

# STUDIUL ANALITIC, NUMERIC ȘI EXPERIMENTAL AL ÎNCOVOIERII UNOR EȘANTIOANE DE PANOU SANDWICH CU FEȚE DIN ALUMINIU ȘI MIEZ DIN POLISTIREN EXTRUDAT

SCARLAT Bogdana<sup>1</sup>, DINU Vlad<sup>1</sup>

Conducători științifici: Prof. dr.ing. Marin Sandu, Prof.dr.ing. Adriana SANDU

**REZUMAT:** Prezenta lucrare are ca obiectiv validarea metodologiei de predimensionare a panourilor sandwich ușoare, pe baza determinărilor experimentale și a simulării numerice cu elemente finite.

Testele de încovoiere în trei puncte au fost efectuate pe o mașină universală de încercat cu sistem de măsurare cu achiziție de date în calculator. Au fost testate eșantioane de tip bara sandwich cu fețe din aluminiu și miez din polistiren extrudat, cu diferite viteze de încărcare.

Buna concordanță a rezultatelor obținute recomandă relațiile de predimensionare pentru a fi utilizate în proiectarea structurilor sandwich cu miez din spumă polimerică.

**CUVINTE CHEIE:** sandwich, test încovoiere, simulare numerică

## 1 INTRODUCERE

Cerințele privind proiectarea unor structuri ușoare și rezistente au condus la utilizarea materialelor compozite, în primul rând în domeniul aviativ. O categorie importantă de substructuri compozite ușoare este cea a panourilor sandwich. Un panou sandwich se obține prin fixarea unor plăci rezistente (fețele) pe un miez din material ușor, mai puțin rezistent. Frecvent miezul este realizat din spume polimerice (figura 1). Panourile sandwich au rigiditate mare la încovoiere și se pot asambla ușor prin lipire cu adezivi structurali sau prin formă.

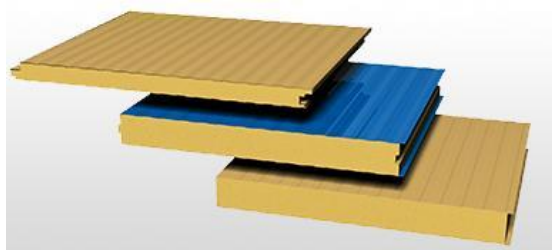


Fig. 1. Panouri sandwich pentru construcții

Panourile sandwich se utilizează în numeroase domenii ingineresti: construcții (pereți și acoperișuri), containere termoizolante, structuri de avioane, vagoane, vehicule, poduri, mobilier etc.

În lucrare se aplică metoda standard de predimensionare la încovoiere cilindrică pentru evaluarea rezistenței și rigidității unui eșantion de panou cu fețe din aluminiu și miez din polistiren extrudat.

<sup>1</sup> Specializarea Ingineria Transporturilor, Facultatea de Transporturi;

E-mail: [bogdana.scarlat@gmail.com](mailto:bogdana.scarlat@gmail.com);

Rezultatele unei analize cu elemente finite sunt comparate cu determinări experimentale.

## 2 CALCUL ANALITIC LA ÎNCOVOIERE CILINDRICĂ PE BAZA MODELULUI DE BARĂ

Acest calcul se bazează pe teoria de bară compozită cu fețe rezistente și miez de rigiditate relativ redusă. Cea mai utilizată schemă de încărcare este prezentată în figura 2. Testul realizat conform acestei scheme este cunoscut sub titulatura de „încovoiere în trei puncte”. Se impune condiția ca distanța între rezazeme  $l$  să fie mai mare decât de trei ori lățimea  $b$  a barei ( $l > 3b$ ). Sarcina totală aplicată este  $F = q \cdot b$ .

