

Corelații între atenuarea acustică a fațadelor clădirilor și permeabilitatea la aer a acestora. Aspecte teoretice.

Correlations between the sound transmission loss of building façades and their air permeability. Theoretical aspects.

Vlad Iordache¹, Florin Iordache¹

¹Centrul de Cercetare CAMBI, Facultatea de Inginerie a Instalațiilor, Universitatea Tehnică de Construcții București, Romania

email : viordach@yahoo.com

Rezumat

Lucrarea își propune să stabilească o corelație teoretică între numărul de schimburi de aer pe oră dintr-o clădire și gradul de izolare acustică al fațadei clădirii. Forma stabilită pe fundamente teoretice, a corelației dintre cei doi parametri, necesită calibrarea experimentală a doi coeficienți din acest model teoretic. Aceasta corelația analitică dintre rata de infiltrații și gradul de izolare acustică a fațadei oferă posibilitatea stabilirii unei proceduri indirecte, foarte ușor de aplicat practic, pentru a identifica permeabilitatea aerului clădirii. În această lucrare, aspectele teoretice sunt prezentate în detaliu, iar în final modelul matematic obținut sunt analizat comparativ cu rezultate experimentale. Rezultatele experimentale sunt utilizate în vederea calibrării relației teoretice.

Cuvinte cheie: *Permeabilitatea la aer a clădirilor, modelare fizică, corelație permeabilitate - zgomot aerian*

Abstract

The paper aims to establish a theoretical correlation between the number of air exchanges per hour of a building due to outdoor air infiltration and the sound transmission loss of the building façade. The theoretically established form of the correlation involves two parameters whose values requires experimental calibration. The analytical correlation between the infiltration rate and the sound transmission loss of a facade element offers the possibility of establishing an indirect procedure, very easy to apply practically, to identify the building air permeability. In this paper, the theoretical aspects are presented in detail, and in the end the results obtained are analyzed compared to the experimental results. The experimental results are used to calibrate the theoretical relationship.

Keywords: *building airtightness, physical modelling, correlation permeability – sound transmission loss.*

Nomenclatura

- R – indice de izolare acustică, dB;
- R_{PE} – indicele de izolare acustică al peretelui, dB;
- R_{FE} – indice de izolare acustică al ferestrei. dB;
- R_{rost} – indice izolare acustică al rostului de infiltrații, dB;
- S – suprafața, m^2 ;
- S_{PE} – suprafață perete, m^2 ;
- S_{FE} – suprafață fereastră, m^2 ;
- S_{rost} – suprafață rost infiltrații, m^2 ;
- V – volumul incintei, m^3 ;
- Tr – timpul de reverberație, s;
- Db – diferența între nivelul zgomotului exterior și cel interior (izolare brută), dB;
- ρ_v – masa volumică (densitate) material, kg/m^3 ;
- ρ_s – masa superficială material, kg/m^2 ;
- $\rho_{s1,2}$ – masa superficială a vitrajelor din cadrul unei ferestre dublavitraj, kg/m^2 ;
- ρ_{aer} – masa volumică (densitate) a aerului, kg/m^3 ;
- c_0 – viteza de propagare a undei sonore în aer, m/s;
- δ – grosime strat, m;
- d – grosimea stratului de aer din componenta ferestrelor dublavitraj, m;
- f – frecvența, Hz;
- S_j – ariile geometrice ale suprafețelor perimetrice ale încăperii, m^2 ;
- α_j – coeficienții de absorbție ai suprafețelor perimetrice ale încăperii, -;
- Δp – diferența de presiune exterior-interior (Pa);
- G – debitul de aer infiltrat (m^3/h);
- C – coeficient de permeabilitate funcție de suprafața de rost de infiltrații $((m^3/h) \cdot (Pa)^{-n})$;
- n – exponentul din legea de permeabilitate, depinde de tipul curgerii; (curgere turbulentă $n = 0.5$, curgere laminară $n = 1.0$ (eventual se poate lucra cu $n = 0,7$), -;
- n_a – numărul de schimburi de aer al spațiului delimitat de mediul exterior de elemente de închidere la care ne referim, $1/h$;
- C_d – coeficient de pierdere de sarcină funcție de forma rostului = 0.61, -;
- ρ_{st} – densitatea standard a aerului = $1,2 kg/m^3$;
- k – indice al stratului din compoziția peretelui, -;

