

## ÎNCERCAREA DINAMICĂ A UNUI POD RUTIER PESTE CANALUL DUNĂRE-MAREA NEAGRĂ

**Cristian Lucian Ghindea**, Șef lucrări dr. ing., Universitatea Tehnică de Construcții București, Laboratorul de Rezistența Materialelor, e-mail: [ghindea@utcb.ro](mailto:ghindea@utcb.ro)

**Radu Cruciat**, Asistent ing., Universitatea Tehnică de Construcții București, Laboratorul de Rezistența Materialelor, e-mail: [reruciat@utcb.ro](mailto:reruciat@utcb.ro)

**Dan Crețu**, Profesor dr. ing., Universitatea Tehnică de Construcții București, Laboratorul de Rezistența Materialelor, e-mail: [cretud@utcb.ro](mailto:cretud@utcb.ro)

### *Rezumat*

Încercarea în regim dinamic a podurilor rutiere este mai puțin reglementată la nivel național. Importanța și necesitatea încercărilor dinamice, cât și statice, sunt diminuate de diferiți factori, printre care și cei economici. Standardul ce reglementează încercarea podurilor rutiere și de cale ferată în România este STAS 12504-86. La nivelul încercărilor dinamice standardul oferă o serie de informații privind modalitatea asigurării încărcării dinamice a podurilor, enumerând caracteristicile ce pot fi urmărite prin încercare, însă fără a oferi informații privind modul de prelucrare a datelor experimentale.

În lucrare se prezintă încercarea dinamică a unui pod rutier, amplasat pe autostrada A2, peste Canalul Dunăre-Marea Neagră. Sunt prezentate aspecte privind condițiile de realizare a încercărilor experimentale, rezultatele obținute și comparația acestora cu valorile rezultate din etapa de proiectare a podului. Rezultatele obținute sunt apropiate de caracteristicile dinamice rezultate din calcul, algoritmul de încercare și prelucrare a datelor experimentale fiind în concordanță cu standardele internaționale de profil

**Cuvinte cheie:** analiza vibrațiilor; descompunere în frecvențe a semnalului; frecvențe de vibrație ale podului; fracțiune de amortizare critică

### *Abstract*

Dynamic testing of road bridges is vaguely national regulated. As result, the importance and the necessity of static and dynamic tests is diminished by various factors, human, technic or economic ones. The standard which regulates the experimental testing of rail and road bridges in Romania is STAS 12504-86. For the dynamic testing case, the Romanian standard provides some information on how to ensure the dynamic loading of bridges, it enumerates some of the characteristics that can be pursued through testing, but without giving information on how to process experimental data.

The present paper illustrates a dynamic test of a road bridge, located on the A2 highway crossing the Danube-Black Sea Channel. There are presented bearings about the testing conditions, the experimental test results and a comparison with the bridge design values. The experimental results are proximate to the dynamic characteristics established in

the bridge design, test algorithm and experimental data processing are consistent with international standards in this field.

**Keywords: vibration analysis; signal frequency decomposition; bridge vibration frequencies; damping ratio**

## 1. INTRODUCERE

### 1.1. Necesitatea efectuării de încercări experimentale la structurile de poduri

La nivel național, dinamica infrastructurii rutiere se află într-o continuă dezvoltare. Se dezvoltă drumuri existente în același timp cu apariția noi legături rutiere între localități. O parte importantă a infrastructurii rutiere este constituită de poduri și viaducte. Importanța acestora din punct de vedere social și economic fiind incontestabilă.

Deși proiectarea podurilor sau viaductelor se realizează conform normelor naționale și europene, în vigoare, între structura podului considerată la proiectare și structura finită pot exista diferențe privind comportarea structurii podului sub încărcări, în unele cazuri acestea fiind semnificative. În funcție de complexitatea structurii, la etapa de proiectare se pot adopta diverse simplificări privind comportarea fizico-mecanică a materialelor, acțiunea încărcării sau modelarea numerică a structurii podului. La acestea adăugându-se diferențele între caracteristicile teoretice și reale ale materialelor utilizate, complexitatea structurii, abaterile constructive și alte cauze pot rezulta diferențele prezentate anterior.

