

ANALIZA MODALĂ A UNEI PLĂCI DIN BOROSILICAT PRIN MODELARE CU ELEMENT FINIT ȘI PRIN CALCUL EXPERIMENTAL

VĂSESCU Lidia¹

Conducători științifici: Prof. dr. ing. **Ioan PĂRĂUȘANU**, Prof. dr. ing. **Ștefan SOROHAN**

REZUMAT: Lucrarea prezintă modul în care se poate face modelarea unui strat de lubrifiant existent între două plăci dreptunghiulare din sticlă borosilicată. Analiza experimentală, prezentată și ea în lucrare, a avut drept scop validarea rezultatelor obținute prin simularea numerică, lucru care s-a realizat prin compararea modurilor proprii de vibrație.

CUVINTE CHEIE: sticlă borosilicată, metoda elementelor finite, moduri proprii de vibrație.

1 INTRODUCERE

Sticla din borosilicat prezintă proprietăți fizice și chimice deosebite, având un grad înalt de rezistență la agenții chimici agresivi și la șocurile termice.

Sticla din acest material este utilizată în fabricarea unei game largi de produse de sticlărie tehnică și de laborator, de aparatură industrială și de sticlărie decorativă și de menaj.

Produsele din sticlă borosilicată au o suprafață netedă, transparentă, rezistente față de substanțe corozive în condiții tehnologice dificile, având o structură perfect omogenă.

În prima parte a lucrării, din dorința de a valida metoda propusă, s-a studiat o singură placă de sticlă din borosilicat, atât experimental, cât și prin simulare numerică. Validarea a fost făcută prin compararea primelor trei frecvențe proprii obținute prin cele două metode. S-au obținut rezultate bune, ceea ce a permis trecerea la etapa următoare: modelarea a două plăci dreptunghiulare din sticlă borosilicată, între care s-a aplicat un strat foarte subțire dintr-un ulei, ale cărui proprietăți sunt: modulul de elasticitate transversal $G = 1620$ MPa, coeficientul lui Poisson $\nu = 0,46$, densitatea $\rho = 800$ kg/m³. Astfel, s-a obținut un pachet de tip sandwich.

Au fost analizate, atât prin simulare numerică, cât și experimental, primele trei moduri proprii de vibrație în trei cazuri distincte: Cazul 1 – în care s-a studiat o singură placă de sticlă borosilicată; Cazul 2 – în care analiza a fost făcută asupra unui pachet de tip sandwich (două plăci de sticlă borosilicată identice, lipite între ele printr-un strat subțire de ulei de tip *Shell Tellus S2 M 46*) și Cazul 3 – în

care a fost efectuată numai o analiză numerică a unei plăci dreptunghiulare de sticlă borosilicată, la care, grosimea este egală cu dublul grosimii plăcilor inițiale.

La baza analizei modale experimentale, stă măsurarea funcției de răspuns în frecvență. Mișcarea de vibrație poate fi descrisă în funcție de parametri: deplasare, viteză sau accelerație. În general, se preferă măsurarea mobilității (raport dintre viteza măsurată și forța aplicată), ea prezentând avantajul unui spectru relative constant pe întreg domeniul de frecvență.

Metoda cea mai des utilizată în analiza modală pentru excitarea unei structuri este cea de tip impact, efectuată cu ajutorul unui ciocan de impact, numit și ciocan modal

Tipul capului ciocanului (porțiunea din ciocan care lovește și care poate fi din fier, teflon, cauciuc etc.), determină domeniul frecvențelor în care este concentrată energia vibrației.

Analiza experimentală s-a efectuat cu ajutorul unui soft specific analizei dinamice (PULSE), utilizandu-se un ciocan modal (de tip 8206 B&K), la care s-a montat capul din cauciuc, iar, cu ajutorul unui accelerometru piezoelectric (tipul 4514 B&K), s-a înregistrat mărimea de ieșire – viteză.