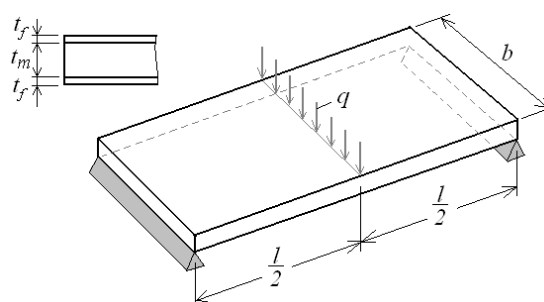


Fig. 2. Schema de încărcare și rezemare

Se propune un set inițial de parametri ai barei compozite și se evaluează comportamentul acesteia cu următoarele relații (Allen H.G., 1969):

- Rigiditatea de încovoiere a barei

$$D = \frac{1}{2} \cdot E_f \cdot t_f \cdot h^2 \cdot b, \quad (1)$$

unde  $E_f$  este modulul de elasticitate longitudinal al materialului fețelor,  $t_f$  - grosimea feței,  $t_m$  - grosimea miezului,  $h = t_f + t_m$  - distanța între suprafețele mediane ale fețelor.

- Rigiditatea de forfecare a miezului

$$S = b \cdot h \cdot G_m, \quad (2)$$

în care  $G_m$  este modulul de forfecare al miezului din polistiren.

- Săgeata maximă a barei compozite

$$\delta_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot D} + \frac{F \cdot l}{4 \cdot S}. \quad (3)$$

Primul termen este datorat încovoierii fețelor iar cel de-al doilea, forfecării miezului.

- Tensiunea maximă de încovoiere în fața barei compozite

$$\sigma_f = \frac{F \cdot l}{4 \cdot h \cdot t_f \cdot b}. \quad (4)$$

- Tensiunea de forfecare a miezului

$$\tau_m = \frac{F}{2 \cdot h \cdot b}. \quad (5)$$

Se impune condiția ca tensiunile calculate cu formulele (4) și (5) să nu depășească valorile admisibile corespunzătoare.

Au fost realizate modele experimentale și au fost efectuate analize cu elemente finite pentru cazul unor bare sandwich cu fețe din aliaj de aluminiu (2024-T3) și miez din polistiren extrudat cu densitate mică ( $30 \text{ kg/m}^3$ ). Au fost efectuate teste și au fost determinate următoarele valori ale parametrilor de material: modulele de elasticitate longitudinale  $E_f = 70000 \text{ MPa}$ ,  $E_m = 12,3 \text{ MPa}$ , coeficienții de contracție transversală  $\nu_f = 0,33$ ,  $\nu_m = 0,2$ , limita de curgere pentru duraluminiu  $\sigma_{c,f} = 240 \text{ MPa}$ , rezistența la rupere pentru polistirenul extrudat  $\sigma_{r,m} = 0,42 \text{ MPa}$  (valoare medie). Pentru determinarea proprietăților miezului, cinci eșantioane de polistiren au fost încercate la încovoiere în trei puncte (fig. 3).

Testele au fost făcute pe o mașină universală de încercat Loyd Instruments LRX plus cu sarcina nominală de 5 kN.

Au fost testate batoane de polistiren cu secțiune dreptunghiulară  $b \times h$  ( $b = 50 \text{ mm}$ ,  $h = 19,5 \text{ mm}$ ) și  $l = 360 \text{ mm}$ . Pentru cinci epruvete încercate a fost înregistrată variația săgeții în funcție de forța aplicată (un exemplu, în fig. 4).

