

Ottimizzazione delle prestazioni termoacustiche attraverso materiali porosi innovativi: modellazione, analisi e applicazioni

Elio Di Giulio¹

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Napoli Federico II,
Piazzale Tecchio, 80, 80125 Napoli
elio.digiulio@unina.it

Ricevuto: 28/2/2024

Accettato: 20/5/2024

DOI: 10.3280/ria1-2024oa17368

ISSN: 2385-2615

L'impatto antropico e l'incremento della domanda energetica sollecitano l'adozione di tecnologie capaci di recuperare o trasformare fonti energetiche non sfruttate, come il calore residuo industriale o solare. La termoacustica, in questo panorama, si presenta come una soluzione sostenibile efficace, utilizzando fonti a bassa temperatura con fluidi ecocompatibili, ed è vantaggiosa per i bassi costi di gestione e manutenzione. Al centro di questa tecnologia vi è lo stack, un materiale poroso essenziale per le interazioni viscoso e termiche necessarie alla conversione dell'energia. Questa ricerca punta ad ottimizzare l'efficienza di motori e refrigeratori termoacustici mediante l'uso di stack non convenzionali come Array di Pin Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. Attraverso un metodo numerico agli elementi finiti, si caratterizzano i parametri di trasporto delle microstrutture. I modelli previsionali del comportamento termoacustico sono stati poi validati con nuove tecniche di misurazione acustiche. Infine, un'analisi preliminare mostra il potenziale di questi materiali innovativi nel migliorare le prestazioni dei dispositivi termoacustici.

Parole chiave: termoacustica, stack, FEM, energie rinnovabili

Optimizing thermoacoustic performance through innovative porous materials: modeling, analysis, and applications

Human impact and the increasing energy demand urge the adoption of renewable technologies able to convert or recover unused energies, such as industrial or solar waste heat. In this context, thermoacoustics emerges as an effective sustainable solution, utilizing low-temperature sources with eco-friendly fluids, and is advantageous for its low operational and maintenance costs. The core of this technology is the stack, which is a porous material essential for the viscous and thermal interactions necessary for energy conversion. This research aims to optimize the efficiency of thermoacoustic engines and refrigerators by employing unconventional stacks such as Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams. Using a finite element numerical method, the transport parameters of the microstructures are characterized to develop predictive models of thermoacoustic behaviour, validated with new acoustic measurement techniques. Finally, a preliminary analysis reveals the potential of these innovative materials in enhancing the performance of thermoacoustic devices.

Keywords: thermoacoustics, stack, FEM, renewable energies

1 | Introduzione

La crescente attenzione verso le tecnologie sostenibili negli ultimi due decenni è motivata dall'aumento dell'impatto energetico delle attività umane e dalla necessità di ridurre l'impatto ambientale di esse. La tecnologia termoacustica si distingue in questo ambito per diverse ragioni: la sua capacità di sfruttare fonti di energia a basso grado exergetico, come l'energia solare o il calore di scarto industriale, l'uso di fluidi di lavoro ecocompatibili come aria o gas nobili, e il suo costo relativamente basso di implementazione e manutenzione. I dispositivi termoacustici, che includono refrigeratori termoacustici (o pompe di calore) che trasformano l'energia delle onde sonore in energia

termica per il raffreddamento (o di riscaldamento) e motori termoacustici che convertono il calore in lavoro utile, sono fondamentali per il loro processo di conversione energetica [1]. Questa tecnologia ha trovato applicazioni in vari campi, tra cui la produzione di elettricità, la refrigerazione domestica, il settore automobilistico, la criogenia e la gestione termica degli elettronici, mostrando la sua versatilità [2]. Tuttavia, affinché la tecnologia termoacustica possa diventare un'alternativa valida ai sistemi esistenti, sono necessari miglioramenti. L'efficienza dei motori e dei refrigeratori termoacustici dipende da un materiale poroso, la cui microstruttura è opportunamente progettata, noto come *stack* (o *rigeneratore*), che permette le necessarie interazioni viscoso e termiche tra il fluido e la superficie solida per la conversione energetica. Ottimizzare le prestazioni dei dispositivi richiede una comprensione più approfondita delle interazioni all'interno di questo nucleo poroso e l'identificazione della geometria ottimale per ogni specifica

¹ Vincitore ex-aequo del premio "Gino G. Sacerdote" edizione 2024.

applicazione. Analizzare i campi termo-fluidodinamici all'interno dello scheletro solido permeato da un fluido permette di caratterizzare il materiale costituente lo stack. Dato che il fluido all'interno del materiale poroso oscilla a causa di sollecitazione acustiche esterne, è necessario risolvere le equazioni di bilancio della meccanica dei fluidi nel regime armonico. Inoltre, è possibile fare riferimento alla vasta letteratura acustica per prevedere il comportamento viscoso e termico in base alla microstruttura del materiale. Una solida comprensione della termodinamica è inoltre fondamentale per quantificare gli scambi energetici e convertire il calore in potenza meccanica, e viceversa. Nel campo della termoacustica, l'uso di materiali con sezioni trasversali uniformi per gli stack è comune a causa della loro semplicità costruttiva e del loro comportamento dinamico in regime armonico descritto da funzioni analitiche. Tuttavia, la loro efficacia è limitata dalla semplicità stessa della geometria. Infatti, il trasferimento ottimale del calore tra gas e solido pregiudica anche le perdite viscosi, le quali rappresentano un aspetto cruciale per i fenomeni termoacustici.

Questa tesi mira ad ampliare le tipologie di stack impiegabili all'interno dei dispositivi termoacustici attraverso materiali, definiti non convenzionali in termoacustica, come i Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. La modellazione di tali materiali avviene sfruttando modelli semi-fenomenologici, derivati dalle teorie tradizionali utilizzate nell'ambito della previsione dell'assorbimento del suono [3]. Essi permettono di quantificare gli scambi viscosi e termici tra scheletro solido e fluido basandosi sulle caratteristiche della micro-geometria. Lo studio introduce, inoltre, due tecniche di misurazione innovative per superare le limitazioni metodologiche esistenti, specialmente a basse frequenze. Infine, viene fornito un criterio energetico per selezionare il materiale poroso più efficiente per la conversione dell'energia da calore ad energia acustica.

Nella sezione seguente, viene presentato un richiamo teorico dell'equazioni linearizzate di Navier-Stokes che descrivono l'interazione tra un flusso oscillante e lo scheletro solido di un materiale poroso. Successivamente, vengono riportati i modelli fenomenologici utilizzati nella modellazione dei mezzi porosi. Nella sezione 3, sono presentati metodi numerici agli elementi finiti atti alla valutazione dei parametri microstrutturali delle tre geometrie in esame: Pin array tetragonale, Wire mesh e schiume a membrana 3D. Inoltre, sono presentate le due tecniche sperimentali innovative, basate sull'ipotesi di parametri acustici concentrati. Il confronto tra i risultati sperimentali con tali tecniche innovative e i modelli sviluppati mediante simulazioni numeriche agli elementi finiti sono riportati nella sezione 4. Successivamente alla validazione dei modelli predittivi, è riportata un'analisi preliminare che evidenzia le proprietà di conversione termoacustica energetica dei materiali selezionati.