1. Introducere

Permeabilitatea la aer a clădirilor are o influență majoră asupra consumului de căldură al clădirii, a calității aerului interior, a confortului acustic și în general asupra calității mediului interior. De aceea determinarea cu precizie a permeabilității la aer a

Corelații între atenuarea acustică a fațadelor clădirilor și permeabilitatea la aer a acestora. Aspecte teoretice unei clădiri reprezintă o etapă esențială în proiectarea instalațiilor și echipamentelor ce asigură confortul interior precum și în controlul funcționării acestora.

Modelele fizice pentru calculul permeabilității la aer a clădirilor, existente în literatură [1], [2], [3], sunt caracterizate de erori medii de aproximativ 20-25% și de erori maxime de aproximativ 150%. Astfel de erori nu sunt acceptabile tocmai pentru un parametru care influențează atât de mult dimensionarea instalațiilor, consumurile energetice și de calitatea a aerului interior.

Metodele experimentale (metoda descreșterii concentrației și metoda suprapresiunii) [4] suplinesc acest dezavantaj al modelelor de calcul, fiind caracterizate de erori de maxim 5% [5]. Totuși dificultatea de realizare a acestora (măsurările sunt influențate de parametrii climatici, standuri experimentale dificil de montat) precum și prețul de achiziție al acestor standuri fac ca aplicabilitatea acestora pentru studii de certificare energetică sau de calitate a aerului interior să fie redusă. Aceste standuri experimentale sunt în general folosite pentru verificarea condițiilor de case pasive energetice.

În ultimii ani a fost dezvoltată o noua metodă experimentală de determinare a permeabilității la aer a unei clădiri, metodă bazată pe legătura între gradul de izolare acustică oferit de tâmplăria fațadelor exterioare ale unei clădiri și permeabilitatea sa la aer [6] și dezvoltări ulterioare ale acestei teorii [7], [8]. Cu cât gradul de atenuare acustică este mai mare cu atât debitul de aer infiltrat în clădire este mai scăzut și invers, cu cât gradul de atenuare acustică este mai scăzut cu atât debitul de aer infiltrat este mai mare.

În lucrarea de față vom continua dezvoltarea acestei noi direcții de cercetare și ne propunem să stabilim o legătură de natură deterministă între cei doi parametri: numărul de schimburi de aer datorat infiltrațiilor și indicele de izolare acustică al elementelor de închidere ale spațiilor clădirii. Mai mult, vom testa relația de natură teoretică pe datele experimentale stabilite experimental în [6], în vederea identificării posibilităților de calibrare a relației teoretice, având în vedere o serie de aspecte particulare situației de conformare a elementelor de închidere existente efectiv în cadrul testelor efectuate.

2. Modelarea fizică a legăturii dintre permeabilitatea la aer a unei fațade și indicele său de izolare acustică

În ceea ce privește partea acustică se cunosc o serie de relații specifice evaluării gradului de izolare acustică oferit de componente de bază din cadrul elementelor de închidere ale spațiilor interioare [9], [10], [11]. Astfel cele două componente de bază ale elementelor de închidere sunt pereții exteriori și ferestrele exterioare. Ambele

componente au diverse structuri. Pereții exteriori sunt de tip stratificat, grosimile și proprietățile fizice ale materialelor din care sunt alcătuite straturile au consecințe directe asupra gradului de izolare acustică a peretelui.

