

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**

TEZA DE DOCTORAT

**INFLUENȚA SISTEMELOR DE AMORTIZARE ASUPRA
VIBRAȚIILOR CABLURILOR PODURILOR HOBANATE**

REZUMAT

AUTOR:
Ing. Vlad Daniel URDĂREANU

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
Prof. Univ. Dr. Ing. Nicolae POPA

**BUCUREȘTI
2022**

MULȚUMIRI

Mulțumiri conducătorului științific Prof. Univ. Dr. Ing. Nicolae Popa pentru îndrumare și pentru determinarea cu care m-a sprijinit în demersul de finalizare al tezei de doctorat. Îi mulțumesc, de asemenea, pentru că mi-a format gândirea și pentru faptul că mi-a împărtășit din bogata experiență profesională și de viață a dumnealui.

Mulțumiri comisiei oficiale, formată din Prof. Univ. Dr. Ing. Constantin Dorinel Voinițchi, Prof Univ. Dr. Ing. Radu Băncilă, Prof. Univ. Dr. Ing. Ștefăniță Iuliu Guțiu și Conf. Univ. Dr. Ing. Ionuț Radu Răcănel.

Mulțumiri Conf. Univ. Dr. Ing Ionuț Radu Răcănel și tuturor membrilor Departamentului de Rezistența Materialelor, Poduri și Tuneluri care au fost tot timpul alături și m-au ajutat la finalizarea tezei.

Cu recunoștință și iubire, dedic această teză soției și părinților mei, care m-au sprijinit și încurajat constant pe durata studiilor doctorale și care mi-au fost alături în cele mai dificile momente, fără de care probabil nu aș fi reușit să ajung în acest punct.

Vlad Daniel Urdăreanu

CUPRINS	
CAPITOLUL I – PODURILE HOBANATE. SOLUȚII CONSTRUCTIVE, AVANTAJE ȘI DEZAVANTAJE	4
I.1. Introducere	4
I.2. Evoluție	4
CAPITOLUL II – VIBRAȚIILE CABLURILOR PODURILOR CU HOBANE	5
II.1. Fenomene care pot induce vibrații în cablurile podurilor cu hobane	5
II.1.1. Desprinderea vârtejurilor	5
II.1.2. Vibrații din rafale	5
II.1.3. Combinația vânt-ploaie (Sena Kumarasena N. P., 2007)	5
II.1.4. Galopare în siaj	6
II.1.5. Depuneri de gheață	6
II.1.6. Acțiuni din trafic	6
II.2. Parametri folosiți în studierea vibrațiilor cablurilor podurilor cu hobane	6
II.2.1. Numărul Reynolds	6
II.2.2. Numărul Strouhal	6
II.2.3. Coeficient aerodinamic și coeficient de liftare (Batchelor, 1967)	6
II.2.4. Numărul Scruton	7
II.3. Soluții constructive și sisteme utilizate pentru atenuarea vibrațiilor cablurilor	7
II.3.1. Profilarea tecilor cablurilor	7
II.3.2. Cabluri suplimentare transversale	8
II.3.3. Mase discrete	8
II.3.4. Amortizori externi	9
II.3.5. Amortizori semiactivi - magneto-reologici	10
II.4. Exemple de probleme și degradări structurale cauzate de vibrațiile cablurilor	11
II.4.1. Podul Dubrovnik	11
II.4.2. Podurile „Veterans Memorial” și “Fred Hartman” – Texas, S.U.A. (Felix Weber G. F., 2006)	12
II.5. Exemple de utilizare a sistemelor de amortizare a vibrațiilor	13
II.5.1. Podul Normandy	13
II.5.2. Podul Sutong	14
II.5.3. Podul Russky	15
CAPITOLUL III – ANALIZA VIBRAȚIILOR CABLURILOR PRIN METODE NUMERICE	15
III.1. Generalități	15
III.2. Modele numerice pentru simularea vibrațiilor cablurilor	16
III.2.1. Probleme în modelarea vibrațiilor cablurilor	16
III.2.2. Propunerea unei metode simplificate pentru simularea vibrațiilor cablurilor	16
III.2.3. Validarea algoritmului prin studii experimentale în tunelul de vânt	16
III.2.4. Comparatie între rezultatele înregistrate și cele obținute prin calcul	22
CAPITOLUL IV – STUDIU DE CAZ – POD HOBANAT LA VLADIVOSTOK	22
IV.1. Scopul și obiectivele studiului	22
IV.2. Abordarea de calcul	23
IV.2.1. Elemente structurale considerate și modelarea acestora	23
IV.2.2. Excitația exterioară	23
IV.2.3. Dispozitive propuse pentru amortizarea vibrațiilor cablurilor și parametri considerați	24
IV.3. Răspunsul dinamic al cablurilor neamortizate	25
IV.4. Influența amortizorilor externi vâscoși fixați la baza tablierului asupra răspunsului dinamic al cablurilor	26
IV.5. Influența amortizorilor externi vâscoși fixați între cabluri adiacente asupra răspunsului dinamic al acestora	28
IV.5.1. Influența poziției amortizorului pe 2 hobane izolate	28
IV.5.2. Influența pozițiilor relative între amortizori adiacenți	31
CAPITOLUL V Concluzii FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU	34
CAPITOLUL VI BIBLIOGRAFIE	40

CAPITOLUL I – PODURILE HOBANATE. SOLUȚII CONSTRUCTIVE, AVANTAJE ȘI DEZAVANTAJE

I.1. Introducere

În ultimele decenii s-au înregistrat creșteri accentuate ale volumelor de marfă și a numărului de persoane ce folosesc infrastructura rutieră, atât la nivel mondial cât și în România, cu previziuni de continuare a creșterii în viitor. Pentru a face față la cererea tot mai mare, rețelele moderne de transport se bazează pe trasee cât mai scurte, cu cât mai puține restricții, care să asigure fluxuri continue de trafic și să evite pe cât posibil formarea de ambuteiaje. Practic, se pune foarte mult accent pe scurtarea timpilor de deplasare, ceea ce implică trasee noi și cât mai directe. Acest context favorizează traversările obstacolelor pe variante cât mai directe și nu neapărat pe cele mai scurte, facilitând astfel realizarea din ce în ce mai des a podurilor cu deschideri mari și foarte mari, printre care se amintesc podurile suspendate și cele cu hobane.

În contextul acesta, lucrarea prezintă un fenomen specific podurilor cu hobane observat foarte des la nivel mondial și anume cel al apariției de vibrații puternice în cabluri. În lucrare este realizată o sinteză a câtorva din cele mai importante poduri hobanate construite până în acest moment, cu prezentarea soluțiilor și a tendințelor în domeniu. În cadrul acestora, sunt scoase în evidență deficiențe structurale cauzate de vibrațiile necontrolate ale cablurilor precum și soluții pentru atenuarea acestora prin diverse dispozitive, interne și externe. Deși fenomenul nu a fost remarcat până acum în România, acesta se întâlnește mai frecvent o dată cu creșterea deschiderilor și este posibil ca în viitor să fie realizate noi structuri susceptibile la astfel de vibrații în hobane.

Amortizarea internă a cablurilor este foarte mică, de aproximativ 0.5%-1%, prin comparație cu cea a generală a structurilor care este de regulă între 3-5%, ceea ce duce la un număr mare de oscilații care, lăsate necontrolate, pot produce daune atât elementelor structurale, cât și a celor constructive din jurul hobanelor. O dată cu mărirea deschiderilor s-au constatat degradări ale cablurilor și ancorajelor acestora cauzate de vibrații cu amplitudini mari ale hobanelor, asociate cu fenomene externe de vânt și ploaie.

Există multiple studii pe această temă care este încă dezbătută la nivel internațional. În prezent nu există normative sau ghiduri oficiale pentru inginerii proiectanți în vederea rezolvării acestei probleme. În literatura de specialitate, majoritatea menționărilor ale acestor fenomene au la bază observații vizuale sau au fost deduse în baza (și în urma) degradărilor pe care le-au cauzat. Ca urmare a accesului dificil și a sensibilității echipamentelor, există foarte puține măsurători înregistrate ale acestora la scară reală.

I.2. Evoluție

Podurile hobanate au început să fie folosite din ce în ce mai des după anul 1950, datorită execuției mai facile, a esteticii superioare, dar și pe criterii economice. Principiul acestui tip de structuri constă în traversarea deschiderilor mari cu tabliere foarte zvelte prin dispersarea eforturilor în suprastructură într-un mod mai favorabil. Acest lucru se realizează prin preluarea solicitărilor în multiple puncte, folosind cabluri, și transmiterea acestora la piloni, care sunt mai rigizi și bine ancorați în teren. Tensiunea în cabluri poate fi controlată relativ ușor, putându-se astfel induce o stare de eforturi optimă în suprastructuri.

Primul pod hobanat a apărut în anii 1600, când inginerul venețian Verantius a proiectat și construit un pod susținut de lanțuri diagonale, fixate pe 2 piloni marginali. Conceptul a fost apreciat de ingineri, iar prin experimentare și progres a ajuns la varianta sa finală în 1950 în Germania. (Niels J. Gimsing, 1997)

Primul pod hobanat modern a fost construit în 1956. Podul Stromsund din Suedia, a fost proiectat de inginerul Dischinger cu o deschidere centrală de 182.6m și două deschideri marginale a câte 74.7m. Hobanele erau dispuse în evantai, susținute de 2 piloni metalici tip portal. (Podolny Walter, 1987)

În anii ce au urmat, multe alte exemple inovatoare au apărut în Germania postbelică. Aproximativ 1500 de poduri fuseseră distruse în urma războiului, ceea ce a făcut necesar ca inginerii din acea perioadă să conceapă structuri pentru deschideri tot mai mari și cât mai ieftine pentru a înlocui ce fusese pierdut în timp cât mai scurt.

Primul pod hobanat realizat în România este cel peste Canalul Dunăre – Marea Neagră, la Agigea, care a fost dat în exploatare în mai 1983. Structura hobanată acoperă trei deschideri de 44.00-40.50-162m, având o lungime totală de 246.50m. Suprastructura podului hobanat este de tip mixt oțel-beton, alcătuită dintr-un tablier metalic compus din două grinzi casetate, trei lonjeroni și antretoaze, în conlucrare cu o placă monolită din beton. Pentru susținerea suprastructurii sunt prevăzute un total de 10 hobane dispuse în două planuri înclinate în sistem evantai, cu lungimi variabile între 67.00m și 138.00m. Acestea au fost inițial realizate din pachete de cabluri cu câte 48 sârme cu diametrul de 5 mm de calitate SBP I, care au fost ulterior înlocuite cu toroane din câte 7 sârme galvanizate. Podul are un singur pilon având forma literei “A” cu elevație alcătuită din doi stâlpi casetați din beton armat cu secțiuni variabile, uniți la capătul superior. Sub nivelul tablierului, cei doi stâlpi sunt legați cu o riglă casetată din beton armat, care constituie și bancheta de rezemare a tablierului podului hobanat, pe aparate de reazem fix. Înălțimea elevației pilonului este de 78.50 m. (IPTANA, 2018)

La momentul elaborării acestei documentații, cele mai mari deschideri realizate prin poduri hobanate sunt după cum urmează:

Podul Russky (Rusia)	Podul Sutong (China)	Podul Stonecutters (China)
		
Deschidere principală: 1104m Lungime totală: 1885.53m Lățime totală: 29.50m An finalizare: 2012	Deschidere principală: 1088m Lungime totală: 1690.00m Lățime totală: 41.00m An finalizare: 2008	Deschidere principală: 1018m Lungime totală: 1596.00m Lățime totală: 51.00m An finalizare: 2009

Figura I-1 – Cele mai mari poduri hobanate la nivel internațional (Wikipedia, 2020)

CAPITOLUL II – VIBRAȚIILE CABLURILOR PODURILOR CU HOBANE

II.1. Fenomene care pot induce vibrații în cablurile podurilor cu hobane

II.1.1. Desprinderea vârtejurilor

În natură, circularrea aerului în jurul unor corpuri cilindrice generează o serie întreagă de fenomene aero-elastice care pot induce vibrații de amplitudini considerabile. Primele construcții ingineresti la care s-au studiat astfel de fenomene sunt turnurile de răcire de la termocentrale unde, pe perioade de vânt puternic, s-au înregistrat deplasări la vârf de ordinul a 2-3m. (Chanson H. , 2009) Acestea se datorează fenomenului de desprindere a vârtejurilor, care poate să apară și în cazul cablurilor podurilor cu hobane.

În dinamica fluidelor, acesta este un regim de curgere oscilant, care are loc atunci când un fluid (cum este aerul) trece pe lângă corpuri de formă cilindrică la anumite viteze. În spatele obiectului se formează vârtejuri care se detașează periodic de o parte și de alta a acestuia. (Batchelor, 1967)

Pe măsură ce fluidul se apropie de suprafața cilindrului, nivelul presiunii se ridică de la valoarea corespunzătoare curgerii libere, până la punctul de stagnare din vârful acestuia, corespunzător presiunilor celor mai mari. Forțele generate de diferențele de presiune tind să împingă particulele de fluid de o parte și de alta a cilindrului, formând straturi limită. Forțelor generate la suprafața corpului li se opun forțele date de vâscozitatea fluidului, acesta neputând curge până în spate. Straturile limită se desprind pe ambele părți, formând 2 straturi de forfecare. Particulele dinspre suprafața rigidă se mișcă mai încet decât cele dinspre exterior, rezultând rotații relative între acestea, ce pot duce la apariția de vârtejuri. (Benato Roberto, 2017)

Datorită lungimilor mari și a rigidității nesemnificative la încovoiere a hobanelor podurilor, acestea sunt foarte sensibile la astfel de fenomene și sunt predispuse să intre în rezonanță. În astfel de situații, frecvența de desprindere a vârtejurilor crește o dată cu viteza medie a vântului.

În cazul cablurilor podurilor cu hobane, practica a arătat că pentru anumite structuri există un interval critic al vitezei vântului la care oscilațiile au amplitudini mai mari, iar fenomenul de desprindere a vârtejurilor persistă mai mult timp și are un efect mai pronunțat. Acest interval este intitulat zona de fixare și este de ordinul a 10-20 m/s. (Hikami, 1988)

II.1.2. Vibrații din rafale

Toate aspectele prezentate în capitolul anterior au la bază ipoteza că viteza vântului rămâne constantă în timp, dar în realitate aceasta poate varia chiar foarte mult în intervale relativ mici de ordinul secundelor. Cum forța ce acționează asupra cablului este direct proporțională cu viteza vântului, aceste variații în timp generează răspunsuri dinamice în hobane. (Sena Kumarasena N. P., 2007)

II.1.3. Combinația vânt-ploaie (Sena Kumarasena N. P., 2007)

Combinația dintre ploaie și vânt cu viteză moderată poate cauza oscilații în cabluri cu amplitudini și perioade de vibrație mari. Acest fenomen a fost observat la multe poduri hobanate și a fost studiat intens.

De-a lungul timpului au fost realizate o sumedenie de cercetări asupra acestui fenomen, incluzând și măsurători în teren, teste în tunelul de vânt sau modele analitice. S-a constatat că aceste oscilații apar în special

atunci când există ploaie și vânt cu viteză moderată între 8-15 m/s, pe o direcție de 20°-60° față de planul cablului, cu hobana înclinată spre direcția vântului.

Perioadele înregistrate ale oscilațiilor cablurilor au fost mai mari de 0.33s, iar amplitudinile maxime între 0.25m-1.00m, rezultând mișcări violente care au dus chiar la lovirea între ele a hobanelor adiacente.

Fenomenul de inducere a vibrațiilor în hobane în urma combinației vânt-ploaie reprezintă unul din cele mai importante mecanisme de care trebuie să se țină seama în proiectarea podurilor cu hobane și a sistemelor de amortizare a vibrațiilor, datorită amplitudinilor mari ale oscilațiilor rezultate și aparițiilor foarte dese.

II.1.4. Galopare în siaj

Galoparea în siaj este un fenomen de inducere a oscilațiilor ce apare datorită influența altor obiecte din jurul hobanelor. Aceste obiecte pot fi construcții învecinate sau pilonii podului, dar de cele mai multe ori sunt calburile adiacente. Oscilațiile unui cilindru aflat în aval pot fi induse de regimul de curgere turbulent din siajul unui altuia situat în amonte.

II.1.5. Depuneri de gheață

Depunerea gheții sau a zăpezii pe cabluri se manifestă asemănător cu fenomenul de inducere a oscilațiilor din combinația vânt-ploaie, dar la temperaturi mult mai joase. Datorită vântului, a precipitațiilor și a temperaturii joase, pe suprafața exterioară a cablului încep să se acumuleze depuneri (zăpadă sau gheață).

II.1.6. Acțiuni din trafic

În exploatare, suprastructurile podurilor sunt supuse constant vibrațiilor cauzate de trafic, în special cel feroviar. Acestea se datorează acțiunii dinamice a vehiculelor și a interacțiunii cu calea de rulare. În cazul structurilor hobanate, vibrațiile se pot transfera ușor la cabluri prin intermediul ancorajelor. Având în vedere gama variată de poziții de încărcare și de variații ce pot să apară, este plauzibil să se presupună că oscilațiile cablurilor provocate de trafic pot ajunge la rezonanță. Acest efect apare în special atunci când una sau mai multe din perioadele proprii de vibrație ale suprastructurilor sunt apropiate de cele ale cablurilor.

II.2. Parametri folosiți în studierea vibrațiilor cablurilor podurilor cu hobane

II.2.1. Numărul Reynolds

Este o mărime adimensională folosită în dinamica fluidelor pentru a prezice caracteristicile unei curgeri și în special a regimului (laminar, turbulent sau tranzitoriu). Conceptul a fost folosit pentru prima dată de Gabriel Stokes, dar Osborne Reynolds a fost cel care a popularizat conceptul. Acesta se definește ca raportul dintre forțele inerțiale și cele vâscoase, cuantificând importanța relativă a acestor 2 surse în determinarea tipului de curgere. (Acheson, 1990)

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_c}{\mu} \quad (II.1)$$

Unde D_c – lungimea caracteristică

ρ – densitatea fluidului

v – viteza de curgere

μ – vâscozitatea dinamică a fluidului

Pentru valori mici ale acestei mărimi curgerea este laminară (lină, constantă), iar forțele vâscoase predomină. La valori mari încep să domine forțele inerțiale care tind să producă curgeri haotice (eddy-uri, vârtejuri, etc), ducând la turbulențe și instabilitate a regimului de curgere. (Acheson, 1990)

II.2.2. Numărul Strouhal

Este o mărime adimensională care descrie oscilațiile mecanismelor de curgere periodice. Poartă numele fizicianului ceh Vincent Strouhal, care a realizat multe experimente pentru a analiza fenomene ca desprinderea vârtejurilor sau așa numitul “cântat în vânt”. (Hikami, 1988)

$$St = \frac{f \cdot L}{v} \quad (II.2)$$

Unde f – frecvența de desprindere a vârtejurilor, L – lungimea caracteristică, iar v – viteza de curgere

Pentru cilindri, numărul Strouhal poate fi considerat 0.2 pentru o gamă largă de viteze de curgere. În această situație se observă cum creșterea vitezei duce la scăderea perioadei de desprindere a vârtejurilor. Astfel, alternarea vârtejurilor induce o forță transversală aproape armonică putând induce fenomene de rezonanță pe măsură ce perioada oscilațiilor se apropie de una din perioadele proprii de vibrații a structurii corespunzătoare deplasării pe direcția respectivă. Modificarea vitezei duce la schimbarea frecvenței de desprindere și poate duce la rezonanță și pe alte frecvențe, o dată cu apropierea de oricare din frecvențele proprii dominante ale structurii. (Hikami, 1988)

II.2.3. Coeficient aerodinamic și coeficient de liftare (Batchelor, 1967)

În mecanica fluidelor, coeficientul aerodinamic (notat de regulă C_D) este o unitate adimensională folosită pentru a determina rezistența unui obiect aflat într-un mediu fluid. Acesta este folosit pentru determinarea forței exercitate de fluidul aflat în mișcare asupra obiectului, pe direcția sensului de curgere. (Batchelor, 1967)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{II.3})$$

Unde F_D – forța indusă de fluid asupra obiectului, în lungul direcției de curgere, ρ – densitatea fluidului v – viteza de curgere, iar A – aria de referință

Coeficientul de liftare (notat în general cu C_L) este de asemenea o unitate adimensională care, spre deosebire de coeficientul de tragere, este folosită la determinarea forței de liftare exercitată de fluid asupra obiectului pe lângă care trece (pe direcție transversală curgerii).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{II.4})$$

Unde F_L – forța indusă de fluid asupra obiectului, perpendicular pe direcția de curgere

II.2.4. Numărul Scruton

Este un parametru adimensional foarte des folosit în mecanica fluidelor pentru determinarea amortizării răspunsului structural indus de vânt. În general amortizarea fenomenelor de instabilitate induse de vânt se consideră pe baza acestui număr. (Hikami, 1988)

$$S_C = \frac{m \cdot \xi}{\rho \cdot D^2} \quad (\text{II.5})$$

Unde m – masa pe unitatea de volum, ξ – fracțiune din amortizarea critică a structurii, D – lățimea obstacolului, iar ρ – densitatea fluidului

În general, studiile teoretice dar și observațiile asupra cablurilor au arătat că pentru valori ale numărului Scruton de peste 10, vibrațiile induse de fenomenele uzuale la care sunt expuse acestea se amortizează și nu ating valori critice care să pună în pericol rezistența sau stabilitatea structurală. (Hikami, 1988)

De regulă, din cei 4 parametri care compun numărul Scruton, doar amortizarea se poate modifica prin soluții ingineresti, ceilalți fiind fixați din alte considerente. Masa cablului depinde de numărul de toroane rezultat din calculul de rezistență, diametrul exterior rezultă în funcție de numărul de toroane, astfel încât acestea să aibă loc în interiorul tecii de protecție, iar densitatea aerului este impusă de zona în care este amplasată lucrarea, dar de regulă nu variază.

Practica inginerescă pentru amortizarea vibrațiilor hobanelor presupune determinarea numărului Scruton, iar în funcție de valoarea acestuia, introducerea de dispozitive de disipare a energiei care să crească amortizarea. De regulă, cablurile scurte nu necesită nici un fel de dispozitiv, dar pe măsură ce lungimea acestora crește, devine necesară adoptarea de diverse soluții pentru creșterea amortizării.

II.3. Soluții constructive și sisteme utilizate pentru atenuarea vibrațiilor cablurilor

II.3.1. Profilarea tecilor cablurilor

Pentru a diminua vibrațiile cauzate de combinația vânt-ploaie, pe exteriorul tecilor hobanelor se realizează diverse profile reliefate care perturbă scurgerea și împiedică formarea firișoarelor de apă. Acestea nu opresc total fenomenul, dar reduc substanțial efectele acestuia.

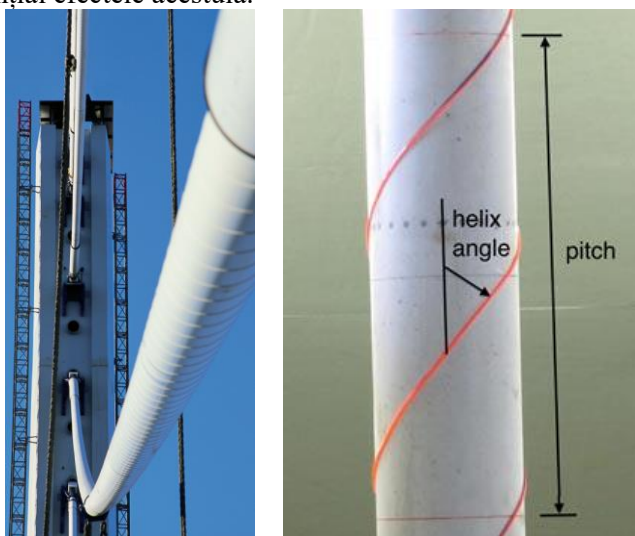


Figura II-1 – Teci profilate (Wind tunnel investigations of an inclined stay cable with a helical fillet, 2014)

Cel mai des adoptat profil este sub forma unei sârme elicoidale la exteriorul tecilor, continuă pe toată lungimea hobanei. Aceasta este atât ușor de realizat, cât și de întreținut în timp. În prezent se află în derulare studii pentru a găsi forme mai eficiente.

II.3.2. Cabluri suplimentare transversale

Sunt tiranți transversali care creează legături între hobanele principale sau între acestea și suprastructură în puncte cheie. Scopul principal este de a schimba forma deformată a cablului pentru a estompa vibrațiile într-un anumit mod propriu. Ca efect secundar favorabil, faptul că punctele de fixare sunt pe hobanele adiacente care au fiecare caracteristici dinamice diferite face ca acestea să interacționeze între și să se scoată reciproc din rezonanță.

Primul și cel mai cunoscut exemplu de pod hobanat la care s-a adoptat acest sistem este Podul Normandy peste râul Sena din Franța. Acesta are o deschidere principală de 856m, o lungime totală de 2143m și o lățime de 23.60m. Dinspre fiecare pilon spre deschideri pleacă câte 3 seturi de tiranți transversali dispuși la distanță egală. Scopul acestora este de a aduce oscilațiile hobanelor spre modul 4 de vibrație.



Figura II-2 – Tiranți transversali pe podul Normandy (Wikipedia, 2019)

Tiranții transversali creează legături rigide între hobane. Acestea nu au rolul de a amortiza efectiv vibrațiile, ci de a modifica perioadele și modurile proprii de vibrații, favorizându-le pe cele superioare care au amplitudini mai mici. În aplicarea acestei soluții trebuie să se țină seama și de faptul că un număr prea mare de tiranți transversali poate deveni inestetic.

II.3.3. Mase discrete

II.3.3.1. Mase discrete cu sisteme de fixare elastice

Sistemul de atenuare a vibrațiilor bazat pe mase discrete presupune fixarea în anumite puncte ale cablurilor, a unor resoarte cu greutate. Acestea au ca scop modificarea caracteristicilor dinamice ale cablului (moduri, perioade și frecvențe proprii de vibrație) pentru a evita fenomenul de rezonanță.