Ținând seama de importanța socio-economică a podurilor apare astfel necesitatea realizării de încercări experimentale la atât structurile noi de poduri, cât și la cele existente, în vederea executării de lucrări de consolidare și după realizarea acestora.

În prezenta lucrare sunt prezentate aspectele tehnice privind încercarea în regim dinamic a unui pod rutier, amplasat pe autostrada A2, ce realizează legătura între Cernavodă și Agigea, podul fiind realizat la trecerea peste Canalul Dunăre-Marea Neagră. Se prezintă condițiile de încercare a podului în contextul reglementărilor în vigoare, rezultatele încercărilor și o comparație cu valorile caracteristice obținute la faza de proiectare a structurii.

## 1.2. Prevederi normative privind încercarea suprastructurilor de poduri

La nivel național, standardul, în vigoare, ce reglementează încercarea suprastructurilor de poduri este STAS 12504-86 [1]. Acesta asigură informațiile minimale privind încercarea podurilor, prevăzând condițiile de realizare a încărcărilor de probă și cerințele generale privind rezultatele urmărite în urma încercărilor, dar fără a oferi informații privind metodologiile de procesare a datelor experimentale.

Conform acestuia încercarea experimentală trebuie prevăzută în cadrul proiectelor pentru podurile ce prezintă noutate din punct de vedere al materialelor utilizate, a metodelor de calcul folosite, al deschiderilor sau al tehnologiilor de construcție utilizate sau dacă acestea au deschideri mai mari de 33 m. Standardul împarte încercările experimentale în două categorii: încercări cu acțiuni de probă în regim static și în regim dinamic. Cele din urmă fiind realizate numai după ce s-au obținut rezultate favorabile la încercările cu acțiuni statice.

În situația în care încercările experimentale sunt prevăzute în proiect este interzisă darea în folosință fără a efectua acestora și obținerea avizului comisiei de recepție [1].

