A XII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională
*"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti"*,
SEBEŞ, 2012

# ABSORBŢIA SONORĂ A MATERIALELOR DIN AŞCHII DE LEMN CIMENTATE

Călin Vasile LUMEI, Mariana ARGHIR

## SOUND ABSORBTION OF CONCRETED-WOOD MATERIALS

This paper presents sound absorption measurements for a cemented wood-fibber material. An acoustical model is presented in order to determine physical properties like porosity, airflow resistivity and tortuosity. An inverse acoustical characterization is used by best-fitting the model function to the experimental data with the least squares method. The inversion method contains an optimization process and hence it is verified that the optimal unknown parameters, even though derived from a mathematical optimum for a given experimental configuration (sample's thickness, measured frequency range), are the intrinsic properties of the characterized porous material.

Cuvinte cheie: impedanţa acustică, absorbţie sonoră, model matematic
Keywords: acoustic impedance, sound absorption mathematical model

### 1. Introducere

În această lucrare sunt prezentate proprietăţile acustice ale unui material compozit din aşchii de lemn cimentate. Materialul, utilizat la realizarea panourilor pentru protecţie împotriva zgomotului de pe autostrăzi este compus din aşchii de lemn (suprafaţa medie de 1 $cm^2$) mineralizate legate cu ciment. S-au realizat măsurători ale coeficientului de absorbţie sonoră pe o probă decupată dintr-un panou fonoabsorbant pentru autostrăzi, panou cu o vechime de 10 ani.

Pentru a determina coeficientul de absorbţie sonoră pe cale analitică este prezentat un model matematic preluat din literatura de specialitate [1]. Modelele matematice formulate în funcţie de proprietăţile fizice ale mediului (porozitatea, rezistenţa la trecerea aerului etc.) sunt avantajoase deoarece aceşti parametrii sunt măsurabili şi practic pot fi folosiţi pentru a interpreta rezultatele experimentale. În această lucrare aceşti parametrii vor fi determinaţi pe cale analitică.

Sunt prezentate rezultate experimentale (măsurători ale coeficientului de absorbţie) care sunt folosite pentru a adapta modelul teoretic.

## 2. Modelul matematic

Obiectivul acestei lucrări constă în aflarea unui model matematic cu ajutorul căruia se poate determina coeficientul de absorbţie sonoră pentru materialul propus. Coeficientul de absorbţie sonoră se poate calcula analitic dacă sunt cunoscute *constanta de propagare* ***k*** şi *impedanţa caracteristică* $\boldsymbol{Z_c}$ sub formă complexă a materialului.

La nivel macroscopic, materialul poros poate fi înlocuit cu un fluid echivalent având o *densitatea dinamică* $\boldsymbol{\rho(\omega)}$ şi un *modul volumetric dinamic* $\boldsymbol{K(\omega)}$.

Densitatea dinamică care caracterizează efectul vâscos este asociată cu secţiunea "îngustă" a porilor iar modulul volumetric dinamic care caracterizează efectele termice este asociat cu secţiunea „largă" a porilor. Numărul de undă şi impedanţa caracteristică se pot determina conform relaţiilor (1) şi (2).

$$k = -i\omega\sqrt{K/\rho} \tag{1}$$

$$Z_c = \sqrt{K\rho}/\Omega \tag{2}$$

unde $\omega$, $\Omega$ sunt viteza unghiulară respectiv porozitatea materialului, iar $i = \sqrt{-1}$.

Odată ce sunt determinate numărul de undă şi impedanţa caracteristică a materialului, se pot calcula coeficientul de reflexie *(R)* şi cel de absorbţie sonoră *(α)* conform relaţiilor (3) şi (4).

$$\mathrm{R} = \left(\mathrm{Z_c}/\mathrm{Z_0} - 1\right)/\left(\mathrm{Z_c}/\mathrm{Z_0} + 1\right) \tag{3}$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \tag{4}$$

unde $Z_o$ este impedanţa aerului.

Datorită faptului că materialele acustice au o geometrie complexă a porilor, primele modele care au descris propagarea sunetului au presupus o formă cilindrică a porilor. Un model exact pentru aceste materiale cu o formă complexă a porilor este aproape imposibil de formulat. Acestea se mai numesc şi modele fenomenologice.