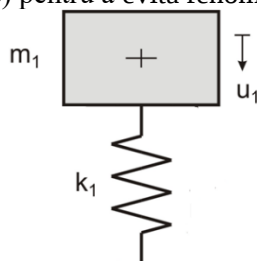


Figura II-3 - Model matematic pentru mase acordate (Habib Tabatabai, 2003)

Principalele avantaje constau în:

- rezistența mare în timp, deoarece toate componentele sunt mecanice și robuste
- insensibilitatea față de variațiile puternice de temperatură
- costuri relativ mici atât pentru aparatul în sine, cât și pentru întreținerea sa

Principalele dezavantaje:

- sunt eficiente doar pentru anumite intervale de amplitudini și perioade ale oscilațiilor, pentru care au fost calculate
- dificil de manipulat în situ, deoarece au greutate relativ mari și trebuie amplasate în locuri greu accesibile (în general spre mijlocul cablurilor)

Primele modele ale unor astfel de aparate erau alcătuite din 2 blocuri de beton legate între ele prin intermediul unei tije care la rândul ei era fixată de cablu la o distanță care să permită mișcare relativă între acesta și greutate.

În ziua de azi se folosesc mase metalice în locul blocurilor din beton. Acestea sunt goale în interior și pot avea diferite forme geometrice cum ar fi: sferă, cilindru, con, clopot. Modelele mai noi au greutățile inegale, ceea ce le permite să funcționeze eficient pe un interval mai mare de frecvențe.

Poziționarea maselor în lungul cablului depinde și de modul propriu de vibrație vizat. De regulă se evită zonele de amplitudine maximă sau de inflexiune. Amplasarea ar trebui teoretic să crească numărul de semiunde care se formează în modul respectiv și astfel să ducă la o scădere a deplasărilor maxime.

Când sunt dimensionate corect, construite și instalate bine, masele absorb eficient energia nedorită din hobană și chiar o disipă intern, reducând astfel semnificativ deformațiile nedorite și o dată cu acestea, degradările timpurii care pot să apară.

II.3.3.2. Mase discrete cu sisteme de fixare vâscoase

Acestea reprezintă o tehnologie relativ nouă care presupune introducerea în interiorul masei acordate a unui mecanism histeretic de disipare de energie pe cale vâscoasă. Momentan nu a fost implementat în nici o lucrare, dar există multe cercetări promițătoare.

Deși mecanismul de disipare își pierde eficiența datorită lipsei legăturii cu un element rigid în care să se poată descărca forțele rezultate, poziția mult mai bună în lungul cablului dă o eficiență sporită dispozitivului. Pentru moment acest tip de soluție este încă în stadiu de concept.

II.3.4. Amortizori externi

II.3.4.1. Principiul amortizorilor externi

Cea mai des folosită metodă pentru asigurarea unui nivel suficient de mare de amortizare în hobane, astfel încât să se evite degradări ale elementelor structurale, este atașarea de amortizori transversali externi. Aceștia au rolul de a disipa energia din cabluri și a reduce amplitudinile vibrațiilor la un nivel acceptabil. Ideal ar fi ca aceștia să fie fixați cât mai aproape de mijlocul cablurilor, datorită limitărilor pe criterii fizice, sunt atașați aproape de tablierul, la aproximativ 1%-3% din lungimea cablului.

Aceste dispozitive, numite și disipatori de energie, funcționează prin generarea unei forțe în amortizor, ca răspuns la deformațiile datorite deplasărilor din cablu. Produsul dintre acestea generează lucru mecanic, care disipă astfel energia și reduce amplitudinile vibrațiilor. Capacitatea de disipare de energie per ciclu este exprimată în histeresisul amortizorului. Cu cât este mai mare aria delimitată de acesta, cu atât mai bună capacitatea de disipare de energie.

În funcție de modul de funcționare, aceștia se pot împărți în 3 mari categorii, în ordinea eficienței lor, după cum urmează:

- amortizori elastomerici – se bazează pe capacitatea cauciucurilor speciale din componența lor de a se deforma după 2 paliere, unul elastic și unul plastic,
- amortizori vâscoși – se bazează pe forța generată la trecerea unui lichid special printr-un piston cu orificii speciale la capăt
- amortizori pe bază de frecare – se bazează pe forța generată pe o suprafață de frecare la mișcarea acestuia

II.3.4.2. Amortizori elastici și cu frecare

Amortizorii elastici reduc oscilațiile din cablu prin înmagazinarea și disiparea energiei intern, în materialele componente. Acest lucru se realizează prin lucrul mecanic dat de forțele interne elastice și în special plastice. Aceștia funcționează prin deformarea sub forță tăietoare a unui elastomer special, cu comportare elasto-plastică bine definită.

Un mod de funcționare similar au și amortizorii pe bază de frecare care, prin intermediul unor forțe de precomprimare interne, generează forțe de răspuns în urma deplasării cablului. Forța de precomprimare este absolut necesară și destul de greu de menținut. Practica a arătat că numărul foarte mare de repetiții degradează prematur acest gen de dispozitive, motiv pentru care nu se prea folosesc în cazul hobanelor.

Principalul lor avantaj față de ceilalți amortizori este dat de dimensiunile mai mici și de instalarea mai facilă. Dezavantajul lor constă în faptul că nu pot admite decât deformații reduse, ceea ce diminuează mult capacitatea lor de a disipa energie.

Faptul că toate caracteristicile lor de amortizare sunt dependente de proprietățile materialelor componente, face acești amortizori foarte dependenți de temperatura exterioară. Elastomerul devine foarte flexibil la temperaturi ridicate și foarte rigid la temperaturi joase, o scădere bruscă putând duce chiar la ruperea acestuia. De asemenea, în cazul celor pe bază de frecare, coeficientul de frecare dintre cele 2 materiale este puternic influențat de temperatura exterioară și de umiditatea mediului.

Formula de calcul pentru forța dată de un amortizor elastic:

$$F = y_d \cdot K_{eff} = y_{el} \cdot K_{el} + (y_d - y_{el}) \cdot K_{pl} \quad (II.6)$$

Unde: y_d, y_{el} – deplasarea totală, respectiv cea elastică

K_{eff}, K_{el}, K_{pl} – rigiditatea efectivă, cea elastică, respectiv cea plastică

II.3.4.3. Amortizori vâscoși

Amortizorii vâscoși sunt dispozitive compuse din cilindri cu pistoane care au orificii în cap prin care este lăsat să treacă un fluid special, pentru a disipa energie.

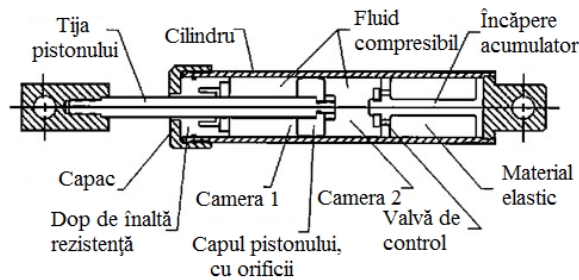


Figura II-4 – Schiță amortizor vâcos (Main, 2002)

Astfel de dispozitive sunt formate din 2 camere, separate de capul pistonului, în care se află un lichid compresibil pe bază de silicon. Orificiile permit lichidului să circule dintr-o cameră în alta, o dată cu mișcarea pistonului. Forța este generată ca rezultat al diferenței de presiune dintre capul pistonului și compresiunea din lichid. (Main, 2002)

Astfel, forța dată de amortizor este dependentă de viteza pistonului și nu de deformația acestuia. Pentru a evidenția acest lucru, în continuare sunt prezentate grafice ale forței în funcție de deformație, respectiv viteză:

Modelul matematic care stă la baza relațiilor de calcul este format dintr-un arc de rigiditate K , înseriat cu un piston de vâscozitate C . Pe lângă acestea, mai există un paramtru important, care determină influența vitezei asupra libertății de circulare a lichidului dintr-o cameră în alta, care este notat în continuare cu α . În funcție de acest coeficient, curbura în diagrama de forță deplasare va fi mai mică sau mai mare. Conform înregistrărilor din laboratoare, valorile extreme pentru acest paramtru sunt 0.15 și 2.

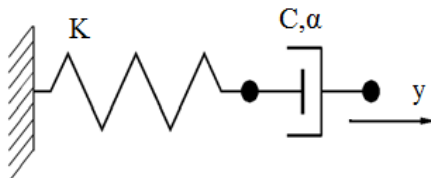


Figura II-5 – Model matematic amortizor vâcos (Main, 2002)

Formula de calcul a forței generate de amortizor este:

$$F = K \cdot y_d + C \cdot v_d^\alpha, \quad (II.7)$$

Unde K este rigiditatea liniară a amortizorului, y_d deplasarea pistonului, C coeficientul de vâscozitate al lichidului, v_d viteza în capul pistonului și α exponentul vitezei, caracteristică a lichidului.

În urma studiilor efectuate, literatura de specialitate specifică formula de calcul pentru coeficientul optim de vâscozitate în funcție de modul propriu de vibrație vizat (Main, 2002):

$$c_i^{opt} = \frac{1}{i \cdot \pi \cdot \frac{x_d}{L}} \cdot \sqrt{T \cdot m}, \quad (II.8)$$

unde i este numărul modului propriu de vibrație vizat

x_d lungimea în lungul cablului de la capăt la poziția amortizorului

L lungimea totală a cablului

T tensiunea în cablu

m masa pe metru liniar a cablului

c_i^{opt} – coeficientul de vâscozitate optim pentru amortizorul vâcos corespunzător modului propriu de vibrație “ i ” al cablului

II.3.5. Amortizori semiactivi - magneto-reologici

Amortizorii magneto-reologici sunt disipatori semi-activi care își pot modifica proprietățile folosind lichide magneto-reologice. Acestea au abilitatea de a-și schimba starea din lichidă în semi-solidă într-o manieră continuă și în totalitate reversibilă prin intermediul unui câmp magnetic. (Erik A. Johnson, 2007)

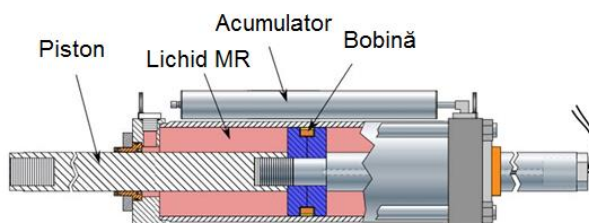


Figura II-6 – Schiță amortizor magneto-reologic (Maurer, 2020)

Lichidul magneto-reologic este un ulei special, care introdus într-un câmp magnetic, își modifică vâscozitatea aparentă până ajunge la stadiul vâsco-elastic. Mai important este faptul că rezistența lui poate fi controlată cu mare precizie, prin varierea intensității câmpului magnetic.

Modelul matematic care stă la baza calculului forței din amortizor este puțin mai complex ca la restul, implicând mai multe componente. Trebuie reținut că toate constantele de la celelalte modele, cum sunt vâscozitatea sau rigiditatea elastică sunt aici variabile care depind de intensitatea curentului electric.

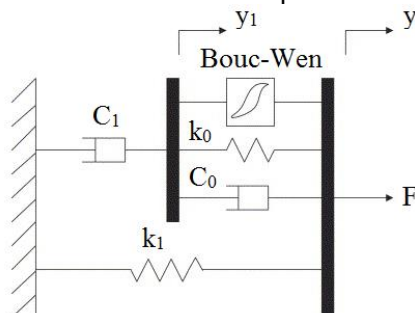


Figura II-7 – Model matematic amortizor magneto-reologic (Erik A. Johnson, 2007)

II.4. Exemple de probleme și degradări structurale cauzate de vibrațiile cablurilor

II.4.1. Podul Dubrovnik

Podul Dubrovnik traversează Râul Dubrovacka spre intrarea vestică în orașul cu același nume și este singurul pod hobanat din Croația. Este un pod asimetric, alcătuit dintr-o structură în cadru executată în consolă cu o deschidere laterală spre Split de 87.35m și o consolă spre deschiderea centrală de 60.05m, cu secțiune casetată din beton, continuată cu structură hobanată asimetrică, cu un singur pilon și o lungime de 244.00m în deschidere centrală și una laterală de 80.70m spre Dubrovnik, alcătuite dintr-o secțiune mixtă oțel-beton. Cele 2 structuri sunt legate prin intermediul unei legături de tip articulație (Z. SAVOR, 2006).

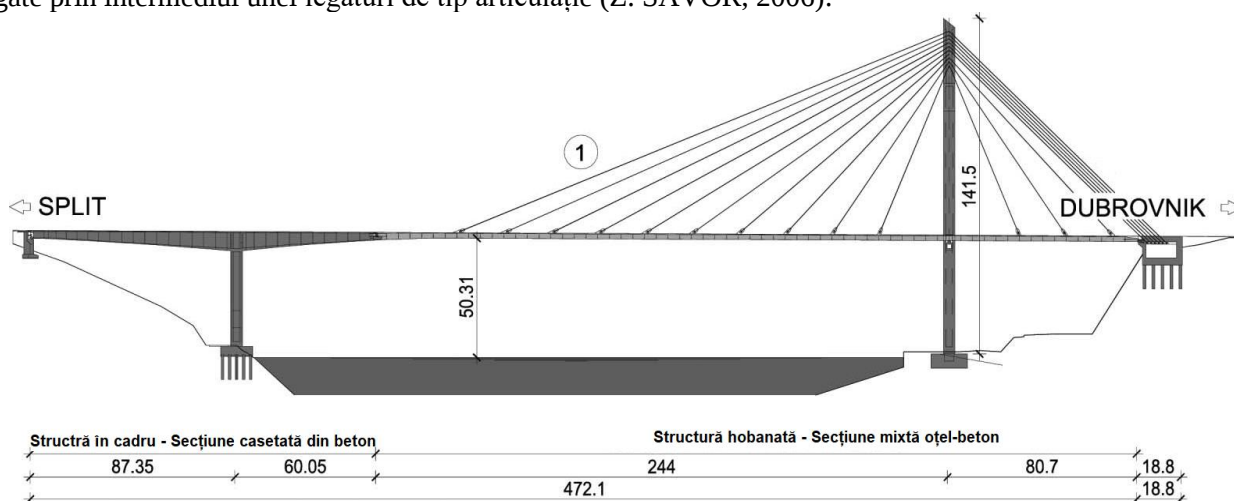


Figura II-8 – Secțiune longitudinală a podului Dubrovnik (Z. SAVOR, 2006)

În sens longitudinal, hobanele sunt dispuse într-un sistem tip “evantai” modificat. În sens transversal, cablurile sunt dispuse după 2 planuri înclinate și sunt alcătuite din fascicule de toroane paralele galvanizate, protejate în teci de PEID cu diametrul de 225mm injectate cu ceară. Numărul de toroane din fiecare hobană variază între 27-61, iar cele mai lungi 6 cabluri sunt de 134.80m, 152.40m, 170.50m, 188.90m, 207.70m, respectiv 226.70m (Z. SAVOR, 2006).

La scurt timp după deschiderea traficului în 2002, în timpul unei ploi ușoare combinată cu vânt de viteză moderată între 12.9-14.7m/s, au fost observate vibrații puternice ale celor mai lungi hobane din deschiderea principală. Au fost excitate cele mai lungi 3 cabluri, iar vibrațiile s-au oprit abia la 20 de minute după încetarea ploii. S-au înregistrat 12 incidente similare în următorul an cu vibrații ale hobanelor de amplitudine mare și frecvență joasă în timpul ploilor ușoare acompaniate de vânt cu viteză medie. În urma fiecărui incident, s-au realizat inspecții vizuale ale hobanelor, respectiv ancorajelor acestora și, întrucât nu s-au observat degradări, s-a considerat că nu sunt necesare măsuri preventive (Z. SAVOR, 2006).

În martie 2005, în timpul unei furtuni puternice de zăpadă, aproape toate hobanele au început să vibreze în mod violent, în special în deschiderea principală. Aceste vibrații au fost acompaniate de o huruiă puternică cauzată de frecarea toroanelor între ele. S-au observat de asemenea mișcări ale suprastructurii caracteristice fenomenelor de încovoiere combinată cu torsiune. Aceste oscilații au durat aproximativ 2 ore, iar din analiza

înregistrărilor video s-a concluzionat că cea mai lungă hobană oscila în special în plan vertical cu o frecvență de 1.27Hz, corespunzătoare celui de-al doilea mod propriu de vibrație (Z. SAVOR, 2006).

Oscilațiile au fost atât de puternice încât 2 hobane s-au izbit de stâlpii de iluminare, dărâmandu-i pe aceștia și degradând local tecile de protecție din PEID (*Figura II-9*). Distanța minimă între cabluri și stâlpi era de 85cm, deci s-au putut estima amplitudini maxime de aproximativ 2.50m. Una din tecile de protecție s-a rupt în dreptul unui rost, lăsând cablul expus pe o lungime de aproximativ 7.50m (*Figura II-9*). De asemenea, un număr semnificativ din șuruburile pretensionate M24 din dreptul ancorajelor de pe pilon s-au rupt (**Error! Reference source not found.**). Similar au fost degradate și ancorajele de la nivelul tablierului, dar în acest caz șuruburile doar sau slăbit (Z. SAVOR, 2006).

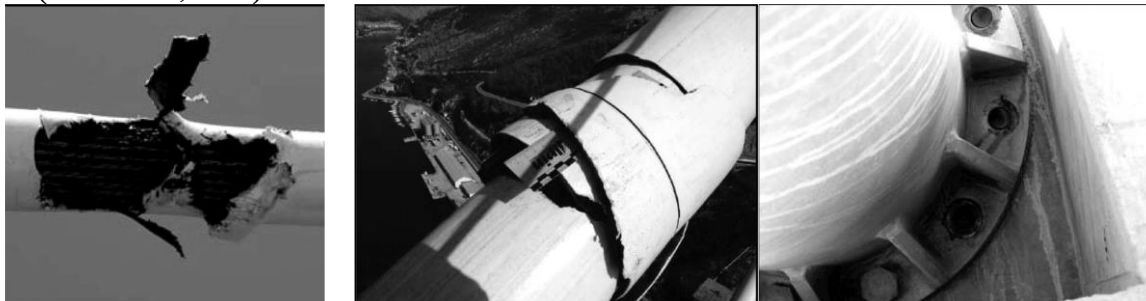


Figura II-9 – Degradări ale tecii de protecție și șuruburi distruse în zona ancorajului (Z. SAVOR, 2006)

Cu un an mai târziu, în luna mai 2006, o altă furtună puternică de zăpadă s-a abătut asupra podului, inducând vibrații puternice la cele mai lungi 6 hobane ale podului din deschiderea principală, acompaniate de mișcări ale suprastructurii de încovoiere cu torsiune, similare cu primul incident. Oscilațiile au durat aproximativ 6 ore. Teaca de protecție reparată anterior s-a rupt de-a lungul sudurii și a fost aruncată în mare, iar o mare parte din șuruburile înlocuite au fost din nou rupte, fiind găsite pe suprastructură (Z. SAVOR, 2006).

Pentru reabilitare a fost aleasă soluția de amortizare a vibrațiilor prin intermediul amortizorilor externi atașați cablurilor (**Error! Reference source not found.**). Au fost folosiți amortizori magneto-reologici, montați la cele mai lungi 6 cabluri de pe deschiderea principală și la toate cablurile de pe cea secundară. Acestea au rolul de a reduce vibrațiile doar în plan vertical, considerându-se că nu este necesară amortizare suplimentară și în plan orizontal. Deși s-a început instalarea acestora încă după primul incident major din anul 2005, lucrările au durat mai bine de un an, fiind realizate sub trafic, astfel apărând și cel de-al doilea incident. Însă după terminarea lucrărilor nu au mai fost înregistrate astfel de evenimente (Z. SAVOR, 2006).

II.4.2. Podurile „Veterans Memorial” și “Fred Hartman” – Texas, S.U.A. (Felix Weber G. F., 2006)

Cele două poduri hobanate din statul Texas – S.U.A. au fost terminate în anii 1991, respectiv 1995 și au fost subiectul unei investigații elaborate legată de vibrația cablurilor, ce a culminat în anul 2004 cu instalarea unor amortizori vâscoși pe ambele structuri.

Podul „Veterans Memorial” este localizat în portul Arthur și are o lungime totală de 380m, cu 3 deschideri de 92.50-195.00-92.50m. Secțiunea transversală a tablierului este alcătuită dintr-o casetă de beton cu lățimea de 17.00m. Pilonii sunt de tip “H”, cu înălțimea totală de 95.00m și un total de 112 hobane dispuse în 2 planuri și aranjate în sistem harpă.

Podul “Fred Hartman” traversează Canalul Houston în La Porte și are o lungime totală de 4km, din care structura hobanată are 754m, fiind alcătuită din 3 deschideri de 187.00-380.00-187.00m. Secțiunea transversală a tablierului este de tip mixt oțel-beton și este alcătuită din grinzi cu inimă plină solidarizate prin antretoaze și o placă de beton. Pilonii sunt de tip “diamant” având ancorate 192 de hobane dispuse în 2 planuri și aranjate în sistem evantai.



Figura II-10 – Podurile „Veterans Memorial” și “Fred Hartman” (Wikipedia, 2021)

Din anul 1997 a început un proces de monitorizare atentă a celor 2 structuri, observându-se vibrații puternice ale hobanelor în timpul ploilor. Aceste oscilații au atins amplitudini de vârf de peste 10 ori diametrul hobanelor la unele din cabluri, mișcarea având loc de regulă după unul din cele 3 moduri principale de vibrație.

Din condițiile meteorologice generale care induceau aceste vibrații puternice s-au remarcat 2 caracteristici principale, determinate ca fiind definitorii și anume intensitatea slab spre moderată a ploii, respectiv a vântului. Oscilații nu au fost înregistrate în timpul ploilor sau vânturilor prea puternice.

Până la un anumit nivel, vibrațiile induse de combinația vânt-ploaie la cele 2 structuri păreau a nu fi influențate de lungimea deschiderilor sau a hobanelor. Deși unul din poduri are deschiderea principală de 2 ori mai mare decât celălalt, la ambele poduri s-au înregistrat oscilații puternice ale hobanelor și degradări semnificative ale sistemelor de protecție. Cu toate acestea, amplitudinile înregistrate pe podul “Fred Hartman” au avut un grad mai mare de severitate, una din explicații fiind flexibilitatea mai mare a suprastructurii care părea că transferă o mare parte din energia proprie la hobane.

Inspecțiile periodice au scos la iveală peste 100 de suduri rupte ale tecilor de protecție a hobanelor, dar și la anumite detalii ale ancorajelor, probabil cauzate de deformațiile mari și a oboselii. Măsurători mai detaliate au arătat și probleme mari la stratul de protecție anticorozivă injectat în hobane, scăzând la un nivel periculos de mic durabilitatea și rezistența la coroziune a cablurilor.

Conform (Caetano), au fost propuse multiple scenarii de punere în siguranță a structurilor împotriva vibrațiilor, dintre care s-au ales inițial 2, fiecare fiind testat local pe poduri, cu scopul stabilirii celui mai eficient.

Primul scenariu propunea legarea hobanelor cu un set de cabluri transversale, cu scopul de a reduce perioadele proprii de vibrație ale cablurilor sub 0.5s și de a crește amortizarea internă.

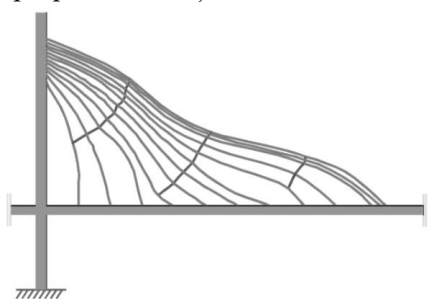


Figura II-11 – Cabluri transversale de rigidizare a hobanelor (Caetano)

Deși acest sistem a fost testat pe structuri și a arătat că funcționează conform așteptărilor, soluția adoptată în final pentru ambele poduri, pe baza eficienței mult mai mari, a constat în montarea de amortizori vâscoși la nivelul suprastructurii pe toate hobanele.

Conform (Caetano), acest sistem a dus la o creștere semnificativă a amortizării, ceea ce a permis reducerea amplitudinilor oscilațiilor cablurilor mult mai eficient și pe un interval mai mare de perioade. Montarea finală s-a realizat după o perioadă de mai bine de doi ani de la instalarea și testarea primului dispozitiv. În urma definitivării lucrărilor, la nici unul din cele 2 poduri nu s-au mai înregistrat probleme legate de vibrațiile hobanelor, deși monitorizarea lor continuă până în ziua de azi.

II.5. Exemple de utilizare a sistemelor de amortizare a vibrațiilor

II.5.1. Podul Normandy

Podul Normandy, inaugurat în anul 1995 în Franța între regiunile La Havre și Honfleur, este prima structură hobanată la care s-au considerat, încă din faza de proiectare, efectele vibrațiilor cablurilor. Cu o deschidere principală de 856.00m și o lungime totală de 2141.00m, a stabilit recordul pentru cea mai mare deschidere pentru poduri cu hobane, la momentul terminării.

Pilonii în formă de “A” au înălțimea totală de 214.77m, iar tablierul se află la aproximativ 60.00m deasupra nivelului apei, rezultând astfel lungimea maximă a hobanelor de peste 450.00m. Pentru a reduce vibrațiile acestora, au fost folosiți tiranți transversali, dispuși în 4 planuri pe fiecare deschidere de-a lungul hobanelor cele mai lungi, legând toate cablurile până la nivelul tablierului. La momentul respectiv acestea erau tehnologii de ultimă oră în domeniu și nu mai fuseseră aplicate în altă parte.



