

IL CALCESTRUZZO POROSO COME MATERIALE FONOASSORBENTE: MODELLI DI CALCOLO UTILIZZATI COME UNO STRUMENTO DI PREVISIONE PER I PROGETTISTI

PERVIOUS CONCRETE AS SOUND ABSORPTION MATERIAL: THEORETICAL MODELS USED AS A SIMPLE PREDICTIVE TOOLS FOR DESIGNERS

Marta Bivanti ^{1*}, Louena Shtrepi ¹, Arianna Astolfi ¹, Giovanni Volpatti ², Davide Zampini ³

¹ Dipartimento Energia (DENERG), Politecnico di Torino

² CEMEX Research Group AG

³ CEMEX International Holding AG

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Dipartimento Energia (DENERG), Politecnico di Torino,

Corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129, Torino, Italia

e-mail: marta.bivanti@studenti.polito.it

RIASSUNTO

Questa ricerca va ad indagare i modelli teorici utilizzati per il calcolo del coefficiente di fonoassorbimento acustico di materiali porosi ed esplora possibili applicazioni ai materiali cementizi. Il materiale utilizzato per la ricerca è un calcestruzzo poroso, che si presenta sotto forma di pannelli, utilizzati per le misure sperimentali in camera riverberante. I dati misurati sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite un modello teorico basato su dati geometrici per valutare la possibile applicazione nella previsione delle proprietà fonoassorbenti senza ulteriori misurazioni.

ABSTRACT

In this research, it was investigated if the sound absorption theoretical models for porous materials can be implemented to cementitious materials. The research uses porous concrete panels for the measurements in the reverberation room. The result of the experimental measurements is compared with a theoretical model based on geometrical parameters, to evaluate the possible application in the prediction of the sound-absorbing properties without further measurements.

Parole chiave: Calcestruzzo poroso; Modelli di calcolo; Fonoassorbimento.

Keywords: Pervious concrete; Theoretical models; Sound absorption.

1 Introduzione

Le superfici in calcestruzzo si presentano generalmente come superfici piane, poco porose e ad alta densità che riflettono quasi il 99% dell'energia sonora [1].

Diverse esigenze hanno dato inizio a studi sul miglioramento delle proprietà fonoassorbenti del calcestruzzo creando dei calcestruzzi ad alta porosità come il calcestruzzo cellulare e il calcestruzzo poroso. Il calcestruzzo cellulare è un calcestruzzo a bassa densità con struttura a celle omogenea creata attraverso l'aggiunta di schiuma o gas all'interno della miscela cementizia [2]. Nel calcestruzzo poroso, invece, l'alta porosità è ottenuta attraverso l'aggregato. Il calcestruzzo poroso contiene aggregati di dimensioni poco variabili, la pasta cementizia lega gli aggregati tra di loro ma senza andare a riempire i vuoti che si creano tra un aggregato e l'altro, formando così dei pori interconnessi [3].

Il fonoassorbimento nei materiali porosi avviene tramite la trasformazione dell'energia sonora in calore per via della struttura interna dei pori che risultano aperti verso l'esterno e interconnessi tra di loro [4]. L'assorbimento sonoro può essere misurato sperimentalmente utilizzando il tubo di Kundt [5, 6] o la camera riverberante [7]. Inoltre la letteratura presenta diversi metodi previsionali tra cui l'utilizzo di modelli di teorici [8–19].

In questo studio si è andato ad indagare se i modelli di calcolo del coefficiente di assorbimento per materiali porosi si possano applicare anche a materiali cementizi, e quali di questi modelli siano di più facile applicazione per quanto riguarda la reperibilità dei dati necessari.

Per i materiali porosi sono stati sviluppati diversi modelli per il calcolo del coefficiente di assorbimento. I modelli di calcolo vengono classificati in base al tipo di approccio utilizzato oppure rispetto ai dati necessari all'applicazione del modello. Gli approcci utilizzati nei modelli possono essere tre: empirico, ottenuto attraverso misure sperimentali; fenomenologico, che descrive il fenomeno viscoso generato in prossimità delle pareti dei pori [20, 21]; e microstrutturale, che semplifica la struttura porosa interna al materiale come un insieme di tubi capillari circolari non connessi tra di loro [13]. Per quanto riguarda i dati dei modelli possono essere di due tipologie [18]: parametri acustici utilizzati per descrivere le proprietà dei materiali porosi e il percorso di propagazione che avviene all'interno dei pori [22], e i parametri geometrici che appunto descrivono la geometria del materiale [18].