Modelul microstructural generalizat aplicabil materialului propus în această lucrare are cinci parametrii necunoscuţi: porozitatea, rezistenţa la trecerea aerului, tortuozitatea[1] şi doi factori de structură. Primii trei sunt parametrii fizici direct măsurabili. Cei doi factori de structură sunt parametrii ajustabili.

Conform acestui model [1], densitatea dinamică $\rho(\omega)$ şi modulul volumetric dinamic sunt date de relaţiile:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty - (i\sigma\Omega / \omega) F(\lambda_\rho) \tag{5}$$

şi

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left( 1 + \frac{2(\gamma - 1)}{N_{pr}^{0.5} \lambda_k \sqrt{-i}} T\left( N_{pr}^{0.5} \lambda_k \sqrt{-i} \right) \right)^{-1} \tag{6}$$

unde $\rho_0$, $\alpha_\infty$, $\sigma$ sunt densitatea aerului, tortuozitatea respectiv rezistenţa la trecerea aerului, iar $\gamma$, $P_0$ şi $N_{pr}$ sunt căldura specifică (~1,4), presiunea atmosferică (1 atm) respectiv numărul Prandtl (~0,77).

Variabila $F(\lambda_\rho)$ este dată de:

$$F(\lambda_\rho) = -\frac{1}{4} \frac{\lambda_\rho \sqrt{-i}\, T\left(\lambda_\rho \sqrt{-i}\right)}{\left[1 - 2T\left(\lambda_\rho \sqrt{-i}\right) / \lambda_\rho \sqrt{-i}\right]} \tag{7}$$

unde

$$T(\zeta) = J_1(\zeta) / J_0(\zeta) \tag{8}$$

---

[1] **TORTUOZITÁTE** *s.f.* Stare a ceea ce este tortuos; întortochere, răsucire. ♦ Caracteristică a unor rețele de canale capilare din masa rocilor de a prezenta sinuozități și întortocheri. [Pron. *-tu-o-*. / cf. fr. *tortuosité*].

este raportul dintre funcţiile Bassel de ordinul întâi şi zero.

Mărimile adimensionale $\lambda_\rho$ şi $\lambda_k$ sunt date de relaţiile:

$$\lambda_\rho = S_\rho \left(8\alpha_\infty \rho_0 \omega / \sigma\Omega\right)^{0.5} \tag{9}$$

şi

$$\lambda_k = S_k \left(8\alpha_\infty \rho_0 \omega / \sigma\Omega\right)^{0.5} \tag{10}$$

unde $S_\rho$ şi $S_k$ sunt cei doi factori de structură reprezentând dependenţa de vâscozitate şi cea termică a materialului poros.

### 3. Măsurători de laborator

Determinarea coeficientului de absorbţie sonoră al materialelor acustice considerate s-a realizat cu ajutorul unui tub de impedanţă (figura 1) conform unei metode standardizate [2].

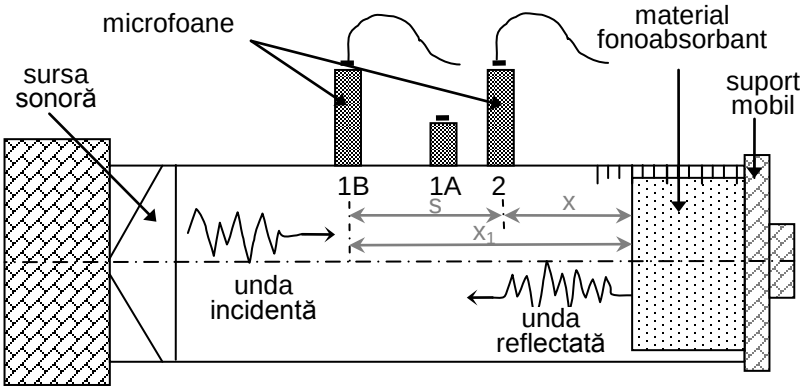


Fig. 1 Schema tubului de impedanţă

Acest aparat de măsurare a coeficientului de absorbție sonoră este compus dintr-un tub care are la un capăt un suport mobil pe care este montată proba, iar la celalalt capăt sursa sonoră. Două microfoane identice pentru măsurarea presiunii sonore se montează în trei poziții de-a lungul tubului (1A, 1B, 2). Gama de frecvenţe pentru care rezultatele măsurătorilor sunt reale (pentru acest tub de impedanţă) este cuprinsă între 100 – 2000 Hz.