2 | Cenni teorici

Dal punto di vista teorico, il comportamento dinamico viscoso e termico di un materiale poroso generico sotto un flusso oscillante (con frequenza angolare $\omega=2\pi f$) può essere descritto

risolvendo le tre equazioni linearizzate di continuità, quantità di moto ed energia accoppiate con l'equazione di stato nel dominio della frequenza. Considerando valori medi costanti per le quantità termodinamiche (p_m, T_m); la pressione, la temperatura e la velocità delle particelle possono essere scritte come:

$$p = p_m + \Re[p_1 e^{i\omega t}] \quad (1)$$

$$T = T_m + \Re[T_1 e^{i\omega t}] \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = \Re[\mathbf{v}_1 e^{i\omega t}] \quad (3)$$

Dove p_1 è la pressione acustica, T_1 la temperatura oscillante, u_1 la velocità acustica, e $i\omega t$ è il fattore temporale complesso, $i = -1$ è l'unità immaginaria e \Re rappresenta la parte reale di un numero complesso. L'assenza di gradiente di pressione medio determina una velocità media del mezzo $u_m = 0$. Le equazioni di quantità di moto ed energia permettono di descrivere gli effetti viscosi e termici su due scale separate come evidenziato dalla teoria dell'omogeneizzazione [3,4]:

$$i\omega\rho_m\mathbf{v}_1 = -\nabla p_1 + \mu\nabla^2\mathbf{v}_1, \quad (4)$$

$$i\omega\rho_m c_p T_1 = i\omega p_1 + \kappa\nabla^2 T_1; \quad (5)$$

ρ_m è la densità di equilibrio dell'aria, μ , κ e c_p sono rispettivamente la viscosità dinamica, la conducibilità termica e il calore specifico a pressione costante dell'aria. Sotto l'ipotesi di pareti rigide e isoterme ($u_{1,parete} = 0$, $T_{1,parete} = 0$) dello scheletro solido del materiale, le soluzioni generali delle Eq. (4), (5) possono essere scritte in termini di due quantità dipendenti dalla frequenza introdotte da Zwikker e Kosten [5] per descrivere il comportamento acustico dei materiali porosi: la densità complessa $\tilde{\rho}(\omega)$ e il modulo di rigidità complesso $\tilde{K}(\omega)$.

In termoacustica, un gradiente di temperatura statico lungo il materiale, dT_m/dx , è ottenuto mediante l'impiego di uno scambiatore di calore caldo e uno freddo ai lati dello stesso. In questo caso i campi di temperatura attraverso il materiale sono scritti come

$$T(x) = T_m(x) + \Re[T_1 e^{i\omega t}]. \quad (6)$$

Tenendo conto dell'Eq. (6), l'Eq. (5) diventa

$$i\omega\rho_m c_p T_1 + \rho_m c_p \frac{dT_m}{dx} v_1 = i\omega p_1 + \kappa\nabla^2 T_1. \quad (7)$$

Va notato che il termine convettivo $v_1\nabla T = v_1\nabla T_m + v_1\nabla T_1$ non è presente nell'Eq. (5) per l'ipotesi di assenza di gradienti di temperatura statica ∇T_m e per la trascurabilità del termine di secondo ordine $v_1\nabla T_1$ di ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli del primo. La densità complessa e il modulo di rigidità sono ovviamente proprietà intrinseche del materiale, che non cambiano quando viene applicato il gradiente termico. In termoacustica, le funzioni termoviscose f_v, f_k sono introdotte per descrivere il comportamento dei media porosi, strettamente legate alla suddetta densità complessa e modulo di rigidità, come mostrato da Dragonetti et al. [6]

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_m}{1 - f_v}, \quad (8)$$

$$\tilde{K} = \frac{\gamma p_m}{1 + (\gamma - 1)f_\kappa}. \quad (9)$$

Per materiali porosi con forme geometriche semplici, come sezione trasversale uniforme (piastre parallele, pori circolari), le funzioni termoviscose (o la densità complessa e il modulo di rigidità) sono espresse analiticamente dipendendo solo dai parametri geometrici (semi-distanza tra le piastre, raggio del poro circolare). Nel caso di mezzi porosi complessi come materiali fibrosi, granulari e schiume, il comportamento termoviscoso dinamico può essere valutato attraverso il modello semi-fenomenologico di Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL). Questo modello richiede sei parametri di input (detti *parametri di trasporto*) che sono correlati a quantità geometriche della microstruttura rappresentante il materiale poroso. I sei parametri di trasporto del modello JCAL sono: la porosità ϕ , la lunghezza caratteristica termica Λ' e viscosa Λ , la tortuosità α_∞ , la permeabilità viscosa statica k_0 (equivalente alla resistività al flusso d'aria $\sigma = \mu/k_0$) e termica k_0' . Noti tali parametri, le proprietà visco-termiche dinamiche dipendenti dalla frequenza possono essere espresse combinando il modello JCAL con le relazioni di Dragonetti et al. Eq. (8) e (9), come segue [7]:

$$f_v = 1 - \frac{1}{\alpha_\infty \left(1 + \frac{\phi \mu}{i \omega \rho_m k_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + i \frac{4 \alpha_\infty^2 k_0^2 \rho_m \omega}{\phi^2 \mu \Lambda^2}} \right)}, \quad (10)$$

$$f_\kappa = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\phi \kappa}{i k_0' c_p \omega \rho_m} \sqrt{1 + i \frac{4 k_0'^2 c_p \rho_m \omega}{\kappa \Lambda'^2 \phi^2}}}. \quad (11)$$

3 | Materiali e metodi

Come evidenziato nella sezione precedente, per prevedere il comportamento dinamico di un materiale poroso sottoposto a eccitazione da onda sonora, è necessario conoscere i suoi parametri di trasporto. Le moderne tecnologie di stampa additiva (AM) consentono di realizzare materiali innovativi e multifunzionali per diverse applicazioni. In particolare, le tecniche AM rendono possibile progettare un materiale con una microgeometria controllata in modo preciso [8]. Pertanto, dalla ripetizione spaziale di una cellula unitaria scelta, è possibile realizzare un intero campione. Ciò consente di indagare sulle proprietà della cellula unitaria per progettare il materiale complessivo e quindi selezionare la geometria adatta per una specifica applicazione. Negli ultimi anni, varie tecnologie AM sono già state utilizzate nella ricerca e nello sviluppo di una varietà di nuovi materiali acustici, come assorbitori acustici con interferenza distruttiva passiva, schiume a sfera cava,

materiali fibrosi stampati in 3D, reticoli micro-assorbenti del suono. Pertanto, la possibilità di avere un set di correlazioni tra microgeometria e parametri di trasporto aiuta nella progettazione di un materiale poroso con proprietà acustiche specificate.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di realizzare stack termoacustici mediante fabbricazione additiva, una volta trovata la cellula unitaria in grado di massimizzare la conversione dell'energia termoacustica attraverso i modelli sviluppati. Di seguito viene riportata la modellazione numerica eseguita mediante metodo agli elementi finiti (FEM) al fine di valutare i parametri di trasporto per tre diverse tipologie di materiali: Pin Array tetragonali, Wire Mesh e Schiume a membrana 3D. Successivamente, sono state sviluppate due tecniche acustiche basate sull'ipotesi di parametri concentrati che permettono di misurare sperimentalmente la densità complessa ed il modulo di rigidità complesso di un materiale in range di bassa frequenza (sotto i 200 Hz).