In questo studio, attraverso una ricerca bibliografica sono stati individuati i modelli utilizzabili per il calcolo del coefficiente di assorbimento di materiali cementizi, e classificati in base alla tipologia di dati di ingresso, acustici e geometrici [18]. Tra i modelli trovati, con la ricerca bibliografica, soltanto un modello di calcolo necessita esclusivamente di dati geometrici. Il modello selezionato è stato applicato a una tipologia di cemento poroso per tre diversi spessori. I risultati sono stati confrontati con i coefficienti di assorbimento misurati in camera riverberante in scala secondo la norma EN ISO 354 [7].

2 Materiali e metodi

Il coefficiente di assorbimento viene misurato sperimentalmente utilizzando il metodo indicato nella norma EN ISO 10534 che prevede misure nel tubo di impedenza [5, 6] oppure con il metodo indicato nella norma EN ISO 354 in camera riverberante [7]. In questo studio è stata utilizzata una camera riverberante in scala 1:5 [23] per la caratterizzazione di tre campioni con tre diversi spessori (16 ± 1 , 37 ± 2 e 57 ± 3 mm). La camera riverberante in scala ha lo scopo di misurare il coefficiente di assorbimento

acustico di piccoli campioni, riducendo i costi di produzione dei campioni. Pertanto, il design della camera privilegia la riduzione delle sue dimensioni, pur mantenendo la capacità di effettuare misure accurate a frequenze medio-alte [24]. Le misure sono state effettuate seguendo la procedura e indicata nella norma EN ISO 354: 2003 [7].

Le misure sono state effettuate con due posizioni della sorgente e con sei posizioni microfoniche per un totale di 12 misure spaziali per ogni pannello.

Per ciascuna configurazione di microfoni e sorgente combinati, sono state realizzate tre misure sullo stesso campione, e le misure sono state effettuate per tutti e tre gli spessori. Sui risultati ottenuti è stata valutata l'incertezza delle misure secondo la ISO 12999-2: 2018 [25].

2.1 Descrizione dei campioni

I pannelli utilizzati per le misure sperimentali e per il modello di calcolo sono in calcestruzzo poroso ottenuto con un aggregato minerale leggero di 2 - 4 mm di diametro. La densità dei provini è di circa 514 kg/m^3 con il 25% di vuoti d'aria.

Con questa tipologia di calcestruzzo poroso sono stati creati nove pannelli con dimensioni 54 x 54 cm, tre per ogni spessore, i pannelli di tipo A con spessore 16 ± 1 mm, i pannelli di tipo B con spessore di 37 ± 2 mm e i pannelli di tipo C 57 ± 3 mm.

Nella tabella 1 sono raccolte le caratteristiche del materiale fornite dal produttore.

Tab. 1 – Descrizione del provino attraverso i dati forniti dal produttore, CEMEX Research Group AG - Description of the sample through the data provided by CEMEX Research Group AG

Aggregato	Aggregato minerale leggero di 2 - 4 mm		
Diametro medio dell'aggregato valutato a partire dalla curva granulometrica	3.2 ± 0.5 mm		
Percentuale dei vuoti d'aria del calcestruzzo	25 %		
Densità calcestruzzo	514 ± 25 kg/m^3		
Diametro medio dei pori del calcestruzzo	1.4 ± 1 mm		
Spessore pannelli	A= 16 ± 1 mm	B= 37 ± 2 mm	C= 57 ± 3 mm

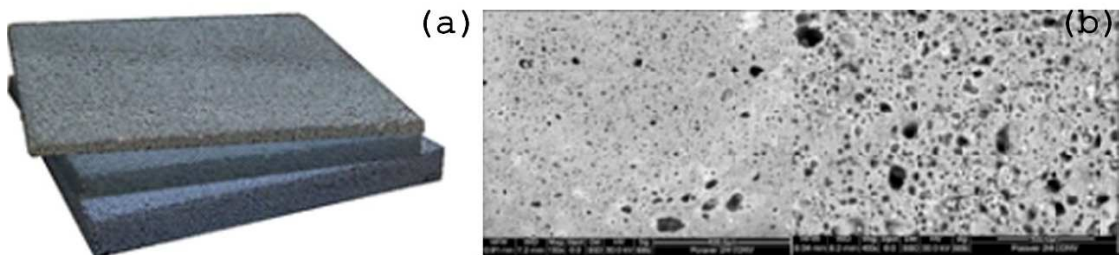


Figura 1 – Pannelli 54x54 cm di diversi spessori, A= 16 ± 1 mm, B= 37 ± 2 mm, C= 57 ± 3 mm (a) e immagine SEM dell'aggregato sezionato (b) – 54x54 cm Panels of three thicknesses, A= 16 ± 1 mm, B= 37 ± 2 mm, C= 57 ± 3 mm (a) and SEM image of the aggregate section (b).