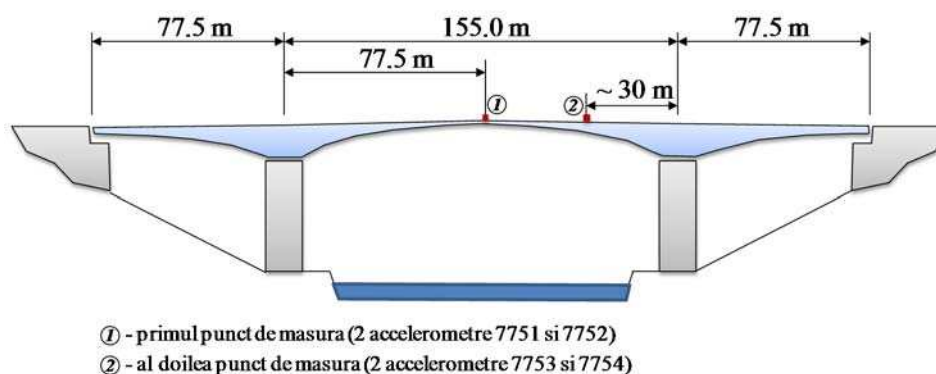


**Figura 1.** Vedere laterală a podului încercat

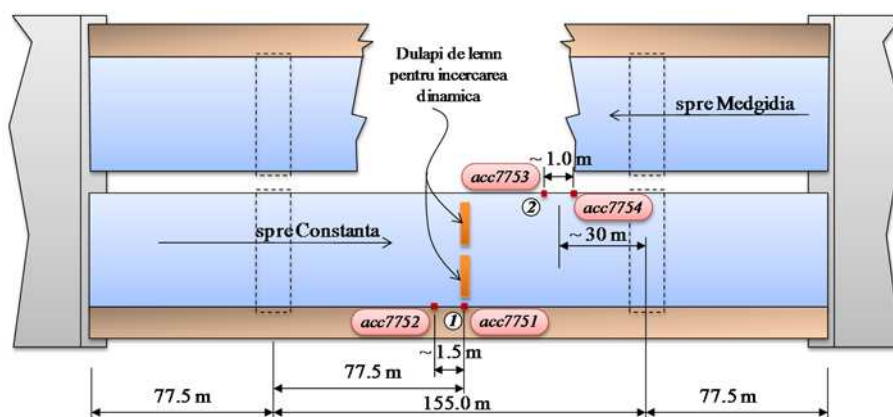
## 1.3. Prezentarea structurii

Obiectul încercărilor dinamice, prezentate în lucrare, l-a constituit una din cele două suprastructuri independente ale unui pod de beton armat (figura 1) ce asigură traversarea peste Canalul Dunăre - Marea Neagră. Podul are o suprastructură de tip grindă continuă, fiind executată prin turnare în consolă și având trei deschideri (77.5+155.0+77.5m). Schemele constructive ale podului, împreună cu amplasarea punctelor de măsură, sunt prezentate în figurile 2 și 3.

Tablierul podului este rezemat intermediar pe două pile, de o parte și de alta a Canalului, și la capete pe culei. Rezemarea pe fiecare suport se realizează prin intermediul a câte două reazeme izolatoare de tip pendul cu frecare [2].



**Figura 2.** Schemă elevație pod



**Figura 3.** Schiță amplasare accelerometre în planul podului

## 2. MATERIALE ȘI METODE EXPERIMENTALE

### 2.1. Principii generale de realizare a măsurătorilor

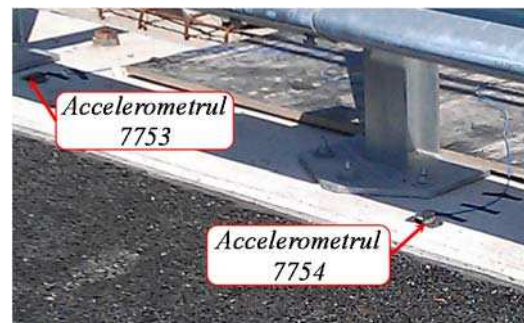
Aparatura utilizată în cadrul încercărilor experimentale permite măsurarea în timp real a accelerațiilor verticale ale tablierului podului, precum și stocarea pe suport electronic a datelor obținute. Întreg lanțul de măsură permite efectuarea încercărilor în condițiile impuse de STAS 12504-86, având domeniul de măsurare mai mare de 50% din valoarea maximă prevăzută a fi măsurată și o sensibilitate ce permite măsurarea de valori mai mici de 2% din aceeași valoarea maximă.

Accelerometrele au fost fixate de bordura marginală din beton prin intermediul unor cleme metalice (figurile 4 și 5) ce asigură transmiterea integrală a vibrațiilor podului către senzori, în conformitate cu ISO 5348 [3].

În funcție de etapa de încercare, solicitarea dinamică a podului s-a realizat cu ajutorul a două camioane de probă încărcate cu pietriș (figura 6), fiecare camion având o masă totală de aproximativ 34 t (figura 7). S-au înregistrat accelerațiile podului pe toată durata de rulare a camioanelor pe pod, până la atenuarea oscilațiilor. Mișcarea înregistrată se poate considera că prezintă trei faze ale încercării: faza premergătoare șocului (din momentul trecerii camioanelor peste rostul de intrare pe pod până în momentul producerii șocului), momentul șocului (realizat de trecerea camioanelor peste un obstacol artificial) și faza finală, după producerea șocului, când se consideră că podul vibrează liber.



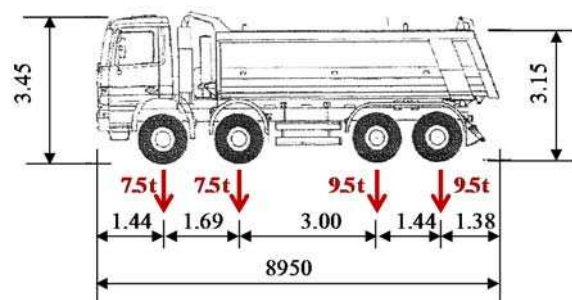
**Figura 4.** Amplasarea traductorilor pentru preluarea accelerațiilor în punctul nr. 1 de măsură



