS – Rivestimenti acustici per pareti in cartone ondulato**

Un progetto di Aleksia Lauren Pupin Kuhl e Baldassarre Peri

Corsi di laurea in Pianificazione della città del Territorio e del Paesaggio, Disegno Industriale

Il progetto **Sinuous** si ispira alla forma d'onda del suono ed è un sistema modulare che può essere applicato sia a parete che come elemento *free standing*, *ideale per ambienti open space*.

I pannelli divisori ecosostenibili in cartone ondulato sono leggeri e garantiscono privacy negli ambienti, mentre l'elegante design geometrico dona dinamismo.

Il sistema è autoportante, di facile installazione e maneggevole, ideale per essere utilizzato in ambienti open space.

Il pannello è stratificato e presenta pertanto prestazioni miste, date sia dalla tipologia di foratura che dalla presenza di fiocchi di cellulosa. Applicato a parete, può avere buone prestazioni di fonoassorbimento alle medio-alte frequenze e possibili buone prestazioni fonoisolanti alle medio-alte frequenze (A:++MH; I:++MH; PAN).

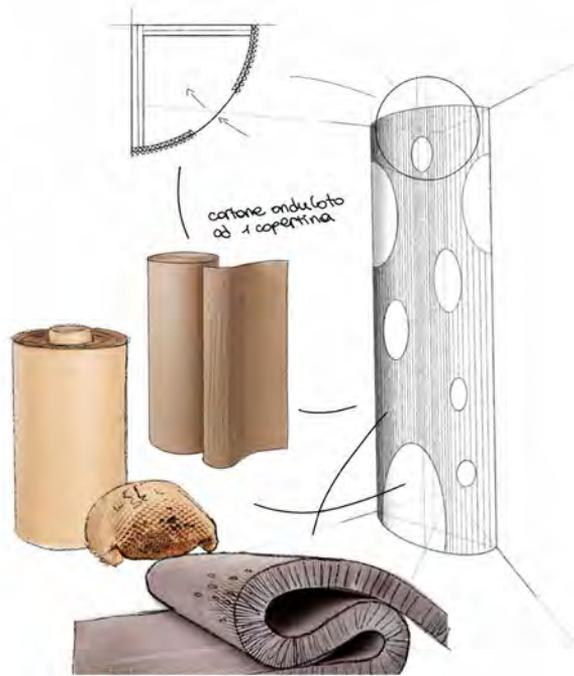
**Fig. 49** - Schizzi preliminari della forma dell'angolare.

**Fig. 50** - Spaccato del sistema.

**Fig. 51** - Dettaglio del materiale.

**Fig. 52** - Fotoinserimento del sistema con configurazione angolare.

**Fig. 53** - Render della configurazione angolare.





## **M0' – Sistema angolare fonoassorbente in cartone ondulato**

Un progetto di Chiara Saccone

Corso di laurea Magistrale in Design

Questo progetto nasce dalla volontà di risolvere il problema dell'acustica negli angoli di un qualsiasi ambiente: in queste zone infatti si raccolgono tutti i suoni alle basse frequenze.

L'obiettivo principale dell'elemento angolare progettato è proprio quello di attenuare le basse frequenze, assorbendo tramite i pannelli a membrana i suoni più profondi in quantità superiore alla media.

Il sistema si presenta in sostanza come una *bass trap* angolare, utile per la correzione acustica di locali di dimensioni ridotte: possiede medie prestazioni di fonoassorbimento alle medio-basse frequenze (A:+LM; EL).

Al fine di conferire al progetto una doppia valenza oltre alla funzione acustica, l'elemento presenta anche un sistema di retroilluminazione, "nascosto" dall'esterna finitura in cartone ondulato ad una copertina: in questo modo l'oggetto acquista un valore formale ed estetico, diventa componente di arredo funzionale.