Astfel pentru peretele exterior care este un element compus din mai multe straturi, evaluarea indicelui de izolare acustică, R , se stabilește [11] cu relația

$$R = 10 \cdot \log_{10} \left[1 + \left(\frac{2\pi f \cdot \rho_s}{3.6 \cdot \rho_{aer} \cdot c_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Peretele exterior reprezintă un element multistrat pentru care densitatea superficială ρ_s , se calculează ca sumă a maselor superficiale ale straturilor din component peretelui:

$$\rho_s = \sum_{k=1}^n \rho_{Sk} = \sum_{k=1}^n \delta_k \cdot \rho_{Vk} \quad (2)$$

Ferestrele de asemenea în funcție de tipul lor (vechi de lemn simple, duble sau cuplate, noi de tip termoizolant cu rame de aluminiu, pvc sau lemn și cu două sau trei foi de elemente transparente) sunt caracterizate de indici de izolare acustică diferiți. Ferestrele, ca și pereții, din punct de vedere acustic, sunt elemente de închidere compuse în sensul că sunt formate din mai multe straturi inseriate. Modul de calcul al indicelui de izolare acustică pentru ferestre [11] se realizează cu ajutorul relației :

$$R = 10 \cdot \log_{10} \left\{ 1 + \left[\frac{2\pi f \cdot (\rho_{s1} + \rho_{s2})}{3.6 \cdot \rho_{aer} \cdot c_0} - \frac{(2\pi f)^2 \cdot \rho_{s1} \cdot \rho_{s2}}{(3.6 \cdot \rho_{aer} \cdot c_0)^2} \cdot 2 \frac{2\pi f}{c_0} d \right]^2 \right\} \quad (3)$$

Elementul de închidere, fațada, se compune din unul sau două tipuri de pereți exteriori și unul sau două tipuri de ferestre. Pe lângă cele două categorii de componente menționate, din punct de vedere acustic mai apare o componentă : rosturile dintre elementele fixe și cele mobile ale ferestrelor sau chiar dintre peretele exterior și rama fixă a ferestrei. Relația de calcul care permite evaluarea indicelui de izolare acustică pentru un întreg element de închidere alcătuit din perete, fereastră și rost este :

$$R = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{S_{PE} + S_{FE} + S_{rost}}{10^{-\frac{R_{PE}}{10}} \cdot S_{PE} + 10^{-\frac{R_{FE}}{10}} \cdot S_{FE} + 10^{-\frac{R_{rost}}{10}} \cdot S_{rost}} \right] \quad (4)$$

Corelații între atenuarea acustică a fațadelor clădirilor și permeabilitatea la aer a acestora. Aspecte teoretice

În relația (4), pentru rost, s-a utilizat indicele “_{rost}”. Indicele de atenuare acustică aferent rostului are valoarea $R_{rost} = 0$, [11]. Din relația (4) se observă că indicele de izolare acustică al întregii fațade depinde de indicii de izolare acustică și de suprafețele componentelor fațadei. Dat fiind interesul deosebit în cadrul acestei cercetări pentru identificarea rosturilor din elementele de închidere și deci din cadrul ferestrelor și a efectelor acestora în permeabilitatea la aer, s-a făcut o analiză a indicelui de atenuare acustic conform relației (4).

Identificarea suprafeței rostului, S_{rost} , are la baza posibilitatea experimentală de evaluare a indicelui de izolare acustică al elementului de fațadă în ansamblul sau, relația cu caracter practic utilizată fiind :

$$R_{fatada} = L_e - L_i - 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{0,161 \cdot V}{(S_{PE} + S_{FE} + S_{rost}) \cdot T_r} \right] \quad (5)$$

Egalând relațiile (4) cu (5) și ținând cont că $R_{rost} = 0$, se obține :

$$S_{rost} = \frac{0,161 \cdot V}{T_r} \cdot 10^{-\frac{L_e - L_i}{10}} - \left(S_{PE} \cdot 10^{-\frac{R_{PE}}{10}} + S_{FE} \cdot 10^{-\frac{R_{FE}}{10}} \right) \quad (6)$$

Durata de reverberație, Tr , fie se determină experimental, fie se stabilește cu ajutorul formulei lui Sabine (relația (7)), unde aria de absorbție, A , a camerei reprezintă suma produselor dintre suprafețele geometrice de la interior, S_j , și coeficienții lor de absorbție, α_j .