2 ANALIZA MODALĂ A STRUCTURILOR CONSIDERATE

2.1 Analiza modală în Cazul 1

2.1.1 Analiza numerică

O singură placă din sticlă borosilicată are forma din figura 1, iar dimensiunile ei sunt lungimea (pe axa x) $l_1 = 300$ mm, lățimea (pe axa y) $b = 215$ mm și grosimea (pe axa z) $t = 3,9$ mm. De asemenea, s-a realizat o modelare a traductorului piezoelectric ce este prezentat, tot în figura 1, și are dimensiunile următoare: diametrul $d = 12$ mm, lungimea (pe axa z) $l_2 = 16$ mm. Acesta se află poziționat pe un colț al plăcii, la distanțele de 8,5 milimetri față de axele Ox și Oy . Proprietățile materialului din care este făcut

¹ Specializarea Siguranța și Integritatea Structurilor, Facultatea IMST;

E-mail: lidiavasescu@yahoo.com;

Analiza modală a unei plăci din borosilicat prin modelare cu element finit și prin calcul experimental

traductorul piezoelectric sunt: $E = 2 \times 10^5$ MPa, coeficientul lui Poisson $\nu = 0,30$, și densitatea $\rho = 4815$ kg/m³.

S-a efectuat, mai întâi, un calcul cu metoda elementelor finite, utilizând programul Ansys Workbench, a unei singure plăci din sticlă borosilicată și au fost determinate valorile primelor trei frecvențe proprii și forma modurilor proprii corespunzătoare.

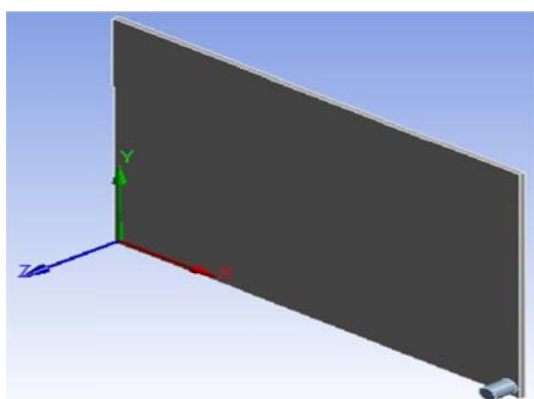


Figura 1. Placă din sticlă borosilicată

Proprietățile de interes ale materialului plăcii din sticlă borosilicată sunt: modulul de elasticitate longitudinal $E = 63000$ MPa și coeficientul lui Poisson $\nu = 0,20$. În modelarea cu element finit, masa are o importanță deosebită, ca urmare, valoarea densității materialului trebuie cunoscută cât mai precis. Din acest motiv, placa a fost cântărită cu ajutorul unui cântar electronic și, cunoscându-i volumul, densitatea a fost calculată rezultând valoarea $\rho = 2136$ kg/m³.

Modelul de calcul este prezentat în figura 2. Structura a fost discretizată în 2736 de elemente de tip brick cu 8 noduri pe element. În urma discretizării au rezultat 19433 de noduri. Mărimea elementului de discretizare este de 5mm.

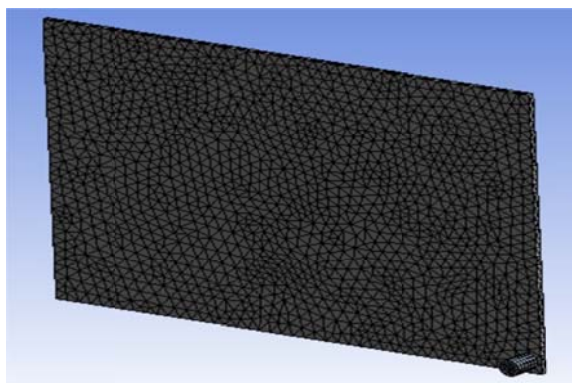


Figura 2. Modelul de calcul numeric

Rezultatele obținute în urma simulării numerice, referitoare la valorile primelor trei frecvențe proprii, sunt prezentate în tabelul 1.

Tabel 1. Rezultate MEF in cazul 1

f_i (Hz)	Mod	Valori MEF
f_1	încovoiere	206 Hz
f_2	încovoiere	235 Hz
f_3	încovoiere	453 Hz

În figurile 3-5 sunt prezentate formele primelor trei moduri proprii de vibrație, vizualizate cu programul Ansys Workbench.