Figura II-12 – Podul Normandy și tiranții transversali (Jacobs, 2012)

Soluția s-a dovedit a fi una de succes, până în prezent structura neavând nici un fel de probleme din acest punct de vedere. La momentul dării în exploatare, podul a atins 2 recorduri, dintre care unul pentru cea mai mare deschidere și al doilea pentru prima structura cu sisteme de atenuare a vibrațiilor cablurilor prevăzute încă din faza de proiectare.

II.5.2. Podul Sutong

Cu o deschidere principală de 1088m și două marginale de câte 300m, Podul Sutong a stabilit recordul pentru cea mai mare deschidere a unui pod hobanat în anul 2008. Acesta traversează râul Yangtze și asigură legătura între orașele Suzhou și Nantong din China, având o lungime totală de 8206m.

Pilonii în formă de „A” au o înălțime impresionantă de 306m, iar hobanele ajung până la 541m lungime. Pentru a asigura toate criteriile de rezistență și stabilitate, au fost realizate o serie de teste asupra comportării hobanelor, printre care unele chiar la scară reală. În urma acestora, a fost adoptat un sistem complex de amortizare a vibrațiilor cablurilor alcătuit din amortizori pasivi și semi-activi.

Podul Sutong, are un număr de 272 hobane cu lungimi între 154m și 541m. S-a decis atenuarea vibrațiilor cu amortizori vâscoși pasivi la hobanele numerele 10 ($L=228m$, $T=1.785s$) până la 28 ($L=472m$, $T=3.571s$), iar la cele mai lungi 6 hobane, respectiv numerele 29 ($L=483m$, $T=3.584s$) până la 34 ($L=541m$, $T=4.002s$) cu amortizori magneto-reologici.



Figura II-13 – Amortizori pe podul Sutong, China (Felix Weber H. D., 2014))

Dispozitivele au fost montate perpendicular pe cabluri în planul vertical al acestora, la 3.50m deasupra tablierului. Ancorajele sunt situate la 1.30m sub nivelul căii, rezultând astfel o poziție relativă a aparatelor de aproximativ 2.30% din lungimea cablului. Fiecare hobană are montat câte un senzor individual care transmite datele la o unitate centrală de comandă, poziționată în interiorul tablierului ce poate controla toți cei 12 amortizori. Ca măsură suplimentară, fiecare aparat este legat la acumulatori externi, capabili să asigure funcționarea pentru cel puțin 48 de ore de la întreruperea curentului.

Sisteme similare au fost folosite și în cazurile podurilor Franjo Tujman de lângă Dubrovnik, Croația, sau podul Alamillo din Sevilla, Spania, unde a fost implementat ca măsură de reabilitare.

Testarea sistemului s-a realizat pe un model fizic în anul 2007, pe un cablu similar cu cel de la Podul Sutong, cu lungimea de 228m.

Rezultatele încercării au arătat că atât ipotezele de calcul, cât și sistemele de control funcționau corect, înregistrându-se o amortizare de 7.5%. Au fost de asemenea scoase în evidență influența rigidității reale a cablului, care s-a dovedit a fi mai mică decât valorile teoretice, și rotirea din ancoraje, care a reieșit mai mare decât fusese considerat în ipotezele de calcul.

II.5.3. Podul Russky

Podul Russky de lângă Vladivostok, care face legătura între Insula Russky și Peninsula Muravyov-Amursky, terminat în anul 2012, deține în prezent recordul mondial pentru cea mai mare deschidere a unui pod hobanat, de 1104m.



Figura II-14 – Podul Russky (<https://structurae.net/en/structures/russky-bridge>)

Structura are o lungime totală de 1885.50m, alcătuită din multiple deschideri de 60-72-3x84m-1104-3x84-72-60m.

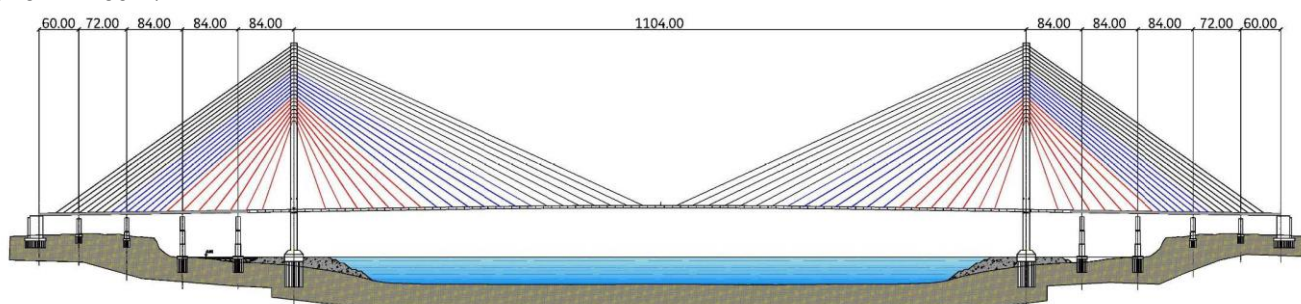


Figura II-15 – Schiță Podul Russky (Mellier, 2014)

Pilonii sunt în formă de “A” cu 3 rigle de rigidizare dintre care una la nivelul tablierului și au înălțimea de 319m. Structura hobanată conține un număr 168 cabluri dispuse în sistem de evantai cu lungimi cuprinse între 135m și 582m, deținând și recordul pentru cea mai lungă hobană.

Pentru a asigura stabilitatea și a menține podul în exploatare chiar și în timpul celor mai severe furtuni, pentru care s-au luat în calcul viteze medii ale vântului de până la 36m/s, a fost adoptat un sistem complex de amortizare a vibrațiilor monitorizat în permanență de un număr de 48 accelerometre și 48 celule de presiune pe fiecare pilon, după cum urmează:

- la hobanele mai scurte cu numere de la 1 la 16 s-au montat amortizori vâscoși pasivi
- la hobanele cele mai lungi de la 17 ($L=483\text{m}$, $T=3.571\text{s}$, $a/L=2.6\%$) până la 21 ($L=580\text{m}$, $T=4.165\text{s}$, $a/L=2.3\%$) au fost montați amortizori magneto-reologici (unde a/L este poziția relativă a dispozitivului în lungul cablului)

Spre deosebire de podul Sutong, pentru a reduce consumul de curent, în acest caz s-a montat câte o unitate de control pentru fiecare aparat și senzori accelerometre direct pe cabluri la aproximativ 28.00m de la nivelul căii. De asemenea, dispozitivele folosite la acest pod includ câte 2 amortizori, pentru a putea atenua și vibrațiile din plan orizontal. Cea mai mare inovație la acest sistem constă însă în faptul că amortizorii magneto-reologici au și senzori de temperatură și pot face corecțiile necesare pentru a asigura parametrii optimi pe un interval mare de temperaturi între -40°C și $+60^{\circ}\text{C}$.

CAPITOLUL III – ANALIZA VIBRAȚIILOR CABLURILOR PRIN METODE NUMERICE

III.1. Generalități

Ca în multe alte cazuri din domeniul construcțiilor, studiul vibrațiilor cablurilor presupune situații de proiectare cu mulți parametri variabili în timp și cu probleme matematice de o complexitate foarte ridicată ce nu se pot rezolva prin metode analitice. Cea mai bună abordare inginerască pentru rezolvarea acestor probleme este evident una bazată pe metode numerice, și mai exact, pe metode de calcul cu elemente finite.

Această abordare întâmpină însă o serie de obstacole ce trebuie depășite plecând chiar de la formularea elementelor folosite, discretizarea și chiar tipul de analiză. Fenomenele ce trebuie modelate matematic țin de 2 ramuri distincte ale ingineriei civile, și anume mecanica fluidelor, care este necesară pentru a simula mediul

exterior în care se mișcă cablul, respectiv mecanica structurală care trebuie să determine starea internă de eforturi și deformații în cablu.

Discretizarea trebuie să fie una cât mai fină pentru a putea reproduce efecte de ordinul II în cablu, dar spațiul modelat trebuie să fie suficient de mare, astfel încât să poată cuprinde fenomenele aeroelastice ce se dezvoltă în jurul acestuia, rezultând astfel un număr foarte mare de elemente finite.

Pentru a putea simula cât mai fidel variația de efort-deformație la nivelul cablului și a putea trage concluzii asupra tipului de oscilații ce se produc în acesta, tipul de analiză adoptat nu poate fi de tip static, ci neapărat dinamic. Este de așteptat ca hobanele modelate să manifeste neliniarități geometrice, iar circulația aerului să descrie mișcări cu un grad înalt de turbulență.

III.2. Modele numerice pentru simularea vibrațiilor cablurilor

III.2.1. Probleme în modelarea vibrațiilor cablurilor

Principalele probleme întâmpinate în modelarea răspunsului dinamic al unei hobane este complexitatea analizelor care necesită o putere mare de calcul și stabilirea acurateții rezultatelor obținute.

Cea mai corectă simulare a vibrațiilor cablurilor sub acțiunea forțelor exterioare presupune discretizarea cablului cu elemente finite specifice mecanicii structurale, discretizarea mediului înconjurător cu elemente finite specifice mecanicii fluidelor și simularea interacțiunii între cele 2 tipuri de elemente, toate acestea în cadrul unor analize time-history cu un grad mare de neliniaritate. Această metodă presupune un calcul foarte laborios care nu va genera întotdeauna cele mai bune rezultate. Fiind vorba de un nivel atât de înalt de complexitate, rezultatele trebuiesc validate pe baza unor modele la scară, care de multe ori nu pot reflecta exact răspunsul dinamic datorită discrepanțelor mari între dimensiunile reale ale hobanelor care ajung al sute de metri și modelele la scară redusă care nu pot fi de regulă mai mari de câțiva metri.

III.2.2. Propunerea unei metode simplificate pentru simularea vibrațiilor cablurilor

III.2.2.1. Prezentarea algoritmului de calcul

În urma celor prezentate la capitolele anterioare, se poate afirma că simularea vibrațiilor cablurilor implică un grad mare de complexitate ce poate face subiectul multor lucrări de cercetare. Unul din obiectivele acestei lucrări este de a găsi o metodă simplificată de realizare a acestei analize, mai la îndemâna inginerilor implicați în concepția sau proiectarea unor structuri cu hobane. Ideea este de a introduce o serie de ipoteze simplificatoare care să facă mai accesibile aceste analize și a le compara cu analize mai detaliate, precum și modele la scară, în vederea stabilirii corectitudinii ipotezelor și a preciziei rezultatelor obținute.

O primă ipoteză simplificatoare este de limitare a interacțiunii între aer și teacă prin neglijare a efectelor locale asupra acesteia, care oricum de regulă se limitează la nivelul tecii și nu asupra cablului. În acest sens, se propune modelarea excitației ce induce vibrațiile în hobane prin intermediul unei forțe exterioare cu variație sinusoidală ce acționează direct asupra cablurilor de rezistență.

O altă ipoteză este de renunțare la modelarea hobanelor cu elemente finite complexe ce conțin formule matematice pentru comportarea complexă a cablului, în favoarea unei modelări cu multiple elemente finite de tip bară simplă cu câte 2 noduri la capete, fiecare cu câte 6 grade de libertate, similar cu teoria lăncșorului din literatura de specialitate.

Dispozitivele de atenuare a vibrațiilor se vor modela prin intermediul unor elemente finite speciale cu comportare histeretică de tip amortizori vâscoși.

În ceea ce privește amortizarea internă, se propune modelarea prin metoda Rayleigh pentru o amortizare de 0.5% pe primele 5 moduri proprii de vibrație. S-a ales această valoare pe baza studiilor similare în domeniu cum ar fi (Erik A. Johnson, 2007) (Felix Weber H. D., 2014) (Y. L. Xu, 2003) etc, ca fiind una acoperitoare, corespunzătoare celor mai defavorabile scenarii.

În ceea ce privește tipul de analiză, se va studia posibilitatea adoptării analizelor de tip time-history cu suprapunere modală în defavoarea celor cu integrare directă. Prin aceasta, trebuie asumat faptul că în analizele modale se vor pierde efectele de neliniaritate geometrică.

Pentru a stabili corectitudinea acestei abordări și a corecta parametrii considerați, s-a realizat un model la scară redusă într-un tunel de vânt. Studiul este prezentat în continuare.

III.2.3. Validarea algoritmului prin studii experimentale în tunelul de vânt

III.2.3.1. Prezentarea modelului la scară și a măsurărilor efectuate

Scopul acestui studiu este de a determina răspunsul dinamic al unui cablu înclinat sub efectul vântului care acționează perpendicular pe planul pe care acesta îl formează cu proiecția sa la teren și posibilitatea de a extrapola aceste rezultate pentru a simula cât mai corect comportarea hobanelor reale prin metoda elementului finit.

Încercările au fost realizate în tunelul de vânt al Facultății de Hidrotehnică din cadrul Universității Tehnice de Construcții București. Acesta are o lungime de 25.00m și o secțiune pătrată cu latura de 1.75m. Pereții tunelului

sunt realizați în cea mai mare parte din tablă de 2mm și din panouri de plexiglas cu grosimea de 10mm pentru vizibilitate în zonele relevante, fixați pe muchii cu șuruburi de o structură metalică. Aerul din interior este antrenat de o elice poziționată la capătul din aval al tunelului. La capătul opus, unde este priza de aer, există un grătar din oțel cu ochiuri pătrate de aproximativ 1cm cu rolul de a laminariza fluxul vântului.

Cablul folosit la încercări are o secțiune compusă din 3 fire cu diametrul de 3mm (3Ø3) și limita de curgere convențională a materialului $f_t = 1860 \text{ N/mm}^2$. Este același cablu folosit pentru precomprimarea traverselor de cale ferată. Acesta a fost fixat de pereții tunelului în colțuri diagonal opuse pentru a avea o lungime cât mai mare. În colțul de sus a fost atașat prin intermediul unui ancoraj fix (pasiv), iar în cel de jos printr-un ancoraj mobil (activ) alcătuit dintr-un cric mecanic cu capacitatea de 4tone legat la teren.



Figura III-1 – Ancoraj fix

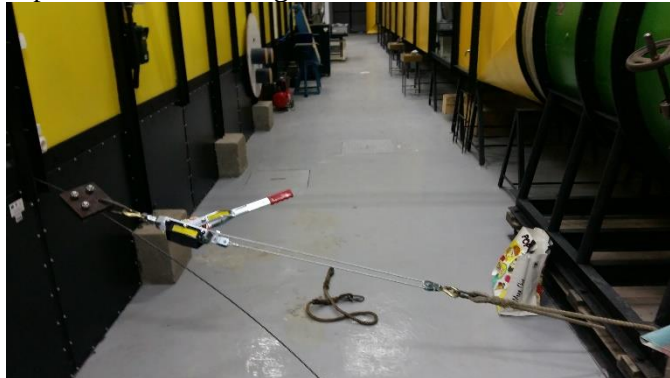


Figura III-2 – Ancoraj mobil

Pentru a spori efectele date de acțiunea vântului și a asigura în același timp o secțiune constantă cu cât mai puține iregularități, cablul a fost introdus într-o teacă rotundă cu diametrul exterior de 50mm și grosimea de 8mm (Ø50x8) din burete, umplută ulterior cu spumă poliuretanică pentru a asigura fixarea de cablu cu influențe minime asupra rigidității acestuia. Greutatea pe metru linier a ansamblului compus din cablu, teacă și spumă este de aproximativ 224 g/m.

Cablul a fost instrumentat cu trei accelerometre tridimensionale montate la un sfert din lungime față de partea superioară, la mijloc, respectiv la un sfert față de partea inferioară. În continuare, acestea vor fi denumite în ordinea precizată “Acc - sus”, “Acc - Centru”, respectiv “Acc - Jos”.

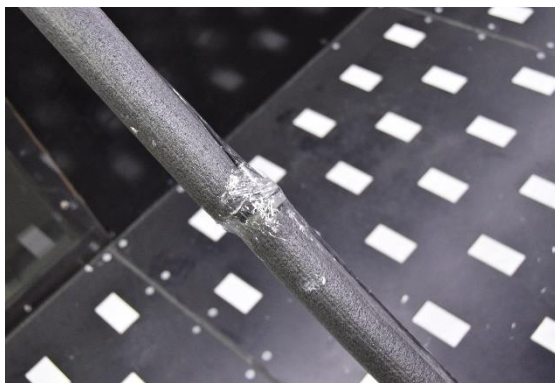


Figura III-3 – Instrumentarea nodurilor cu accelerometre



Figura III-4 – Model la scară final (cablul netensionat)

Accelerometrele folosite au posibilitatea de a înregistra simultan accelerații pe 3 direcții ortogonale cu o frecvență de 1200Hz (o înregistrare la 0.00083s). Acestea au fost montate astfel încât direcția “X” să coincidă cu direcția cablului, direcția “Z” să coincidă cu direcția vântului (orizontal, perpendicular pe cablu), iar direcția “Y” să fie în plan vertical, perpendiculară pe cablu. Întrucât accelerometrele au formă pătrată și pot strica profilul aerodinamic al tecii, acestea au fost fixate în spatele cablului față de direcția în care urma să bată vântul și acoperite cu bandă adezivă pentru a imita cât mai fidel profilul aerodinamic al tecii.

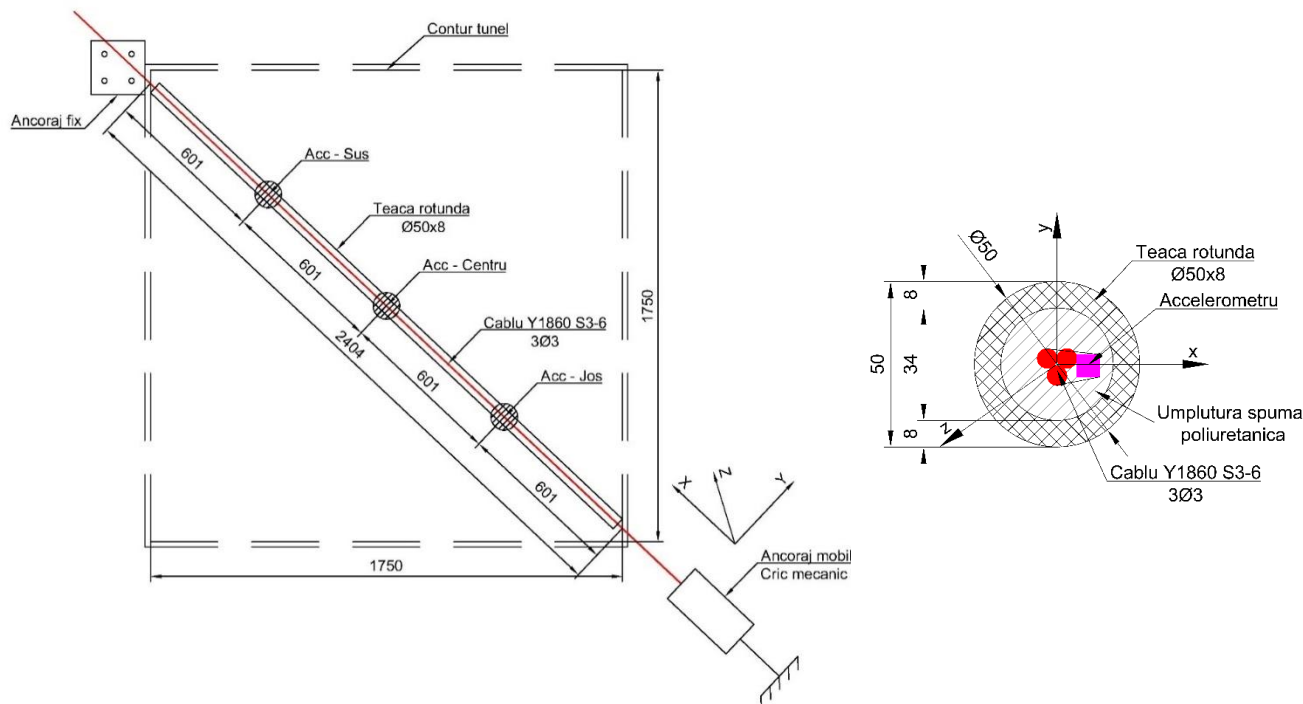


Figura III-5 – Schiță cu modelul la scară și secțiune prin cablu

Inițial au fost propuse 3 situații de încercare pentru determinarea răspunsului dinamic al cablului, cu variația tensiunii interne a acestuia de la caz la caz, respectiv cu 118.95N, 288.27N și 655.10N. Pentru fiecare situație s-au realizat mai multe încercări, cu măsurarea accelerațiilor tridimensionale în cele 3 accelerometre pe intervale de câte 60s și cu frecvența de înregistrare de 1200Hz, după cum urmează:

- Vibrații libere – măsurarea comportării sub vibrații libere, fără acțiunea vântului; s-a realizat prin-un impuls dat sub forma unei deformări impuse în mijlocul cablului de 10cm pe direcție perpendiculară pe acesta în plan vertical (direcția Y), eliberată brusc; prin aceasta s-au urmărit determinarea perioadei fundamentale de vibrație, a nivelului de amortizare și, indirect, determinarea tensiunii efective indusă
- Viteza de 0-5m/s – urmărirea comportării sub acțiunea vântului pe direcție perpendiculară pe acesta, cu variația vitezei aerului de la 0 la 5m/s
- Viteza de 5m/s – urmărirea comportării sub acțiunea vântului, cu o viteză constantă a aerului de 5m/s
- Viteza de 10m/s – urmărirea comportării sub acțiunea vântului, cu o viteză constantă a aerului de 10m/s
- Viteza de 12m/s – urmărirea comportării sub acțiunea vântului, cu o viteză constantă a aerului de 12m/s
- Viteza de 15m/s – urmărirea comportării sub acțiunea vântului, cu o viteză constantă a aerului de 15m/s
- Viteză în scădere – urmărirea comportării sub acțiunea vântului, cu viteza în descreștere de la 15m/s până la oprire

În urma realizării tuturor măsurărilor și a unei analize preliminare a rezultatelor, oscilațiile cele mai puternice s-au produs pe cablul tensionat la 655.10N la viteza vântului de 5m/s. În căutarea unei situații cât mai defavorabile, s-a decis să se mai realizeze un set de încercări pe cu viteza vântului în jurul valorii de 3m/s.

Datorită volumului mare de date, în această lucrare sunt prezentate doar câteva situații, pe intervale de maxim 10s de la fiecare măsurătoare. Rezultatele au fost prelucrate prin aplicarea de corecții ale liniei de bază și filtre tip lățime de bandă cu frecvențe între 0.1Hz și 100Hz. S-au calculat spectre Fourier și spectre de putere pentru a prezenta rezultatele și în domeniul frecvențelor.

III.2.3.2. Prezentarea rezultatelor

Ținând cont de volumul mare de date obținut în urma experimentului, continuare va fi prezentate doar scenariul considerat a fi edificator.

III.2.3.2.1. Vibrații din vânt cu viteza de 3m/s pe cablul tensionat la $F=655.10N$

Înregistrările corespunzătoare acestei analize s-au realizat pe un interval de viteză constantă a aerului de 3m/s. În continuare este prezentat un interval de 6s caracteristic pentru stabilitatea oscilațiilor.

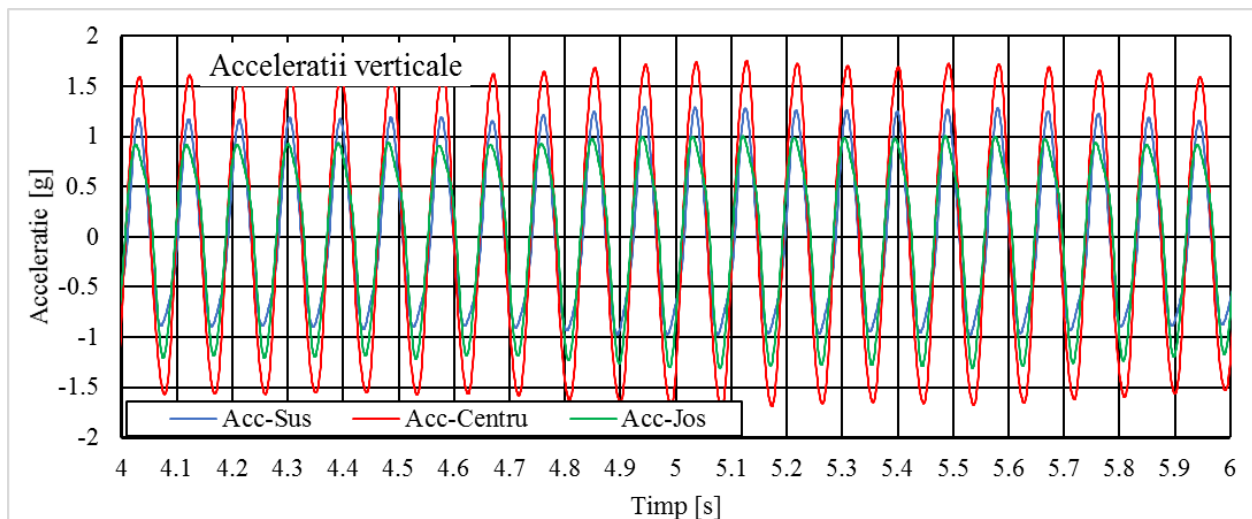


Figura III-6 – Accelații verticale în cablu pe interval de timp restrâns

Răspunsul pe verticală prezintă o mișcare ciclică, cu perioadă stabilă și corelare între toate punctele de măsurătoare. Amplitudinile vibrațiilor sunt aproximativ egale de la un ciclu la altul, în jurul valorilor de 1.6-1.7g pentru punctul din mijloc, respectiv 1.2-1.3g pentru cele din margini.