**Figura 5.** Amplasarea traductorilor în punctul nr. 2 de măsură



**Figura 6.** Camioanele de probă în timpul încercării dinamice



**Figura 7.** Schemă camion de probă (conform proiectului de încercare)

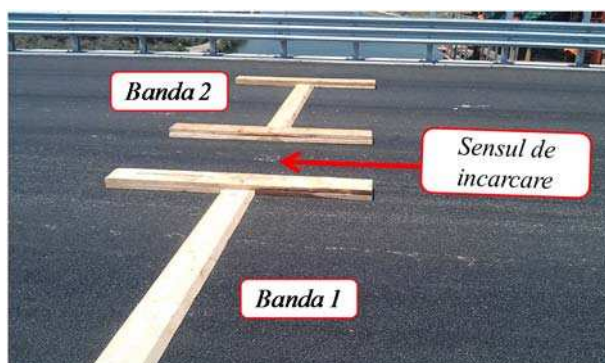
Șocul necesar realizării încercării a fost generat prin trecerea camioanelor, rulând cu diverse viteze, peste câte un prag, realizat dintr-un dulap de lemn, cu dimensiuni standard (30x4-300cm), cu muchiile teșite la 45° (figurile 8 și 9).

Considerând că după producerea șocului, podul vibrează liber, în urma prelucrării ulterioare a accelerogramelor înregistrate se pot determina caracteristicile dinamice ale tablierului podului. Se poate determina perioada fundamentală de vibrație ale tablierului ( $T_1$ ), respectiv frecvența de vibrație ( $f_1$ ) precum și decrementul logaritmic al mișcării la vibrații libere prin intermediul căruia se evaluează fracțiunea de amortizare critică a structurii [4].

Ca urmare a sensibilității ridicate a aparatelor, necesară pentru preluarea tuturor oscilațiilor podului la vibrații și exprimată prin numărul mare de valori măsurate pe secundă, accelerațiile măsurate sunt influențate de vibrațiile ambientale, în mod special, în acest caz, de vibrațiile induse de rularea camioanelor de probă.



**Figura 8.** Detaliu prag de lemn



**Figura 9.** Pragurile realizate din scândură din lemn cu muchii teșite

Pentru determinarea mai exactă a perioadelor, respectiv frecvențelor, de vibrație ale podului experimentat s-au realizat spectre de putere în scopul determinării conținutului în frecvențe al mișcării. Spectrul de putere asigură descompunerea funcției în sinusoidale de diverse frecvențe în cazul unor serii discrete de valori, cum este cazul accelerogramelor înregistrate, sinusoidalele reprezintă armonicile frecvențelor fundamentale ale funcției analizate.

## 2.2. Etapele încercării în regim dinamic a podului

Ansamblul de încercări experimentale, în regim dinamic, ale podului s-au efectuat în șase etape de încărcare, după cum urmează:

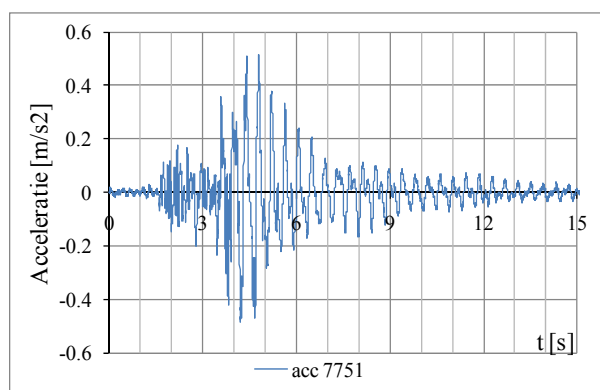
- la încercările 1÷5 camioanele au rulat simultan în același sens, cu viteze de 10 km/h, 30 km/h, 50 km/h, 70 km/h și, respectiv, 90 km/h,
- la încercarea 6 pe pod a rulat un singur camion cu viteza de 50 km/h pe banda 1 a sensului de circulație.