$$Tr = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (7)$$

$$A = \sum_{j=1}^m S_j \cdot \alpha_j$$

Suprafața rostului existent este elementul esențial de legătură între partea acustică și partea de permeabilitate la aer a elementului de închidere, deoarece prin aceeași suprafață de rost are loc și transferul de energie sonoră și transferul de aer. Astfel, din punct de vedere al transferului de aer, debitul de aer infiltrat, G , se stabilește cu o relație de tipul unei legi de permeabilitate:

$$G = C \cdot \Delta p^n \quad (8)$$

Coeficientului de permeabilitate, C , poate fi exprimat funcție de suprafața de rost, S_{rost} , prin intermediul coeficientului de pierderi de sarcină, C_d , a densității aerului,

ρ_{aer} și a exponentului n din legea de permeabilitate care ia valori de regulă între 0,5 și 1,0 funcție de regimul de curgere : turbulent sau respectiv laminar [12].

$$C = C_d \cdot \left(\frac{2}{\rho_{aer}} \right)^n \cdot S_{rost} = C_d \cdot 1,667^n \cdot S_{rost} \quad (9)$$

Prin înlocuirea coeficientului de permeabilitate în ecuația (8) se obține o relație de legătură între debitul de aer ce traversează rostul, G , și secțiunea rostului, S_{rost} . Acest transfer de aer este diferit funcție de diferența de presiune care generează aceste infiltrații, Δp , (relația (10)). Rata de infiltrații, n_a , se calculează ca raport între debitul de aer și volumul încăperii (relația (11)).

$$G = C_d \cdot 1,667^n \cdot S_{rost} \cdot \Delta p^n \quad (10)$$

$$n_a = \frac{G}{V} = \frac{C_d}{V} \cdot S_{rost} \cdot 1,667^n \cdot \Delta p^n \quad (11)$$

Înlocuind expresia acustică a suprafeței rostului (relația (6)) în relația (11) a numărului de schimburi de aer, n_a , se obține relația de legătură între rata de infiltrații, n_a , și parametrii acustici ai clădirii. Iar prin înmulțire cu 3600 se obține ca unitate de măsură a ratei de infiltrații (l/h) (relația (12)).

$$n_a = 3600 \cdot C_d \cdot 1,667^n \cdot \Delta p^n \cdot \left(\frac{10^{-\frac{L_e-L_i}{10}} \cdot 0,161}{T_r} - \frac{10^{-\frac{R_{PE}}{10}} \cdot S_{PE} + 10^{-\frac{R_{FE}}{10}} \cdot S_{FE}}{V} \right) \quad (12)$$

Se observă ca structura relației (12) este :

$$n_a = 3600 \cdot C_d \cdot 1,667^n \cdot \Delta p^n \cdot (T_E - T_C)$$

unde :

$$T_E = \frac{10^{-\frac{L_e-L_i}{10}} \cdot 0,161}{T_r} \quad (13)$$

$$T_C = \frac{10^{-\frac{R_{PE}}{10}} \cdot S_{PE} + 10^{-\frac{R_{FE}}{10}} \cdot S_{FE}}{V}$$

Astfel n_a se exprimă funcție de : (1) termeni aferenți permeabilității (în fața parantezei) și (2) grupul de termeni aferenți părții acustice (în interiorul parantezei). În

interiorul parantezei, primul termen, T_E , este un termen experimental, care presupune prelevarea experimentală a gradului de atenuare acustică, L_e-L_i și a timpului de reverberație, Tr , al camerei analizate. Cel de al doilea termen, T_C , este un termen ce depinde de configurarea spațiului interior și de tipul fațadei, care presupune cunoașterea volumului spațiului, V și a indicilor de izolare acustică, R_{FE} , R_{PE} și suprafețelor, S_{FE} , S_{PE} , pentru componentele fațadei. În grupul de parametri aferenți părții de permeabilitate, $3600 \cdot C_d \cdot 1,667^n \cdot \Delta p^n$, diferența de presiune între exterior și interior este de regulă 4 Pa (media anuală a diferenței de presiune între exteriorul și interiorul clădirilor), iar coeficientul de pierderi de sarcină, C_d , și exponentul, n , sunt cei care vor fi experimental stabiliți în vederea calibrării relației (13).