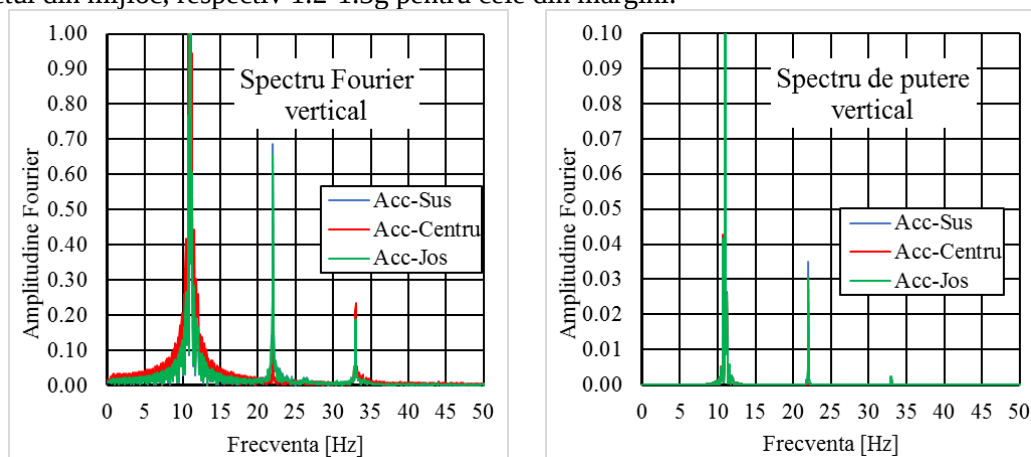


Figura III-7 – Spectre Fourier și de putere

Simularea vibrațiilor înregistrate prin metode numerice

Unul dintre obiectivele principale ale acestui studiu este folosirea datelor obținute din măsurători în vederea realizării unei metodologii de calcul suficient de precisă a vibrațiilor cablurilor, care să se poată aplica și la structuri la scară reală.

În acest sens, s-a propus defalcarea fenomenelor specifice în 2 modele numerice după cum urmează:

- Un model aeroelastic cu elemente finite în domeniul mecanicii fluidelor, cu rolul de a estima mișcarea aerului în jurul cablului, nivelul și variația în timp a forțelor ce acționează asupra acestuia sub vânt;
- Un model cu elemente finite în domeniul mecanicii structurale, cu rolul de a estima comportarea cablului sub acțiunile exterioare preluate de la modelul anterior;

III.2.3.2.2. Model aeroelastic cu elemente finite în domeniul mecanicii fluidelor

Fluxul aerului în jurul cablului și efectele produse de acesta a fost estimat într-un model bidimensional cu elemente finite. Cablul a fost modelat ca un perete staționar, de forma unui cerc cu diametrul de 5cm, iar domeniul de analiză (masa de aer) a fost considerat de formă rectangulară, astfel încât atât pe direcție orizontală în fața peretelui, cât și pe direcție verticală deasupra, respectiv dedesubt să fie spații de minim 3 diametre ale tecii cablului, iar în spatele peretelui, pe direcție orizontală minim 5 diametre, pentru a putea urmări mai bine fenomenul de desprindere a vârtejurilor.

Condițiile de contur au fost introduse după cum urmează:

- Marginea din stânga – admisie
- Marginea din dreapta – evacuare
- Marginile de sus, jos – linii de simetrie (suprafețe fără frecare)
- Cablul – perete cu frecare pe contur

Modelul matematic este alcătuit din 21350 de elemente finite plane de tip patrulater cu câte 8 noduri (4 la colțuri și 4 la mijloacele laturilor), rezultând un total de 21655 noduri. Discretizarea a fost făcută urmărind ca dimensiunile elementelor finite să fie mai mici în jurul cablului și mai mari spre margini. Au rezultat dimensiuni ale laturilor cuprinse între 0.5mm și 5cm.

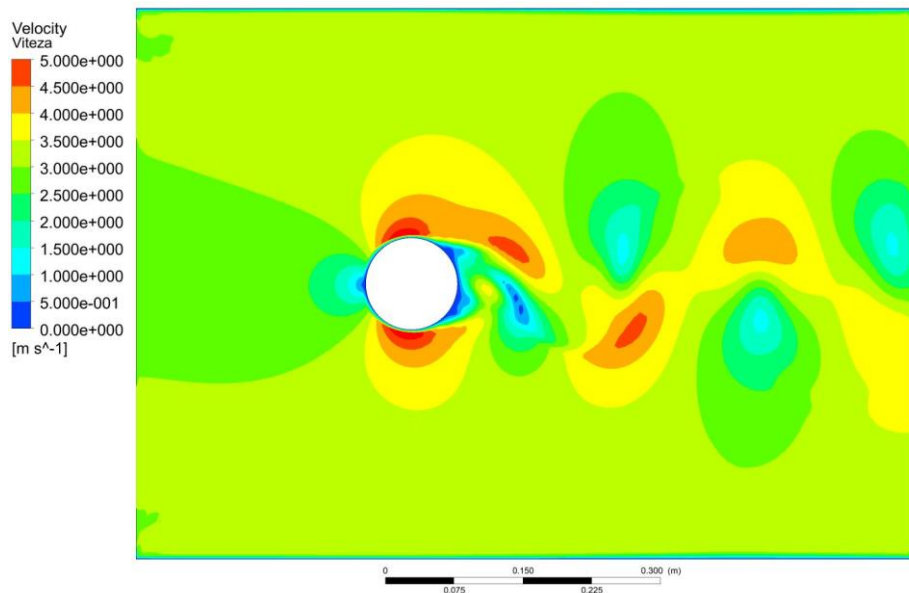


Figura III-8 - Contururi de viteză totală

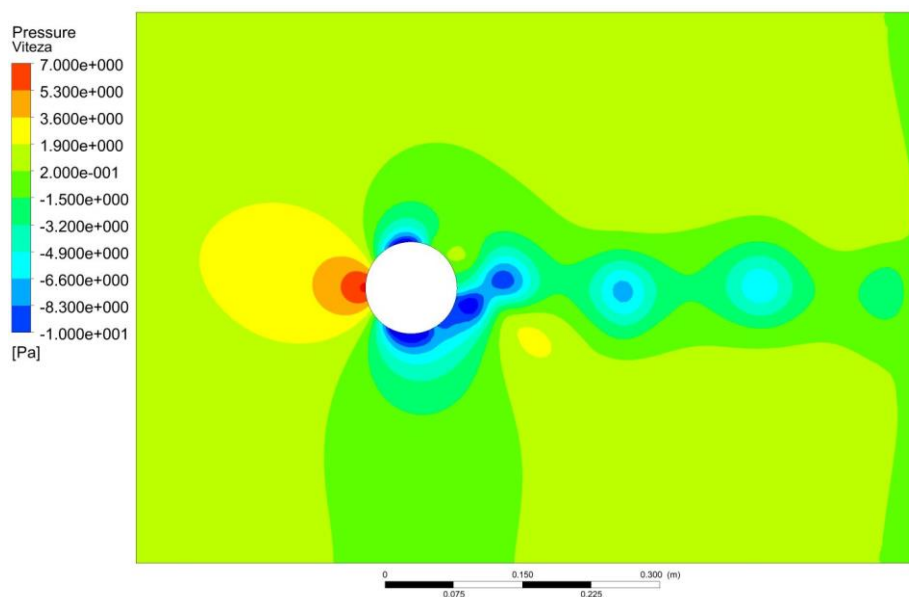


Figura III-9 – Contururi de presiune

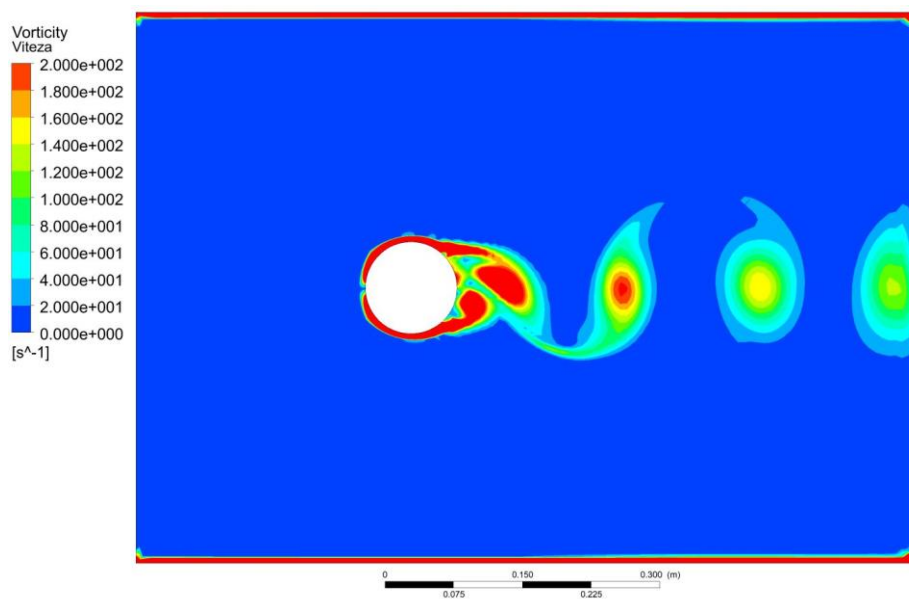


Figura III-10 – Contururi de vorticitate

Obiectivul principal al modelului a fost de a urmări efectul curgerii aerului asupra cablului. În acest sens, au fost monitorizate variațiile în timp ale forțelor aeroelastice ce acționează asupra cablului, pe direcție orizontală, respectiv verticală. În continuare vor fi prezentate grafice cu variația în timp a acestor forțe în funcție de viteza de bază a aerului.

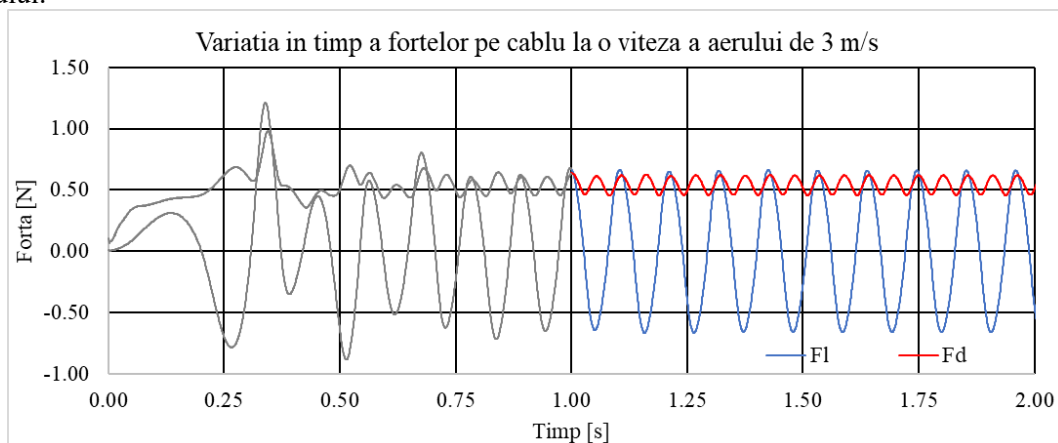


Figura III-11 – Variațiile în timp ale forțelor ce acționează pe cablu la viteza de 3 m/s

Din graficul prezentat anterior se constată că forțele induse de vânt asupra cablului au valori maxime comparabile pe cele 2 direcții de mișcare, dar variațiile lor în timp sunt diferite. Pe direcția vântului (z-z) se constată că forțele variază ciclic cu perioadă și amplitudini stabile, cu linia de referință a oscilațiilor în jurul unei valori medii, corespunzătoare unui coeficient aerodinamic de 0.8, ceea ce corespunde teoriei. Pe direcție perpendiculară vântului, se constată de asemenea că forțele variază ciclic cu perioadă și amplitudini stabile, dar cu linia de simetrie în jurul valorii de 0, ceea ce duce la amplitudini mult mai mari ale oscilațiilor. De asemenea, perioada oscilațiilor pe verticală este aproximativ dublă față de cea pe orizontală.

Practic, fenomenul se poate reduce la o forță în lungul direcției vântului constantă peste care se suprapune o forță cu variație de formă sinusoidală de amplitudine mică, iar pe direcție verticală cu o forță cu variație sinusoidală, cu amplitudine mult mai mare.

III.2.3.2.3. Model cu elemente finite în domeniul mecanicii structurale

Cablul studiat a fost modelat cu elemente de tip bară de câte 5cm lungime (49 în total), cu încastrări la capete. Pentru rigiditatea la forță axială și la încovoiere, s-au introdus caracteristici geometrice echivalente a de 3 ori cele ale unei bare circulare cu diametru de 3mm (3Ø3). De regulă, rigiditatea la încovoiere a hobanelor se poate neglija, dar în acest caz ea este semnificativă raportată la lungimea cablului. Pentru echivalarea greutateii proprii s-a multiplicat de 4.8 ori greutatea proprie a țevii de 3mm (de 3 ori pentru cele 3 sârme și 1.8 pentru teaca exterioară).

Pentru comparație s-a ales ultimul caz, cu nivelul cel mai ridicat de pretensionare, estimat la 655N. Introducerea efortului axial în modelul de calcul s-a realizat printr-o deformare specifică impusă de -1.584×10^{-4} , aplicată pe toată lungimea cablului într-o analiză neliniară cu efecte P-delta. Toate analizele ulterioare vor prelua starea de deformății și rigiditatea de la finalul acestui caz de încărcare.

O primă verificare a acurateții modelului de calcul s-a realizat comparând primele 2 moduri proprii de vibrație, după cum urmează:

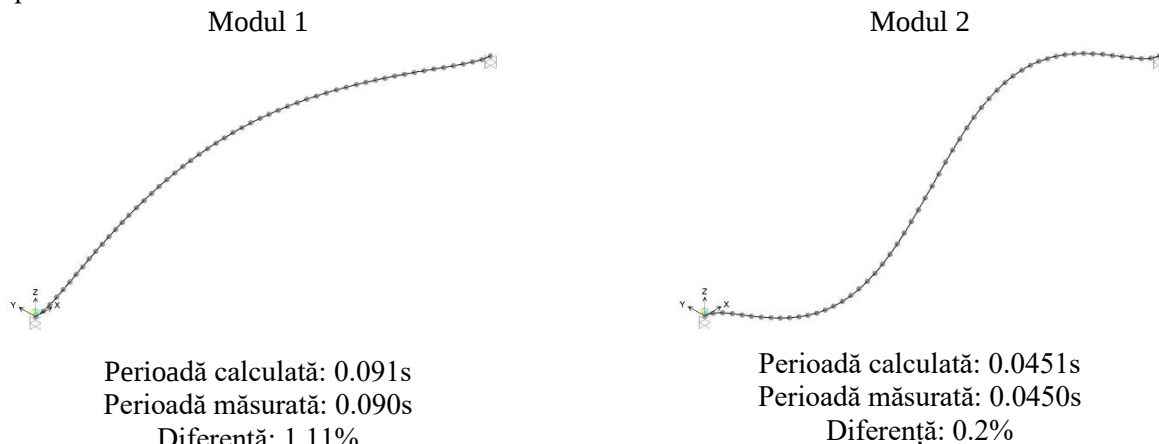


Figura III-12 – Comparații moduri proprii de vibrație

După cum se poate observa, caracteristicile dinamice ale cablului modelat față de cel măsurat sunt foarte apropiate, cu erori de sub 1.5%, suficient de mici pentru studiul de caz.

În continuare se vor compara rezultatele obținute în 3 cazuri distincte, după cum urmează:

- Comportarea cablului sub vibrații libere
- Comportarea cablului sub viteză constantă a vântului de 3m/s
- Comportarea cablului sub viteză constantă a vântului de 5m/s

Criteriul de comparație s-a considerat accelerația pe direcție y-y în mijlocul cablului (perpendicular pe direcția acestuia și pe cea a vântului). S-au realizat analize time-history neliniare cu efecte P-delta și deplasări mari, folosind o metodă explicită de integrare (HHT, $\gamma=0.5$, $\beta=0.25$, $\alpha=0$). Amortizarea internă, care are un rol important în acest gen de analize, a fost considerată după metoda Rayleigh. Coeficienții α și β aferenți metodei au fost stabiliți printr-o variație parametrică cu multiple analize, astfel încât să se obțină rezultate cât mai apropiate de cele măsurate.

III.2.4. Comparație între rezultatele înregistrate și cele obținute prin calcul

Pentru simularea răspunsului cablului sub vânt cu viteză constantă de 3m/s s-au luat forțele și variațiile lor în timp determinate pe unitatea de lungime la capitolul anterior, și s-au aplicat ca forțe uniforme distribuite pe cablu, pe toată lungimea acestuia cu excepția capetelor, unde pe aproximativ 30cm s-a considerat că pereții tunelului influențează prea mult desprinderea de vârtejuri Von-Karman, considerate a fi principală răspunzătoare pentru variațiile forțelor.

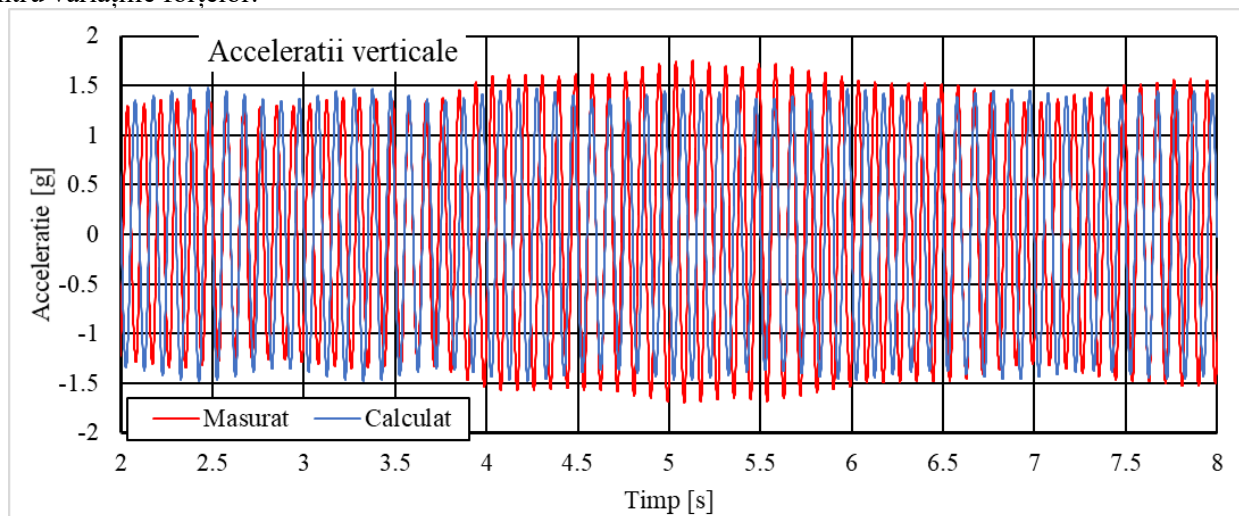


Figura III-13 – Comparație între accelerații verticale în cablu măsurate și cele calculate

Răspunsul cablului a fost calculat cu un timp de integrare de 0.001s, pentru 36s, dintre care se prezintă în graficul următor un interval de doar 4s al accelerațiilor calculate pe direcție Y în mijlocul cablului, suprapuse cu cele măsurate. A fost nevoie de aproximativ 28s pentru a ajunge oscilații stabile ale cablului, motiv pentru care sunt prezentate doar rezultatele de la finalul analizei.

Pe intervalul prezentat, accelerațiile comparate sunt aproape identice, atât ca amplitudini cât și ca legi de variație. Valorile maxime alternează între accelerațiile calculate și cele măsurate, dar cu diferențe mici de sub 5%. Modelul numeric prezintă mișcare armonică cu cicluri stabile, perioade de 0.09s și paliere de mici creșteri / descreșteri în amplitudini de aproximativ 1.00s. Accelerațiile măsurate se prezintă similar, dar cu un grad foarte mică de instabilitate, observată prin paliere neregulate de creșteri / descreșteri în amplitudini. Acestea se pot considera normale ținând cont de numărul mare de fenomene ce au loc concomitent și de influențele condițiilor de contur (vibrația pereților tunelului, ancorajele imperfecte, etc).

CAPITOLUL IV – STUDIU DE CAZ – POD HOBANAT LA VLADIVOSTOK

IV.1. Scopul și obiectivele studiului

Pentru studiul de caz se va folosi exemplul podului Russky, de la Vladivostok, acesta deținând recordul pentru cea mai mare deschidere principală a unui pod hobanat și implicit, a celor mai lungi cabluri, la momentul elaborării prezentei lucrări. Alcătuirea acestuia a fost prezentată detaliat, împreună cu sistemele de amortizare a vibrațiilor cablurilor adoptate, în capitolele anterioare (Vezi II.5.3).

Scopul principal al studiului este de a estima răspunsul dinamic al cablurilor podului cu hobane analizat cu deschidere foarte mare (1104m) în diferite situații de proiectare și de a determina influența unor sisteme de amortizare asupra acestora.

Unul din obiectivele principale este determinarea răspunsului dinamic al hobanelor în lipsa dispozitivelor de atenuare a vibrațiilor, cu scopul de a evidenția potențiale vulnerabilități în structură generate de oscilațiile amplificate necontrolat.

Un alt obiectiv este de a determina răspunsul dinamic al cablurilor în situația în care se sunt atașați amortizori vâscoși externi la baza acestora, la nivelul suprastructurii. Aceste rezultate sunt necesare pentru a compara cele două răspunsuri și a evidenția îmbunătățirile aduse de dispozitivele de amortizare.

Al treilea obiectiv este de a studia posibilitatea adoptării unei soluții noi de amortizare, prin aplicarea amortizorilor vâscoși fixați între cabluri adiacente, nu fixați de tablier cum este soluția convențională pentru acest gen de structuri. Scopul este de a determina răspunsul dinamic în această situație și de a compara cu celelalte două. Se vor realiza studii pentru a determina atât caracteristicile optime ale dispozitivelor (vâscozitate, exponentul vitezei, rigiditate elastică, etc), cât și poziția optimă a amortizorilor în lungul cablului. De asemenea se vor studia multiple scheme de aranjare a amortizorilor pentru a determina cel mai eficient scenariu.

IV.2. Abordarea de calcul

IV.2.1. Elemente structurale considerate și modelarea acestora

Pentru estimarea răspunsului prin calcule s-au folosit modele numerice alcătuite din elemente finite. Ca urmare a complexității analizelor și a volumului mare de calcule necesare, s-a decis să nu se modeleze întreaga structură, ci să se izoleze cele mai lungi 6 hobane. Acestea au fost modelate ca bare individuale dublu articulate. Fiecare hobană a fost modelată cu câte 200 elemente finite de tip bară cu câte 2 noduri la capete, fiecare cu câte 6 grade de libertate (3 translații și 3 rotații). Ancorajele lor au fost dispuse la distanțe de 20.00m la nivelul tablierului, respectiv 5.50m la nivelul pilonului. Cea mai lungă hobană considerată este de 604.00m, iar cea mai scurtă de 486.00m. Detalii suplimentare despre dispunerea acestora și caracteristicile lor geometrice se regăsesc în Figura IV-1.

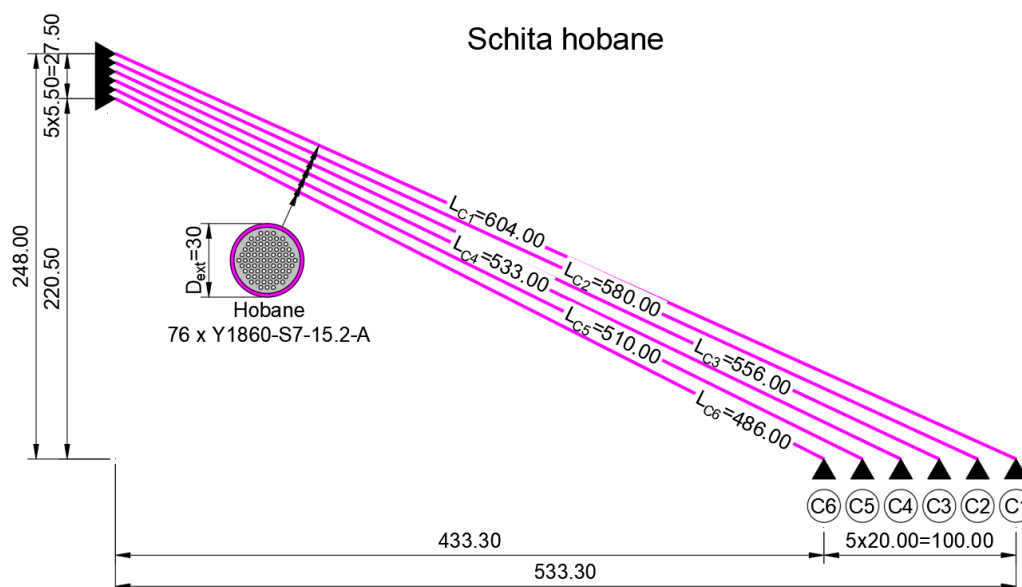


Figura IV-1 – Schiță dispunere hobane considerate

S-au considerat hobane alcătuite din câte 76 toroane paralele de tip Y1860-S7-15.2-A (SREN1993-11), introduse în teci din HDPE cu diametrul exterior de 30cm. Pentru o acuratețe mai mare a rezultatelor în special în zonele ancorajelor, s-a considerat o rigiditate la încovoiere a hobanelor, ca echivalentul a 76x7=532 sârme cu diametrul de 5mm (Felix Weber H. D., 2014) și modul de elasticitate $E_p=195\text{GPa}$ (SREN1993-11).

IV.2.2. Excitația exterioară

În baza studiilor realizate în tunelul de vânt prezentate în capitolele anterioare, excitația exterioară a fost considerată sub forma unei forțe uniform distribuite variabilă în timp ce acționează pe toată lungimea hobanelor, perpendicular pe acestea în plan vertical. Pentru simplificarea calculelor, nu s-a ținut cont de cuplajul acțiunii vântului pe cele 3 direcții ortogonale sau de variația intensității acestuia pe înălțime.