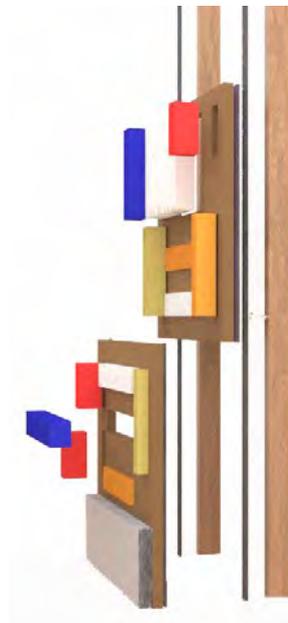
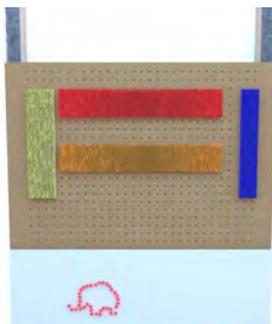


**Fig. 54** - Modulo base del sistema fonoassorbente con elemento rimovibile per disegnare o comporre figure.

**Fig. 55** - Schema di montaggio del sistema fonoassorbente composto da moduli da 100x100 cm.

**Fig. 56** - Fotoinserimento del sistema all'interno di un ambiente di scuola materna.

**Fig. 57** - Prospetto del sistema fonoassorbente composto da moduli da 100x100 cm.



## PEEL & STICK – Pannello-gioco assemblabile per scuole materne

Un progetto di Giacomo Ricci

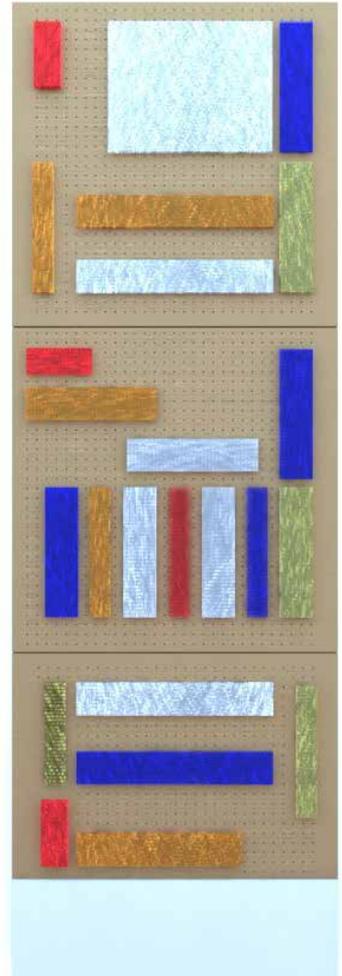
Corso di laurea in Architettura Magistrale a Ciclo Unico

Il riferimento iniziale del progetto è da considerarsi nel movimento artistico De Stijl per le diverse colorazioni dei pannelli e nel concetto di scomposizione della scatola del quadro di Mondrian «Composition with Red Blue and Yellow».

L'elemento di partenza di questo progetto è un pannello in cartone alveolare forato, fissato con un sistema in velcro alla struttura, composta a sua volta da montanti verticali in legno ancorati a muro.

Ogni pannello ha dimensione 1x1m con spessore di 4 cm, i fori sono distanti l'uno dall'altro di circa 3 cm e il loro diametro è di 2,5mm; gli elementi a sezione ondulata hanno colorazioni differenti e uno spessore di 8 cm. Nella parte bassa del pannello vi è un elemento di cartone che può essere utilizzato per comporre figure o per disegnare e una volta riempito può essere sostituito con facilità.

Lo spessore dei montanti verticali genera un'intercapedine d'aria di 10 cm che favorisce l'abbattimento delle basse frequenze. Il pannello (o la composizione degli stessi) presenta interessanti prestazioni di fonoassorbimento alle medio-alte frequenze vista l'idea di utilizzare cartone ondulato valutato “di taglio” (A:++MH; PAN).



**Fig. 58** - Focus sul telaio. Parola chiave di questo progetto è sostenibilità. La carta è una materia viva che si trasforma, di conseguenza è necessario che il telaio sia altrettanto vivo e dinamico allo scorrere del tempo, a tal fine ogni suo componente è in legno.