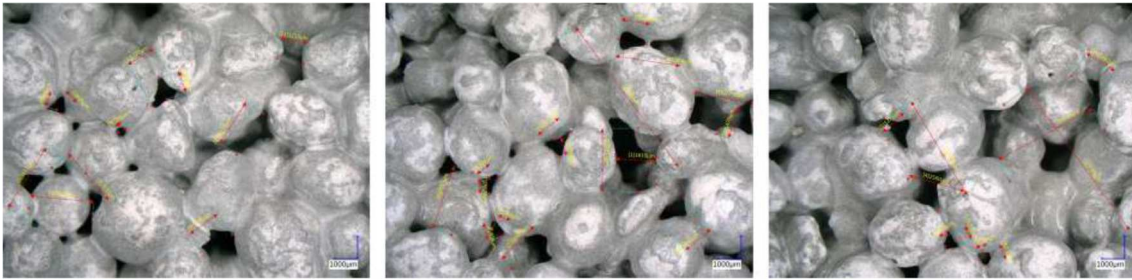


Figura 2 – Immagini dal microscopio ottico utilizzate per valutare l'area, il perimetro ed il diametro dei pori – Optical microscope images of the specimen used to measure the area, perimeter and diameter of the pores.



Figura 3 – Camera riverberante in scala 1:5 senza il campione (a) e con il campione A (b), con il campione B (c) e con il campione C (d) (Dip. di Energia, Politecnico di Torino) – 1:5 scaled reverberation room without the sample (a) and with the measured sample A (b), Sample B (c) Sample C (d) (Dep. of Energy, Politecnico di Torino).

3 Modelli di calcolo

Le proprietà fonoassorbenti dei materiali porosi oltre che sperimentalmente è possibile prevederle anche attraverso modelli teorici. I modelli possono essere raggruppati in tre categorie in base al tipo di approccio utilizzato: empirico, fenomenologico e microstrutturale:

- a) I modelli di calcolo con approccio empirico sono ricavati da dati sperimentali [26].
- b) I modelli di calcolo con approccio fenomenologico si basano sul fenomeno fisico della propagazione acustica in un mezzo poroso [27]. In questi modelli l'impedenza caratteristica e la costante di propagazione vengono calcolate attraverso il fenomeno a livello microscopico della propagazione nei pori [15]. Il

- c) Il mezzo poroso viene considerato come un fluido comprimibile in cui si verifica la dissipazione di energia acustica [19].
- d) I modelli con approccio microstrutturale semplificano la struttura del materiale poroso come un insieme di tubi capillari cilindrici non collegati tra di loro [28]. L'approccio microstrutturale si basa sulla propagazione delle onde in un singolo poro per poi essere generalizzata per l'intero materiale [29].

I dati utilizzati all'interno dei modelli possono essere acustici [18] o geometrici. I parametri acustici descrivono le proprietà dei materiali porosi e il percorso di propagazione all'interno dei pori [18]. Questo tipo di dati difficilmente sono forniti dal produttore del materiale, quindi potrebbe essere necessario effettuare delle misure sperimentali per ottenerli [22].

A fronte di queste caratteristiche che descrivono i modelli si è deciso di classificarli in base alla tipologia di dati di ingresso utilizzati per il modello. Essendo i parametri geometrici più facili da reperire per una previsione preliminare, un modello che utilizza esclusivamente questa tipologia di dati sarà più facile da applicare rispetto a un modello per il quale sono necessarie delle misurazioni sperimentali per l'ottenimento dei dati di ingresso.

3.1 Selezione dei modelli teorici

È stata effettuata una selezione dei modelli di calcolo utilizzati per i materiali cementizi attraverso una ricerca bibliografica basata su articoli scientifici. La ricerca è stata condotta analizzando solo gli articoli, sulla risorsa online PICO, una banca dati contenente libri, periodici, tesi, pubblicazioni di ateneo, risorse ad accesso libero, resa disponibile dal Politecnico di Torino. Per selezionare gli articoli è stato applicato un processo di esclusione in tre fasi. La prima fase è stata basata sul titolo, in questa fase sono stati esclusi tutti gli articoli il cui titolo non era correlato all'argomento. Nella seconda fase ci si è basati sull'abstract, sono quindi stati esclusi tutti gli articoli il cui contenuto non riguardava materiali porosi o granulari o non veniva specificato un modello di calcolo per il coefficiente di assorbimento acustico. La terza fase è stata basata su una lettura dell'intero articolo, qui sono stati esclusi tutti gli articoli che nella loro ricerca non utilizzano un materiale cementizio e che non esplicitano l'implementazione di un modello di calcolo. Alla fine del processo di esclusione in tre fasi, solo tredici articoli risultano congruenti con tutti i criteri di ricerca. Da questi articoli sono stati estrapolati nove modelli di calcolo, riassunti in Tabella 2.

