



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Anno Accademico 2022/2023

**Schiume di alluminio.
Caratterizzazione acustica, termica e
vibrazionale.
Possibili applicazioni nel campo delle costruzioni.**

RELATORI:

Prof.ssa Sara FERRARIS

Prof. Sergio PERERO (co-relatore)

CANDIDATO:

Lorenzo LIPPOLIS

RINGRAZIAMENTI

Ci tengo a ringraziare, davvero di cuore, chi ha fatto sì che questo traguardo potesse essere finalmente raggiunto.

Ci tengo ad esprimere un grosso GRAZIE innanzitutto alla Professoressa Sara Ferraris e al Professor Sergio Perero, per l'aiuto e il tempo dedicatomi ma, soprattutto, per la comprensione, il costante dialogo e la vicinanza dimostrata nei miei confronti permettendomi di conciliare il lavoro con l'attività di tesi.

Vorrei ringraziare Paola, la mia Famiglia, gli Amici di sempre.

Infine, voglio dedicare questo lavoro anche ai colleghi di Sina che mi hanno sempre dimostrato la loro solidarietà.

ABSTRACT (ita)

Le schiume metalliche, ed in particolare quelle di alluminio, rappresentano un materiale innovativo, sempre più studiato negli ultimi anni e che sta trovando applicazione in un numero di settori crescente. Si può affermare che le caratteristiche di questo materiale siano riconducibili alla sua principale peculiarità: ovvero la porosità. La presenza di pori al suo interno impartisce alla schiuma alcune potenzialità come l'elevato potere isolante sia termico sia acustico. Questi sono requisiti fondamentali nel settore edile e civile. Le schiume metalliche al contempo rappresentano un materiale ottimale per l'assorbimento di energia e per lo smorzamento delle vibrazioni, capacità richieste principalmente nel settore automotive dove in caso di urto la schiuma rappresenterebbe un valido materiale per l'assorbimento dell'energia rilasciata nell'impatto. La sua bassa densità rappresenta, inoltre, un grande vantaggio in termini di riduzione di peso e anche per questo motivo può rappresentare una valida alternativa ai materiali tradizionali generalmente più "pesanti". Lo scopo del presente lavoro è stato quindi quello di caratterizzare la schiuma di alluminio dal punto di vista acustico, termico e vibrazionale e contestualmente confrontare i risultati ottenuti con le caratteristiche note di materiali già oggi impiegati nelle costruzioni.

Nella prima sezione del presente elaborato, quindi, sono state descritte le caratteristiche delle schiume metalliche con maggiore dettaglio per quelle utilizzate nel lavoro sperimentale.

Nella seconda sezione, sono presentati i risultati della caratterizzazione acustica, mediante tubo d'impedenza, svolta al fine di indagare la proprietà di assorbimento acustico di una schiuma a celle chiuse.

Nella terza sezione dell'elaborato sono descritti i risultati dell'analisi termica (diffusività termica) di un pannello di schiuma di alluminio rivestito con uno strato in lega di alluminio.

Nella quarta sezione, sono illustrati i risultati delle prove di misura del fattore di attenuazione delle vibrazioni su diverse tipologie di schiuma di alluminio e di sandwich, tramite analisi della funzione di risposta in frequenza conseguente all'eccitazione degli stessi provini con segnali a frequenza variabile. Sono inoltre illustrati i tentativi effettuati per la creazione di un modello agli elementi finiti delle schiume analizzate.

Nella quinta ed ultima parte, infine, si sono dedotte le conclusioni generali.

ABSTRACT (eng)

Metal foams, especially aluminum foams, represent an innovative material that has been increasingly studied in recent years and is finding applications in a growing number of sectors. It can be stated that the characteristics of this material are attributable to its main peculiarity: porosity. The presence of pores inside it allows the foam to exhibit some potentials such as high thermal and acoustic insulation properties. These are fundamental requirements in the construction and civil engineering sector. At the same time, metal foams are an optimal material for energy absorption and vibration damping, capabilities mainly required in the automotive sector where in the event of a collision, foam would serve as a valuable material for absorbing the energy released upon impact. Furthermore, its low density is a significant advantage in terms of weight reduction, and for this reason, it can be a viable alternative to traditionally heavier materials. The purpose of this study was, therefore, to characterize aluminum foam from the acoustic, thermal, and vibrational perspectives, and concurrently compare the results obtained with the known characteristics of materials already used in construction.

In the first section of this paper, the characteristics of metal foams, with greater detail for those used in the experimental work, have been described.

In the second section, the results of the acoustic characterization, using impedance tube measurements, are presented to investigate the acoustic absorption property of a closed-cell foam.

In the third section of the paper, the results of thermal analysis (thermal diffusivity) of an aluminum foam panel coated with an aluminum alloy layer are described.

In the fourth section, the results of vibration attenuation factor measurements on various types of aluminum foam and sandwich structures are illustrated through frequency response analysis following excitation of the specimens with variable frequency signals.

In the fifth and final section, general conclusions are shown.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	III
1. INTRODUZIONE	1
1.1 LE SCHIUME METALLICHE	1
1.2 PROPRIETÀ	3
1.3 TECNICHE DI PRODUZIONE	9
1.4 CASO STUDIO	15
2. CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA	18
2.1 CENNI ALLE GRANDEZZE ACUSTICHE	18
2.2 ISOLAMENTO ED ASSORBIMENTO ACUSTICO IN EDILIZIA	27
2.3 MISURE SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE ACUSTICHE E INDICI DI VALUTAZIONE	37
2.3.1 MISURE SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE ACUSTICHE	37
2.3.2 INDICI DI VALUTAZIONE	42
2.4 ACUSTICA E SCHIUME METALLICHE	45
2.5 ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO	60
2.5.1 INQUADRAMENTO AL LAVORO SVOLTO	60
2.5.2 STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE	61
2.5.3 RISULTATI	66
2.6 CONSIDERAZIONI E CONFRONTO CON MATERIALI TRADIZIONALI	73
3. CARATTERIZZAZIONE TERMICA	80
3.1 CENNI ALLE GRANDEZZE TERMICHE	80
3.2 ISOLAMENTO TERMICO IN EDILIZIA	86
3.3 ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI DIFFUSIVITA' TERMICA	89
3.3.1 STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE	89
3.3.2 RISULTATI	99
3.4 CONSIDERAZIONI E CONFRONTO CON MATERIALI TRADIZIONALI	100

4.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE E MODELLO FEM	102
4.1	INTRODUZIONE AL LAVORO SVOLTO.....	102
4.2	ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI ATTENUAZIONE.....	111
4.2.1	STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE.....	114
4.2.2	RISULTATI.....	126
4.3	MODELLO FEM	130
5.	CONCLUSIONI.....	134
	BIBLIOGRAFIA.....	136

1. INTRODUZIONE

1.1 LE SCHIUME METALLICHE

Le schiume metalliche sono una categoria di materiali innovativi utilizzati in diverse applicazioni, il cui livello di conoscenza sta crescendo negli ultimi anni.

Ad oggi, vengono impiegate in ambito strutturale grazie alle loro eccellenti caratteristiche meccaniche quali resistenza e rigidità, in particolar modo se rapportate al loro basso peso, godono di una buona capacità di assorbimento di energia d'impatto, mostrano ottime capacità di assorbimento acustico e di smorzamento delle vibrazioni.

La peculiarità delle schiume di alluminio è senza dubbio la porosità presente al loro interno. I pori, a seconda delle proprietà che si vogliono ottenere, possono essere interconnessi o no: si parlerà infatti, di schiume “a celle aperte” e schiume “a celle chiuse”. In *Figura 1.1* e *Figura 1.2* sono illustrate rispettivamente la configurazione di una schiuma a celle aperte e quella di una schiuma a celle chiuse [1].

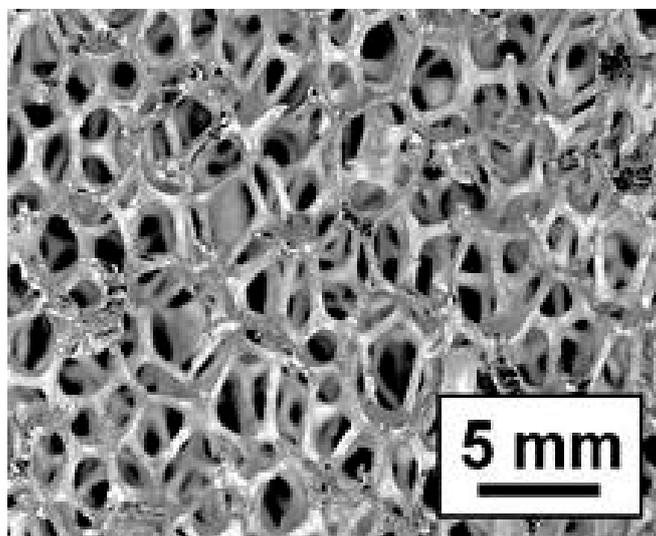


Figura 1.1. Schiuma metallica a celle aperte [1].

INTRODUZIONE

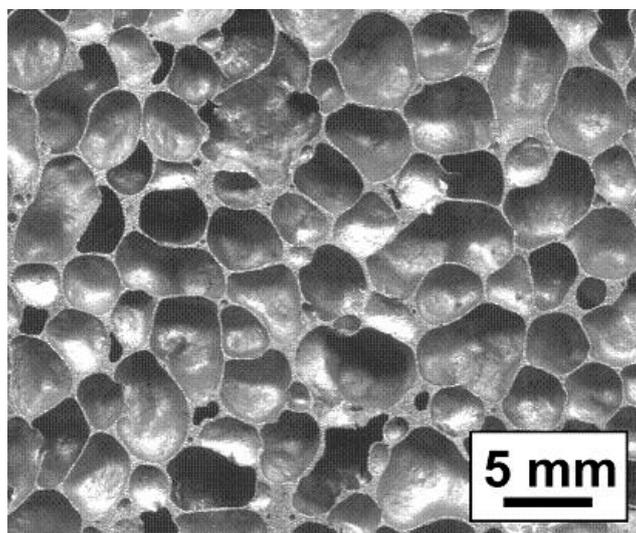


Figura 1.2. Schiuma di alluminio a celle chiuse [1].

La porosità influenza notevolmente le proprietà della schiuma, al punto che desiderate caratteristiche del materiale finito si possono deliberatamente ottenere controllando la densità dei pori all'interno del fuso. I pori, infatti, si ottengono con diverse tecniche, tra le quali l'insufflaggio di aria all'interno del fuso metallico.

Per un approfondimento sulle tecniche di produzione si rimanda al paragrafo "1.3. *Tecniche di produzione*".

Da un punto di vista storico, i primi riferimenti alle schiume metalliche risalgono al 1943, quando B. Sosnik aggiunse mercurio all'alluminio fuso. Successivamente però, il mercurio fu rimpiazzato, a causa della sua tossicità, da altri agenti in grado di formare bolle (denominati "foaming agents"). Negli anni '80 lo studio sulle schiume metalliche e di conseguenza la loro produzione è notevolmente aumentata, anche se tutt'ora i volumi di produzione non hanno ancora raggiunto quelli dei materiali tradizionali.

Ad oggi, una stima plausibile, porta ad immaginare che nei prossimi anni gli studi sulle schiume aumenteranno e nasceranno sempre più case produttrici, unendosi al gruppo dei cosiddetti produttori "metfoams" insieme a nomi quali Shinko-WireTM, CymatTM, AlulightTM, SchunkTM, KarmanTM, Neuman-AufoamTM e FoamtechTM.

INTRODUZIONE

1.2 PROPRIETÀ

Vengono illustrate brevemente quelle che sono le principali proprietà delle schiume metalliche ed in particolare quelle di alluminio, rimarcando il concetto fondamentale relativo alla loro struttura fisica: la porosità e soprattutto la percentuale dei pori stessi influenza il comportamento globale della schiuma; questa o quella proprietà può essere esaltata controllando il processo di produzione della schiuma e stabilendone il risultato finale in termini di densità, quindi vuoti presenti e peso finale.

Come introduzione, si riporta in Figura 1.3 una schematizzazione relativa alle diverse proprietà delle schiume, suddivise per tipologia e casa produttrice [x].

INTRODUZIONE

<i>Property, symbol [units]</i>	<i>Cymat</i>	<i>Alulight</i>	<i>Alporas</i>	<i>ERG</i>	<i>Inco</i>
Material	Al–SiC	Al	Al	Al	Ni
Relative density, ρ/ρ_0	0.02–0.2	0.1–0.35	0.08–0.1	0.05–0.1	0.03–0.04
Structure	Closed cell	Closed cell	Closed cell	Open cell	Open cell
Young's modulus, E [GPa]	0.02–2.0	1.7–12	0.4–1.0	0.06–0.3	0.4–1.0
Poisson's ratio, ν	0.31–0.34	0.31–.34	0.31–0.34	0.31–0.34	0.31–0.34
Compressive strength, σ_{pl} [MPa]	0.04–7.0	1.9–14.0	1.3–1.7	0.9–3.0	0.6–1.1
Tensile elastic limit, σ_y [MPa]	0.04–7.0	2.0–20	1.6–1.8	0.9–2.7	0.6–1.1
Tensile strength, σ_{UTS} [MPa]	0.05–8.5	2.2–30	1.6–1.9	1.9–3.5	1.0–2.4
Endurance limit, σ_e^c [MPa]	0.02–3.6	0.95–13	0.9–1.0	0.45–1.5	0.3–0.6
Densification strain, ε_D	0.6–0.9	0.4–0.8	0.7–0.82	0.8–0.9	0.9–0.94
Tensile ductility, ε_{UTS}	0.01–0.02	0.002–0.04	0.01–0.06	0.1–0.2	0.03–0.1
Fracture toughness, K_{IC} [MPa.m ^{1/2}]	0.03–0.5	0.3–1.6	0.1–0.9	0.1–0.2	0.6–1.0
Thermal conductivity, λ [W/m·K]	0.3–10	3.0–35	3.5–4.5	6.0–11	0.2–0.3
Resistivity, R [$10^{-8}\Omega\cdot m$]	90–3000	20–200	210–250	180–450	300–500

Figura 1.3. Proprietà di schiume metalliche disponibili in commercio [2].

Da un punto di vista delle proprietà meccaniche, sebbene il comportamento delle schiume sia considerato prevalentemente duttile, è possibile individuare tre tipologie di comportamento:

- Elastomerico;
- Elastoplastico;
- Fragile.

INTRODUZIONE

Le tre tipologie non mostrano diversi comportamenti durante la fase di carico di una prova di compressione, bensì durante la fase di scarico della prova stessa. Nel dettaglio di una prova di compressione, infatti, il comportamento che si nota sarà simile e costituito da un primo tratto di carico lineare seguito da un plateau plastico sino a rottura; ma la natura del plateau, il quale si è osservato essere esteso dimostrando buone proprietà nell'assorbimento di energia [2], è differente per le diverse tipologie. Per le schiume elastomeriche, il collasso è da instabilità elastica ed è parzialmente recuperabile, per quelle elastoplastiche è dovuto alla formazione di cerniere plastiche mentre per quelle fragili è la frattura fragile delle pareti delle celle a causare questo comportamento. In questi ultimi due casi, il collasso non è recuperabile.

In generale, si può però affermare che le schiume di alluminio siano sostanzialmente un materiale duttile il cui comportamento globale, definito dalla legge sforzo-deformazione, sia del tipo rappresentato in Figura 1.4.

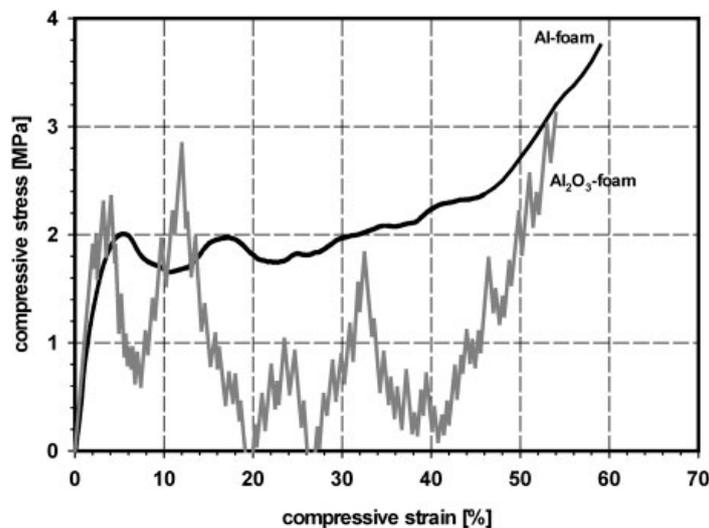


Figura 1.4. Legge costitutiva di tipo duttile per le schiume di alluminio [2].

Le grandezze che caratterizzano il comportamento meccanico sono fortemente influenzate dalla porosità nonché alla densità, come accennato in precedenza. Per quanto concerne il modulo di Young, ad esempio, gli autori Gibson e Ashby hanno dimostrato tramite studi sperimentali come tale influenza sia descritta dalle seguenti equazioni, valide rispettivamente per le schiume a celle aperte e chiuse [2]:

INTRODUZIONE

$$\frac{E}{E_s} = \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$$

(1.1)

$$\frac{E}{E_s} = \emptyset^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 + (1 - \emptyset) \frac{\rho}{\rho_s}$$

(1.2)

Dove:

- E [MPa], modulo elastico della schiuma;
- E_s [MPa], modulo elastico dell'alluminio di cui sono fatte le schiume;
- ρ [kg/m³], densità della schiuma;
- ρ_s [kg/m³], densità dell'alluminio di cui sono fatte le schiume;
- $\frac{\rho}{\rho_s}$ [-], densità relativa della schiuma;
- \emptyset , è la "frazione di solido contenuta nelle pareti delle celle" [2];

In Figura 1.5. si riporta la dipendenza del modulo di Young dalla densità relativa per diverse tipologie di schiume.

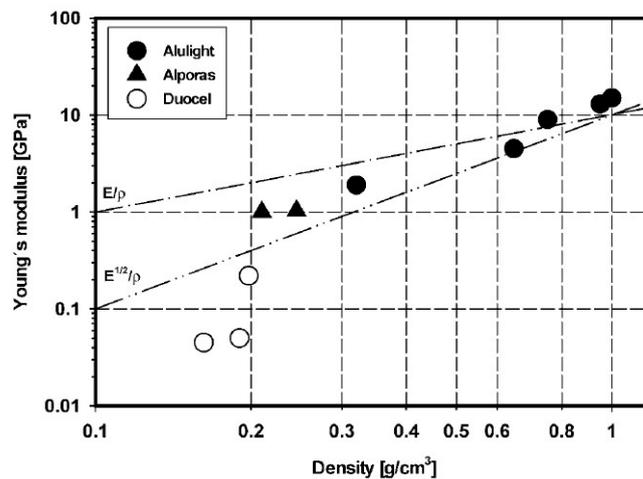


Figura 1.5. Dipendenza del modulo di Young dalla densità relativa [2].

INTRODUZIONE

Le schiume di alluminio godono inoltre di buone proprietà acustiche, termiche e vibrazionale, la cui trattazione verrà approfondita nel *Capitolo 2*, *Capitolo 3* e *Capitolo 4*.

Per quanto concerne l'ambito acustico, la struttura porosa è in grado di fornire buone risposte nei confronti dell'assorbimento acustico e dell'isolamento acustico, intendendo con il primo termine la capacità di assorbire l'onda sonora incidente evitando indesiderate riflessioni della stessa e fastidiosi riverberi, mentre con il secondo si identifica la capacità di un materiale di evitare il passaggio del suono tra due ambienti adiacenti, uno definito "disturbante" e l'altro ricevente. Come illustrato nel *Capitolo 2*, infatti, si sono riscontrati in seguito a misure sperimentali livelli di assorbimento piuttosto elevati, rappresentati da un coefficiente di assorbimento α prossimo a 0.85 nelle frequenze dell'udibile, contestualmente ad un potere fonoisolante R'_w misurato secondo procedure standardizzate e pari a 38 dB.

Relativamente all'ambito termico, la schiuma è in grado di trattenere calore isolando termicamente grazie alla presenza delle cavità al suo interno. Le pareti dei pori, invece, sono conduttive poiché costituita da alluminio.

Il comportamento nei confronti della trasmissione del calore è perciò complesso e verrà approfondito nel *Capitolo 3*, analizzando le proprietà fondamentali quali la conducibilità termica e la diffusività termica, per la quale sono state eseguiti misure di laboratorio al fine di determinare un range di valori proprio della schiuma in esame.

Le schiume di alluminio possiedono inoltre una buona capacità di smorzamento delle vibrazioni, intendendo con questo termine onde eccitanti di frequenza pari all'ordine di grandezza del kHz, e denominate vibrazioni strutturali.

In particolare, le schiume hanno mostrato avere una buona capacità di smorzamento delle vibrazioni alla frequenza di risonanza, o auto-frequenza. La capacità di smorzamento di un materiale dipende strettamente dall'attrito interno che esplicano le pareti delle celle, convertendo l'energia vibrazionale in calore e successivamente dissipandolo verso la superficie esterna del materiale.

Al fine di comprendere tale meccanismo e di ricavare informazioni circa lo smorzamento strutturale delle schiume, si sono svolte in laboratorio misure di

INTRODUZIONE

attenuazione, il cui dettaglio è riportato nel *Capitolo 4*. Le misure, condotte con diversi set sperimentali al fine di eliminare dal valore esatto di attenuazione contributi parassiti quali la presenza fisica della strumentazione, la presenza di ulteriori vibrazioni dovute all'aria e alla voce umana, hanno condotto a valori dell'ordine di 10^{-3} , cioè almeno un ordine di grandezza superiore dell'alluminio solido (o "bulk").

INTRODUZIONE

1.3 TECNICHE DI PRODUZIONE

Si descrivono le principali tecniche di produzione delle schiume metalliche.

Scegliendo una o l'altra tecnica si possono ottenere differenze sostanziali nel prodotto finale in termini di proprietà fisiche, porosità e densità.

Esistono diverse tecniche di produzione delle schiume, ma le più note sono le seguenti:

- Iniezione di bolle d'aria nel fuso metallico;
- Decomposizione di particelle che rilasciano gas nel fuso;
- Decomposizione di particelle che rilasciano gas all'interno di un materiale allo stato solido;
- Schiumatura mediante l'impiego di un precursore polimerico.

INIEZIONE DI BOLLE D'ARIA NEL FUSO METALLICO

Questo metodo di produzione è molto usato per la produzione di schiume di alluminio. L'alluminio viene fuso e vengono aggiunte particelle stabilizzanti in una quantità pari al 10% in peso; tali particelle possono essere di allumina, carburo di silicio SiC ecc. Anche i gas che vengono introdotti al fine di creare le bolle possono essere di tipo diverso: l'aria è la più usata, ma anche diossido di carbonio (CO₂), ossigeno (O₂), gas inerti e anche acqua.

Le bolle che si sono formate migrano verso la superficie del fuso e il metallo circostante inizia a solidificarsi. Con tale tecnica si possono ottenere lastre di schiuma con densità fino a $5 \cdot 10^2$ kg/m³ e dimensioni di cella comprese tra 2.5 mm e 30 mm.

Il processo è schematizzato in *Figura 1.6*.

INTRODUZIONE

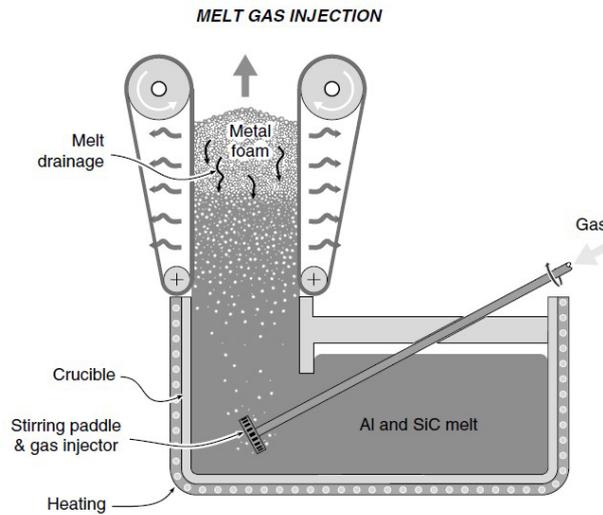


Figura 1.6. Processo di produzione della schiuma metallica per mezzo di iniezione di gas nel fuso metallico [3]

DECOMPOSIZIONE DI PARTICELLE CHE RILASCIANO GAS NEL FUSO

Con questa tecnica le bolle gassose sono generate dalla decomposizione di un precursore solido all'interno del fuso.

Il processo prevede di ottimizzare la viscosità dell'alluminio fuso mediante aggiunta di 1.5% di Ca a 680 °C o altri elementi affini all'ossigeno, tramite il quale si ha un aumento della viscosità del fuso tramite la formazione di CaO, allumina (Al_2O_3) e alluminato di calcio ($3CaO \cdot Al_2O_3$).

Successivamente, il fuso addensato viene trasferito in uno stampo di colata e viene aggiunta una quantità di idruro di titanio pari al 1.6% in peso come agente schiumogeno e agitato per indurre liberazione di idrogeno e generazione di bolle. Il materiale, poi, viene fatto raffreddare e solidificare nello stampo.

Come risultato si ottengono schiume di densità comprese tra 180 kg/m^3 e 240 kg/m^3 e dimensione media delle celle di 4.5 mm.

In *Figura 1.7* è schematizzato il processo descritto.

INTRODUZIONE

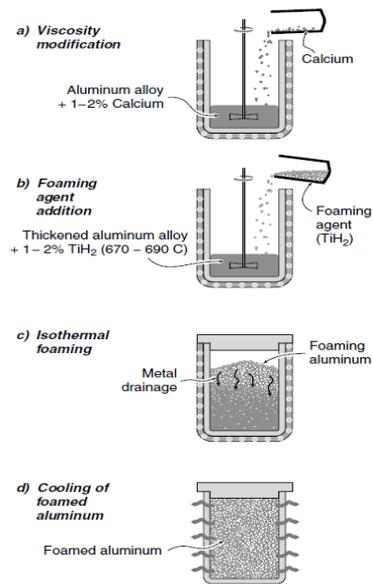


Figura 1.7. Processo produttivo basato su decomposizione di particelle in un fuso metallico [3].

INTRODUZIONE

DECOMPOSIZIONE DI PARTICELLE CHE RILASCIANO GAS ALL'INTERNO DI UN MATERIALE ALLO STATO SOLIDO

Questo processo prevede che agenti schiumogeni in polvere vengano introdotti all'interno di metalli anch'essi allo stato solido, assistendo ad un mescolamento di polveri. Uno degli agenti schiumogeni più diffuso è l'idruro di Titanio, caratterizzato da una temperatura alla quale si decompone pari a 465 °C, decisamente inferiore della temperatura di fusione dell'alluminio, pari a 660 °C.

Quindi, dopo aver mischiato opportunamente le polveri, il composto viene compattato a freddo e successivamente estruso in barre o lastre. Si ottengono così, campioni di densità relativa inferiore a 0.08.

In *Figura 1.8* si riporta il processo produttivo sopra descritto.

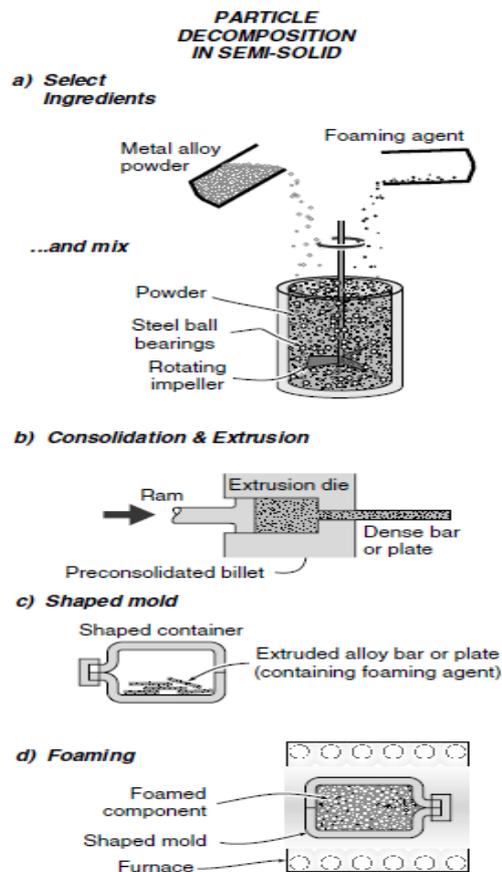


Figura 1.8. Schema del processo produttivo delle schiume tramite precursori solidi all'interno di alluminio solido [3].

INTRODUZIONE

SCHIUMATURA MEDIANTE IMPIEGO DI UN PRECURSORE POLIMERICO

Mentre le tecniche di produzione sopra descritte hanno come conseguenza la formazione di schiume a celle chiuse, secondo la definizione data precedentemente in questo capitolo, questa tecnica, basata sulla schiumatura mediante un precursore polimerico, ha come prodotto una struttura cellulare costituita da pori interconnessi, ovvero a celle aperte.

La prima fase del processo produttivo si basa sulla selezione di uno specifico stampo composto in schiuma polimerica a celle aperte, la cui dimensione delle cavità e la densità dipendono strettamente dalle proprietà che si vogliono ottenere nel prodotto finito. Dopo aver fuso il metallo e solidificato lo stampo si procede alla colatura del fuso nello stampo. Viene successivamente incorporato ulteriore metallo fuso all'interno dello stampo per riempire gli spazi vuoti, e dopo raffreddamento lo stampo viene rimosso, lasciando il negativo della schiuma polimerica.

Lo schema del processo è illustrato in *Figura 1.9*.

INTRODUZIONE

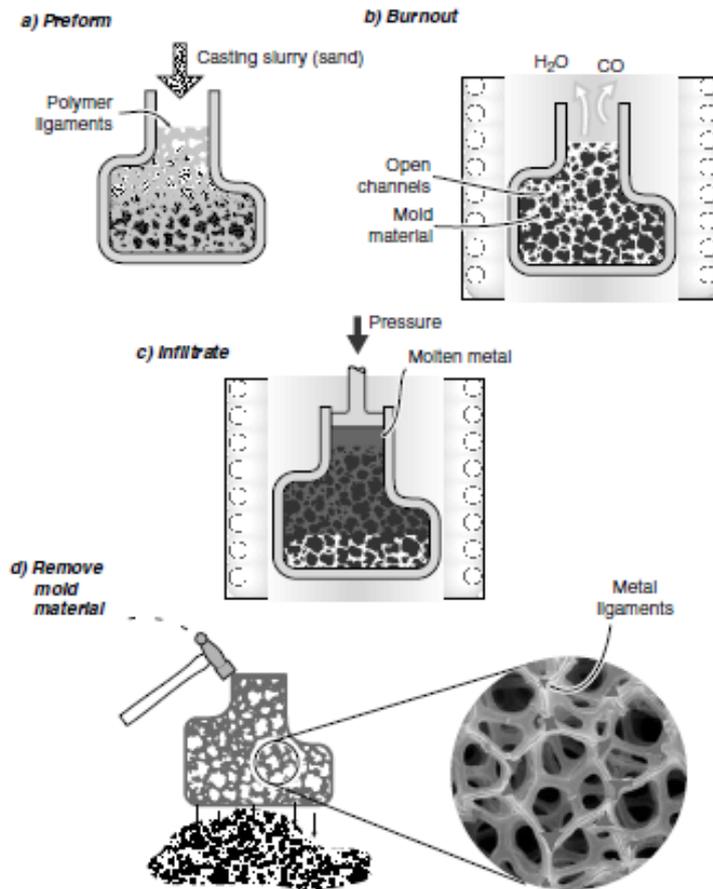


Figura 1.9. Schema produttivo mediante impiego di precursore polimerico [3].

INTRODUZIONE

1.4 CASO STUDIO

In questa sezione viene illustrato nel dettaglio il caso studio oggetto della presente tesi, dopo aver introdotto alcune considerazioni generali sulla natura delle schiume metalliche, sulla loro struttura e sulle loro proprietà principali.

È stata effettuata la caratterizzazione acustica, termica e vibrazionale delle schiume di alluminio, con l'obiettivo di valutare, tramite misure sperimentali condotte in laboratorio, possibili applicazioni nel campo delle costruzioni e quindi del mondo edile e civile.

In dettaglio sono state eseguite misure di assorbimento acustico, misure di diffusività termica, e di attenuazione vibrazionale.

I provini di schiuma utilizzati per le misure nei tre ambiti non sono i medesimi, bensì sono stati impiegate diverse tipologie di campioni che hanno però in comune la matrice porosa.

La scelta di non utilizzare la stessa tipologia di provini per tutte le caratterizzazioni effettuate deriva dal fatto che ad esempio, relativamente alle prove acustiche, si è presentata la necessità di testare provini che non fossero rivestiti da alcun strato superficiale in modo tale che l'onda sonora colpisse direttamente la faccia scoperta del materiale, al fine di apprezzare l'eventuale capacità di assorbimento del provino stesso. Nel caso questo fosse infatti rivestito con "layer" superficiali, come nel caso del campione denominato "sandwich", l'onda sonora non sarebbe stata assorbita per attrito viscoso grazie alle creste delle celle ma, al contrario, sarebbe stata riflessa completamente, poiché incidente su una superficie priva di rugosità e scabrezza.

Anche per quanto concerne le prove termiche si è utilizzato il campione di schiuma non rivestito: eventuali layer superficiali avrebbero impedito di apprezzare il processo di diffusione termica all'interno della schiuma.

Relativamente alle prove vibrazionali, invece, tutte le tipologie di campioni sono state utilizzate poiché mentre per i campioni a superficie liscia come i sandwich e l'alluminio "bulk" non si sono presentate problematiche relative al contatto laser-superficie, come verrà meglio descritto nel *Capitolo 4*, per i campioni di schiuma di alluminio la

INTRODUZIONE

problematica delle irregolarità delle superfici è stato bypassato con un accurato posizionamento del laser utilizzato nelle misure di attenuazione.

Le caratteristiche dei campioni sono riportate di seguito:

- Schiuma di alluminio a celle chiuse (core);
- spessore 9 mm;
- densità 280 kg/m^3 ;
- lunghezza 60 mm e larghezza 35 mm;

Per i campioni sandwich:

- piatti di alluminio (utilizzati per la “pelle di rivestimento” dei sandwich) di lega AA-6016 (Al 98.75 % + Mg 0.25% + Si 1%);
- spessore 1.2 mm;
- densità 2700 kg/m^3 .

Entrando nel dettaglio delle prove:

- per le misure acustiche sono stati impiegati campioni cilindrici di schiuma di alluminio, ricavati dalla schiuma le cui caratteristiche sono sopra riportate, diametro 40 mm e spessore 9 mm, come riportato in *Figura 1.10*. La forma e il diametro del provino è stata scelta in funzione delle dimensioni dello strumento impiegato nelle misure, ovvero il tubo di Kundt.

INTRODUZIONE



Figura 1.10. *Campioni di schiuma di alluminio per prove acustiche.*

- Per le misure termiche, si è impiegato un provino di forma parallelepipedica costituito da sola schiuma, come mostrato in *Figura 1.11*.



Figura 1.11. *Campione di sandwich utilizzato per misure di diffusività termica.*

- Infine, per le prove vibrazionali, si sono impiegate in diversi set up di prova, un campione a forma parallelepipedica costituito da sola schiuma come mostrato in *Figura 1.12* (il medesimo delle prove termiche), il sandwich menzionato per le prove termiche e un campione costituito da alluminio solido, come in *Figura 1.13*.