3. Studiu experimental

Experimental, acustic, prelevăm valorile parametrilor, L_e , L_i și Tr , fără să calibrăm vreun alt parametru. Pe parte de permeabilitate $\Delta p = 4$ Pa, iar calibrarea experimentală a modelului teoretic reprezentat de relația (12) presupune stabilirea parametrilor C_d și n , corespunzătoare unei anumite camere, astfel încât curba teoretică să reprezinte o aproximare optimă a rezultatelor experimentale (minimizarea estimatorului celor mai mici pătrate). Această calibrare a fost realizată pe baza măsurărilor acustice realizate în cadrul unui alt studiu [6]. Astfel, dimensiunile camerei experimentale sunt: 7,2m x 6,8m și înălțimea de 3,95 m, conducând la un volum de 195 m³. Timpul de reverberație al camerei este $Tr=1,25$ (s). Fațada este caracterizată prin două tipuri de parametri: suprafețele de perete și de fereastră ($S_{PE}=19,44$ m², $S_{FE}=4,41$ m²) și indicii de izolare acustică ai celor două elemente de fațadă ($R_{PE}=58$ dB, $R_{FE}=35$ dB). Astfel calibrarea experimentală a modelului constă în determinarea prin metoda celor mai mici pătrate a cuplului parametrilor (C_d , n). S-au obținut : $C_d = 0,7852$ și $n = 0,5684$.

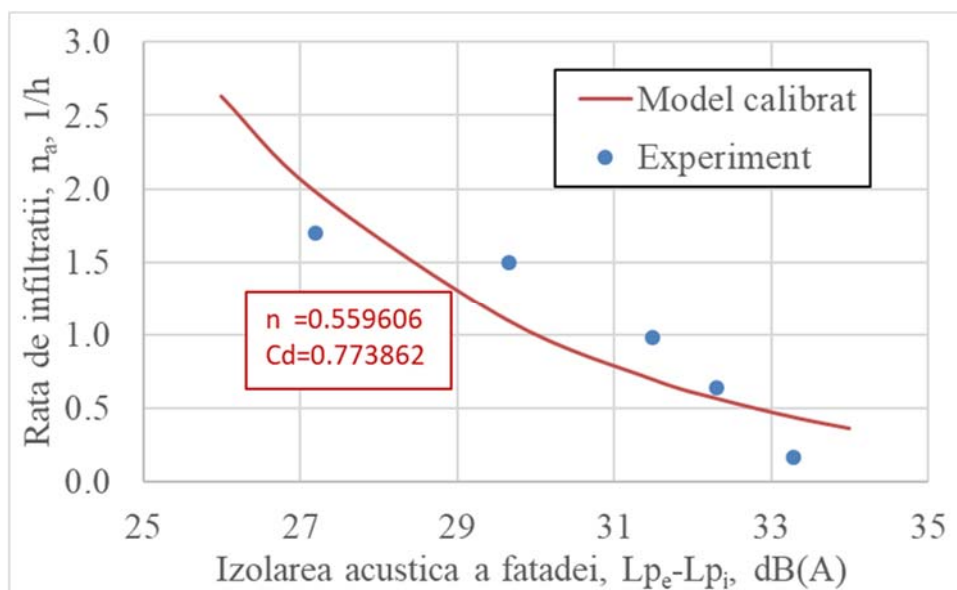


Figura 1. Calibrarea modelului teoretic pe baza datelor experimentale

Remarcăm faptul ca relația teoretică (relația (12)) poate fi calibrată experimental pentru diverse tipuri de ferestre (simple, duble, triple, dublulvitraj, tripluvitraj și altele) și pentru diferite suprafețe ale acestora în fațada clădirii. Se oferă astfel posibilitatea în viitor a evaluării mai rapide, pe baze acustice a permeabilității clădirii. Acest aspect va fi urmărit și dezvoltat în cadrul unui proiect de cercetare în curs de desfășurare.

4. Concluzii

Obiectivul acestui studiu este stabilirea unei expresii teoretice pentru corelația între numărul de schimburi de aer infiltrat de la exterior spre interiorul clădirii și gradul de izolare acustică aferent aceleiași fațade a clădirii. Stabilirea acestei corelații reprezentate de relația (12) se datorează faptului că atât în expresia gradului de atenuare acustică a unei fațade cât și în expresia debitului de aer infiltrat se găsește suprafața rosturilor din fațada clădirii.