Echipamentul pentru procesarea semnalului este compus dintr-un amplificator și un sistem de analiză Fourier. Pentru determinarea coeficientului de absorbție sonoră se folosește metoda funcției de

transfer (ISO 10534-2:1996) [2]. Această metodă se bazează pe faptul că factorul de reflexie sonoră R se poate determina cu ajutorul funcției de transfer dintre cele două microfoane, după care se calculează coeficientul de absorbţie sonoră în funcţie de frecvenţă.

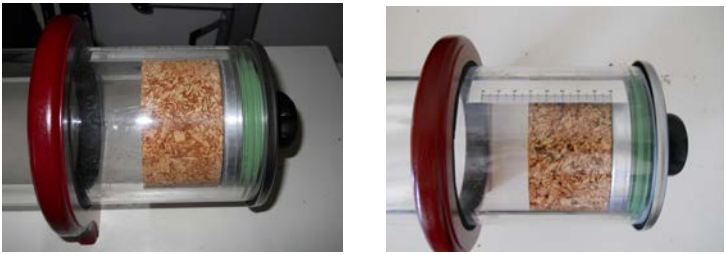

Fig. 2 Probele din aşchii de lemn cimentate

Măsurătorile s-au efectuat pe două probe din aşchii de lemn cimentate (figura 2) având o grosime de 50 mm, după care s-a calculat media coeficientului de absorbţie sonoră.

În figura 3 este reprezentată grafic media coeficientul de absorbţie sonoră a materialului din aşchii de lemn cimentate.

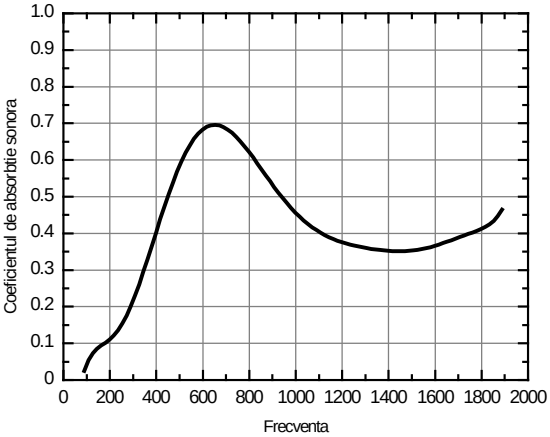


Fig. 3

Curba de absorbţie sonoră

## 4. Ajustarea modelului matematic

Obiectivul acestei lucrări constă în ajustarea parametrilor necunoscuţi ai modelului matematic pentru a obţine o simulare cât mai

precisă a curbei de absorbţie. Funcţia model se fitează[2] la datele obţinute experimental.

Se consideră un set de puncte ***M***, ***(x1,α1)***, ***(x2,α2)*** … ***(xi,αi)***, unde ***xi (i = 1,...n)*** reprezentând variabila independentă este frecvenţa şi **αi** reprezentând variabila dependentă, este coeficientul de absorbţie sonoră. Funcţia model este de forma ***α = f(x, a)***, unde ***a*** este un vector cu ***p*** parametrii (ex. porozitatea, tortuozitatea etc.).

Valorile parametrilor necunoscuţi ai funcţiei model (prezentate în secţiunea a doua) se determină prin fitarea la rezultatele experimentale. În funcţia model, pe lângă cei doi parametrii necunoscuţi, factorii de structură, s-au adăugat şi porozitatea, rezistenţa la trecerea aerului şi tortuozitatea.