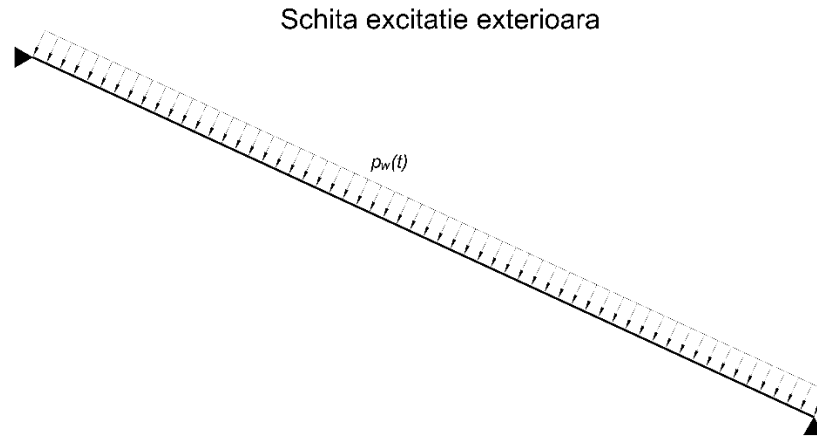


Figura IV-2 – Schiță excitație exterioară ca forță uniform distribuită

$$p_w(t) = c_l \cdot \frac{\rho \cdot v_w(t)^2}{2} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot t \cdot \pi}{T}\right) \quad (IV.1)$$

Unde: $c_l = 0.8$ coeficient de liftare (Chanson H., 2009)

$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ (SREN1991-1-4)

$T = 1.12 \text{ s}$ perioada de desprindere a vârtejurilor (II.2.3)

$v_w(t)$ – variația în timp a vitezei vântului determinată cu ajutorul aplicației dezvoltată de Universitatea Notre Dame, considerând clasa de expunere “A” conform ASCE 7-98 și o viteză de bază a vântului de 12 m/s - <http://windsim.ce.nd.edu/> (Kwon, 2006); Funcția obținută se poate vedea în graficul următor

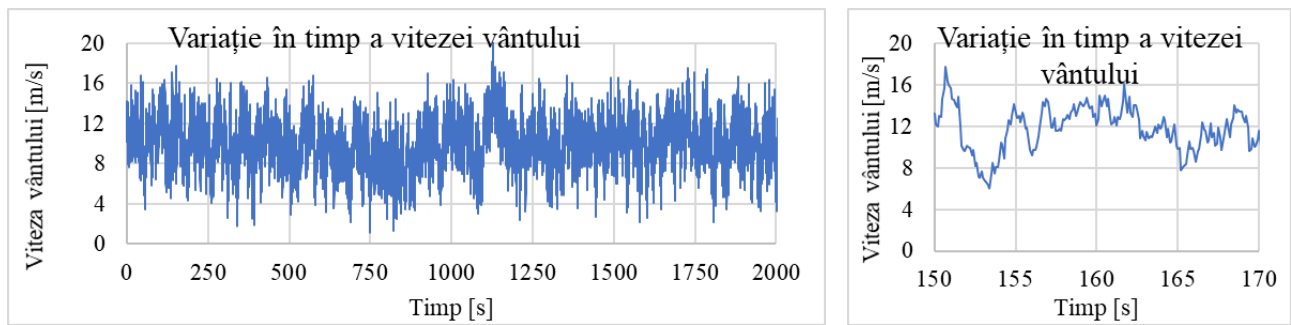


Figura IV-3 – Variația în timp a vitezei vântului pe tot intervalul considerat de 2000s, respectiv în detaliu pe un segment redus de 20s - <http://windsim.ce.nd.edu/> (Kwon, 2006)

Pe baza variației vitezei prezentată anterior, se obține următoarea variație în timp a forței ce acționează pe cabluri:

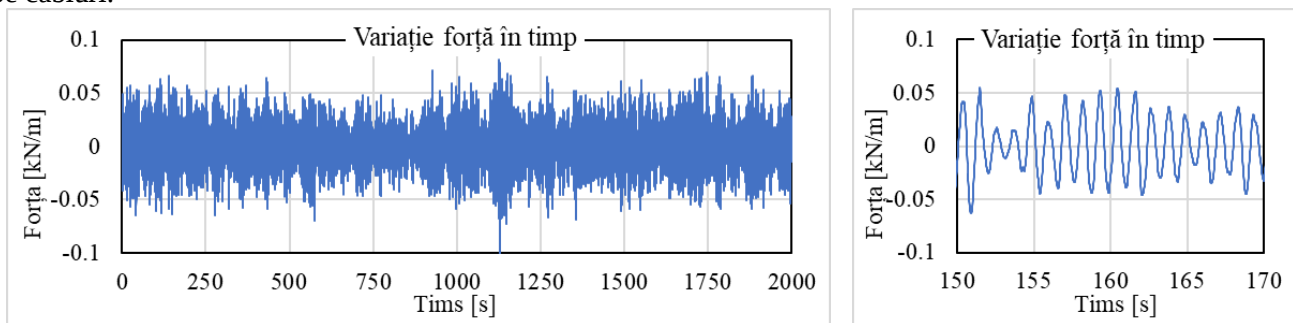


Figura IV-4 – Variația în timp a forței exterioare

IV.2.3. Dispozitive propuse pentru amortizarea vibrațiilor cablurilor și parametrii considerați

Din gama largă de dispozitive existente de atenuare a vibrațiilor în cabluri, în acest studiu s-au considerat doar amortizorii externi vâscoși. Indiferent de poziția lor, dacă sunt fixați la partea inferioară între cabluri și tablă, sau dacă sunt fixați între cabluri adiacente, formularea matematică a forței dată de dispozitiv este:

$$F(t) = K \cdot y_d(t) + C \cdot v_d(t)^\alpha \quad (IV.2)$$

Unde s-au considerat parametrii următori: rigiditatea elastică $K = 10000 \text{ kN/m}$, coeficientul vitezei $\alpha = 1$, iar coeficientul de vâscozitate c s-a realizat un studiu parametric pentru a găsi valoarea optimă, plecând de la recomandarea pentru determinarea coeficientului de vâscozitate optimă conform (Wang X. Y., 2004):

$$c_1^{opt} = \frac{1}{i \cdot \pi \cdot \frac{x_d}{L}} \cdot \sqrt{T \cdot m}, \quad (IV.3)$$

Unde: $i = \text{var } [1 \dots 5]$, x_d variază în funcție de situația analizată, $L=500\text{m}$ (lungimea medie a pachetului de cabluri considerat), $T = 6500\text{kN}$, $m = 85.509 \text{ kg/m}$

IV.3. Răspunsul dinamic al cablurilor neamortizate

Pentru a stabili o referință și a avea o bază de comparații, inițial s-a calculat răspunsul dinamic al cablurilor neamortizate. Această analiză are de asemenea rolul de a evidenția zonele critice cu potențiale vulnerabilități și posibile degradări cauzate de vibrațiile necontrolate cu amplitudini mari.

Răspunsul dinamic obținut a fost similar pentru toate cele 6 hobane, cu amplitudinile cele mai mari în cablul C6, dar cu valori similare cu cele obținute în celelalte cabluri. În vederea comparațiilor ulterioare, în continuare sunt prezentate grafice cu deplasarea în timp a punctului din mijlocul cablului C4.

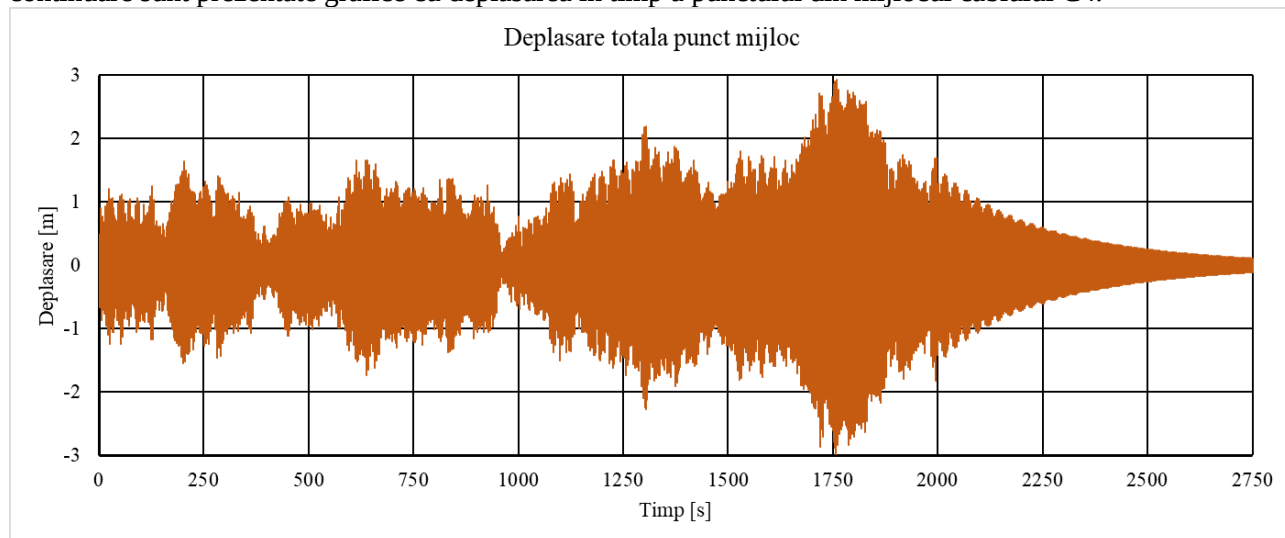


Figura IV-5 – Grafic deplasare mijloc cablu în timp

Analizând graficul anterior, se observă în primul rând apariția fenomenelor de rezonanță și de bătai. De la primele amplitudini care sunt de aproximativ 0.50m, se ajunge la amplitudini de până la 6.00m. Pe intervalul de vibrații forțate, mișcarea pare să descrie oscilații stabile în timp, dar cu amplitudini variabile. Valorile medii ale acestora sunt de aproximativ 2.55m. Se observă atingerea unor amplitudini maxime prin fenomenul de bătai la intervale de timp de aproximativ 450s, în jurul secundelor 205, 650, 1303, respectiv 1750.

Din secunda 2000, excitația exterioară se oprește, iar cablurile intră în vibrații libere, modificare care se observă și din grafic. Mișcarea devine mai stabilă cu cicluri, respectiv macrocicluri în continuă scădere. Amortizarea internă foarte mică face ca vibrațiile să nu se amortizeze total nici după intervalul de timp relativ mare analizat de 750s (peste 12 minute).

Pentru o descriere mai detaliată, în continuare sunt prezentate grafice cu oscilația cablului pe intervale restrânse de timp pe intervalul de vibrații forțate, respectiv pe cel cu vibrații libere.

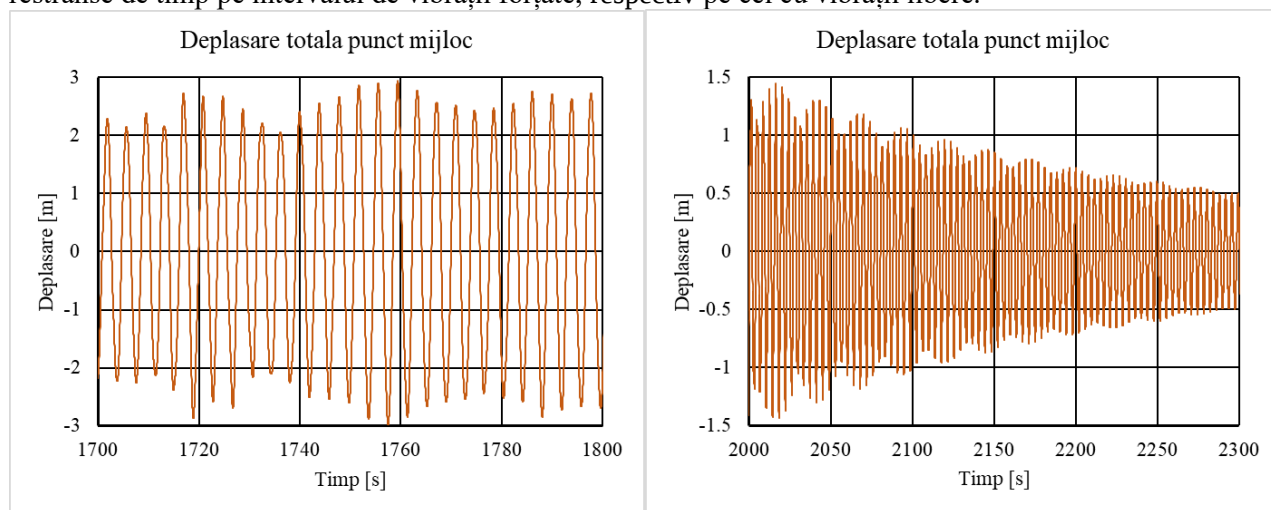


Figura IV-6 – Grafice pe intervale restrânse cu deplasarea mijlocului cablului în timp

Din graficele anterioare se evidențiază mult mai bine fenomenul de bătai, fiind observate ciclurile cu perioada de aproximativ 4.00s și unda descrisă de valorile maxime ale amplitudinilor cu perioada mai mare de aproximativ 40s. Se observă atât intervale de creștere a amplitudinilor dar și de scădere a acestora, în funcție de suprapunerea frecvențelor proprii de vibrație. Acestea sunt prezente și pe intervalul de vibrații libere, dar cu o

reducere a perioadei fenomenului de bătaie la aproximativ 25s și o reducere a amplitudinilor undei acestuia pe măsură ce se atenuează vibrațiile.

IV.4. Influența amortizorilor externi vâscoși fixați la baza tablierului asupra răspunsului dinamic al cablurilor

Întrucât cele 6 cabluri studiate au proprietăți geometrice și caracteristici dinamice similare, ținând cont și de faptul că în ipotezele studiului ele sunt izolate și lucrează decuplat, fără a se influența între ele, pentru analiză s-au ales doar 2 hobane (C2 și C3), în vederea reducerii puterii de calcul necesară. Amortizorii au fost modelați prin intermediul unor elemente finite specializate de tip amortizor vâscos. Aceste elemente au fiecare câte două noduri și șase grade de libertate, exact ca o bară simplă, dar cu comportare neliniară de tip histeretic, dependentă și de viteză, nu doar de deformare. Aceste elemente permit alegerea coeficientului de vâscozitate, a exponentului vitezei, precum și a tuturor celorlalți parametri specifici.

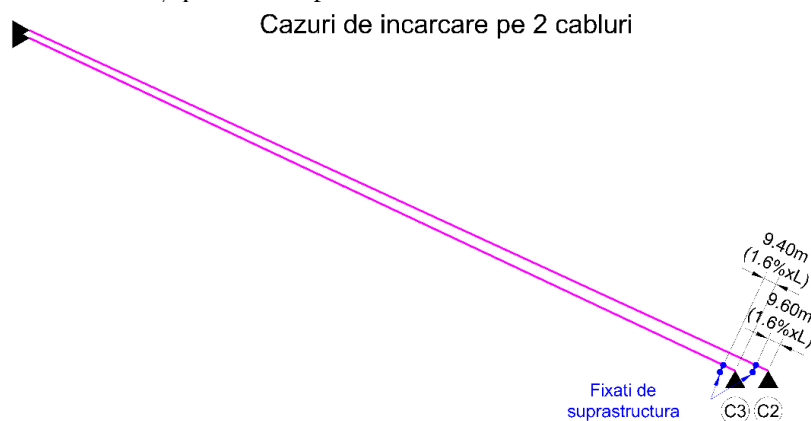


Figura IV-7 – Schemă poziționare amortizori vâscoși

S-a considerat o înălțime de aproximativ 5.50m de la planul în care se regăsesc ancorajele cablurilor până la nivelul de contact cu amortizorii, rezultând astfel lungimi în lungul cablurilor între ancoraje și amortizori de 9.40m pentru hobana C3, respectiv 9.60m pentru C2, reprezentând aproximativ 1.6% din lungimea acestora.

Parametrii amortizorilor vâscoși s-au precizat în capitolele anterioare (Capitolul II.3.4.3), cu excepția coeficientului de vâscozitate, pentru care studiul conține mai multe valori, plecând de la valoarea optimă rezultată din literatura de specialitate pentru poziția propusă și pentru modul 1 de vibrație. Valoarea acestuia s-a variat în vederea obținerii unei eficiențe cât mai ridicată a dispozitivului. În tabelul și graficul următoare sunt prezentate energia disipată de un amortizor în funcție de valoarea coeficientului de vâscozitate.

Tabel rezultate

Coeficient vâscozitate c	Procent din c optim teoretic	$F_{\max}$ amortizor	Energie disipata
[kN x s / m]	[%]	[kN]	[kJ]
0			0
40	10.00%	10	509
133.33333	33.33%	18	599
200	50.00%	21	567.5
400	100.00%	25	430
800	200%	38	230

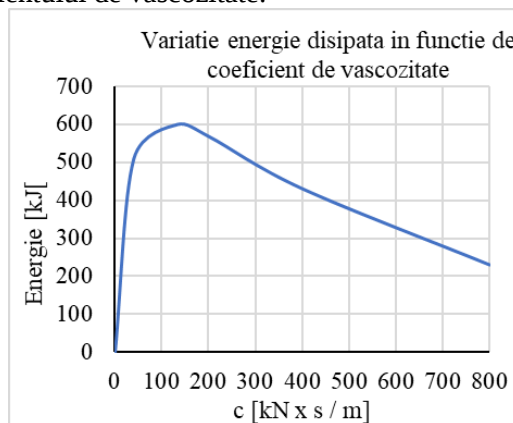


Figura IV-8 – Influența coeficientului de vâscozitate asupra răspunsului cablurilor

Forțele maxime din amortizori sau determinat în baza graficelor cu histeresis corespunzătoare acestora, similare cu cele din **Error! Reference source not found.** sau Figura IV-11. Energia disipată s-a calculat însumând lucrul mecanic realizat de amortizor pe intervalul de timp studiat.

După cum se poate observa pe baza energiei disipată, valoarea cea mai eficientă pentru coeficientul de vâscozitate a rezultat de 133.33 kN x s/m, corespunzătoare unui procent de 33% din valoarea optimă teoretică estimată pentru modul 1. Această diferență se poate explica datorită influenței mari a modurilor de vibrație superioare, în detrimentul celui fundamental. În grafic se poate observa intervalul restrâns de valori ale coeficientului de vâscozitate pentru care se obține o eficiență satisfăcătoare. Din graficul din Figura IV-8 se poate observa cum cantitatea de energie disipată pe intervalul de timp studiat crește brusc o dată cu vâscozitatea, are un palier restrâns de eficiență maximă, după care scade asimptotic la aproximativ 40% din valoarea maximă. Aceste rezultate sunt similare cu alte lucrări din literatura de specialitate (Habib Tabatabai, 2003).

În continuare se prezintă, pentru cazul cu eficiența cea mai mare, grafice cu deplasarea punctului din mijlocul cablului, respectiv cu variația forței axiale în ancoraj, prin comparație cu scenariul fără amortizori.

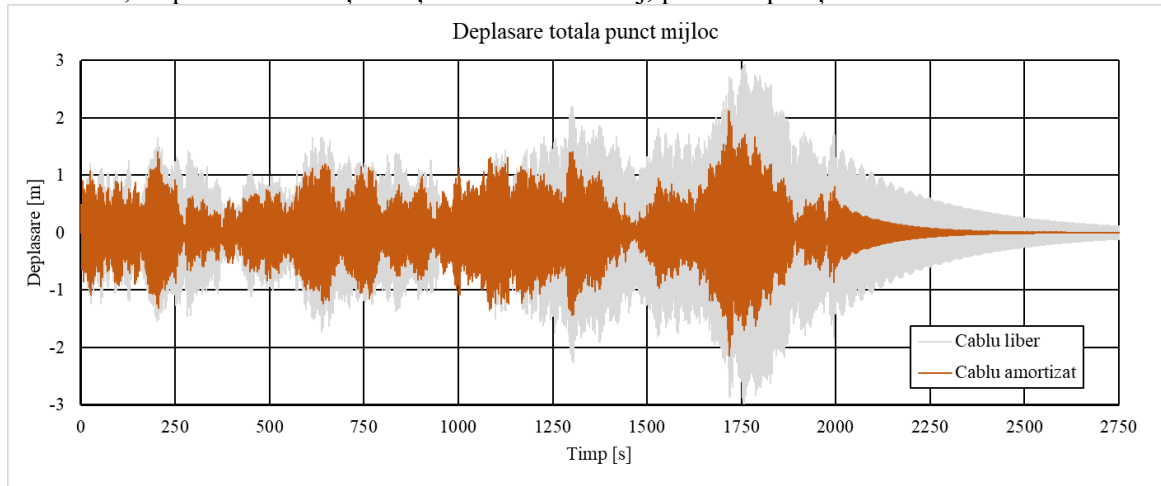


Figura IV-9 – Grafic deplasare mijloc cablu în timp

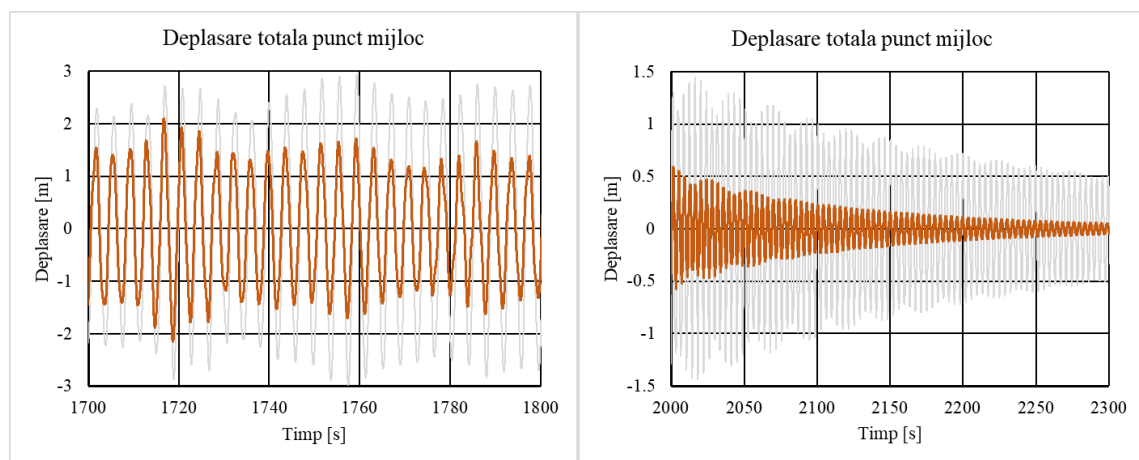


Figura IV-10 – Grafice pe intervale restrânse cu deplasarea mijlocului cablului în timp

În ceea ce privește deplasările cablului, amplitudinile oscilațiilor sunt mai mici cu aproximativ 35%. Amplitudinile maxime ale deplasărilor se situează în jurul valorii de 2.20m, cu maxima de 4.00m. În general, variația mișcării este similară cu cea în situația neamortizată, dar cu valori mai mici ale amplitudinilor. Sunt prezente în continuare fenomenele de rezonanță, respectiv de bătaii, cu cicluri și macro cicluri similare.

Sistemul de amortizare ales are o influență mică la amplitudini mai mici, dar o eficiență crescută la deplasări mai mari. Se observă anumite intervale, în special la amplitudini mici, în care variația deplasării descrisă în cele două cazuri studiate este similară, cu diferențe nesemnificative (exemplu între secunde 0 și 50, sau între 900 și 1000).

Pe intervalul de vibrații libere (după secunda 2000), după doar 250s, amplitudinile vibrațiilor sunt reduse la un nivel acceptabil, spre deosebire de cazul de bază în care acest lucru nu se întâmplă nici după 750s.

Pentru a evidenția modul de disipare al energiei de către dispozitivul de amortizare, în continuare se prezintă curba histeretică descrisă de amortizorul vâcos în scenariul cu eficiență maximă.

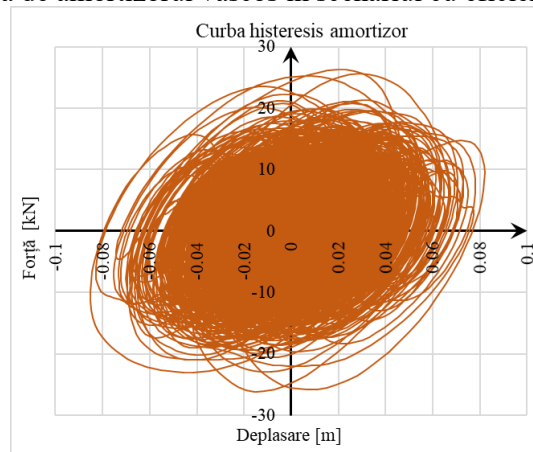


Figura IV-11 – Curbă histeretică amortizor

Cursa totală a pistonului este de aproximativ 16cm, iar forța indusă în hobană sub 30kN, ceea ce este acceptabil pentru a preveni degradări ale elementelor hobanei din efecte locale.

Din analiza oscilațiilor a rezultat o dublare a amortizării, cu un coeficient din amortizarea critică de 1.04%, respectiv o valoare a numărului Scruton de $S_c = 7.751$. Raportând la recomandările literaturii de specialitate, această valoare, deși este dublă față de cea din cazul de bază, tot nu este satisfăcătoare.

IV.5. Influența amortizorilor externi vâscoși fixați între cabluri adiacente asupra răspunsului dinamic al acestora

IV.5.1. Influența poziției amortizorului pe 2 hobane izolate

Unul din parametrii cei mai importanți care determină eficiența unui dispozitiv de amortizare extern este poziția acestuia în lungul cablului. În vederea determinării caracteristicilor optime pentru dispozitivele externe de amortizare fixate între hobane adiacente, inițial s-au considerat doar cele 2 cabluri de la capitolul anterior, care permit montarea și analiza unui singur aparat. S-a realizat un studiu parametric cu variația valorii coeficientului de vâscozitate, pornind de la valoarea de bază determinată teoretic pentru modul 1 raportat la poziția aparatului în lungul cablului, pentru care au fost considerate de asemenea 7 situații după cum urmează: la 50% din lungime, 33%, 25%, 20%, 15%, 10%, respectiv 5%.