INTRODUZIONE



Figura 1.12. Campione costituito da sola schiuma per prove vibrazionali.



Figura 1.13. Campione di alluminio bulk per prove vibrazionali.

2. CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

2.1 CENNI ALLE GRANDEZZE ACUSTICHE

Le schiume metalliche ed in particolare quelle di alluminio presentano buone proprietà dal punto di vista acustico. Si è notato sperimentalmente infatti come queste possiedano interessanti caratteristiche nei confronti dell'assorbimento acustico e dell'isolamento acustico. Per assorbimento acustico si intende la capacità di trattenere una quota parte dell'onda sonora incidente sulla superficie del materiale garantendo ad un ambiente chiuso la quasi assenza di riverbero, dal momento che l'aliquota riflessa dell'onda incidente tende ad essere in buona parte ridotta.

Per isolamento acustico, invece, si intende la capacità di un materiale di impedire il passaggio del suono da un ambiente in cui sia presente una sorgente sonora ad uno adiacente ad esso, definito come ricevente. Basti pensare alle stanze confinanti di due abitazioni distinte, dove gli abitanti di entrambe sono interessati all'isolamento dei locali appartenenti alla propria casa rispetto ai suoni provenienti da appartamenti vicini.

Occorre però definire alcuni concetti base del mondo dell'acustica indispensabili per comprendere il fenomeno stesso e la sua natura, le grandezze in gioco e la relazione tra il suono stesso e la percezione umana.

Il suono consiste nella propagazione di onde di pressione in un mezzo elastico, generate dalla rapida successione di compressioni ed espansioni del mezzo stesso in cui le onde si propagano. Il suono è generato quindi da una *sorgente* e non può propagare in assenza di un mezzo elastico, motivo per la quale non riesce a diffondersi nel vuoto. La sorgente, dunque, è sostanzialmente costituita da un elemento vibrante, il quale trasmette il proprio movimento alle particelle del mezzo circostante, le quali oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio. Nel caso del suono il mezzo che sarà considerato è l'aria.

In acustica sono presenti alcune grandezze fondamentali, quali:

- la *frequenza* f [Hz]: rappresenta il numero di oscillazioni al secondo delle particelle d'aria coinvolte dalla propagazione dell'onda sonora. Per poter parlare di fenomeno sonoro però, è necessario che la frequenza sia compresa tra 20 Hz e 20.000 Hz, ovvero

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

il range di frequenze al quale si assume che l'orecchio umano sia sensibile. Al di sopra dei 20.000 Hz si hanno gli ultrasuoni, mentre al di sotto dei 20 Hz si parla di infrasuoni;

- il *periodo* T [s]: definito come l'intervallo di tempo che trascorre tra due occorrenze dello stesso fenomeno o più precisamente, il tempo in cui l'onda compie un'oscillazione completa e torna alla condizione iniziale;
- la *lunghezza d'onda* λ [m]: ovvero la distanza percorsa dall'onda sonora in un intervallo di tempo pari al periodo;
- la *pulsazione* ω [1/s]: definita come la misura della velocità con cui viene effettuata un'oscillazione completa nel moto armonico, caratteristico delle onde.

Le relazioni che correlano queste grandezze con la frequenza sono le seguenti:

- $f = \frac{1}{T}$ [Hz];
- $T = \frac{2\pi}{\omega}$ [s];
- $\lambda = \frac{c}{f}$ [m];
- $\lambda = cT$ [m];
- $\omega = 2\pi f$;

(2.1)

dove c rappresenta la velocità del suono ed è funzione delle condizioni termodinamiche del mezzo in cui il suono si propaga.

Si possono poi introdurre altre grandezze fisiche legate all'aspetto energetico del suono, ed in particolare:

- la pressione acustica p [Pa];
- l'impedenza acustica specifica Z [rayl];
- l'intensità acustica I [W/m²];
- la densità di energia sonora D [J/m³];
- la potenza sonora W [Watt].

La *pressione acustica* si definisce come lo scostamento della pressione rispetto al suo valore di equilibrio corrispondente con la pressione atmosferica. Questa è una grandezza oscillante e pertanto è rappresentabile come numero complesso, caratterizzato da parte

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

reale e immaginaria o, alternativamente, nella rappresentazione fasoriale, da modulo e fase. Per semplicità, si introduce il valore efficace della pressione, p_{eff} o alternativamente p_{RMS} (dall'inglese "root mean square") definito come nella seguente espressione:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad [Pa] \quad (2.2)$$

Il valore efficace di una forma d'onda, qualsiasi essa sia, si ottiene calcolando il valor medio dei quadrati dei singoli valori istantanei assunti dalla funzione $p(t)$ ed estraendo la radice quadrata del risultato.

L'impedenza acustica specifica in un punto si definisce come il rapporto la pressione acustica e la velocità delle particelle d'aria interessate al passaggio dell'onda sonora, funzioni complesse dipendenti entrambe sia della variabile *spazio* x che della variabile *tempo* t , come indicato nella seguente espressione:

$$Z = \frac{p(x, t)}{u(x, t)} \quad \left[\frac{kg}{m^2s} \right] = [rayl] \quad (2.3)$$

L'impedenza acustica specifica è dunque a sua volta una grandezza complessa, rapporto di due grandezze complesse, e rappresenta concettualmente la resistenza che l'onda sonora incontra nel suo propagarsi nel mezzo elastico, o più precisamente, la resistenza che il mezzo elastico offre ad una sollecitazione esterna quale può essere la pressione legata all'onda sonora. Nel caso generico, le grandezze complesse di pressione e velocità non sono in fase tra loro, ma si propagano sfasate di un certo angolo. Di conseguenza, si può definire l'impedenza specifica in ogni punto di un campo sonoro come una coppia di numeri che indicano il quoziente p/u e la sfasatura tra l'angolo di fase della pressione p e quello della velocità u .

In questa trattazione ci si riferisce per semplicità ad un moto unidimensionale dell'onda; la natura del moto ondoso nella realtà è tridimensionale, motivo per il quale l'impedenza acustica assumerebbe in una trattazione più generale la forma tensoriale.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

In presenza di onde piane nell'aria si parla di *impedenza acustica caratteristica*, grandezza non più complessa e rappresentabile come $Z = \rho c$, dove ρ è la densità del mezzo elastico in cui si propaga l'onda sonora e c è la velocità di propagazione del suono: l'impedenza acustica caratteristica rappresenta quindi un caso particolare dell'impedenza acustica specifica, ed è dimostrabile come nel caso di onde piane si mantenga costante il rapporto tra le grandezze p e u sopra menzionate.

L'intensità acustica è la quantità di energia che attraversa una superficie unitaria in direzione normale alla stessa nell'unità di tempo ed è pertanto una grandezza vettoriale. Nel caso di onde piane che si propagano in un mezzo elastico non viscoso si può esprimere come:

$$I = \frac{p_{eff}^2}{\rho c} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.4)$$

La densità di energia sonora rappresenta la quantità di energia acustica presente in un volume unitario, che nel caso di onde piane può essere espressa dalla seguente formula:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho c^2} = \frac{1}{c} \quad \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.5)$$

La potenza sonora si definisce come la potenza trasmessa dalla fonte sonora al mezzo. Per onde piane che si propagano attraverso mezzi non viscosi la potenza sonora si può esprimere come:

$$W = IS \quad [W(Watt)] \quad (2.6)$$

In acustica si è soliti rappresentare queste grandezze per mezzo di una scala logaritmica, con la quale si fa corrispondere al valore della grandezza in esame il logaritmo del rapporto tra quello stesso valore e un valore di riferimento prefissato. Nello specifico le grandezze espresse in questa nuova scala hanno come unità di misura il *decibel dB*, ossia

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

dieci volte il logaritmo del rapporto sopra menzionato. Di conseguenza alla grandezza generica X si fa corrispondere il cosiddetto livello L_X , che vale:

$$L_X = 10 \log \frac{X}{X_{rif}} \quad (2.7)$$

Con questa notazione si potranno pertanto esprimere tutte le grandezze acustiche fondamentali descritte in precedenza, ed in particolare risulteranno essere definite come indicato nelle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} - L_p &= 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}} \quad [dB] && \text{livello di pressione;} \\ - L_I &= 10 \log \frac{I}{I_{rif}} \quad [dB] && \text{livello di intensità;} \\ - L_W &= 10 \log \frac{W}{W_{rif}} \quad [dB] && \text{livello di potenza;} \\ - L_D &= 10 \log \frac{D}{D_{rif}} \quad [dB] && \text{livello di densità;} \end{aligned} \quad (2.8)$$

dove:

$$\begin{aligned} - p_{rif} &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa;} \\ - I_{rif} &= 10^{-12} \frac{W}{m^2}; \\ - W_{rif} &= 10^{-12} \text{ Watt;} \\ - D_{rif} &= 10^{-12} \frac{J}{m^3}. \end{aligned}$$

All'interno delle espressioni dei livelli di pressione, di intensità, di potenza e di densità, si può notare come i rapporti tra la grandezza generica e quella di riferimento siano adimensionali e proporzionali all'energia del segnale sonoro. Al fine di fornire un'indicazione numerica e un ordine di grandezza delle grandezze in gioco e di come queste siano rappresentative del fenomeno sonoro all'interno della quotidianità, si riporta una tabella riassuntiva (*Tabella 2.1*) dei più comuni suoni e rumori presenti nell'ambiente.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Intensità sonora (w/m^2)	Pressione sonora (Pa)	Livello sonoro (dB)	Esempi
10^2	200	140	Soglia del dolore
10^{-4}	0.2	80	Voce alta
10^{-6}	0.02	60	Parlato normale
10^{-8}	0.002	40	Voce bassa
10^{-12}	0.00002	0	Soglia udibile

Tabella 2.1. Intensità, pressione e livello sonoro.

La peculiarità dei suoni esistenti è che essi non sono composti da un tono puro ovvero da un segnale composto da una singola frequenza, ma anzi sono costituiti da una gamma di frequenze in alcuni casi anche piuttosto estesa.

Risulta opportuno, pertanto, poter analizzare la composizione dei suoni in termini di frequenza. Tale analisi viene eseguita suddividendo il suono in *bande*, ovvero in prefissati range di frequenza. Ogni banda è caratterizzata dalla *frequenza nominale* f_b posta a centro banda, e dalle frequenze *superiore* f_s e *inferiore* f_i . In edilizia viene eseguita tipicamente un'analisi in bande di ampiezza percentuale costante, dove vige cioè la costanza del rapporto tra $\Delta f = f_s - f_i$, e f_b . Si parlerà di analisi in *bande di ottava* qualora il rapporto $\frac{\Delta f}{f_b}$ sia pari a 0.707 e di analisi in bande di terzi di ottava qualora tale rapporto sia invece uguale a 0.232.

Come accennato in precedenza, l'onda sonora assume un comportamento specifico nel momento in cui incontra un ostacolo, come ad esempio una parete che separa due stanze confinanti appartenenti ad abitazioni distinte. Essa, infatti, verrà in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa nell'ambiente adiacente.

Tale fenomeno può essere descritto in termini energetici, o di potenza, considerando che rispetto alla totalità dell'energia incidente vi sarà una componente riflessa, una assorbita e una trasmessa, legate della seguente relazione:

$$W_i = W_r + W_a + W_t \tag{2.9}$$

e suddividendo entrambi i membri rispetto all'energia incidente W_i si può riscrivere come:

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

$$1 = r + a + t$$

(2. 10)

in termini di coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione.

Da un punto di vista pratico legato al mondo edile e civile, risultano di maggior interesse due ulteriori grandezze, strettamente correlate a quelle appena definite, ma che si prestano meglio a descrivere il comportamento acustico di un edificio. Queste sono il *coefficiente di assorbimento acustico apparente* α e il *potere fonoisolante* R ed esprimono rispettivamente la capacità del materiale costituente la parete di trattenere (assorbire) una quota dell'onda sonora incidente e di evitare la trasmissione della stessa verso l'ambiente confinante. Tali grandezze si esprimono come:

$$\alpha = 1 - r$$

(2. 11)

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{t} \right)$$

(2. 12)

Queste due grandezze sono strettamente connesse da un punto di vista della prestazione acustica che un edificio deve esplicare. Si pensi infatti a come non sia sufficiente utilizzare materiali solo fonoisolanti o solo fonoassorbenti per ottenere una buona acustica nell'ambiente e che soprattutto soltanto dall'unione di entrambe le caratteristiche è possibile soddisfare i requisiti minimi richiesti, come da D.P.C.M. del 5/12/1997 sui requisiti acustici passivi degli edifici menzionato precedentemente. A tal fine, la condizione esecutiva ottimale prevede l'accoppiamento di materiali differenti, ciascuno in grado secondo la propria natura di fornire all'edificio le proprietà di isolamento o assorbimento.

A titolo di esempio, si descrive l'andamento del potere fonoisolante R per pareti omogenee e definiti *sottili*, in rapporto a pareti pesanti quali quelle costruite in muratura per le quali sono validi leggi differenti. Nel dettaglio, come illustrato in *Figura 2.1*, il potere fonoisolante è funzione della frequenza del suono incidente sulla parete e può

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

essere descritto da una funzione matematica nella quale si possono osservare zone distinte tra loro.

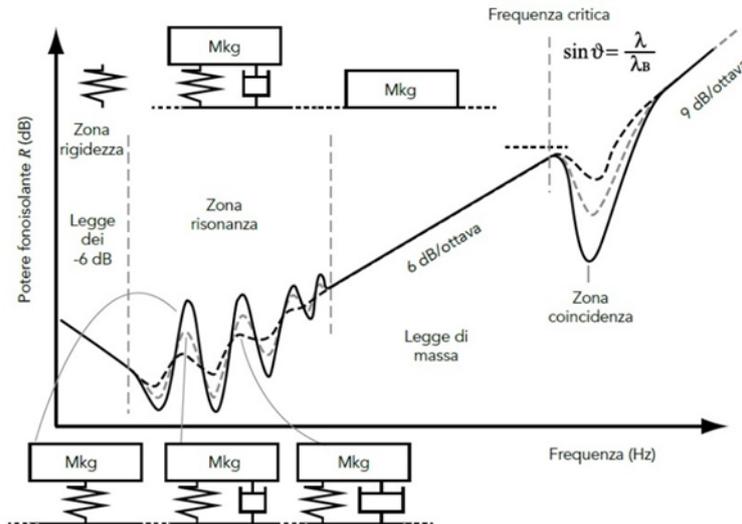


Figura 2.1. Andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza [4].

Si può notare come tale funzione abbia un minimo in corrispondenza di un valore di frequenza pari a quello di risonanza del sistema f_r . Questa frequenza è funzione di diversi fattori quali la massa per unità di superficie e la rigidezza, che a sua volta dipende dal *modulo di elasticità* e *modulo di Poisson* e da grandezze geometriche come *altezza*, *larghezza* e *spessore*. Sinteticamente può essere espresso dalla seguente formula:

$$f_r = \frac{Bh}{2\pi ab} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad [\text{Hz}]$$

(2.13)

Dove:

- B è una costante moltiplicativa pari a 10.4;
- h è lo spessore della parete sottile;
- a e b sono le dimensioni della parete;
- E è il modulo di elasticità della parete sottile;
- ν è il modulo di Poisson della parete sottile;
- ρ è la densità della parete sottile.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Nella *zona di risonanza* il potere fonoisolante oscilla con massimi e minimi in modo irregolare, rimanendo però sempre su valori piuttosto bassi. Quando la generica frequenza è minore di f_r , il comportamento globale è strettamente legato alla rigidità del sistema con una diminuzione di 6 dB ad ogni raddoppio di frequenza. Al contrario, quando la generica frequenza è compresa tra la frequenza di risonanza e la cosiddetta *frequenza critica* f_c , cioè quando $f_r < f < f_c$, si nota come il potere fonoisolante sia dettato dalla legge di massa, il che determina un aumento di 6 dB ogni raddoppio della frequenza. La frequenza critica è quella frequenza tale per cui la velocità delle onde flessionali, che si propagano nella struttura, è uguale alla velocità delle onde acustiche, che si propagano invece nell'aria. Qualora si raggiungesse questo valore di frequenza si assisterebbe ad un'unione tra le due tipologie di onde, strutturali e acustiche, la cui conseguenza sarebbe un forte aumento della radiazione acustica della struttura ed una netta diminuzione del potere fonoisolante. La zona del grafico in cui si nota questa netta diminuzione è detta *zona coincidenza*. In ultimo, per frequenze maggiori della frequenza critica, il potere fonoisolante cresce nuovamente con un aumento di 9 dB al raddoppio di frequenza.

2.2 ISOLAMENTO ED ASSORBIMENTO ACUSTICO IN EDILIZIA

Come mostrato nei capitoli precedenti l'andamento teorico del potere fonoisolante per un pannello sottile omogeneo *monostrato* presenta una legge specifica in funzione della frequenza, all'interno della quale si possono osservare frequenze note come la frequenza di risonanza, la frequenza critica e la frequenza di coincidenza.

Qualora aumentasse lo spessore della parete, non variando le altre grandezze in gioco, si assisterebbe sperimentalmente ad un aumento della frequenza di risonanza e ad una contestuale diminuzione della frequenza critica, nonché ad un sostanziale aumento del potere fonoisolante nel range di frequenze tra f_r e f_c : in questo range vige infatti la legge di massa, e pertanto, si può affermare che al crescere della massa del pannello si ha un conseguente aumento del potere fonoisolante.

La validità di questa legge cessa qualora lo spessore della lastra diventasse così elevato da far decadere il modello e le ipotesi di lastra sottile. In questo caso, infatti, l'elevato spessore del pannello, farebbe nascere fenomeni di *risonanza di spessore* osservabili alle alte frequenze, che comporterebbe una sensibile riduzione del potere fonoisolante. In *Figura 2.2* infatti, si nota come l'aumento dello spessore agisce in modo tale che la frequenza di coincidenza scenda sino ai 150 Hz e contestualmente sorgano fenomeni di risonanza di spessore intorno ai 5000 Hz; tale andamento è tipico di pareti con spessore fino ai 15 cm - 20 cm.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

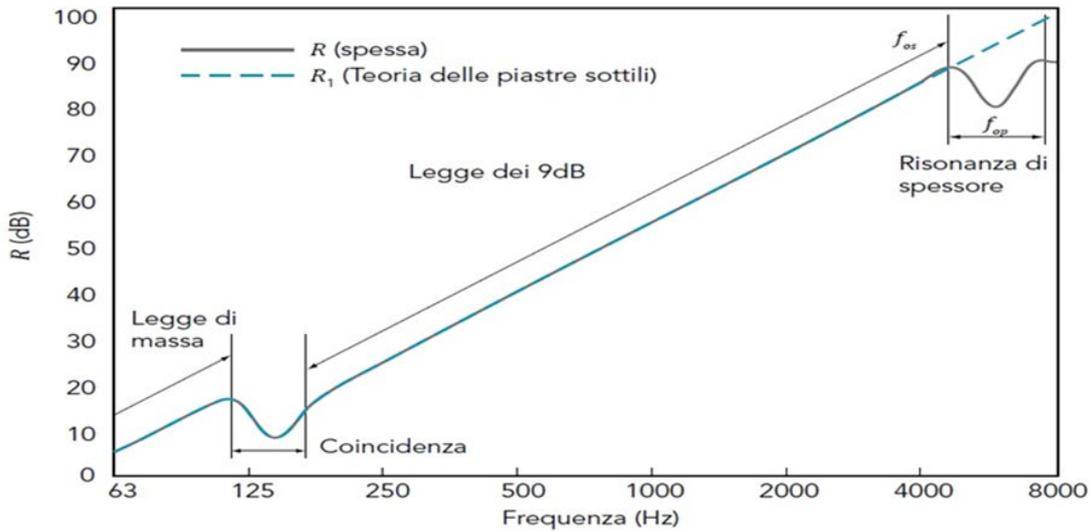


Figura 2.2. Variazione della legge del potere fonoisolante per aumento spessore [4].

Tale fenomeno si manifesta prettamente nelle pareti non omogenee di elevato spessore, quali quelle perimetrali costituite prevalentemente in muratura. Ciò che accade è che per questa tipologia di pareti vi sia una difficoltà nella determinazione della zona di coincidenza che risulterà pertanto ricadere in un range di frequenze compreso tra la frequenza critica minima e quella massima. Se ci poniamo a frequenze maggiori della frequenza critica massima osserveremo un andamento teorico del potere fonoisolante non troppo dissimile da quello che si osserva nel caso di parete omogenea risultando valida una legge di aumento del potere fonoisolante R di 6 dB al raddoppio della frequenza.

Considerando invece il comportamento di una parete multistrato, quale ad esempio una parete doppia, è opportuno introdurre leggi e comportamenti differenti, che tengano in conto anche dello spessore dell'intercapedine tra i due pannelli che solitamente viene considerato per migliorare le prestazioni acustiche del pacchetto d'insieme, sia nel caso che tale vuoto sia riempito con materiale fonoassorbente sia nell'eventualità che non lo sia. A riempimento dell'intercapedine vengono pertanto inserite solitamente lastre di materiale poroso che possiedono la peculiarità di avere una buona *resistività al flusso d'aria* [$\frac{Pa \cdot s}{m^2}$]. Si noti, infatti, in *Figura 2.3* come si possa apprezzare un aumento del potere fonoisolante della doppia parete al variare del materiale fonoassorbente posto nell'intercapedine. In *Figura 2.4*, invece si osservi come sia di rilievo anche la

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

percentuale di cavità riempita con materiale fonoassorbente, e che sebbene questo raggiunga il suo massimo valore per percentuali di riempimento pari al 88% è bene precisare che nella pratica costruttiva si tende a non superare i 2/3 del vuoto al fine di garantire una certa facilità nell'assemblaggio della parete.

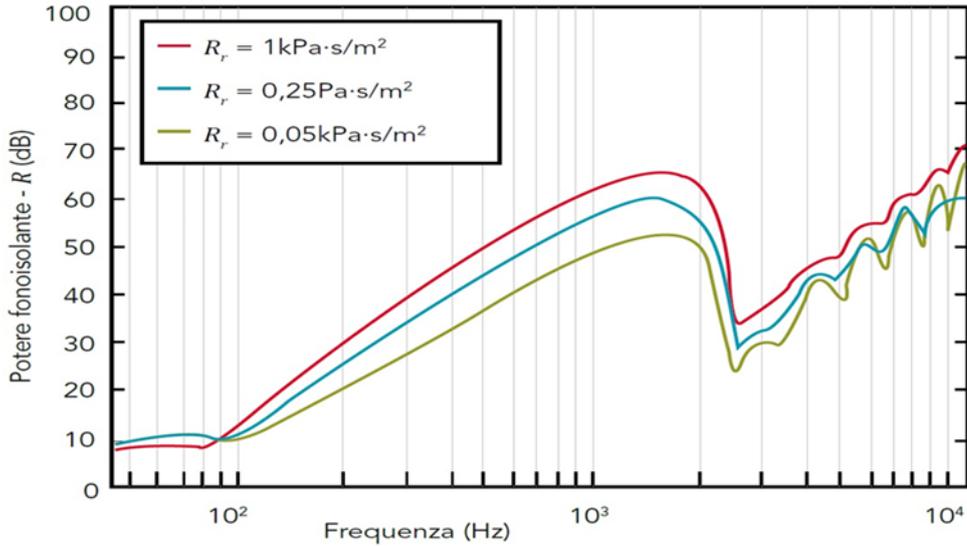


Figura 2.3. Andamento di R al variare del materiale fonoassorbente all'interno della cavità [4].

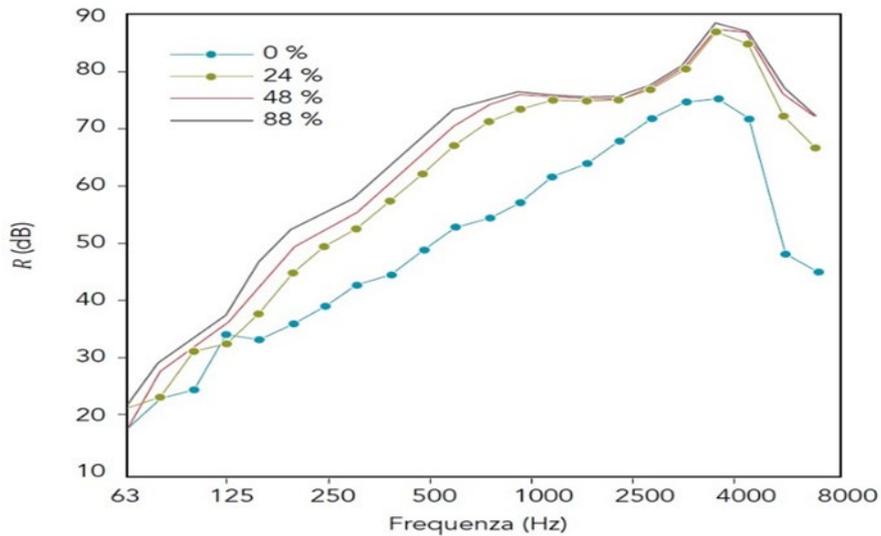


Figura 2.4. Andamento di R al variare della percentuale di riempimento con materiale fonoassorbente [4].

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Per quanto concerne *l'assorbimento acustico* invece è opportuno considerare nel dettaglio quali sono i materiali adatti a svolgere questo compito e in quali diverse modalità questi sono capaci di assorbire l'onda sonora. I materiali utilizzati per l'assorbimento acustico si possono dividere in:

- Materiali porosi;
- Risuonatori acustici o di Helmholtz;
- Pannelli vibranti che sfruttano la risonanza del pannello.

Si riporta in *Figura 2.5*, *Figura 2.6* e *Figura 2.7*, esempi rispettivamente di materiali porosi, risuonatori acustici e di pannelli vibranti.



Figura 2.5. Materiali porosi per assorbimento acustico [5].



Figura 2.6. Esempio di risonatore di Helmholtz [6].

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA



Figura 2.7. Pannelli vibranti per assorbimento acustico [7].

Ciascuna delle tipologie sopra elencate viene applicata in un range specifico di frequenze, dove risulta esplicitare un maggiore assorbimento acustico. Infatti, si è osservato come i materiali porosi riescano ad esplicitare un *coefficiente di assorbimento* α di 0.7 a 5.000 Hz, mentre per i risuonatori acustici si raggiunge il valore di 1 a circa 100 Hz e infine per i pannelli vibranti la frequenza di riferimento si aggira sugli 80 Hz, in corrispondenza della quale il coefficiente α raggiunge il valore di 0.7.

Per quanto concerne i materiali porosi si può affermare che il fenomeno dell'assorbimento acustico è dettato dalla trasformazione in calore dell'energia meccanica trasportata dall'onda sonora per il tramite dell'attrito che si manifesta all'interno delle micro-cavità esposte all'aria. Infatti, il suono incidente fa vibrare l'aria presente all'interno dei pori che dissipa energia per attrito viscoso. Tipici materiali fonoassorbenti sono le fibre minerali, le lane minerali, i poliuretani espansi, le fibre vegetali, le schiume melamminiche, le fibre di poliestere ecc. In generale vale la tendenza per cui un alto valore di coefficiente di assorbimento si ha alle alte frequenze, mentre alle basse aumenta con l'aumentare dello spessore del pannello. Tuttavia, è possibile ottenere un valore alto di coefficiente di assorbimento ad una frequenza specifica, immaginando di posizionare un pannello sottile di materiale fonoassorbente ad una distanza specifica d dalla parete rigida che si sta trattando. Tale fenomeno si spiega considerando che l'assorbimento è massimo laddove è massima la velocità delle

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

particelle d'aria. Immaginando infatti di trattare una parete perfettamente rigida, in prossimità di questa la velocità delle particelle d'aria sarà nulla e di conseguenza anche l'assorbimento garantito dal pannello fonoassorbente. Al contrario, un pannello di materiale fonoassorbente garantirà il massimo assorbimento se posto ad una distanza pari ad un quarto o tre quarti della lunghezza d'onda dell'onda incidente.

I risuonatori acustici di Helmholtz sono costituiti da una cavità delimitata da pareti rigide e collegata verso l'esterna da un collo di data lunghezza e sezione. All'interno del collo vi è una massa d'aria che vibra quando colpita dall'onda sonora. Tale massa, insieme a quella contenuta nella cavità, rappresenta un sistema del tipo massa-molla-molla: la dissipazione di energia acustica è garantita proprio dalle oscillazioni del sistema descritto, in particolare in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema calcolata come:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{V(l + 1.6r)}} \quad [Hz]$$

(2.14)

Dove " c_0 " è la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato, "r" è il raggio del collo del risuonatore mentre l è la lunghezza del collo del risuonatore; "V" infine è il volume della cavità. Il risuonatore è in grado di avere un picco di assorbimento in corrispondenza della frequenza di risonanza qualora la cavità del risuonatore fosse vuota poiché quella è l'unica frequenza in grado di penetrare nella cavità. Solitamente però i risuonatori sono riempiti da materiale poroso, descritto in precedenza, permettendo così al risuonatore di risultare in grado di assorbire un range di frequenze maggiore. L'andamento del coefficiente di assorbimento α in funzione della frequenza del suono incidente è descritto in *Figura 2.8*, nella quale sono riportati i casi di risuonatore con o senza aggiunta di materiale poroso fonoassorbente all'interno.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

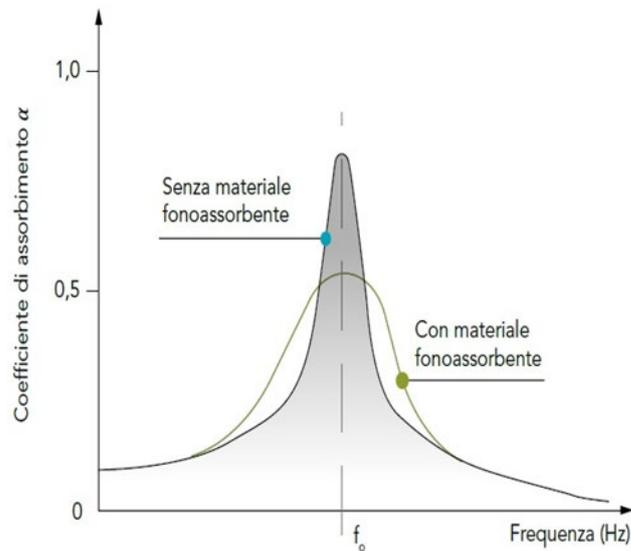


Figura 2.8. Andamento del coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza [4].

In ultimo, vengono presentati i pannelli vibranti, costituiti da lastre di materiale non poroso quale ad esempio il compensato, montate su un telaio il cui compito è quello di distanziarle dalla superficie da trattare, creando così un'intercapedine d'aria. Quando vengono investiti dall'onda sonora i pannelli fonoassorbenti vibrano assorbendo energia acustica. Per questa tipologia di elementi assorbenti vi è una stretta relazione tra onda sonora e vibrazioni flessionali, dal momento che la dissipazione di energia sonora si ha solo nel momento in cui i pannelli vibrano secondo i modi propri, caratterizzati da differenti frequenze proprie. L'effetto assorbente maggiore si ha in corrispondenza del modo fondamentale di vibrazione, ovvero alla sua frequenza fondamentale, mentre in corrispondenza dei modi di ordine superiore al fondamentale si osserva una diminuzione dell'effetto assorbente.

La determinazione delle proprietà di assorbimento di un determinato materiale viene effettuata sperimentalmente per mezzo del *tubo ad impedenza ad onde piane*, o *tubo di Kundt*.

Tale strumento, il cui funzionamento verrà illustrato dettagliatamente nel *Capitolo 2.5.2*, vede al suo interno il propagarsi di onde acustiche incidenti e riflesse dal momento che, come ribadito più volte, l'onda sonora incidente viene in parte riflessa, in parte trasmessa e in parte assorbita.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

L'onda incidente, ed in particolare la pressione dell'onda sonora incidente, può essere descritta da una forma cosinusoidale, o analogamente sinusoidale, del tipo:

$$p_i = A \cos(2\pi f t) \quad (2.15)$$

mentre quella dell'onda riflessa è caratterizzata dalla forma:

$$p_r = B \cos\left(2\pi f \left(t - \frac{2x}{c}\right)\right) \quad (2.16)$$

dove:

- A è l'ampiezza dell'onda incidente;
- B è l'ampiezza dell'onda riflessa;
- f è la frequenza;
- t è il tempo;
- x è la distanza dalla superficie del campione che si sta testando;
- c è la velocità della luce.

Di conseguenza, la pressione complessiva presente all'interno del tubo, misurabile con apposito microfono, si ottiene dalla somma delle due componenti p_i e p_r .

Il coefficiente di assorbimento, nonché la grandezza oggetto di interesse per lo studio delle caratteristiche fonoassorbenti dei materiali, si può determinare come:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \quad (2.17)$$

Per meglio comprendere la natura di tale grandezza, si riporta in *Tabella 2.2* un elenco di materiali di uso comune in edilizia e il relativo coefficiente di assorbimento.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Materiale	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Piastrelle smaltate	0.01	0.01	0.02	0.02
Pavimento in legno su travetti in legno	0.15	0.10	0.10	0.08
Tende drappeggiate su supporto solido	0.40	0.50	0.60	0.70
Tappeto spesso su sottostrato in feltro	0.30	0.60	0.75	0.80
Polistirene espanso, spessore 25 mm, distanziato di 50 mm da supporto rigido	0.55	0.20	0.10	0.15
Intonaco acustico a spray, spessore 12 mm, su supporto rigido	0.50	0.80	0.85	0.60
Lana di vetro, spessore 50 mm, su supporto rigido	0.50	0.90	0.98	0.99
Parete in muratura con intonaco di gesso	0.02	0.03	0.04	0.05
Parete in muratura con intonaco civile	0.03	0.04	0.04	0.04
Pavimento in gomma	0.04	0.06	0.08	0.08
Vetrata di grosso spessore	0.04	0.03	0.02	0.02

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Lana di roccia, spessore 5 cm	0.65	0.76	0.78	0.85
Lana di vetro ricoperta da lamierino metallico forato per il 15% dell'area	0.75	0.85	0.75	0.70
Pannello di fibre di legno, incollato	0.40	0.50	0.50	0.40

Tabella 2.2. Coefficiente di assorbimento acustico di materiali di uso comune in edilizia.

Ciò che si può constatare è che la capacità dei materiali elencati di assorbire l'onda sonora varia ovviamente in funzione della frequenza e che quindi in funzione del contesto in cui gli stessi vengono usati possono dimostrarsi dei pessimi o degli ottimi materiali fonoassorbenti.

La lana di vetro, ad esempio, è completamente assorbente ai 4000 Hz ma anche già sopra i 1000 Hz, ma troverebbe scarso impiego per contesti in cui le onde sonore abbiano una frequenza vicina ai 500 Hz. Allo stesso tempo, materiali come le piastrelle smaltate non hanno alcuna funzione fonoassorbente, visto l'andamento del coefficiente di assorbimento che si aggira intorno allo 0.01 in tutti i range di frequenza.

2.3 MISURE SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE ACUSTICHE E INDICI DI VALUTAZIONE

Sono di seguito riportate le metodologie standardizzate per la misura delle grandezze acustiche di interesse nel presente lavoro sperimentale, nonché la definizione degli indici di valutazione delle stesse.