3.1 | Simulazioni agli elementi finiti

Le equazioni di continuità, momento ed energia linearizzate permettono di risolvere i campi termo-fluidodinamici all'interno dei materiali porosi in condizioni di flusso oscillante. La teoria dell'omogeneizzazione evidenzia che, quando esiste una *separazione di scala*, ovvero la lunghezza d'onda dello stimolo è molto più grande della microscala del materiale, la descrizione gli effetti viscosi e termici può essere disaccoppiata. In particolare, grazie al modello JCAL, la conoscenza del comportamento dinamico complesso del materiale è funzione di soli sei parametri di trasporto, che possono essere valutati mediante la risoluzione di tre *boundary value problems*. La fisica di base corrispondente alle diverse simulazioni è la seguente [9].

- Risolvendo il flusso di Stokes, si può valutare la permeabilità viscosa statica k_0 della struttura porosa in esame. Per flussi a basso numero di Reynolds, corrispondenti a un fluido newtoniano incomprimibile, risulta

$$k_0 = \phi \frac{\langle u \rangle}{\Delta p / D_t}, \quad (12)$$

dove $\langle u \rangle$ è la velocità media sulla fase fluida, Δp è la differenza di pressione applicata e D_t è la dimensione della cella unitaria.

- La risoluzione del problema di Laplace consente di valutare i parametri ad alta frequenza derivati nel caso di un fluido ideale inviscido: la tortuosità α_∞ e la lunghezza caratteristica viscosa Λ . Secondo l'analogia della conduzione elettrica, una volta applicata una differenza di potenziale elettrico ΔV attraverso la cella unitaria in cui la fase solida è isolante e il fluido è conduttivo, i parametri possono essere stimati come

$$\alpha_\infty = \frac{\langle E \cdot E \rangle_{V_f}}{\langle E \rangle_{V_s} \cdot \langle E \rangle_{V_s}}, \quad (13)$$

$$\Lambda = \frac{2 \int_{V_f} E \cdot E dV_f}{\int_{A_{fs}} E \cdot E dA_{fs}}; \quad (14)$$

dove V_f e A_{fs} indicano, rispettivamente, il volume fluido e la superficie di interfaccia solido-fluido, E è il campo elettrico locale derivante da un potenziale scalare, il potenziale scalare essendo a sua volta soluzione del problema di Laplace.

- Dalla soluzione del problema di Poisson all'interno del volume fluido della microstruttura del mezzo poroso è possibile valutare la permeabilità termica statica k'_0 come:

$$k'_0 = \varphi \langle \tau \rangle_{V_f} \quad (15)$$

dove τ è il campo di temperatura scalato che risolve l'equazione di Poisson all'interno della cella unitaria:

$$\nabla^2 \tau = -1. \quad (16)$$

Nella risoluzione di questi tre problemi alla microgeometria, alle superfici laterali della cella unitaria sono applicate condizioni al contorno periodiche, mentre isoterma e no-slip sono le condizioni termomeccaniche imposte all'interfaccia solido fluido. In Fig. 1 sono riportati degli esempi di campi di velocità, potenziale elettrico e temperatura per una cella unitaria di Pin Array Tetragonali.

Infine, porosità φ e lunghezza caratteristica termica Λ' sono parametri geometrici che possono essere valutati direttamente dalla geometria cellula unitaria:

$$\varphi = \frac{V_f}{V_{total}}, \quad (17)$$

$$\Lambda' = \frac{2 \int_{V_f} dV_f}{\int_{A_{fs}} dA_{fs}}, \quad (18)$$

con V_{total} il volume totale della cellula unitaria includendo entrambe le frazioni solide e fluide.

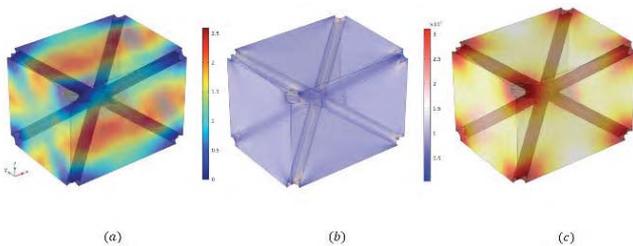


Fig. 1 – Un esempio dei tre campi di velocità, potenziale elettrico e temperatura per una cella unitaria a forma di Pin array tetragonale di pin. È possibile notare l'aumento della velocità nelle sezioni laterali del flusso di passaggio (a), la periodicità del campo elettrico sui confini laterali (b) e la condizione di parete isoterma imposta sulle interfacce solido-fluido (c)

An example of the three fields of velocity, electric potential, and temperature for a unit cell in the shape of a tetragonal array of pins. It is possible to notice the increase in velocity in the lateral sections of the flow passage (a), the periodicity of the electric field at the lateral boundaries (b), and the isothermal wall condition imposed on the solid-fluid interfaces (c)

3.2 | Tecniche sperimentali acustiche a parametri concentrati

Per caratterizzare le funzioni di risposta viscosa f_v e termiche f_k dei campioni da testare, è stata sviluppata una tecnica innovativa al fine di misurare con accuratezza il comportamento del mezzo poroso in bassa frequenza, dove generalmente sono impiegati a lavorare gli stack. La tecnica si basa sull'approccio dei parametri concentrati [10,11]. Le Figure 2 e 3 mostrano il setup sperimentale utilizzato per caratterizzare rispettivamente la funzione dinamica f_v viscosa e la funzione dinamica f_k termica. La procedura di misurazione si basa su due acquisizioni distinte per ciascuna funzione di risposta: una misurazione in cui il campione riempie la cavità anteriore la sorgente acustica (misura detta *full*, Figg. 2 e 3 sinistra) e una misurazione senza il campione (detta *empty*, Figg. 2 e 3 destra). I test “vuoti” corrispondono a una correzione che tiene conto del supporto rigido imperfetto o dell'effetto dell'impedenza di radiazione con la terminazione aperta. Sfruttando diverse condizioni al contorno (terminazione aperta o supporto rigido) e misurando il campo di pressione acustica sia nella cavità inferiore p_{dw} che nella cavità superiore p_{up} , è possibile fornire una misura sperimentale della densità di massa dinamica $\tilde{\rho}$ e del modulo elastico dinamico \tilde{K} dei campioni prodotti, come segue:

$$\tilde{\rho} = \varphi \left(\rho_m + \frac{\gamma p_m A}{\omega^2 V_{dw} (d - x_{mic})} \left[\left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{full} - \left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{empty} \right] \right), \quad (18)$$

$$\tilde{K} = \frac{\gamma p_m}{\frac{1}{\varphi} - \frac{V_{dw}}{V_{up} \varphi} \left[\left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{full} - \left(\frac{p_{up}}{p_{dw}} \right)_{empty} \right]}, \quad (19)$$

dove d e A sono rispettivamente lo spessore e l'area trasversale del campione, x_{mic} è la posizione del microfono (rilevante per la misurazione della densità complessa); V_{dw} e V_{up} sono il volume della cavità inferiore e superiore. Questo metodo è limitato all'intervallo di frequenza bassa e deve soddisfare $|\tilde{k}_n d| < 0.5$ dove $\tilde{k}_n = \omega \sqrt{\tilde{\rho} / \tilde{K}}$ è il numero d'onda complesso che si propaga all'interno del campione. Combinando i risultati sperimentali dalle elaborazioni delle Eqs. (19) e (20)