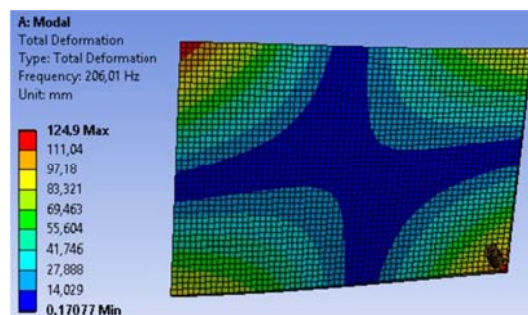


Figura 3. Modul 1

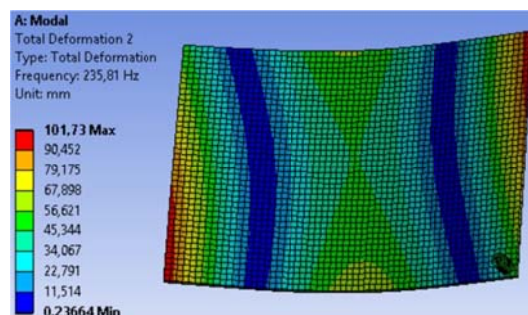


Figura 4. Modul 2

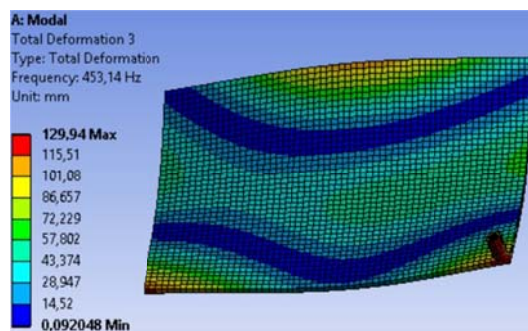


Figura 5. Modul 3

2.1.2 Analiza experimentală

Analiza modală experimentală a fost efectuată pe placa complet liberă. Pentru aceasta, placa a fost agățată de un corp cu masă mare, care nu participa la mișcarea de vibrație (figura 6).



Figura 6. Analiza experimentală

În figura 7 este prezentată curba de răspuns în frecvență, exprimată sub forma mobilității măsurate experimental, ca raport între mărimea de ieșire (viteza), măsurată în colțul plăcii și mărimea de intrare (forța), aplicată în centrul plăcii, corespunzătoare Cazului 1.

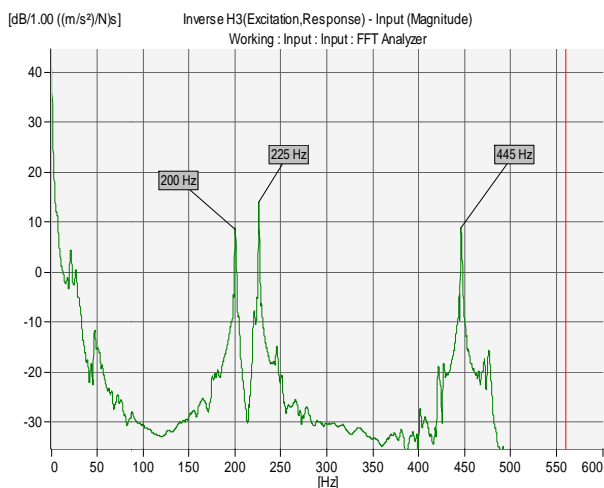


Figura 7. Curba de răspuns în frecvență

2.1.3 Concluzii corespunzătoare Cazului 1

Pentru primele trei moduri de vibrație, atât prin simulare numerică, cât și experimental, au fost determinate frecvențele proprii corespunzătoare primelor trei moduri proprii de vibrație. Rezultatele sunt trecute în tabelul 2.

Din tabel, rezultă eroarea relativ mică obținută în urma comparării celor două seturi de rezultate, lucru care certifică metoda de modelare cu elemente finite aleasă.

Tabel 2.Comparatie rezultate Caz 1

Modul	Frecvențe		Eroarea
	Simulare numerică	Analiza experimentală	
I	206 Hz	200 Hz	6 %
II	235 Hz	225 Hz	10 %
III	453 Hz	445 Hz	8 %

2.2 Analiza modală în Cazul 2

2.2.1 Analiza numerică

În acest caz, utilizându-se același program, Ansys Workbench, s-a efectuat analiza modală a două plăci din sticlă borosilicată, care au fost „lipite” între ele printr-un strat subțire de ulei cu grosimea de 0,01 mm. Acest pachet este denumit sandwich și este prezentat în figura 8. Densitatea celeilalte sticle a rezultat ca fiind $\rho = 2121 \text{ kg/m}^3$.