2.3.1 MISURE SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE ACUSTICHE

Nel capitolo precedente si è discusso dei due concetti fondamentali in merito al rapporto tra il fenomeno acustico e il mondo edile e civile. Si è parlato infatti di isolamento acustico e assorbimento acustico e si è visto come questi due concetti distinti tra loro siano strettamente connessi nel momento in cui si voglia valutare la prestazione offerta ad esempio da una parete all'interno di un edificio, nei confronti di rumori proveniente da un'abitazione adiacente. L'isolamento acustico ci dà quindi un'indicazione dell'aliquota di onda sonora che non viene trasmessa nell'ambiente adiacente, mentre l'assorbimento indica invece qual è la aliquota di suono che non viene riemessa nella stanza in cui è presente la sorgente acustica, evitando così fastidiosi riverberi o echi. In merito a quest'ultima osservazione, si pensi a come sono realizzati le *camere anecoiche*, all'interno delle quali le pareti sono ricoperte da prismi costituiti da materiale poroso e che presentano numerose facce in modo da massimizzare l'assorbimento dell'onda sonora.

In generale però, la valutazione dell'efficienza di una parete o di un setto nei confronti del suono viene fatta attraverso misure sperimentali di isolamento acustico, il quale può essere però positivamente influenzato dalla presenza di uno strato di materiale fonoassorbente all'interno della stessa parete; ecco che quindi materiali fonoisolanti e fonoassorbenti concorrono entrambi al raggiungimento di un livello ottimale di isolamento acustico.

Ciò che convenzionalmente si misura in termini di grandezze correlate all'isolamento acustico è:

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

- *il potere fonoisolante;*
- *il potere fonoisolante apparente;*
- *l'isolamento acustico di facciata;*
- *il rumore di calpestio;*
- *il rumore da pioggia.*

Il *potere fonoisolante R* si determina in laboratorio secondo quanto indicato nella norma UNI EN ISO 10140-1 [8]. Nel dettaglio, sono presenti due ambienti distinti, uno disturbante e l'altro ricevente, sperati da giunti elastici e realizzati su fondazioni distinte in modo tale da minimizzare la trasmissione laterale di energia sonora: la misura, infatti, considera nullo questo contributo nel computo totale del potere fonoisolante. La misura del potere fonoisolante R viene fatta secondo la seguente formula:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad [dB]$$

(2. 18)

Dove:

- L_1 è il livello di pressione sonora alle varie frequenze misurato nell'ambiente disturbante (ovvero quello al cui interno è presente la sorgente sonora);
- L_2 è il livello di pressione sonora alle varie frequenze misurato nell'ambiente ricevente;
- S è la superficie del setto divisorio;
- A è l'area equivalente di assorbimento acustico nell'ambiente ricevente.

Il *potere fonoisolante apparente R'* è analogo al potere fonoisolante R ma tiene conto della trasmissione sonora laterale, oltre a quella diretta. La differenza sostanziale tra i due indicatori descritti è che mentre la misura di R viene eseguita in laboratorio, quella di R' viene eseguita direttamente in opera, motivo per la quale decade l'ipotesi di trasmissione laterale nulla, che è valida solo nel caso ideale ricreato in laboratorio. In *Figura 2.9.* sono evidenziati i percorsi diretti e indiretti dell'onda sonora, che contribuiscono a diminuire il valore del potere fonoisolante.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

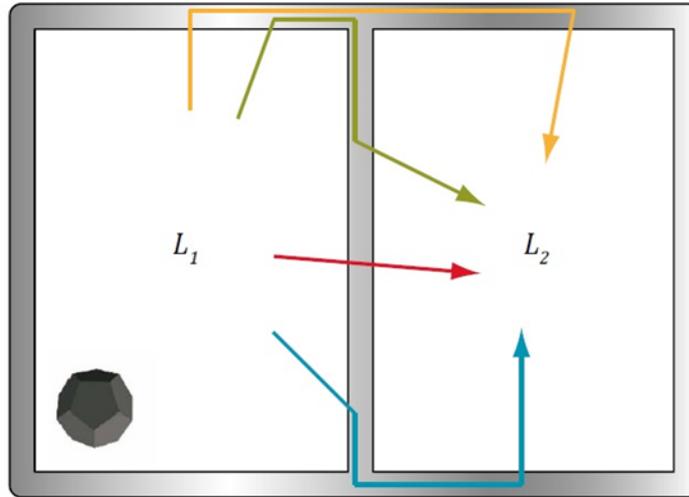


Figura 2.9. Contributi di energia sonora diretta e trasmessa [4].

In alternativa, si è soliti valutare l'isolamento acustico di un setto in opera attraverso la determinazione dell'*isolamento acustico normalizzato* D_n o dell'*isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione* D_{nT} , che valgono rispettivamente:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad [dB] \quad (2.19)$$

$$D_{nT} = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [dB] \quad (2.20)$$

Dove:

- A_0 è l'area di riferimento e vale 10 m^2 per le abitazioni;
- T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente;
- T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento e vale 0.5 per le abitazioni.

Il *tempo di riverberazione* si definisce come il tempo necessario affinché la densità di energia sonora diminuisca fino a raggiungere il valore di *densità di energia sonora di regime*, una volta spenta la sorgente sonora all'interno di un ambiente. Il tempo di riverberazione è quindi una misura della coda sonora che segue un fenomeno acustico,

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

nel momento in cui il fenomeno sonoro cessa, e può essere espresso dalla seguente espressione:

$$T = 0.161 \frac{V}{\sum a_i s_i + \sum A_i} \quad [s] \quad (2.21)$$

Dove:

- A_i è l'area equivalente di assorbimento acustico [m^2];
- s_i è la superficie i-esima;
- a_i è il coefficiente i-esimo di assorbimento acustico apparente, come definito in precedenza;
- V è il volume dell'ambiente.

L'*isolamento acustico di facciata* fornisce un'indicazione di quanto un ambiente possa essere isolato dai rumori esterni, quali ad esempio quelli rappresentati dal traffico, per mezzo di una facciata. Questa grandezza rappresenta un indicatore acustico fondamentale ai sensi del D.P.C.M. del 5/12/1997 [9] sui requisiti acustici passivi, all'interno del quale si richiede esplicita verifica del superamento degli indicatori minimi. A seconda che la prova per la determinazione dell'isolamento acustico di facciata sia condotta simulando i rumori esterni con rumori di traffico reale o simulati con altoparlante, si distinguono gli indicatori $D_{tr,2m,nT}$ (traffico) e $D_{2m,nT}$ (altoparlante). L'indicatore $D_{2m,nT}$ si definisce come nell'espressione sottostante:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad [dB] \quad (2.22)$$

Dove:

- $L_{1,2m}$ rappresenta il livello di pressione sonora all'esterno dell'ambiente oggetto di prova, misurato a 2 metri davanti alla facciata;
- L_2 è la misura del livello medio di pressione sonora nell'ambiente interno;
- T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente;

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

- T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento e vale 0.5 s per le abitazioni.

Gli indicatori sopra citati costituiscono solo una parte di quelli che il D.P.C.M. del 5/12/1997 sui requisiti acustici passivi considera nella valutazione dell'isolamento globale di un edificio; la norma infatti prende in esame anche l'isolamento nei confronti del rumore di calpestio e nei confronti del rumore da pioggia, i quali però verranno esaminati a completezza della trattazione in apposito capitolo dedicato all'applicazione della norma.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

2.3.2 INDICI DI VALUTAZIONE

Come si è definito in precedenza l'isolamento acustico di un edificio viene valutato in relazione a diverse grandezze in gioco, ciascuna delle quali si riferisce ad uno specifico aspetto dell'isolamento. La misura di questi indicatori costituisce un mezzo efficace per poter ricostruire l'andamento della grandezza descrittrice in funzione della frequenza, nel dettaglio in bande di 1/3 di ottava, in un range compreso tra 100 Hz e 3150 Hz per le misurazioni in opera e tra 100 Hz e 5000 Hz per le misure in laboratorio. La rappresentazione dei vari indicatori in funzione della frequenza risulta però meno conveniente in termini pratici alla rappresentazione tramite gli *indici di valutazione*. Questo metodo ha il vantaggio di esprimere in un singolo numero la grandezza in questione, sia essa il potere fonoisolante, il potere fonoisolante apparente o altri, per poterlo confrontare direttamente con il limite di legge per una data categoria di edificio. Il valore dell'indice di valutazione della grandezza generica si ottiene muovendo la sua curva di *riferimento*, ricavata da normativa, nel senso delle ordinate di ± 1 dB rispetto alla curva della grandezza in esame ricavata sperimentalmente, immaginando di eseguire tale operazione in un grafico che abbia in ascissa la frequenza espressa in Hz e in ordinata il potere fonoisolante espresso in dB. All'interno di questo grafico quindi, si sposterà la curva di riferimento rispetto alla curva sperimentale per passi di 1 dB fintanto che la somma degli scostamenti favorevoli tra le due curve, ovvero quei tratti in cui la curva sperimentale presenti un valore dell'indicatore di riferimento inferiore alla curva di riferimento, divisa per il numero totale di bande di frequenza considerate, non sia inferiore o uguale a 2 dB, specificando che il numero totale di bande di frequenza sono pari a 16 per i terzi di ottava e 5 per le ottave. Nel dettaglio quindi, al fine di garantire i suddetti 2 dB è necessario che la somma degli scostamenti sfavorevoli sia pari a 32 dB per i terzi di ottava e pari a 10 dB per le ottave.

A titolo esemplificativo, si declina quanto detto in relazione al potere fonoisolante, specificando che il medesimo ragionamento si potrebbe compiere per tutti gli indicatori acustici sopra citati (potere fonoisolante apparente ecc.). Si osservi infatti in *Figura 2.10* come le due curve, sperimentale e di riferimento, scostino per ogni frequenza l'una dall'altra di un "delta" di decibel. Tali delta possono essere in generale sia favorevoli,

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

ovvero nel caso in cui il potere fonoisolante nella curva sperimentale ad una fissata frequenza sia superiore al valore di potere fonoisolante della curva di riferimento alla medesima frequenza, sia sfavorevoli. Immaginando di sommare solamente gli scostamenti sfavorevoli e dividerli per il numero totale di bande di frequenza considerate, qualora il risultato fornisse un valore vicino ai 2 dB sarebbe rispettata la condizione per determinare l'indice di valutazione del potere fonoisolante. Tale valore, infatti, si determinerà come il valore di potere fonoisolante valutato sulla curva di riferimento ad una frequenza di 500 Hz e si definirà come *indice di valutazione del potere fonoisolante* R_w .

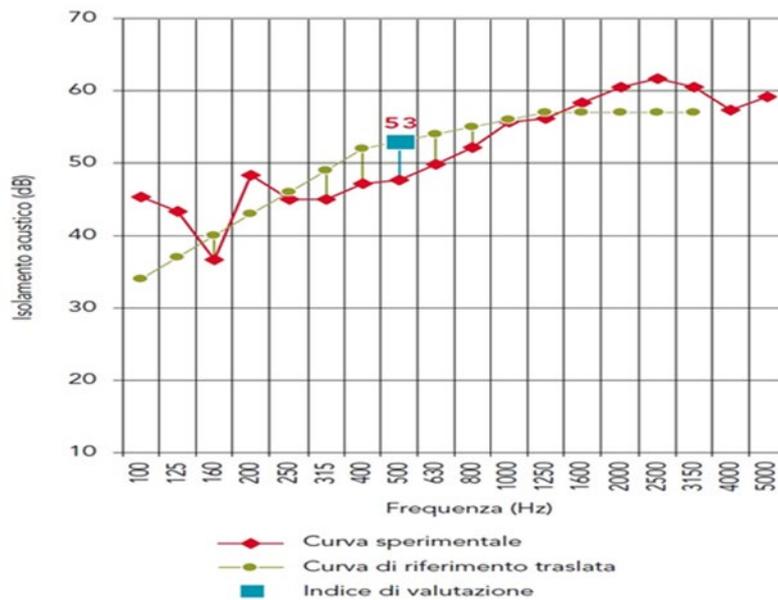


Figura 2.10. *Indice di valutazione del potere fonoisolante [4].*

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

In *Figura 2.11* si riporta invece l'indice di valutazione del rumore di calpestio $L_{n,w}$.

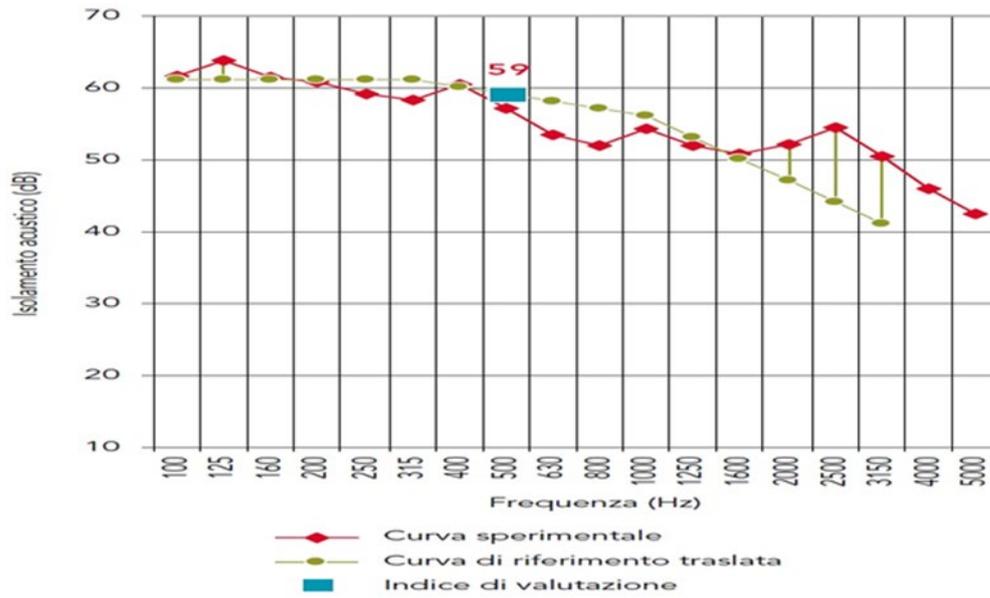


Figura 2.11. Indice di valutazione del rumore di calpestio [4].

2.4 ACUSTICA E SCHIUME METALLICHE

L'introduzione di alcuni principi e concetti base dell'acustica risulta necessaria al fine di declinare la trattazione all'interno di una categoria di materiali ancora poco approfondita ma in costante sviluppo: le schiume metalliche. All'interno di questa trattazione si farà cenno quindi a quelli che possano essere i campi di applicazione delle schiume da un punto di vista acustico, in relazione al mondo edile e civile.

Tali applicazioni sono correlate ovviamente alla potenziale capacità delle schiume metalliche di fungere da materiale isolante e assorbente nei confronti dell'onda sonora, garantendo una buona qualità acustica all'interno degli edifici. Questa capacità è strettamente legata al comportamento che un generico pannello costituito da schiuma, ed eventualmente integrato in un sistema a sandwich con altri materiali, abbia nel contesto edilizio. Si richiama pertanto la *Figura 2.1* in cui è illustrato l'andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza di un pannello generico sottile, dove questo termine si associa ad esempio a divisori interni leggeri costituiti spesso da lastre in cartongesso ed eventualmente integrate con pannelli costituiti da materiale fonoassorbente. Come si è già illustrato in precedenza si distinguono all'interno del grafico diverse zone di interesse, in ciascuna delle quali è preponderante la dipendenza del comportamento globale del pannello dalla sua massa piuttosto che dalla sua rigidità. Alle basse frequenze, nella zona governata dalla "legge dei 6 dB", ovvero quella tale per cui si assiste ad una diminuzione dell'isolamento di 6 dB per ogni raddoppio della frequenza, è preponderante la rigidità del pannello sul suo comportamento globale. Per tale motivo l'utilizzo di metalli cellulari o schiume metalliche, come ad esempio quelle di alluminio oggetto della presente trattazione, possono rappresentare un punto di forte interesse dato il loro alto rapporto tra rigidità e densità, esprimibile come rapporto tra *modulo di Young E* ed il cubo della *massa volumica* del pannello ρ : tale valore si aggira infatti sull'ordine di $40 \frac{m^8}{s^2kg^2}$ per le schiume di alluminio, in confronto a $3.5 \frac{m^8}{s^2kg^2}$ dell'alluminio bulk e lo $0.4 \frac{m^8}{s^2kg^2}$ dell'acciaio.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

A frequenze più alte, l'isolamento offerto dal pannello dipende dal fenomeno della risonanza, per la quale si assiste ad oscillazioni di R [dB] attenuate dallo smorzamento che può offrire il pannello. Le schiume metalliche offrono un buon livello di smorzamento ed in questo range di frequenze possono dunque rappresentare una soluzione ottimale oltre ad essere in grado di spostare la prima frequenza di risonanza verso valori più alti andando ad allargare il range di frequenze in cui vige la legge di rigidità, dimostrando nuovamente come questa tipologia di materiale possa rappresentare una buona soluzione nei confronti dell'isolamento.

Di rilievo è anche la zona governata dalla massa, delimitata da un range di frequenze molto elevato. In questa gamma di frequenze il potere fonoisolante, o indice di riduzione sonora, aumenta con l'aumentare della massa superficiale del pannello; pertanto, le schiume metalliche in quanto materiali porosi e relativamente "leggeri" non trovano un ampio utilizzo.

A frequenze ancora maggiori, infine, sussiste il fenomeno della coincidenza tra le onde flessionali all'interno del pannello e quelle sonore; tale fenomeno ha quindi come conseguenza una diminuzione del potere fonoisolante e si riscontra quando il valore della frequenza sonora è pari alla *frequenza critica* del pannello, che risulta essere proporzionale a diverse grandezze, tra cui la radice quadrata della densità. Notoriamente le schiume metalliche hanno una bassa densità, se paragonate ai più comuni materiali utilizzati in edilizia, abbassando di conseguenza il valore della frequenza critica. Qualora la frequenza critica fosse vicina ai valori di frequenza sonora tipici del contesto edilizio renderebbe le schiume metalliche un materiale poco ottimale allo scopo.

Si riportano ora alcuni riferimenti a studi sperimentali condotti al fine di determinare il potere fonoisolante in laboratorio di campioni di schiume di alluminio, differenti tra loro per densità e dimensioni. Il potere fonoisolante, o "*insulation index*", oggetto degli studi proposti fa riferimento in particolare all'indice di valutazione del potere fonoisolante, così come descritto al capitolo "*4.2 INDICI DI VALUTAZIONE*". In questo modo è possibile esprimere con un singolo numero la capacità di un certo materiale di isolare dai suoni e/o rumori presenti.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Gli autori Yu, Yao, Wang, Li, Yin nel loro studio del 2006 [10] propongono alcuni risultati ottenuti nella determinazione sperimentale di R_w .

In particolare, sono state considerate diverse geometrie di provini di schiuma di alluminio con struttura a celle chiuse da testare, per un numero complessivo di cinque:

- densità pari a $\rho = 670 \text{ kg/m}^3$, spessori di 10 mm (*provino 1*), 20 mm (*provino 2*) e 30 mm (*provino 3*);
- spessore di 30 mm, densità pari a $\rho = 310 \text{ kg/m}^3$ (*provino 4*), $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$ (*provino 5*), $\rho = 670 \text{ kg/m}^3$ (*provino 6*, coincidente con il *provino 3*).

In *Figura 2.12*, *Figura 2.13* e *Figura 2.14* sono riportate le immagini relative alla struttura cellulare dei provini 4, 5 e 6.

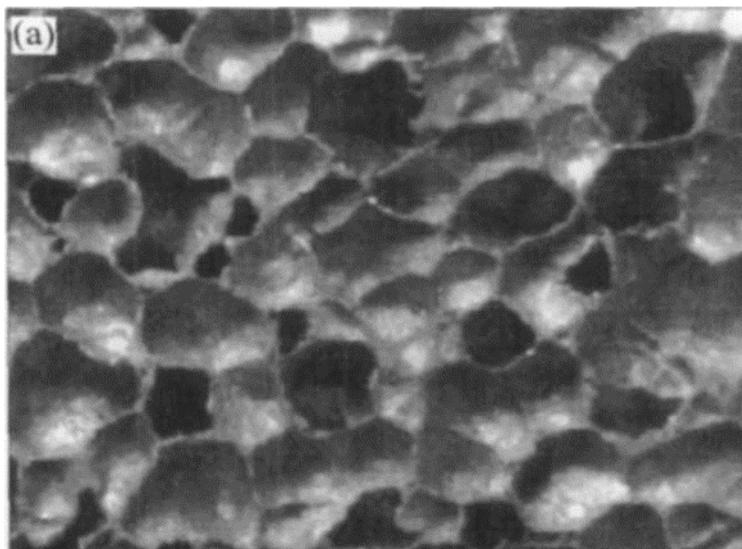


Figura 2.12. *Provino 4 – Densità 310 kg/m^3 , spessore 30 mm [10].*

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

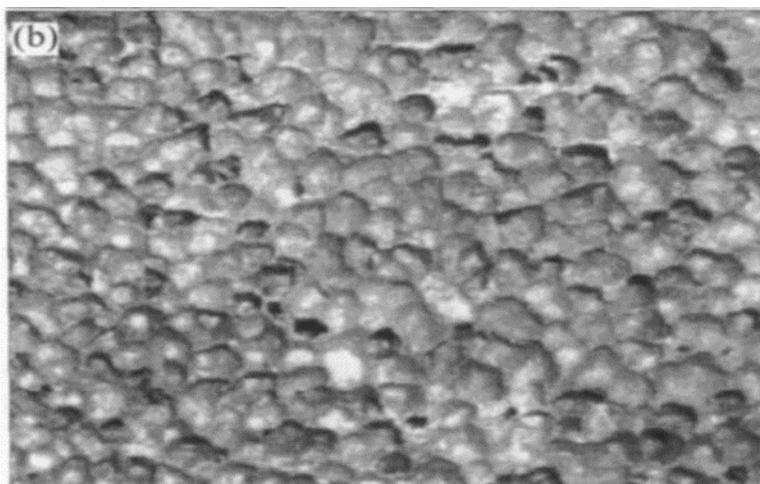


Figura 2.13. Provino 5 – Densità = 510 kg/m^3 , spessore 30 mm [10].

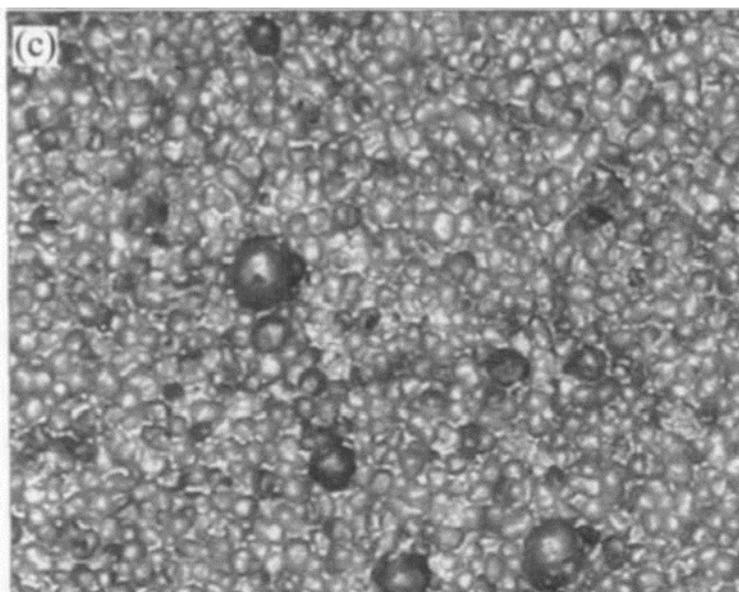


Figura 2.14. Provino 6 – Densità 670 kg/m^3 [10].

È importante sottolineare che il calcolo della densità dei provini sia tutt'altro che banale: mentre la massa è facilmente ricavabile con una bilancia di precisione, per il volume si è applicato il calcolo della media pesata al fine di determinare il volume occupato da tutte le pareti delle celle. Per tutti i campioni testati le dimensioni sono pari a 1240 mm di altezza e 1100 mm di larghezza, anche se le stesse si riducono a 1100 mm di altezza poiché il pannello è incastrato nella porzione di tramezzo esistente tra i due locali. All'interno del laboratorio di prova sono presenti quindi due locali distinti separati dal

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

pannello, uno al cui interno è presente la sorgente sonora e l'altro definito come ambiente ricevente. All'interno dei due ambienti sono posti cinque microfoni capaci di misurare la pressione sonora locale nel punto in cui ciascuno di essi è installato e si definiscono quindi L_{p1} e L_{p2} , ovvero il livello medio di pressione sonora all'interno rispettivamente dell'ambiente disturbante e di quello ricevente, come nelle seguenti espressioni: il potere fonoisolante R si ricaverà pertanto dalla $R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S}{A}$, enunciata in precedenza.

I risultati di tale campagna sperimentale hanno mostrato diversi aspetti sul comportamento della schiuma di alluminio testata, in primis la dipendenza del potere fonoisolante dallo spessore del campione, una volta fissata la densità. Infatti, si osserva in *Figura 2.15* e *Figura 2.16* che per i campioni 1, 2 e 3, ovvero quelli caratterizzati da densità $\rho = 670 \text{ kg/m}^3$ e spessori di 10 mm, 20 mm e 30 mm e per i campioni 3,4 e 5, ovvero quelli caratterizzati da spessore di 30 mm e densità pari a $\rho = 310 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 670 \text{ kg/m}^3$ il valore di R cresce con l'aumentare dello spessore variando in funzione della frequenza secondo il modello valido di parete sottile illustrato in *Figura 2.1*.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

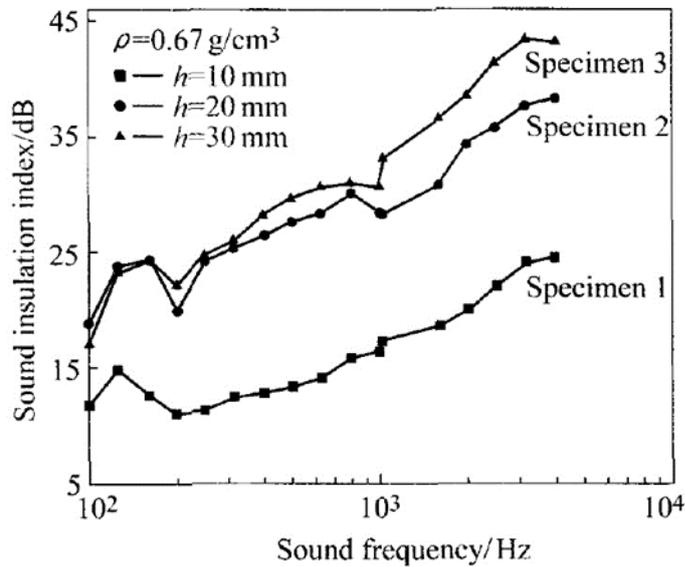


Figura 2.15. Potere fonoisolante dei provini 1, 2 e 3 [10].

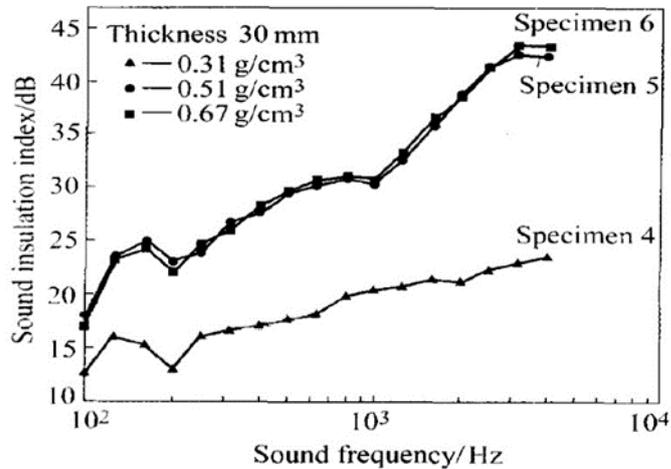


Figura 2.16. Potere fonoisolante dei provini 4, 5 e 6 [10].

Come si evince dai grafici proposti, i provini 3 e 5 sono quelli che presentano le migliori prestazioni nei confronti dell'isolamento, con valori vicini ai 40 dB (il campione 3 coincide con il 6): fissata la densità il potere fonoisolante aumenta con lo spessore del campione, mentre fissato lo spessore la prestazione acustica sarà maggiore con il crescere delle densità.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Tale informazione però è meno diretta rispetto a quella fornita dall'indice di valutazione del potere fonoisolante, il quale è stato calcolato dagli autori per ogni campione per poter esprimere con un solo valore la prestazione del materiale legata all'isolamento acustico, secondo la procedura di confronto con la curva di riferimento, come indicato precedentemente.

A titolo di esempio, si riporta in *Figura 2.17* il valore di R_w del campione 3 (coincidente con il campione 6) che risulta essere il più alto fra tutti i provini testati: esso, infatti, raggiunge il valore di 33.2 dB, rispetto al valore di 30.8 dB del campione 2 e al valore di 17.7 dB del campione 1.

È chiaro come il “salto” nella prestazione del materiale si apprezza maggiormente variando lo spessore dai 10 mm ai 20 mm, che non tra i 20 mm e i 30 mm, a parità di densità.

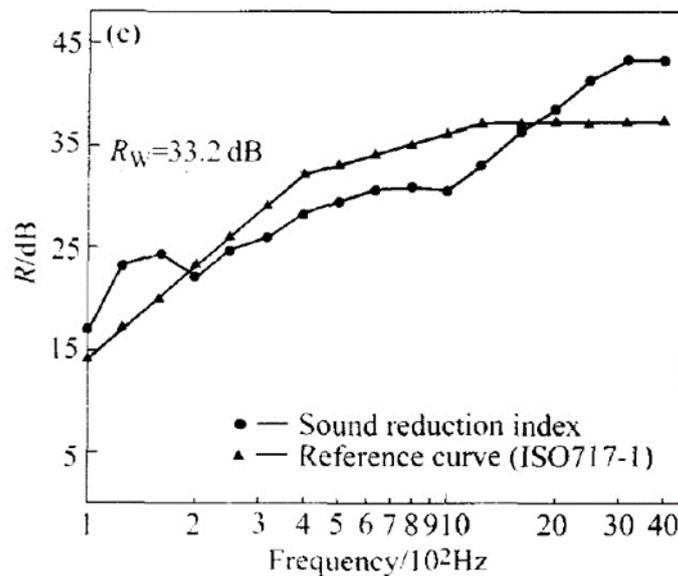


Figura 2.17. Indice di valutazione del potere fonoisolante del campione 3 [10].

Per quanto concerne l'assorbimento acustico invece, gli studi sperimentali hanno evidenziato come le schiume metalliche possano raggiungere prestazioni elevate in alcuni range di frequenza e soprattutto in presenza di celle aperte, in grado cioè di ricevere direttamente l'onda sonora e assorbirla per attrito viscoso, senza rifletterla.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Sono stati infatti eseguiti nel tempo differenti esperimenti al fine di determinare il coefficiente di assorbimento con lo scopo primario di poter determinare se tali materiali fossero in grado di pareggiare quantomeno i valori e le prestazioni fornite dai materiali più comunemente adottati in materia di assorbimento acustico, ovvero tutti quei materiali che possiedono un'alta permeabilità: polimeri a celle aperte come il poliuretano espanso o ancora materiali quali la fibra di vetro o fibra di lana minerale.

A differenza delle schiume metalliche però, i materiali citati possiedono alcuni svantaggi che in determinati casi potrebbero limitare il loro campo di applicazione. Infatti, i polimeri sono materiali infiammabili con conseguente sviluppo di gas tossici mentre i materiali fibrosi possono essere soggetti a sfilacciatura ed erosione dovute a vibrazioni o flusso d'aria.

Dal momento che la capacità di assorbire l'onda sonora dipende dalla permeabilità del materiale è intuitivo affermare che la struttura ottimale in tal senso sia quella a celle aperte, perché in caso contrario si avrebbe una riflessione del suono indesiderata. A tale scopo sono stati sviluppate tecnologie differenti per aumentare la percentuale di celle aperte all'interno del materiale quali quelle basate sulla compressione, sabbiatura e rollatura dimostrando che tanto più il materiale presenta una struttura aperta tanto più è alto il grado di assorbimento, legato prevalentemente a fenomeni di attrito viscoso.

Si noti ad esempio in *Figura 2.18* come vi sia un incremento netto nel coefficiente di assorbimento per una schiuma metallica *AluLight™* in una configurazione che presenti una percentuale di fori sul suo strato di rivestimento superficiale pari al 1.40 % della superficie totale rispetto al caso in cui tale percentuale sia inferiore.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

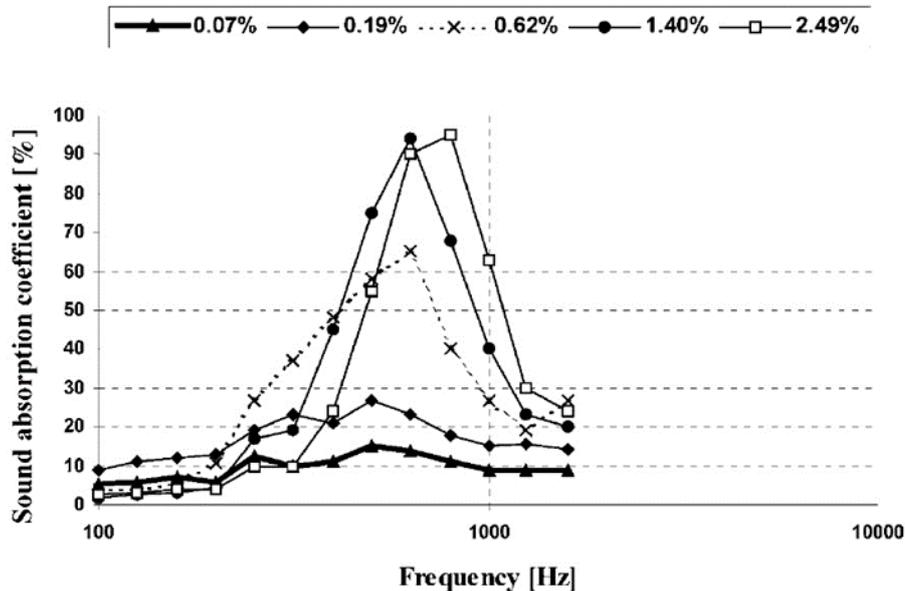


Figura 2.18. Incremento del coefficiente di assorbimento con forometria del 1,4% [2].

Ciò che va considerato è che l'effetto assorbente esplicabile da un pannello di schiuma di alluminio non dipenderà solo dal suo spessore, dalla sua densità o dalla dimensione dei pori bensì da una compartecipazione di questi fattori; la risposta del materiale, infatti è analizzabile fissando due parametri, o gradi di libertà, e facendo variare il rimanente. Si può affermare cioè che il coefficiente di assorbimento acustico sia una funzione reale di tre variabili.

Ad esempio, fissata densità e diametro medio dei pori l'assorbimento acustico aumenterà con l'aumentare dello spessore del pannello, sebbene questa soluzione sia spesso sconveniente poiché si raggiungerebbero pesi via via crescenti e poco funzionali all'interno dell'edificio e in fase di progettazione strutturale.

Evidenze sperimentali hanno però dimostrato che lo stesso livello di assorbimento si può ottenere utilizzando un pannello di spessore non elevato ma aggiungendo dietro allo stesso un gap d'aria, evitando quindi il contatto diretto con il supporto rigido da isolare. Ulteriormente, alcuni studi riportano l'andamento del coefficiente di assorbimento di una schiuma Alporas™ in funzione della frequenza, sia in condizione "vergine", ovvero senza essere modificata dopo la fabbricazione (Figura 2.19), e in condizione "modificata", cioè soggetta ad uno stato di compressione tale da rompere alcune celle costituenti la struttura. Si nota, infatti, in Figura 2.20 l'effetto della compressione sul

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

campione di schiuma: il coefficiente di assorbimento raggiunge infatti il valore di 0.90 a 2000 Hz e rimane pressoché costante per frequenze superiori.