Classificando i modelli selezionati in base ai parametri utilizzati, soltanto due modelli utilizzano esclusivamente dati geometrici, e sono i modelli basati sull'analogia elettro-acustica [18, 19]. Considerando, però, i dati a disposizione è possibile applicare, senza ulteriori misure, per ottenere i dati necessari, esclusivamente il modello presentato da Kim et al. [18].

I dati necessari per il modello sono: la percentuale di vuoti d'aria "TVR", il raggio dell'aggregato (che viene assunto come la gradazione media dell'aggregato) "r", la forma dell'aggregato "κ" e lo spessore del pannello "t".

Il modello utilizza il metodo di semplificazione della struttura del calcestruzzo poroso "multy-layered perforated panel model" di Kang et al. [30]. Questo metodo solitamente è utilizzato su pannelli forati, ma Wang et al. [31] hanno dimostrato che è possibile applicarlo anche per materiali porosi.

Tabella 2 – Tabella riassuntiva dei modelli di calcolo utilizzati per materiali cementizi.
 - Summary of models applicable to concrete materials.

Modelli	Approccio	Tipologia di Parametri	Dati
Delany-Bazley [8]	Empirico	Acustici	Resistività al Flusso
		Geometrici	Spessore
Delany-Bazley-Miki [9]	Empirico	Acustici	Resistività al Flusso
		Geometrici	Spessore
Miki generalizzazione [12]	Empirico	Acustici	Resistività al Flusso Porosità Tortuosità
		Geometrici	Spessore
Voronina [14]	Empirico	Acustici	Porosità
		Geometrici	Spessore Diametro dei Pori
Hamet-Berengier [15]	Fenomenologico	Acustici	Resistività al Flusso Porosità Tortuosità
		Geometrici	Spessore
Johnson-Allard-Champoux [8]	Fenomenologico	Acustici	Resistività al Flusso Porosità Tortuosità Lunghezza Viscosa Caratteristica Lunghezza Termica Caratteristica
		Geometrici	Spessore
Horoshenkov-Swift [10, 16, 28]	Microstrutturale	Acustici	Resistività al Flusso Porosità Tortuosità Deviazione Standard della Dimensione dei Pori
		Geometrici	Spessore
Champoux-Stinson [15, 17]	Microstrutturale	Acustici	Resistività al Flusso Porosità Tortuosità
		Geometrici	Spessore Fattore Viscoso di Forma del Poro Fattore Termico di Forma del Poro
Analogia Elettro-Acustica (Kim et al.) [18]	Microstrutturale	Geometrici	Spessore Percentuale di Vuoti d'Aria Dimensione dell'Aggregato Forma dell'Aggregato
		Geometrici	Spessore Diametro dei Pori Lunghezza dei Pori Diametro delle Aperture Lunghezza delle Aperture

Questo modello considera il calcestruzzo poroso come un reticolo uniforme composto da strati. Ogni strato è formato dagli aggregati e separato l'uno con l'altro da un'intercapedine di aria. La dimensione delle intercapedine è influenzata dalla dimensione e dalla forma degli aggregati.

$$(1) \quad t_{panel} = 2 \left(\frac{2\sqrt{6}}{3} - 1 \right) r \cong 1.266r \quad [-]$$

$$(2) \quad t_{air} = \kappa \left(r - \frac{t}{2} \right) \cong 0.367\kappa r \quad [-]$$

t_{panel} è lo spessore di un singolo strato mentre t_{air} è lo spessore di una singola intercapedine di aria.

È necessario definire l'impedenza delle aperture e l'impedenza delle intercapedini d'aria per poter calcolare l'impedenza dell'intero pannello.

L'impedenza dei vuoti d'aria è [32]:

$$(3) \quad Z_a = j\omega\rho_0 t_{panel} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{-j\beta'}} \frac{J_1\sqrt{-j\beta'}}{J_0\sqrt{-j\beta'}} \right]^{-1} \quad [-]$$

Dove ω è la velocità angolare, ρ_0 è la densità dell'aria [kg/m³], η è la viscosità dinamica dell'aria [kg/ms] e c_0 è la velocità del suono nell'aria [m/s].

$$(4) \quad \beta' = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{\eta}} \quad [-]$$

$$(5) \quad d = 0.07r + 0.643 \quad [-]$$

Quando $\beta > 10$

$$(6) \quad Z_a = \frac{8\eta t_{panel}\beta'}{\sqrt{2}d^2} + j \left(\omega\rho_0 t_{panel} \frac{8\eta t_{panel}\beta'}{\sqrt{2}d^2} \right) \quad [-]$$