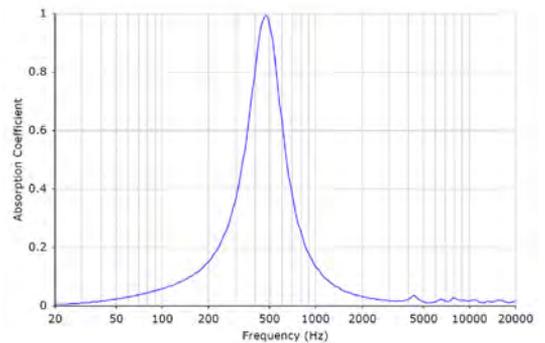
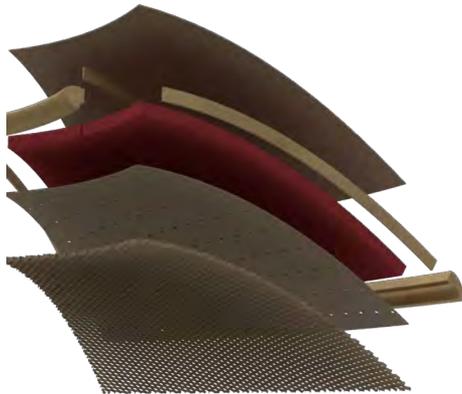
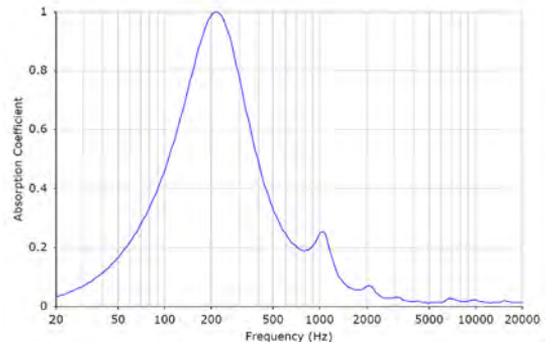


**Figg. 59a-b** - Esploso del risonatore acustico centrale. Sistema ottimizzato per le basse frequenze e relativo grafico di alfa.

**Figg. 60a-b** - Esploso di una delle otto vele. Sistema ottimizzato per le alte frequenze e relativo grafico di alfa.

**Fig. 61** - Fotoinserimento del sistema UFO.

**Fig. 62** - Vista dal basso del sistema UFO applicato a soffitto.





### **UFO – Cupola semisferica fonoassorbente in cartone**

Un progetto di Carmela Benevento e Cataldo Malena

Corsi di laurea in Product Interior Communication and Eco-Social Design, Disegno Industriale

Nell'odierna società è assodata l'importanza di riutilizzare le risorse e dare una seconda vita agli oggetti. Davanti alla sfida di poter dare nuovo valore alla carta e al cartone, l'esigenza di migliorare la qualità del suono in ambienti di studio e lavoro è apparsa fondamentale.

Partendo dalle proprietà tecniche di questo materiale nasce Ufo, una cupola fonoassorbente e illuminante. Il nome scelto vuole ironicamente porre l'attenzione sul desiderio dei lavoratori di essere rapiti da una navicella spaziale, un Ufo appunto, verso una nuova dimensione in cui studiare, lavorare e comunicare meglio rispetto al caos di rumori tipico degli spazi di coworking.

Il materiale con cui è composto l'anello esterno dell'oggetto possiede discrete prestazioni fonoisolanti alle alte frequenze; il sistema presenta anche buone prestazioni di fonoassorbimento alle medio-alte frequenze, grazie alla presenza di fiocchi di cellulosa di cui sono ripiene le vele dell'elemento (A:++MH; I:+H; EL).

Il progetto può quindi essere considerato come un "acoustic dome": attraverso la sua conformazione concentra i raggi sonori all'interno di un perimetro definito, garantendo privacy ed una migliore acustica in postazioni di conversazione prefissate.

## Bibliografia di riferimento

Bonsiepe, G. (1993), *Teoria e pratica del disegno industriale. Elementi per una manualistica critica*, Feltrinelli Editore, Milano, prima edizione fuori collana - prima edizione in sc/10 1975.

Buchanan, R. (1992), *Wicked Problems in Design Thinking*, MIT Press Journal, Design Issue, Vol. 8, n. 2 (pp. 5-21).

Cross, N. (1993), *Science and design methodology: A review*. Research in Engineering Design 5, 63–69 (1993). <https://doi.org/10.1007/BF02032575>.

De Bono, E. (1970), *Lateral Thinking. A Textbook of Creativity*, Penguin Books LTD, UK  
Design Council (2019), *Double Diamond*, consultabile al link: [https://www.designcouncil.org.uk/fileadmin/uploads/dc/Documents/Case\\_Studies\\_Documents/Double\\_Diamond\\_Model\\_2019.pdf](https://www.designcouncil.org.uk/fileadmin/uploads/dc/Documents/Case_Studies_Documents/Double_Diamond_Model_2019.pdf) (ultima consultazione: novembre 2023).