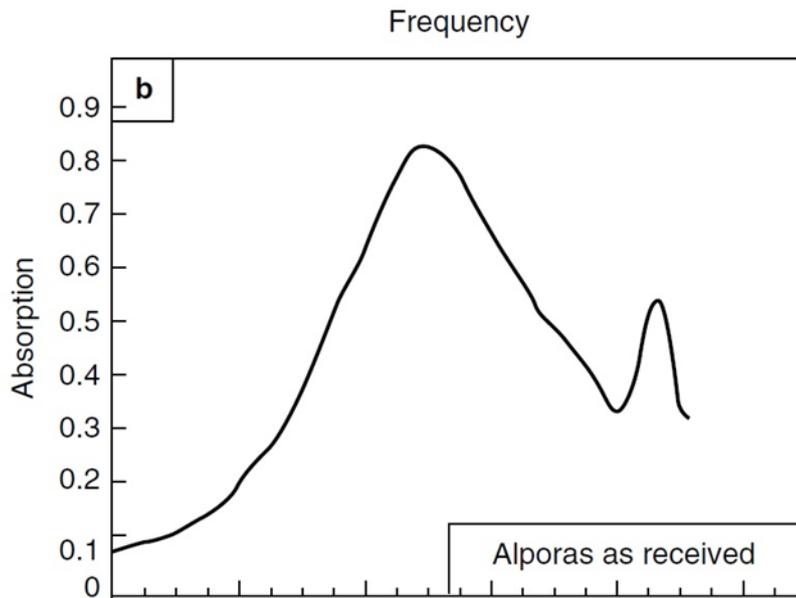


Figura 2.19. Coefficiente di assorbimento per campione di schiuma "vergine" [3].

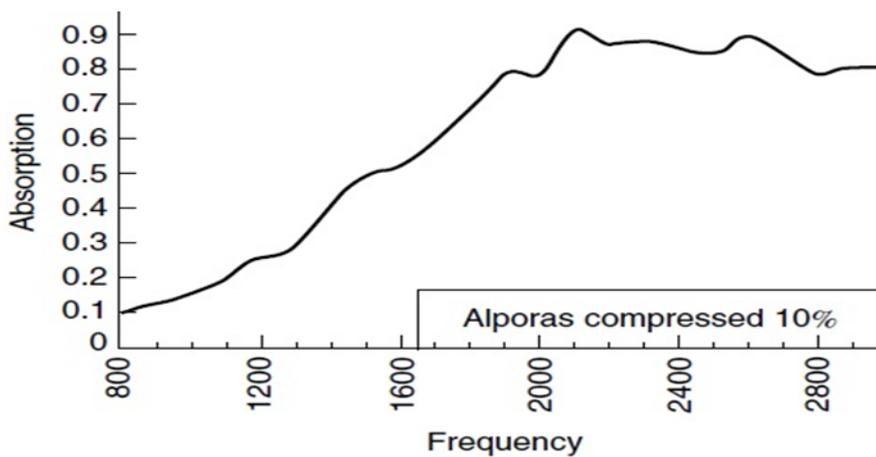


Figura 2.20. Coefficiente di assorbimento per campione di schiuma "modificata" a seguito di compressione [3].

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

A confermare quanto sopra descritto sull'assorbimento delle schiume di alluminio è lo studio condotto da Lu, Hess e Ashby nel 1999 presso l'Università di Cambridge [11]. Nel dettaglio, furono testati diversi campioni di un pannello di schiuma Alporas™ al fine di determinarne il coefficiente di assorbimento acustico, per mezzo del noto tubo ad impedenza o tubo di Kundt.

La schematizzazione della prova è elementare e prevede che all'interno del tubo sia posizionata una sorgente sonora ad un'estremità e il campione da testare a quella opposta. L'onda sonora emessa colpirà il campione, il quale “risponderà” assorbendo parte della stessa e in parte riflettendola.

Ciò che gli studiosi dimostrarono fu la correlazione tra *densità relativa* ρ_r e assorbimento a parità di spessore e contestualmente tra spessore e assorbimento, tenendo costante la densità relativa. Questa grandezza rappresenta in qualche modo la novità rispetto allo studio visto in precedenza condotto in Cina: definendo la densità relativa come rapporto tra la densità della schiuma e quella del metallo solido da cui essa deriva, si dimostrò che al diminuire di questa grandezza l'assorbimento acustico invece migliorava.

Come già accennato, inoltre, venne dimostrato come la foratura della superficie del campione o la rottura per compressione delle celle delle schiume portarono un notevole aumento in termini di assorbimento, se considerato il relativo basso assorbimento acustico di una schiuma cosiddetta “as-received”, ovvero sottoposta a prova senza preliminare foratura o compressione ma mantenuta nelle stesse condizioni che possedeva al termine della sua produzione.

I set di prova furono i seguenti:

- a) provini “as received” posizionati contro parete rigida all'interno del tubo: spessore 10 mm e densità relativa $\rho_r = 0.09; 0.13; 0.15$;
- b) provini “as-received” posizionati contro parete rigida all'interno del tubo: densità relativa $\rho_r = 0.09$ e spessore H [mm] = 6; 10; 20; 40; 50;
- c) provini soggetti a rollatura: $\rho_{r, iniziale} = 0.09$. Per questa categoria di campioni si può apprezzare una differenza tra la densità relativa misurata prima della

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

compressione, $\rho_{r,iniziale}$, e una a seguito della compressione, $\rho_{r,finale}$. I provini, pertanto, risultano avere spessore H [mm] = 5; 9; 15 e rispettivamente

$$\rho_{r,iniziale} = 0.188; 0.189; 0.133;$$

- d) provini soggetti a compressione: spessore iniziale $H = 20$ mm e densità relativa iniziale pari a 0.09.
- e) provini soggetti a foratura (“hole drilling”), con diametro dei fori pari a 1 mm e 2 mm: spessore del provino H [mm] = 20 mm, densità relativa $\rho_r = 0.09$.

Vengono quindi ora proposti e analizzati criticamente i risultati che lo studio in oggetto ha portato.

Relativamente alla categoria di provini a), come si evince dalla *Figura 2.21*, si è potuto notare come il campione che sembra assorbire maggiormente è quello con densità relativa minore, sebbene con un valore di α , relativamente basso, non superiore a 0.5 ai 1500 Hz, relativamente basso.

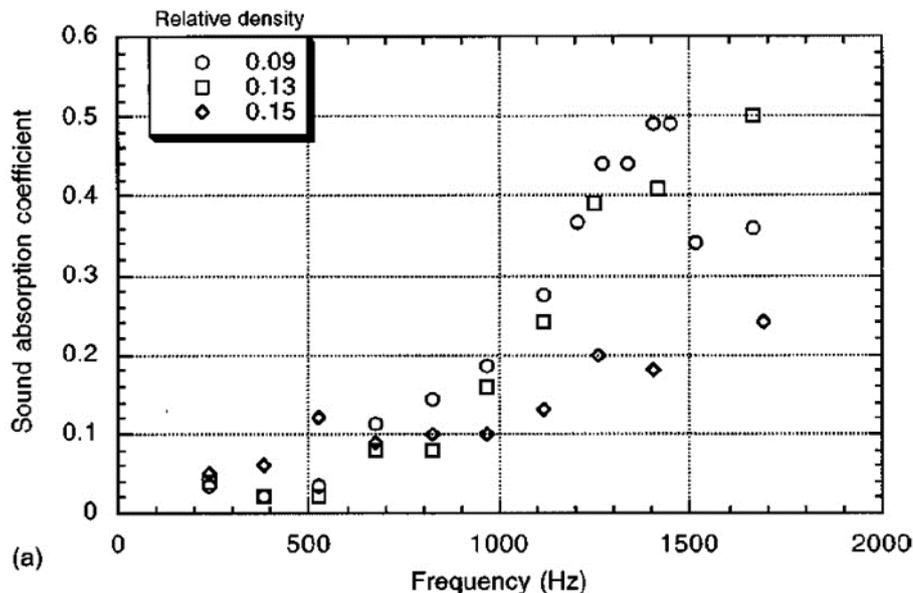


Figura 2.21. Coefficiente di assorbimento dei campioni a) [11].

La *Figura 2.22* relativa ai campioni di tipo b) mostra come esista un intervallo di spessori ottimali del campione tali per cui si ha il valore massimo di assorbimento: questo range risulta compreso tra i 10 mm e i 20 mm. In particolare, con un campione

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

di 20 mm si raggiunge un valore di α pari a 0.65 a 800 Hz contro lo 0.55 ai 1400 Hz del campione di spessore 10 mm.

È interessante notare peraltro, che per effetto dell'assorbimento acustico si assiste ad una "perdita" di dB, denominata "sound transmission loss". In questa configurazione e con questo livello di assorbimento acustico tale perdita non è indifferente e risulta essere pari a -3.9 dB, in quante valutata come nell'espressione seguente:

$$\Delta = 10 \log(1 - \alpha)$$

(2.23)

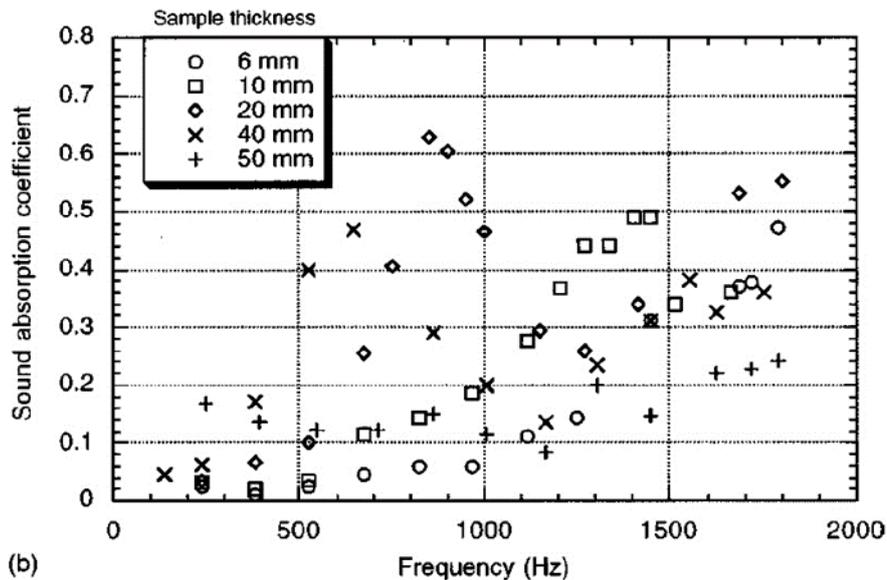


Figura 2.22. Coefficiente di assorbimento dei campioni b) [11].

Questi due primi risultati danno un chiaro segnale: un provino di schiuma in condizioni non trattate non può rappresentare una valida alternativa ai materiali tradizionali in termini di assorbimento acustico; infatti, non vi è alcuna possibilità di raffrontare a livello di prestazioni questi campioni con uno di lana di vetro, completamente assorbente a qualsiasi frequenza al di sopra dei 1000 Hz, come mostrato in *Figura 2.23*.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

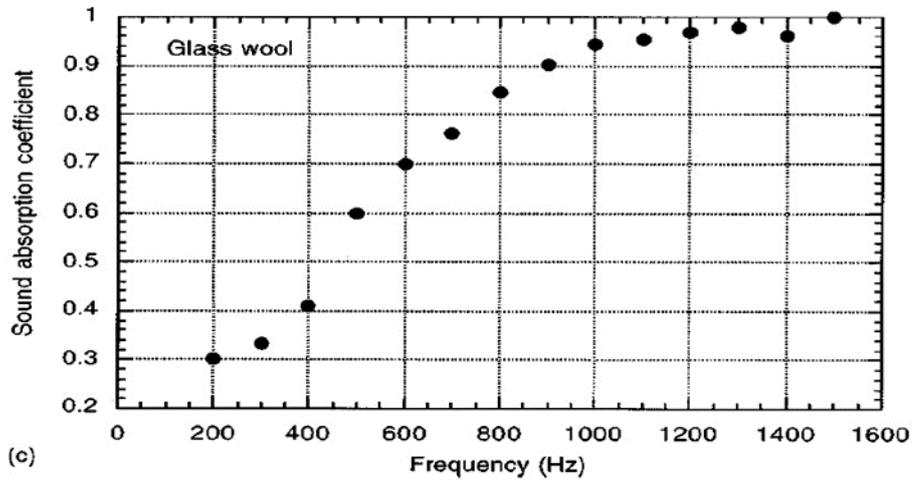


Figura 2.23. Coefficiente di assorbimento della lana di vetro [11].

Per quanto concerne i campioni di tipo c), i risultati sperimentali mostrano come la tecnica del “rolling” porti alcuni benefici alle prestazioni acustiche. Infatti, si nota in *Figura 2.24.* come il campione di spessore pari a 9 mm riesca ad esplicare un coefficiente di assorbimento pari a 0.7 ad una frequenza di 1800 Hz.

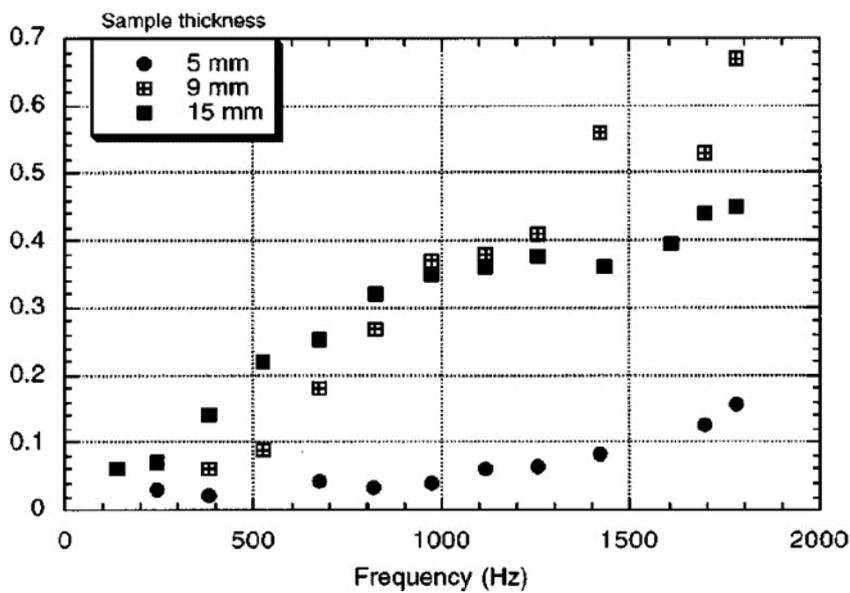


Figura 2.24. Coefficiente di assorbimento dei provini di tipo c) [11].

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Per effetto di una forza di compressione sui provini, sia essa eseguita istantaneamente che graduale, si raggiungono valori di α anche superiori allo 0.8. Si inizia quindi ad intravedere un netto miglioramento e ad avvicinarsi ai valori dei materiali ad oggi utilizzati in edilizia.

In ultimo, *Figura 2.25* mostra i risultati della prova eseguita sui campioni di tipo d), sui quali è stata realizzata una foratura meccanica superficiale di diametro 1 mm e 2 mm. Questa configurazione è quella che ha fornito i migliori risultati poiché si è ampiamente raggiunto il valore del 100% di assorbimento acustico a frequenze vicine ai 1500 Hz. Ciò è dovuto alla presenza dei fori che permettono il passaggio dentro-fori delle particelle d'aria mosse dall'onda sonora e garantendo sostanziali perdite per attrito viscoso.

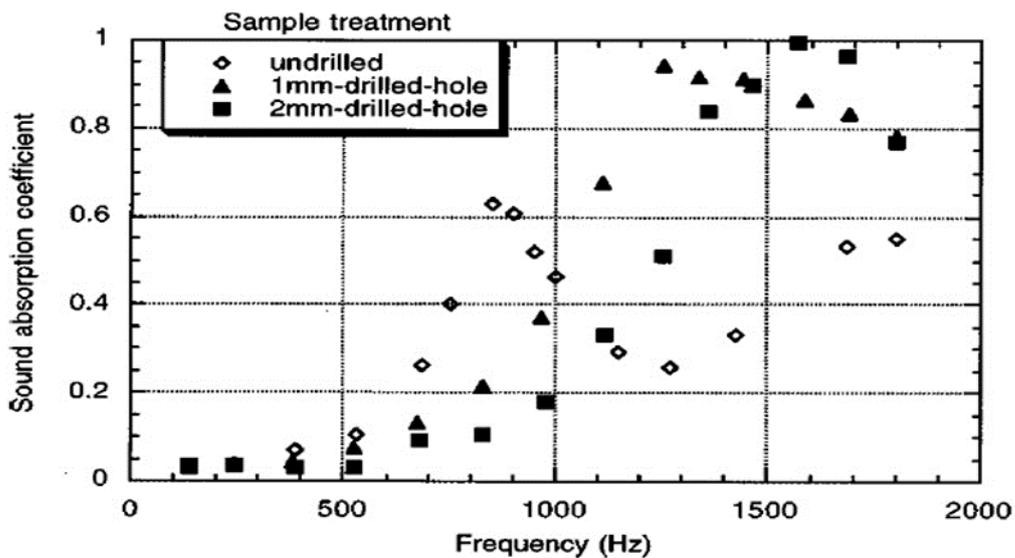


Figura 2.25. Coefficiente di assorbimento dei provini di tipo d) [11].

2.5 ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO

Si descrive all'interno di questo capitolo l'attività di laboratorio svolta relativamente all'ambito acustico, al fine di determinare eventuali applicazioni delle schiume di alluminio come isolanti acustici.

2.5.1 INQUADRAMENTO AL LAVORO SVOLTO

Richiamando quanto detto precedentemente, si rammenta che all'interno di un ambiente chiuso l'onda sonora emessa da una sorgente verrà in parte riflessa dalle pareti presenti, in parte assorbita e in parte trasmessa agli ambienti adiacenti.

La preponderanza di una o delle altre componenti dipenderà da molteplici fattori, uno su tutti la tipologia delle pareti riceventi. Infatti, materiali diversi si comporteranno diversamente nei confronti dell'onda sonora rispondendo ad esso secondo le loro proprietà e caratteristiche.

Nei confronti dell'assorbimento acustico la caratteristica che maggiormente influenza il fenomeno è la porosità. Si è illustrato infatti nei precedenti capitoli che a livello generale la presenza di pori all'interno di un mezzo migliora la proprietà di assorbimento acustico per attrito viscoso tra l'onda e le pareti della cella.

La presenza di pori è quindi il nodo cruciale della questione dal momento che la distribuzione di questi all'interno della schiuma è totalmente casuale e non prevedibile, sebbene sia controllabile le dimensioni medie degli stessi in fase di produzione.

È quindi riportato il comportamento che la schiuma oggetto di analisi nel presente lavoro di tesi mostra nei confronti dell'assorbimento acustico e se questo si ripeta uguale a sé stesso all'interno della distribuzione casuale di pori. Da tale analisi si può definire se questa tipologia di schiume possa essere un materiale impiegabile o quantomeno confrontabile con quelli comunemente utilizzati nel campo delle costruzioni.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

2.5.2 STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE

L'attività di laboratorio si è basata sull'utilizzo di uno strumento ben noto nel mondo dell'acustica, ovvero il tubo di Kundt, o di impedenza, già richiamato in precedenza e illustrato in *Figura 2.26*.



Figura 2.26. Tubo di Kundt o di impedenza impiegato per le analisi sperimentali.

Lo strumento è costituito da un tubo chiuso, alle estremità del quale sono posti da una parte il materiale da testare e dall'altra un altoparlante, che funge da sorgente sonora.

Questo metodo per la misura del coefficiente di assorbimento richiede che i campioni siano di piccole dimensioni, ovvero abbiano un diametro massimo tale da poter entrare all'imbocco del tubo. Tale dimensione massima dipende ovviamente dalla tipologia e dal modello di tubo ma generalmente non supera i 4 cm – 5 cm.

Al di là di alcune precisazioni iniziali, è opportuno menzionare la procedura normata per la misura in questione, descritta dalla norma ISO-10534, la quale consiste nel generare un'onda piana e misurare la pressione sonora massima e minima nei punti in cui sono posizionati i microfoni.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Quindi, l'onda piana incidente generata dalla sorgente viene parzialmente riflessa dal provino, creando un pattern di onde stazionarie all'interno del tubo. Si misurano quindi la pressione massima e minima determinando il coefficiente di assorbimento per il tramite della seguente espressione:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho_{max}/\rho_{min} - 1}{\rho_{max}/\rho_{min} + 1} \right)^2$$

(2.24)

I campioni oggetto di prova sono stati ricavati, come menzionato in precedenza, da una schiuma di alluminio a celle chiuse le cui caratteristiche vengono riportate brevemente in *Tabella 2.3*:

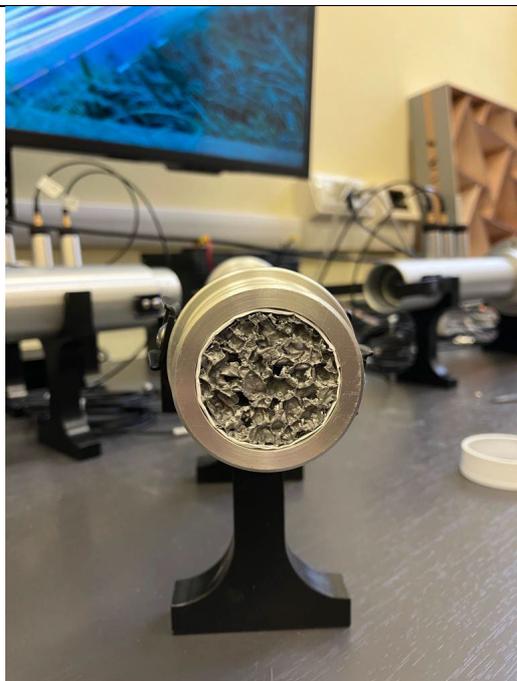
DIAMETRO	SPESSORE	POROSITÀ	DENSITÀ	PRODUTTORE
4 cm	9 mm	Celle chiuse	280 kg/m ³	Foamtech™, South Korea

Tabella 2.3. Caratteristiche della schiuma oggetto di studio.

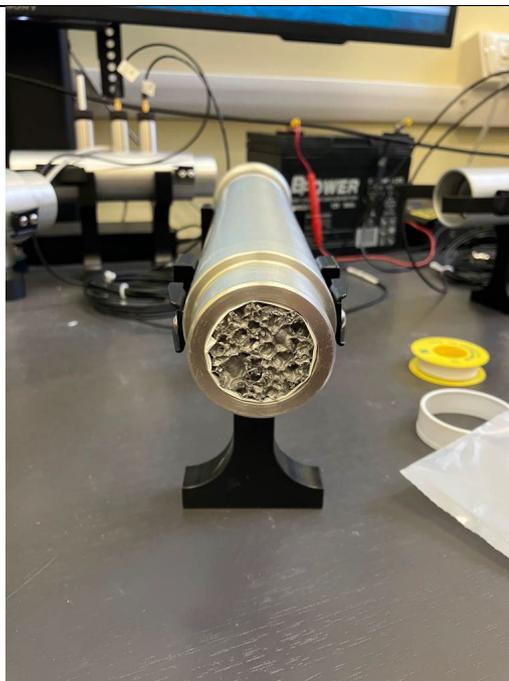
Si sono esaminati numero 4 campioni, sfruttando entrambi i lati, al fine di esaminare se e in che modo l'assorbimento variasse sulle due facce, in funzione della diversa porosità che si può apprezzare da un lato e dall'altro. Si è esaminato anche, per confronto, un campione costituito dal fondo del tubo completamente riflettente e da un campione con fondo anecoico, in modo da poter apprezzare rispettivamente i valori di coefficiente di assorbimento prossimi allo 0 % e al 100%. Infatti, se la superficie è riflettente, il suo assorbimento sarà nullo, al contrario, una superficie completamente assorbente garantirà una riflessione dell'onda sonora pressoché nulla.

Per maggiore chiarezza, si riportano in *Figura 2.27* le fotografie dei campioni sopra menzionati e relativa denominazione, specificando che la dicitura "BACK" individua il retro del provino, nell'ottica di testare entrambe le facce come sopra descritto.

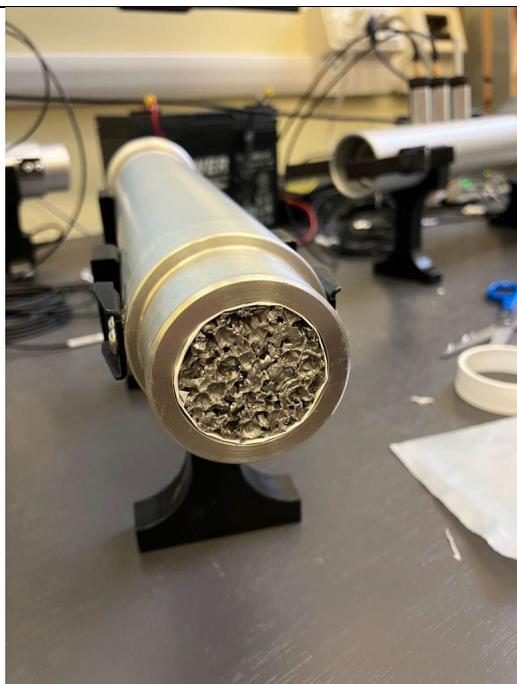
CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA



Campione C1



Campione C1_BACK



Campione C2

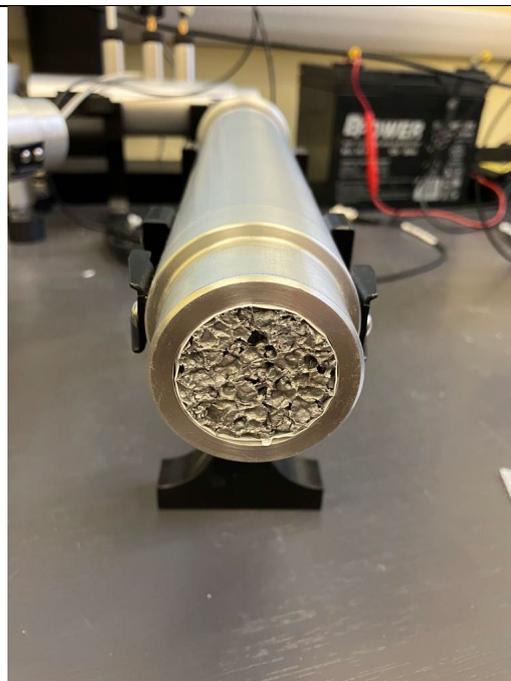


Campione C2_BACK

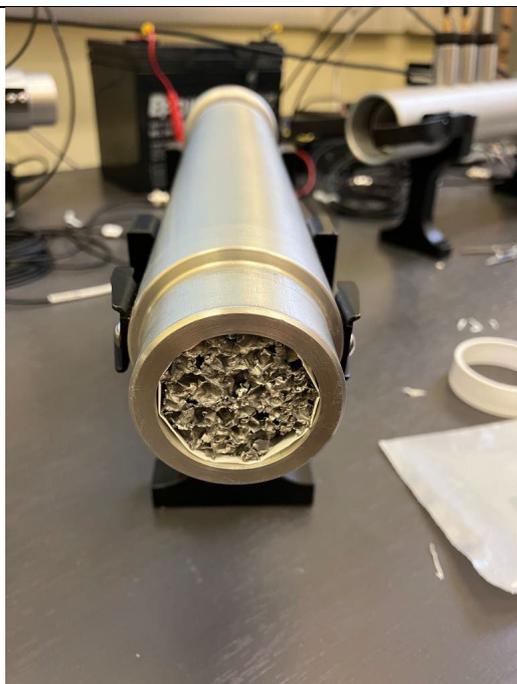
CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA



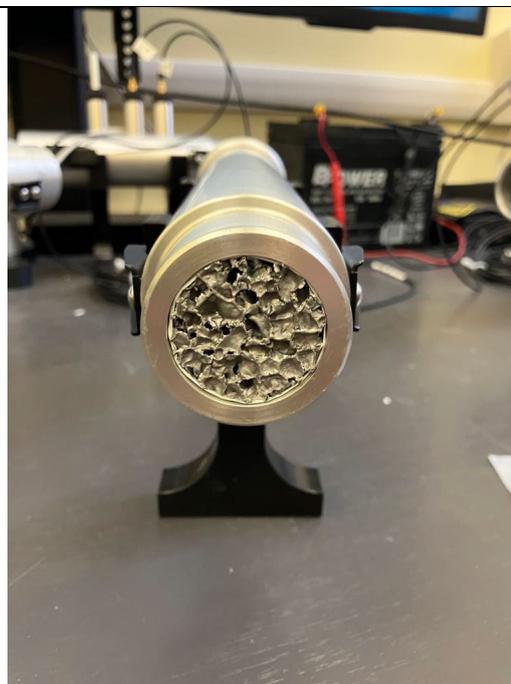
Campione C3



Campione C3_BACK

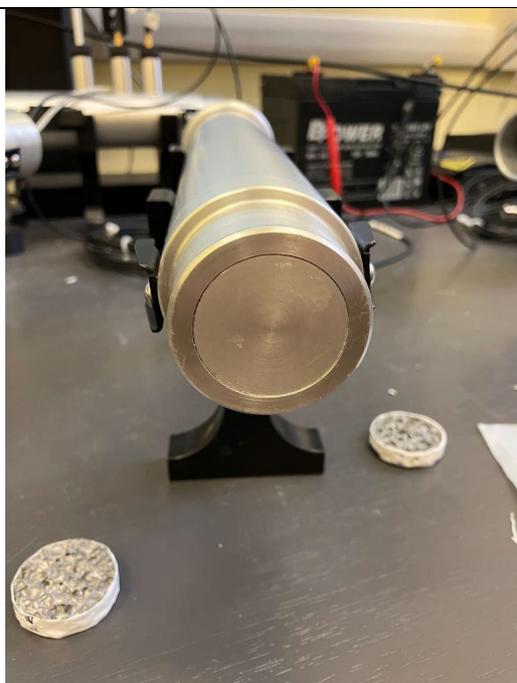


Campione C4

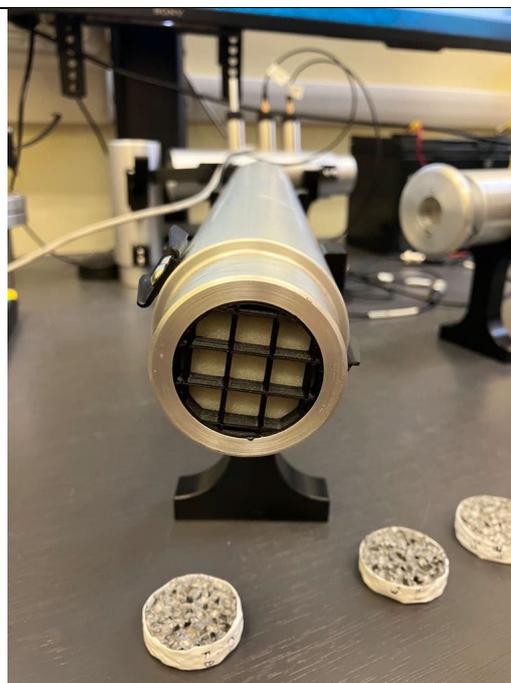


Campione C4_BACK

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA



Campione C_RIFLETTENTE



Campione C_ANECOICO

Figura 2.27. Campioni testati per prove di assorbimento.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

2.5.3 RISULTATI

I risultati ottenuti, in termini di coefficiente di assorbimento, vengono riportati all'interno di grafici che ne mostrano l'andamento in funzione della frequenza per ogni provino testato, compreso il campione riflettente e quello completamente assorbente o anecoico.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

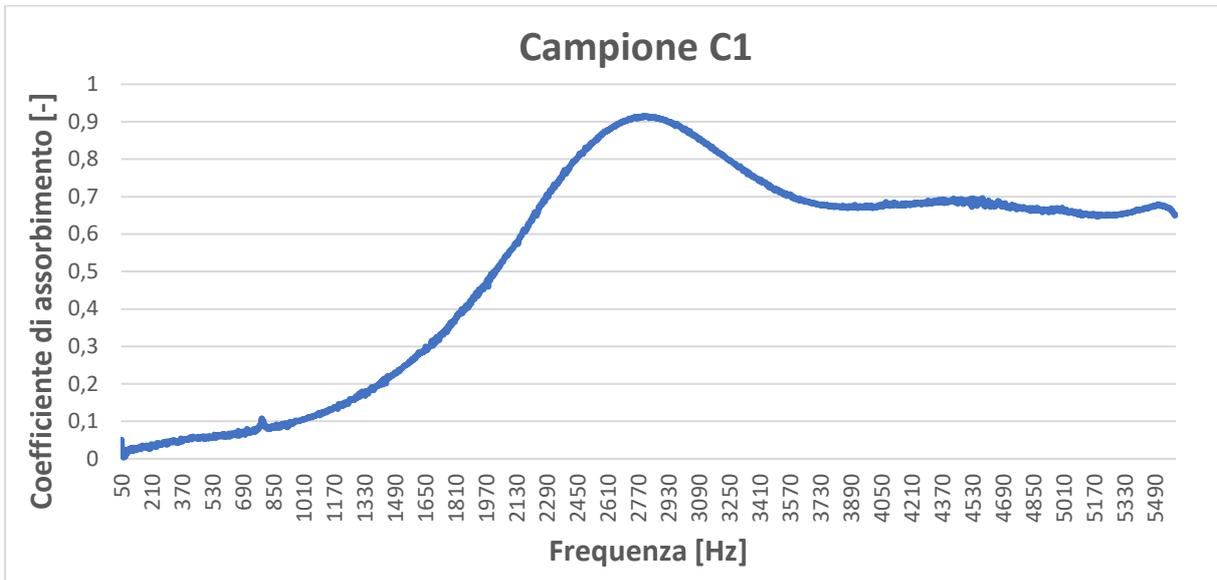


Figura 2.28. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C1.