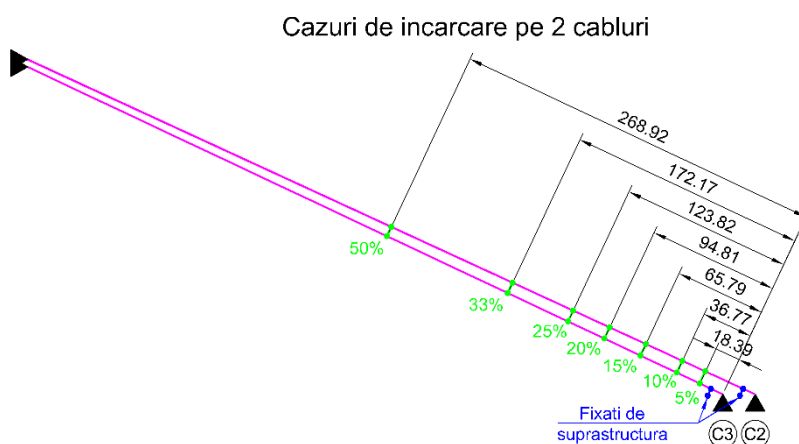


Figura IV-12 – Poziții considerate pentru amortizori vâscoși între cabluri

Aferente acestui capitol s-au realizat un număr de 49 de analize cu variația coeficientului de vâscozitate pentru toate cele 7 poziții de încărcare, în urma cărora s-au obținut următoarele grafice cu valori ale energiei disipate:

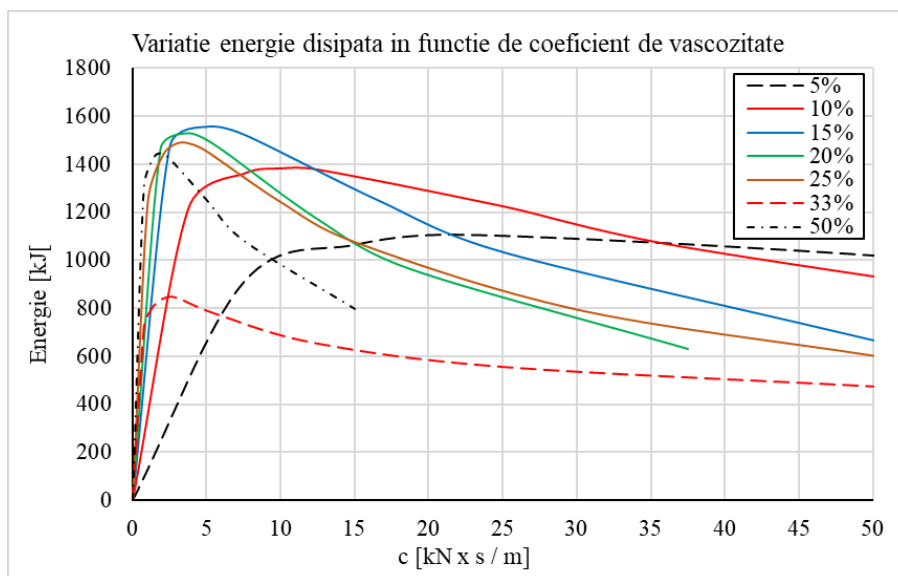


Figura IV-13 – Variația energiei disipată de amortizor în funcție de poziție și vâscozitate

Alura graficelor este similară cu cea a amortizorilor fixați de suprastructură. O dată cu creșterea distanței între ancoraj și poziția amortizorului, se mărește și plaja de valori a coeficientului de vâscozitate pentru care cantitatea de energie disipată este mare. Valori acceptabile sunt atinse pentru poziții ale amortizorului mai mari de 10% în lungul cablului, cu excepția celui la 33%, pentru care răspunsul este nesatisfăcător.

Pentru fiecare poziție a amortizorului s-au calculat procentul din amortizarea critică și numărul Scruton. Acestea sunt prezentate în tabelul următor:

Tabel 1 – Rezultate analiză pentru un singur amortizor între cabluri

Poziție amortizor în lungul cablului	Vâscozitate optimă		Procent din amortizarea critică ξ	Număr Scruton
	Coeficient de vâscozitate c [kN x s / m]	Procent din c optim teoretic [%]		
1.60% (Fixat de tablier)	133.33	33.33%	1.04%	7.751
5%	22.5	15.00%	0.81%	6.040
10%	10	13.33%	1.08%	8.008
15%	5	10.00%	1.44%	8.458
20%	3.75	10.00%	1.53%	9.144
25%	3	10.00%	1.40%	8.148
33%	2.5	10.00%	0.89%	6.630
50%	1.5	10.00%	1.44%	8.490

Conform tabelului, se constată că poziții în care amortizorului este eficient sunt cuprinse între 15%-25% din lungimea hobanei, cu procente din amortizarea critică corespunzătoare de peste 1.40%, de aproape 3 ori mai mult față de situația fără dispozitive de atenuare.

În continuare se prezintă, pentru cazul cu eficiența cea mai mare, grafice cu deplasarea punctului din mijlocul cablului, respectiv cu variația forței axiale în ancoraj prin comparație cu scenariul fără amortizori.

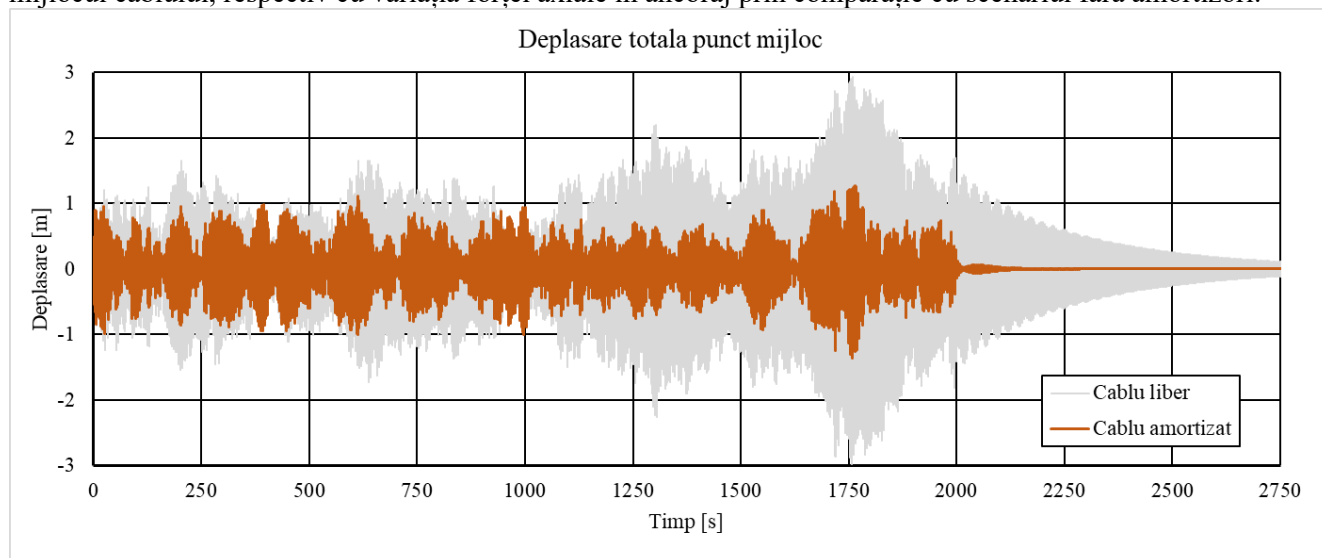


Figura IV-14 – Grafic deplasare mijloc cablu în timp

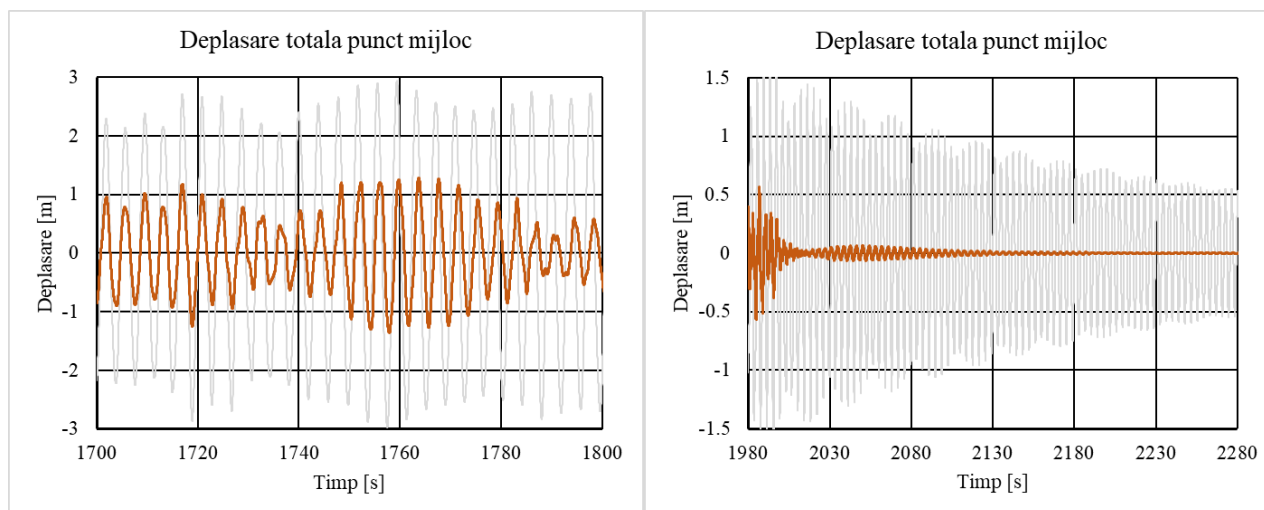


Figura IV-15 – Grafice pe intervale restrânse cu deplasarea mijlocului cablului în timp

Analizând deplasările din mijlocul cablului se pot observa reduceri ale amplitudinilor la aproximativ 35% față de cele de bază. Se observă un interval la începutul analizei de aproximativ 50s în care dispozitivul nu funcționează în parametrii. Acest lucru se datorează faptului că nu s-a produs încă un defazaj suficient între cele 2 cabluri și implicit, nu există deplasări relative semnificative între cele 2. În continuare se pot observa fenomenele de rezonanță, respectiv de bătai. Amplitudinile maxime oscilează în jurul valorii de 2.00m, iar cea maximă este de 2.60m.

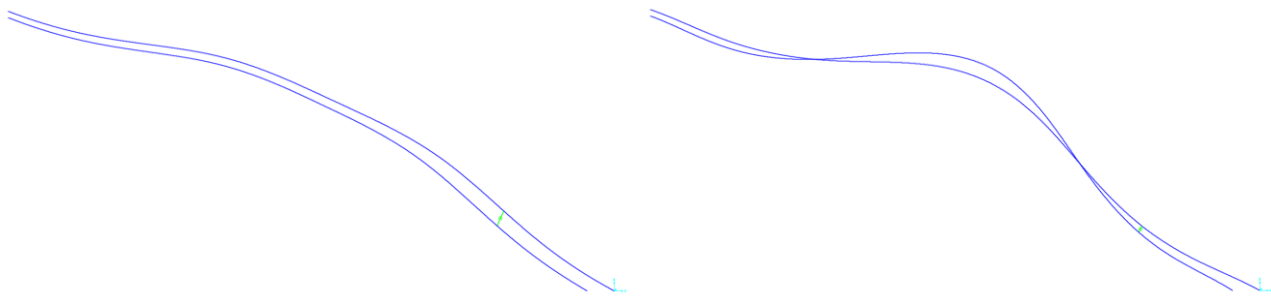


Figura IV-16 – Deformatele hobanelor la secunde 20, respectiv 1725 în situația optimă

Spre deosebire de cazul amortizorilor fixați de suprastructură care nu influențau conținutul în frecvențe al oscilațiilor ci doar diminuau amplitudinile, răspuns dinamic al cablului în acest caz diferă. Se observă un defazaj care se tot mărește o dată cu trecerea timpului, ajungând la aproximativ cinci secunde spre finalul analizei. Suprapunerile între frecvențe se realizează diferit, obținându-se astfel vârfurile de deplasare în momente diferite.

Pe intervalul de vibrații libere atenuarea acestora la un nivel nesemnificativ de amplitudini se produce mult mai rapid, pe un interval de sub 20s.

Pentru a evidenția mai exact comportarea dispozitivului și influența acestuia asupra sistemului, în continuare sunt prezentate curbe de histeresis ale amortizorilor poziționați la 5%, 20%, respectiv 50% din lungimea cablului.

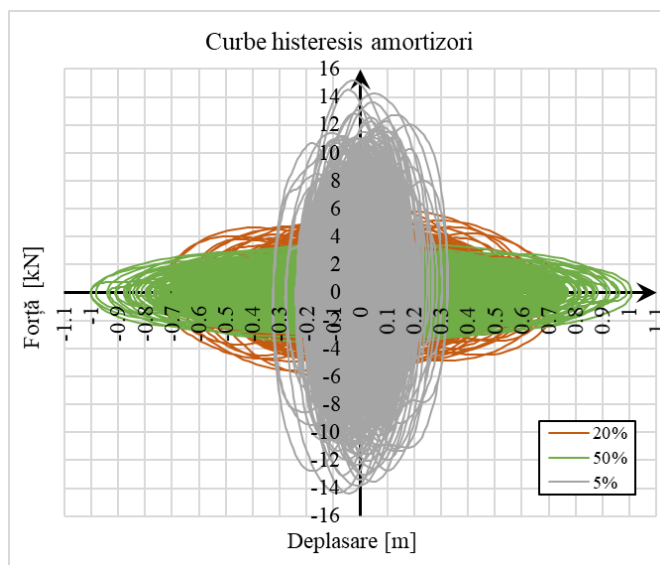


Figura IV-17 – Curbe histeresis amortizori

Se observă deplasări de ordinul a $\pm 1.00\text{m}$ pentru amortizorul din mijlocul cablului, față valorile mult mai mici de doar $\pm 0.25\text{m}$ corespunzătoare cazului în care acesta era se afla la 5% din lungime. Acest aspect poate constitui o problemă în ceea ce privește confecționarea în sine a dispozitivului. În ceea ce privește forțele generate de amortizor în cablu, situația este inversă, cu valori mai mari de până la $\pm 14\text{kN}$ în cazul dispozitivul amplasat spre capăt și de doar $\pm 3\text{kN}$ la dispozitivul din centru.

Cu toate acestea, aria descrisă de histeresisul amortizorului poziționat la 20% din cablu este mai mare, sugerând o cantitate mai mare de energie disipată și implicit, un procent de amortizare critică superior.

În baza celor expuse mai sus, se poate trage o concluzie parțială legată de soluția de fixare a amortizorilor între cabluri, care sunt mai eficienți pentru poziții în intervalul de 10%-25% din lungimea cablului. Aceasta va fi considerată pentru schemele de amplasare a amortizorilor din capitolul următor.

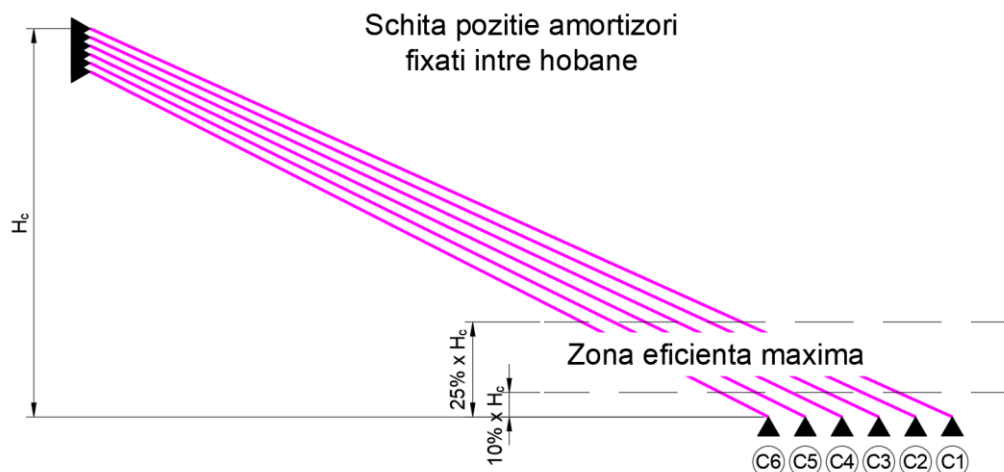


Figura IV-18 – Zonă eficiență maximă amortizor vâscos fixat între cabluri

IV.5.2. Influența pozițiilor relative între amortizori adiacenți

În această ultimă etapă a studiului de caz s-a analizat efectul de grup care apare atunci când există mai mulți amortizori și influența aranjamentelor acestora asupra răspunsului dinamic al cablurilor. În acest sens, s-au considerat 4 aranjamente pentru cele 5 dispozitive fixate între cele 6 hobane. Pentru stabilirea pozițiilor aparatelor, s-a urmărit ca acestea să se găsească în intervalul de eficiență maximă determinat la punctul anterior. Astfel s-au ales următoarele scheme de așezare:

- Schema așezare 1 – toți 5 amortizorii au fost amplasați coliniar, pe direcție perpendiculară pe bisectoarea dintre hobanele C1 și C6; pozițiile relative ale acestora în lungul cablurilor variază între 18-22% din lungime, astfel încât centrul segmentului format din aceștia să se regăsească la aproximativ 20% din înălțimea maximă a hobanelor studiate (H_c);
- Schema așezare 2 – amortizorii au fost amplasați coliniar, pe direcție orizontală; în ideea similitudinii cu schema anterioară, aceștia au fost amplasați la înălțimea de 20% din înălțimea maximă a hobanelor (H_c);
- Schema așezare 3 – amortizorii au fost amplasați individual, fiecare perpendicular pe bisectoarea dintre cele 2 hobane de care este fixat, cu centrele dispozitivelor la înălțimea de aproximativ 20% din înălțimea maximă a hobanelor (H_c);
- Schema așezare 4 – amortizorii au fost amplasați similar cu schema 3 din punct de vedere al direcției, dar dispunerea s-a făcut decalat, pe 2 planuri orizontale situate al 15%, respectiv 25% din înălțimea maximă a hobanelor (H_c);

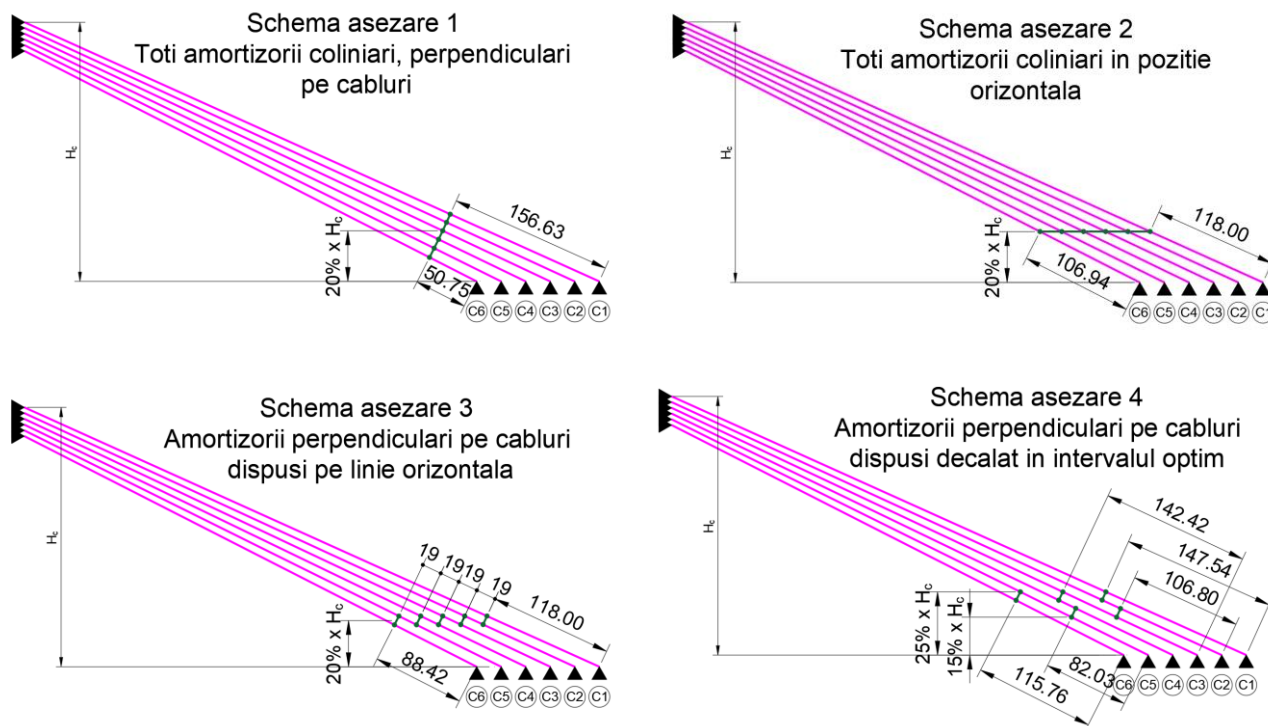


Figura IV-19 – Scheme așezare amortizori

Pentru fiecare din scenariile prezentate anterior s-au realizat mai multe analize cu scopul de a determina valoarea coeficientului de vâscozitate pentru care răspunsul dinamic al grupului de hobane este optim. S-au

urmărit găsirea valorii coeficientului de vâscozitate optim coroborat cu poziția optimă a dispozitivelor. Ca și rezultate, se prezintă doar răspunsul dinamic al hobanei C3, comportarea acestuia fiind similară cu cele ale celorlalte hobane. A fost nevoie de modelarea tuturor celor 6 cabluri pentru a simula efectul de grup. Pentru hobana respectivă, s-au determinat forța maximă generată de amortizorul dintre cablurile C3 și C2, procentul din amortizarea critică rezultat pentru tot sistemul și nu în ultimul rând, numărul Scruton rezultat pentru hobana C3. În tabelul următor sunt prezentate rezultatele tuturor acestor parametrii, corespunzători situațiilor cele mai favorabile, așa cum au reieșit din calcule.

Tabel 2 – Rezultate analiză pentru amortizorii în grup

Poziție amortizor în lungul cablului	Vâscozitate optimă		Deplasare maximă cablu	Forța maximă amortizor	Procent din amortizarea critică ξ	Scruton
	Coeficient de vâscozitate c	Procent din c optim teoretic				
	[kN x s / m]	[%]				
Schema 1	50	133.00%	1.029	22	2.11%	15.640
Schema 2	50	133.00%	1.081	17	1.92%	14.240
Schema 3	50	133.00%	1.016	24	2.16%	16.013
Schema 4	50	133.00%	1.027	18	2.11%	15.699

Prin comparație cu răspunsurile dinamice ale cablurilor de la punctul anterior, toate aranjamentele propuse au dat rezultate mai favorabile, dar cea mai eficientă aranjare a fost cea propusă în Schema 3. Rezultatele acestei analize sunt prezentate detaliat în graficele următoare:

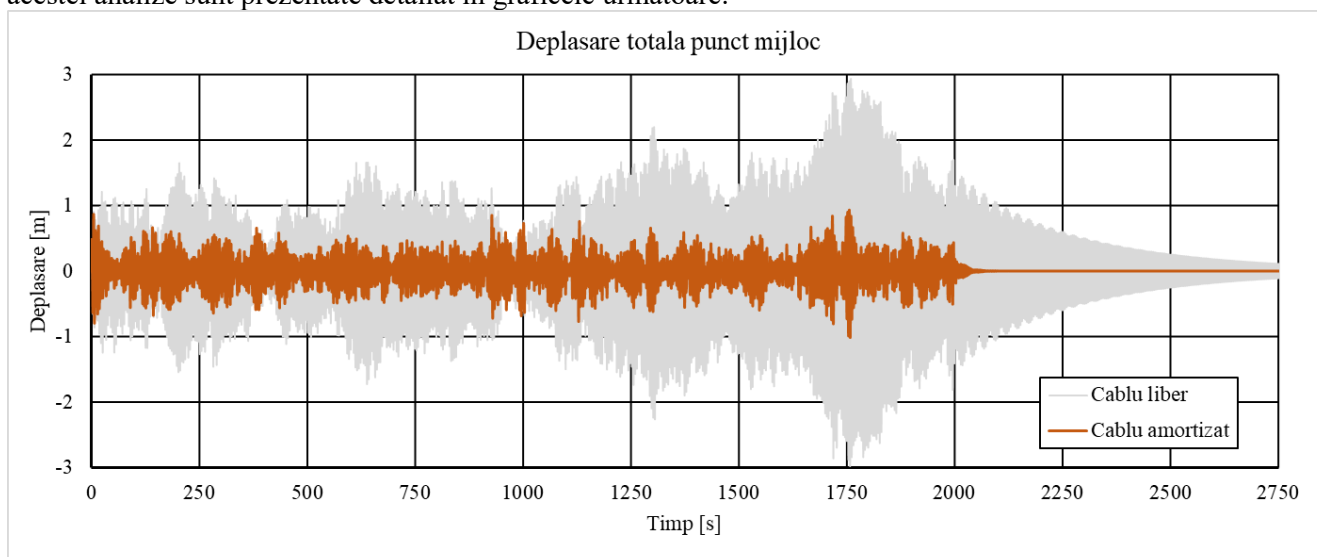


Figura IV-20 – Grafic deplasare mijloc cablu C3 în timp

Amplitudinile maxime în deplasări ale centrului cablului C3 se situează în jurul valorii de 1.20m, cu vârfuri locale în pragul valorii de 2.00m. Maximul absolut s-a obținut tot în jurul valorii de 1750s și este de 2.032m.

