

SIMULAZIONE FEM ACUSTICA DI UNA SCHIUMA AL VARIARE DELLA GEOMETRIA CELLULARE

Cristina Marescotti (1), Francesco Pompoli (2)

1) Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Ferrara, mrcsst@unife.it
2) Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Ferrara, pmpfnc@unife.it

SOMMARIO

Nel presente articolo viene studiato come varia l'assorbimento acustico di un materiale poroso cellulare al variare della geometria delle singole facce presenti nella cella, che possono essere o meno aperte verso le celle adiacenti. Viene utilizzato un modello agli elementi finiti nel quale è rappresentata la geometria 3D di una cella unitaria periodica, con il quale, attraverso diversi tipi di simulazione, si ottengono i 6 parametri del modello di fluido equivalente di Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL) [1] e l'assorbimento acustico per incidenza normale (α_n).

1. Introduzione

Le schiume cellulari sono materiali che vengono ampiamente utilizzati poiché posseggono ottime proprietà, tra cui acustiche, termiche e strutturali, unitamente all'aver bassa densità e pesi contenuti. Grazie all'impiego di nuove tecnologie produttive e alla possibilità di disporre di hardware di calcolo più potenti, negli ultimi anni si è cercato di indagare tali materiali partendo dallo studio di singole celle unitarie (PUC), tramite l'utilizzo di modelli numerici.

Nel precedente articolo [1], sono stati indagati due differenti modelli numerici i quali, partendo dalla costruzione del modello 3D di una cella unitaria periodica (PUC), sulla base della cella di Kelvin [2], determinano il coefficiente di assorbimento per incidenza normale α_n . Le simulazioni sono state svolte su celle caratterizzate da pari rapporto di chiusura r_c della membrana, quindi a parità di rapporto tra area piena e area forata su tutte le facce costituenti lo scheletro della schiuma.

Con l'obiettivo di indagare come varia il comportamento acustico delle celle all'aumentare della complessità della geometria, sono state condotte simulazioni andando a chiudere totalmente le membrane, partendo da una singola fino ad un massimo di cinque. Ulteriori simulazioni sono state eseguite concatenando in modo randomico più celle e paragonandole alle simulazioni delle singole PUC.

Il metodo di simulazione FEM utilizzato per la determinazione di α_n è quello denominato in [1] *Modello Fluido Equivalente*, poiché a parità di mesh comporta un costo computazionale notevolmente ridotto rispetto a quello termo-visco-acustico (TVA), senza presentare significative differenze [1].

2. Modello numerico – Modello Fluido Equivalente

Il modello numerico utilizzato in questo studio è quello definito *Modello Fluido Equivalente* [1], che calcola i 6 parametri acustici per la determinazione del coefficiente di assorbimento tramite il modello JCAL. Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Il software di simulazione è COMSOL Multiphysics® v. 5.6;
- Viene simulato il dominio d'aria di una singola cella unitaria 3D, come mostrato in figura 1 – a);
- Alle 4 facce del dominio fluido perpendicolari all'eccitazione (flusso d'aria, pressione sonora, corrente elettrica, ecc.), si applica la condizione di *Simmetria* (figura 1 – b)), per simulare un provino di superficie infinita. Lo spessore

del provino di 20.0 mm, viene considerato all'interno del modello di JCAL per il calcolo dell'impedenza superficiale Z_s del materiale.

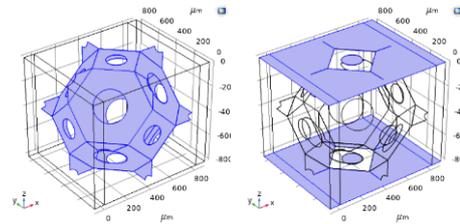


Figura 1 – Modello FEM cella unitaria: a) PUC base con $r_c = 55\%$; b) condizione al contorno di simmetria, direzione z.

Per quanto riguarda invece il calcolo dei 6 parametri fisici del modello di JCAL, il modello implementa tre diverse simulazioni; i tre modelli sono stati descritti in [1] e sono i seguenti: *Flusso laminare* – calcolo della resistività al flusso d'aria σ ; *Corrente Elettrica* – calcolo della porosità ϕ , tortuosità α_{∞} , e delle due grandezze lunghezza caratteristica viscosa Λ e lunghezza caratteristica termica Λ' ; *Equazioni di Poisson* – calcolo della permeabilità statica termica k_0' .