### 3. REZULTATE EXPERIMENTALE

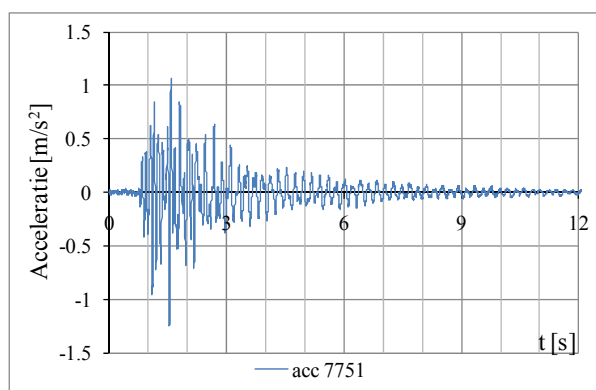
#### 3.1. Înregistrarea accelerațiilor verticale ale tablierului podului la vibrațiile induse de acțiunea de probă

În continuare, în figurile 10÷13, se vor reprezenta orientativ o parte din accelerogramele înregistrate în secțiunea centrală a podului (a se vedea figurile 2 și 3, poziția accelerometrului 7751).

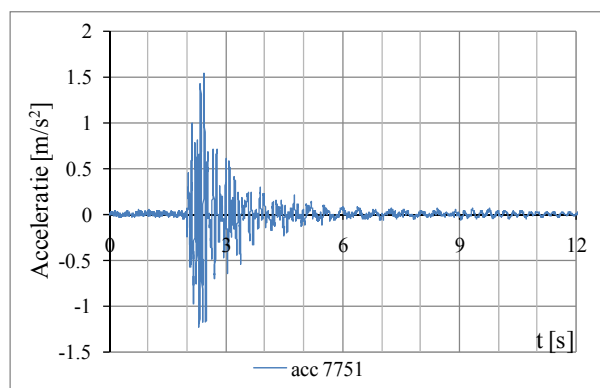
Pentru toate accelerogramele înregistrate, în fiecare punct de măsură, s-au efectuat corecții ale liniei de referință și s-a realizat o filtrare a înregistrării.



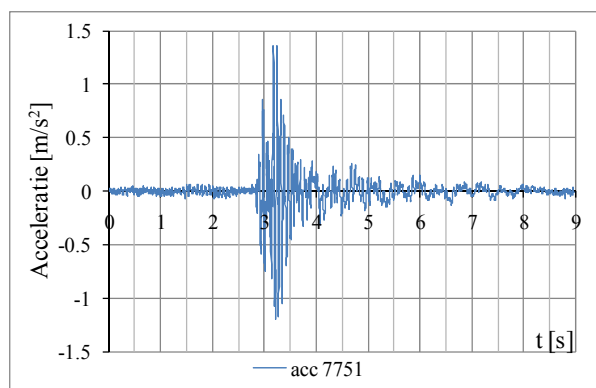
**Figura 10.** Accelerații verticale la încercarea nr. 1 (2 camioane rulând cu 10 km/h)