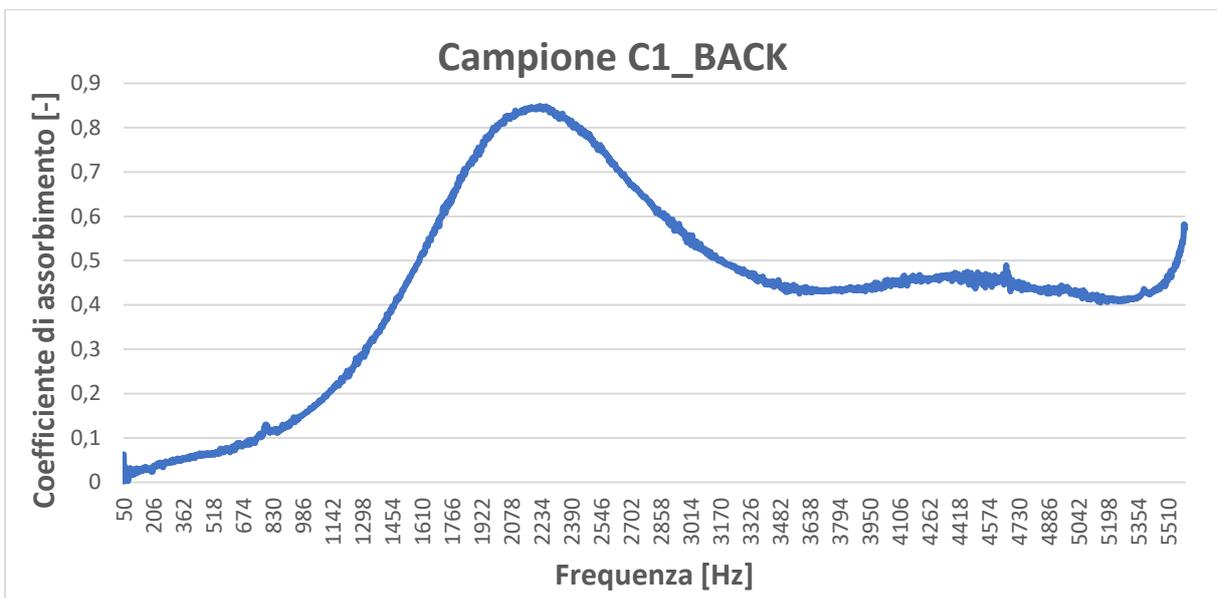


Figura 2.29. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C1_BACK.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

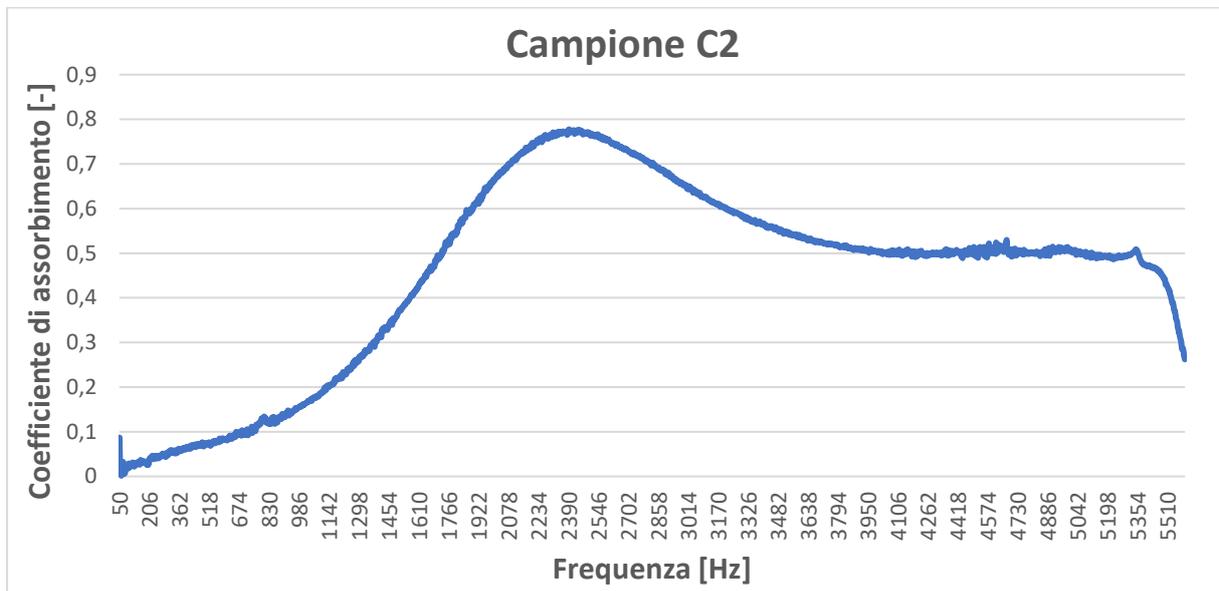


Figura 2.30. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C2.

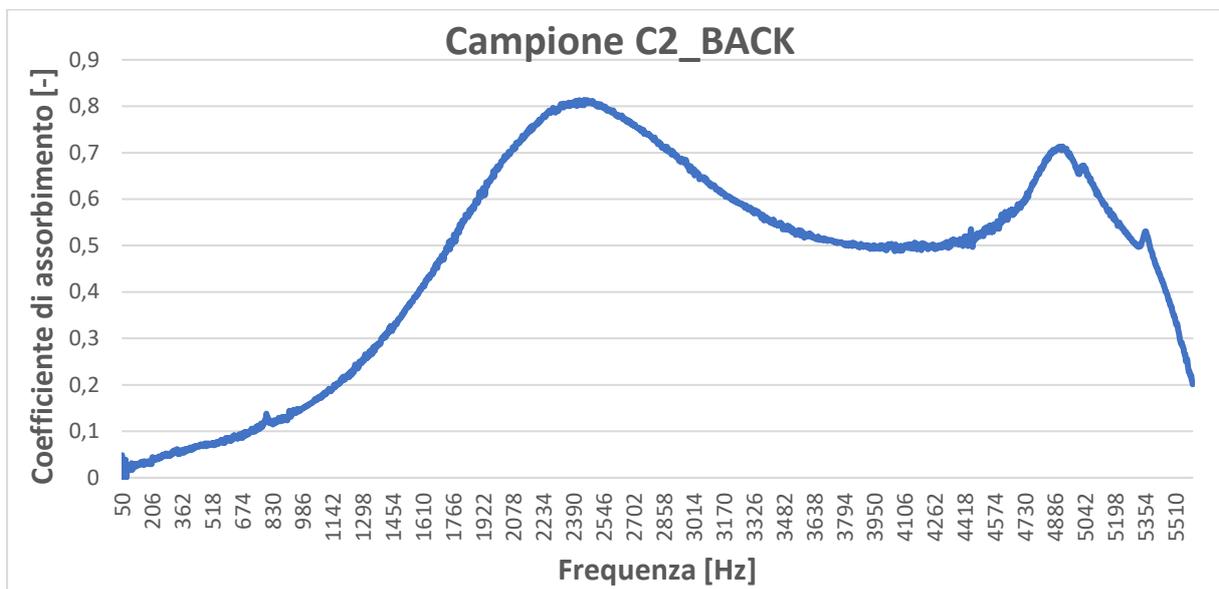


Figura 2.31. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C2_BACK.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

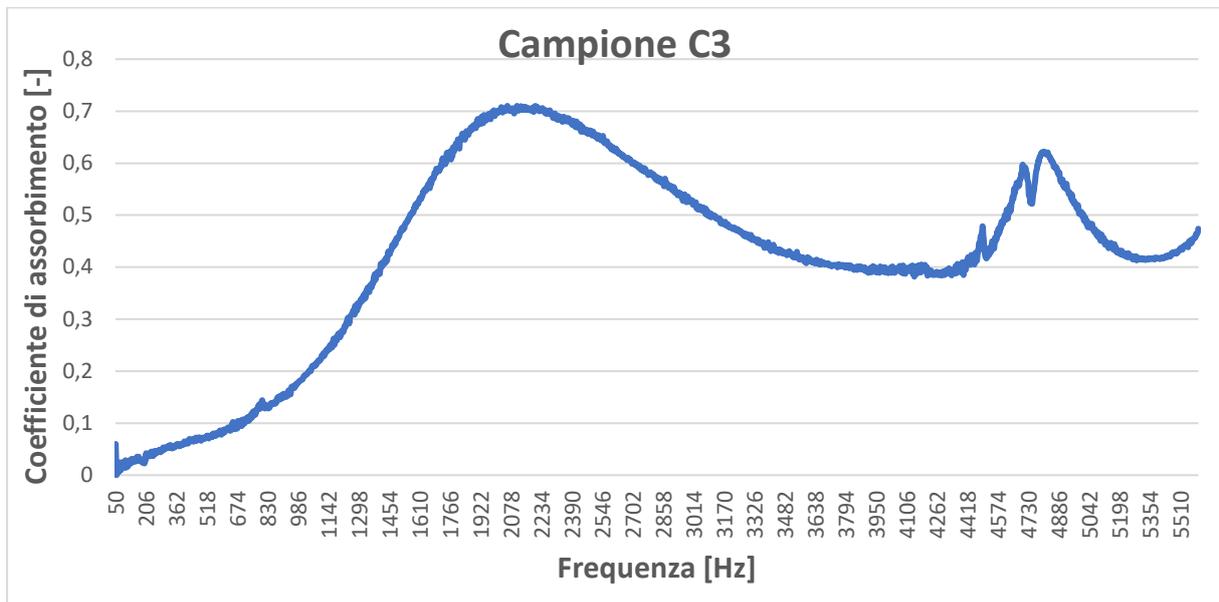


Figura 2.32. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C3.

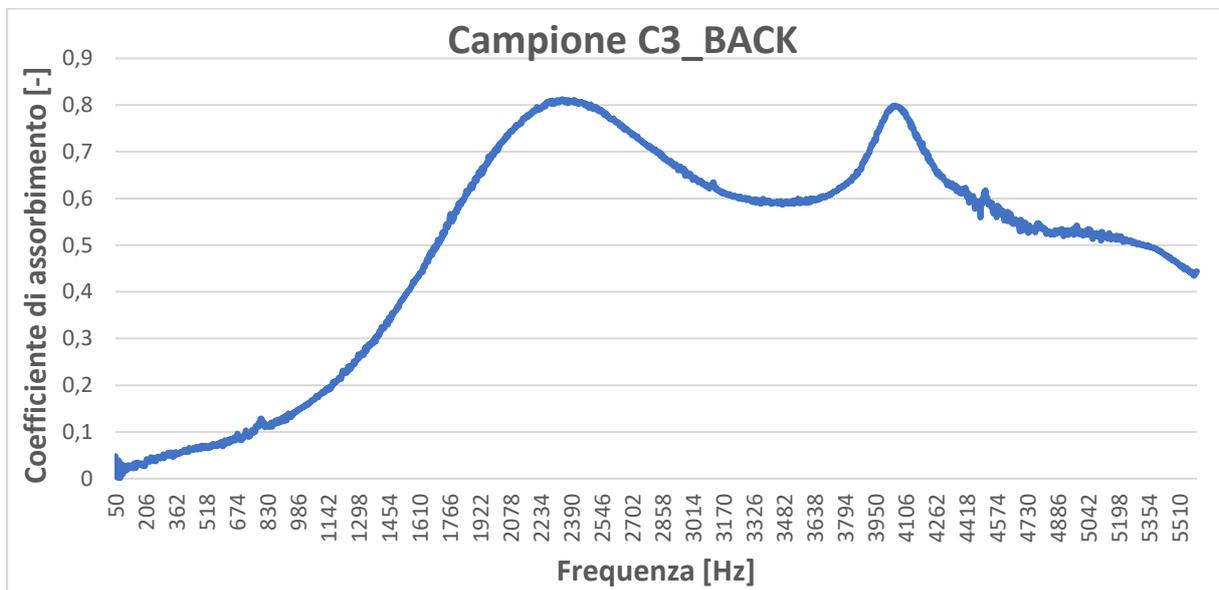


Figura 2.33. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C3_BACK.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

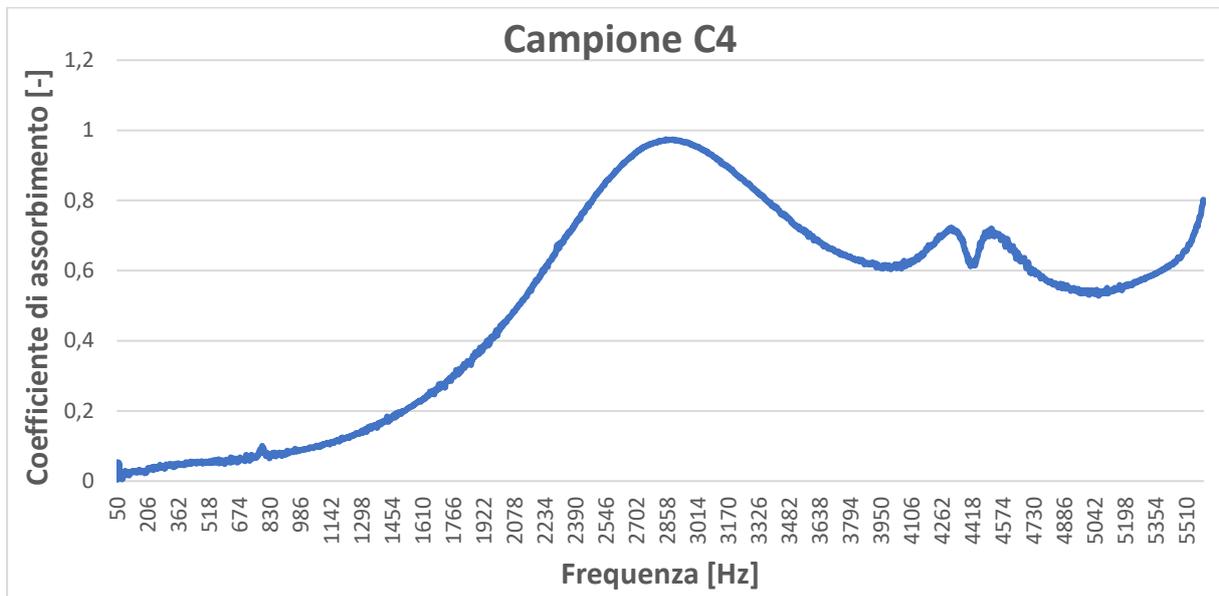


Figura 2.34. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C4.

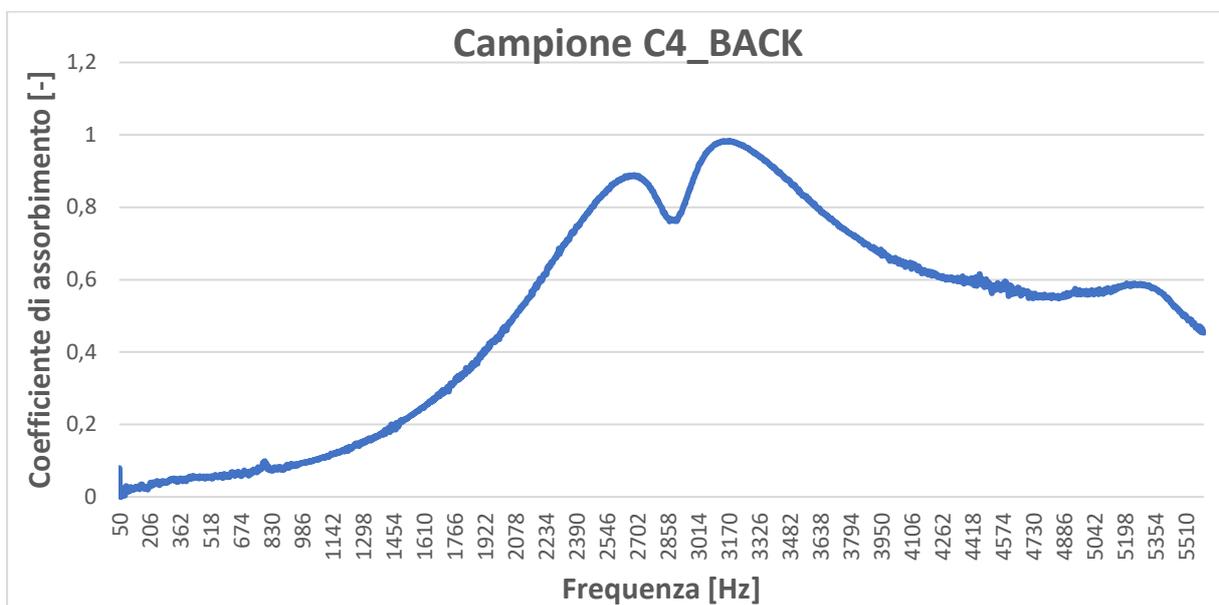


Figura 2.35. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C4_BACK.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

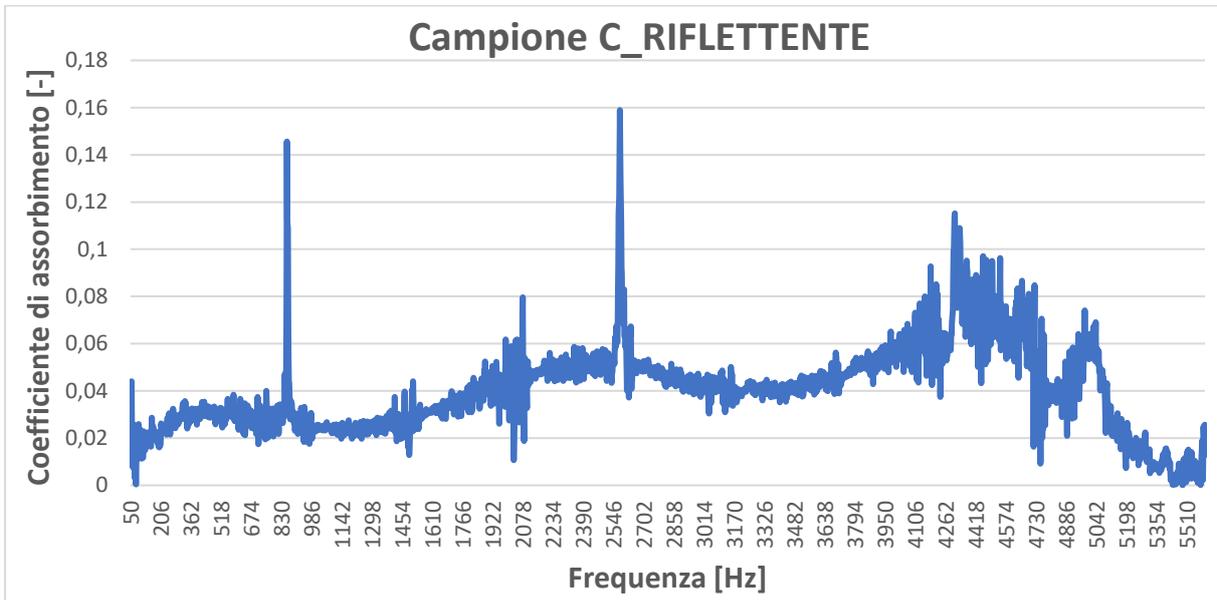


Figura 2.36. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C_RIFLETTENTE.

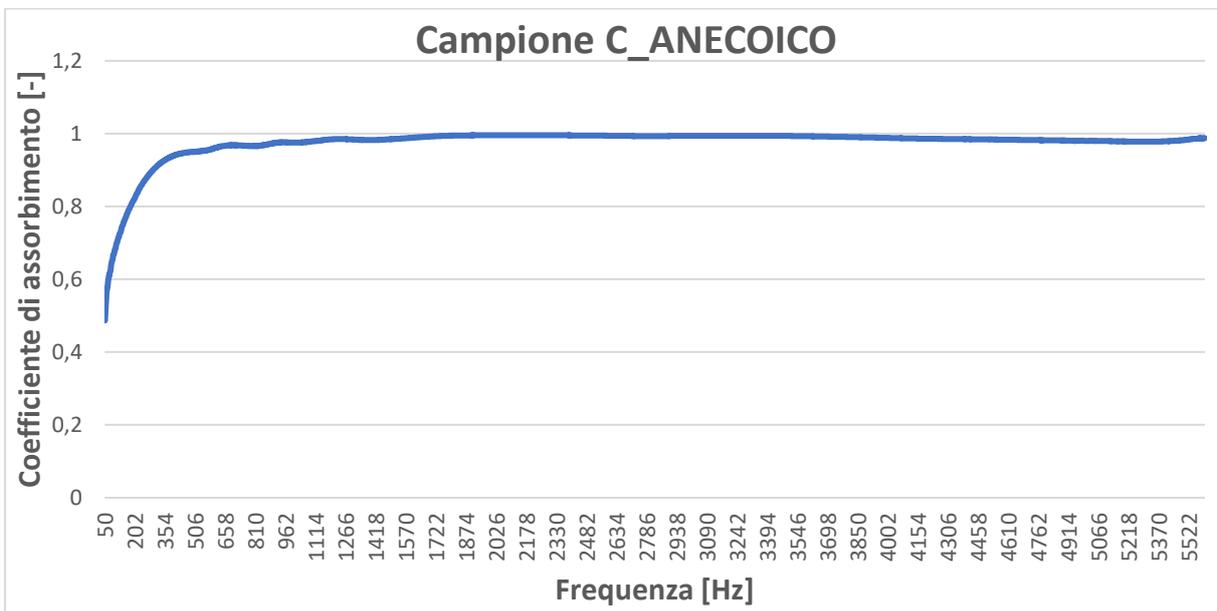


Figura 2.37. Coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza – Campione C_ANECOICO.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Si riporta in *Figura 2.38*, un grafico complessivo degli andamenti del coefficiente di assorbimento di tutti i campioni testati, in funzione della frequenza.

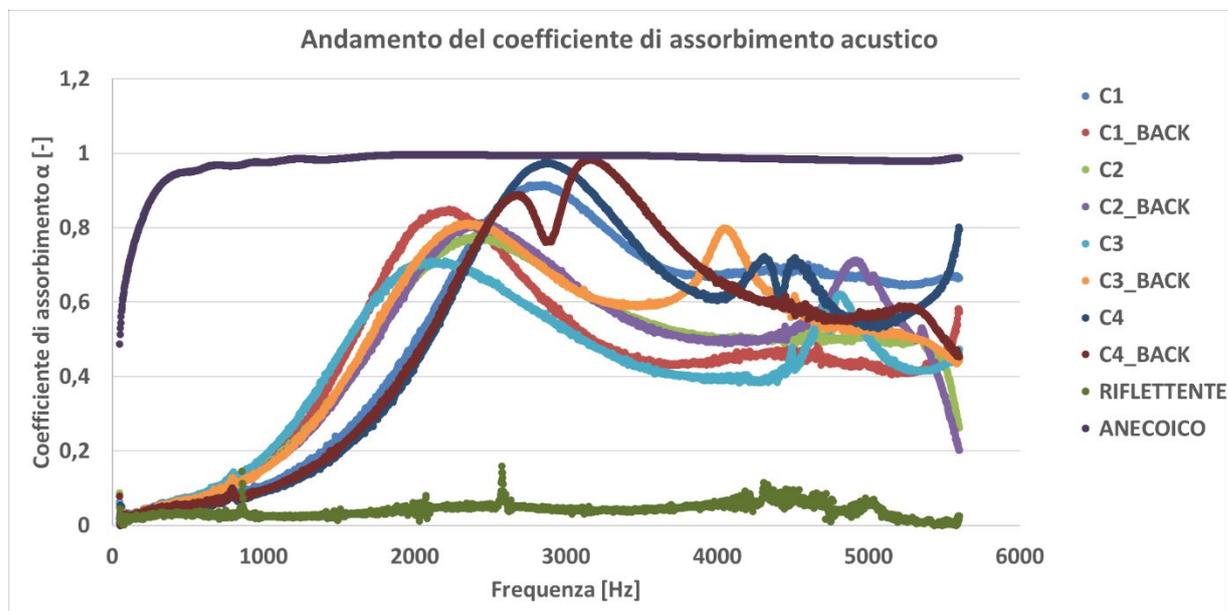


Figura 2.38. Andamento del coefficiente di assorbimento acustico dei provini testati.

2.6 CONSIDERAZIONI E CONFRONTO CON MATERIALI TRADIZIONALI

Alla luce dei risultati ottenuti, presenti all'interno dei grafici riportati, emergono chiaramente diversi aspetti sul comportamento della schiuma analizzata.

In primo luogo, è possibile osservare come in tutti i provini analizzati si apprezzino valori di assorbimento superiori allo 0.8, talvolta anche di 0.9 e, come nel caso del provino C4, si raggiunga un coefficiente di assorbimento prossimo ad 1. In tal senso, la schiuma in esame verrebbe classificata come "altamente assorbente", secondo la norma UNI EN I20 11654:1998 [12], la quale prevede una classificazione dei materiali fonoassorbenti con indici di prestazione compresi tra A ed E.

Questa indicazione, sebbene rappresenti un segnale prestazionale importante dal punto di vista dell'assorbimento acustico, porta con sé un limite legato al piccolo range di frequenze per il quale α tocca i valori sopra menzionati.

Si intende dire cioè, che una risposta ottimale di un pannello di schiuma di alluminio, si avrebbe nel caso in cui i livelli di assorbimento fossero vicini al 100% per un campo di frequenze il più esteso possibile, o comunque almeno per un range di frequenze corrispondente a quello caratteristico dell'udibile, compreso tra i 500 Hz e i 5000 Hz.

Dai risultati ottenuti, invece, si nota ad esempio come valori dell'80% di assorbimento si raggiungono solo dai 2450 Hz ai 3250 Hz, nel caso del campione C1, o dai 1922 Hz ai 2390 Hz nel caso del campione C1_BACK. Tale range si allarga dai 1700 Hz ai 6000 Hz per la maggior parte dei provini qualora si considerino accettabili valori di assorbimento pari a 0.70.

Si è notato, inoltre, come lo stesso provino, analizzato su una faccia e su quella opposta, presenta risposte sostanzialmente diverse: infatti, in funzione della casualità con cui i pori si distribuiscono nel materiale, la risposta si presenterà sostanzialmente diversa, sebbene il provino sia il medesimo e le due facce distino solamente 9 mm.

Ulteriormente, al di sopra dei 4000 Hz tutte le schiume presentano un comportamento irregolare, con picchi e valli, suggerendo che a tali livelli di frequenza la schiuma in esame non garantisce un buon livello di assorbimento.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

È, infine, da sottolineare come in alcuni campioni si sono notati delle repentine cadute in assorbimento successivamente al raggiungimento di picchi elevati: ciò rappresenta un'ulteriore incertezza nel comportamento della schiuma anche nel range di frequenze dove i valori di assorbimento sono elevati.

Per meglio comprendere il significato e il valore numerico dei risultati ottenuti, è opportuno confrontarli con valori noti di assorbimento di materiali il cui utilizzo nel mondo edile e civile è ampiamente collaudato:

- Pannello in schiuma in poliuretano espanso a celle aperte:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0.50	0.70	0.95	0.95	0.98	0.98

Tabella 2.4. Coefficiente di assorbimento di un pannello in poliuretano espanso a celle aperte,

- Pannelli in fibra di vetro:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0.45	0.75	0.80	0.85	0.85	0.90

Tabella 2.5. Coefficiente di assorbimento di un pannello in fibra di vetro.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

- Pannello in resina melamminica, densità 11 kg/m³:

Freq. (Hz)	Spessore (mm)		
	50	70	100
100	0,10	0,20	0,30
125	0,13	0,22	0,40
160	0,15	0,30	0,56
200	0,19	0,42	0,60
250	0,25	0,49	0,77
315	0,28	0,55	0,85
400	0,37	0,60	0,90
500	0,50	0,77	0,92
630	0,52	0,80	0,99
800	0,55	0,85	0,97
1000	0,75	0,96	1,00
1250	0,78	0,93	1,00
1600	0,80	0,98	1,00
2000	0,88	0,96	1,00
2500	0,90	1,00	1,00
3150	0,92	1,00	1,00
4000	0,94	1,00	1,00

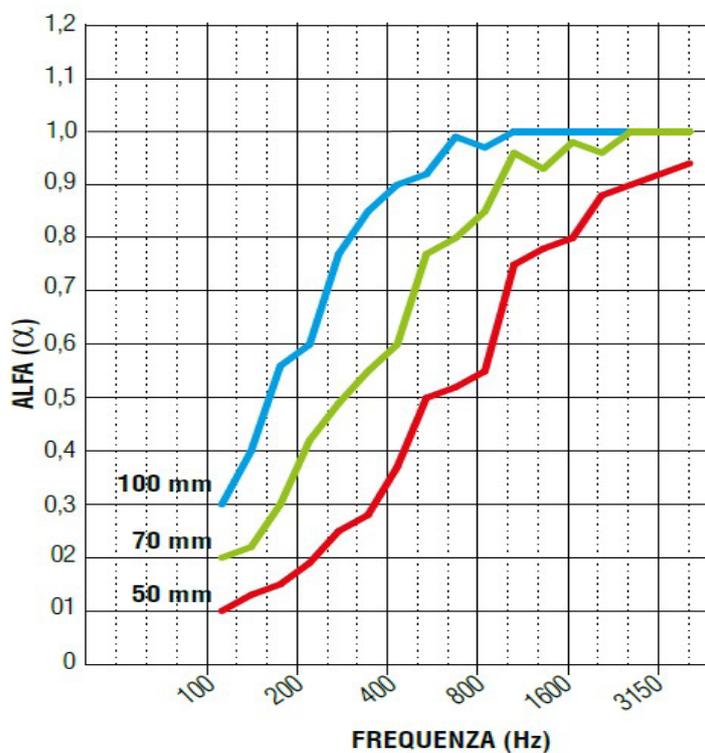


Figura 2.39. Coefficiente di assorbimento acustico di un pannello in resina melamminica – Asse della frequenza in scala logaritmica [13].

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

- Pannelli in fibra di poliestere, densità 60 kg/m^3 :

Freq. (Hz)	Spessore (mm) 50
100	0,12
125	0,28
160	0,35
200	0,46
250	0,60
315	0,69
400	0,78
500	0,91
630	0,97
800	0,98
1000	0,99
1250	0,92
1600	0,92
2000	0,92
2500	0,93
3150	0,95
4000	0,95

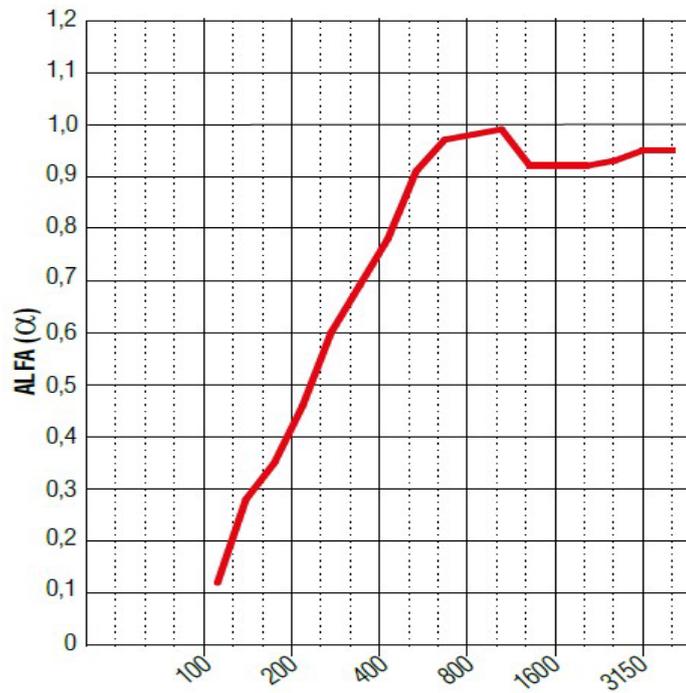


Figura 2.40. Coefficiente di assorbimento acustico di un pannello in fibra di poliestere – Asse della frequenza in scala logaritmica [13].

Alla luce dei risultati ottenuti, si può constatare che i livelli di assorbimento siano decisamente elevati per tutto il range di frequenze dell'udibile. Con l'utilizzo di questi pannelli, infatti, si può affermare che un'eventuale applicazione in ambienti chiusi possa portare ad una quasi totale assenza di riverbero.

È vero altresì, che negli ambienti domestici, così come in case e ospedali, non è richiesta una totale assenza di riverbero, prescrizione che invece è presente in auditorium e teatri. In definitiva, in termini di assorbimento acustico, è opportuno pensare che la schiuma esaminata in quanto costituita da celle chiuse, non sia la soluzione ottimale per rappresentare un'alternativa ai materiali tradizionali, ma che eventualmente, se integrata con pannelli dalle proprietà fonoassorbenti, anche non elevatissimi, possa costituire un materiale valido allo scopo.

Inoltre, si assisterebbe ad un incremento delle proprietà fonoassorbenti, se la porosità della schiuma fosse aperta, permettendo all'onda di essere assorbita per attrito viscoso

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

dalle pareti della cella, che risultano invece interconnesse all'interno del campione oggetto di studio.

In definitiva, come emerge da *Figura 2.38*, si ribadisce l'evidenza sperimentale di elevati valori di assorbimento acustico in tutti i campioni testati, ma al contempo si è notato che tali valori si apprezzano per un range di frequenze ristretto, considerando che il campo dell'udibile si è estende da 500 HZ ai 5000 Hz, e che al di sotto dei 2000 Hz quasi nessun provino raggiunge il 75% in assorbimento, creando un "difetto" applicativo non trascurabile.

Confrontare le schiume di alluminio con i materiali tradizionali da un punto di vista acustico presuppone che si caratterizzino le due caratteristiche fondamentali in termini di prestazioni: l'assorbimento acustico, di cui si è accennato nelle pagine precedenti, e l'isolamento acustico.

Come già accennato, parlare di isolamento acustico vuol dire far riferimento ad un comfort acustico che si espliciti per il tramite di materiali in grado di impedire il passaggio dell'onda sonora dall'ambiente cosiddetto disturbante a quello disturbato, all'interno di unità immobiliari differenti, ospedali, teatri ecc.

Questa proprietà, si riflette nell'indicatore del potere fonoisolante apparente e più specificatamente nel suo indice di valutazione, R'_w [dB], misurato in opera secondo procedura standardizzata esplicita nella norma UNI EN ISO 16283-1 e che permette di esprimere in un singolo valore, e quindi svincolando lo stesso dalla dipendenza dalla frequenza, l'attitudine o meno di un certo materiale a contrastare la trasmissione dell'onda sonora

In questa ottica, non è sufficiente esplicitare l'indice di valutazione del singolo materiale e confrontarlo con quello di materiali tradizionali, dal momento che in ogni edificio non si avranno mai singoli pannelli di materiale "puro" ad assolvere la funzione di isolante acustico ma si avrà bensì un "pacchetto" di materiali differenti la cui stratigrafia concorrerà al soddisfacimento di specifici requisiti acustici.

A tal proposito, si menziona quella che è il testo fondamentale in materia di inquinamento acustico degli edifici, cioè la "Legge 26 ottobre 1995 n. 447 – Legge quadro sull'inquinamento acustico" nonché il suo decreto attuativo D.P.C.M. del

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

5/12/97 inerente alla “Determinazione dei requisiti acustici passivi”. In sintesi, all’interno del testo si individuano sette categorie di edifici, denominati:

- Categoria A: edifici adibiti a residenza o assimilabili;
- Categoria B: edifici adibiti ad uffici e assimilabili;
- Categoria C: edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili;
- Categoria D: edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili;
- Categoria E: edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili;
- Categoria F: edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili;
- Categoria G: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili.

Per ciascuna delle categorie elencate, la norma prescrive, in funzione dell’indicatore, valori massimi e minimi da rispettare in fase di progettazione. Si intende dire, cioè, che prendendo ad esempio il caso dell’indicatore R'_w [dB], la norma richiede valori minimi di potere fonoisolante che le partizioni tra due unità immobiliari distinte devono soddisfare, pari a 55 dB per gli edifici di Categoria D, 50 dB per quelli di categoria A, B, C, E, F e G.

Si riporta per completezza in *Figura 2.41* la tabella riassuntiva dei requisiti acustici passivi in funzione della categoria di edificio, sebbene ulteriori commenti verranno aggiunti approfondendo per semplicità solamente il potere fonoisolante apparente R'_w .

Categorie di cui alla Tab. A	Parametri				
	R'_w (*)	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

Figura 2.41. Requisiti acustici passivi – DPCM 5/12/97 sui requisiti acustici passivi [9].

Vengono ora analizzate le soluzioni maggiormente adottate in edilizia, composte da diversi materiali, che soddisfino i requisiti sopra menzionati e contestualmente si

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

confronteranno tali soluzioni con quelle ottenibili mediante l'utilizzo di schiume di alluminio, sulla base delle loro prestazioni in termini di isolamento ricavate dai riferimenti di letteratura riportati al *Capitolo 1.4*. È bene però far chiarezza sul fatto che valori minimi specificati dalla norma si riferiscono all'isolamento offerto da una parete posta tra due unità immobiliare distinte; non verranno pertanto considerate soluzioni di pareti singole o doppie da installarsi nell'ambito di una stessa unità immobiliare tra due locali adiacenti.

