

MODELLAZIONE FEM MICROSTRUTTURALE DI MATERIALI FIBROSI

Francesco Pompoli (1), Paolo Bonfiglio (2), Cristina Marescotti (3)

1) Dipartimento di Ingegneria – Università di Ferrara, Ferrara, francesco.pompoli@unife.it

2) Materiacustica srl, Ferrara, paolo.bonfiglio@materiacustica.it

3) Dipartimento di Ingegneria – Università di Ferrara, Ferrara, cristina.marescotti@unife.it

SOMMARIO

Nel presente articolo saranno illustrate due modalità di simulazione FEM microstrutturale di materiali fibrosi con distribuzione random di fibre parallele; la prima modalità prevede una simulazione termo-visco-acustica, che consente di ottenere direttamente le proprietà acustiche del materiale, quali ad esempio le grandezze acustiche caratteristiche e quindi l'assorbimento acustico. La seconda modalità prevede invece una serie di simulazioni FEM non acustiche, dalle quali ricavare i parametri fisici utilizzati dal modello di fluido dissipativo equivalente JCAL e calcolare analiticamente le grandezze acustiche caratteristiche.

1. Introduzione

La modellazione acustica microstrutturale dei materiali porosi è oggetto di numerose pubblicazioni scientifiche negli ultimi anni; gli approcci che i ricercatori stanno seguendo sono essenzialmente di due tipi:

- simulare direttamente i fenomeni termo-visco-acustici all'interno della microstruttura del materiale [1];
- simulare diversi fenomeni fisici (viscosi, elettrici, termici) all'interno della microstruttura del materiale e ricavare parametri (resistività, tortuosità, grandezze caratteristiche viscoso e termiche, permeabilità termica statica) che vengono poi utilizzati da modelli analitici di fluido dissipativo equivalente per calcolare i parametri acustici macrostrutturali del materiale [2].

Il primo approccio risolve direttamente le equazioni differenziali che governano la propagazione acustica in una microstruttura porosa simulando contemporaneamente gli effetti viscosi, termici ed inerziali prodotti dall'interazione tra campo acustico e scheletro del materiale, con tempi di calcolo elevati e difficoltà nel raggiungere alte frequenze nel caso di modelli tridimensionali complessi; nel secondo approccio invece si effettuano simulazioni stazionarie di diversi fenomeni fisici da cui si calcolano i parametri caratteristici che sono richiamati da modelli analitici che forniscono le proprietà acustiche caratteristiche in funzione della frequenza. In questo secondo caso si tratta di simulazioni molto più veloci e realizzabili anche per modelli microstrutturali complessi. In entrambi i casi comunque non si simula l'intero materiale oggetto di studio ma un volume elementare rappresentativo (REV in [2]) al cui interno ci siano un numero sufficiente di fibre o pori.

2. Metodi di simulazioni FEM

Per confrontare le due metodiche di simulazione microstrutturale sono stati studiati materiali costituiti da fibre parallele, disposte su un piano ortogonale all'asse delle fibre con disposizione casuale. La geometria studiata è quindi 2D (sezione ortogonale all'asse delle fibre), e su tale piano sono state generate una serie di circonferenze a raggio costante (10 μm) con centro determinato da una funzione di generazione random, previa verifica dell'assenza di sovrapposizione tra le circonferenze stesse. La definizione del numero di fibre (1000 per ogni modello) e della porosità imposta (0.90 e 0.96) determina la dimensione della cella REV quadrata (dell'ordine dei 2 mm).

Di seguito vengono sinteticamente descritte le diverse simulazioni FEM effettuate:

- Simulazione termo-visco-acustica per la determinazione diretta delle proprietà acustiche del mezzo: mediante tale simulazione è possibile calcolare la propagazione delle onde acustiche con la definizione esplicita delle perdite termiche e viscoso risolvendo simultaneamente l'equazione di continuità linearizzata, l'equazione di Navier-Stokes e l'equazione della conservazione dell'energia. Il dominio fluido è costituito da aria alla temperatura di 23 °C. Sul contorno del modello esposto al campo acustico si impone una condizione di pressione adiabatica unitaria mentre su quello posto su fondo rigido si applica una condizione di velocità di particella nulla. Sulle superfici delle fibre si applicano condizioni di velocità nulla e di temperatura nulla. Le superfici rimanenti sono trattate come simmetriche. La simulazione permette di determinare pressione acustica e velocità di particella alle estremità del volume rappresentativo dalle quali vengono calcolate le grandezze acustiche complesse (impedenza caratteristica e numero d'onda complesso). Successivamente vengono calcolate analiticamente l'impedenza superficiale e il coefficiente di assorbimento acustico per uno spessore arbitrario (fissato a 30 mm nel presente articolo).
- Simulazione fluidodinamica di flusso laminare per la determinazione della resistività al flusso d'aria in direzione ortogonale alle fibre σ : una condizione di velocità (pari a 0,5 mm/s) è applicata all'inlet del modello geometrico mentre per l'outlet è utilizzata una condizione di pressione nulla. Sul contorno delle fibre sono applicate condizioni di velocità nulla. Le superfici rimanenti sono trattate come simmetriche. Il modello permette di determinare la caduta di pressione ai capi del dominio rappresentativo da cui è calcolata la resistività del flusso d'aria una volta fissato lo spessore dell'elemento.
- Simulazione di conducibilità elettrica per la determinazione della tortuosità α_∞ e della grandezza caratteristica viscosa A : il dominio fluido è costituito da acqua alla temperatura di 23 °C. Un potenziale elettrico unitario è applicato all'inlet mentre una condizione di potenziale nullo è imposta all'outlet del modello. A tutti i restanti contorni è applicata una condizione densità di corrente

normale nulla. Calcolando le resistenze elettriche attraverso il dominio di acqua pura e un dominio di acqua permeato da fibre è possibile determinare la tortuosità una volta che la porosità a cella aperta è nota. Inoltre, la lunghezza caratteristica viscosa viene calcolata integrando la norma del campo elettrico sul dominio del mezzo e sui contorni delle fibre rispettivamente [2].

I restanti parametri di porosità ϕ e grandezza caratteristica termica Λ' sono calcolati dalla geometria del modello [2].

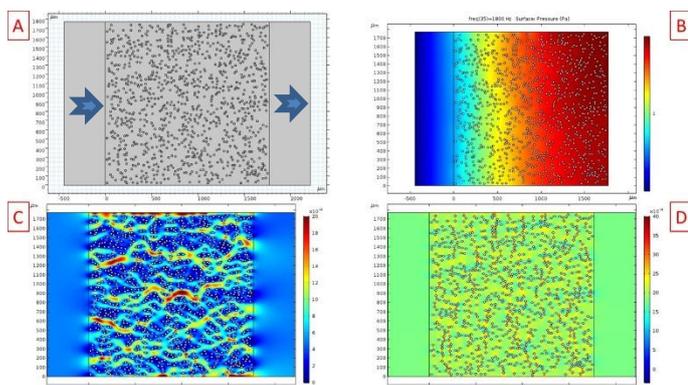


Figura 1 – Esempio di simulazioni FEM: A – geometria 2D del provino con disposizione di fibre random ($\phi=0.90$), le frecce indicano inlet ed outlet; B – andamento della pressione (simulazione termo-visco-acustica); C – andamento della velocità (simulazione fluidodinamica); D – densità di corrente in direzione x (simulazione elettrica).

Per il calcolo analitico delle proprietà acustiche caratteristiche è stato utilizzato il modello JCAL [3], che dipende dai 5 parametri già indicati e da un sesto, chiamato permeabilità termica statica k'_0 ; tale parametro può essere determinato direttamente da una simulazione FEM termica che al momento non è stata ancora effettuata oppure calcolato indirettamente da alcuni dei primi cinque parametri; ad esempio in [4] viene indicato un legame con la resistività al flusso attraverso la relazione:

$$(1) \quad k'_0 = \frac{\eta}{\sigma_{//}} \quad [\text{Hz}]$$

dove $\sigma_{//}$ è la resistività al flusso d'aria per un flusso parallelo all'asse delle fibre ed η la viscosità dinamica dell'aria; per diversi autori [5], [6] tale grandezza è pari alla metà della resistività calcolata per direzione ortogonale alle fibre e quindi può essere calcolata dal risultato della simulazione FEM fluidodinamica.

3. Risultati delle simulazioni

In tabella 1 vengono riportati i parametri fisici ricavati dalle due geometrie e dalle simulazioni fluidodinamiche ed elettriche (il parametro k'_0 è ricavato secondo (1)). In figura 2 viene riportato un confronto relativo al coefficiente di assorbimento acustico apparente, calcolato per un materiale dello spessore di 30 mm posto su fondo rigido per incidenza normale di un campo ad onde piane. Per ogni materiale viene riportata la curva calcolata dalle simulazioni termo-visco-acustiche (FEM) e quella ricavata dall'applicazione del modello di JCAL a partire dai parametri calcolati dalle simulazioni FEM precedentemente illustrate.