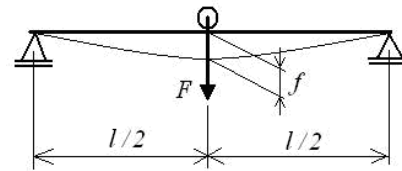


Fig. 3. Schema de testare a polistirenului

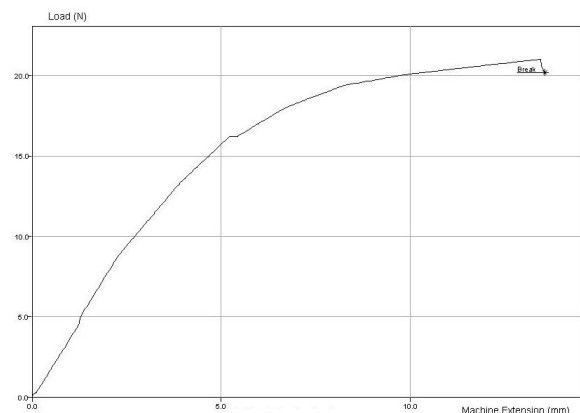


Fig. 4. Dependența forță-săgeată la testarea la încovoiere a unui eșantion de polistiren

Pe baza coordonatelor unui punct din zona liniară a înregistrării se poate deduce o valoare a modulului de elasticitate la încovoiere din relația

$$E_m = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot f}, \quad (I = \frac{b \cdot h^3}{12}) \quad (6)$$

Admițând că în domeniul solicitărilor elastice miezul se comportă ca un material omogen și izotrop s-a calculat modulul de elasticitate transversal

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} = 5,125 \text{ MPa}. \quad (7)$$

S-a considerat o sarcină  $F = 100 \text{ N}$  și următoarele valori pentru parametrii geometrici:  $l = 180 \text{ mm}$ ,  $b = 50 \text{ mm}$ ,  $t_f = 1 \text{ mm}$ ,  $t_m = 19,5 \text{ mm}$ .

Lipirea fețelor pe miez s-a făcut cu adeziv epoxidic universal AW 106 / HV 953 U, cu parametrii elastici  $E_a = 1350 \text{ MPa}$ ,  $\nu_a = 0,45$  și

rezistențele la tracțiune și forfecare  $\sigma_{r,a} = 33$  MPa,  $\tau_{r,a} = 23$  MPa.

Cu aceste date s-au calculat rigiditățile

$$D = \frac{1}{2} E_f t_f h^2 b = 7,354 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}^2,$$

$$S = b \cdot h \cdot G_m = 5253 \text{ N},$$

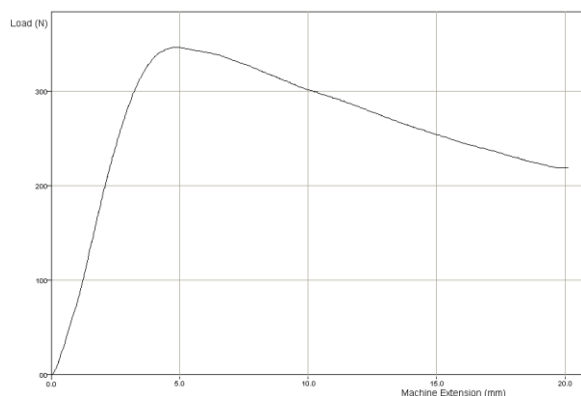
și săgeata maximă

$$\delta_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot D} + \frac{F \cdot l}{4 \cdot S} = 0,165 + 0,691 = 0,856 \text{ mm}.$$

Pentru tensiunile maxime în fețe și în miez au fost obținute valorile  $\sigma_f = 4,39$  MPa și  $\tau_m = 0,048$  MPa.

### 3 REZULTATE EXPERIMENTALE

Au fost încercate la încovoiere în trei puncte câte două eșantioane de panou sandwich la următoarele viteze de încărcare: 2, 10, 50 și 250 mm/min, conform schemei de încărcare din figura 3. Au fost obținute înregistrări de tipul celei din figura 5.



**Fig. 5. Dependenta forță-deplasare (viteza de încărcare de 2 mm/min)**

Pe zona solicitărilor elastice au fost determinate variațiile săgeții  $\Delta f$  asociate variației de forță  $\Delta F = 100$  N, care sunt prezentate în tabelul 1.

La solicitarea cvasistatică (viteza de încărcare de 2 mm/min) s-a obținut o variație  $\Delta f = 0,87$  mm, foarte apropiată de săgeata calculată analitic, de 0,856 mm. Se observă o creștere a forței maxime înregistrate cu mărirea vitezei de încărcare.