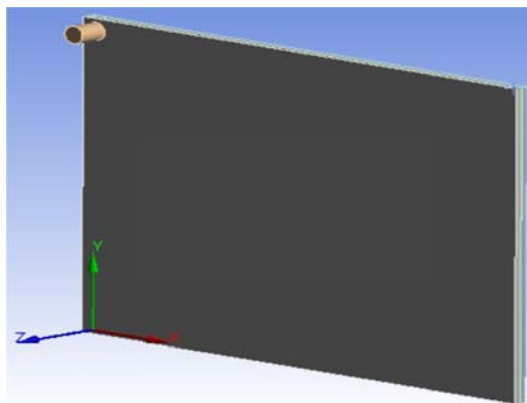


Figura 8. Pachet de tip sandwich

În model s-au folosit trei tipuri de contacte: două dintre acestea se află între ulei și fiecare dintre cele două sticle și cel de-al treilea se află între una dintre sticle și traductorul piezoelectric.

Modelul de calcul este prezentat în figura 9. Structura a fost discretizată în 4008 de elemente de tip brick cu 8 noduri pe element. În urma discretizării au rezultat 29197 de noduri. Mărimea elementului de discretizare este de 7mm.

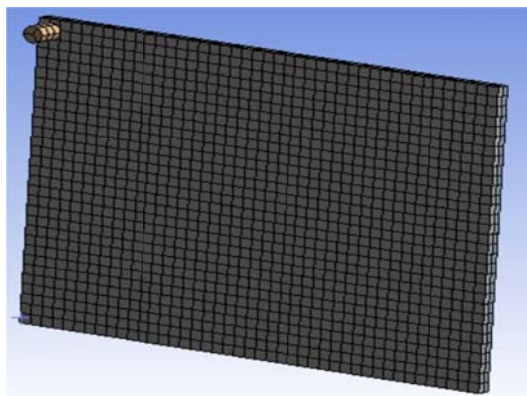


Figura 9. Modelul de calcul numeric

Valorile obținute în urma simulării numerice, ale primelor trei frecvențe proprii, sunt prezentate în tabelul 3, iar formele modurilor proprii, specifice celor trei frecvențe sunt evidențiate în figurile 10-12.

Tabel 3.Rezultate MEF in cazul 2

f_i (Hz)	Mod	Valorile frecvențelor MEF

Analiza modală a unei plăci din borosilicat prin modelare cu element finit și prin calcul experimental

f_1	încovoiere	213 Hz
f_2	încovoiere	240 Hz
f_3	încovoiere	470 Hz

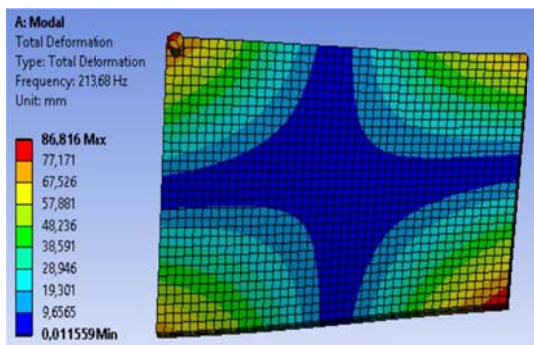


Figura 10. Modul 1

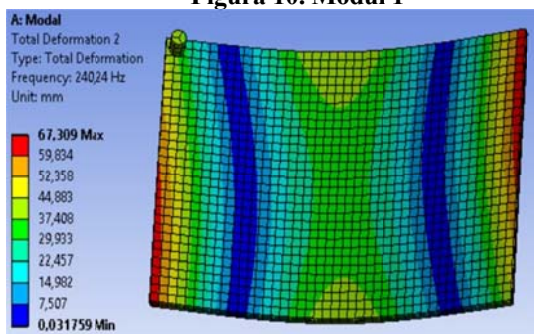


Figura 11. Modul 2

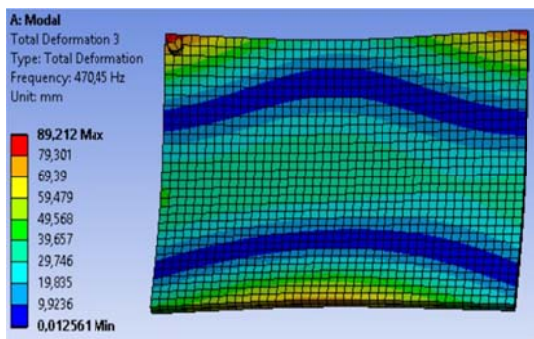


Figura 12. Modul 3

2.2.2 Analiza experimentală

Valorile primelor trei frecvențe proprii obținute experimental, în urma lovirii în centru a celor două plăci din sticlă borosilicată, separate printr-un strat subțire de ulei, sunt prezentate în figura 13