3. Analisi numerica acustica al variare della PUC

Le simulazioni sono state condotte a partire dalla geometria *Base*, mostrata in figura 1 – a), la quale presenta un rapporto di chiusura r_c pari al 55% e in cui tutte le membrane sono forate. La grandezza r_c viene definita come segue:

$$(1) \quad r_c = 1 - \sqrt{A_{el}/A_{po}} \quad [-] \quad (1)$$

dove A_{po} è l'area totale della i-esima faccia considerata [m^2], mentre A_{el} è l'area del foro [m^2].

Tabella 1 – Parametri acustici JCAL delle PUC simulate.

	σ	ϕ	α_{∞}	Λ	Λ'	k_0'
	[Pa s/m ²]	[-]	[-]	[μm]	[μm]	[-]
BASE						
$r_c = 55\%$	13504	0.993	1.50	105.6	289.2	1.17E-08
S01_min	13270	0.993	1.49	120.5	289.6	1.18E-08
S01_max	17112	0.993	1.66	100.7	283.6	1.17E-08
S03	17922	0.992	1.78	104.5	276.4	1.12E-08
S05	21786	0.992	1.84	97.7	268.1	1.10E-08

Per valutare come all'aumentare della complessità della geometria, introducendo delle membrane completamente occluse, si modifichi il comportamento acustico della PUC, sono state simulate diverse geometrie che presentano da una a cinque membrane senza foro, disposte in modo del tutto randomico. Le geometrie simulate sono numerose, ma verranno presentate e confrontate in questo articolo solo quelle di figura 2, i cui 6 parametri fisici sono riportati in tabella 1.

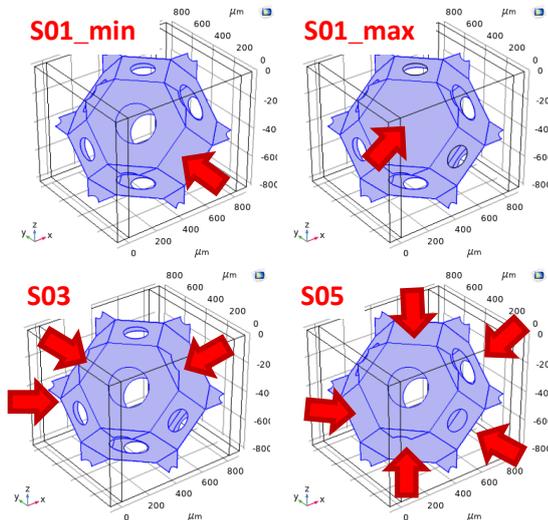


Figura 2 – PUC simulate: S01_min e _max – una superficie occlusa; S03 – 3 superfici occluse; S05 – 5 superfici occluse.

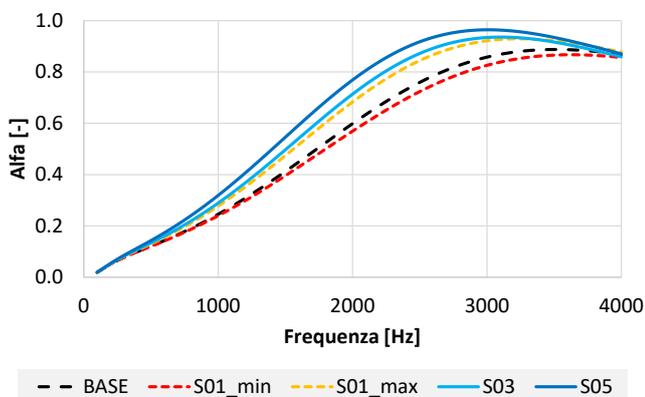


Figura 3 – Coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale α_n : confronto al variare della complessità della geometria della PUC.

In figura 3 vengono riportati gli andamenti relativi al coefficiente di assorbimento per incidenza normale α_n delle 5 PUC simulate. La riga tratteggiata nera rappresenta la cella *Base*, con tutte le facce forate e pari rapporto di chiusura r_c del 55%. Come detto precedentemente, le simulazioni eseguite sono molteplici, nello specifico sono state occluse tutte le membrane singolarmente. Nel grafico di figura 3 viene riportato l'andamento di α_n per la configurazione che presenta il minimo assorbimento (*S1_min*) e la configurazione che ne presenta invece il massimo (*S01_max*), con una sola membrana chiusa. Si nota come vi sia un'elevata variazione dell'andamento di α_n al variare anche di una singola membrana chiusa, rispetto alla configurazione totalmente aperta.