**Tabelul 1. Rezultatele testelor**

Epru- veta	Viteza de încărcare [mm/min]	Forța maximă înregistrată [N]	$\Delta f$ [mm] la $\Delta F = 100$ N
1	2	347	0,87
2	10	369	0,78
3	50	388	0,79
4	250	395	0,81

### 4 REZULTATELE SIMULĂRII NUMERICE CU ELEMENTE FINITE

A fost efectuată o analiză liniar elastică în stare plană de deformații, pe baza unei modelări cu elemente finite patrulate (figura 6).

Adezivul utilizat la asamblarea speciemenelor nu a fost evidențiat în modelul cu elemente finite pentru că este mult mai rezistent decât polistirenul extrudat din care este făcut miezul (care va ceda primul la atingerea stării limită).

Pentru diminuarea efectelor locale, sarcina a fost considerată repartizată pe o mică arie din centrul feței superioare.

În figura 7 este prezentată deformată barei sandwich sub sarcina de 100 N.

Dintre cei doi termeni ce apar în calculul analitic al săgeții maxime, are o contribuție majoră cel datorat deformațiilor de forfecare induse în miez, ca urmare a rigidității scăzute a acestuia. Analiza cu elemente finite (AEF) a fost efectuată în regim elastic, cu deplasări mici. Calculul în deplasări mari (geometric neliniară) nu este absolut necesar deoarece analiza elastică a dat pentru săgeata maximă un rezultat (0,746 mm) destul de apropiat de cel experimental.

AEF a dat pentru tensiunile maxime în fețe și în miez valorile  $\sigma_f = 15$  MPa și  $\tau_m = 0,048$  MPa. Față de rezultatul de la predimensionare, s-a obținut o valoare mult mai mare pentru  $\sigma_f$  dar acest fapt se datorează unor efecte locale (fig. 8) pe care calculul analitic nu le evidențiază. Totuși, valorile  $\tau_m$  coincid (fig 9).

Acest rezultat și evaluarea destul de corectă (în concordanță cu experimentul) a rigidității structurii, recomandă metodologia de predimensionare pentru utilizare în calculul de proiectare preliminar. Studiul analitic-experimental-numeric arată că cele trei metode de evaluare pot oferi date complementare utile în predicția comportamentului panourilor sandwich în exploatare.