Mentre se $1 < \beta < 10$

$$(7) \quad Z_a = \frac{32\eta t_{panel}}{d^2} \sqrt{1 + \frac{\beta'^2}{32}} + j\omega\rho_0 t_{panel} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{\beta'^2}{2}}} \right) \quad [-]$$

L'impedenza delle aperture considerando "end effects" è [33]:

$$(8) \quad Z_a = R_a + jM_a \quad [-]$$

Dove:

$$(9) \quad R_a = \frac{32\eta t_{panel}}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{\beta'^2}{32}} + \sqrt{\frac{\beta' d}{4t_{panel}}} \right) \quad [-]$$

$$(10) \quad M_a = \omega\rho_0 t_{panel} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{\beta'^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t_{panel}} \right) \quad [-]$$

Considerando l'equazione 8 l'impedenza di uno strato è:

$$(10) \quad z_a = \frac{Z_a}{P_{eff}} \quad [-]$$

Dove:

$$(11) \quad P_{eff} = mP_{origin} \quad [-]$$

$$(12) \quad P_{origin} = \frac{(\text{area of a triangle}) - (\text{area of three hatched sectors})}{(\text{area of a triangle})} = \frac{\sqrt{3}r^2 - \frac{\pi}{2}r^2}{\sqrt{3}r^2} \cong 9.31 \% \quad [-]$$

Il parametro “m” è determinato da una funzione esponenziale, in quanto l’errore della funzione esponenziale è minore rispetto a una funzione lineare [18]. Il fattore “m” è dato da:

$$(13) \quad m = 1.106e^{8.4248(TVR)} \pm 0.121 \quad [-]$$

L’impedenza di un intercapedine, quando $\frac{\omega t_{air}}{c_0} \ll 1$, è [32]:

$$(14) \quad Z(t_{air}) = -j\rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega t_{air}}{c_0}\right) \cong -j\frac{\rho_0 c_0^2}{\omega t_{air}} \quad [-]$$

L’impedenza di un singolo pacchetto, formato da uno strato più un’intercapedine d’aria è:

$$(15) \quad Z_1 = z_a + Z(t_{air}) \quad [-]$$

In caso di più strati l’impedenza è:

$$(16) \quad Z_n = z_a + \frac{Z_{n-1}Z(t_{air})}{Z_{n-1} + Z(t_{air})} \quad [-]$$

Quindi il coefficiente di assorbimento acustico a incidenza normale di un pannello multistrato si può esprimere come:

$$(17) \quad \alpha_0 = \frac{\frac{4R}{\rho_0 c_0}}{\left(1 + \frac{R}{\rho_0 c_0}\right)^2 + \left(\frac{M}{\rho_0 c_0}\right)^2} \quad [-]$$

R e M sono rispettivamente le componenti reale e immaginaria dell’eq.17.

4 Risultati

Sono stati messi a confronto le misure sperimentali effettuate nella camera riverberante in scala e i risultati ottenuti con il modello di calcolo per tutti e tre gli spessori del materiale.

Applicando il modello si ottiene il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale, mentre con le misure in camera riverberante si ottiene il coefficiente di assorbimento ad incidenza diffusa, per confrontare i due risultati è stato necessario utilizzare il modello

Spagnolo-Benedetto [34] per trasformare i risultati del modello teorico da incidenza normale a incidenza diffusa.

Tenendo conto della variabilità dello spessore dei pannelli, il modello di calcolo è stato applicato a diversi spessori. Nel pannello A, le curve ottenute per gli spessori di 15, 17 mm sono quelle che meglio vanno ad individuare la curva ottenuta con le misure sperimentali; nel pannello B, gli spessori che meglio vanno ad individuare la curva sono: 35, 37, 39 mm; mentre per il pannello C gli spessori sono: 54, 57, 60 mm. I risultati ottenuti con il modello per gli spessori che meglio descrivono la curva per ogni tipologia di pannello sono stati mediati, ottenendo così le curve per gli spessori di 16 ± 1 mm, 37 ± 2 mm e 57 ± 3 mm.