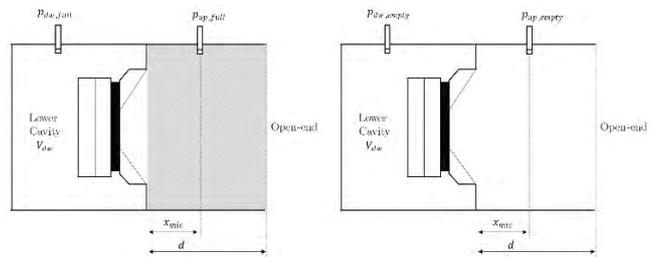


Fig. 2 – Illustrazione schematica della configurazione a parametri concentrati acustici utilizzata per misurare la densità complessa: configurazione completa (sinistra), configurazione vuota (destra)
Schematic illustration of the lumped parameter acoustic configuration used to measure the complex density: complete configuration (left), empty configuration (right)

e utilizzando le relazioni di Dragonetti et al., Eqs. (8) e (9), è possibile ottenere una derivazione sperimentale delle funzioni termoviscose f_v e f_k .

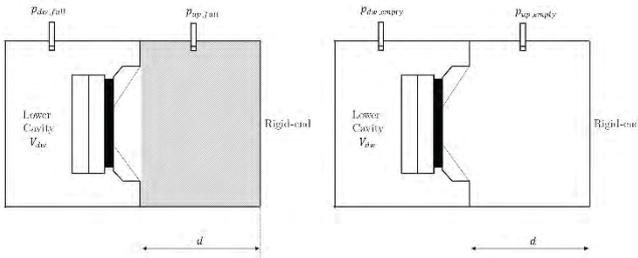


Fig. 3 – Illustrazione schematica della configurazione a parametri concentrati acustici utilizzata per misurare il modulo di rigidità complessa: configurazione completa (sinistra), configurazione vuota (destra)

Schematic illustration of the lumped parameter acoustic configuration used to measure the complex stiffness modulus: complete configuration (left), empty configuration (right)

4 | Risultati e discussione

Le simulazioni numeriche sono state effettuate variando i parametri geometrici delle tre strutture in esame. Questo ha permesso di costruire delle correlazioni fenomenologiche per la previsione dei parametri di trasporto dipendenti dalle caratteristiche geometriche di ciascun materiale. In questa sezione, vengono riportati i confronti tra gli andamenti teorici predetti mediante il modello di JCAL e i risultati sperimentali ottenuti mediante le tecniche acustiche innovative introdotte nella precedente sezione.

4.1 | Pin Array Tetragonali

Per questi materiali, la cella elementare può essere immaginata come una disposizione di cilindri (con diametro $2r_p$) intersecanti che costituiscono le diagonali di un tetragono con base quadrata [12], come riportato in Fig. 4. In base all'altezza o alla dimensione della base del tetragono (L_x , L_z), le aste possono avere diverse orientazioni rispetto alla direzione di propagazione delle onde sonore. Questo studio è motivato dalle notevoli potenzialità termoacustiche di questi materiali, come anche mostrato in studi precedenti. Materiali porosi con array di pin paralleli, sono stati introdotti da Swift e Keolian [13], notando un aumento dell'efficienza rispetto ad altri stack tradizionali (pori circolari e piastre parallele). La migliore performance termoacustica attesa per stack con elementi cilindrici è correlata al fatto che, per fluidi operativi con numero di Prandtl $P_r < 1$, la convessità della superficie solida porta ad un rapporto maggiore tra area termoacustica e area viscosa rispetto ad altri stack dotati di geometrie concave interne.

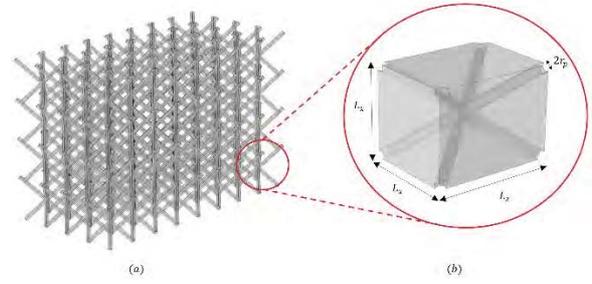


Fig. 4 – Pin Array Tetragonali (a), volume della cella unitaria (b)
Tetragonal Pin Array (a), volume of the unit cell (b)

Basandosi sul teorema di adimensionalizzazione di Buckingham, ciascun parametro di trasporto adimensionale può essere espresso come funzione di due grandezze adimensionali $\overline{L}_x = L_x/r_p$ e $\overline{L}_z = L_z/r_p$. Le simulazioni FEM sono state eseguite su 324 diverse celle reticolari, ottenute variando \overline{L}_x e \overline{L}_z in un intervallo di valori da 8 a 25 e fissando $r_p = 90 \mu\text{m}$. Una volta ottenuti i parametri per ciascuna cella del grande insieme di celle simulate con FEM, è stata implementata una procedura di adattamento per trovare i coefficienti dei polinomi del secondo ordine per ciascun parametro (R-quadrato corretto pari a 0,99 in ciascun caso).

$$\left[\varphi, \alpha_\infty, \frac{\Lambda'}{r_p}, \frac{\Lambda}{r_p}, \frac{k_0}{r_p^2}, \frac{k'_0}{r_p^2} \right] = A_1 + A_2 \overline{L}_x + A_3 \overline{L}_z + A_4 \overline{L}_x^2 + A_5 \overline{L}_x \overline{L}_z + A_6 \overline{L}_z^2.$$

Dove le costanti $A_{i=1-6}$ sono riportate nella Tab. 1.

Tab. 1 – Costanti del modello per valutare i parametri di trasporto adimensionali per i Pin Array Tetragonali

Model constants to evaluate the dimensionless transport parameters for Tetragonal Pin Arrays

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
φ	0.4787	0.03023	0.01335	-0.0006	-0.0001627	-0.0002149
Λ'/r_p	-0.9985	0.1024	0.08976	-0.001162	0.04551	-0.01226
Λ/r_p	0.3271	0.1772	-0.1711	2.728e-5	0.01215	0.005476
α_∞	1.373	-0.02005	-0.01669	0.0003822	0.0002203	0.0002946
k_0/r_p^2	1.31	-0.1572	-0.2395	0.02229	0.004712	0.007991
k'_0/r_p^2	2.804	-0.5023	-0.2478	0.01621	0.05014	-0.003899

Il provino realizzato mediante tecnologia di stampa additiva in polvere metallica, riportato insieme ai risultati in Fig. 5, è caratterizzato i seguenti parametri geometrici: $r_p = 90 \mu\text{m}$, $\overline{L}_x = 13.9$, $\overline{L}_z = 16.7$. Dal confronto teorico, parametri di trasporto da Tab. 1 con il modello di JCAL, Eq (10) e (11), e sperimentale vi è un ottimo accordo che permette di validare il modello previsionale per questa tipologia di materiale.