La stratigrafia classica di una parete posta tra due unità immobiliari distinte prevede la struttura sotto riportata, con misure variabili nell'intorno del centimetro:

- Intonaco 15 mm;
- Muratura in mattoni semipieni 80 mm;
- Intonaco 15 mm;
- Intercapedine da riempire con apposito materiale, spessore variabile;
- Muratura in mattoni semipieni 80 mm;
- Intonaco 15 mm.

Si è opportunamente evidenziata la voce relativa all'intercapedine perché proprio il suo riempimento con materiali di caratteristiche specifiche porterà al soddisfacimento dei requisiti di cui sopra.

Si introducono quindi diverse tipologie di materiali che possano fungere da riempimento:

1. Lastra in lana di roccia, spessore 50 mm: R'_w del singolo pannello pari a 22 dB;
2. Lastra in gesso rinforzato con fibre di legno, spessore 15 mm: R'_w del singolo pannello pari a 26 dB;
3. Lastra in cemento alleggerito additivato con inerti minerali, spessore 12 mm: R'_w del singolo pannello pari a 27 dB;
4. Pannello composto da doppio strato di Poliuretano espanso con interposto foglio in piombo, spessore 20 mm: R'_w del pannello pari a 29 dB.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Per questi materiali, opportunamente inseriti nel pacchetto stratigrafico sopra descritto, è riportato all'interno della documentazione tecnica delle diverse case produttrici, il rapporto di prova che testimonia come i valori di R'_w relativi siano stati ottenuti secondo procedura standardizzata. Pertanto, vengono indicati quelli che sono i valori di R'_w non per il singolo pannello di materiale bensì per il pacchetto completo, formato dalla comune stratigrafia utilizzata in edilizia con l'inserimento dei pannelli descritti:

1. Pacchetto stratigrafico con inserimento di lana di roccia: R'_w pari a 56 dB;
2. Pacchetto stratigrafico con inserimento di pannello in gesso rinforzato: R'_w pari a 60 dB;
3. Pacchetto stratigrafico con inserimento di pannello in cemento alleggerito: R'_w pari a 61 dB;
4. Pacchetto stratigrafico con inserimento di pannello doppio in poliuretano espanso: R'_w pari a 63 dB.

Alla luce di tali risultati, è logico pensare che, dal momento che i materiali sopra enunciati, opportunamente inseriti in intercapedine, soddisfano ampiamente i requisiti minimi del DPCM, allora anche pannelli di schiuma di alluminio aventi R'_w compresi nel range 30 dB - 40 dB come riportato nell'articolo degli autori Yu, Yao, Wang, Li, Yin del 2006 [10] possano soddisfare anch'essi i requisiti richiesti dalla norma, rappresentando quindi una possibile alternativa ai materiali tradizionali.

3. CARATTERIZZAZIONE TERMICA

3.1 CENNI ALLE GRANDEZZE TERMICHE

Questo capitolo verterà sulla caratterizzazione termica delle schiume di alluminio, eseguita tramite misure dirette della diffusività termica.

Tali misure sono state condotte, su un campione di schiuma di alluminio per il quale si riportano le principali caratteristiche fisiche.

Schiuma di alluminio a celle chiuse (casa produttrice Foamtech™, South Korea);

- spessore 9 mm;
- densità 280 kg/m³;
- lunghezza 60 mm e larghezza 35 mm.

È opportuno al fine di meglio comprendere le tipologie di misure effettuate e i risultati che ne sono conseguiti, introdurre alcuni concetti base relativi al calore, ed in particolare:

- la conducibilità termica [$\frac{W}{m K}$];
- la diffusività termica [$\frac{m^2}{s}$];
- la capacità termica [$\frac{J}{K}$];
- il calore specifico [$\frac{J}{kg \cdot K}$];
- la resistenza termica [$\frac{m^2 K}{W}$];
- coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo [-].

La *conducibilità termica* è una proprietà fisica dei materiali che misura la loro capacità di condurre il calore. In altre parole, essa indica quanto velocemente il calore può fluire attraverso un materiale quando, tra i due lati dello stesso, sia presente una differenza di temperatura.

I materiali metallici possiedono un'ottima capacità di condurre il calore e vengono pertanto definiti “conduttori”, a differenza dei materiali denominati “isolanti”; metalli

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

come il rame, l'alluminio e il piombo, per citarne alcuni, sono degli ottimi conduttori, a differenza dei polimeri e dei materiali ceramici.

Il calore scambiato tra le due facce di un corpo, supposte piane e parallele, sotto l'ipotesi di regime stazionario, è quantificato dalla seguente espressione, nota come legge di Fourier:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Dove:

- \dot{Q} [W], è il flusso termico. Diretto perpendicolarmente alle due facce del corpo, dalla parete a temperatura maggiore verso quella a temperatura inferiore;
- $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$, è la conducibilità termica del materiale;
- A [m²], è la superficie attraversata dal calore;
- $\frac{dT}{dx} \left[\frac{\text{K}}{\text{m}} \right]$, è la variazione di temperatura in un tratto infinitesimo del corpo.

Sotto le ipotesi menzionate, il profilo della temperatura è lineare all'interno del corpo, con pendenza decrescente da T_1 a T_2 , con $T_1 > T_2$.

Inoltre, il segno – del flusso termico è in accordo con il Secondo Principio della Termodinamica e serve per rendere positiva la quantità di calore scambiata dal momento che la differenza tra le due temperature $T_2 - T_1$ è negativa. Si riporta in *Figura 3.1* una tabella riepilogativa dei valori di conducibilità termica di materiali di comune impiego.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Sostanza	λ [W/(m·K)]	Sostanza	λ [W/(m·K)]
diamante	1600	vetro	1
argento	460	mattoni	0,90
rame	390	cartongesso	0,21
oro	320	plexiglas	0,19
alluminio	290	carta	0,18 (0,14 - 0,23)
ottone	111	legno	0,18
platino	70	sughero	0,052
piombo	35	lana di pecora	0,040
acciaio inox	17	polistirolo estruso (XPS)	0,040
quarzo	8	aria secca (a 300 K, 100 kPa) in quiete	0,026
ghiaccio (acqua a 0°)	2,20 - 2,50	Aerogel	0,013

Figura 3.1. Valori di conducibilità termica di materiali noti [14].

La *diffusività termica* è una caratteristica termofisica di un materiale che ne descrive la sua capacità di assorbire e accumulare calore. Si esprime come:

$$d = \frac{\lambda}{\rho c}$$

(3. 2)

Dove:

- d [$\frac{m^2}{s}$], diffusività termica del materiale;
- λ [$\frac{W}{m \cdot K}$], conducibilità termica del materiale;
- ρ [$\frac{kg}{m^3}$], densità del materiale;
- c [$\frac{J}{kg \cdot K}$], calore specifico del materiale.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

A differenza della legge della conducibilità, valida in condizioni stazionarie, la diffusività termica descrive la propagazione del calore in condizioni non stazionarie, ovvero quando le condizioni al contorno, come ad esempio la temperatura esterna di una delle due facce della lastra, variano in funzione del tempo.

Si riporta in *Figura 3.2* una tabella riepilogativa dei valori di diffusività termica di materiali di comune impiego.

Metalli		
Oro	127×10^{-6}	m^2/s
Acciaio	4×10^{-6}	m^2/s
Alluminio	97×10^{-6}	m^2/s
Solidi non metallici		
Legno	$20 \div 30 \times 10^{-6}$	m^2/s
Calcestruzzo	$0,75 \times 10^{-6}$	m^2/s
Mattoni	$0,52 \times 10^{-6}$	m^2/s
Vetro	$0,34 \times 10^{-6}$	m^2/s
Legno (quercia)	$0,13 \times 10^{-6}$	m^2/s
Aria		
	$22,4 \times 10^{-6}$	m^2/s
Acqua		
liquido	$0,14 \times 10^{-6}$	m^2/s
solido	$1,2 \times 10^{-6}$	m^2/s

Figura 3.2. Valori di diffusività termica di materiali noti [15].

La *capacità termica*, caratteristica termofisica che esprime la quantità di calore da fornire ad un corpo affinché la sua temperatura aumenti di 1 K.

Essa è strettamente legata alla definizione di *calore specifico*, il quale è definito come la quantità di calore necessaria per aumentare di 1 K 1 kg di una certa sostanza. In questa definizione si nota come, a differenza della capacità termica, il calore specifico sia una proprietà intrinseca del materiale, cioè svincolata dalla sua massa.

I valori di calore specifico di materiali noti sono riportati in *Figura 3.3*.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Sostanza	Calore specifico (J/kg k)	Sostanza	Calore specifico (J/kg k)
Acqua	4186	Idrogeno	14300
Alluminio	880	Mercurio	138.1
Anidride carbonica	820	Oro	129
Argento	240	Ottone	380
Aria	1004.6	Ossigeno	920.9
Elio	5100	Rame	387
Ferro	460	Vapore d'acqua	2000
Carbonio	850	Vetro	800

Figura 3.3. Valori di calore specifico di materiali di noto utilizzo [16].

La *resistenza termica*, indica la capacità di un corpo di opporsi al passaggio del calore e dipende dallo spessore del materiale nonché dalla sua conducibilità termica, come definita precedentemente. Si può esprimere con la formula seguente:

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

(3. 3)

Dove:

- $R \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$, è la resistenza termica;
- Δx [m], è lo spessore del materiale;
- $\lambda \left[\frac{W}{m K} \right]$, conducibilità termica del materiale.

Il *coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo*, espresso come fattore adimensionale, mette in rapporto la resistenza alla diffusione del vapor d'acqua offerta da una sostanza e quella offerta da un volume d'aria pari a quello del materiale in esame.

Si esprime come:

$$\mu = \frac{\delta_{aria}}{\delta_{materiale}}$$

(3. 4)

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Dove $\delta_{aria} [\frac{kg}{m s Pa}]$, è la permeabilità al vapor d'acqua dell'aria e rappresenta concettualmente “la quantità di vapore d'acqua che attraversa, per unità di tempo, un'unità di superficie del materiale, per un campione di spessore unitario, qualora ci sia una differenza di pressione anch'essa unitaria” [1].

Il rapporto tra le due quantità, indica quindi quante volte la resistenza alla diffusione del vapore d'acqua di un materiale è maggiore rispetto a quella dell'aria; in tal senso, il termine μ è maggiore di zero tanto più il materiale è isolante.

Infatti, un buon isolante deve evitare al massimo la penetrazione di vapor d'acqua, evitando così un aumento della conducibilità termica durante l'esercizio.

Inoltre, si può affermare che tanto più μ è elevato, tanto più il materiale in esame opporrà resistenza alla condensazione all'interno del materiale stesso.

Si riporta in *Figura 3.4* una tabella di materiali isolanti di nota applicazione con i relativi valori di μ .

PROPRIETÀ	POLISTIRENE EXTRUSO (XPS)	POLISTIRENE ESPANSO (EPS)	POLIURETANO ESPANSO (PIR/PUR) CON RIVESTIMENTI PERMEABILI	POLIURETANO ESPANSO (PIR/PUR) CON RIVESTIMENTI IMPERMEABILI	LANA MINERALE (MW)	FIBRA DI LEGNO
Conducibilità termica	0.032 - 0.038	0.033 - 0.050	0.025 - 0.028	0.022	0.034 - 0.044	0.038 - 0.050
Fattore di Resistenza al vapore di acqua	80 - 150	20 - 60	30 - 50	∞	1 - 2	4 - 8

Figura 3.4. Valori di resistenza alla diffusione del vapor d'acqua per materiali noti [17].

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

3.2 ISOLAMENTO TERMICO IN EDILIZIA

L'isolamento termico in edilizia può essere definito come l'insieme di quei comportamenti da adottare al fine di evitare dispersione del calore nel periodo invernale e contestualmente evitare che i locali interni, sottoposti a forte radiazione solare nei mesi estivi, si surriscaldino eccessivamente.

Il calore, infatti, tende a migrare da zone a temperatura maggiore verso quelle a temperature minori, attraverso le superfici costituenti il cosiddetto "involucro edilizio". Per involucro edilizio si intende l'insieme di superfici che divide gli ambienti aventi condizioni climatiche stabili, da quelli aventi valori di temperatura variabili.

La dispersione del calore attraverso le superfici costituenti l'involucro edilizio, nel caso non fosse isolato, non avviene nella stessa percentuale, ma è invece differenziata a seconda della tipologia di superficie, come indicato in *Figura 3.5*.

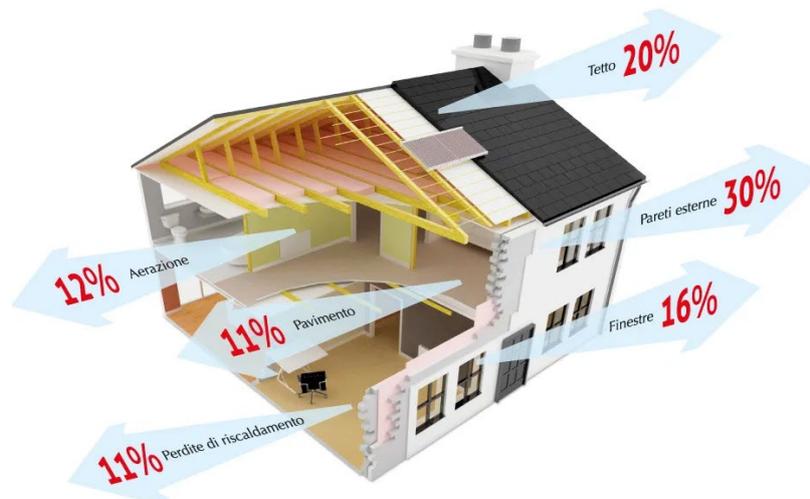


Figura 3.5. Dispersioni termiche nell'involucro edilizio [18].

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Come si può notare, la tipologia di superficie attraverso la quale si apprezza una maggior dispersione di calore è quella costituita dalle pareti esterne, alle quali è associato un 30% della dispersione totale. La progettazione della stratigrafia delle pareti esterne, nonché di tutti gli altri componenti, deve essere eseguita al fine di minimizzare le dispersioni termiche per mezzo di appositi materiali isolanti opportunamente giustapposti l'uno accanto all'altro.

Si riporta in *Figura 3.6* una classica stratigrafia di una parete di tamponamento.

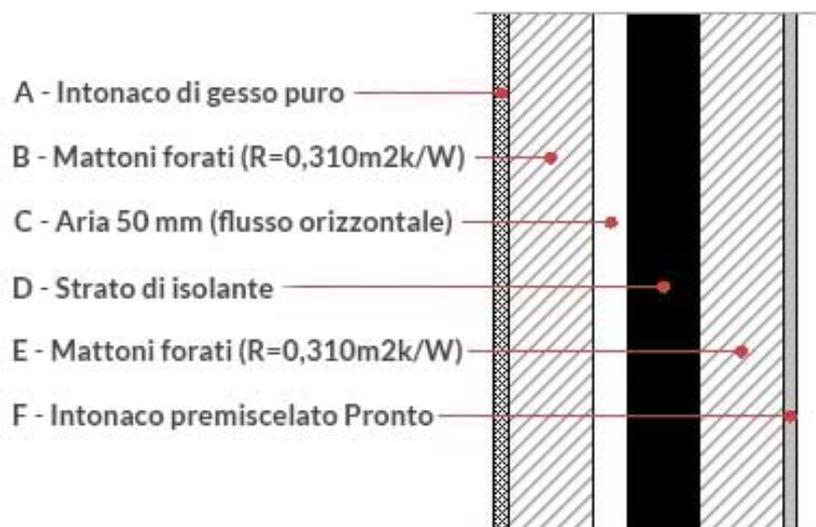


Figura 3.6. Stratigrafia parete esterna di tamponamento [19].

È da precisare però, che nella valutazione dello scambio termico che avviene tra le superfici di un edificio e lo spazio esterno si adottano alcune ipotesi semplificative. Considerando infatti che lo spessore di una parete è diversi ordini di grandezza minore della sua altezza o larghezza, si può affermare con buona approssimazione che il flusso termico sia passante in direzione perpendicolare alle pareti stesse, nonché a tutti gli strati costituenti.

Considerando inoltre l'ipotesi di stazionarietà, ovvero assumendo che la differenza tra la parete interna e quella esterna non sia funzione del tempo, si ha l'implicazione che non vi è alcuna generazione di calore interno e quindi una distribuzione lineare della temperatura.

Sotto tali ipotesi, si può definire il flusso termico per unità di superficie, secondo l'espressione seguente:

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

(3.5)

Dove:

- $T_1 > T_2$, per convenzione;
- $\frac{1}{h_i}$ [$\frac{m^2 K}{W}$], resistenza superficiale interna;
- $\frac{1}{h_e}$ [$\frac{m^2 K}{W}$], resistenza superficiale esterna;
- s [m], spessore lastra;
- λ [$\frac{W}{m K}$], conducibilità termica del materiale costituente la lastra.

Si sottolinea come il rapporto $U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$ prenda il nome di *trasmissione termica*, e rappresenta un indice delle dispersioni termiche attraverso un pannello, o lastra, di caratteristiche note.

La trasmissione è legata strettamente alla conducibilità termica del materiale costituente il pannello, nonché al suo spessore: tanto più è spesso il pannello tanto più bassa sarà la trasmissione, tanto più alta sarà la conducibilità tanto elevato sarà il valore di trasmissione termica.

3.3 ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI DIFFUSIVITÀ TERMICA

È di seguito descritta l'attività di laboratorio condotta al fine di determinare la risposta termica del campione di schiuma, le cui caratteristiche sono riportate al *Capitolo 1.4*, in termini di diffusività termica.

3.3.1 STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE

Come accennato in precedenza, nell'introduzione del presente capitolo, la diffusività termica è una caratteristica termofisica di un materiale che ne descrive la sua capacità di assorbire e accumulare calore. Si esprime come:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Dove:

- α [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$], diffusività termica del materiale;
- λ [$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$], conducibilità termica del materiale;
- ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$], densità del materiale;
- c [$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$], calore specifico del materiale.

In questo caso, però, non si è ricavato un valore di diffusività termica mediante l'espressione riportata bensì sperimentalmente, con l'ausilio di un set up sperimentale composto da:

- *sorgente laser*;
- *termocamera ad infrarossi*.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Si riporta in *Figura 3.7* il dettaglio del set up sperimentale descritto.

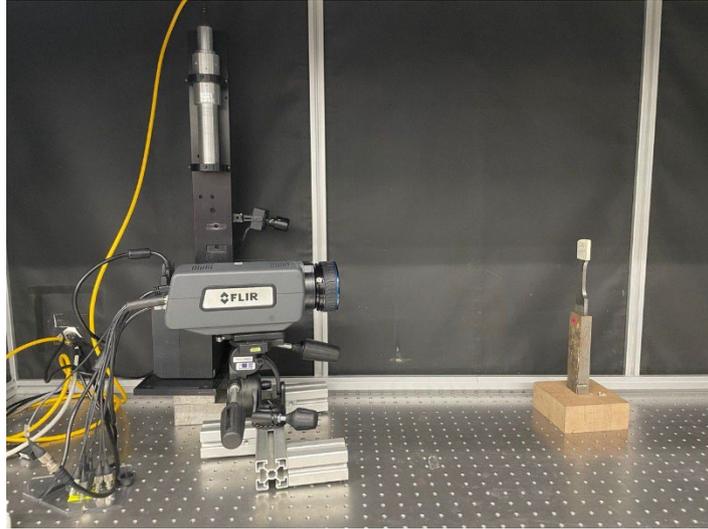


Figura 3.7. Set-up sperimentale utilizzato per le prove di diffusività termica.

La sorgente laser, puntata verso il campione, ne fa aumentare la sua temperatura; di conseguenza si apprezza, per effetto dell'aumento della temperatura nel corpo, il manifestarsi di energia termica irradiata dallo stesso provino.

Tale energia termica non può essere rilevata dall'occhio umano, ma è necessario l'utilizzo di una termocamera ad infrarossi, o telecamera termica.

La termocamera riesce infatti a rilevare senza contatto l'energia termica irradiata da un corpo avente temperatura maggiore dello zero assoluto, ovvero $- 273.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La termocamera, sensibile alle onde elettromagnetiche, ha la funzione di captare, analogamente all'occhio umano, radiazioni elettromagnetiche di una certa lunghezza d'onda. Il range di frequenze percepibile dall'occhio umano è compreso tra $0.4 \text{ }\mu\text{m}$ e $0.7 \text{ }\mu\text{m}$, mentre la radiazione termica catturata dalla termocamera ha una lunghezza d'onda compresa tra $0.75 \text{ }\mu\text{m}$ e $14 \text{ }\mu\text{m}$ [20].

Come è facile intuire, infatti, ogni essere umano è in grado di percepire il calore se posto vicino ad una fonte di calore, ma non è in grado di vederlo.

Al contrario, il sensore (o detector) posto all'interno di una termocamera è in grado di trasformare il calore in un impulso di tipo elettrico, a sua volta convertito in un'immagine termica.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Le termocamere possono essere sostanzialmente di due tipologie diverse:

- *non radiometrica*;
- *radiometrica*.

Le termocamere non radiometriche sono in grado di rilevare l'energia termica emanata da un corpo generando conseguentemente un'immagine termica “che rappresenta la distribuzione del calore dell'oggetto inquadrato” [20].

Le termocamere radiometriche, al contrario, oltre a generare l'immagine termica, è in grado di “misurare la temperatura superficiale di ogni pixel del sensore” [20]. Nel caso in esame si è utilizzata una termocamera radiometrica.

Dopo aver introdotto le specifiche della strumentazione, si riportano quelli che sono i principi teorici posti alla base della misura effettuata, come riportato all'interno dell'articolo di Rosenthal e Friedmann [21] [22], incentrato sulla misura della diffusività termica di due differenti leghe di alluminio, basata sulla teoria “Moving heat sources”.

All'interno dell'articolo si illustra come sia stato dimostrato che quando la distribuzione di temperatura dovuta ad una fonte di calore in movimento di intensità costante, raggiunge una condizione stazionaria, o “quasi stazionaria”, l'equazione differenziale del flusso lineare di calore avente dispersioni di superficie, può essere espressa con la seguente espressione:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} = -2\lambda v \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{PH}{A} T$$

(3. 6)

Dove:

- T [°C], è la differenza tra la temperatura misurata localmente sul corpo oggetto di prova e la temperatura ambiente;
- ξ [cm], è la distanza misurata tra il provino e la fonte di calore;
- $\frac{1}{2\lambda} \left[\frac{cm^2}{s} \right]$, è la diffusività termica;
- P [cm], perimetro del campione;

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

- $A [cm^2]$, area della sezione del provino;
- $H [\frac{1}{cm}]$, rapporto tra il coefficiente di trasmissione del calore per convezione e la conducibilità termica;
- $v [\frac{cm}{s}]$, velocità della sorgente di calore.

Si introducono, inoltre, le seguenti grandezze:

- $\beta [-]$, pendenza della curva di riscaldamento del provino;
- $\beta' [-]$, pendenza della curva di raffreddamento del provino.

L'equazione differenziale sopra citata ha una soluzione del tipo:

$$T = Ae^{\beta\xi} \tag{3.7}$$

Con A e β costanti da determinare.

La trattazione matematica presente all'interno dell'articolo porta alla definizione del valore di diffusività termica oggetto delle misure svolte, ed esprimibile come:

$$\frac{1}{2\lambda} = -\frac{v\beta(\xi)}{[\beta(\xi)]^2 - [\beta'(\xi)]^2} \tag{3.8}$$

Si riportano ora alcune immagini relative alla campagna di misure effettuate, con particolare riferimento alle termo-immagini restituite dalla termocamera durante la fase di riscaldamento dei provini, nonché a grafici in cui si sono riportati gli andamenti della temperatura in funzione del tempo di misurazione.

È da precisare che le misure di diffusività termica sono state sì eseguite sul campione di schiuma (Campione 1) al fine di caratterizzare il materiale ma, in aggiunta, si è deciso di sottoporre anche il campione di alluminio “bulk” (Campione 2) alla stessa tipologia di prova: questa scelta è stata fatta non tanto nell'ottica di ricavarne un valore sperimentale di diffusività termica, in quanto ben noto da letteratura, bensì per poter

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

apprezzare anche attraverso le termo-immagini il diverso comportamento dei due materiali nei confronti della diffusione del calore al loro interno.

Nelle immagini che seguono è illustrato il processo di diffusione del calore all'interno del campione per effetto dell'incidenza del laser, premettendo che l'istante $t = 0$ s coincide con quello appena antecedente all'accensione del laser e che si identifica l'istante generico successivo a quello iniziale con $t = t_i$, come indicato in *Figura 3.8*.

I colori che si osservano, inoltre, indicano la temperatura raggiunta all'interno del provino, dove la transizione da basse ad elevate temperature è raffigurata graficamente con il passaggio dei colori dal blu al rosso.

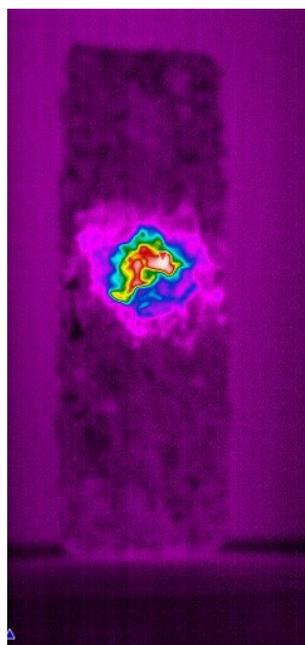


Figura 3.8. Campione 1 nell'istante t_1 appena successivo all'accensione del laser. Il calore generato dal laser non si è ancora diffuso e risulta concentrato nel centro del provino.

In questo istante il provino non è soggetto solamente al calore emesso dal laser incidente, dal momento che nell'ambiente circostante ci sono altre fonti di calore che incidono più o meno direttamente sul provino.

In un istante generico $t_2 > t_1$, successivo all'accensione del laser, la diffusione del calore coinvolge una porzione del campione che è funzione della capacità dello stesso di diffondere, ovvero della sua diffusività (*Figura 3.9*).

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

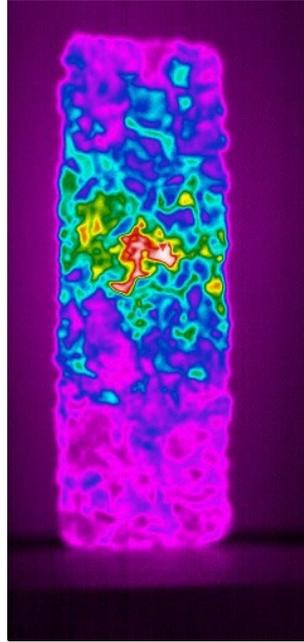


Figura 3.9. Diffusione del calore all'interno del Campione 1 ad un istante temporale generico.

È stata eseguita, pertanto, è una operazione di “filtraggio” o “pulizia” dell’immagine restituita dalla termocamera eseguita tramite eliminazione di tutti i contributi di calore “spuri” antecedenti all’accensione del laser, permettendo così di ricostruire il processo di diffusione del calore all’interno del provino a partire dal momento esatto di accensione del laser. In *Figura 3.10*, quindi, si riporta la termo-immagine del campione di schiuma al termine della fase di riscaldamento, ripulita dei contributi spuri relativi alla “situazione” termica dell’istante $t = 0$ s.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

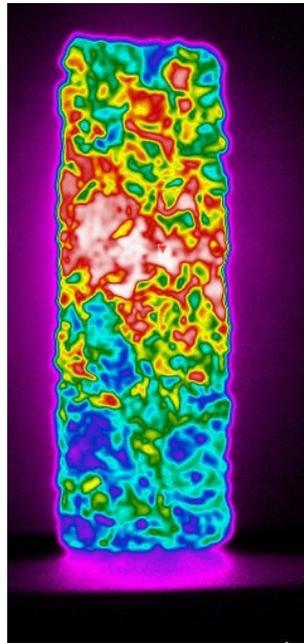


Figura 3.10. Diffusione termica nel Campione 1 all'istante finale del processo di riscaldamento.

Per completezza, in *Figura 3.11* si riporta una sequenza di confronto dei tre istanti analizzati: istante di accensione del laser (*Figura 3.8*) e due istanti successivi in cui il calore sta diffondendo all'interno del corpo (*Figura 3.9* e *Figura 3.10*).

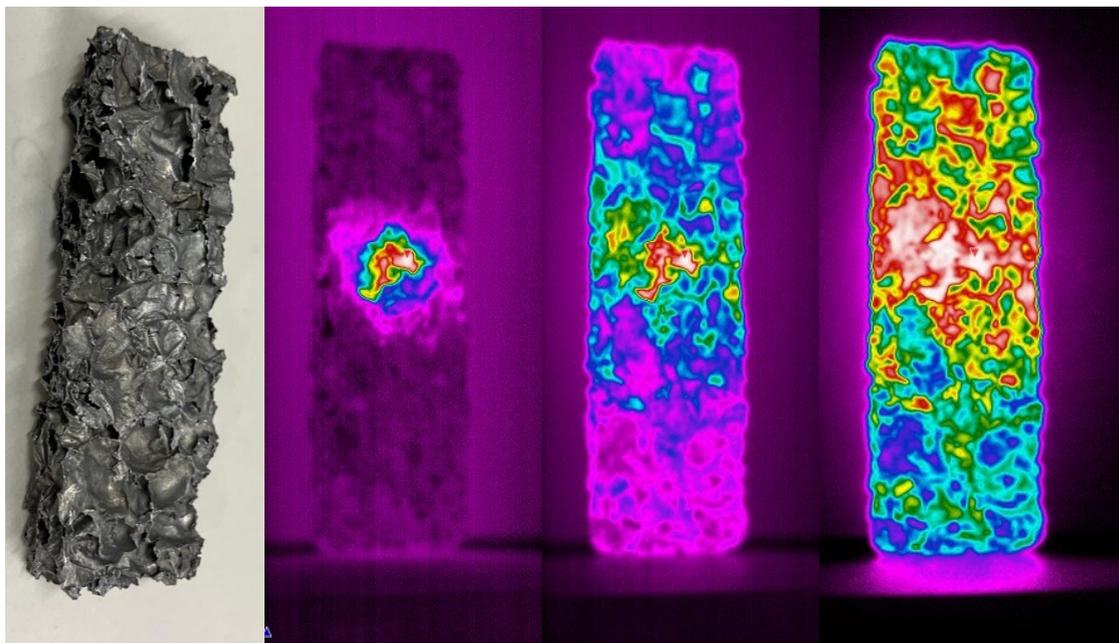


Figura 3.11. Confronto "termico" dei tre istanti analizzati.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

È stato possibile, inoltre, ricavare nella fase di riscaldamento l'aumento della temperatura in funzione del tempo all'interno di una regione di interesse selezionata denominata "ROI" ("region of interest") e costituita da punti campionati per i quali è stata registrato l'aumento di temperatura (misurato in °C) (Figura 3.12).

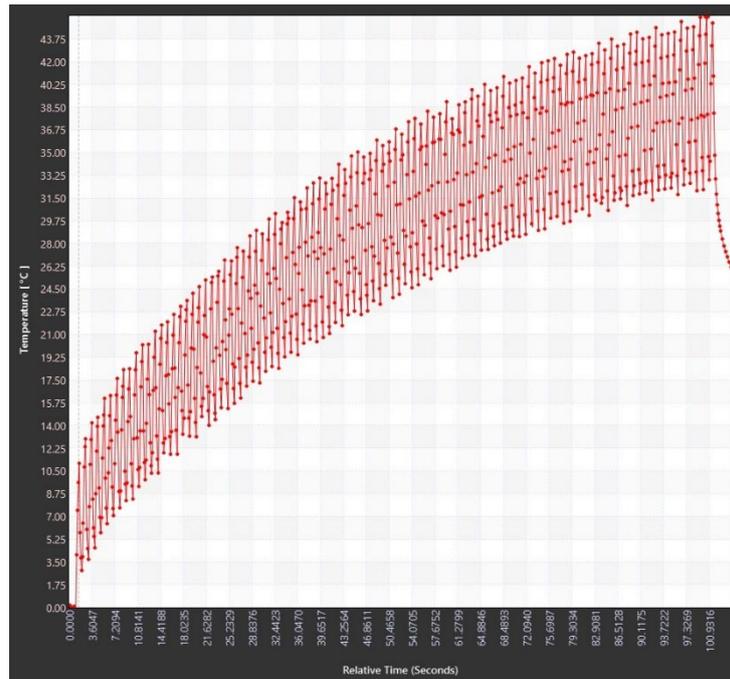


Figura 3.12. Andamento dell'aumento della temperatura all'interno del Campione 1.

Le stesse informazioni ricavate per il campione di schiuma sono state estrapolate anche dal campione di alluminio solido al fine di poter confrontare i risultati dei due materiali e per poter sottolineare le differenze nella predisposizione dei due provini a diffondere il calore.

In Figura 3.13 è infatti illustrato il frame relativo al campione di alluminio solido ad un istante generico della fase di riscaldamento: si notano il riscaldamento localizzato in corrispondenza del laser incidente e le "riflessioni spurie" menzionate in precedenza e causate da fonti di calore presenti nell'ambiente.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

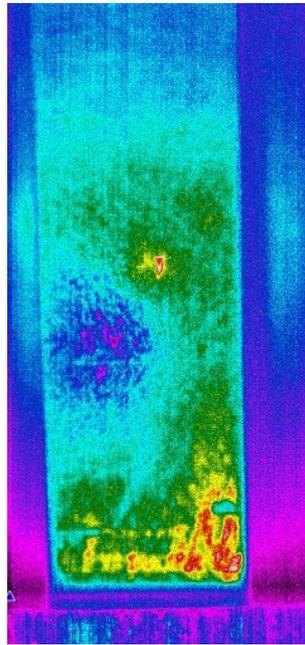


Figura 3.13. Diffusione del calore all'interno del Campione 2 ad un istante temporale generico.

Al termine della fase di riscaldamento, così come per il Campione 1, si è ricavato anche per questo un frame termico ripulito da quello relativo all'istante appena antecedente all'istante $t = 0$ s, tramite processo di filtering (*Figura 3.14*).

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

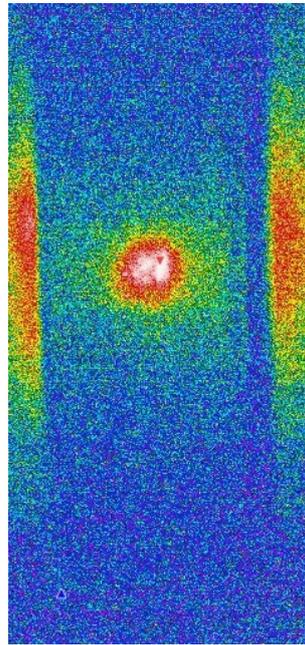


Figura 3.14. Diffusione termica nel Campione 2 all'istante finale del processo di riscaldamento.

Analogamente, si è estrapolato l'andamento dell'aumento della temperatura in funzione del tempo di campionamento (*Figura 3.15*).