**Figura 11.** Accelerații verticale la încercarea nr. 2 (2 camioane rulând cu 30 km/h)

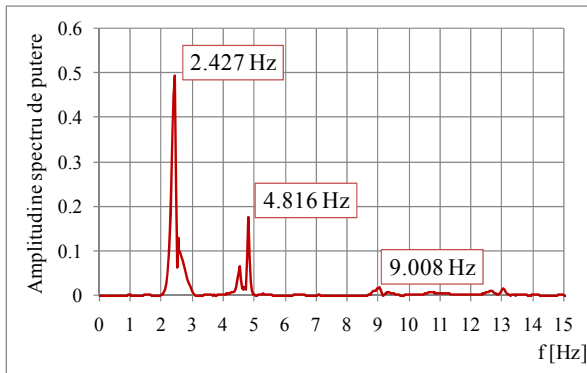


**Figura 12.** Accelerații verticale la încercarea nr. 4 (2 camioane rulând cu 70 km/h)

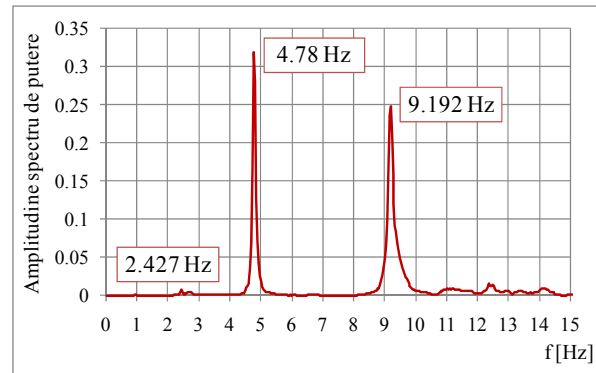


**Figura 13.** Accelerații verticale la încercarea nr. 5 (2 camioane rulând cu 90 km/h)

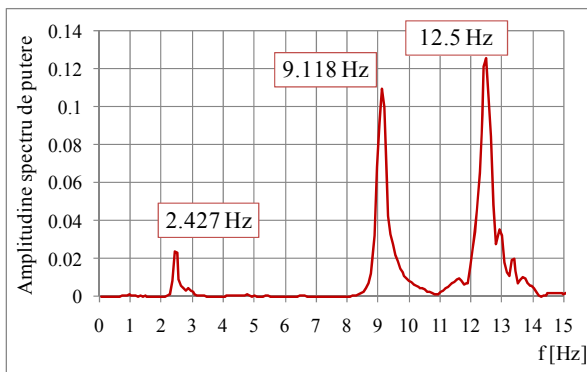
### 3.2. Spectrele de putere pentru accelerogramele înregistrate, în cazul înregistrării mișcării complete



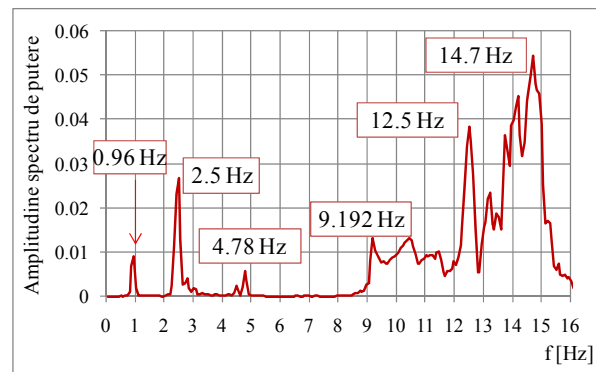
**Figura 14.** Spectrul de putere corespunzător accelerogramei din figura 10



**Figura 11.** Spectrul de putere corespunzător accelerogramei din figura 11



**Figura 12.** Spectrul de putere corespunzător accelerogramei din figura 12



**Figura 13.** Spectrul de putere corespunzător accelerogramei din figura 13

### 3.3. Evaluarea decrementului logaritm și a fracțiunii de amortizare critică

Trecerea camioanelor peste obstacolul artificial produce o acțiune dinamică de tip șoc asupra tablierului podului. Cu toate că, după producerea șocului, camioanele continuă să ruleze pe pod se poate considera că oscilațiile verticale ale tablierului sunt oscilații de tip vibrații libere. Accelerogramele înregistrate permit determinarea decrementului logaritm al vibrațiilor libere,  $\delta$ , pe baza căruia se evaluează fracțiunea de amortizare critică,  $\xi$ , corespunzătoare fiecărei înregistrări [1] [4]. În acest caz, prelucrarea manuală a accelerogramelor înregistrate conduce la valori ale perioadelor,  $T_1$ , și frecvențelor de vibrație,  $f_1$ ,



redate în tabelul 1, cu un grad de incertitudine mai mare, în raport cu cele obținute din spectrele de putere [5].

**Tabelul 1 Frațiunea de amortizare critică și accelerații maxime**

Test	Accelerometru	$\delta$	$\xi$ [%]	$T_1$ [s]	$f_1$ [Hz]	Acc. max. [m/s <sup>2</sup> ]
Înc. 1	7751	0.251	3.99%	0.427	2.34	0.512
	7752	0.232	3.69%	0.432	2.31	0.489
	7753	0.331	5.27%	0.777	1.29	0.387
	7754	0.247	3.94%	0.443	2.26	0.362
Înc. 2	7751	0.284	4.52%	0.218	4.59	1.244
	7752	0.208	3.31%	0.216	4.63	0.942
	7753	0.443	7.06%	0.116	8.65	1.123
	7754	0.354	5.64%	0.115	8.69	1.135
Înc. 3	7751	0.306	4.87%	0.260	3.85	1.507
	7752	0.259	4.12%	0.360	2.78	1.828
	7753	0.228	3.63%	0.175	5.70	1.116
	7754	0.232	3.70%	0.333	3.01	1.170
Înc. 4	7751	0.257	4.10%	0.296	3.38	1.535
	7752	0.575	9.15%	0.367	2.72	1.316
	7753	0.262	4.17%	0.115	8.73	1.437
	7754	0.459	7.30%	0.184	5.43	1.417
Înc. 5	7751	0.328	5.22%	0.074	13.44	1.365
	7752	0.352	5.60%	0.103	9.69	1.132
	7753	0.591	9.40%	0.299	3.34	1.842
	7754	0.529	8.42%	0.301	3.33	1.649
Înc. 6	7751	0.604	9.62%	0.267	3.74	1.516
	7752	0.482	7.67%	0.263	3.81	1.058
	7753	0.389	6.19%	0.254	3.94	0.969
	7754	0.404	6.43%	0.261	3.82	0.961