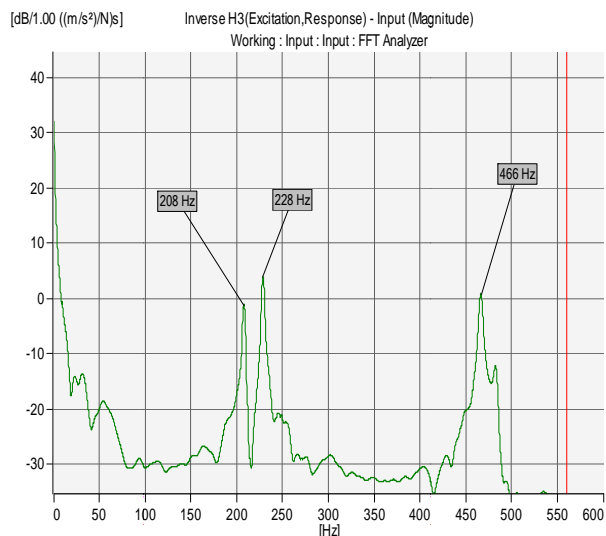


Figura 13. Curba de răspuns în frecvență

2.2.3 Concluzii corespunzătoare Cazului 2

Pentru primele trei moduri de vibrație, atât prin simulare numerică, cât și experimental, au fost determinate frecvențele proprii corespunzătoare primelor trei moduri proprii de vibrație. Rezultatele sunt trecute în tabelul 4. Din tabel, rezultă eroarea relativ mică obținută în urma comparării celor două seturi de rezultate, certificând încă o dată în plus, dacă mai era cazul, robustețea metodei alese.

Tabelul 4. Comparatie rezultate Caz 2

Modul	Frecvențele simulării [Hz]		Eroarea [%]
	Simulare numerică	Analiza experimentală	
I	213 Hz	208 Hz	5 %
II	240 Hz	228 Hz	12 %
III	470 Hz	466 Hz	4 %

2.3 Analiza modală în Cazul 3

Rezultatele bune obținute în primele două cazuri ne-au conferit siguranța obținerii de rezultate corecte și în cazul în care vom analiza o placă dreptunghiulară din sticlă borosilicată, a cărei grosime este egală cu dublul grosimii plăcilor din primele două cazuri, respectiv $t = 7,8$ mm.

Modelul de calcul este prezentat în figura 14. Structura a fost discretizată în 2675 de elemente de tip brick cu 8 noduri pe element. În urma discretizării au rezultat 15345 de noduri. Mărimea elementului de discretizare este de 5mm.



Figura 14. Modelul de calcul numeric

S-a observat faptul că frecvențele proprii, obținute prin simulare numerică, s-au dublat, lucru de altfel așteptat, deoarece structura este mai rigidă (tabelul 5).

Tabelul 5. Rezultate MEF caz 3

f_i (Hz)	Mod	Valorile frecvențelor MEF
f_1	încovoiere	494 Hz
f_2	încovoiere	572 Hz
f_3	încovoiere	1150 Hz

Formele modurilor proprii de vibrație au rămas aceleași. Ele sunt reprezentate în figurie 15-17.