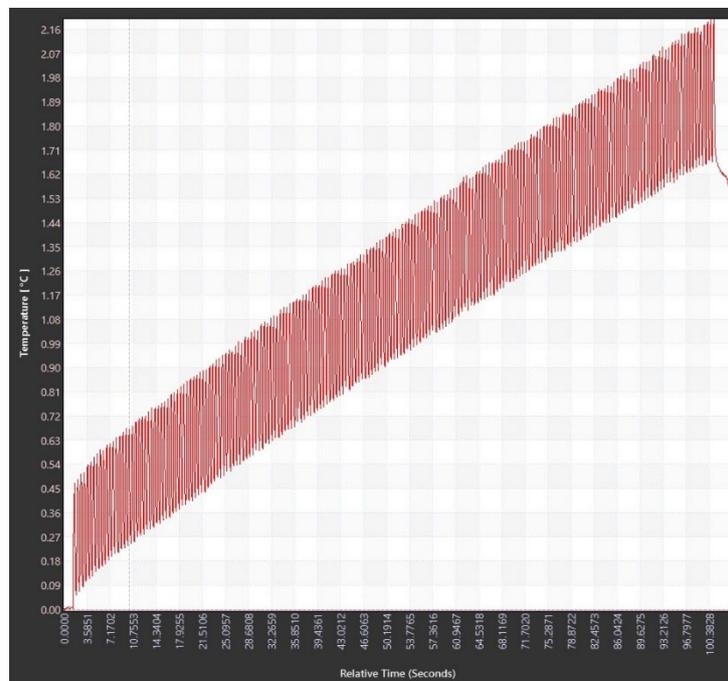


Figura 3.15. Andamento dell'aumento della temperatura all'interno del Campione 2.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

3.3.2 RISULTATI

Alla luce di quanto accennato sui richiami teorici posti alla base delle misurazioni effettuate, e successivamente al post-processamento dei dati ottenuti dalle misure sperimentali e dall'analisi dei frame termici (o termo-immagini) ricavati, si è pervenuti per il campione di schiuma di alluminio ad un valore di diffusività termica pari a $32 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Al contempo, le misure effettuate sul campione di alluminio solido, o "bulk", hanno confermato le indicazioni presenti in letteratura, fornendo valori pari a $87 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Tali valori forniscono una prima indicazione, ovvero il rapporto 1:3 tra la diffusività termica della schiuma e quella dell'alluminio: in tal senso, osservando la *Figura 3.12* e *Figura 3.15*, emerge come a parità di tempo trascorso la schiuma metallica è in grado di diffondere meno il calore, che pertanto rimarrà concentrato localmente con conseguente aumento repentino di temperatura.

Osservando infatti un istante generico di campionamento, ad esempio $t = 32 \text{ s}$, l'aumento della temperatura nella schiuma è pari a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ mentre risulta essere prossima a $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ per il campione di alluminio solido.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

3.4 CONSIDERAZIONI E CONFRONTO CON MATERIALI TRADIZIONALI

Il valore di diffusività termica ottenuto viene ora analizzato al fine di poter determinare in che relazione si pone la categoria delle schiume metalliche, ed in particolare la schiuma di alluminio analizzata, con i materiali tradizionali utilizzati in edilizia, in termini di prestazioni di isolamento termico.

Si può affermare che dal punto di vista dell'isolamento termico, la grandezza che meglio identifica l'attitudine di un materiale a impedire il passaggio di calore è la conducibilità termica.

In tal senso, non essendo state effettuate in questo studio misure di conducibilità termica, è risultato più opportuno analizzare e confrontare la schiuma di alluminio con gli altri materiali isolanti dal punto di vista della diffusività termica.

Si riportano dunque in *Figura 3.15*, i valori di diffusività termica di materiali utilizzati come isolanti termici, sfruttando l'equazione 3.2 vista a pagina 82, noti i valori di conducibilità termica, densità e calore specifico degli stessi materiali.

MATERIALE	CONDUCIBILITA' TERMICA [W/(m °K)]	DENSITA' [kg/m]	CALORE SPECIFICO [J/(kg °K)]	DIFFUSIVITA' TERMICA [mm ² /s]
lana di vetro	0,032	85	1030	0,37
lana di roccia	0,035	40	1030	0,85
polistirene estruso XPS	0,032	33	1450	0,67
pannelli sughero	0,036	120	1900	0,16
pannello fibra legno	0,041	140	2100	0,14
poliuretano	0,022	35	1500	0,42

Figura 3.15. Valori di diffusività termica per materiali isolanti.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Analizzando i valori di diffusività riportati in tabella con il valore ricavato sperimentalmente per la schiuma di alluminio, si nota in modo chiaro ed evidente come vi siano due ordini di grandezza tra i primi ed il secondo: la diffusività termica di un pannello di fibra in legno, pari a $0.14 \text{ mm}^2/\text{s}$, risulta essere 228 volte inferiore a quella della schiuma di alluminio testata.

In tal senso, sulla base dei risultati ottenuti, la schiuma di alluminio non sembra possedere caratteristiche di isolamento termico paragonabili a quelle dei materiali isolanti comunemente impiegati in edilizia.

Si può affermare inoltre, che l'analisi condotta sulla diffusività termica non ha portato indicazioni favorevoli circa la possibilità di utilizzare le schiume in alternativa ai materiali tradizionali; sarebbe opportuno, a mio parere, cercare ulteriori conferme circa il dato che è emerso, realizzando ulteriori campagne sperimentali relativa alla misurazione diretta della conducibilità termica con diversi set up sperimentali.

In conclusione, è opportuno però far riferimento al fatto che i valori di diffusività termica ottenuti, sebbene non soddisfino i requisiti necessari per la coibentazione termica delle pareti di un edificio, rappresentino un buon risultato globale dal momento che la presenza di pori dimostra la sua buona capacità di trattenere il calore a discapito di quanto si possa pensare per i materiali costituiti da una struttura globalmente conduttiva come quella dell'alluminio e in generale dei metalli.

4. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE E MODELLO FEM

4.1 INTRODUZIONE AL LAVORO SVOLTO

All'interno di questo capitolo, viene illustrata l'attività sperimentale svolta al fine di caratterizzare i campioni analizzati in precedenza per le prove acustiche e termiche, le cui caratteristiche sono state riportate in termini di geometria, valori di densità e composizione chimica nel *Capitolo 1.4*, in termini di capacità di smorzamento delle vibrazioni, tramite misure di fattore di attenuazione vibrazionale, o "loss factor".

Lo smorzamento di vibrazioni meccaniche è di interesse nel campo delle costruzioni nella misura in cui si ha evidenza del fatto che gli elementi strutturali di sezione cava, utilizzati per ridurre il peso delle strutture, se opportunamente riempiti ("foamed") con schiuma di alluminio, riducono le oscillazioni se soggette ad eccitazioni esterne, a parità di rigidità offerta [2]. In tal senso, non si ha però riscontro in letteratura di requisiti e valori minimi richiesti ai materiali strutturali in termini di fattore di attenuazione e, pertanto, verranno illustrati esclusivamente metodi e tecniche sperimentali adottate per le misure di η .

A completamento della trattazione relativa alla capacità di smorzamento di vibrazioni di tipo meccanico, è riportato il dettaglio dei tentativi eseguiti al fine di realizzare un modello FEM del campione di schiuma per poter indagare la dipendenza delle proprietà di smorzamento delle vibrazioni dalla distribuzione randomizzata dei pori all'interno del provino.

Risulta opportuno, al fine di definire il concetto di "loss factor", far presente che tutti i materiali dissipano energia durante cicli di deformazione la capacità di smorzamento intrinseca del materiale stesso [23].

Lo smorzamento è determinante ogni qual volta un corpo sia eccitato da una forzante esterna caratterizzata da una frequenza prossima a quella di risonanza del corpo eccitato: lo smorzamento è, infatti, in grado di "abbattere" la risposta del sistema conseguentemente all'azione della forzante.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

Il “loss factor”, η [–], è una grandezza adimensionale alla quale può essere associata una definizione energetica in termini di energia dissipata, come sopra accennato.

Caricando in modo elastico un corpo per il tramite di una forza superficiale σ_{max} , questo accumulerà energia di deformazione elastica per unità di volume [3], definita come:

$$U = \int_0^{\sigma_{max}} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{max}^2}{E} \quad [\text{MPa}] \quad (4.1)$$

Dove:

- σ [MPa], valore della tensione applicata, compreso tra 0 e σ_{max} ;
- $d\varepsilon$ [–], deformazione elastica infinitesima (variabile di integrazione);
- E [MPa], modulo di Young del corpo.

In un ciclo completo di carico e scarico, come rappresentato in *Figura 4.1*, il sistema dissipa una quantità di energia pari a ΔU , esprimibile come:

$$\Delta U = \oint \sigma d\varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (4.2)$$

e si definisce di conseguenza il “loss factor” η [–] come:

$$\eta = \frac{\Delta U}{U} \quad [-] \quad (4.3)$$

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

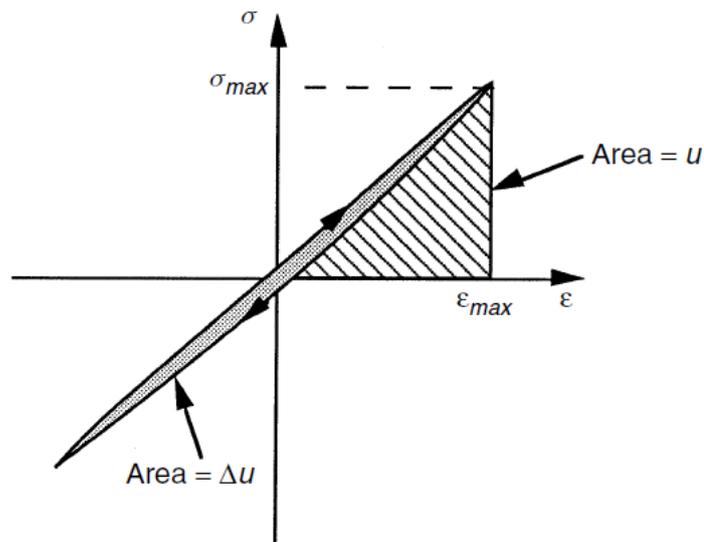


Figura 4.1. Ciclo di carico e scarico – Energia di deformazione elastica, energia dissipata nel ciclo [3].

In generale, il “loss factor” dipende da diversi fattori, quali la frequenza del ciclo di carico (o della forzante esterna), la temperatura esterna e l’ampiezza della sollecitazione applicata.

Come introduzione al lavoro sperimentale svolto, e per meglio declinare nel campo delle schiume metalliche i concetti enunciati, si riportano i punti salienti dell’attività sperimentale condotta da Banhart e Baumeister [23] ed incentrata sulla misura del “loss factor” di schiume di alluminio. Le misure effettuate dagli autori, così come quelle descritte in seguito, hanno lo scopo di ricavare la risposta in termini di smorzamento di materiali altamente disorganizzati e aventi una distribuzione di pori “randomizzata”. Questa fonte di “casualità”, come meglio spiegato in seguito, incide fortemente sui risultati ottenuti e sulle tecniche di misura.

Banhart e Baumeister [23] specificano come, al fine di rendere più precisa e affidabile la loro misura, sia stato necessario scorporare dai risultati sperimentali ottenuti, e quindi dalla grandezza misurata $\eta_{sperim.}$, una serie di contributi definiti “residui” o “parassiti” che sovrastimano l’attenuazione vibrazionale esplicabile dal corpo testato.

In tal senso, si può definire una equazione di “bilancio” di η , nella forma seguente:

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

$$\eta_{sperim.} = \eta_{provino} + \eta_{set} + \eta_{aria} + \dots$$

(4.4)

Dove:

- $\eta_{sperim.}$ è il valore effettivamente misurato del “loss factor”, quindi comprensivo di tutti i contributi parassiti;
- $\eta_{provino}$ è il valore di “loss factor” effettivo del campione, al netto dei contributi spuri quali il contatto tra provino e campione nonché la presenza dell’aria;
- η_{set} è il contributo dato dalla frizione tra provino e set-up sperimentale. È da intendersi come un contributo spurio che sovrastima la capacità di smorzamento effettiva del campione;
- η_{aria} è il contributo dato dalla presenza dell’aria all’interno dell’ambiente in cui si è eseguita la prova. Anch’esso è un contributo che stima in eccesso il valore effettivo $\eta_{provino}$, dal momento che è generato per frizione tra campione ed aria e collabora con il campione “aiutandolo” nello smorzamento della sollecitazione esterna.

In quest’ottica, quindi, risulta opportuno eliminare i contributi residui per poter avere una stima accurata del reale valore di attenuazione.

Nell’articolo menzionato [23], il campione di schiuma di alluminio a celle chiuse di forma parallelepipedica (densità pari a 670 kg/m^3), viene inserito in due differenti set-up sperimentali, come mostrato in *Figura 4.2*:

nel primo caso il campione è bloccato ad una estremità da un morsetto ricreando così il modello di una trave a mensola, mentre nel secondo caso il campione è adagiato a due appoggi posti alle estremità.

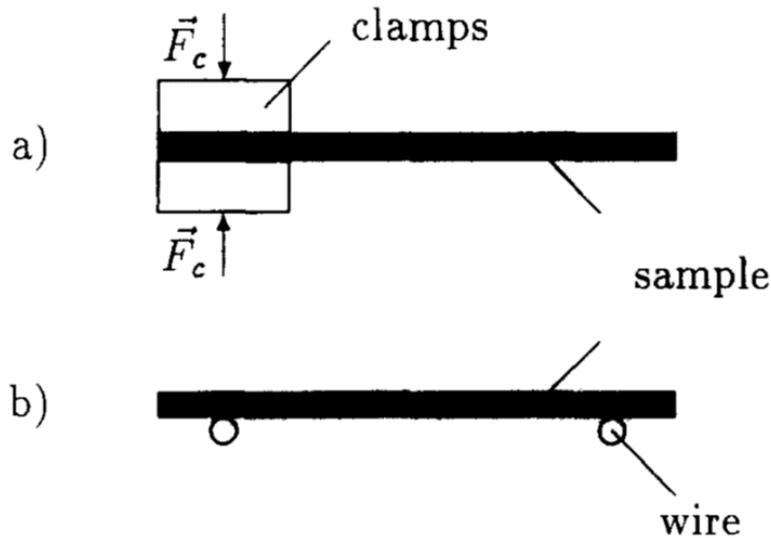


Figura 4.2. Set-up sperimentali descritti nell'articolo di Banhart e Baumeister [23].

La vibrazione del campione, conseguentemente alla quale si vuole stimare il “loss factor”, è generata in queste prove sperimentali per il tramite di una eccitazione di tipo elettromagnetica indirizzata su di un disco ferromagnetico sul quale è appoggiato il campione testato.

Entrambi gli schemi a) e b) sono appoggiati sul supporto ferromagnetico ma, in termini di $\eta_{provino}$, è chiaro quindi che sarà lo schema b) a garantire un minor contatto tra l'apparato sperimentale e quindi una minor sovrastima dell'attenuazione per effetto della frizione tra i corpi, nonché un valore di η_{set} tendente allo zero.

Gli autori spiegano inoltre che η_{aria} è minimizzato eseguendo le prove in una camera “a vuoto”, ovvero all'interno della quale l'aria è stata rimossa tramite pompa a vuoto []. Gli autori sottolineano però, come entrambi i set-up utilizzati nelle misure non abbiano dato risultati soddisfacenti dal momento che l'esecuzione della prova ripetuta due volte consecutivamente, con spostamento e riposizionamento del provino nella medesima posizione iniziale, ha fornito risultati differenti tra loro. Lo si può apprezzare in *Figura 4.3*, dove è evidente lo scostamento dei valori di η nelle due misurazioni effettuate, al variare della forza esercitata dal morsetto posto in testa al campione.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

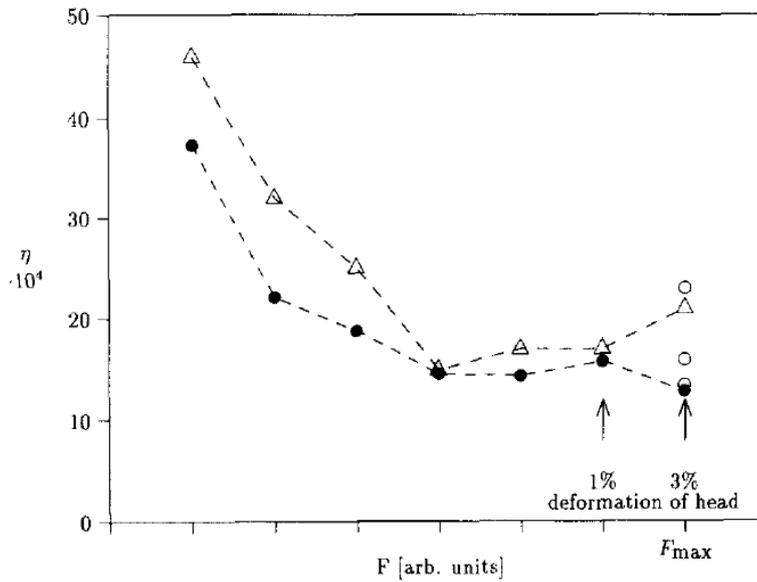


Figura 4.3. Variazione del valore di η tra la prima e la seconda misura, in funzione della forza applicata [23].

Al fine di risolvere la problematica descritta che ha portato ad una inaffidabilità dei risultati ottenuti, è stata studiata una soluzione che ha riguardato la modifica della geometria del provino descritta come in *Figura 4.4*.

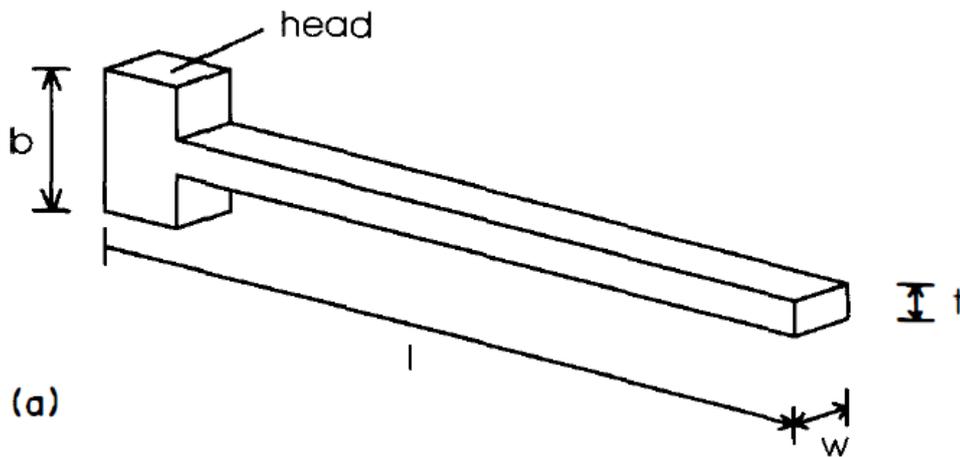


Figura 4.4. Modifica geometria del campione in esame [23].

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

Tale modifica ha portato maggiore stabilità nelle misure ripetute poiché, secondo gli autori, il ringrosso ad una estremità del campione agisce in modo tale da “allontanare” il contatto campione-morsetto dal resto del campione che sarà in vibrazione per effetto dell’eccitazione esterna, ed inoltre, si ha avuto evidenza della quasi costanza nella misura di η al variare dell’intensità della forza di ammorsamento applicata.

Una volta individuata quindi la geometria corretta e funzionale per la ripetibilità delle prove, è stata eseguita una campagna sperimentale su diversi provini con geometrie, densità e dimensioni medie dei pori differenti, come illustrato in *Figura 4.5*.

Sample dimensions and densities and approximate average pore sizes

Sample	Dimensions (mm)				Density ^a (g cm ⁻³)	Average cell size (mm)
	<i>l</i>	<i>w</i>	<i>t</i>	<i>b</i>		
1	214	26.3	5.1	23.1	0.67	2
2	226	23.8	5.0	19.3	0.69	2
3	230	27.2	3.6	21.9	1.01	1
4	237	25.2	2.6	14.4	1.34	1
5	245	26.1	2.4	13.2	1.80	0.8
6	259	28.8	2.4	11.9	2.28	≈0.3
7	235	30.0	2.3	10.5	2.55	—

Figura 4.5. Tabella riassuntiva dei provini testati a seguito dell’individuazione della geometria più idonea [23].

Per ciascuno dei sette campioni sono stati misurati i valori di attenuazione, ripetendo la misura andando a diminuire gradualmente la lunghezza dei campioni stessi e testando un numero di lunghezze pari a cinque. Nel dettaglio, sono stati misurati i valori di attenuazione nel secondo modo flessionale [23] in tutti i provini per tutte le lunghezze testate, e nel terzo modo flessionale in tutti i provini ma per la sola lunghezza iniziale. Concettualmente però, la capacità di smorzamento delle vibrazioni di un corpo costituito da un determinato materiale, non è funzione della frequenza e quindi del modo di vibrare esaminato. Gli autori, pur consapevoli di questo fondamento, hanno eseguito l’analisi in termini di modi di vibrare perché, dato il grande disordine microstrutturale delle

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

schiume metalliche, era opportuno fissare almeno un parametro (cioè il modo di vibrare). I risultati ottenuti sono riportati in *Figura 4.6*.

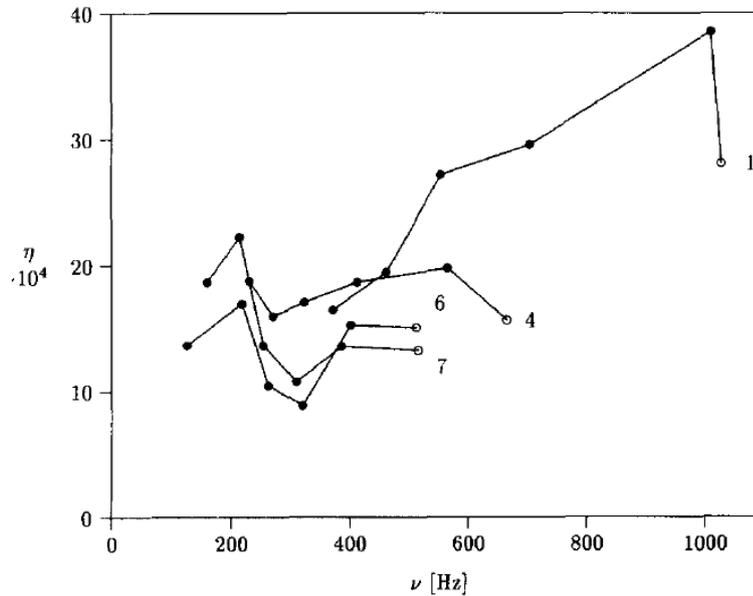


Figura 4.6. Andamento di η al variare della lunghezza dei provini e quindi del valore di frequenze di risonanza del secondo modo flessionale [23].

Ciò che fa variare η in funzione della frequenza e quindi a seconda dei modi di vibrare è da ricercare nella distribuzione spaziale della densità del materiale, che non è quindi costante in tutto il provino, ma anche nello scostamento della forma dei pori da quella perfettamente sferica.

L'obiettivo degli autori è stato però raggiunto, dal momento che, come descrivono nel loro articolo, sono riusciti ad ottenere valori di attenuazione indipendenti dalla frequenza e specificatamente dalle frequenze di risonanza dei differenti modi di vibrare. Nel dettaglio, gli autori identificano diversi possibili accorgimenti per ridurre le oscillazioni nei valori misurati: ridurre tali variazioni riducendo le disomogeneità del materiale costituente i provini, sottoponendo a test campioni di dimensioni maggiori e mediare i valori ottenuti nelle diverse frequenze relative ai differenti modi di vibrare. Di conseguenza, è stato calcolato un valore unico di η per ogni provino, come media dei valori di attenuazione ottenuti alle varie frequenze di risonanza, e si è riportato l'andamento di tale parametro in funzione della densità, come riportato in *Figura 4.7*.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

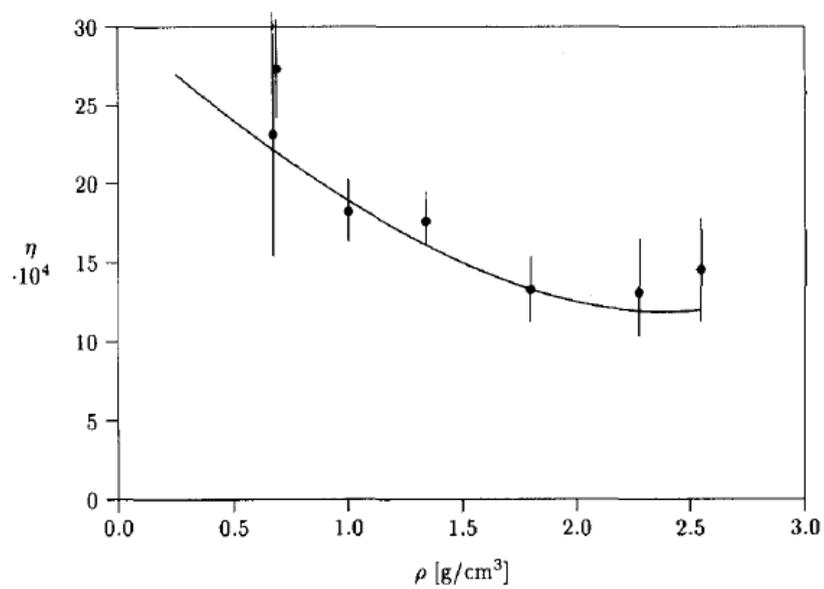


Figura 4.7. Andamento di η al variare della densità del provino [23].

4.2 ATTIVITÀ DI LABORATORIO – MISURE DI ATTENUAZIONE

In questo capitolo viene descritta l'attività di laboratorio svolta al fine di determinare l'attitudine delle schiume di alluminio all'attenuazione e quindi smorzamento delle vibrazioni, tramite la misura del “loss factor” η .

Sono state eseguite misure su diverse tipologie di provini e diversi set up sperimentali, al fine di poter ricreare casistiche differenti ed avere una maggior disponibilità di risultati da analizzare.

Le peculiarità dei set-up di prova verranno descritte nel paragrafo successivo mentre si riporta di seguito la descrizione dei campioni testati, che risultano essere i medesimi utilizzati da G. Ubertalli et al. in [24]:

Campione A (*Figura 4.8*):

- Schiuma di alluminio a celle chiuse;
- spessore 9 mm;
- densità 280 kg/m³;
- lunghezza 60 mm, larghezza 35 mm.



Figura 4.8. Campione A.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

Campione B (sandwich formato da strato esterno + “core” interno – *Figura 4.9*):

- piatti di alluminio (utilizzati per la “pelle di rivestimento” dei sandwich) di lega AA-6016 (Al 98.75 % + Mg 0.25% + Si 1%);
 - spessore 1.2 mm;
 - densità 2700 kg/m³;
 - lunghezza 60 mm e larghezza 35 mm.
- Core composto da schiuma di alluminio a celle chiuse;
 - spessore 9 mm;
 - densità 280 kg/m³;
 - lunghezza 60 mm e larghezza 35 mm.



Figura 4.9. Campione B.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

Campione C (*Figura 4.10*):

- Alluminio solido (o “bulk”);
- spessore 20 mm;
- densità 280 kg/m³;
- lunghezza 60 mm, larghezza 35 mm.



Figura 4.10. Campione C – Alluminio bulk.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

4.2.1 STRUMENTAZIONE, METODI E MISURE.

Il set-up sperimentale utilizzato per le prove di attenuazione, di cui si riporta un dettaglio in *Figura 4.11*, è composto dai seguenti elementi:

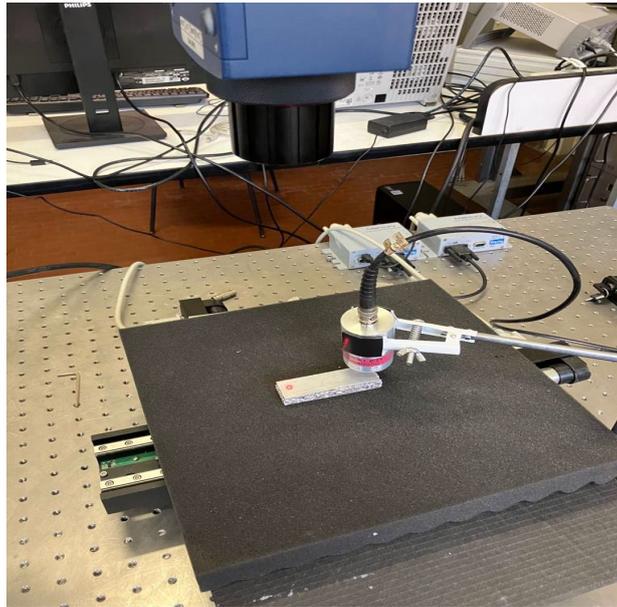


Figura 4.11. Set-up sperimentale per prove di attenuazione.

- Laser. Attraverso esso, viene eccitato il provino con un'eccitazione (o segnale) di tipo “chirp”, ovvero costituita da una frequenza variabile nel tempo, compresa in un range variabile. In queste misure, tale range è stato fatto variare tra 1 kHz – 20 kHz e 20 kHz – 40 kHz, al fine di sottoporre i campioni a input differenti per apprezzare eventuali similitudini o differenze nella risposta del materiale;
- Trasduttore piezoelettrico (*Figura 4.12*). È in grado di registrare la risposta del materiale (intesa anch'essa come “segnale”) all'input somministrato;

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE



Figura 4.12. Dettaglio del trasduttore piezoelettrico.

- Base di appoggio. È costituita da un pannello in gommapiuma e funge da appoggio per i provini testati;
- Binario per lo scorrimento della base di appoggio. Il provino oggetto di test, si muove in modo solidale con la base nelle due direzioni ortogonali x e y, fino al raggiungimento di un punto di coordinate note.

Come verrà spiegato successivamente all'interno del capitolo, si sono testati diversi punti dei campioni, ciascuno dei quali definito tramite coordinate nel piano x e y, al fine di studiare globalmente la capacità di smorzamento dei provini.

Concettualmente, infatti, sebbene la capacità di smorzamento delle vibrazioni sia una caratteristica intrinseca dei materiali, c'è da aspettarsi che la schiuma di alluminio presenti un comportamento variabile per sua complessità caratterizzata da porosità irregolare sia come dimensione che come distribuzione dei pori, così come accennato precedentemente all'interno di questo capitolo.

Quelli poc'anzi descritti sono i componenti base del set-up di prova sperimentale utilizzato, ma è da precisare che nello spirito di studiare diverse casistiche per poter meglio caratterizzare il materiale dal punto di vista vibrazionale, sono state adottate

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

diverse modalità di prova e, contestualmente, alcune sono state considerate valide in termini di risultati ottenuti mentre altre sono state scartate.

Si descrivono ora nel dettaglio le combinazioni di prova studiate per le prove in oggetto e si riportano quelle che sono state le motivazioni per le quali si è deciso di considerare validi solo alcune di queste.

Un primo set-up impiegato, rappresentato in *Figura 4.13*, prevede che il laser agente e il trasduttore piezoelettrico siano ravvicinati tra loro e posti sulla stessa faccia del campione testato; il provino è appoggiato al supporto in gommapiuma.

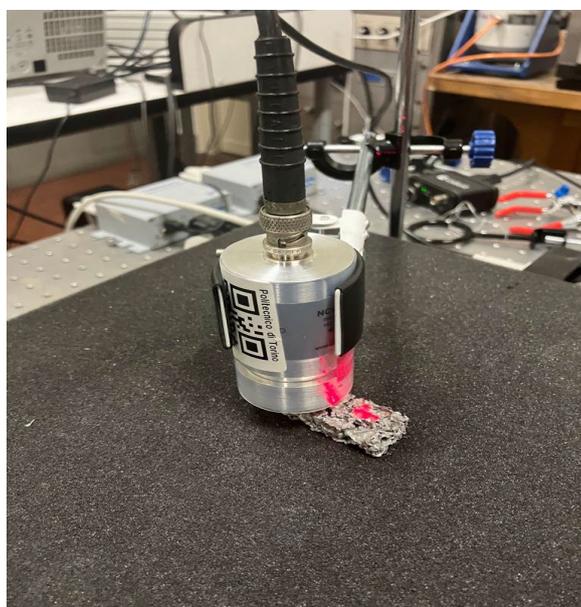


Figura 4.13. Set-up con trasduttore e laser sulla stessa faccia del campione (dettaglio della prova eseguita sul campione A).

Un secondo schema, rappresentato in *Figura 4.14*, prevede che il laser incidente e il trasduttore piezoelettrico non siano ravvicinati tra loro bensì posti rispettivamente da un lato e dall'altro del campione.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE



Figura 4.14. Set-up con trasduttore e laser su facce opposte del campione (dettaglio della prova eseguita sul campione A).

In *Figura 4.14* si nota, inoltre, il dettaglio di una porzione di nastro biadesivo applicato sul trasduttore per tenere a contatto il campione di schiuma.

In *Figura 4.15*, si illustra la stessa tipologia di set-up applicata al campione di alluminio “bulk”.



Figura 4.15. Set-up con trasduttore e laser su facce opposte del campione (dettaglio della prova eseguita sul campione C).

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

Nell'ottica di testare diversi schemi sperimentali al fine di ottenere una maggior varietà di risultati, come accennato in precedenza, si sono adottati ulteriori set-up sperimentali caratterizzati dalla mancanza di contatto tra il provino e il traduttore piezoelettrico.

Nello svolgimento delle prove, però, questi due sistemi si sono verificati fallaci in quanto troppo soggetti all'instabilità del montaggio.

Si riporta, dunque, in *Figura 4.16* e *Figura 4.17*, il dettaglio dei due sistemi menzionati. Il primo, *Figura 4.16*, è caratterizzato da un sistema in grado di tenere sospeso il campione tramite fili tesi legati all'anello metallico del sistema di sospensione, mentre di sotto del campione è posto il trasduttore.



Figura 4.16. Set-up in sospensione con fili (dettaglio campione B).

Il secondo, *Figura 4.17*, è invece costituito da un sistema in sospensione ma all'interno del quale il provino è appoggiato ad un supporto metallico solo puntualmente (in questo caso è stato utilizzato un morsetto con sola funzione di supporto).

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

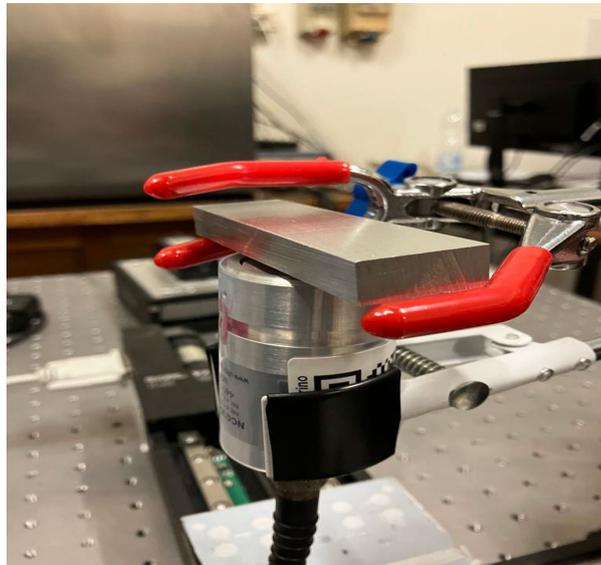


Figura 4.17. Set-up in sospensione con supporto (dettaglio campione C).

Entrambi i sistemi di misura pocanzi descritti si sono verificati fallaci e non idonei per le misure svolte, come accennato pocanzi. Infatti, la labilità del sistema di supporto, sia nel caso della sospensione realizzata con fili, sia nel caso di quella con morsetto di supporto, ha causato ulteriori vibrazioni del campione nell'istante in cui l'impulso del laser incideva sul provino stesso. La mancanza di stabilità, quindi, ha agito come rumore aggiuntivo nel segnale di risposta che il trasduttore ha ricevuto, rendendo impossibile la fase di post-processing in quanto. Si è infatti sperimentalmente osservata l'impossibilità di riconoscere e distinguere i picchi di risposta in corrispondenza delle frequenze di risonanza legate ai differenti modi di vibrare, e di conseguenza l'errore nella stima del fattore di attenuazione.