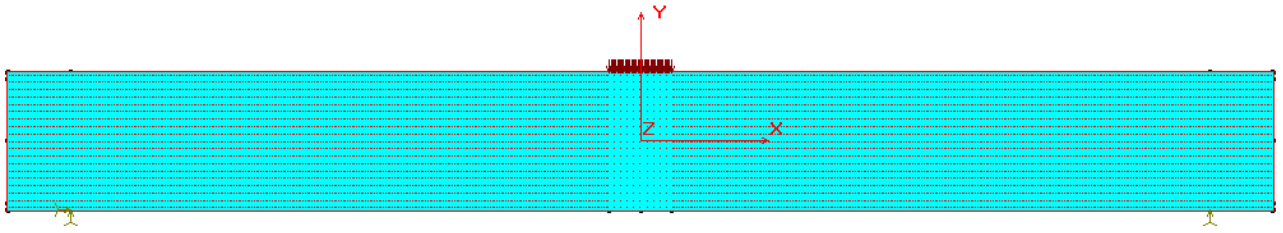


Figura 6. Modelul utilizat în calcul numeric

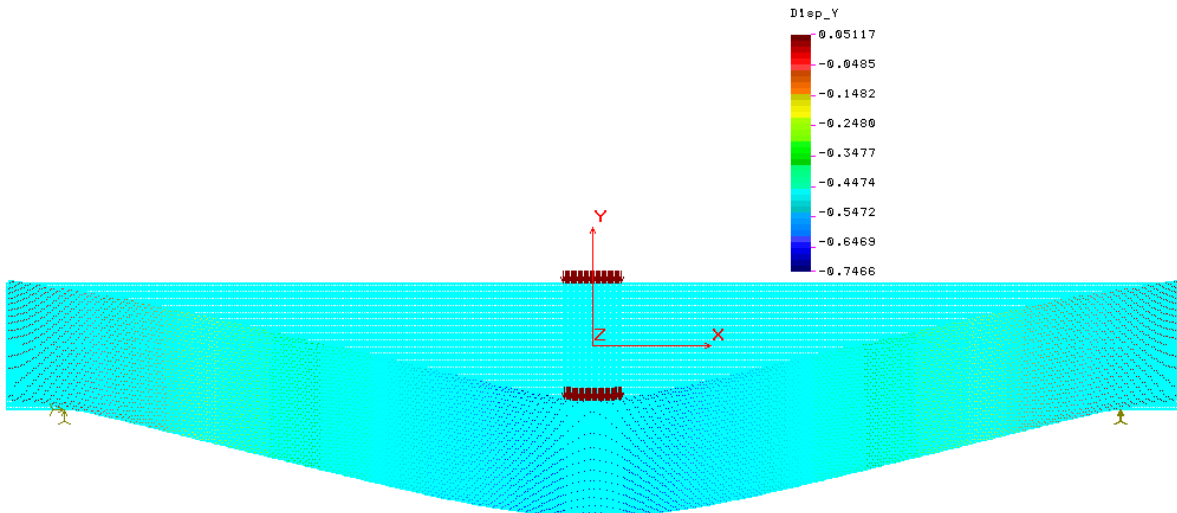


Figura 7. Deformata barei sandwich

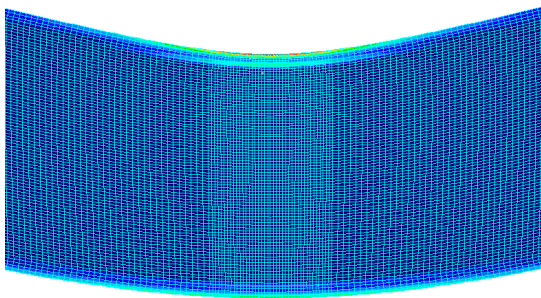


Fig. 8. Tesiuni echivalente în zona de încărcare

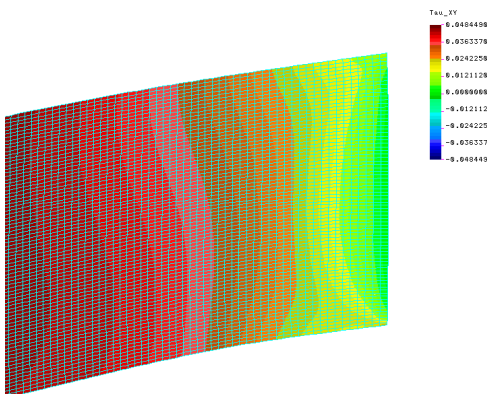


Fig. 9. Tesiuni de forfecare în miez

## 5 CONCLUZII

În activitatea proiectanților de structuri de rezistență apare frecvent situația când nu se pot satisface la nivelul maxim toate cerințele de performanță tehnică.

Plăcile sandwich întrunesc trei cerințe severe: masa specifică redusă, rezistență ridicată, cost rezonabil.

În lucrare a fost validată o metodologie simplă de predimensionare pe baza unor teste de încovoiere și a unei analize cu elemente finite. Relațiile de calcul pot fi utilizate și pentru optimizare structurală, de exemplu, pentru stabilirea grosimilor adecvate pentru fețe și miez dacă sunt cunoscute caracteristicile materialelor și sarcina impusă.

## BIBLIOGRAFIE

- [1]. Allen H.G. (1969), *Analysis and design of structural sandwich panels*, Pergamon Press, Oxford.
- [2]. ASTM C 393-00, Standard test method for flexural properties of sandwich constructions.