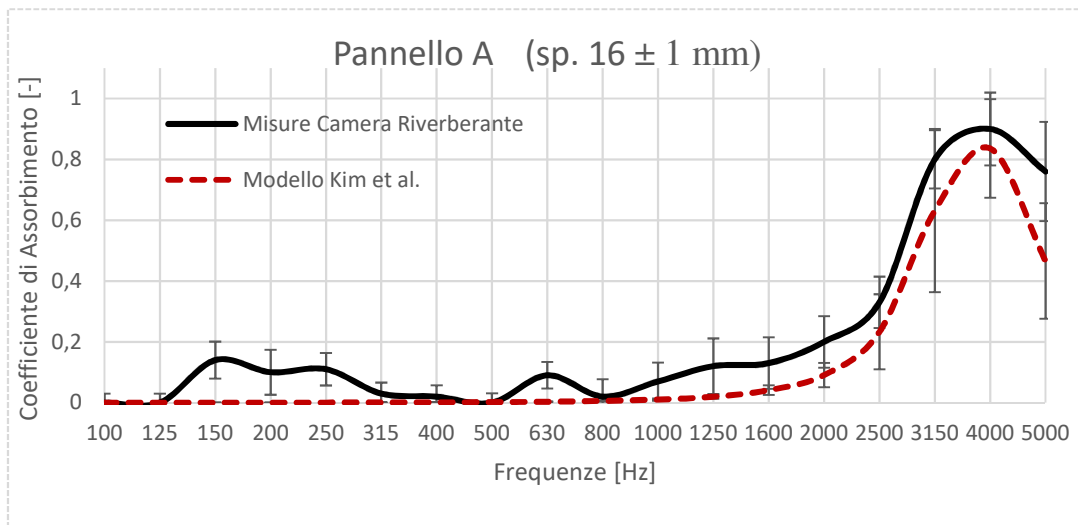


Figura 4 – Confronto tra i risultati ottenuti con la camera riverberante sul pannello A (spessore 16 ± 1 mm) e la media dei risultati ottenuti applicando il modello per gli spessori di 15, 17 mm - Comparison of the results obtained with the reverberation room on panel A (thickness 16 ± 1 mm) and the average of the results obtained applying the model for 15, 17 mm thickness.

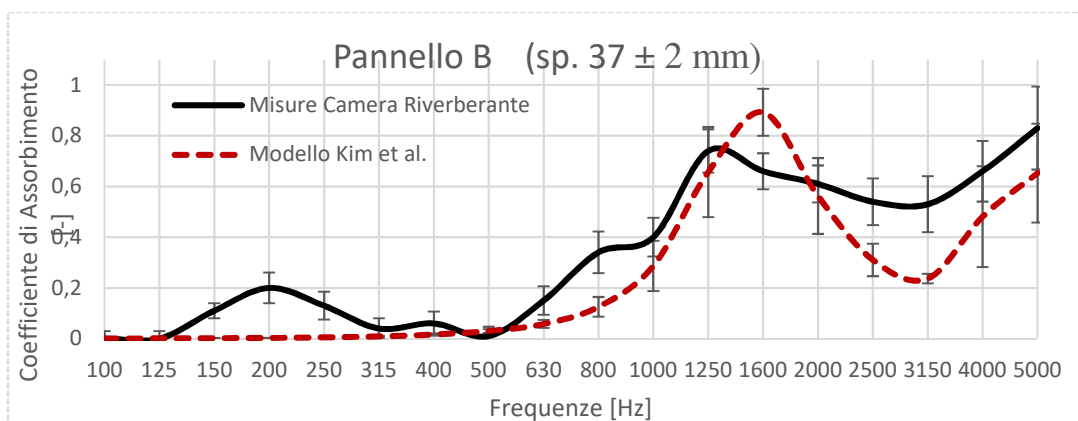


Figura 5 – Confronto tra i risultati ottenuti con la camera riverberante sul pannello B (spessore 37 ± 2 mm) e la media dei risultati ottenuti applicando il modello per gli spessori di 35, 37, 39 mm - Comparison of the results obtained with the reverberation room on panel B (thickness 37 ± 2 mm) and the average of the results obtained applying the model for 35, 37, 39 mm thickness.