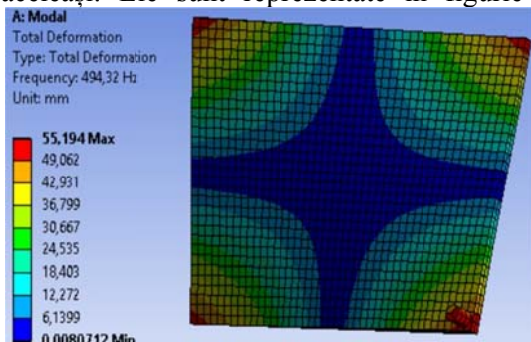


Figura 15. Modul 1

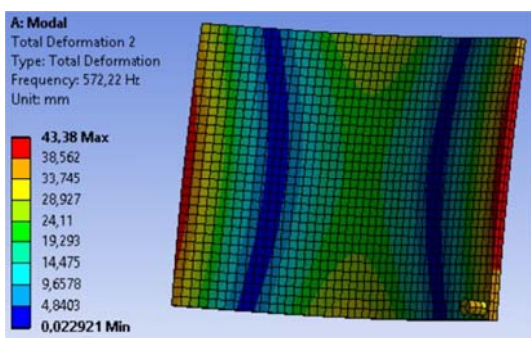


Figura 16. Modul 2

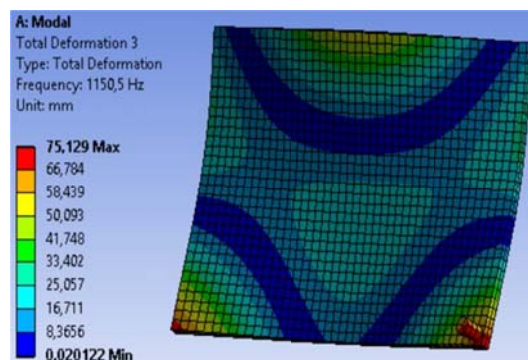


Figura 17. Modul 3

3 CONCLUZII

Alegerea metodei de simulare numerica prin metoda elementelor finite și a tipului de element folosit, au fost certificate de rezultatele bune și valorile relativ mici ale erorilor obținute în Cazul 1 (tabelul 2).

În Cazul 2, deși valorile densității sticlelor puteau fi cunoscute din standarde, s-a preferat determinarea lor experimentală pe baza măsurării directe a masei. Au rezultat astfel, pentru cele două sticle din borosilicat, valorile 2136 kg/m^3 și, respectiv, 2121 kg/m^3 . Valoarea densității uleiului, folosită ca dată de intrare în programul de simulare Ansys Workbench, a fost cea din standard, respectiv, 800 kg/m^3 . În ceea ce privește modulele de elasticitate și coeficientul de contracție transversală, pentru sticle s-au folosit modulul longitudinal $E = 63000 \text{ MPa}$, respectiv $\nu=0,20$, iar pentru pelicula de ulei, s-au folosit modulul transversal $G = 1620 \text{ MPa}$ și, respectiv, $\nu=0,46$. Toate cele trei straturi, au fost modelate cu tipul de element brick cu 8 noduri.

În ciuda faptului că pelicula de ulei asigură o aderență foarte bună a celor două plăci de sticlă (cu mare dificultate puteau fi despărțite), rezultatele obținute, atât prin simularea numerică, cât și experimental, au surprins prin valorile lor apropiate de cele rezultate în Cazul 1, reliefând faptul că, plăcile vibrează, oarecum, independent. Concluzia care se desprinde din observația de mai sus, constă în faptul că, obținerea unei structuri din sticlă borosilicată de grosime dublă față de grosimea sticlei inițiale, dar cu păstrarea regimului de frecvențe proprii, corespunzătoare primelor trei moduri proprii de vibrație, pentru evitarea fenomenului de rezonanță, presupune realizarea unui pachet de tip sandwich, așa cum este cel analizat în Cazul 2.

În cazul în care nu s-ar fi realizat acest pachet de tip sandwich, dar se dorea menținerea grosimii duble a sticlei, frecvențele primelor trei moduri proprii de vibrație, ar fi crescut considerabil și, în

Analiza modală a unei plăci din borosilicat prin modelare cu element finit și prin calcul experimental

unele situații, ar fi putut apărea fenomenul de rezonanță (tabelul 6).

Tabelul 6. Comparatie rezultate

Mod	Valorile frecvențelor proprii			
	Cazul 1		Cazul 2	
	Numeri c	Experimenta l	Numeri c	Experimenta l
I	206 Hz	200 Hz	213 Hz	208 Hz
II	235 Hz	225 Hz	240 Hz	228 Hz
III	453 Hz	445 Hz	470 Hz	466 Hz

Pentru a exista certitudinea unei simulări numerice corecte, analiza numerică realizată prin MEF, trebuie, cel puțin într-o primă fază, dublată de o analiză experimentală, care să certifice modelul.

4 BIBLIOGRAFIE

[1]. Părășanu I., cursul de "Dinamica structurilor", București, 2017.

[2]. Sorohan Ș., cursul de " Practica modelării cu elemente finite ", București, 2016.

[3]. <http://www.schott.com/d/tubing/9a0f5126-6e35-43bd-bf2a-349912caf9f2/schott-algae-brochure-borosilicate.pdf> Accesta la data: 2.05.2017

[4]. <http://www.btc.ro/tehnologie/> Accesta la data: 27.04.2017