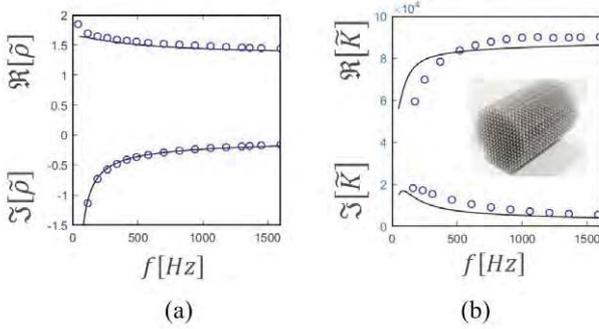


Fig. 5 – Confronto teorico-sperimentale della (a) densità complessa e (b) del modulo di Rigidezza complesso del provino di Pin Array Tetragonale

Comparison of theoretical-experimental (a) complex density and (b) complex stiffness modulus of the tetragonal pin array specimen

4.2 | Wire Mesh

Le Wire Mesh (o schermi sovrapposti) sono ampiamente utilizzate perché sono facili da realizzare rispetto ad altri stack classici a sezione trasversale uniforme (piastre parallele, pori circolari) e offrono un basso rapporto tra il volume del fluido e l'area dell'interfaccia fluido-solido. Tuttavia, manca un modello accurato nella letteratura per descrivere le proprietà viscoso e termiche di questo tipo di stack. Le Wire Mesh sono praticamente ottenute mediante la sovrapposizione di diversi strati di griglie disposte in modo casuale, Fig. 6. Le simulazioni sono state condotte su 150 diverse celle unitarie ottenute variando il raggio del cilindro r_p da 0.13 a 0.78 mm e la distanza tra essi d_s da 1 a 3.5 mm. Si noti che questo intervallo di variazione dei parametri r_p e d_s include le dimensioni tipiche delle reti metalliche commerciali. Attraverso le Eqs. (12)-(15), (17) e (18), i parametri di trasporto sono stati valutati per ciascuna cella unitaria. Successivamente, la struttura generale delle correlazioni proposte tra i descrittori geometrici e i parametri di trasporto è stata ispirata a quelle fornite da Luu et al. [14]. Questo è stato possibile grazie alla somiglianza tra le Wire Mesh ed una struttura fibrosa. Le correlazioni proposte sono riassunte nella Tab. II, insieme ad alcuni indicatori statistici che valutano la bontà dell'adattamento dell'interpolazione [7].

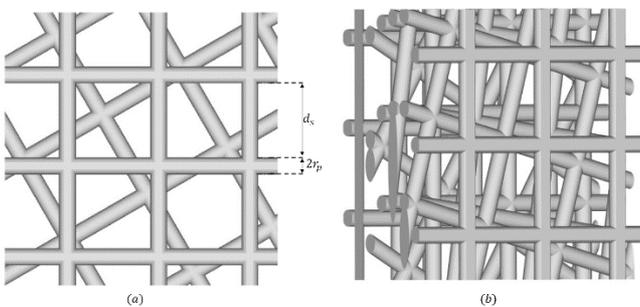


Fig. 6 – (a) Rappresentazione schematica dei parametri costituenti le Wire Mesh, (b) Volume rappresentativo della cella unitaria

(a) Schematic representation of the parameters constituting the Wire Mesh. (b) Representative volume of the unit cell

Tab. 2 – Correlazioni per i parametri di trasporto per le Wire Mesh. SSE indica l'errore quadratico medio
Correlations for the transport parameters for the Wire Mesh. SSE denotes the mean squared error

Correlazione	SSE
$\varphi = 1 - 0.7099 \frac{\pi r_p}{p + 2r_p}$	0.0493
$\frac{\Lambda'}{r_p} = \frac{\varphi}{1 - \varphi - 0.005133}$	10.38
$\frac{\Lambda}{r_p} = 0.4825 \frac{\varphi}{1 - \varphi + 0.04564}$	1.284
$\alpha_\infty = \left(\frac{1}{\varphi}\right)^{0.5807}$	0.1303
$\log_{10} \left(\frac{k_0}{r_p^2}\right) = 0.7765 \log_{10} \left(\frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2}\right) - 0.9855$	0.0605
$\log_{10} \left(\frac{k'_0}{r_p^2}\right) = 0.7258 \log_{10} \left(\frac{\varphi^3}{(1 - \varphi + 0.3054)^2}\right) - 0.6741$	0.1802

Di seguito, i risultati sperimentali sono riportati in termini di funzioni termo-viscosa, f_v e f_κ . La Fig. 7 mostra un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti attraverso la tecnica a parametri concentrati e le previsioni che combinano il modello JCAL, Eqs. (10) e (11) con le correlazioni dei parametri di trasporto proposte (Tab. II). Il provino testato è una Mesh con i seguenti dati geometrici: $r_p = 0.30$ mm, $d_s = 2.30$ mm. I grafici sono riportati in termini delle parti reale e immaginaria delle funzioni termo-viscoso. I dati sperimentali sono in buon accordo con le previsioni teoriche sia per il comportamento viscoso che termico. Le differenze più significative tra i dati sperimentali e il modello sono state osservate per la parte immaginaria della funzione di risposta termica, f_κ (sotto i 50 Hz). Questo è principalmente dovuto alle difficoltà intrinseche alla tecnica di

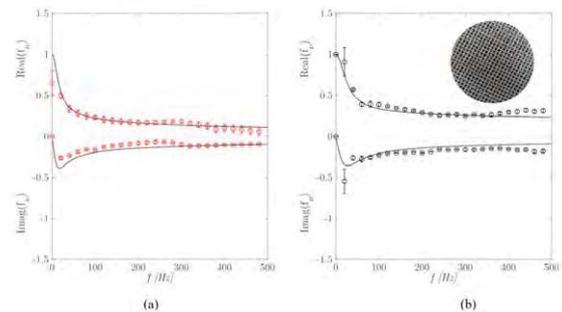


Fig. 7 – Confronto tra i risultati sperimentali (punti circolari), con media e deviazione standard, e l'approccio di modellazione (linea continua); parte reale e immaginaria della (a) funzione termica dinamica e (b) funzione viscosa dinamica in funzione della frequenza

Comparison between experimental results (circular points) with mean and standard deviation, and the modeling approach (solid line); real and imaginary parts of (a) dynamic thermal function and (b) dynamic viscous function as a function of frequency

misurazione, che richiede un allestimento perfettamente sigillato per evitare perdite d'aria e una sorgente acustica in grado di supportare il volume di aderenza anteriore e posteriore.

4.3 | Schiume a membrana 3D

Le schiume sono una dispersione di gas in una matrice liquida o solida. La loro struttura è composta da membrane, legamenti e vertici. Le schiume che presentano pori completamente interconnessi vengono definite come “*completamente aperta*”. In questa situazione, la connessione tra le celle raggiunge il massimo livello. Se alcuni dei pori sono chiusi o parzialmente chiusi da membrane sottili, la schiuma viene denominata “*parzialmente reticolata*”. I film solidi o le membrane nei reali mezzi porosi come poliuretano o schiume metalliche rappresentano solo una piccola frazione del materiale nella massa complessiva del mezzo poroso. Tuttavia, il loro ruolo potrebbe essere di primaria importanza per la comprensione delle proprietà di trasporto e acustiche di queste schiume.