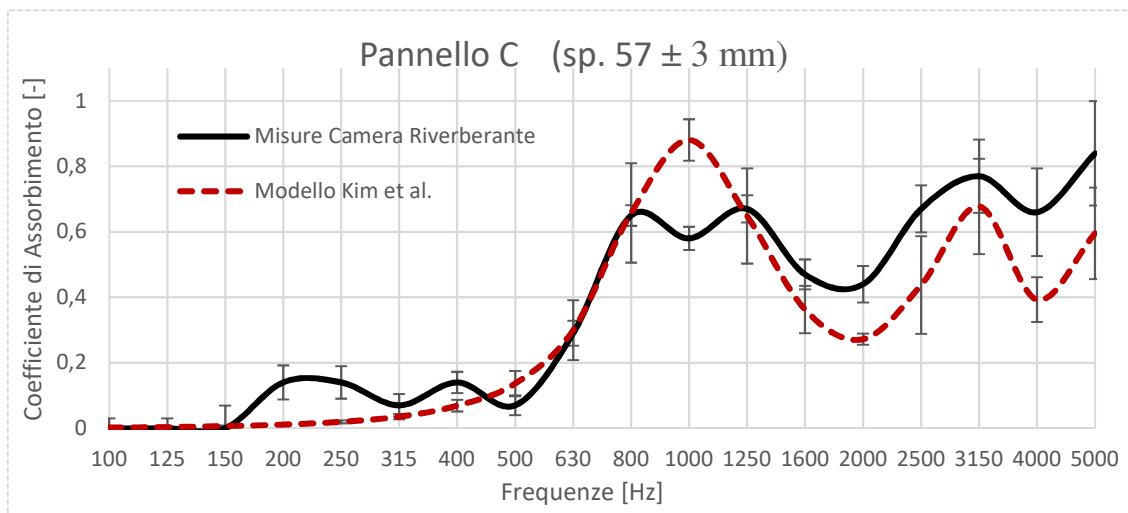


Figura 6 – Confronto tra i risultati ottenuti con la camera riverberante sul pannello C (spessore 57 ± 3 mm) e la media dei risultati ottenuti applicando il modello per gli spessori di 54, 57, 60 mm - Comparison of the results obtained with the reverberation room on panel C (thickness 57 ± 3 mm) and the average of the results obtained applying the model for 54, 57, 60 mm thickness.

Nelle misure sperimentali le barre di errore sono state ottenute confrontando le diverse misure effettuate sullo stesso pannello, invece, per quanto riguarda i risultati ottenuti con il modello le barre d'errore sono state ottenute in base alla deviazione standard calcolata dal modello stesso. Considerando il fattore "m", eq.14), con una variabilità di $\pm 0,121$, i risultati che si ottengono applicando il modello sono tre: il primo risultato si otterrà considerando m, il secondo risultato considera $m+0,121$ e il terzo risultato considera $m-0,121$. La deviazione standard, indicata nelle figure 4, 5 e 6 viene calcolata su questi tre risultati, ottenuti inserendo all'interno del modello i diversi valori per il fattore "m" e considerando la variabilità dello spessore per ciascuna tipologia di pannello.

Conclusioni

In questo studio, attraverso una ricerca bibliografica sono stati individuati i modelli utilizzabili per il calcolo del coefficiente di assorbimento di materiali cementizi. In particolare, è stato individuato un modello di calcolo che necessita esclusivamente di dati geometrici: spessore del provino, percentuale di vuoti d'aria, forma e dimensione dell'aggregato. Il modello selezionato è stato applicato a una tipologia di calcestruzzo poroso per tre diversi spessori. I risultati sono stati confrontati con i coefficienti di assorbimento misurati in camera riverberante in scala secondo la norma EN ISO 354 [7]. Vengono sottolineate le seguenti conclusioni:

- Il modello è confrontabile con le misure effettuate nella camera riverberante, considerando anche i diversi spessori.
- I modelli teorici con parametri acustici sono più difficili da utilizzare poiché è necessari effettuare delle misure sperimentali per ottenere i parametri di ingresso, mentre il modello di Kim et al. [18] risulta più semplice da utilizzare in quanto richiede pochi parametri facilmente misurabili o forniti direttamente dal produttore e presenta un buon accordo con le misure sperimentali.

In fine possiamo concludere che il calcestruzzo può essere utilizzato come materiale fonoassorbente in quanto è un materiale molto versatile ed è possibile ottenere le prestazioni richieste intervenendo su poche caratteristiche del materiale. I modelli teorici,

in particolare il modello di Kim et al.[18], possono diventare uno strumento utile in fase di progettazione anche per i progettisti per prevedere l'assorbimento acustico di materiali cementizi.

Conclusions

In this study, a detailed research of the state of the art has been performed to analyze and identify the most suitable sound absorption theoretical models used for concrete materials. Only one of the identified models, requires only geometrical data: specimen thickness, target voids ratio, shape, and gradation of the aggregate. The selected model has been applied to a porous concrete in three different thicknesses. The results are compared with the absorption coefficient measured data in a scaled reverberation room, according to the EN ISO 354 standard [7].

The following conclusions are highlighted:

- The theoretical model is comparable with the reverberation room measurements, considering also the different thicknesses.
- Theoretical models with acoustic parameters as input data are harder to be applied since they require further parameters that could be obtained experimentally, while the model by Kim et al. [18] results easier since it requires a few and easily measurable geometrical parameters and, as it was shown, it has a good agreement with the experimental measurements.

In conclusion, concrete can be used as sound-absorbing material for its versatility and modifying few material design characteristics, it is possible to obtain the required performances. The theoretical models, especially, Kim et al. [18] model, can become a useful tool for designers in the early design phase, to provide the acoustic absorption data of concrete.