Come si può notare si trova un'ottima corrispondenza tra la simulazione acustica diretta e la curva ottenuta dal modello di fluido equivalente JCAL con i parametri calcolati dalle simulazioni FEM, pertanto i due metodi si possono ritenere entrambi validi. Per la porosità più alta si è riscontrata una differenza ad

alta frequenza tra le due curve che verrà indagata in futuro attraverso il calcolo diretto del parametro k'_0 ottenibile da simulazioni FEM termiche; tali differenze potrebbero infatti essere dovute alla determinazione approssimata del parametro k'_0 attraverso le formule analitiche proposte da [4], [5] e [6].

Tabella 1 – Parametri fisici per i materiali fibrosi simulati.

Porosità	Spessore [mm]	σ [Ns/m ⁴]	α_∞	Λ [μm]	Λ' [μm]	k'_0 [m ²]
0.90	30	106745	1.10	43.7	90.5	3.41e-10
0.96	30	22775	1.04	119.6	243.2	1.60e-9

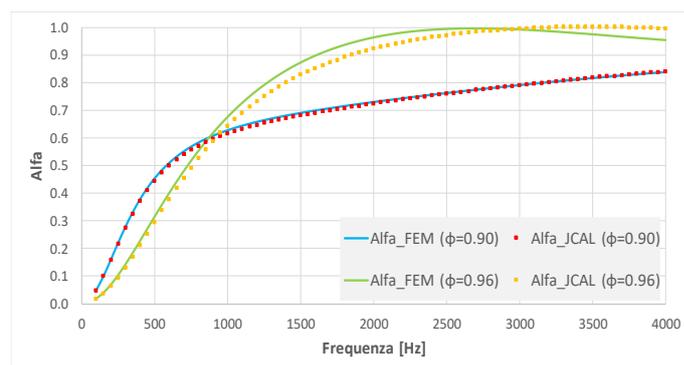


Figura 2 - Esempio di collocazione nel testo di una figura con didascalia lunga. È necessario che i caratteri eventualmente presenti all'interno di grafici e figure siano ben leggibili.

4. Conclusioni

Con il presente articolo si è mostrato come sia possibile simulare agli elementi finiti la microstruttura di un materiale fibroso e calcolarne direttamente le proprietà acustiche come ad esempio la curva di assorbimento acustico. L'indagine è stata effettuata su una geometria semplice e bidimensionale (fibre parallele a distribuzione random) che può essere poi complicata a piacere, anche in 3D. Poiché i tempi di simulazione di geometrie complesse possono risultare molto elevati, si è indagata una seconda possibilità attraverso simulazioni FEM più semplici: vengono calcolati da simulazioni multifisiche stazionarie molto più veloci i parametri fisici da cui il modello di fluido equivalente di JCAL dipende, e con questo si calcolano le prestazioni acustiche del materiale; il secondo approccio risulta più rapido ed utilizzabile anche per geometrie più complesse. I risultati hanno mostrato una ottima correlazione tra i risultati dei due metodi, ad eccezione di alcune differenze alle alte frequenze che saranno indagate in futuro con la determinazione diretta del parametro k'_0 attraverso simulazioni FEM termiche.

5. Bibliografia

- [1] Červenka M., Bednařík M., Tomasz G. Zieliński T.G., *Direct numerical simulation of sound absorption in porous media*, Euronoise 2018, Crete
- [2] Luu H.T., Perrot C., Monchiet V., Panneton R., *Three-dimensional reconstruction of a random fibrous medium: Geometry, transport, and sound absorbing properties*, J. Acoust. Soc. Am. 141, 4768 (2017)
- [3] Lafarge D., Lemarinier P., Allard J.F., Tarnow V., *Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies*, J. Acoust. Soc. Am. 102, 1995–2006 (1997).
- [4] Umnova O., Siklauri D., Venegas R., *Effect of boundary slip on the acoustical properties of microfibrillar materials*. J Acoust Soc Am 126(4):1850–61(2009).
- [5] Tarnow V., *Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials*, J Acoust Soc Am 100(6), 3706–13 (1996).
- [6] Tamayol A, Bahrami M., *Parallel flow through ordered fibers: an analytical approach*, J Fluids Eng 132 (11):114502-2 (2010)