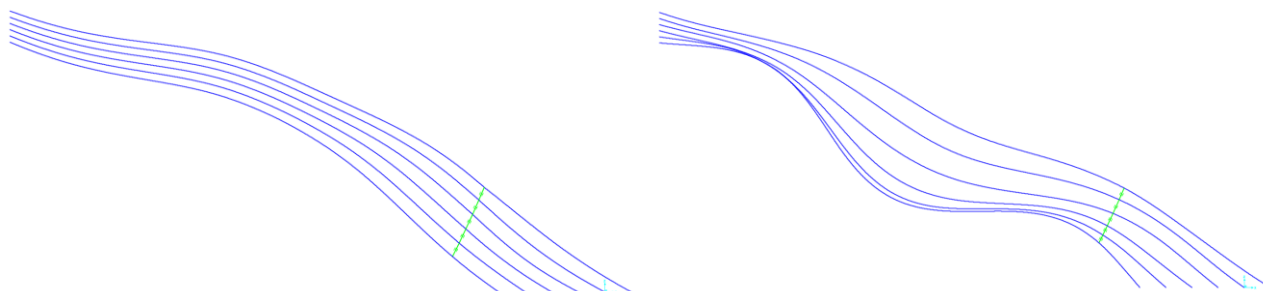


Figura IV-21 – Deformatele hobanelor la secunde 20, respectiv 1725 în situația optimă

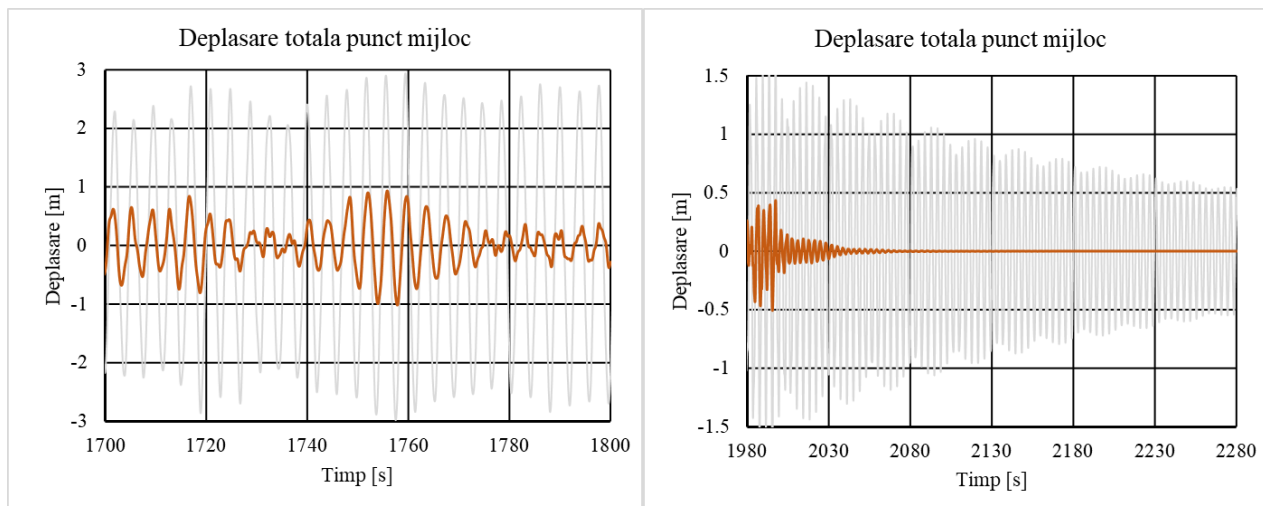


Figura IV-22 – Grafice pe interavle restrânse cu deplasarea mijlocului cablului C3 în timp

Analizând la nivel local mișcarea cablului C3 prin comparație cu situația de referință, se observă un mic defazaj între cele două cazuri, care duce la un decalaj semnificativ al mișcării și apariția unui ciclu suplimentar de oscilație la aproximativ fiecare 100s. Acest lucru ar sugera o scădere a perioadei de vibrație și implicit o creștere semnificativă a rigidității sistemului. De asemenea, comparând alura mișcării, se constată că răspunsul dinamic diferă mult față de cel inițial, având alte forme ale macro ciclurilor, deși amplitudinile maxime sunt atinse aproximativ în aceleași momente.

După oprirea excitației exterioare, este nevoie de mai puțin de 30s pentru ca amplitudinile să coboare sub pragul după care devin ne semnificative. Este important de menționat că nivelul foarte scăzut al amplitudinilor după doar 30s nu este atins în varianta fără amortizori nici măcar după scurgerea celor 750s până la oprirea analizei.

Comportarea și parametrii de funcționare ai celor 5 amortizori modelați sunt similare, motiv pentru care în continuare se va prezenta unul singur. Pentru a pune mai bine în evidență modul de funcționare al amortizorilor, în continuare este prezentată curba de histeresis a dispozitivului fixat între hobanele C3 și C2:

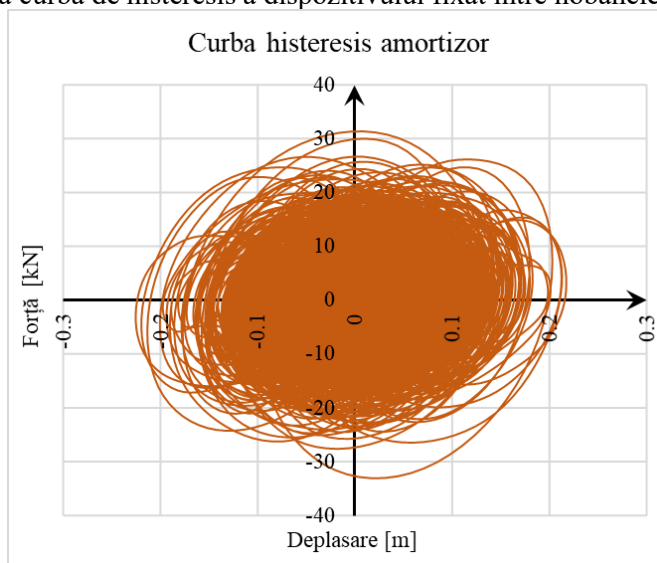


Figura IV-23 – Curbe histeresis amortizor dintre C3 și C2

Ca și în celelalte 2 cazuri, curba de histeresis este ovoidală, cu valorile ale forței în jurul valorii de $\pm 30\text{kN}$ și deplasări de până la $\pm 20\text{cm}$. Comparând cu celelalte 2 cazuri analizate, valorile forței sunt similare cu cele pentru amortizorul fixat de suprastructură, dar mult mai mari decât cele ale amortizorilor individuali fixați între hobane. În mod similar, deplasările sunt mai mari decât în cazul celor fixați de suprastructură, dar mult mai mici decât în cazul celor individuali între cabluri.

În toate schemele de aranjare studiate s-au obținut valori ale numărului Scruton de peste 10, fiind considerate acceptabile după criteriile impuse. Procentul din amortizarea critică în hobane atinge valori de aproximativ 2%, care pot fi considerate foarte bune raportat la structura studiată.

CAPITOLUL V CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU

În practica inginerescă modernă, majoritatea soluțiilor de atenuare a vibrațiilor hobanelor presupun atașarea de amortizori externi la nivelul suprastructurii, fixați între aceasta și cabluri, cu rolul de a disipa energia dată de oscilațiile cablurilor. Una dintre principalele inconveniente ale acestei soluții o reprezintă poziția dispozitivelor, care este foarte aproape de capetele hobanelor, zone în care eficiența lor este scăzută. În situația cea mai eficientă, aceștia ar trebui poziționați între suprastructură și mijlocul cablului, dar acest lucru nu se poate realiza pe considerente fizice din cauza dimensiunilor foarte mari care ar rezulta pentru dispozitive.

La nivel mondial există o gamă variată de sisteme de atenuare a vibrațiilor în cabluri, multe dintre care s-au folosit cu succes la structuri și au generat rezultate acceptabile. Probleme cel mai des întâmpinate sunt legate de costuri, care sunt destul de ridicate, a montajului care de multe ori este foarte dificil realizându-se în poziții greu accesibile și nu în ultimul rând, rezistența în timp pentru care, până în acest moment, nu sunt suficiente date pentru a putea trage concluzii, aceste dispozitive fiind relativ noi, cu vârste de circa 25 de ani.

Chiar și cu instrumentele performante de calcul aflate al dispoziția inginerilor din ziua de azi, estimarea răspunsului cablurilor în regim dinamic cu dispozitive de atenuare a vibrațiilor este foarte dificil de realizat și necesită foarte multă putere de calcul. Unul din obiectivele acestei lucrări a fost să propună un algoritm simplificat pentru determinarea răspunsului dinamic al cablurilor la excitații exterioare cauzate de intemperii.

Abordarea propusă pentru rezolvarea acestora presupune o serie de ipoteze simplificatoare, printre care defalcarea fenomenelor pe cele două ramuri ale fizicii, de mecanică a fluidelor respectiv mecanică structurală. Pentru partea de mecanică fluidelor s-au realizat modele de calcul bidimensionale cu elemente finite triunghiulare și patrulatere, specifice domeniului, din care s-a extras excitația exterioară ce ar trebui aplicată pe cablu, percum și variația acesteia în timp. Cea mai bună reprezentare a rezultat sub forma unei forțe uniform distribuite pe toată lungimea cablului și variație în timp de formă sinusoidală, cu perioade dependente de diametrul tecii exterioare. Pentru determinarea răspunsului cablului în diferitele situații s-au considerat principiile mecanicii structurale, în baza cărora s-au realizat modele bidimensionale cu elemente finite de tip bară și cu elemente finite specializate cu comportare histeretică în cazul amortizorilor.

Pentru validarea rezultatelor s-a folosit inițial această abordare la determinarea răspunsului unui cablu la scară redusă care a fost instrumentat și încercat în tunelul de vânt. După corectarea tuturor parametrilor din modelele de calcul și aplicarea principiilor teoriei similitudinii, rezultatele obținute au fost destul de apropiate de cele reale, cu erori sub 5%. Metoda de calcul propusă s-a dovedit a suficient de precisă în estimarea răspunsului dinamic al cablului studiat. Există diferențe de valori, așa cum se vede în **Error! Reference source not found.**, a tât cu valori peste cât și sub cele înregistrate, dar în general cu rezultate satisfăcătoare.

În urma prelucrării rezultatelor de la măsurătorile realizate pe cablu în tunel a rezultat o gamă largă de răspunsuri dinamice ale cablurilor. S-au înregistrat vibrații aleatoare sub formă de zgomot, vibrații stabile sub formă de oscilații cu amplitudine constantă, fenomene de rezonanță și fenomene de bătai. Prin procesarea rezultatelor s-au obținut frecvențe dominante ale mișcărilor, influența modurilor inferioare dar și a celor superioare de vibrație, respectiv mecanisme de amortizare complexe, dificil de modelat matematic.

S-a observat că răspunsul dinamic al cablurilor depinde de caracteristicile geometrice și de material, dar în mare măsură și de starea internă de tensiuni. Pentru niveluri mai mici de tensiune, aportul modurilor de vibrație proprii superioare a rezultat ca fiind mai mare, în timp ce la eforturi axiale mai ridicate modul fundamental devine preponderent în mișcare.

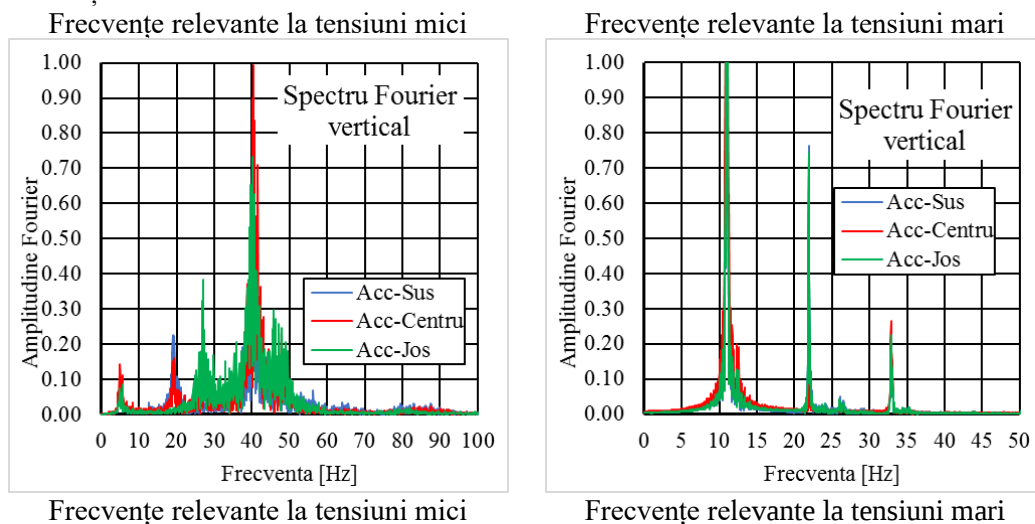


Figura V-1 – Spectre Fourier cu frecvențele dominante la tensiuni mici, respective mai mari în cablu

Amortizarea internă a cablurilor depinde și ea în mare măsură de starea internă de eforturi și de nivelul oscilațiilor. La niveluri mai mici ale acestora, pe baza răspunsurilor dinamice sub formă de vibrații libere, s-a obținut o fracțiune din amortizarea critică de 5.23%, pe când la niveluri mai ridicate aceasta a scăzut la 1.11%.

Procent din limita convențională de curgere a tensiunii internă	3.01‰	7.31‰	16.61‰
Amortizare maximă	7.16%	5.08%	2.40%
Amortizare minimă	3.30%	3.30%	0.79%
Amortizare medie	5.23%	4.19%	1.11%

Sub acțiunea vântului, s-a constatat că răspunsul dinamic al cablului nu este întotdeauna similar pe direcția de mișcare a aerului prin comparație cu cea în plan perpendicular pe aceasta. Conform înregistrărilor obținute, au fost situații în care, pe direcția vântului (Z), același cablu a vibrat sub formă de două semiunde, iar pe direcție perpendiculară pe aceasta (Y) vibra sub formă de trei semiunde. Din acest motiv, în estimarea răspunsului dinamic al cablului se recomandă o descompunere a efectelor, atunci când este posibil, pe două direcții, una în lungul direcției de mișcare a aerului și una în plan perpendicular pe aceasta.

S-a constatat, în special la tensiuni mai mici în cablu, că frecvențele oscilațiilor sunt dictate de viteza aerului, și că acestea se pot suprapune în diferite moduri cu frecvențele modurilor proprii de vibrație ale cablului. Se recomandă ca în estimarea răspunsului dinamic produs de vânt la cablurile podurilor hobanate, să se considere efectul cel mai defavorabil al direcției de bătaie a vântului. În cadrul studiului, acesta a fost considerat perpendicular pe planul format de hobane cu proiecția lor pe orizontală.

Măsurătorile au scos de asemenea în evidență efectul ancorajelor asupra răspunsului dinamic al cablurilor. Conform înregistrărilor făcute, accelerațiile dinspre capătul de jos a cablului au fost în general mai mici decât cele din partea de sus, fenomenul vizibil în special în timpul creșterii, sau descreșterii vitezei aerului. Acest lucru s-a datorat, cel mai probabil ancorajului activ de la partea de jos, care a fost mult mai flexibil decât cel pasiv de la partea de sus și a influențat vibrațiile din acea zonă. Pentru o estimare cât mai corectă a răspunsului dinamic al cablurilor podurilor hobanate trebuie să se țină cont atât de efectul local al tipurilor de ancoraje cât și efectul global al interacțiunii dintre cablu și suprastructură, respectiv piloni, întrucât acestea pot modifica în mod semnificativ răspunsul dinamic al cablului.

În abordarea propusă s-a considerat doar acțiunea vântului, dar nu trebuie omise și celelalte fenomene care pot induce excitații în cabluri cum ar fi galoparea în siaj, depunerea gheții, combinația vânt ploaie, acțiunile din trafic, etc.

Analizele numerice din cadrul ambelor domenii ale fizicii (mecanica fluidelor și mecanica structurală) s-au dovedit a fi foarte sensibile la pasul de integrare. În cazul modelului din domeniul mecanicii fluidelor, pasul s-a ales în funcție de diametrul hobanei și viteza vântului, astfel încât o particulă teoretică să traverseze prin zona adiacentă obstacolului în cel puțin 20 de pași, așa cum se recomandă și în literatura de specialitate (Chanson H. , 2009). În cazul modelului în domeniul mecanicii structurale, pasul de timp s-a ales în funcție de perioadele semnificative ale oscilației. În modelul realizat, pasul de timp s-a ales împărțind perioada corespunzătoare modului 3 de vibrație în 20 de intervale. S-a încercat astfel obținerea unui raport cât mai bun între puterea de calcul necesară și precizia rezultatelor, cu condiția ca cea din urmă să fie suficient de mare.

Amortizarea joacă de asemenea un rol foarte important pentru obținerea unor rezultate cât mai corecte. Aceasta a fost luată în calcul prin metoda Rayleigh determinând coeficienții α și β prin încercare, astfel încât rezultatele calculate să fie cât mai apropiate de cele măsurate. Cele mai bune rezultate s-au obținut calculând acești coeficienți cu formulele tradiționale, considerând un procent din amortizarea critică de 0.5% pentru frecvențele modurilor 1 și 2 de vibrație.

S-a observat că erorile obținute între valorile calculate și cele înregistrate au variat pe intervale de referință. Pe intervale de vibrații libere au ajuns până la 20%, modelul matematic având o amortizare mai ridicată la oscilații cu amplitudini mici, dar au fost sub 5% în intervalele de rezonanță maximă la oscilații stabile, cu valori calculate mai mari decât cele înregistrate în realitate.

Având în vedere cele prezentate mai sus, se poate afirma că metoda propusă de analizare separată pe cele două domenii ale fizicii, în speță mecanica fluidelor și mecanica structurală, a generat rezultate satisfăcătoare și poate fi aplicată pentru estimarea răspunsurilor cablurilor la scară reală. De asemenea, pentru determinarea răspunsului dinamic al cablurilor, se pot folosi atât integrarea directă cât și metoda suprapunerii modale. Pentru modelarea cablului se pot folosi elemente simple de tip bară, cu condiția asigurării în prealabil unei stări de tensiuni interne adecvate.

Studiul de caz a fost făcut pe podul de la Vladivostok, structură la care s-au adoptat atât amortizori vâscoși, cât și amortizori magneto-reologici pe hobanele cele mai lungi pentru a controla nivelul de vibrații în timp real. Pentru lungimi foarte mari ale hobanelor de peste 500m cum sunt cele ale Podului Russky, soluția de atenuare a vibrațiilor acestora prin amortizori vâscoși fixați de suprastructură nu mai este suficientă. Este nevoie de alternative mai performante, cum de altfel s-au și adoptat prin utilizarea amortizorilor semi-activi.

Astfel, studiul a avut două obiective principale. Primul a fost să simuleze comportarea în regim dinamic a hobanelor în scenariul în care nu ar fi existat nici un dispozitiv de atenuare a vibrațiilor, iar cel de-al doilea de a arăta influența amortizorilor asupra răspunsului cablurilor. S-au studiat trei soluții de amortizare a vibrațiilor prin intermediul amortizorilor vâscoși, după cum urmează:

- fixați între hobane și tablier la baza acestora (soluția convențională)
- fixați între hobane adiacente pe perechi de câte două
- fixați între hobane adiacente pe perechi de cinci

Pentru toate acestea s-au realizat analize parametrice cu variația vâscozității amortizorilor, a poziției acestora, respectiv a aranjării lor între cabluri.

Rezultatele studiului relevă importanța introducerii sistemelor de amortizare asupra răspunsului dinamic al cablurilor podurilor cu hobane. La deschiderea principală a podului din studiu de 1104m rezultă lungimi de hobane de chiar până la 600m, despre care s-a arătat că sunt foarte susceptibile la vibrații induse de vânt. În lipsa acestor sisteme, cablurile libere au o amortizare internă foarte mică de aproximativ 0.50-1.00% care, în combinație cu rigiditatea neglijabilă la încovoiere, duce în situații extreme la oscilații cu amplitudini foarte mari ale deplasărilor de peste 6.00m, respectiv ale tensiunii de peste 1000kN (aproximativ 15% din valoarea în stare de repaus fără trafic), rezultând factori de amplificare dinamică de peste 15.

Introducerea oricăruia din sistemele de creștere a amortizării studiate a dus la modificări semnificative în răspunsurile dinamice ale cablurilor, cu reduceri substanțiale ale amplitudinilor maxime în termeni de deplasări sau tensiuni interne, dar și reduceri ale timpilor de atenuare a oscilațiilor sub vibrații libere.

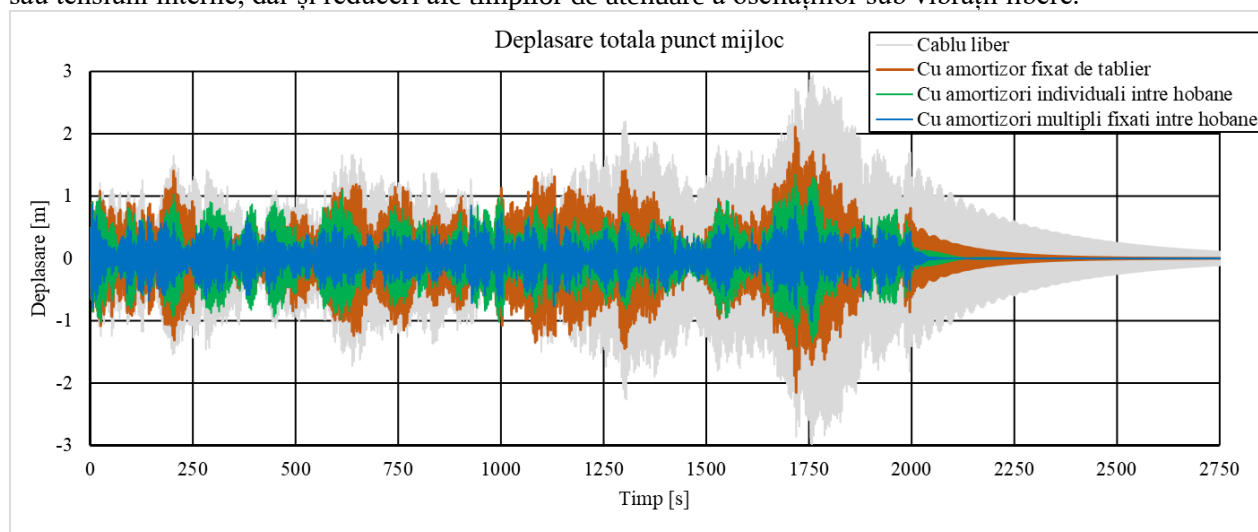


Figura V-2 – Comparație deplasare punct din mijlocul cablului în timp

Comparând rezultatele, cel mai eficient sistem a rezultat cel bazat pe instalarea de amortizori în grup. Amplitudinile maxime în termeni de deplasări au fost reduse la 1.50m, adică sub 25% față de situația de bază, iar oscilațiile sub vibrații libere durează aproximativ 30s, o fracțiune foarte mică față de intervalul de timp de peste 750s rezultat pe cablurile libere. Prin comparație, soluția mai des folosită de instalare a amortizorilor la baza hobanelor fixați de tablier, a redus amplitudinile maxime la aproximativ 4.00m, adică doar 66% față de cazul de referință, iar timpul de atenuare a vibrațiilor libere a reieșit de aproximativ 300s, de 10 ori mai mare decât în soluția optimă.

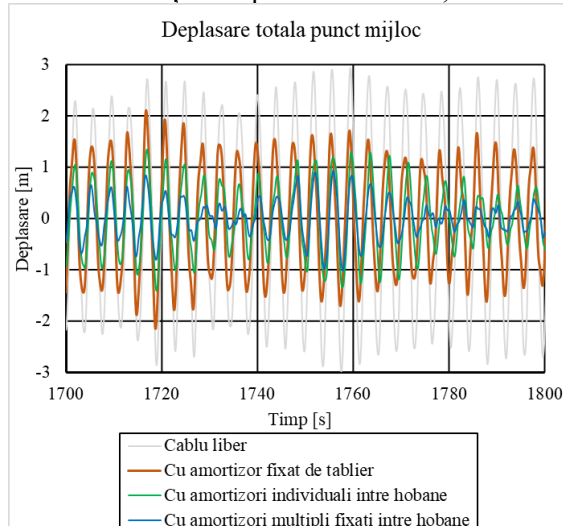


Figura V-3 – Comparație pe interval restrâns de timp a deplasărilor punctului din în mijlocul cablului

Comparând deplasările și la nivel local pe intervale restrânse de timp, se constată că se păstrează răspunsul mai favorabil în cazul amortizorilor fixați între hobane, fie singuri sau în grup, prin comparație cu cel al amortizorilor fixați de tablier. Mișcarea punctului din mijlocul cablului prezintă legi de variație similare în toate cele 4 cazuri, cu creșteri și descreșteri ale amplitudinilor pe aceleași sectoare, cu diferențe date doar de valorile amplitudinilor.

Comparând curbele de histeresis ale amortizorilor în cele 3 cazuri, se observă arii mai mari descrise de cele 2 scenarii în care dispozitivele sunt fixate între hobane, ceea ce indică o cantitate mai mare de energie disipată.

Cu toate acestea, trebuie ținut cont și de faptul că deplasările în dreptul amortizorilor montați pe perechi de câte două sunt de ordinul a $\pm 65\text{cm}$, față de $\pm 20\text{cm}$ în cazul amortizorilor în grup, respectiv de $\pm 10\text{cm}$ în cazul celor fixați de tablier. Din punct de vedere teoretic, acest aspect nu reprezintă o problemă, dar realizarea fizică a unui amortizor vâscos cu o cursă a pistonului de 1.50m și vâscozitate foarte mică s-ar putea dovedi dificilă, cu costuri foarte mari care ar face soluția nefezabilă. Comportarea dispozitivelor în celelalte 2 situații duce la parametri mult mai ușor de obținut în realitate, putând duce la rapoarte eficiență/preț mult mai mari.