Bibliografia

- [1] Holmes, N., Browne, A., Montague, C. (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Constr. Build. Mater.*, 73, pp. 195–204.
- [2] Lamound, J.F., Pielert, J.H. (2018). *Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials*. ASTM International, West Conshohocken USA.
- [3] Brown, H.L., Offenber, M. (2018). *Pervious Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- [4] Spagnolo, R. (2015). *Acustica: Fondamenti e applicazioni*. UTET.
- [5] ISO (2001). ISO 10534-1:2001, *Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza: Metodo con le onde stazionarie*.
- [6] ISO (2001). ISO 10534-2:2001, *Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza: Metodo della funzione di trasferimento*.
- [7] BS (2003). BS EN ISO 20354:2003 *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
- [8] Cuiyun, D., Guang, C., Xinbang, X., Peisheng, L. (2012). Sound absorption characteristics of a high-temperature sintering porous ceramic material. *Appl. Acoust.*, 73, pp. 865–871.
- [9] Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models. *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 11, pp. 19–24.

- [10] Carbajo, F.D., Esquerdo-Lloret, J., Ramis, T.V., Nadal-Gisbert, J., Denia, A.V. (2015). Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Mater. Construcción*, 65, pp. 1–11.
- [11] Losa, M., Leandri, P. (2012). A comprehensive model to predict acoustic absorption factor of porous mixes, *Mater. Struct. Constr.*, 45, pp. 923–940.
- [12] Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials - Generalizations of empirical models. *Journal Acoust. Soc. Japan*, 11, pp. 25–28.
- [13] Cobo, P., Simón, F. (2016). A comparison of impedance models for the inverse estimation of the non-acoustical parameters of granular absorbers. *Appl. Acoust.*, 104, pp. 119–126.
- [14] Voronina, N. (1997). An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. *Appl. Acoust.*, 51, pp. 181–198.
- [15] Bérengier, M.C., Stinson, M.R., Daigle, G.A., Hamet, J.F. (1997). Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101, pp. 155–162.
- [16] Vašina, M., Hughes, D.C., Horoshenkov, K.V., Lapčík, L. (2006). The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl. Acoust.*, 67, pp. 787–796.
- [17] Champoux, Y., Stinson M.R. (1992). On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, pp. 1120–1131.
- [18] Kim, H.K., Lee, H.K. (2010). Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. *J. Sound Vib.*, 329, pp. 866–879.
- [19] Neithalath, N., Marolf, A., Weiss, J., Olek, J. (2005). Modeling the Influence of Pore Structure on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.*, 3, pp. 29–40.
- [20] Biot, M.A. (1956). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, pp. 179–191.
- [21] Biot, M.A. (1956). Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28, pp. 168–178.
- [22] Hopkins, C. (2007). *Sound insulation*, Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- [23] Shtrepi, L., Latorella, F., Prato, A., Schiavi, A., Masoero, M., Astolfi, A. (2019). Practical aspects related to the measurement of the diffuse field absorption coefficient in scaled reverberation rooms. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, 11 settembre 2019.
- [24] Del Rey, R., Alba, J., Bertó, L., Gregori, A. (2017). Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption. *Mater. Construcción*, 67, p. 139.
- [25] ISO (2018) ISO/CD 12999-2:2018: Acoustics — Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics — Part 2: Sound absorption.
- [26] Delany, M.E., Bazley, E.N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl. Acoust.*, 3, pp. 105–116.
- [27] Wilson D.K. (1997). Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media. *Appl. Acoust.*, 50, pp. 171–188.
- [28] Horoshenkov, K.V., Swift, M.J. (2001). The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110, pp. 2371–2378.
- [29] Garai, M., Pompoli, F. (2005). A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Appl. Acoust.*, 66, pp. 1383–1398.

- [30] Kang, Y.J., Bolton, J.S. (1995). Finite element modeling of isotropic elastic porous materials coupled with acoustical finite elements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, pp. 635–643.
- [31] Wang, X., Lu, T.J. (1999). Optimized acoustic properties of cellular solids. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, pp. 756–765.
- [32] Maa, D.Y. (1998). Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104, pp. 2861–2866.
- [33] Lu, T.J., Chen, F., He, D. (2000). Sound absorption of cellular metals with semiopen cells. *J. Acoust. Soc. Am.*, 108, pp. 1697–1709.
- [34] Benedetto, G., Spagnolo, R. (1985). Reverberation time in enclosures: The surface reflection law and the dependence of the absorption coefficient on the angle of incidence. *J. Acoust. Soc. Am.*, 77, pp. 1447–1451.