#### 4. COMPARAȚII CU VALORI DE PROIECTARE ȘI CONCLUZII

Informațiile parțiale privind rezultatele analizei numerice efectuate în etapa de proiectare [6], furnizate de proiectantul structurii podului analizat, au permis realizarea unor comparații între valorile caracteristicilor dinamice determinate experimental și cele obținute la proiectarea podului. În tabelul 2

sunt prezentate modurile de vibrație cu factori de participare modali pentru translația verticală obținuți prin modelarea structurii podului cu elemente finite. Primul mod important de vibrație a podului, pe direcție verticală, este modul 8, având o perioadă de vibrație de 0.500682 s, respectiv o frecvență de vibrație de 1.997 Hz.

**Tabelul 2 Frecvențe și perioade proprii de vibrați rezultate din calcul**

<b>Nr.</b>	<b>Modul de vibrație</b>	<b>f [Hz]</b>	<b>T [s]</b>	<b>Factor de participare modal pentru translația verticală</b>
1.	5	0.644	1.553	5.39
2.	6	1.224	0.817	0.02
3.	<b>8</b>	<b>1.997</b>	<b>0.501</b>	<b>27.08</b>
4.	10	2.826	0.353	0.09
5.	12	3.947	0.253	15.75
6.	13	5.395	0.185	0.03
7.	14	5.426	0.184	1.27
8.	15	5.674	0.176	0.15
9.	17	6.805	0.147	2.96
10.	23	9.740	0.103	3.48
11.	26	12.442	0.080	0.29

Frecvențele corespunzătoare modurilor proprii de vibrație, prezentate mai sus, au fost calculate ținându-se seama de întreaga încărcare asupra structurii podului (greutate proprie și încărcări utile).

În cazul încercărilor experimentale în regim dinamic, încărcarea dată de camioanele de probă este mult mai mică decât încărcarea utilă de calcul a podului, încărcarea experimentală putând fi neglijată. Astfel se poate considera că podul a fost încărcat doar din greutatea sa proprie, apreciată ca fiind aproximativ 70% din încărcarea totală considerată în calcul.

Deoarece frecvența fundamentală depinde de masă:

$$f_1 = 2\pi\sqrt{k/m} \quad (1)$$

unde  $k$  este rigiditatea structurii și  $m$  este masa structurii, frecvențele de vibrație determinate prin calcul se pot corecta, în vederea obținerii frecvenței de vibrație a podului încărcat doar din greutate proprie, cu relația

$$f_{cor} = f_{calc} \sqrt{m_{calc}/m_{gp}} \quad (2)$$

unde:  $f_{cor}$  este frecvența de vibrație a podului încărcat din greutate proprie;  
 $f_{calc}$  este frecvența de vibrație rezultată din analiza modală a podului;  $m_{calc}$  este  
masa totală a podului considerată în calcul și  $m_{gp}$  = masa proprie a podului.

Dacă  $m_{gp} = 0.7m_{calc}$ , rezultă  $f_{cor} = 1.195f_{calc}$ .