L'obiettivo di questo modello è prevedere le proprietà dinamiche delle schiume a membrana realizzate con la tecnica di stampa additiva. Ciò significa che vengono considerate geometrie ordinate monodisperse, denominate schiume a membrana 3D. Le principali differenze tra la cellula unitaria scelta e la classica cellula tetraedrica reticolata sono l'assenza di legamenti per collegare le membrane e lo spessore non trascurabile delle membrane, come mostrato nella Fig. 8a. Pertanto, i tre descrittori geometrici che caratterizzano la cellula unitaria sono la dimensione della cellula unitaria D_t , lo spessore della membrana, ξ e il rapporto di apertura della membrana definito come $t_0\sqrt{A_{open}/A_{membrana}}$ (rapporto tra l'area verde chiaro e l'area rossa nella Fig. 8.a).

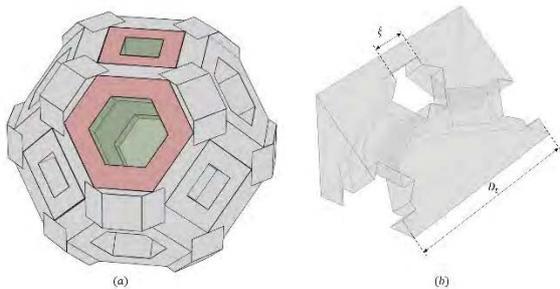


Fig. 8 – (a) Cella unitaria della schiuma a membrana 3D, (b) volume unitario utilizzato per le simulazioni numeriche sfruttando la simmetria della geometria
(a) Unit cell of the 3D membrane foam, (b) unit volume used for numerical simulations leveraging the symmetry of the geometry

Approfondendo della simmetria della cella unitaria, viene presa in considerazione solo un'ottava parte come dominio fluido per ridurre i costi computazionali (Fig. 8b). Il limite degli intervalli dei parametri geometrici è espresso attraverso due quantità adimensionali come $0.2 < t_0 < 0.7$ e $0.003 < \xi/D_t < 0.2$. Inoltre, per evitare punti di singolarità in cui non vi è convergenza e stabilità della soluzione numerica, vengono adottati bordi arrotondati delle membrane.

La struttura delle correlazioni per la porosità φ e la lunghezza caratteristica termica Λ' come funzioni dei descrittori geometrici è derivata analiticamente, mentre per i parametri inerziali Λ e α_∞ le correlazioni sono ispirate a Doutres et al. [15] e per la permeabilità viscosa statica da Langlois et al. [16]. Le correlazioni proposte sono riportate nella Tab. 3.

Tab. 3 – Correlazione dei parametri di trasporto per schiume a membrana 3D
Correlation of transport parameters for 3D membrane foams

Correlazione	SSE
$\varphi = 1 - \frac{9}{16}(1 + 2\sqrt{3})(1 - t_0^2)\frac{\xi}{D_t}$	0.01649
$\frac{\Lambda'}{D_t} = \frac{2\varphi}{6(1 - t_0^2) + \frac{\xi}{D_t}}$	0.03528
$\frac{\Lambda'}{\Lambda} = (\varphi)^{0.2468} \left(\frac{1}{t_0}\right)^{0.9609}$	3.254
$\alpha_\infty = 0.6668(\varphi)^{-0.4703} \left(\frac{1}{t_0}\right)^{0.9678}$	1.984
$\frac{k_0}{D_t^2} = 0.03249\varphi t_0^3$	2.334e-6
$\frac{k'_0}{D_t^2} = 0.04023\varphi^{3.265} t_0^{2.494} + 0.01097 \left(\frac{\xi}{D_t}\right)^{-0.07873}$	4.506e-5

Il confronto teorico sperimentale è stato effettuato per un provino realizzato in stampa additiva (PLA), le cui dimensioni caratteristiche della microstruttura sono $D_t = 8$ mm, $\xi = 0.8$ mm, $t_0 = 0.4$. In Fig. 9, sono riportati i confronti teorico-sperimentali in termini di parte reale e immaginaria delle permeabilità viscoso $\tilde{k} = \varphi \frac{\delta_v^2}{2i}(1 - f_v)$ e termica $\tilde{k}'\varphi \frac{\delta_k^2}{2i}(1 - f_k)$, dove $\delta_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho_0}$ e $\delta_k = \sqrt{2\kappa/\omega\rho_0 c_p}$ sono gli spessori di strato limite viscoso e termico rispettivamente. Da tali figure è possibile evidenziare un ottimo accordo tra i dati del modello e quelli misurati.

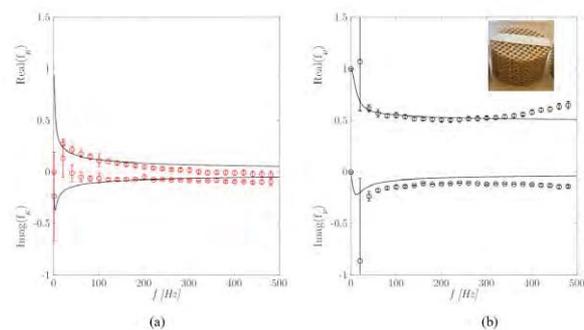


Fig. 9 – Confronto tra i risultati sperimentali (punti circolari), con media e deviazione standard, e l'approccio di modellazione (linea continua); parte reale e immaginaria della (a) permeabilità termica dinamica e (b) permeabilità viscosa dinamica in funzione della frequenza

Comparison between experimental results (circular points) with mean and standard deviation, and the modeling approach (solid line); real and imaginary parts of (a) dynamic thermal permeability and (b) dynamic viscous permeability as a function of frequency

4.4 | Confronto delle prestazioni termoacustiche

Il confronto delle prestazioni dei tre stack non convenzionali (Wire Mesh, Pin Array Tetragonali e Schiume a membrana 3D) è stato effettuato dal punto di vista numerico su un motore termoacustico ad onda stazionaria. Lo schema utilizzato per le simulazioni è riportato nella Fig. 10. Le simulazioni sono state effettuate implementando le equazioni del software DELTAEC [17] in ambiente MATLAB avendo così la possibilità di inserire la modellazione degli stack innovativi caratterizzati. Sono stati effettuati degli sweep bidimensionali per i parametri geometrici di ciascuno stack, in particolare: per Wire Mesh, $0.13\text{ mm} < r_p < 0.78\text{ mm}$ e $1\text{ mm} < d_s < 3.5\text{ mm}$; per i Pin Array Tetragonali, $r_p = 0.09\text{ mm}$, $8 < L_x < 24$ e $8 < L_z < 24$; per le schiume a membrana 3D, $D_t = 1\text{ mm}$, $0.1 < \xi/D_t < 0.2$ e $0.2 < t_0 < 0.7$. Le condizioni al contorno applicate sono riportate nella Tab. 4.