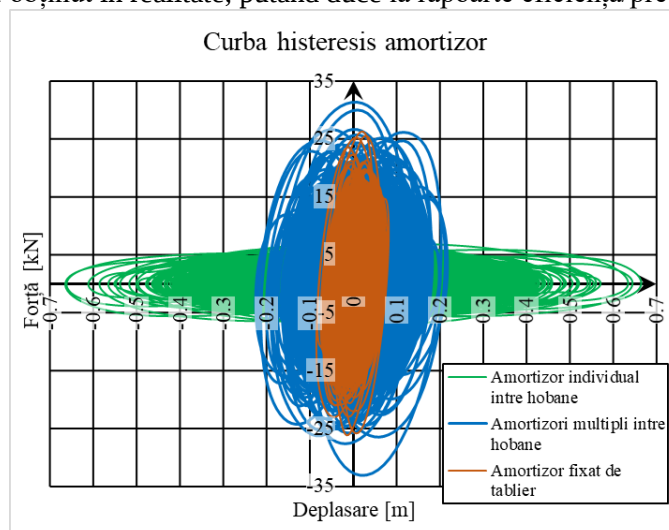


Figura V-4 – Comparării curbe histeresis amortizori

Pentru a obține răspunsuri dinamice cât mai bune, vâscozitatea amortizorilor trebuie acordată în funcție de masa hobanei, lungimea, tensiunea internă, modul propriu de vibrație vizat și poziția amortizorului în lungul cablului.

În cazul amortizorilor fixați de suprastructură, eficiența crește o dată cu depărtarea de suprastructură a punctului de fixare de cablu, iar modurile proprii considerate sunt între 1 și 5. În funcție de acestea, în literatura de specialitate (Wang X. Y., 2004) există relații pentru obținerea coeficientului de vâscozitate optim.

În cazul dispozitivelor fixate între hobane, abordarea nu mai este la fel de simplă. Amortizarea depinde aici și de perioadele oscilațiilor care influențează puternic randamentul dispozitivelor de atenuare. De exemplu, eficiența acestora este mult redusă dacă sunt poziționate în apropierea punctelor de inflexiune ale deformatelor cablurilor. Cablurile oscilează sub formă de semiunde și deci, aceste puncte se pot determina în funcție de perioadele excitațiilor exterioare care se suprapun cu cele ale perioadelor proprii de vibrație. În acest sens, este utilă o analiză a vibrațiilor în domeniul frecvențelor, motiv pentru care se prezintă în lucrare spectre Fourier și spectre de putere ale vibrațiilor în cele 4 cazuri analizate.

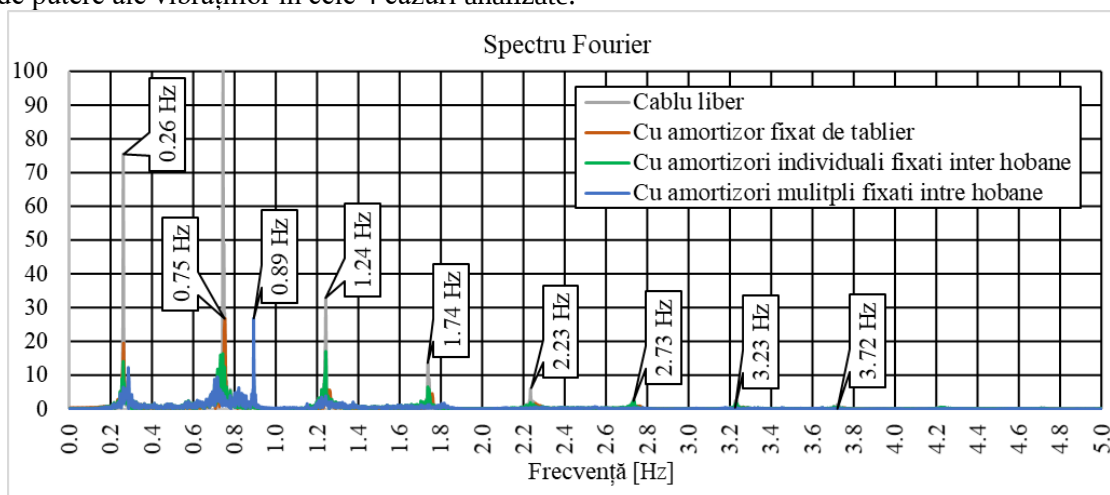


Figura V-5 – Comparatie spectre Fourier

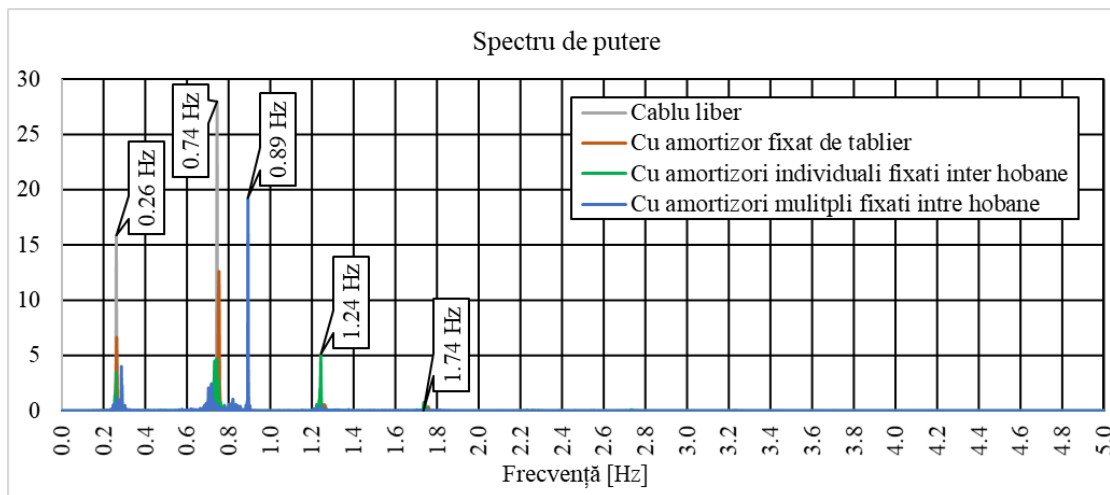


Figura V-6 – Comparație spectre de putere

Analizând Spectrul Fourier, se poate observa lipsa modului 2 de vibrație, cu frecvența în jurul valorii de 0.50Hz. Frecvența dominantă este cea a modului 3, urmată de modul 1, iar apoi de modurile superioare până la 9. În cazul spectrului de putere, se observă aceeași lipsă a modului 2, cu modul fundamental 3, dar frecvențe semnificative au reieșit doar cele corespunzătoare până la modul 5. Această lipsă a modului 2 de vibrație se datorează cel mai probabil excitației exterioare considerată, care nu a reușit să inducă vibrații pe frecvența corespunzătoare acestuia și nu înseamnă neapărat că aceste cabluri nu vor vibra niciodată după modul 2. Se poate afirma însă că există excitații exterioare ce pot induce vibrații în cabluri doar pe anumite frecvențe și nu întotdeauna pe cea fundamentală.

În scenariile cu amortizori fixați de suprastructură sau cu unul singur fixat între hobane, nu s-au constatat schimbări ale caracteristicilor dinamice față de cazul de referință, care era fără dispozitive. Totuși, în scenariul grupului de amortizori între cabluri se constată o mutare a frecvenței modului 3 de la 0.74Hz la 0.89Hz, cel mai probabil datorată interacțiunii între cabluri și a creșterii rigidității la deplasări transversale a acestora.

În căutarea poziției relative optime în lungul cablurilor a amortizorului între perechi de câte două hobane, rezultatele au fost satisfăcătoare pentru toate situațiile între 5% și 50% din lungime, cu excepția celei de la 33%, în care influența dispozitivului a fost nesemnificativă. Acest lucru se datorează cel mai probabil vibrațiilor după modul dominant 3, care prezintă 3 semiunde și 2 puncte de inflexiune, dintre care unul ce coincide cu poziția aparatului. Faptul că modul propriu de vibrație cu ponderea cea mai mare este al treilea a rezultat în urma unui cumul dat de parametrii hobanelor și ai excitației exterioare. Ținând cont de gama largă de situații și fenomene care pot induce oscilații, în cazuri similare pot rezulta ca moduri dominante și primele 2. Ținând cont de toate acestea, se recomandă să se evite zonele de inflexiune ale primelor 3 moduri principale de vibrație în alegerea poziției de montare a amortizorilor.

Deși graficele cu variația amplitudinilor oscilațiilor în termeni de deplasări sau forțe axiale în cabluri pot da foarte multe informații cu privire la răspunsul dinamic al acestora, cei mai relevanți parametri de comparație a eficienței sunt cele bazate pe procentul din amortizarea critică și pe numărul Scruton, pentru care literatura de specialitate recomandă valori de peste 10. (Sena Kumarasena N. P., 2007)

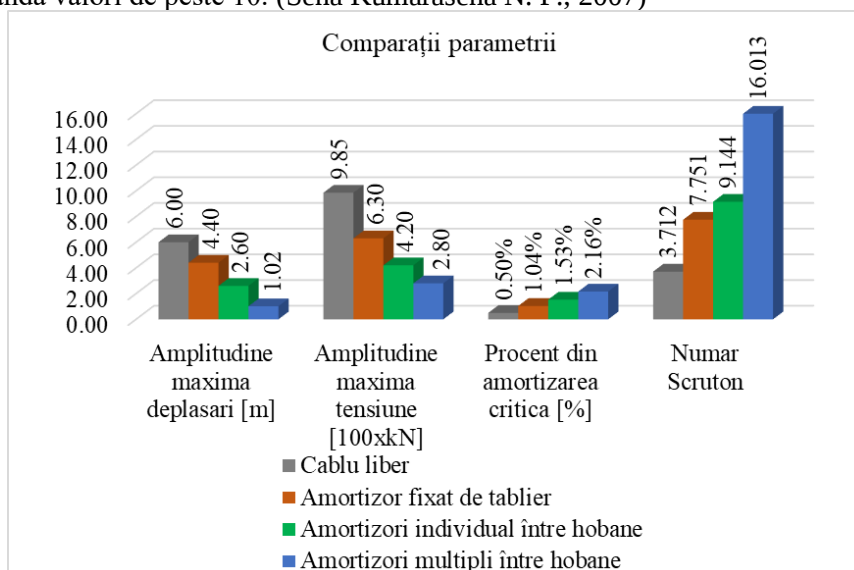


Figura V-7 – Comparații pe diverse criterii între cazuri

Introducerea sistemelor externe de amortizare pasivă a dus la o dublare a procentului din amortizarea critică în cazul dispozitivelor fixate de tablier, crescând valoarea de la 0.50% la 1.04%, respectiv la o creștere de 4 ori, până la valoarea de 2.16%, în cazul celor fixate între hobane.

În ceea ce privește valorile obținute pentru numărul Scruton, dispozitivele de atenuare a vibrațiilor au dus la creșteri semnificative față de cazul de bază, proporționale cu amortizarea. În scenariile cu amortizori fixați de suprastructură s-a obținut o valoare de doar 7.75, iar în cel al amortizorilor fixați între cabluri s-au obținut valori de 9.15 pentru cei care lucrează izolat, respectiv 16.013 pentru cei care lucrează în grup. Comparând cu prescripțiile din literatura de specialitate, doar ultimul caz ar satisface toate criteriile. Această deficiență a dispozitivelor fixate de suprastructură este confirmată și prin soluția adoptată în realitate. Pentru structura pe care se bazează studiul, s-au adoptat amortizori vâscoși pasivi doar pe hobanele mai scurte, iar pentru cele mai lungi s-au folosit amortizori magneto-reologici semiactivi, care sunt mai eficienți decât cei pasivi.

Deși rezultatele cele mai bune din studiu s-au obținut pentru cazurile grupurilor de amortizori fixați între hobane, trebuie ținut cont și de faptul că acest scenariu implică costurile cele mai ridicate atât din punct de vedere al procurării și instalării dispozitivelor, cât și din cel al întreținerii pe durata de viață a structurii.

Se poate concluziona că soluția bazată pe amortizori vâscoși fixați între hobane și suprastructură îmbunătățește substanțial răspunsul dinamic al acestora, dar pentru lungimi de 600m cum sunt cele din studiu, această variantă nu mai este suficientă. În situațiile în care această lungime este depășită, este recomandabil să se adopte soluții mai eficiente. Una din acestea poate fi chiar cea promovată în cadru lucrării, de instalare a amortizorilor pasivi între cabluri. Aceasta a arătat, cel puțin din punct de vedere teoretic, rezultate foarte bune. De asemenea, cele 2 soluții de atenuare a vibrațiilor prezentate nu se exclud reciproc, ele putând fi instalate în paralel pentru a obține răspunsuri dinamice și mai favorabile. Alegerea unei soluții de amortizare trebuie să se facă pe criterii de stabilitate la fenomenele aerodinamice, dar și pe criterii economice, pentru a nu duce la costuri exagerat de mari.

Studiul de caz a arătat că soluția de montare a unui grup de amortizori între hobane adiacente poate genera rezultate favorabile, cu condiția ca aceștia să fie acordați și amplasați corect. Cele mai bune rezultate s-au obținut când aceștia au fost montați ca poziție relativă între 10%-25% din lungimea hobanelor, cu evitarea punctelor de inflexiune corespunzătoare primelor 3 moduri proprii de vibrație ale acestora. Din cele 4 scheme de amplasare studiate, toate au dat rezultate bune, dar cel mai eficient scenariu a fost cel în care dispozitivele erau montate aproape perpendicular pe hobane la o poziție relativă corespunzător cu 20% din lungimea cablurilor. Prin comparație pe aceeași structură cu soluția convențională de amplasare a amortizorilor vâscoși la baza hobanelor, amortizarea cablurilor și numărul Scruton aferent acestora s-au dublat, arătând că este o soluție viabilă cu rezultate foarte promițătoare.

Cu condiția ca poziționarea lor în lungul cablurilor să fie în intervalul mai sus menționat, aranjarea amortizorilor este destul de flexibilă, obținându-se rezultate acceptabile în toate schemele studiate. Acest aspect este important, deoarece deschide posibilitatea aranjării dispozitivelor și pe criterii estetice.

Studiul realizat nu ia însă în calcul și factorul economic. Confecționarea și montarea, dar și mentenanța dispozitivelor în zonele foarte greu accesibile pot duce la costuri suplimentare foarte mari, motiv pentru care această variantă nu este recomandabilă decât la deschideri foarte mari ale podurilor de peste 800m, la care soluțiile convenționale nu mai dau același randament.

Rezultatele studiului nu sunt suficiente pentru a determina o formulă simplificată de calcul a coeficientului de vâscozitate optim sau a aranjamentului cel mai eficient al dispozitivelor între hobane. Acestea au fost găsite prin variații parametrice și multe cazuri de analiză pe elemente finite. Mai multe studii similare ar putea duce la o generalizare a modului de lucru și posibil la găsirea unor relații de calcul manual.

În studiu a fost considerată o singură excitație exterioară pentru toate analizele, sub forma unei forțe uniform distribuite perpendiculară pe cablu, pe toată lungimea acestuia. Având în vedere variabilitatea acțiunii vântului pe cele trei direcții în spațiu, un rol esențial îl au considerarea cuplajului între acțiunea în direcție orizontală longitudinală și variația pe înălțime a intensității, aspecte de care nu s-a ținut cont. Este posibil ca eficiența dispozitivelor să scadă sau chiar să crească pentru alte valori și variații în timp ale forțelor ce acționează pe hobane, în funcție de conținutul în frecvențe al vibrațiilor. De asemenea, au fost realizate doar analize în plan, cu neglijarea mișcărilor pe direcția perpendiculară pe planul hobanelor. Mai multe studii ar trebui realizate pentru a determina și influența vibrațiilor pe cealaltă direcție asupra răspunsului cablului.

Studiul tratează doar varianta de fixare între hobane a amortizorilor vâscoși, dar se pot lua în calcul și alte dispozitive histeretice cum sunt cele cu elastomeri, cu frecare sau chiar cele magneto-reologice. De asemenea, se poate avea în vedere și posibilitatea combinării celor 2 soluții, cea convențională cu cea a dispozitivelor între hobane, cu rezultate potențiale și mai bune.

Aceste aspecte pot constitui direcții viitoare de cercetare pe un număr mai mare de poduri cu alcătuiuri similare sau chiar diferite, prin raportare la structura analizată în lucrare.

CAPITOLUL VI BIBLIOGRAFIE

- Acheson, D. J. (1990). *Elementary Fluid Dynamics*. Clarendon Press.
- [1] adevarul.ro. (2021, Ianuarie 16). Preluat de pe https://adevarul.ro/locale/constanta:https://adevarul.ro/locale/constanta/noul-pod-agigea-mai-mare-pod-hobanat-romania-deschide-traficul-autostrada-soarelui-portul-constanta-1_5626537ef5eaafab2cdacbfef/index.html#gallery_currentImage
- [2] Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- [3] BBR Project finder. (2021, 02 06). Preluat de pe <http://pf.bbrnetwork.com/http://pf.bbrnetwork.com/m/installation10A.html>
- [4] Benato Roberto, S. D. (2017). Core laying pitch-long 3D finite element model of an AC three-core armoured submarine cable with a length of 3 metres. *Electric power systems research*, 137-143.
- [5] Caetano, E. d. (fără an). *Cable vibrations in Cable-Stayed Bridges*. IABSE.
- [6] Chanson, H. (2009). *Applied Hydrodynamics: An Introduction to Ideal and Real Fluid Flows*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [7] Chanson, H. (2009). *Applied Hydrodynamics: An Introduction to Ideal and Real Fluid Flows*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [8] Construst. (2021, 01). Preluat de pe <http://www.structuri-constructii.ro/>: <http://www.structuri-constructii.ro/studiu-de-caz-coordinare-montaj-structura-tablier-metalic-la-podul-rutier-peste-calea-ferata-otopeni>
- [9] CSI Manual. (2017). *Computers and Structures INC Analysis Reference Manual*. Computers & Structures INC.
- [10] Degeratu, M. (2015). *Analiză dimensională, similitudine și modelare*. București: Editura Academiei Oamenilor de Știință din România.
- [11] Erik A. Johnson, B. F. (2007). Semiactive damping of stay cables. *ASCE*.
- [12] Eth, Z. (2010). *Mitigation of stay cable vibrations with magnetorheological dampers*. Zurich.
- [13] Felix Weber, G. F. (2006). Guidelines for Structural Control.
- [14] Felix Weber, H. D. (2014). Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers. *Wiley Online Library*.
- [15] Ghindea, C. (2004). *Încercări destinate determinării unor caracteristici dinamice ale Construcțiilor*. București: Universitate Tehnică de Construcții București.
- [16] Habib Tabatabai, A. B. (2003). *Vibration suppression measures for stay cables*. Illinois.
- [17] Haeyoung, K. (fără an). *Mechanism of wake galloping of two circular cylinders*. Universitatea Nagoya, Japonia.
- [18] Harlow, F. H. (2004). Fluid dynamics in Group T-3 Los Alamos National Laboratory. *Journal of Computational Physics* (Elsevier).
- [19] Hikami, Y. &. (1988). Rain-wind induced vibrations of cable stayed bridges. *Wind Eng Indust Aero*, 409-418.
- [20] IPTANA. (2018). *REABILITAREA PODULUI DE LA AGIGEA, DN 39, KM 8+988*. București: COMPANIA NAȚIONALĂ DE ADMINISTRARE A INFRASTRUCTURII RUTIERE.
- [21] Jacobs. (2012, Februarie 09). Assessment of Deck Type Options. *ARUP*.
- [22] Jones, M. J. (1999). Full-scale measurements of stay cable vibration. *Tenth International Conference on Wind Engineering*. Copenhagen.
- [23] K. Kleissl, C. G. (2012). Comparison of the aerodynamics of bridge cables with helical fillets and a pattern-indented surface. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [24] Kwon, D. a. (2006). *NatHaz on-line wind simulator (NOWS) : simulation of Gaussian multivariate wind fields*. Paris: NatHaz Modeling Laboratory Report - Univ. of Notre Dame.
- [25] Main, J. A. (2002). *Modelling the vibrations of a stay cable with attached damper*. Baltimore.
- [26] Marcin Maslanka, B. S. (2007). *Experimental study of vibration control of a cable with an attached MR damper*. Varșovia.
- [27] Marius Giuclea, Tudor Sireteanu, Danut Stanicioiu, Charles W. Stammers. (2004). *Modelling of magnetorheological damper dynamic behaviour by genetic algorithms based inverse method*. București.
- [28] Matsumoto, M. (2006). *Review of Bridge Cable Vibrations in Japan,, 2006*. Kyoto: Universitatea Kyoto .
- [29] Matsumoto, M. S. (1990). Aerodynamic behavior of inclined circular cylinders - cable aerodynamics. *Wind Eng Indust Aero*, 63-72.
- [30] Maurer, S. (2020, 02 18). Maurer Structural protection systems. Munchen, Germania.
- [31] Mediafax. (2021, 02 06). Preluat de pe [mediafax.ro: https://www.mediafax.ro/social/cum-arata-parcul-moghioros-din-drumul-taberei-redeschis-pentru-public-galerie-foto-14364681](https://www.mediafax.ro/social/cum-arata-parcul-moghioros-din-drumul-taberei-redeschis-pentru-public-galerie-foto-14364681)
- [32] Mellier, E. (2014). A record breaking cable stayed bridge and future developments. *3rd International Bridge Seminar Mexico City*. Mexic.

- [33] Milano, P. (2017). An elegant hybrid solution to cross the Bosphorus strait.
- [34] Naeim F., K. J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. New York : John Wiley & Sons.
- [35] Niels J. Gimsing, C. T. (1997). *Cable Supported Bridges, concept and design*. New York: John Wiley & Sons.
- [36] Podolny Walter, S. J. (1987). *Construction and Design of Cable Stayed Bridges*. New York: Wiley Interscience.
- [37] Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- [38] Radeş, M. (2008). *Vibrații mecanice*. București: Editura Printech.
- [39] Rene Walther, B. H. (1999). *Cable stayed bridges*. Londra: Thomas Telford Publishing.
- [40] Sena Kumarasena, N. P. (2007). *Wind Induced Vibration of Stay Cables*. U.S. Department of Transportation.
- [41] Sena Kumarasena, N. P. (2007). *Wind-Induced Vibration of Cable Stays*. New York.
- [42] Shinbrot, M. (1973). *Lectures on Fluid Mechanics*. Gordon and Breach.
- [43] SREN1991-1-4. (fără an). Acțiuni ale vântului. *Eurocod 1 Partea 1-4*.
- [44] SREN1993-11. (fără an). SR EN 1993-1-11 Proiectarea structurilor cu elemente întinse.
- [45] *Structurae*. (2021, 02 06). Preluat de pe structurae.net: <https://structurae.net/en/structures/severin-bridge>
- [46] *Structurae*. (2021, 06 02). Preluat de pe structurae.net: <https://structurae.net/en/structures/norderelbe-bridge>
- [47] *Structurae*. (2021, 02 06). Preluat de pe structurae.net: <https://structurae.net/en/structures/friedrich-ebert-bridge>
- [48] *Structurae*. (2021, 02 06). Preluat de pe structurae.net: <https://structurae.net/en/structures/kohlbrand-bridge>
- [49] *Structurae*. (2021, 02 06). Preluat de pe structurae.net: <https://structurae.net/en/structures/general-rafael-urdaneta-bridge>
- [50] Thomson, M. (1973). *Theoretical Aerodynamics*. Dover Publications.
- [51] Wang X. Y., N. Y. (2004). *Optimal design of viscous dampers for multi-mode vibration control of bridge cables*. Hong Kong.
- [52] *Wikipedia*. (2013, 10 12). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics#References](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics#References)
- [53] *Wikipedia*. (2017, 04 07). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding](https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding)
- [54] *Wikipedia*. (2018, 04 05). Preluat de pe [en.wikipedia.org: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stockbridge_damper_POV.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stockbridge_damper_POV.jpg)
- [55] *Wikipedia*. (2019, 04 27). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Millau_Viaduct](https://en.wikipedia.org/wiki/Millau_Viaduct)
- [56] *Wikipedia*. (2019, 03 14). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_de_Normandie](https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_de_Normandie)
- [57] *Wikipedia*. (2020, 05 11). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/](https://en.wikipedia.org/wiki/)
- [58] *Wikipedia*. (2020, 07 05). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Kap_Shui_Mun_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Kap_Shui_Mun_Bridge)
- [59] *Wikipedia*. (2021, 02 06). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Bridge,_London](https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Bridge,_London)
- [60] *Wikipedia*. (2021, 02 06). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6msund_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6msund_Bridge)
- [61] *Wikipedia*. (2021, 02 06). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Theodor_Heuss_Bridge_\(D%C3%BCsseldorf\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Theodor_Heuss_Bridge_(D%C3%BCsseldorf))
- [62] *Wikipedia*. (2021, 02 06). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Alex_Fraser_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Alex_Fraser_Bridge)
- [63] *Wikipedia*. (2021, 02 06). Preluat de pe [ro.wikipedia.org: https://ro.wikipedia.org/wiki/Canalul_Dun%C4%83re-Marea_Neagr%C4%83](https://ro.wikipedia.org/wiki/Canalul_Dun%C4%83re-Marea_Neagr%C4%83)
- [64] *Wikipedia*. (2021, 01 14). Preluat de pe [en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Fred_Hartman_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Fred_Hartman_Bridge)
- [65] (2014). *Wind tunnel investigations of an inclined stay cable with a helical fillet*. Federal Highway Administration Research and Technology.
- [66] Wu W. J., C. C. (2007). *Experiments on reduction of cable vibration using MR dampers*. Delaware.
- [67] Xu, Y.-L. (2013). *Wind Effects on Cable-Supported Bridges*. John Wiley & Sons Singapore Pte.
- [68] Y. L. Xu, L. Y. (2003). Analytical study of wind-rain induced cable vibration: SDOF model. *Journal of Wind Engineering*.
- [69] Yunus A. Cengel, J. M.-H. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*.
- [70] Z. SAVOR, J. R. (2006). Cable vibrations at Dubrovnik bridge. *Bridge Structures, Vol. 2, No. 2*, 97-106.