È possibile inoltre affermare, che l'inaffidabilità dei risultati ottenuti con questo set-up sperimentale, si spieghino in termini di componenti "parassiti" del fattore di attenuazione ricavato. Anche qualora infatti il segnale sia stato poco sporcato dalla vibrazione aggiuntiva descritta in precedenza, il fattore di attenuazione sarà sicuramente viziato a causa del movimento dovuto alla sospensione del campione, andando a sovrastimare (o anche sottostimare) il valore di attenuazione. Tale spiegazione trova riscontro con quanto riportato precedentemente in questo capitolo relativamente ai contributi spuri di η di cui all'articolo [23].

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

La fase di post processing, avvenuta successivamente alla registrazione del segnale di risposta dei vari provini, è strutturata secondo le seguenti fasi:

- analisi in frequenza del segnale tramite trasformata di Fourier;
- individuazione dei picchi di risposta in corrispondenza delle frequenze di risonanza del campione;
- determinazione del fattore di attenuazione relativo all’i-esima frequenza di risonanza.

Operativamente, la qualità del segnale di risposta registrato è fondamentale al fine di poter eseguire le operazioni successive descritte: in caso di segnale “rumoroso”, infatti, ovvero sporcato da vibrazioni aggiuntive quali presenza dell’aria, voce degli operatori o causato da una non perfetta incidenza del laser sul campione (ad. Esempio sulle creste delle pareti delle celle del provino di schiuma), risulta impossibile ricavare la trasformata di Fourier nonché l’individuazione dei picchi di risposta in frequenza.

Nel dettaglio, è doveroso specificare come si sia pervenuto al valore di attenuazione relativo alle varie frequenze nei punti esaminati dei differenti campioni e nei diversi set up sperimentali.

Una volta registrato il segnale di risposta del campione, infatti, si è ricercata la possibilità che questo, inteso come dato sperimentale, fosse ben rappresentabile da una modello matematico teorico quale la distribuzione di Lorentz [25] (processo di *fitting* tra sperimentale e teorico), la cui espressione è nota come:

$$L(x) = \frac{\frac{2}{\pi\Gamma}}{1 + \left(\frac{x - x_0}{\frac{\Gamma}{2}}\right)^2}$$

(4.5)

Dove:

- x_0 è il valore corrispondente al centro della distribuzione;
- Γ è la larghezza del Lorentziano.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

In *Figura 4.18* è illustrato il semplice caso di distribuzione Lorentziana per $x_0 = 0$ e $\Gamma = 0$.

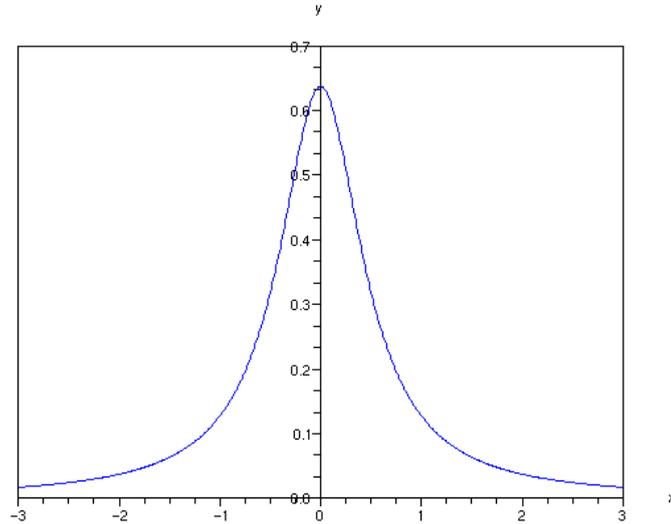


Figura 4.18. Distribuzione Lorentziana con parametri $x_0 = 0$ e $\Gamma = 0$ [25].

Il codice Matlab strutturato per la determinazione della misura di attenuazione, quindi, “cicla” fin tanto che si riesca a trovare, ammesso che si riesca per tutti i punti e per tutte le frequenze di risonanza, una differenza (o scarto) prossimo a zero tra i parametri del modello teorico di Lorentz e le misure sperimentali effettuate.

In caso di esito positivo del ciclo, l’indicatore che misura lo scarto sarà appunto prossimo a zero (e comunque è da considerarsi accettabile uno scarto compreso tra zero ed uno), restituendo il valore di attenuazione per quella frequenza specifica di risonanza, introdotta come dato di input dall’utente dopo aver analizzato la Trasformata di Fourier del segnale, come sopra menzionato.

Si presentano dunque, anticipatamente alla presentazione dei risultati ottenuti, le situazioni che si sono verificate a livello di “pulizia” nella registrazione del segnale, nell’elaborazione della trasformata di Fourier e nel processo di fitting tra modello teorico e risultati sperimentali.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

In primo luogo, come accennato in precedenza, è fondamentale che il segnale registrato sia di buona qualità, ovvero siano facilmente visibile i picchi e le valli dell'intensità del segnale posta sulle ordinate e misurata in Volt, al variare del tempo di campionamento, posto sulle ascisse e misurato in secondi, come rappresentato in *Figura 4.19*.

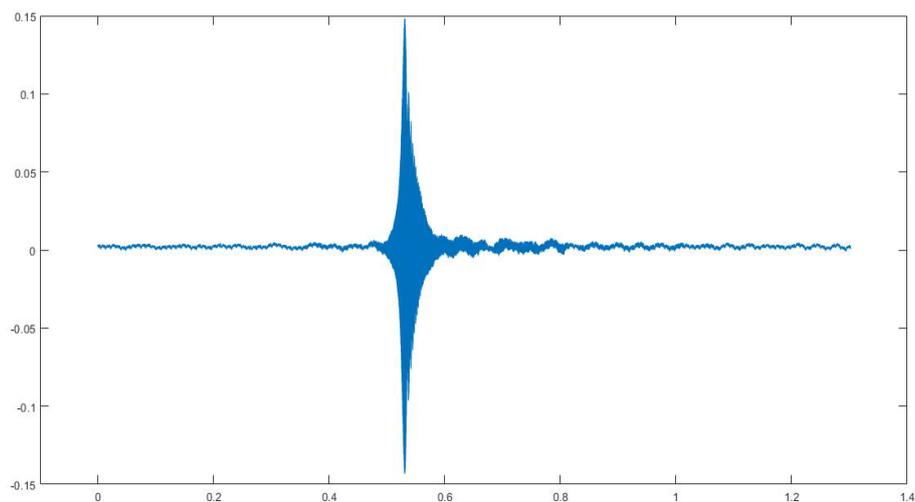


Figura 4.19. Segnale relativo al campione di alluminio solido.

La relativa Trasformata di Fourier, ed in particolare solo la sua componente di modulo, è rappresentata in *Figura 4.20*, in funzione della frequenza. La peculiarità della Trasformata di Fourier è, come ben noto, la ricostruzione nel dominio della frequenza, di un segnale campionato nel dominio del tempo, come nel caso in esame.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

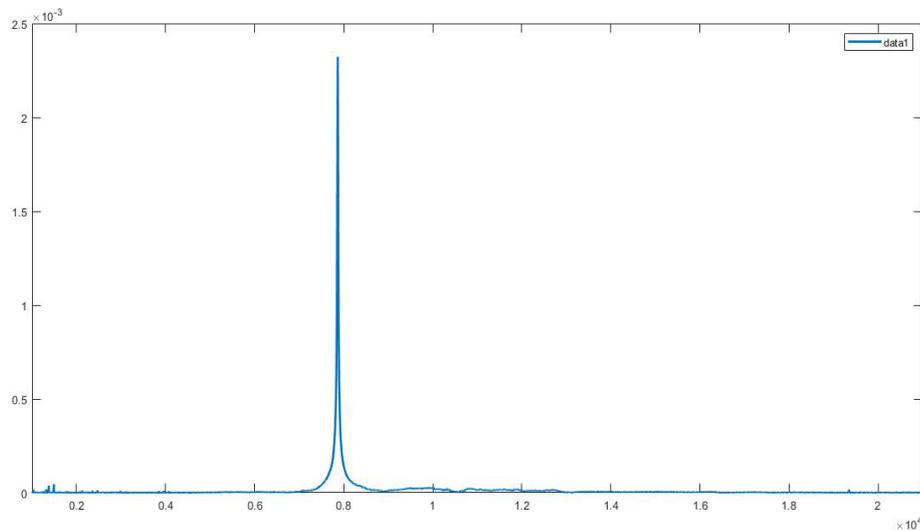


Figura 4.20. Modulo della trasformata di Fourier del segnale di Figura 4.19. Il modulo della Trasformata è adimensionale, la frequenza è misurata in Hz.

Come si può notare dalle due immagini riportate, è evidente che nel caso dell'alluminio bulk, in quanto materiale isotropo e con densità costante all'interno del campione, la frequenza di risonanza e quindi il picco di risposta sarà una sola, ovvero quella relativa al modo di vibrare principale, cioè più energetico.

Tale situazione non si verifica invece nel caso dei provini di schiuma, dove la natura della microstruttura rende il segnale meno pulito e quindi più rumoroso (ad esempio per l'incidenza non perfetta con le creste delle pareti delle celle, e di conseguenza non vi sarà il manifestarsi di un singolo modo di vibrare bensì di diverse frequenze di risonanza, relative ai diversi modi eccitati, in quanto la schiuma testata è lontana dal concetto di materiale isotropo con densità e distribuzione di massa costante spazialmente.

Quanto descritto si può constatare dalla *Figura 4.21*, segnale relativo al campione sandwich e *Figura 4.22*, ovvero la sua Trasformata.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

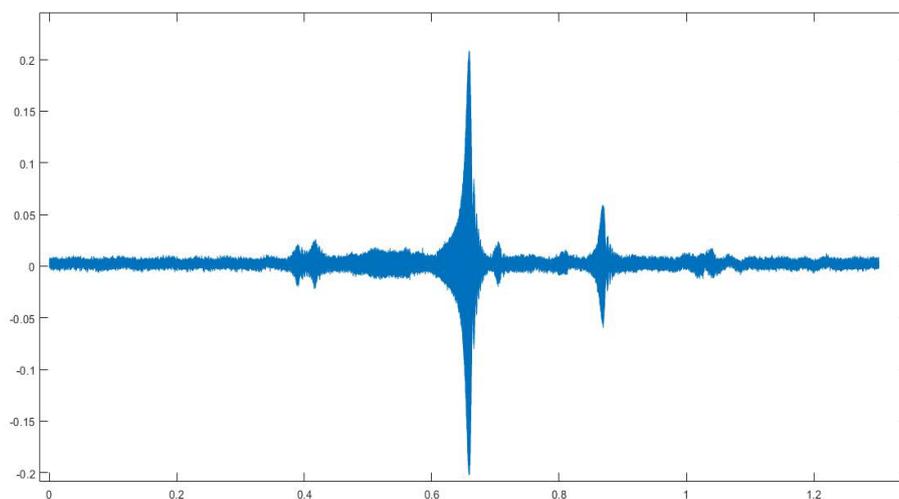


Figura 4.21. Segnale relativo al campione sandwich.

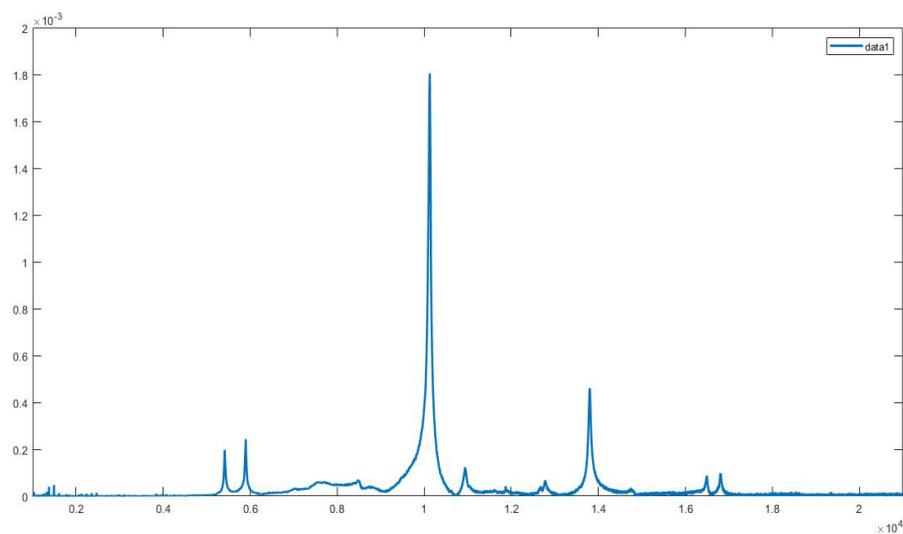


Figura 4.22. Modulo della trasformata di Fourier del segnale di Figura 4.21. Il modulo della Trasformata è adimensionale, la frequenza è misurata in Hz.

Per quanto concerne il fitting tra la curva sperimentale e il modello teorico, posto alla base del ciclo iterativo che porta alla restituzione dei valori di attenuazione alle varie frequenze, si riporta per completezza in *Figura 4.23* un caso riscontrato nelle misure

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

svolte in cui si è avuto una buona sovrapposizione tra le due curve in uno dei picchi di risonanza analizzati, con conseguenza di un valore attendibile di attenuazione.

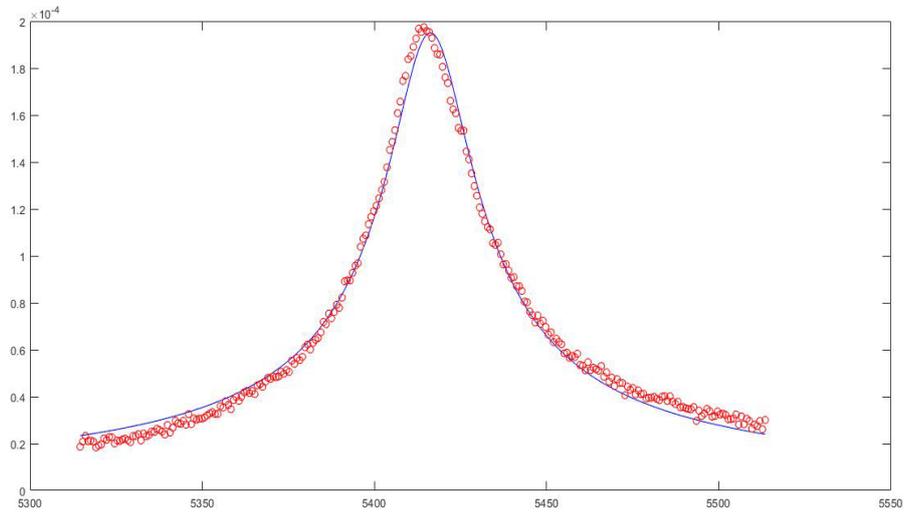


Figura 4.23. Fitting tra curva sperimentale e modello teorico, in corrispondenza del picco analizzato relativo alla frequenza 5414 Hz nel campione sandwich. In rosso i punti sperimentali, in blu la curva teorica.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

4.2.2 RISULTATI

Si riportano ora i risultati ottenuti in termini di fattore di attenuazione delle vibrazioni, in funzione dei diversi set up utilizzati e dei diversi provini testati.

I set up sperimentali vengono denominati:

- “Air Ground”, con cui si indica quello utilizzato in Figura 4.13;
- “Air TX”, con cui si indica quello utilizzato in Figura 4.14.

Di conseguenza, avendo testato diversi provini, si avranno i seguenti gruppi di misura:

- “Alluminio Bulk_Air Ground”;
- “Alluminio Bulk_Air TX”;
- “Schiuma_Air Ground”;
- “Schiuma_Air TX”;
- “Sandwich_Air Ground”;
- “Sandwich_Air TX”.

Per ciascuno dei campioni testati nelle due diverse modalità si sono studiati un numero di punti variabile, corrispondenti a coordinate note impostate dall’utente. I risultati sono riportati in *Tabella 4.1*.

TIPOLOGIA DI PROVINO	SET-UP	PUNTO	FREQUENZA [Hz]	FATTORE DI ATTENUAZIONE, $\eta \cdot 10^3$ [-]
Alluminio bulk	Air Ground	1	7867	2,21
		2	7867	2,29
		3	7867	2,2
	Air TX	1	7867	5,34
		2	7867	5,92
		3	7867	5,34
Schiuma	Air Ground	1	5620	4,7
		1	6017	4,63
		1	6900	5,44
		1	10602	4,16
		1	12938	3,88

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

		2	ERR	ERR
		3	5623	4,22
		3	6016	4,45
		3	10598	3,75
		3	12938	4,24
		4	ERR	ERR
		5	ERR	ERR
	Air TX	1	7157	2,94
		1	9601	6,18
		1	11568	6,79
		2	3191	9,8
		2	9594	4,52
		2	10691	7,12
		3	6029	8,96
Sandwich	Air Ground	3	9591	4,8
		3	13803	3,79
		1	5414	4,48
		1	5897	4,65
		1	10128	4,5
		1	13803	3,5
		1	16490	2,45
		1	16803	2,46
		2	5414	4,6
		2	5896	4,42
		2	10127	4,46
		2	10940	6,47
		3	5414	5,24
		3	5898	5,24
3	10938	6,51		
3	13800	3,57		
3	16497	2,44		
3	16806	2,46		
4	5410	5,66		
4	5898	5,65		
4	10128	4,39		
4	10934	7,16		
4	13806	3,34		
5	5411	5,69		
5	5900	6,11		
5	10128	4,47		

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

		5	13803	3,45
		5	16806	2,55
	Air TX	1	5973	9,59
		1	10167	10
		2	5972	9,46
		2	10939	4,84
		2	13857	8,23
		3	5469	9,62
		3	5973	11,9

Tabella 4.1. Risultati delle misure di attenuazione sui diversi campioni.

Alla luce dei risultati ottenuti, è possibile porre le seguenti osservazioni, con accenno ai campioni di schiuma di alluminio e di sandwich oggetto di questa trattazione.

In primo luogo, è evidente come l'ordine di grandezza del fattore di attenuazione è lo stesso individuato in [23] permettendo così di poter affermare la sostanziale bontà dei risultati ottenuti.

Nel dettaglio, però, è doveroso soffermarsi sulle differenze sostanziali che si sono notate tra la tipologia di misura effettuata con set-up "Air Ground" e quello denominato "Air TX". I valori di attenuazione ricavati in seguito a misure effettuati con il metodo "Air TX" risultano essere tendenzialmente più elevate, seppur dello stesso ordine di grandezza.

Valori di η [-] prossimi a 0.008 e 0.009, per quanto apparentemente indicatori di ottime proprietà di smorzamento, non possono essere considerate del tutto affidabili poiché lontane dai valori sia di letteratura sia da quelli ottenuti con il set-up "Air Ground". Tale tesi può inoltre essere sostenuta considerando che il set-up "Air TX" è caratterizzato da un sistema in sospensione rispetto al "Air Ground": il provino infatti è stato posizionato a contatto con il traduttore solo per una porzione mentre la restante parte risulta sospesa tipo "mensola". Questa sospensione potrebbe far nascere ulteriori vibrazioni sovrastimando il valore di smorzamento tramite contributi spuri, come precedentemente discusso.

Ulteriormente, con il metodo "Air TX" si sono riscontrati numerosi casi in cui non si è riusciti a pervenire ad un buon fitting tra curva sperimentale e modello teorico, risultando in uno scarto dei dati relativi a diversi picchi di segnale, causando una

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

informazione risultante circoscritta a un basso numero di dati. Si noti infatti il caso Sandwich_Air Tx, in cui per ogni punto campionato si sono riusciti ad individuare e analizzare con un buon fitting solo due frequenze di risonanza (punti 1 e 3) e tre frequenze di risonanza (punto due), con conseguente poca affidabilità dei risultati ottenuti.

Per contro, quanto eseguito con il set-up “Air Ground” sembra mostrare una certa costanza nel valore di attenuazione α , quanto meno, una fascia di valori accettabile: nel caso del sandwich tale range è compreso nell’intervallo di valori $2.44 \div 5.69$ considerando come outliers i valori superiori a 6, mentre relativamente alla schiuma si ha un valore circa costante e prossimo a 4.2. L’affidabilità dei risultati ottenuti può essere ulteriormente sostenuta notando che nei diversi punti, i picchi di risonanza si sono riscontrati alle medesime frequenze, avallando l’ipotesi di buona riuscita della misura.

In conclusione, è necessario menzionare per alcuni punti analizzati non è stato possibile analizzare il relativo segnale, troppo affetto da “rumore” esterno: tali punti sono stati scartati e, come esempio, ne è stato riportato uno in *Tabella 4.1* con la dicitura “ERR” (errore).

4.3 MODELLO FEM

Al termine di questa trattazione è opportuno, a mio avviso, illustrare quelle che sono possibili ulteriori indagini da condurre sulle schiume, al fine di meglio caratterizzare le loro proprietà ed eventualmente definire ulteriori applicazioni.

È stato infatti più volte sottolineato come il comportamento globale delle schiume di alluminio sia fortemente influenzato dalla presenza di porosità interne, chiuse come nel caso studiato, o aperte.

Relativamente ai pori è stato sottolineato come la loro distribuzione spaziale sia dettata da una sostanziale casualità, a causa del processo produttivo che coinvolge l'iniezione di bolle d'aria nel fuso di alluminio. In tal senso, è ammissibile pensare, che la ricerca di un ordine di distribuzione dei pori, all'interno di un sistema "disordinato", potrebbe rappresentare un modo per ricavare informazioni aggiuntive e più precise circa le proprietà delle schiume ma soprattutto sulla loro dipendenza dalla distribuzione dei pori. Per quanto sopra riportato, alcuni tentativi di ricostruire un modello spaziale agli elementi finiti ("Finite element model", FEM) sono stati fatti, partendo da scansioni effettuate sui provini nella fase iniziale dell'attività sperimentale. L'obiettivo, nel dettaglio, è stato quello di investigare la gamma di frequenze di risonanza del campione costituito da schiuma di alluminio e di apprezzare la varietà di modi di vibrare dello stesso.

Operativamente, si è cercato in primo luogo di ricostruire una "mesh" tridimensionale del provino, provando in ogni step successivo ad infittirla.

In *Figura 5.1* è rappresentato uno step nella fase del processo di creazione della mesh costituita da elementi finiti di tipo tetraedro (tetrahedral mesh).

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

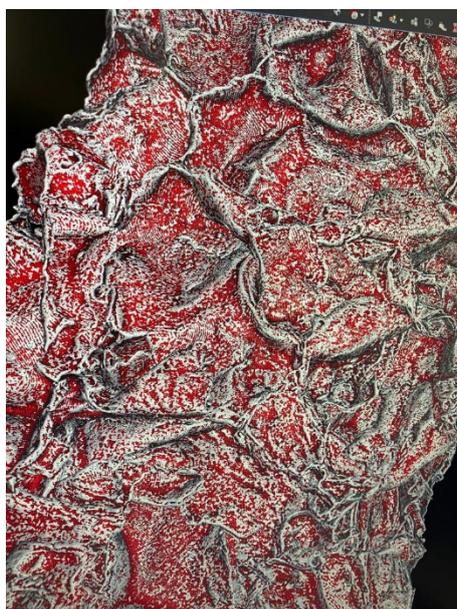


Figura 5.1. Creazione mesh tetraedrica per il provino di schiuma.

In questa ricostruzione si notano la struttura porosa del campione di schiuma nonché i bordi in rilievo delle diverse celle. Sono inoltre ben visibili in rosso i tetraedri con cui si è cercato di ricostruire il solido.

Il processo di costruzione della mesh non è stato tuttavia banale e si sono eseguiti diversi tentativi modificando i parametri relativi alla geometria degli elementi finiti da utilizzare: la porosità presente, infatti, è stata riconosciuta dal software come una fonte di errore nel processo poiché non rappresentabile come micro difetto, come presente ad esempio nel calcestruzzo, bensì come vuoti di dimensioni paragonabili a quelle del provino stesso e quindi di difficile ricostruzione.

D'altro canto, è stato possibile ricostruire alcune zone con estrema accuratezza, come dimostrano *Figura 5.2* e *Figura 5.3*.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

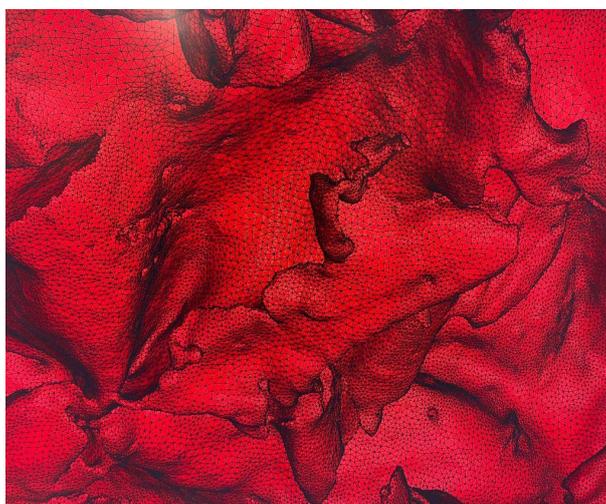


Figura 5.2. Dettaglio nella ricostruzione della mesh sul provino di schiuma. I tetraedri convergono in punti (nodi) comuni.

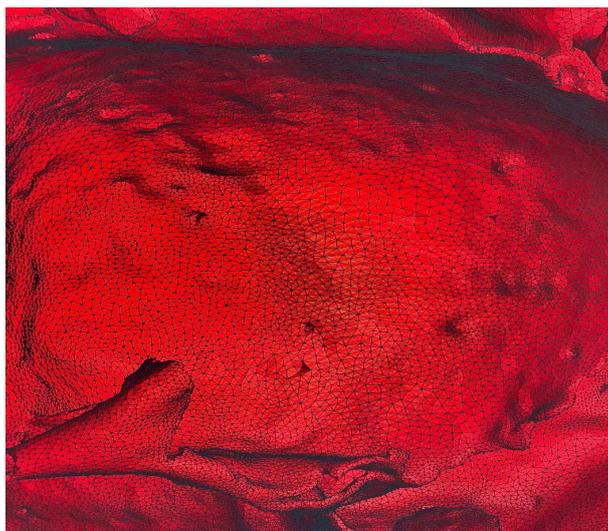


Figura 5.3. Dettaglio nella ricostruzione della mesh sul provino di schiuma. I tetraedri convergono in punti (nodi) comuni.

La ricostruzione della mesh, al netto delle difficoltà riscontrate, è stato lo step propedeutico alla fase di esportazione della stessa su un software per l'analisi "finite element", finalizzata ad una indagine più accurata della dipendenza delle proprietà della schiuma in funzione della porosità, compreso eventualmente lo studio del comportamento meccanico della schiuma soggetta a condizioni di carico imposte, nonché lo studio della sua risposta tenso-deformativa.

CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE

In tal senso, nonostante i molteplici tentativi effettuati, l'esportazione della mesh non è andata a buon fine poiché sono emersi in essa differenti errori riguardanti la non perfetta ricostruzione della mesh, come accennato in precedenza, nonché la non capacità del software di arrivare di leggere i dati in input rappresentati dalla mesh.

In conclusione, è possibile affermare che i tentativi effettuati rappresentino una base per future ricerche che si vogliono intraprendere per implementare un'analisi FEM relativamente alla schiuma di alluminio e al pannello sandwich e chiarire l'importante aspetto della distribuzione disorganizzata, ma al contempo modellabile, della loro struttura.

5. CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi sopra descritto ha indagato il comportamento e le proprietà delle schiume di alluminio nei confronti delle prestazioni acustiche, termiche e di smorzamento delle vibrazioni, al fine di determinare eventuali applicazioni delle stesse nell'ambito del mondo delle costruzioni.

Alla luce dell'attività sperimentale svolta è possibile affermare che la schiuma analizzata presenta un'ottima predisposizione all'assorbimento acustico, con evidenza di valori di coefficiente di assorbimento α prossimi al 90%.

Tuttavia, questo comportamento si manifesta in un range di frequenze piuttosto ristretto, indicando che se utilizzato da solo all'interno, ad esempio, di un pacchetto di tamponamento di civile abitazione, tale materiale non pareggia le prestazioni dei materiali già utilizzati quali lana di roccia, schiuma poliuretana e fibra di vetro, per i quali l'assorbimento acustico è pari al 90% per quasi tutto il campo dell'udibile. È dunque plausibile pensare che le prestazioni acustiche, con riguardo al soddisfacimento dei limiti imposti dalla norma italiana sui requisiti acustici passivi (D.P.C.M. del 5/12/1997), sarebbero esaltate se un pannello di schiuma fosse coadiuvato da altri materiali porosi, eventualmente con riduzione degli spessori di quest'ultimo.

Al contrario di quella analizzata avente una struttura a pori chiusi, una schiuma a celle aperte garantirebbe d'altro canto ottime prestazioni in termini di assorbimento per un range più ampio di frequenze, grazie al maggior attrito viscoso che si verificherebbe all'interno del corpo.

Dal punto di vista delle prestazioni termiche si sono ottenute buone indicazioni circa la diffusività termica d della schiuma, dal momento che i risultati delle prove sperimentali svolte hanno fornito valori pari a $32 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Tale valore fornisce un'interessante indicazione se confrontata con l'alluminio solido, dal momento che quest'ultimo, oggetto anch'esso di prove sperimentali, è in grado di esplicitare una diffusività termica pari a tre volte quella della schiuma di alluminio: nella schiuma, dunque, è la porosità presente il fattore determinante in tal senso.

CONCLUSIONI

Al contempo, però, la diffusività termica della schiuma di alluminio non può essere confrontata con quella dei materiali usati come isolanti termici in edilizia, dal momento che materiali come fibra di legno, sughero, lana di vetro, poliuretano espanso, XPS e lana di roccia, mostrano valori compresi tra $0.14 \text{ mm}^2/\text{s}$ e $0.85 \text{ mm}^2/\text{s}$, il che sottolinea i due ordini di grandezza di differenza tra questi e le schiume di alluminio.

Per quanto concerne le prove eseguite sulle schiume relativamente alla capacità di smorzamento delle vibrazioni, si è pervenuto ad un range di valori compreso tra 2.44 e 5.69 per il campione sandwich e ad un valore circa costante e pari a 4.2 per il campione di schiuma, considerando maggiormente affidabile il set-up “Air Ground” dal momento che il set-up “Air Tx” ha fornito valori troppo elevati se confrontati con quelli presenti in letteratura, a causa di vibrazioni parassite dovute al sistema di contatto con il trasduttore.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- [1] TECMATIED, «www.tecmatied.wordpress.com» 2014 [Online]. Available: <https://tecmatied.wordpress.com/2014/01/09/schiuma-metallica/> . [Consultato il giorno 06/10/2023].
- [2] H.P. Degischer, B. Kriszt; *Handbook of cellular metals*. Production, Processing, Applications. Wiley-VCH, 2002.
- [3] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley; *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth – Heinemann, Oxford 2000.
- [4] ROCKWOOL, «www.rockwool.com» 2022 [Online]. Available: <https://p-cdn.rockwool.com/syssiteassets/rw-it/brochuremanuali/acustica/manuale-acustica-in-edilizia.pdf?f=20211105081603> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [5] EDILIZIALIBERA, «www.edilizialibera.com» 2020 [Online]. Available: <https://www.edilizialibera.com/miglior-isolante-acustico-per-pareti-pavimento-soffitto-guida/> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [6] LANTIRUMORE, «www.lantirumore.it» 2023 [Online]. Available: <https://www.lantirumore.it/blog-insonorizzazione/parliamo-di-i-risuonatori-di-helmholtz> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [7] EQACOUSTICS, «www.eqacoustics.com» 2023 [Online]. Available: https://eqacoustics.com/pages/acoustic-panels-for-schools-and-colleges?logged_in_customer_id=&lang=it . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [8] *UNI EN ISO 10140-1:2021 “Acustica – Misurazione in laboratorio dell’isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Regole di applicazione per prodotti particolari”*.
- [9] *D.P.C.M. 5/12/1997 – Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici. (Pubblicato in Gazzetta Serie generale n. 297 del 22/12/1997).*
- [10] “Sound insulation property of Al-Si closed cell aluminium foam bare board material”, YU Hai-jun, YAO Guang-chun, WANG Xiao-lin, LI Bing, YIN Yao, LIU Ke, Transactions of Nonferrous metals Society of China, Volume 17, 2006.
- [11] “Sound absorption in metallic foams”, T.J. Lu, Hess Audrey, Ashby M. F., Journal of Applied Physics, Volume 85, 1999.
- [12] *UNI EN ISO 11654:1998 “Acustica – Assorbitori acustici per l’edilizia – Valutazione dell’assorbimento acustico”*.

BIBLIOGRAFIA

- [13] ELMO, «www.elmosrl.eu», 2023 [Online]. Available: https://assets-global.website-files.com/619514180434bd28f5f1a9f1/61a87951e6f2a4d7d6e660bc_ACUSTIC_A.pdf . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [14] CHIMICA ONLINE, «www.chimica-online.it», [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/fisica/conducibilita-resistenza-e-trasmittanza-termica.htm> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [15] CHIMICA ONLINE, «www.chimica-online.it», [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/fisica/diffusivita-termica.htm> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [16] INGBRANDO, «www.ingbrando.altervista.org», 2023 [Online]. Available: <https://ingbrando.altervista.org/capacita-termica-calore-specifico-equazione-fondamentale-della-termologia/> . [Consultato il giorno 14/10/2023].
- [17] INFOBUILDINGEGNERIA, «www.infobuildingegneria.it», 2020 [Online]. Available: www.infobuildenergia.it/approfondimenti/assorbimento-dacqua-e-conduttivita-termica-dei-materiali-isolanti/ . [Consultato il giorno 15/10/2023].
- [18] ZEROABITA, «www.zeroabita.it», [Online]. Available: <http://www.zeroabita.it/involucro-efficiente/isolamento/cosa-significa-isolare-l-involucro/> . [Consultato il giorno 15/10/2023].
- [19] EXPOCLIMA, «www.expoclima.net», [Online]. Available: <https://www.expoclima.net/esempi-di-stratigrafie-per-un-edificio-nzeb> [Consultato il giorno 15/10/2023].
- [20] TERMOCAMERAFACILE, «www.termocamerafacile.com», 2015 [Online]. Available: <https://termocamerafacile.com/cose-una-termocamera/> . [Consultato il giorno 15/10/2023].
- [21] “The Determination of Thermal Diffusivity of Aluminium Alloys at Various temperatures by Means of a Moving Heat Sources”, D. Rosenthal, N. E. Friedmann, ASME. *Trans. ASME*, 1956.
- [22] “Infrared in-line monitoring of flaws in steel welded joints: a preliminary approach with SMAW and GMAW processes”, L. Santoro, R. Sesana, R. Mollica Nardo, F. Curà; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023.
- [23] “Damping properties of aluminium foams”, J. Banhart, J. Baumeister, M. Weber, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 205, 1996.

BIBLIOGRAFIA

- [24] “Joining of Al-6016 to Al-foam using Zn-based joining materials”, G. Ubertalli, M. Ferraris, M K. Bangash; Composites: part A, Elsevier, 2017.
- [25] Wikipedia, «www.wikipedia.it», 2005 [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Fonction_lorentzienne.png [Consultato il giorno 15/10/2023].