Andando invece ad aumentare la complessità della geometria e del cammino che il flusso d'aria deve eseguire, passando quindi ad una cella con 3 membrane chiuse (*S03*) o ad una con 5 membrane chiuse (*S05*), si ha che all'aumentare dell'occlu-

sione della PUC, l'assorbimento tende ad aumentare: confrontando la geometria *Base* con la *S05*, si ha una variazione massima di α_n pari a 0.2 alla frequenza di 2100 Hz.

Un'altra indagine che è stata svolta, analizza l'andamento di α_n al variare delle celle concatenate. Le simulazioni svolte precedentemente, simulavano la singola PUC fino ad ottenere un provino di superficie infinita e spessore pari a 20.0 mm. In questo caso, il provino di pari spessore, replica due PUC concatenate tra di loro: nello specifico si analizzano le configurazioni in cui si ha prima la cella *S01_min* concatenata alla *S05* (*S01_min+S05*) e viceversa (*S05+S01_min*). Il nome della prima cella è quella frontale al flusso d'aria. Anche in questo caso, si ottengono delle variazioni nel coefficiente di assorbimento rispetto alle due singole celle: nel complesso, si ha che le due celle concatenate mostrano sempre un andamento inferiore rispetto alla cella più assorbente (*S05*), mentre hanno un valore di α_n notevolmente superiore rispetto alla cella meno performante (*S01_min*).

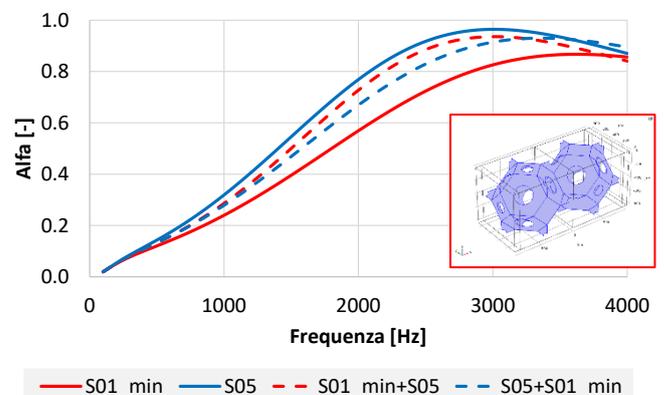


Figura 4 – Coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale α_n : confronto al variare delle celle concatenate e geometria *S01_min+S05*.

4. Conclusioni

Partendo dalla simulazione numerica della cella *Base*, sono state analizzate differenti configurazioni all'aumentare dell'occlusione delle membrane e quindi della complessità geometrica della PUC. Analizzando il coefficiente di assorbimento numerico, si nota come chiudendo una singola membrana, l'andamento di α_n vari all'interno di un ampio range di valori, soprattutto ad alta frequenza. Questa variazione aumenta all'aumentare del numero di membrane chiuse, come mostrato in figura 3.

Concatenando invece due celle che presentano un assorbimento differente, si ottengono degli andamenti intermedi al comportamento acustico delle singole celle. Si può quindi concludere che, essendo nella realtà questi materiali notevolmente randomici a causa del processo di formazione, non è banale stimare un coefficiente di assorbimento senza tenere conto di questa variabilità geometrica.

5. Bibliografia

- [1] Marescotti C., Pompili F., *Simulazione FEM del campo acustico all'interno di una schiuma a cella aperta*, Associazione Italiana di Acustica, 47° Convegno Nazionale, 24-28 maggio 2021.
- [2] Van Hai Trinh, Vincent Langlois, Johann Guilleminot, Camille Perrot, Yacine Khidas, Olivier Pitois, *Tuning membrane content of sound absorbing cellular foams: Fabrication, experimental evidence and multiscale numerical simulation*, Materials and Design, **162** (2019), pp. 345-2361.

6. Ringraziamenti

Questa ricerca è finanziata dalla Regione Emilia Romagna all'interno del progetto SUPER: Supercomputing Unified Platform - Emilia-Romagna in attuazione del POR-FESR 2014-2020, Asse 1 - Ricerca e Innovazione, Azione 1.5.1.