Se aplică metoda celor mai mici pătrate [3]. Funcţia model este optimă când suma (***S***) pătratelor reziduurilor este minimă.

$$S = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 \tag{11}$$

Reziduurile (erorile) $r_i$ reprezintă diferenţa dintre valorile dependentei variabile măsurate şi valorile teoretice.

$$r_i = \alpha_i - f\left(x_i, a\right) \tag{12}$$

Definind vectorul parametric $a = \{\Omega, \sigma, \alpha_\infty, S_\rho, S_k\}$, curba fitată (***R***) a funcţiei model devine minimul sumei ***S***, unde exponenţii ***c*** şi ***m*** marchează absorbţia calculată respectiv cea măsurată.

$$R(a) = \min \sum_{i=1}^{n} \left| \alpha_i^c\left(a\right) - \alpha_i^m \right|^2 \tag{13}$$

Următoarele restricţii sunt impuse la calcularea vectorului parametric ***a***:

$$\begin{cases} R\left(a\right) \to 0 \\ LI \le a \le LS \end{cases} \tag{14}$$

---

[2] **A fita, fitare** – determinarea coeficienților unei funcții matematice alese, astfel încât aceasta să aproximeze cât mai bine (funcție de aproximarea aleasă) un set de date experimentale.

unde ***LI*** şi ***LS*** reprezintă limita inferioară respectiv limita superioară a domeniului de calcul pentru fiecare parametru necunoscut.

În figura 4 sunt reprezentaţi grafic coeficienţii de absorbţie sonoră rezultaţi în urma măsurătorilor (stea) şi pe cale teoretică (linie continuă).

În urma fitării modelului matematic la rezultatele experimentale au rezultat următoarele valori pentru parametrii necunoscuţi ai modelului acustic: porozitate → 0.34; rezistenţa la trecerea aerului → 96100 Pa·s·m$^{-2}$; tortuozitate → 1.89; factorii de structură $S_\rho$ → 1.36 şi $S_k$ → 1.53.

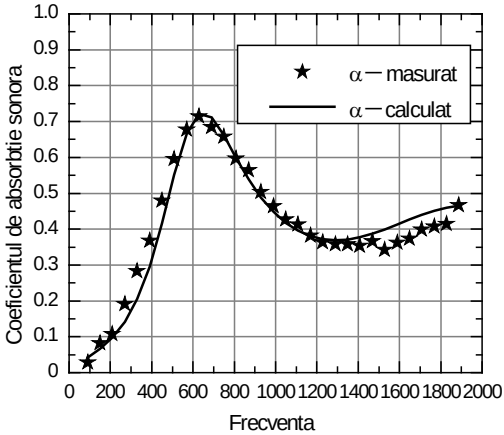


Fig. 4 Curba de absorbţie sonoră ($\alpha^c$ şi $\alpha^m$)

## 5. Concluzii

■ S-au realizat măsurători ale coeficientului de absorbţie sonoră pentru un material fonoabsorbant fabricat din aşchii de lemn cimentate. Este prezentat un model matematic pentru determinarea coeficientului de absorbţie sonoră.

■ Utilizând metoda celor mai mici pătrate, s-a realizat o fitare a modelului matematic la rezultatele experimentale pentru a determina parametrii necunoscuţi ai modelului matematic.

■ Au rezultat valori reale ale parametrilor fitaţi. Materialele fabricate din aşchii de lemn cimentate au în general o porozitate cuprinsă între 0,5 – 0,6; porozitatea rezultată este de 0,34 aceasta fiind mai mică decât normal ţinând cont de faptul că panoul fonoabsorbant a fost expus timp de 10 ani la intemperii, porii materialului astupându-se cu diverse particule de praf și deşeuri ale traficului rutier.

■ Această lucrare demonstrează ca tehnica folosită, metoda celor mai mici pătrate poate fi folosită pentru a estima parametrii fizici măsurabili ai materialului acustic propus.

**NOTĂ**: Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul "Studii doctorale în ştiinţe inginereşti în scopul dezvoltării societăţii bazate pe cunoaştere - SIDOC ", contract: POSDRU/88/1.5/S/60078, proiect cofinanţat din Fondul Social European prin Programul Operaţional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

**BIBLIOGRAFIE**

[1] Champoux, Y., ş.a*., On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors*, J. Acoust. Soc. Am. Volume 92, Issue 2, pp. 1120-1131, 1992.
[2] * * * ISO 10354-2, *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes* – Part 2: transfer-function method, 1996.
[3] * * * http://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares.

Drd. Ing. Călin Vasile LUMEI
Prof. Dr. Ing. Mariana ARGHIR
Facultatea de Construcţii de Maşini,
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca,
e-mail: calinlumei@yahoo.com, marianananaarghir@yahoo.com,
telefon: 0264 401759, 0264 401657
membri AGIR