IDEO (2015), *The Field Guide to Human-Centered Design*, consultabile al link: [https://d1r3w4d5z5a88i.cloudfront.net/assets/guide/Field%20Guide%20to%20Human-Centered%20Design\\_IDEOorg\\_English-0f60d33bce6b870e7d80f9cc1642c8e7.pdf](https://d1r3w4d5z5a88i.cloudfront.net/assets/guide/Field%20Guide%20to%20Human-Centered%20Design_IDEOorg_English-0f60d33bce6b870e7d80f9cc1642c8e7.pdf) (ultima consultazione: novembre 2023).

Jones C. J. (1992, I ed.1970), *Design Methods*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Saakes, D., van der Lugt, R. (2009), *Material Design Workshop Playing, exploring and designing materials in products*, in J. Kim, LL. Chen, & K. Lee (Eds.), Proceedings of the IAS-DR2009 “Design Rigor & Relevance”, Korean Society of Design Science.

Sales, R. B. C., Franco, A. G., Mohallem, N. D. S., & Paulino Aguilar, M. T. (2018). *Study of Double Walled Corrugated Cardboard as an Alternative Material for Eco-Friendly Designed Furniture*. Materials Science Forum, 930, 195–200. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.930.195>.

Schön D. A. (1993), *Il Professionista Riflessivo. Per una nuova epistemologia della pratica professionale*, Edizioni Dedalo, Bari - titolo originale: The Reflexive Practitioner, Basic Books, New York, 1983.

## Ringraziamenti

La ricerca si è svolta nell'ambito di una convenzione tra il Dipartimento di Architettura e Comieco (Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica) che ha visto la partecipazione anche di altri soggetti.

In particolare si ringraziano, per la collaborazione al workshop:

LUCENSE

Caimi Brevetti Spa

Nardi mobili in cartone Srl

Per la fornitura dei materiali per lo svolgimento del workshop:

Tubo nastri Srl

GEMCO Srl

Bonded Srl

Nesocel Srl

Per il Laboratorio di Design per la Sostenibilità dell'Università di Firenze:

Arch. Francesco Cantini

Arch. Alessio Tanzini







**didapress**  
**Dipartimento di Architettura**  
Università degli Studi di Firenze  
2024



Il volume raccoglie i risultati preliminari di un progetto di ricerca promosso dal Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica (Comieco) e condotto dal Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze. L'interesse nella ricerca nasce dalla volontà di coniugare la tematica della qualità acustica interna degli ambienti a quella della sostenibilità dei materiali fonoassorbenti, individuando nei prodotti a base cellulosica una valida alternativa ai materiali sintetici o non riciclabili impiegati oggi giorno.

All'interno di questa ricerca si inserisce il workshop ReCarDABLES, al quale hanno partecipato studenti provenienti da diversi corsi di laurea della Scuola di Architettura dell'Università di Firenze e che ha portato all'elaborazione di 11 concept di nuove idee per semilavorati e prodotti con proprietà fonoassorbenti a base di carta e cartone di varie tipologie (tubi, cartone alveolare, cartone ondulato, cartoncino teso, focchi di cellulosa).

**Simone Secchi** è professore associato di Tecnologia dell'Architettura presso l'Università di Firenze. Svolge attività di ricerca nel campo della protezione acustica degli ambienti e del comfort uditivo negli ambienti adibiti all'ascolto e all'insegnamento.

È autore di oltre 250 pubblicazioni scientifiche nel campo del comfort acustico e luminoso e delle prestazioni dei materiali da costruzione.

**Veronica Amodeo** si è laureata nel 2020 presso la Scuola di Architettura di Firenze con una tesi sperimentale sulla qualità acustica degli ambienti scolastici. È Tecnico Competente in Acustica e Dottoranda in Tecnologia dell'Architettura presso l'Università degli Studi di Firenze. I principali interessi di ricerca riguardano la propagazione sonora e il comfort acustico all'interno degli edifici pubblici, quali scuole e ambienti sanitari.

ISBN 978-88-3338-220-3