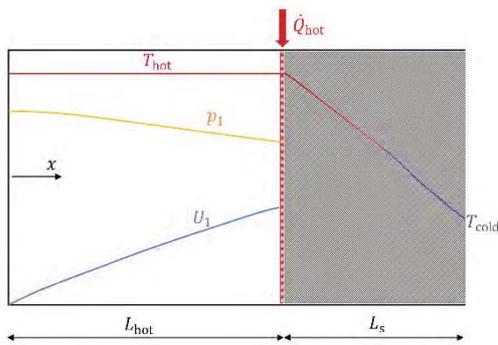


Fig. 10 – Rappresentazione della sezione del motore termoacustico simulato

Representation of the simulated section of the thermoacoustic engine

Tab. 4 – Condizioni operative del motore termoacustico simulato
Operating conditions of the simulated thermoacoustic engine

Parametro	Valore
L_{hot}	0.85 m
L_s	0.05 m
p_{run}	5.000 Pa
T_{hot}	593 K
T_{cold}	333 K
Q_{hot}	100 W

In Fig. 11, *surface-plot* consentono di individuare l'insieme dei parametri geometrici in cui lo stack è in grado di convertire una quantità positiva di energia per unità di tempo

$$\dot{E}_{gain} = \int \frac{1}{2} \Re[g \tilde{p}_1 u_1] dz > 0$$

dove il parametro g è il parametro di guadagno termoacustico funzione del comportamento del materiale (f_v, f_x) e del gradiente termico applicato dagli scambiatori di calore (dT_m/dx).

Se è soddisfatta la condizione per cui $\dot{E}_{gain} > 0$, allora avverrà la conversione di calore in energia meccanica. In caso contrario, quando non avverrà alcuna conversione in energia meccanica e si verificheranno solo processi dissipativi. Nel caso di Pin Array Tetragonali e Wire Mesh, è possibile riscontrare la presenza sia di condizioni favorevoli alla conversione energetica ($\dot{E}_{gain} > 0$) che puramente dissipative, come da Fig. 11a e 11b. Nel caso dei Pin Array Tetragonali, per valori molto bassi di L_z e valori elevati di L_x per i pin array, e per valori molto bassi di r_p e valori elevati di d_s delle Wire Mesh, la conversione di calore in energia meccanica è favorita. Le regioni in cui $\dot{E}_{gain} = 0$ sono caratterizzate da effetti bilanciati tra la conversione di energia energetica e le perdite. Nel caso delle Schiume a membrana 3D (Fig. 11c), si può notare che, per gli stessi parametri operativi (Tab. 6.2), non esistono regioni per cui $\dot{E}_{gain} < 0$. Questo indica dunque la presenza di sole condizioni favorevoli alla conversione energetica. Tuttavia, per poter osservare il fenomeno termoacustico, la quantità di energia convertita positivamente (guadagno) per unità di tempo \dot{E}_{gain} deve superare la quantità di energia dissipata per interazione viscosa e termica tra il fluido e lo scheletro solido dello stack \dot{E}_{diss} . Pertanto, il fenomeno termoacustico avverrà quando la somma dell'energia guadagnata e dell'energia dissipata per unità di tempo $\dot{E}_{tot} = \dot{E}_{gain} + \dot{E}_{diss} > 0$. Queste perdite di energia \dot{E}_{diss} per unità di tempo sono riportate per ciascun materiale in Fig. 12. Si può evidenziare l'alta quantità di dissipazione fornita dalle Schiume a membrana, che è di due ordini di grandezza maggiore rispetto a quella fornita dalle altre tipologie di stack. La Fig. 13, dunque, mostra il reale potenziale di innesco del processo termoacustico di questi tipi di stack all'interno di un dispositivo che funziona con queste condizioni operative. Si può dunque osservare che per le Wire Mesh e i Pin Array Tetragonali forniscono diverse combinazioni per cui $\dot{E}_{tot} > 0$, in particolare, per valori molto bassi di L_z e valori elevati di L_x per i pin array, e per valori molto bassi di r_p e valori elevati di d_s per le Wire Mesh. Infine, è possibile concludere che i Pin Array Tetragonali per tali condizioni operative possono essere preferiti rispetto al Wire Mesh, grazie ad una più ampia regione che permette la conversione energetica favorevole e dunque l'innesco del processo termoacustico.

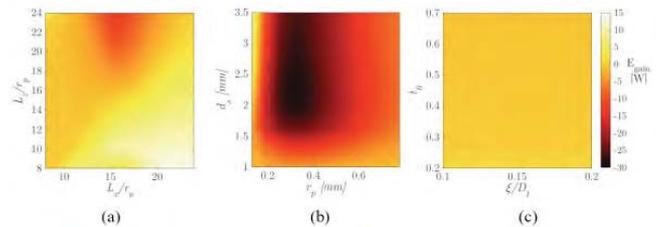


Fig. 11 – Le prestazioni, in termini di quantità positiva di energia per unità di tempo \dot{E}_{gain} , di un motore termoacustico che utilizza uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The performance, in terms of positive energy output per unit time \dot{E}_{gain} , of a thermoacoustic engine using: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

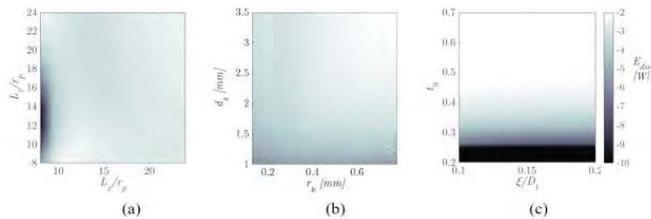


Fig. 12 – L'energia dissipata \dot{E}_{diss} in un motore termoacustico all'interno di uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The dissipated energy \dot{E}_{diss} in a thermoacoustic engine within a stack: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

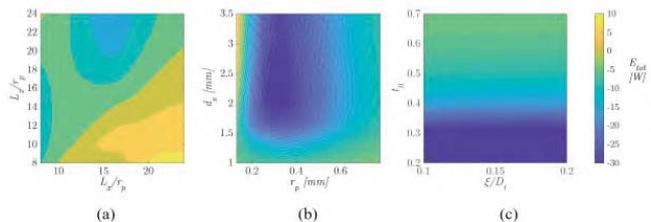


Fig. 13 – L'energia totale convertita \dot{E}_{tot} nel processo termoacustico da uno stack: (a) a pin array tetragonali, (b) wire mesh, (c) schiume a membrana 3D

The total converted energy \dot{E}_{tot} in the thermoacoustic process from a stack: (a) tetragonal pin array, (b) wire mesh, (c) 3D membrane foams