**Tabelul 3 Compararea frecvențelor de calcul  
cu frecvențele rezultate experimental**

Nr.	Mod vib.	$f_{calc}$ [Hz]	$f_{cor}$ [Hz]	Încercarea					
				1	2	3	4	5	6
1.	5	0.644	0.770	-	-	0.88 0.971 1.03	0.88	0.88 0.96	0.88
2.	6	1.224	1.463	-	-	-	-	1.62	-
3.	8	<b>1.997</b>	<b>2.387</b>	<b>2.353</b> <b>2.427</b> <b>2.5</b>	<b>2.28</b> <b>2.427</b> <b>2.5</b>	<b>2.353</b> <b>2.426</b> <b>2.5</b>	<b>2.353</b> <b>2.5</b>	<b>2.353</b> <b>2.426</b> <b>2.5</b>	<b>2.5</b>
4.	10	2.826	3.378	3.014	3.09	-	3.236	-	3.326
5.	12	3.947	4.718	4.529 4.552 4.816	4.706 4.78 4.853	4.412 4.486 4.559	4.413 4.559	4.486 4.706 4.78	4.63
6.	13	5.395	6.448	-	-	-	7.5	-	7.354
7.	14	5.426	6.485						
8.	15	5.674	6.782						
9.	17	6.805	8.134	9.008	9.118 9.192	9.118	9.118	9.118 9.192	9.118 9.192
10.	23	9.740	11.642	-	12.8 13.38	12.5 12.79 12.94	12.94	12.5 12.94 13.53	12.5 13.23
11.	26	12.442	14.871	-	14.48	14.56		14.04 14.7	

În tabelul 3 se pot observa prin comparație frecvențele de vibrație calculate și corectate cu cele rezultate din interpretarea înregistrărilor la încercarea dinamică.

Ținând seama de marja de eroare, aferentă oricărui studiu experimental, gama de frecvențe obținută prin prelucrarea înregistrărilor accelerațiilor verticale

la încercarea dinamică a podului se regăsește în apropierea valorilor obținute prin calcul.

În cazul modului 8 de vibrație, considerat modul principal de pentru vibrațiile verticale ale tablierului podului, se poate constata că în general frecvențele măsurate au rezultat mai mari decât valorile determinate prin calcul și corectate. Acest lucru se poate explica printr-o rigiditate reală a podului, mai mare decât cea evaluată în calculul de proiectare.

Răspunsul dinamic, al podului, la vibrații libere realizat ca urmare a șocului produs de trecerea camioanelor peste pragul de lemn este diferit de răspunsul teoretic al unei structuri la vibrații libere produse prin șoc, deoarece camioanele de probă ce rulează pe carosabil cu diverse viteze induc o serie de vibrații armonice forțate. Frecvențele vibrațiilor induse de acestea se pot regăsi în gama de frecvențe rezultate din analiza oscilațiilor podului, suprapuse sau nu peste frecvențele de vibrație ale podului.

Din punct de vedere al modului de amortizare al vibrațiilor o evaluare calitativă se poate realiza din analiza vizuală a mișcării, observându-se o atenuare rapidă a oscilațiilor. Pentru o evaluare cantitativă, din analiza celor 24 de înregistrări, s-a calculat o fracțiune de amortizare critică, medie, de 5.71%, corespunzătoare unei structuri din beton armat.

## BIBLIOGRAFIE

- [1]. STAS 12504-86: "*Poduri de cale ferată, de șosea și pasarele. Încercarea suprastructurilor cu acțiuni de probă*", IRS, București, **1986**.
- [2]. A. HAIDUCU: "*Reducerea efectului acțiunii seismice la structurile de poduri prin procedeul de izolare la nivelul de rezemare*", Teză de doctorat, U.T.C.B., București, **2012**.
- [3]. ISO 5348:1998: "*Mechanical mounting of accelerometers*", International Organization for Standardization, Geneva, **1998**.
- [4]. A. K. CHOPRA: "*Dynamics of Structures*", third ed., Prentice Hall, New Jersey, **2006**
- [5]. R. CRUCIAT, C. GHINDEA: "*Experimental Determination of Dynamic Characteristics of Structures*", Mathematical Modelling in Civil Engineering Scientific Journal of the TUCEB, p. 51-59, No. 4, **2012**
- [6]. "*Încercarea statică și dinamică a Podului nr. 20, pe Autostrada A2, Medgidia-Constanța, peste Canalul Dunăre – Marea Neagră, km 193+645*", Contract UTCB 260/2012