Aceasta expresie teoretică, relația (12), ține seama de :

- (a) indicii de izolare acustică și suprafețele aferente ferestrelor și elementelor opace de închidere ale fațadei clădirii;
 - (b) volumul camerei analizate experimental;
 - (c) timpul de reverberație și bineînțeles de
 - (d) valorile celor doi parametri care trebuie calibrați experimental (C_d și n).
- Intervine de asemenea

Corelații între atenuarea acustică a fațadelor clădirilor și permeabilitatea la aer a acestora. Aspecte teoretice

(e) diferența de presiune dintre exterior și interior, care de regulă este de 4 Pa.

Expresia teoretică atestă o formă concavă a funcției de corelație dintre numărul de schimburi de aer și gradul de atenuare acustică.

Stabilirea unei astfel de corelații analitice între numărul de schimburi de aer și gradul de atenuare acustică oferă posibilitatea stabilirii unei proceduri indirecte, destul de ușor de aplicat practic, pentru identificarea permeabilității clădirilor.

Acest demers este încurajator pentru se pune în evidență posibilitatea descrierii acestui fenomen printr-o relație matematică de tip fenomenologic, care oferă avantajul că poate fi adaptată funcție de tipul de perete, de fereastră, de timpul de reverberație interior și de alți parametri. Astfel se poate construi o nomogramă ca unealtă de calcul adaptabilă pentru diferite tipuri de încălziri/camere.

Odată validat acest demers matematic, remarcăm noi direcții de îmbunătățire a acestei relații de legătură între cele două fenomene fie prin adoptarea unei legi de permeabilitate mai complexe [13] fie prin studii de sensibilitate a acestui model relativ la parametrii sau coeficienți din interiorul modelului.

Recunoașteri

Acest studiu a fost susținut de Autoritatea Națională Română pentru Cercetare Științifică și Inovare CNCS/CCCDI – UEFISCDI, prin proiectul de cercetare PN-III-P2-2.1-PED-2016-1951, în cadrul PNCDI III.

Bibliografie

- [1] J. McWilliams and M. Jung, "Development of a mathematical air-leakage model," Report LBNL-59041. Berkley, CA, 47pp, 2006.
- [2] M. Montoya, E. Pastor, F. Carrie, G. Guyot and E. Planas, "Air leakage in Catalan dwellings: developing an airtightness model and leakage airflow predictions," *Building and Environment*, vol. 45, no. 6, 2010.
- [3] W. R. Chan, W. W. Nazaroff, P. N. Price, M. D. Sohn and A. J. Gadgil, "Analyzing a database of residential air leakage in the United States.," *Atmos Environ*, vol. 39, no. 19, 2005.
- [4] EN 13829, "Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method".

- [5] M. Sherman and L. Palmiter, "Uncertainties in fan pressurization measurements.," BL-32115, 1995.
- [6] V. Iordache and T. Catalina, "Acoustic approach for building air permeability estimation," *Building and Environment*, vol. 57, no. pp 18-27, 2012.
- [7] O. Hassan, "An alternative method for evaluating the air tightness of building components," *Building and Environment*, vol. 67, no. pp 82-86, 2013.
- [8] G. Raman, K. Chelliah, M. Prakash and R. Muehleisen, "Detection and quantification of building air infiltration using," Melbourne, Australia, 2014.
- [9] V. Iordache, "Zgomot aerian," în *Protecția la Zgomot. Acustica clădirii și a instalațiilor*, București, Matrixrom, 2007.
- [10] M. Ricci and T. Ricci, *Introducere în acustica arhitecturală*, Ed. Tehnică, 1974.
- [11] L. Marshal, *Architectural acoustics*, Elsevier - Academic Press, 2014.
- [12] H. Awbi, *Ventilation of buildings*, London and New York: Spon Press Taylor & Francis Group, 2003.
- [13] T. Baracu, V. Bădescu, C. Teodosiu, M. Degeratu, M. Pătrașcu and C. Streche, "Consideration of a new extended power law of air infiltration through the building's envelope providing estimations of the leakage area," *Energy and Buildings*, vol. 149, no. pp 400-423, 2017.