5 | Conclusioni

In questo articolo è stato dunque analizzato il contesto della termoacustica e la sua rilevanza nel panorama delle tecnologie sostenibili. Sono stati esaminati i vantaggi e le potenzialità di questa tecnologia, focalizzandosi sul ruolo cruciale degli stack porosi nel processo di conversione energetica. Si è evidenziata la necessità di migliorare l'efficienza dei dispositivi termoacustici attraverso l'ottimizzazione dei materiali degli stack. Infatti, grazie alla diffusione della tecnologia di fabbricazione additiva, è possibile realizzare materiali porosi con geometria controllata in modo preciso. Pertanto, un modello predittivo rappresenta uno strumento potente nella fase di progettazione sia delle applicazioni di assorbimento acustico sia delle applicazioni termoacustiche. Nel primo caso, l'obiettivo è massimizzare la dissipazione di energia dovuta alle perdite viscoso e termiche quando il suono si propaga nello scheletro solido. Nel secondo caso, invece, l'obiettivo è trovare il bilanciamento ottimale tra resistenza viscosa ed effetti di rilassamento termico al fine di innescare il fenomeno termoacustico, ossia la conversione di energia da termica a meccanica (e viceversa). A questo scopo, sono stati esplorati materiali non convenzionali come Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D. Sono stati sviluppati modelli predittivi per correlare i parametri di trasporto con le dimensioni geometriche, per tre diverse tipologie di materiali: Pin Array Tetragonali, Rete Metallica e Schiume a Membrana 3D. Simulazioni basate sui metodi agli Elementi Finiti (FEM) hanno permesso di stimare numericamente i pa-

rametri di trasporto dalla risoluzione dei problemi di Stokes, Laplace e Poisson all'interno del Volume Elementare Rappresentativo del materiale.

Inoltre, sono stati sviluppati due nuove tecniche sperimentali per caratterizzare accuratamente i materiali porosi in bassa frequenza. Queste tecniche si basano sull'ipotesi dei parametri concentrati e l'analisi per i range di validità della frequenza è stata sintetizzata in $|\tilde{k}_n d| < 0.5$. Infine, è stato riportato un confronto tra le prestazioni di un motore termoacustico utilizzando i tre diversi stack (Pin Array Tetragonali, Wire Mesh e Schiume a Membrana 3D) e le stesse condizioni operative in termini di quantità di energia guadagnata ed energia dissipata per unità di tempo.

Sviluppi futuri prevederanno il testing delle proprietà di conversione energetica di questi materiali su diversi prototipi di dispositivi termoacustici caratterizzati da campi di pressione e velocità differenti tra loro (standing wave, traveling wave e hybrid).

Conclusions

This article explores the context of thermoacoustics and its relevance in the realm of sustainable technologies. It examines the advantages and potential of this technology, focusing on the crucial role of porous stacks in the energy conversion process. The need to enhance the efficiency of thermoacoustic devices through stack material optimization is highlighted. Thanks to the widespread adoption of additive manufacturing technology, it is now possible to create porous materials with precise controlled geometry. Therefore, predictive modeling represents a powerful tool in designing both acoustic absorption and thermoacoustic applications. In the former case, the goal is to maximize energy dissipation due to viscous and thermal losses when sound propagates through the solid skeleton. In the latter case, the aim is to find the optimal balance between viscous resistance and thermal relaxation effects to trigger the thermoacoustic phenomenon, i.e., the conversion of energy from thermal to mechanical (and vice versa). To achieve this, unconventional materials such as Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams have been explored. Predictive models have been developed to correlate transport parameters with geometric dimensions for these three types of materials: Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams. Finite Element Method (FEM)-based simulations have allowed for the numerical estimation of transport parameters by solving Stokes, Laplace, and Poisson problems within the Representative Elementary Volume of the material.

Additionally, two new experimental techniques have been developed to accurately characterize porous materials at low frequencies. These techniques are based on the lumped parameter assumption, and the frequency range analysis validity has been synthesized in $|\tilde{k}_n d| < 0.5$. Finally, a comparison of the performance of a thermoacoustic engine using the three different stacks (Tetragonal Pin Arrays, Wire Mesh, and 3D Membrane Foams) under the same operating conditions in terms of energy gain and dissipation per unit time has been reported. Future developments will involve testing the energy conversion properties of these materials on various prototypes of thermoacoustic devices characterized by different pressure and velocity fields (standing wave, traveling wave, and hybrid).

Bibliografia

- [1] G.W. Swift, *Thermoacoustics : a unifying perspective for some engines and refrigerators.*, Springer, 2018.
- [2] G. Chen, L. Tang, B. Mace, Z. Yu, Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146 (2021) 111170. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111170>.
- [3] J.F. Allard, N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, John Wiley and Sons, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470747339>.
- [4] J.L. Auriault, C. Boutin, C. Geindreau, *Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media*, Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media (2010). <https://doi.org/10.1002/9780470612033>.
- [5] C. Zwikker, C.W. Kosten, *Sound Absorbing Materials*, 1949.
- [6] R. Dragonetti, M. Napolitano, S. Di Filippo, R. Romano, Modeling energy conversion in a tortuous stack for thermoacoustic applications, *Appl Therm Eng* 103 (2016) 233-242. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.076>.
- [7] E. Di Giulio, C.T. Nguyen, C. Perrot, R. Dragonetti, Wire mesh stack and regenerator model for thermoacoustic devices, *Appl Therm Eng* 221 (2023) 119816. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119816>.
- [8] T.G. Zieliński, N. Dauchez, T. Boutin, M. Leturia, A. Wilkinson, F. Chevillotte, F.X. Bécot, R. Venegas, Taking advantage of a 3D printing imperfection in the development of sound-absorbing materials, *Applied Acoustics* 197 (2022) 108941. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2022.108941>.
- [9] T. Zieliński, R. Venegas, C. Perrot, J. Sound and Vibration, 2020, Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115441>.
- [10] M. Napolitano, E. Di Giulio, F. Auriemma, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex bulk modulus of porous materials, *J Acoust Soc Am* 151 (2022) 1545–1556. <https://doi.org/10.1121/10.0009767>.
- [11] E. Di Giulio, M. Napolitano, A. Di Meglio, R.A. Romano, R. Dragonetti, Low frequency acoustic method to measure the complex density of porous materials, *J Acoust Soc Am* 152 (2022) 2220. <https://doi.org/10.1121/10.0014762>.
- [12] E. Di Giulio, F. Auriemma, M. Napolitano, R. Dragonetti, Acoustic and thermoacoustic properties of an additive manufactured lattice structure, *J Acoust Soc Am* 149 (2021) 3878–3888. <https://doi.org/10.1121/10.0005085>.
- [13] G.W. Swift, R.M. Kenlian, Thermoacoustics in pin-array stacks, *Journal of the Acoustical Society of America* 94 (1993) 941–943. <https://doi.org/10.1121/1.408196>.
- [14] H.T. Luu, C. Perrot, R. Panneton, Influence of Porosity, Fiber Radius and Fiber Orientation on the Transport and Acoustic Properties of Random Fiber Structures, *Acta Acustica United with Acustica* 103 (2017) 1050–1063. <https://doi.org/10.3813/AAA.919134>.
- [15] O. Doutres, N. Atalla, K. Dong, A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams, *J Appl Phys* 113 (2013) 054901. <https://doi.org/10.1063/1.4789595>.
- [16] V. Langlois, A. Kaddami, O. Pitois, C. Perrot, Acoustics of monodisperse open-cell foam: An experimental and numerical parametric study, *J Acoust Soc Am* 148 (2020) 1767. <https://doi.org/10.1121/10.0001995>.
- [17] B. Ward, J. Clark, Gregory.W. Swift, Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion, DELTAEC version 6.2: Users guide, Los Alamos National Laboratory, 2008.